



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

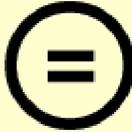
다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學博士學位論文

分布形 降雨-流出模型을 利用한
流域 流砂量 模型 開發 및 適用

Development and Application of Watershed Sediment
Transport Process Using Distributed Rainfall-Runoff Model



忠北大學校 大學院

地域建設工學科 地域環境水利工學專攻

金 鉉 植

2015 年 8 月

工學博士學位論文

分布形 降雨-流出模型을 利用한
流域 流砂量 模型 開發 및 適用

Development and Application of Watershed Sediment
Transport Process Using Distributed Rainfall-Runoff Model

指導教授 孟昇辰

地域建設工學科 地域環境水利工學專攻

金 鉉 植

이 論文을 工學博士學位 論文으로 提出함.

2015 年 8月

本 論文을 金鉉植의 工學博士學位 論文으로 認定함.

審 查 委 員 長

金 鎮 洙 

審 查 副 委 員 長

朴 鍾 和 

審 查 委 員

金 成 圭 

審 查 委 員

차 기욱 

審 查 委 員

孟 昇 辰 

忠 北 大 學 校 大 學 院

2015 年 8 月

차 례

Abstract	i
List of Tables	iii
List of Figures	viii
I. 서론	1
II. 연구사	5
2.1 분포형 강우-유출분석	5
2.2 유역 유사량 분석	10
2.3 저수지 퇴사 분석	15
III. 모형 이론	18
3.1 분포형 강우-유출모형	18
3.1.1 모형의 개요	18
3.1.2 모형의 이론	22
3.2 유역 유사량 산정 모형	29
3.2.1 모형의 개요	30
3.2.2 모형의 이론	31

3.3 저수지 퇴사 모형	38
3.3.1 모형의 개요	38
3.3.2 모형의 이론	39
IV. 대상유역 특성 및 연구방법	42
4.1 대상유역	42
4.1.1 합천다목적댐	42
4.1.2 임하다목적댐	45
4.2 기초자료 구성	47
4.2.1 지형특성 자료	48
4.2.2 토양특성 자료	56
4.2.3 강우-유출량 분석	66
4.2.4 유역 유사량 분석	73
4.2.5 저수지 퇴사 분석	80
4.2.6 정확도 평가	84
4.3 연구방법	86
V. 결과 및 고찰	89
5.1 유출량 분석 결과	89
5.1.1 합천댐 유역	89

5.1.2 임하댐 유역	96
5.2 유역 유사량 분석 결과	104
5.2.1 합천댐 유역	105
5.2.2 임하댐 유역	112
5.3 저수지 퇴사 분석 결과	120
5.3.1 유역 유사량 산정	120
5.3.2 저수지 퇴사 분석	129
VI. 결 론	137
참 고 문 헌	139
Appendix	151

Development and Application of Watershed Sediment Transport Process Using Distributed Rainfall-Runoff Model*

Kim, Hyeon Sik

Department of Agricultural and Rural Engineering

Graduate School, Chungbuk National University

Cheongju, Korea

Supervised by Professor Maeng, Seung Jin

Abstract

Recently, as the need for various types of analyses for the integrated water resources management has increased significantly, it has become evident that the development of a distributed runoff model for the analysis of the natural phenomenon is required. Korea Water Resources Corporation developed a Distributed Rainfall Runoff Model (K-DRUM) which only focuses on the rainfall runoff analysis of flooding events, and as such, it does not provide enough information to assist in the decision-making process for integrated water resources management. In this study, the developing purpose of the sediment transport process module is to provide relevant information need to make reliable and accurate decisions for dam operation, water planning and investigation. The sediment transport process module

was improved from the existing K-DRUM. In order to develop the sediment module, the characteristics of various sediment models are examined, and the best appropriate method for K-DRUM is selected. The best method should be capable of analyzing the deposition and erosion process for the watershed sediment physically according to land cover and soil characteristics, rainfall intensity, and runoff patterns. The applied equations for watershed sedimentation and transport are from the European soil erosion model (EUROSEM) and the Cell-based distributed runoff model version 3 (CDRMV3) models. Hapcheon and Imha Dam were selected as the study target watersheds and sedimentation analyses were carried out. The results between calculated and observed sediments were analyzed for consistency. As the procedure to verify sediment amounts coming into the reservoir, the Surface Water Modeling System (SMS) model was used. The sediment transport model, SED2D is to quantitatively analyze sediment distribution in a reservoir based on sediment intrusion. For water level-discharge data required in boundary conditions of the model, real-time data measured by K-water were used. Sediment depth was compared with the results of the model by collecting cross-section core samples of the reservoir. As the result of validation, the sediment depth was similar to measured value. In the future, by examining the application of K-DRUM to variable basins and phenomena minutely, the accuracy of the model will be improved. Especially, to improve K-DRUM, additional functions are needed to provide various water resources management related information.

* A thesis for the degree of Doctor in August 2015.

List of Tables

Table 3.1 Main original data and hydrological parameters	21
Table 3.2 Input and output data type	22
Table 3.3 Soil erosion detachability based on soil texture classes	34
Table 4.1 Precipitation station status at Hapcheon Dam watershed	44
Table 4.2 Water level station status at Hapcheon Dam watershed	45
Table 4.3 Precipitation station status at Imha Dam watershed	46
Table 4.4 Water level station status at Imha Dam watershed	47
Table 4.5 Roughness coefficient	56
Table 4.6 Green-Ampt infiltration coefficient	57
Table 4.7 Soil depth coefficient	58
Table 4.8 Simulation conditions	66
Table 4.9 Rating curve of water level stations	67
Table 4.10 Observed discharge and sediment at Geochang 1 station	74
Table 4.11 Observed discharge and sediment at Geochang 2 station	75
Table 4.12 Observed discharge and sediment at Yeongyang station	76
Table 4.13 Observed discharge and sediment at Dongcheon station	77
Table 4.14 Discharge-sediment relation in Hapcheon & Imha Dam watershed	78
Table 4.15 Characteristics of Hapcheon Dam	83

Table 4.16 Performance evaluation standard of numerical analysis model	86
Table 5.1 Parameters of K-DRUM model in Hapcheon Dam watershed	90
Table 5.2 Discharge simulation results (Case 1)	95
Table 5.3 Discharge simulation results (Case 2)	96
Table 5.4 Performance evaluation result of Hapcheon Dam	96
Table 5.5 Parameters of K-DRUM model in Imha Dam watershed	96
Table 5.6 Discharge simulation results (Case 3)	102
Table 5.7 Discharge simulation results (Case 4)	103
Table 5.8 Performance evaluation result of Imha Dam	103
Table 5.9 Sediment coefficient in Hapcheon Dam watershed	104
Table 5.10 Sediment coefficient in Imha Dam watershed	105
Table 5.11 Sediment simulation results (Case 1)	108
Table 5.12 Sediment simulation results (Case 2)	110
Table 5.13 Performance evaluation result of Hapcheon Dam	112
Table 5.14 Sediment simulation results (Case 3)	115
Table 5.15 Sediment simulation results (Case 4)	117
Table 5.16 Performance evaluation result of Imha Dam	119
Table 5.17 Long term discharge simulation results in Hapcheon Dam Watershed	128
Table 5.18 Performance evaluation result for long term of Hapcheon Dam	129
Table 5.19 Measured and predicted bed change from 2001 to 2012	135

Table 5.20 Comparison of the bed changes simulated in the model and
measured in the field 136

List of Figureures

Figure 3.1 Basic concept of K-DRUM model	19
Figure 3.2 Framework of K-DRUM model	20
Figure 3.3 Basic structure of K-DRUM model	23
Figure 3.4 Finite element grid division	24
Figure 3.5 Green and Ampt infiltration diagram	28
Figure 3.6 Schematic diagram of soil erosion continuous equation	32
Figure 3.7 Time and spatial difference variables	38
Figure 4.1 Digital elevation map of Hapcheon Dam watershed	49
Figure 4.2 Sub-basin map of Hapcheon Dam watershed	50
Figure 4.3 Basin slope map of Hapcheon Dam watershed	51
Figure 4.4 Digital elevation map of Imha Dam watershed	53
Figure 4.5 Sub-basin map of Imha Dam watershed	54
Figure 4.6 Basin slope map of Imha Dam watershed	55
Figure 4.7 Land use map of Hapcheon Dam watershed	59
Figure 4.8 Soil map of Hapcheon Dam watershed	60
Figure 4.9 Soil depth map of Hapcheon Dam watershed	61
Figure 4.10 Land use map of Imha Dam watershed	63
Figure 4.11 Soil map of Imha Dam watershed	64
Figure 4.12 Soil depth map of Imha Dam watershed	65

Figure 4.13 Stage-discharge relation at Geochang 1 station in 2010	68
Figure 4.14 Stage-discharge relation at Geochang 2 station in 2010	69
Figure 4.15 Stage-discharge relation at Yeongyang station in 2010	70
Figure 4.16 Stage-discharge relation at Geochang 2 station in 2011	71
Figure 4.17 Stage-discharge relation at Dongcheon station in 2011	72
Figure 4.18 Discharge-sediment relation at Yeongyang station	78
Figure 4.19 Discharge-sediment relation at Geochang 1 station	79
Figure 4.20 Discharge-sediment relation at Geochang 2 station	79
Figure 4.21 Discharge-sediment relation at Dongcheon station	80
Figure 4.22 LiDAR data and Multibeam data	81
Figure 4.23 Model grid and bathymetry	82
Figure 4.24 Sedimentation survey in Hapcheon Dam watershed	84
Figure 4.25 Study flow chart	88
Figure 5.1 Discharge simulation results at Hapcheon Dam (Case 1)	91
Figure 5.2 Discharge simulation results at Geochang 1 station (Case 1)	92
Figure 5.3 Discharge simulation results at Hapcheon Dam (Case 2)	93
Figure 5.4 Discharge simulation results at Geochang 2 station (Case 2)	94
Figure 5.5 Discharge simulation results at Imha Dam (Case 3)	98
Figure 5.6 Discharge simulation results at Yeongyang station (Case 3)	99
Figure 5.7 Discharge simulation results at Imha Dam (Case 4)	100
Figure 5.8 Discharge simulation results at Dongcheon station (Case 4)	101

Figure 5.9 Sediment simulation results at Geochang 1 station	106
Figure 5.10 Sediment simulation results at Geochang 2 station	107
Figure 5.11 Comparison between observed and simulated discharge at Geochang 1 station (Case 1)	109
Figure 5.12 Comparison between observed and simulated sediment at Geochang 1 station (Case 1)	109
Figure 5.13 Comparison between observed and simulated discharge at Geochang 2 station (Case 2)	110
Figure 5.14 Comparison between observed and simulated sediment at Geochang 2 station (Case 2)	111
Figure 5.15 Sediment simulation results at Yeongyang station	113
Figure 5.16 Sediment simulation results at Dongcheon station	114
Figure 5.17 Comparison between observed and simulated discharge at Yeongyang station (Case 3)	116
Figure 5.18 Comparison between observed and simulated sediment at Yeongyang station (Case 3)	116
Figure 5.19 Comparison between observed and simulated discharge at Dongcheon station (Case 4)	118
Figure 5.20 Comparison between observed and simulated sediment at Dongcheon station (Case 4)	118
Figure 5.21 Points of inflow generation in Hapcheon Dam	121

Figure 5.22 Long term discharge simulation results at Hapcheon Dam	123
Figure 5.23 Long term discharge simulation results at Geochang 1 station	124
Figure 5.24 Long term sediment simulation results at Geochang 1 station	125
Figure 5.25 Long term discharge simulation results at Geochang 2 station	126
Figure 5.26 Long term sediment simulation results at Geochang 2 station	127
Figure 5.27 Study area in Hapcheon Dam	130
Figure 5.28 Observed and simulated discharge at boundary 1	131
Figure 5.29 Observed and simulated discharge at boundary 2	132
Figure 5.30 Observed and simulated discharge at boundary 3	133
Figure 5.31 Bed change simulation results in 2012	134

I. 서론

강수 등에 한 토양침식은 세계 도처의 자연자원관리자 또는 정부기관들이 직면하고 있는 가장 중요한 문제점 중의 하나이다. 유역에서 발생하는 토사는 하천수로를 따라 이송되면서 하천을 오염시키고 저수지를 메우는 주요 원천이 된다. 우리나라의 경우 유사 유출량은 100 ~ 200 톤/km²/yr 정도로 보고되고 있으나, 아직 체계적으로 수집되지 못하고 있다(우효섭, 2001). 미국의 경우 1970년대의 연간 침식률은 약 4조 톤으로 높은 편이었다. 1982년에는 3조 톤으로 감소되었고, 1993년에는 경작지의 감소와 침식방지 기술의 발달로 2.13조 톤으로 추정하고 있다(Ward and Elliot, 1995).

침식되는 토사는 수로상에서 부분적으로 인산과 같은 영양물질을 운반하며, 호수나 하천의 부영양화를 초래한다. 또한 흡수된 제초제는 침식토사와 함께 이동하면서 지표수의 수질을 저하시키고 있다. 또한 토양침식은 토양의 생산성을 다소 저하시킬 수 있다. 토양이 침식되면 유기물이 용탈되므로 토양 구조가 악화되어 비옥도가 떨어지게 된다. 이와 같이 토양침식으로 인해 수자원, 환경, 농업 등 여러 분야에서 문제를 발생시키고 있다.

토양침식에 영향을 미치는 주요요인은 기후, 토양, 식생 및 지형이다. 이들 중 식생과 토양 및 지형요인들은 어느 정도 조절할 수 있으나, 기후요인은 인위적으로 통제할 수 없다.

기후요인은 온도, 습도, 햇빛, 바람, 강수 등이다. 온도, 습도, 햇빛, 바람은 대부분 증발이나 증산에 따라 그 효과가 나타난다. 토양의 성질은 침투능에 영향을 미치며, 토양입자의 크기에 따라 분리나 이동도 영향을 받는다. 예를

들면, 점토입자는 모래보다 분리되기 어렵지만, 점토는 더욱 쉽게 이동한다. 식생은 침식을 줄이는데 몇 가지 주요한 영향을 준다. 빗방울의 충격으로부터 보호하며, 지표유출의 속도를 감소시키고 토양의 유실을 막아 제자리에 머물게 한다. 지형적인 요인은 경사도, 경사길이, 경사형태이다. 급경사지역의 유출은 침식현상을 더욱 촉진하며, 분리된 토사를 하류로 쉽게 이동시킬 수 있다.

토양침식량 또는 유역에서 발생하는 유사량 추정에는 하천 및 댐관리자들이 유역을 관리하기 위한 계획을 수립하는데 필수적이다. 이러한 필요성에 따라 미국에서는 1945년부터 1965년까지 20여년간 미국내 전지역에서 소형 침식조사구 현장시험을 실시하였으며, 이 결과를 통계적으로 분석하여 토양유실을 추정할 수 있는 범용 토양유실방정식(Universal Soil Loss Equation, USLE)을 개발하였다(Wischmeier and Smith, 1978). 그리고 더 나아가 침식예측을 위하여 농지관리방법이나 지형적인 조건 등을 좀더 상세하게 고려하여 컴퓨터로 응용할 수 있게 한 개정 범용 토양유실방정식이 개발되었다(Renard *et al.*, 1991). 한편 1960년대 중반이후로 과학자들은 침투능, 유출, 토사의 분리, 이동 및 퇴적 등 침식과정을 고려하여 토양유출을 추정하는 CREAMS, WEPP, EUROSEM 등 많은 프로그램을 개발해 왔다.

우리나라에서도 기후변화, 4대강 살리기 사업 등 물관리 분야의 급격한 변화에 대응하기 위해 강우, 수문, 수리, 수질 등 다양한 분야에 대한 실무 주도의 연구개발이 활발하게 진행되고 있다. 그러나 실무에서 활용중인 해외 상용기술은 국내특성 반영 및 모형 개선 등에 많은 어려움이 있다.

국내에서도 GIS, 인공위성 등을 이용한 토양 및 지형에 대한 정보구축은 유역에 대한 정확하고 상세한 각종 수문매개변수의 수집을 가능하게 하고, 이러

한 정보를 활용할 수 있는 분야에서의 관련 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히, 컴퓨터 성능의 향상뿐만 아니라 국가차원의 GIS 구축 및 정보시스템 운영, GIS 자료의 정확도 향상, GIS 소프트웨어의 기능향상은 분포형 모형에 필요한 처리능력을 충족시키는 한편 더욱 정밀한 공간자료를 더욱 쉽게 구축할 수 있게 하였다(정인균 등, 2008).

강우 정보를 공간 분포화 하는 것은 모형의 신뢰도를 향상시키는데 매우 중요하다. 특히 국지성 돌발호우를 반영 할 경우 기존의 소유역 단위 모형에서는 소유역의 면적에 비해 국지성 돌발호우의 분포면적이 작다면 호우의 국지성을 제대로 반영하기가 매우 어렵다. K-water에서 개발한 분포형 모형(K-DRUM)의 경우 격자 크기가 유역면적에 따라 다소 차이가 있지만, 1 km 이하로 격자분할을 수행하여 강우의 국지성을 최대한 반영할 수 있다. 또한 다양한 형태의 강우정보를 활용하여 공간 분포를 시킬 수 있는 기법들이 적용되어 있어 지점 관측 강우, 레이더 관측강우 및 격자단위 수치 강우예보 정보와 같이 다양한 형태의 강우정보를 활용할 수 있는 장점이 있다.

분포형 유출모형과 관련된 연구동향을 살펴보면 유역의 복잡한 지형특성이나 인위적인 영향 등을 충분히 고려할 수 있도록 물 순환적인 측면에서 접근하여 모형이 보다 복잡화되고 있다. 물리적 기반의 유역특성정보 적용과 유출 해석의 수리학적 처리는 분포형 모형을 홍수유출해석에만 적용하기보다 유역의 유사량 산정, 지하수 거동을 포함한 장기 유출해석, 수질인자를 고려한 유역 수질분석 등에 적용할 수 있도록 다양한 장점을 제공 한다. 유럽 및 일본 등에서는 분포형 모형을 이용한 유역 유사관리, 장기 수질관리를 위하여 고유의 자체개발 모형을 보유하고 있고 다양한 유역을 대상으로 적용성 검토를 통

해 기능을 지속적으로 개선하고 있다. 특히 연구자 중심의 개발을 지양하고 사용자 중심의 실무 적용을 위해 범용 사용자 편의환경(GUI)을 개발하여 보급하고 있으며, 타 분석 기능과 연계를 통해 유역 전반의 다양한 분석을 지원할 수 있도록 개발하고 있다.

국내의 경우 분포형 모형에 대한 접근이 외국에 비해 늦었으나, 최근에는 기후변화 평가, 산사태 등 유역의 사면 안전성 평가, 도심지 유출 해석 등의 분석을 위해 다양한 학계, 연구기관에서 자체 모형개발을 추진하고 있으며, 실무에 적용할 수 있도록 사용자 편의환경을 개발하는 등 지속적으로 기능을 개선하고 있다.

K-DRUM(K-water Distributed Rainfall Runoff Model) 모형은 K-water 물관리센터에서 홍수기 유출해석의 신뢰성을 높이고 차세대 물관리 기술확보를 위해 2006년부터 장기적인 계획으로 추진하여 개발된 물리적 기반의 격자 단위 분포형 강우유출모형으로 국내의 16개 다목적 댐 유역을 대상으로 홍수 유출해석을 수행한 결과 신뢰할 만한 수준의 정확도를 확보하였다.

본 연구의 목적은 K-water에서 자체개발하여 활용중인 분포형 강우-유출모형(K-DRUM)을 기반으로 댐 유역의 유사량 산정 기능을 추가로 개발하여 유역의 유사량을 산정하고 그 적용성을 검증하고자 한다. 이를 위해 합천댐과 임하댐 상류유역의 주요지점을 대상으로 실측 조사한 수위-유량 및 유량-유사량 관계곡선식을 활용하여 유출량과 유사량을 산정하고, 산정된 유사량을 경계 유입조건으로 하여 저수지에서 퇴사분포를 분석하고자 한다.

본 연구 결과로 제공되는 정보는 앞으로 실무에서 수자원 조사·계획, 다목적 댐 저수지 운영 및 관리 등 효율적인 의사결정 지원에 활용되리라 기대된다.

II. 연구사

본 연구에서는 K-DRUM 모형의 유사모듈 개발을 위하여 댐 유역에서 토양 침식과 퇴적, 그리고 이송과정을 보다 물리적인 방법으로 해석하고자 한다.

이를 위해 대상유역의 분석 지점에 대해 기 관측된 유량, 유사량 자료 등 수문자료와 경사도, 토지피복도, 토양도, 토심도 등 유역특성자료를 활용하여 유출 및 유사모형의 매개변수의 추정 및 검증시에 활용한다. 그리고 홍수사상이 발생하였던 시기와 유량 및 유사량 조사가 동시에 시행되었던 기간을 선정하여 대상유역의 상류 주요지점에서 유출 및 유사량 모의를 한 후 유역전체에서 최대유사량 발생량과 분석기간 동안 발생한 유사총량 그리고 하도로 이송하여 최종 댐 저수지 구간에서 퇴적분포를 분석하고자 한다.

따라서 본 논문의 연구사는 분포형 강우-유출모형, 유역 유사분석, 저수지 퇴사 분석으로 구분하여 서술하고자 한다.

2.1 분포형 강우-유출 분석

강우-유출모형의 시작은 19세기로 거슬러 올라가 도로, 운하, 도시의 하수관거, 배수체계, 댐, 압거, 교량, 용수공급시스템 등의 설계를 위한 토목공학적 개발로부터 시작되었다고 할 수 있다. 이후 1950년대 중반까지 수문모델링은 주로 지표유출, 침투, 저류, 증발, 차단, 지표하 및 기저유출과 같은 수문순환에서 각각의 구성성분에 대한 개념과 이론 그리고 모형을 개발하는 것에 집중되었다.

미육군공병단(USACE)의 Puls(1928)는 저류량-유출량의 관계가 일정하고

홍수가 전파되는 동안 변하는 경사는 무시한다고 가정하여, 저수지를 통과하는 유출량을 추적하는 방법을 개발하였다. 이후 이 방법은 미개척국(USBR, 1949)에 의해 수정되었고 지금은 수정 Puls법으로 불린다. 췌기와 태형저류의 개념을 사용하여 McCarthy 와 다른 연구자들은 1934 ~ 1935의 홍수를 추적하여 Muskingum 방법을 개발하였다(USACE, 1936). Muskingum 방법은 지금도 일부 유역모형에서 하도추적을 위해 사용되고 있다.

1950년대에는 시스템공학 이론에 근거한 비약적인 발전이 있었다. 주로 선형 시스템이론을 채택하기 위한 노력을 하였는데, Lighthill과 Whitham(1955)은 긴 하천의 흐름추적을 위한 운동과 이론을 개발하였다. Nash(1957)에 의한 순간단위도 이론과, Dooge(1959)에 의하여 단위도 이론이 일반화 되었다. 이러한 이론은 지금도 지표류와 다른 다양한 수문학적 과정을 모델링하기 위한 표준 도구로 채택되고 있다.

컴퓨터 기반의 수문모형은 지난 30년 동안 꾸준히 이루어져 왔음에도 불구하고 개념적, 집중형, 결정론적 수문모형들은 과학적으로 논리적이지 못한 기술적인 도구에 불과하다고 일부 학자들은 혹평을 하였고, 전반적으로 이와 같은 모형으로부터 예측된 결과에 대한 신뢰성에 의문을 가져왔다. 이러한 의문에 대하여 물리적인 기반의 분포형 수문모형에 대한 필요성과 그 개념은 Freeze와 Harlan(1969)이 처음으로 제시한 바 있다.

Freeze의 선구자적인 제안이 촉발되어 1976년에 유럽의 세 기관에서 SHE(the Systeme Hydrologique Europeen)의 개발을 시작하였다. 그 이후로 여러 유형의 분포형 모형들이 개발되기 시작하였다. 이후 20년 동안의 모형개발에 대한 노력이 있었음에도 불구하고, 분포형 수문모형들은 잠재력을 보여

주는 정도로 활용되고 있지만 아직 많은 제약조건들이 있다. 물리적인 기반의 분포형 모형을 충분히 활용하기 위한 필수조건은 지질, 토양, 식생과 같은 자연적인 매개변수와 용수 및 채수, 농업활동, 오염물질의 배출량 등과 같은 인위적인 영향에 대한 자세한 공간정보를 포함한 대규모 자료가 구비되어야 하며, 이들 자료를 손쉽게 획득할 수 있어야 하는 것이다.

최근에 새로운 위성영상에 대한 기대감이 커지고 분포형 수문모형과 결합한 원격탐사자료의 대규모 활용은 획기적인 진전이라고 할 수 있다. 컴퓨터 성능의 향상과 더불어 GIS의 발전 그리고 DEM의 획득과 사용이 가능하게 됨으로서 분포형 모형의 연구는 더욱 가속화 되고 있다. 또한 하드웨어의 그래픽 성능이 모형의 입력과 출력을 쉽게 가시화할 수 있게 되면서 1990년대 중반부터는 MIKE SHE(Refsgaard and Storm, 1996), WMS(Watershed Modeling System, Brigham Young Univ. Engineering Computer Graphics Lab., 1996) 등과 같이 포괄적인 그래픽 사용자환경을 제공하는 시스템의 개발도 병행되고 있다.

국내에서는 고덕구(1989)에 의해 소유역의 장기유출예측을 위한 모의발생 수문모형이 개발되었다. 1990년대 중반부터는 GIS를 이용한 수문모형의 적용 및 개발에 대한 연구가 활발히 진행되었다. 농공학 분야에서 정하우 등(1995)이 격자 물수지를 이용한 강우유출모형을 개발하여 경기도 화성군 반월유역에 적용한 바 있다.

한편, 수자원분야에서는 김상현(1997)이 TOPMODEL을 적용시켜 인공배수 유역에서의 유출과정을 배수관을 통한 유출, 지하수 유출, 지표수 유출 등으로 나누어 수문학적 거동을 추적하였다. 조홍제 등(1997)은 강우-유출해석에

GIS와 TOPMODEL을 이용하여 모형변수의 민감도 분석과 지형의 격자별 크기에 따른 침투 유량과 발생시각의 변화에 대한 연구를 수행하였다. 김성준(1998)은 격자 물수지 기법(Grid-based water balance technique)을 이용하여 지표흐름과 지표하 흐름을 모두 고려한 분포형 강우-유출모형(KIMSTORM)을 개발하였다. 개발 모형은 래스터 GIS 소프트웨어인 GRASS를 이용하여 모형의 입력자료를 추출하는 모형의 전처리과정과 모형의 결과를 시간적·공간적으로 표현해주는 후처리 과정을 개발하여 임진강 유역내의 연천댐 유역에 적용한 바 있다. 배덕효 등(2000)이 단일유역에서 TOPMODEL의 홍수예보능에 관한 연구를 수행하였고, 유동훈과 이정영(2000)은 지표면 유출과정에서 침투를 고려하여 홍수시 하천유출을 모의하는 연계모형을 개발하였다. 권형중 등(2003)은 TOPMODEL과 Muskingum 기법을 연계하여 안성천유역의 홍수 유출분석을 수행하였다.

수질환경분야에서는 김진택(1995)이 농업 비점오염원 유출모형인 AGNPS와 GRASS와의 호환모형을 개발하여 반월유역에 적용하였다. 김성준 등(2000)은 농촌 소유역의 하천수질관리를 위한 시스템을 개발하여 경기도 북하천 유역에 적용한 연구, 격자기반의 토양침식 및 유사운송모형을 개발하여 화옹 간척지역에 적용한 연구, AGNPS모형을 이용하여 농촌 소유역의 축산농가 관리기법을 제시한 연구 등이 있다.

최근 국내에서는 미 공병단 연구개발센터에서 개발된 물리적인 개념의 공간 분포형 수문모형인 GSSHA 모형을 이용한 경안천 유역의 물순환해석(장철희 등, 2005)에 적용한 바 있으며, 이승중 등(2005)은 WEP 모형을 이용한 도림천 유역의 물순환을 모의한바 있다. 홍준범 등(2006)은 V_{10} TM 모형을 중랑천 유

역의 유출모의에 적용하여 물리기반의 분포형 수문모형의 정확성을 평가하였으며, 이창희 등(2006)은 비정형격자기반 도시침수 해석모형을 개발하였다. 한국건설기술연구원(2003)이 건강한 물순환체계 구축을 위한 유역진단기법을 개발하기 위하여 국외의 분포형 모형들에 대한 비교평가를 실시하고 그 중 오픈소스 모형인 WEP 모형을 채택하여 활발한 연구를 진행하고 있다. 박진혁 등(2006)은 댐유역의 홍수예측을 위하여 GIS 기반의 분포형모형인 $V_{flo}TM$ 와 집중형 모형인 KOWACO 모형을 이용하여 용담댐 유역의 유출해석을 실시하였다. 분포형 모형에 의한 수문곡선은 매개변수의 추가적 보정이 필요 없을 정도로 매개변수의 초기값이 수문곡선을 잘 모의하고 있었다고 결론하였다.

김충수 등(2007)은 분포형모형인 $V_{flo}TM$ 를 이용하여 중랑천유역의 월계1 배수구역(상가 및 주거지역), 군자 배수구역(아파트 지역), 어린이대공원 배수구역(공원 지역) 등 3개의 도시 소매수구역에 대한 강우유출해석을 수행하였다. 그 결과 약간의 매개변수 조정만으로 3개 소매수구역 모두 모의치들이 실측치와 “거의 동일”하였다. 이는 분포형 모형의 입력자료들이 집중형 모형의 입력자료들에 비해 물리적 의미가 큰 입력자료를 채택하기 때문으로 해석하였다. 김광섭 등(2007)은 중랑천유역에 대하여 2003년 9월 11일에서 13일 사이에 태풍 매미에 수반하여 발생한 호우를 TREC 기법에 의한 레이더 예측 강우와 $V_{flo}TM$ 분포형 모형을 이용하여 모의하였다. 강우와 조도계수, 하도폭 등을 보정한 결과 실측치와 “상당히 일치하는” 결과를 얻었다고 보고하였다.

김문모 등(2007)은 연속방정식과 Manning 식을 결합한 비선형저류방정식 기반의 분포형 모형을 개발하여 가상유역 및 군자 배수구역에 적용하였다. 적용 결과 분포형 모형은 이동강우나 국지적인 집중호우 등 시공간적으로 변화

는 수문 특성을 반영할 수 있어 도시유역의 홍수방재관리에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 보고하였다. 박진혁 등(2008a)은 용담댐유역에 대하여 GIS와 연계한 물리적기반의 분포형모형인 $V_{fio}TM$ 모형 등 최신 수자원 IT 기술을 활용하여 홍수기 돌발홍수에 대응한 초단기 정량적 강우-유출예측을 위한 분포형 유출예측시스템을 구축하였다. 모형검증 결과 GIS를 이용하여 지형, 토양, 토지피복과 같은 물리적 특성을 매개변수로 활용하여 유역특성을 적절히 반영함에 따라 첨두유량, 유출량, 첨두도달 시간차 등에서 만족할만한 결과를 보여주는 것으로 보고하였다. 이들은 기상청 레이더 반사도 UF자료를 처리하고 지상관측소 강우량과 보정과정을 거쳐 $V_{fio}TM$ 입력자료를 작성하는 K-RainVieux를 개발하여 활용하였다. 정인균 등(2008)은 K-water 현업에서 실시간 물관리에 사용하고 있는 저류함수법기반의 개념적 집중형 모형인 Kwater 홍수분석모형과 물리적기반의 분포형 모형 $V_{fio}TM$ 를 유역면적 2,293 km^2 인 남강댐유역에 적용하여 비교하였다. 모형 적용 결과 분포형 모형은 매개변수 보정 없이도 적절한 성능을 나타낸 것으로 보고하였다.

2.2 유역 유사량 분석

유역의 유사량 산정 관련 국내·외 연구동향을 살펴보면 경험적인 모형에서 가장 기초가 되는 모형은 USLE 공식이다. USLE 공식은 Wischmeier와 Smith(1965)에 의해 개발된 모형으로 강우(R), 토양침식성(K), 지형(LS), 식생피복(C), 토양보존대책(P) 등의 매개변수의 곱으로 산정된다. Renfro(1975)에 의해 제안된 유사전달률(Sediment Delivery Ratio, SDR)에 의해 유역의 토사 유출량으로 변환된다. 그러나 USLE 공식은 미국의 서부지역과 같은 건조기후

지역에 적용할 경우 심각한 오차를 유발하기 때문에 적용 대상지역에 제약이 있다. 연평균 토양 침식량만 산정할 수 있는 한계점과 단일호우에 대해서는 모의할 수 없는 단점이 있다. 이에 Wischmeier와 Smith(1978)는 기후인자를 강우 침식능 지수(R)로 치환하는 등 USLE 공식을 보완하여 현재 토양 침식량 산정에 있어 가장 보편적으로 사용되는 RUSLE 공식을 제시하였다. Williams(1972)는 USLE 공식의 한계점인 연평균 토양 침식량 산정을 극복하기 위하여 USLE 공식을 수정하여 단일호우에 대한 토양 침식량을 산정하는 MUSLE 공식을 제안하였다. 그러나 MUSLE 공식 역시 USLE, RUSLE 공식의 한계점인 수로(channel) 및 구곡(gully)에서의 퇴적모의가 불가능한 한계점을 가지고 있다.

Yang(1972)은 기존의 유사이송 공식들의 유도에 이용된 기본적인 가정들을 검토하여 유사 이송량이 유량이나 평균유속, 에너지 경사, 전단응력 등으로 결정될 수 있다는 기존의 가정에 대한 문제를 제기하였다. 이에 유사를 이송시키는 물의 단위중량당 잠재에너지 개념을 도입하였으며, 잠재 에너지의 시간 변화율을 유속, 경사의 곱으로 표현한 단위수류력(Unit Stream Power)을 정의하였다.

Yang은 단위수류력을 이용하여 유사량 산정식을 도출하였고 다양한 실험자료와 현장자료를 통해 검증하였으며, 다양한 유사량 산정공식들과의 비교를 통해 우수한 분석 결과를 보이는 것을 입증하였다.

Alonso 등(1981)은 유역의 유사분석에 적합한 유사이송공식을 평가하기 위해 여러 유사이송공식을 통해 산정한 이송능력을 현장과 실험수로의 실측 데이터와 비교하였다. 그 결과 Yang의 단위수류력을 이용한 이송능력이 다른

공식에 비해 우수한 결과를 보여줌을 확인하였다. 그러나 유역의 유사분석에 있어 여러 공식의 장단점에 대한 언급이 배제되어 있으며, 조건 및 상황에 적합한 공식은 사용자에게 의해 선택되어야 한다고 언급하였다.

Moore와 Burch(1986)은 단위수류력 이론을 적용하여 포상류(sheet flow)와 세류(rill flow)에 대한 침식량 예측을 직접 응용해 보았다. 포상류의 경우 유속을 측정하기 어렵기 때문에 Manning공식으로부터 유속을 유도하였다. 포상류나 세류와 같이 매우 얇은 수심의 경우 초기 한계 단위수류력은 상수로 가정할 수 있다는 사실을 발견하였다. Mosly(1972, 1974), Moss(1979)의 실측데이터와 비교를 통해 단위수류력을 이용한 유사이송 모의가 우수한 분석 결과를 보이는 것을 입증하였다.

APIP 등(2008)은 분포형 수문모형을 이용하여 인도네시아 Lesti강 유역에 대해 모의하여 실측데이터의 비교를 통해 모의에 사용된 모형의 우수한 예측 결과를 입증하였으며, 모의시간과 매개변수의 간소화를 위해 분포형모형의 집중화(lumping)를 시도하였다. 그 결과 모형의 모의시간은 개선되었으나 모의 결과의 정확도면에서는 분포형 모형이 우수한 결과를 제공함을 제시한 바 있다.

국내의 경우, 김웅태(1998)는 국내에서 많이 적용되고 있는 USLE 공식의 신뢰도가 떨어지는 경우를 고려하기 위해 적절한 격자크기를 이용하여 USLE 공식의 매개변수를 추정하였다. 각 격자의 유사 전달률에 보정계수를 사용하여 유역특성과의 상관분석을 통해 유역출구에 배출되는 연평균 토사의 양을 추정하였다. 그러나 총량 개념의 USLE 공식을 사용하였기 때문에 유사유출량의 시간에 따른 변화량은 산정하지 못하였다. 또한, 상대적으로 규모가 큰 유

역에서는 집중형 모형 적용에 한계가 있기에 분포형 모형의 적용이 필요하다고 주장하였다.

손광익(2001)은 해외 토사유출량 산정공식의 국내 적용성의 검토를 위해 전국 7개 개발현장에서 실측한 강우 및 토사유출량을 경험적 산정기법인 RUSLE 공식과 MUSLE 공식의 결과와 비교·검토하였다. 그 결과 RUSLE 공식과 MUSLE 공식이 유사한 결과를 보이고 있으나 현장의 특성에 따라 두 결과 값이 확연한 차이를 보이는 경우가 있어 현장 특성인자 산정에 많은 연구가 뒤따라야 한다고 언급하였다.

경험적 산정기법 이외에 물리적 산정기법에 대한 국내 연구를 살펴보면, 윤세의 등(1996)은 운동과방정식에 의한 지표면 유출 및 하도홍수추적 모형인 KINEROS 모형을 중소유역에 대한 적용성 평가를 위해 강우에 대한 유출 및 유사량을 산정하고 관측자료와 비교·검토하였다. 그 결과 침투 홍수량 발생시간이 다소 빠르게 나타났지만 전체 수문곡선의 형태 및 크기에 있어서는 실측값과 비교적 잘 일치함을 제시하였다.

그러나 유사량 계산에 사용되는 유사량 공식에 따라 모의 결과 많은 차이가 나타나므로 유사량 공식 선택에 있어 많은 주의가 필요함을 제시하였다. 금종호 등(2002)은 소유역의 토사유출량 산정을 위해 분포형 모형인 KINEROS2를 국내에 적용하여 적용성을 평가하였으며, 기존의 토양침식량 산정공식인 USLE 공식과 비교하였다. 비교 결과 토사유출량 산정에 있어서 기존 산정공식인 USLE 공식은 토사유출의 시간분포를 산정은 불가능하고, 강우 영향에 따라 과다 산정될 수 있는 문제점과 그에 따른 적용한계를 제시하였다. 김철겸과 김남원(2008)은 SWAT-K 모형으로부터 생성된 자료를 이용하여 소양강

댐 상류유역을 대상으로 강우에 따른 유출과 이송되는 유사량의 상호 관계를 분석하였다. 소양강댐 상류유역을 대상으로 유역내 각 지점별 강우에 따른 유사의 상호관계, 유출에 따른 유사의 상호관계 등을 도시하여 검토한 결과 강우와 유사 사이에 이차원의 회귀식을 유도할 수 있었다. 그에 따른 결정계수도 높게 나타나 회귀식이 유사량과 매우 상관성이 높음을 알 수 있었다. 이근상 등(2009)은 GIS 기반 SWAT모형을 이용하여 용담댐 유역의 소유역인 동향, 천천 유역에 대한 유량 및 부유사량 장기 분석을 통해 출구점에서의 실측값과 비교하였다. 검·보정 결과에 대한 평가를 위해 결정계수와 모형 효율성 지수를 사용하였으며, 그 결과 두 지수 모두 높게 나타나 실측치와 비교적 잘 일치함을 보였다. 유완식(2010)은 침식 및 퇴적의 공간분포에 대한 분석을 위해 사면의 지표 및 지표하 흐름을 고려한 유출모의 모듈과 단위수류력 이론을 기반으로 한 유사유출 모듈을 결합하여 확장 개발된 분포형 강우-유사-유출 모형을 개발하였다. 이기하 등(2010)은 분포형 수문모형을 이용하여 용담댐 상류유역을 대상으로 침식 및 퇴적의 시·공간 변동성 분석 연구에서 유사 유출의 공간적 특성에 대한 분석을 수행하였고 다양한 매개변수에 대한 최적화 기법을 적용하여 모의 정확도를 향상시키고자 하였다.

유역 유사량 산정에 대한 연구동향은 현재까지도 경험적 모형과 물리적 기반의 분포형 모형을 이용한 연구가 지속되고 있으며, 현재로써는 어느 방법이 최적이다 라고 쉽게 단정할 수 없겠다. 이는 각 방법들이 연구목적 및 방법에 따라 달리 선택되어 질 수 있고, 두 방법 모두 비용대비 효과 부분에서는 우열을 가리기 힘들기 때문이다. 특히 국내의 경우 유역 유사량 산정을 위한 다양한 기초 입력자료의 확보, 모의 정확도 비교분석을 위한 관측자료 부족 등

유사 분석 모형의 평가가 사실상 불가능한 수준이기 때문에 관련 연구가 제한적으로 이루어지고 있다.

유역에서의 토양침식과정을 보다 정확하게 해석하기 위해서는 회귀식 모형 또는 집중형 모형을 대체할 수 있는 물리적 기반의 분포형 모형이 필요하다. 토사의 발생지역, 규모 및 기간에 대해 파악하기 위해 연간 총 토사유출량 산정이 아닌 호우발생시 시간별로 모의가 가능하여야 한다. 또한, 대부분의 물리적 기반의 분포형 모형은 적용대상유역의 면적에 제약을 받는데 댐과 같은 중권역 이상의 유역에서의 토사유출량 모의를 위해서는 적용할 수 있는 유역면적의 크기의 제한이 비교적 적어야 한다. 따라서 시·공간적으로 유역내 침식 및 퇴사모의가 가능하며 중규모이상의 유역에 적용이 가능한 물리적 기반의 분포형 모형 도입이 절실한 실정이다.

2.3 저수지 퇴사 분석

저수지 내 퇴사 문제는 저수지의 건설과 운영 및 유지관리에 영향을 미치는 요소로 자연 하천에 댐을 건설할 경우 퇴적물 조건과 하상 경계의 상대적인 평형을 변화시켜 물과 유사의 조건 및 하상 형태를 교란시키게 된다. 이러한 현상은 저수지의 수위 상승에 따른 유속의 변화로 인하여 상당량의 유사가 저수지내로 유입하여 퇴적된다. 또한 퇴적된 유사는 저수지의 활용 저수용량을 연차적으로 감소시켜 용수공급 및 홍수조절 능력 저하와 배수위 변화 등의 다양한 문제를 발생시킨다(Morris, 1996). 이와 같이 저수지 내에 발생하는 퇴사량의 정확한 예측은 저수지 운영에 필수적이라 하겠다. 국내의 저수지 퇴사량 예측은 퇴사량 자료를 보유한 저수지를 대상으로 연평균 비퇴사량 산정을 위

한 경험공식을 유도하는 방법(Ministry of Construction, 1978; Ministry of Construction and Transportation, 2002; Kim *et al.*, 1993a, 1993b;)이 주로 이용되고 있다. 그러나 경험공식의 대부분은 유역면적이 100 km²이하의 농업용 저수지를 대상으로 하고 있고 대규모 저수지에 대한 퇴사량 산정에 대한 연구(Ministry of Construction and Transportation, 2002; Yoon, 1981)는 미미한 실정이다. 이 밖에 저수지 퇴사량 산정에 대한 연구로는 USLE, RUSLE와 같은 토사 발생량 산정공식을 이용하거나, 유량-유사량 관계곡선식을 이용하는 방법 및 수치모의를 이용한 퇴사분포 연구(Choi *et al.*, 2008; Yang, 1986; Chang and Hill, 1976; Holly, 1990), 강우량과 퇴사량의 상관관계를 분석하여 경험식을 개발한 연구(Ruy and Min, 1975, Ruy and Kim, 1976)도 수행되고 있다. USLE 모형은 지표면 및 실개천에서 발생하는 연평균 토사침식량을 산정하기 위해 1970년대 개발된 식이다. 사면이나 평지와 같은 소유역에 대한 토사침식량 산정에 있어 적합하지 못하다는 단점이 있어 Renard *et al.*(1991)이 USLE 모형에 수정인자를 사용하여 RUSLE 모형을 개발하였다. 그러나 이 같이 경험식에 의한 방법 및 토사발생량 산정공식을 이용한 퇴사량 산정은 불확실성이 높기 때문에 실측자료를 바탕으로 한 방법이 신뢰도가 가장 높을 수 밖에 없다(Ahn *et al.*, 2006).

하상의 침식과 퇴적에 따른 하상변동에 대한 해석방법은 하천흐름 및 유사이송을 지배하는 연속방정식, 운동방정식, 흐름저항 방정식, 유사연속방정식, 유사량 공식을 이용하여 수학적 방법에 의해 해법을 구하는 것이다. 주로 컴퓨터 발전에 힘입어 지배방정식과 수치해석 기법을 이용한 수학적 모형들이 많이 이용되고 있다. 이러한 수치모형들의 기본적인 원리는 하천흐름 및 유사

이송을 지배하는 방정식을 유한차분법, 유한요소법등의 수치기법을 이용하여 해를 구하는 것이다.

국·내외적으로 하천 수리특성 및 유사 이송 해석에 많이 이용되고 있는 모형이 미 육군공병단(USACE)의 WES(Waterways Experiment Station)와 연방도로국(U.S. Federal Highway Administration)이 연계하여 Brigham Young University의 Environmental Modeling Research Laboratory(EMRL)에서 개발한 SMS (Surface-water Modeling System) 모형이다. SMS 모형은 2차원 동수역학적 모형(Hydrodynamic modeling)으로서 GFGEN 모형, RMA-2 모형, RMA-4 모형, SED2D 모형 등으로 구성되어 있다(Enviromental Modeling Research Laboratory, 2000a, 2000b, 2000c, 2000d).

Ⅲ. 모형 이론

본 연구에서 요구되는 이론은 강우 발생시 분포형 강우-유출모형에 의해 산정된 유출량 산정과정과 그에 따른 유역유사의 침식과 퇴적 및 이송과정, 마지막으로 댐 저수지 유입구 부터 전체구간에 걸친 퇴적분포 과정이다.

따라서 본 절에서는 상기의 3가지 방법에 대한 모형 개요와 이론, 그리고 하천의 흐름과 유사이송을 지배하는 연속방정식, 운동방정식 등을 살펴 보고자 한다.

3.1 분포형 강우-유출모형

3.1.1 모형의 개요

유역내 수평 유출량산정 모듈로서 평면분포형의 격자형을, 연직분포형의 다층모형을 이용해서 격자기반다층유출모형을 적용한다. 연직구조는 Figure 3.1과 같이 A~B층의 수평유출량은 하천으로 유입하고, C층은 하천유량에 영향을 미치지 않는 지하수층으로 가정 하였다(박진혁 등, 2008c). 본 모형의 특성으로서는 DEM을 이용하여 격자기반으로 지형정보를 수치화하고 GIS와 위성영상을 이용하여 실제 토양 및 토지피복에 대한 매개변수들을 추출하였다. 실제상황과 가까운 하천 흐름도를 추출하여 운동역학적인 이론을 기반으로 물의 흐름을 수리학적으로 추적하는 것이다. 또한, 침투능 공극을 흐름과정으로 산정하고 레이더강우자료 등의 격자기반의 분포형강우를 입력할 수 있도록 설계되어 있다.

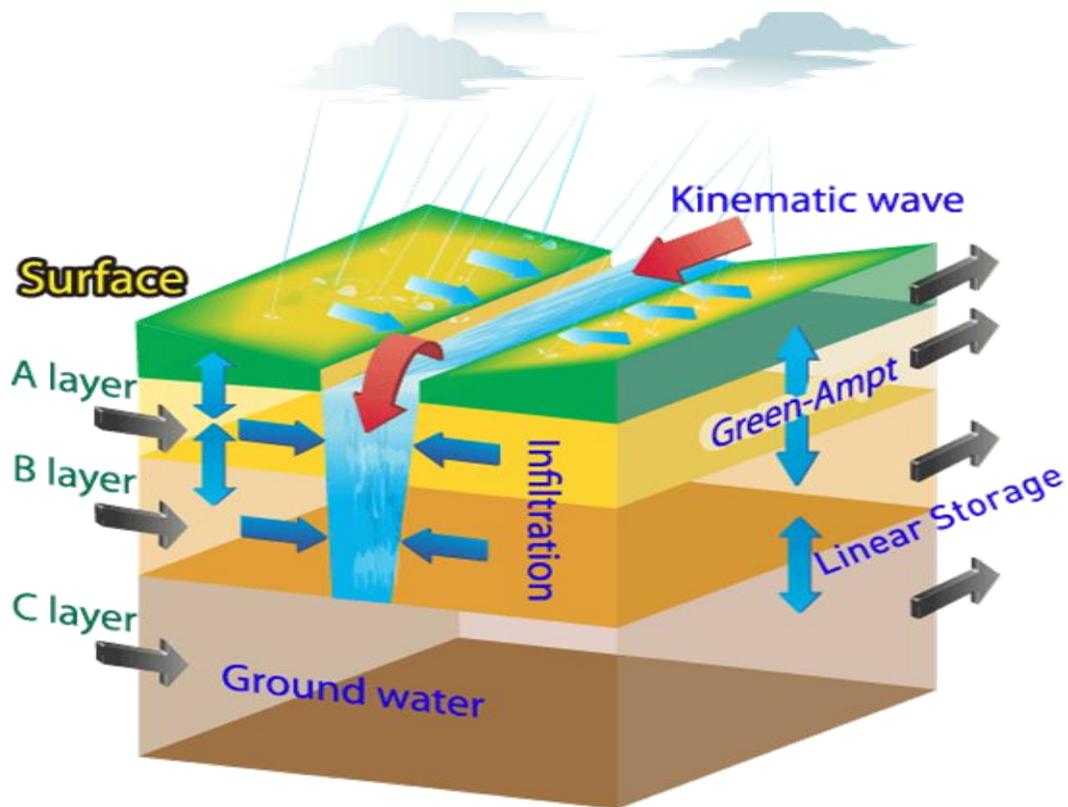


Figure 3.1 Basic concept of K-DRUM model

본 모형은 단순화된 조건하에서 사용하기 적합한 해석해가 존재하여 검증이 용이하고 넓은 범위의 조건하에서 적용성이 우수하며 강우-유출로 인한 지표 흐름을 추적하기 위하여 보편적으로 적용하고 있는 운동파 해석법(kinematic wave)을 이용하였다(박진혁 등, 2008c). 지표 흐름 및 A층(얕은면 흐름)은 중간유출을 고려한 운동파법을 적용하였고, B층(지표하 흐름)과 C층(지하수 흐름)은 선형저류법을 적용하였다. 강우발생시 토양내부로의 침투강도를 계산하기 위하여 Mein과 Larson(1973)이 제안한 Green-Ampt식을 이용하였다. 이 모형은 격자기반의 분포형 수문모형으로서 모든 매개변수 산정을 지형도, 토

지피복도, 토양도로부터 직접 GIS처리하여 일괄 입력할 수 있도록 함으로써 매개변수 산정 과정에서 문제가 되는 경험적인 요인을 사실상 제거하였다.

본 연구에서 이용하고자 하는 분포형 강우-유출모형의 기본 구조 및 개념을 모식화 하면 다음 Figure 3.2와 같이 나타낼 수 있다.

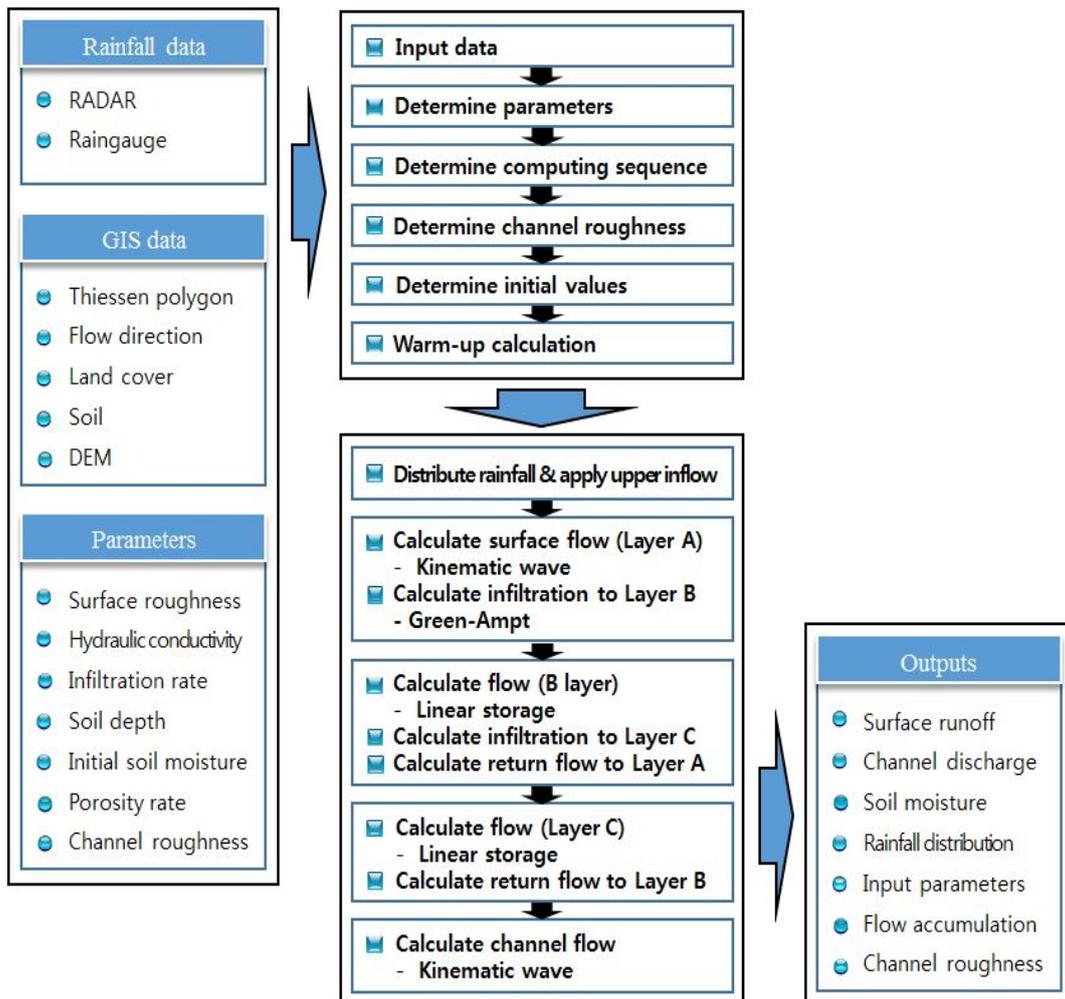


Figure 3.2 Framework of K-DRUM model

본 K-DRUM모형의 주요 수문매개변수들은 Tabel 3.1과 같이 요약된다.

Table 3.1 Main original data and hydrological parameters

Original data	Hydrological parameters	Remark
DEM	Basin slope	ArcView (Spatial Analysis)
	Riverbed slope	ArcView (Spatial Analysis)
	Flow direction	HEC-GeoHMS
Land Cover	Roughness coefficient of land cover	Reclassified to as 5 types
Soil Map	Effective soil depth	Green & Ampt infiltration process
	Saturated conductivity	
	Wetting front suction	
	Effective porosity	
Grid resolution		100~1,000m

본 기본모듈에서의 입력자료는 ESRI ArcGIS의 ASCII format 형태의 수치 고도모델, 흐름방향도, 흐름누적도, 토지이용도, 토양도, 티센망도가 외부에서 처리하여 입력되어야 한다. 또한, 강우자료는 시강우가 입력되며, 기타 매개변수는 현재 프로그램 내에서 지정되도록 되어있다. 출력자료는 현재 모의전 지정된 위치의 수문곡선이 출력되고, 기타 유출량, 유속, 유출심, 토양수분이 분포도 형태로 출력되도록 구성되어 있다.

Table 3.2 Input and output data type

Input file	Type	Unit	Output file	Type	Unit
Elevation.ASC	Real	EL.m	Runoff.ASC	Real	m ³ /sec
Flow direc.ASC	Integer	-	Soil moisture.ASC	Real	m
Flow Accum.ASC	Integer	EA	Grid storage.ASC	Real	m ³
Soil class.ASC	Integer	-	Grid runoff depth.ASC	Real	m
Land use.ASC	Integer	-			
Thiessen.ASC	Integer	-			
Spatial rain.ASC	Real	mm/hr			

GIS 자료는 정밀한 데이터로부터 모형입력시에는 해상도가 커지게 되므로 ArcGIS 등 외부 GIS 프로그램에서 중고해상도의 자료에 각 속성값을 입력하여 해상도를 리샘플링하여 구성하고 입력하는 방식을 취하고 있다.

본 연구에서 분포형모형에 입·출력되어야 하는 기본적인 자료의 형태는 ESRI ArcGIS의 ASCII format이 되며, 현재 정수형 데이터와 실수형 데이터의 입·출력 형태로 나타내고 있다.

3.1.2 모형의 이론

가. 모형의 구성

앞서 언급한바와 같이 유역내 수평 유출량산정 모듈로서 평면 분포형의 격자형을, 연직분포형으로 다층모형을 이용해서 격자기반다층유출모형을 적용하고, A~B층의 수평유출량은 하천으로 유입하고, C층은 하천유출량에 영향을 미

치지 않는 지하수 흐름으로 가정하였다. 동일한 유출특성을 가지는 토지피복을 산림, 논, 밭, 도시, 수역으로 재분류하여 격자마다 토지피복의 영향을 상세하게 파악할 수 있도록 고려하였다(Figure 3.3).

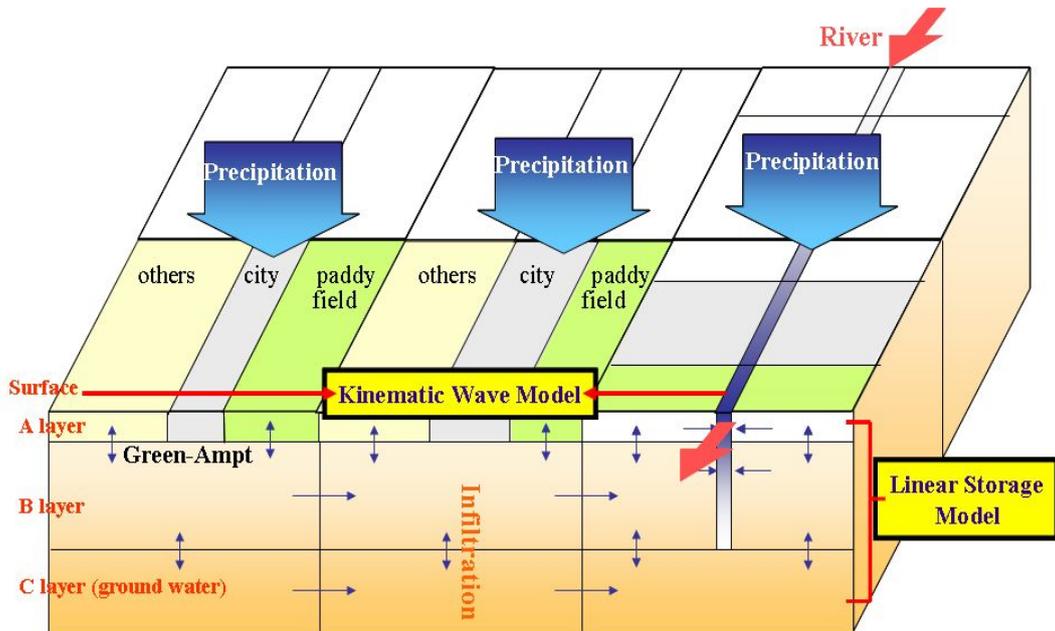


Figure 3.3 Basic structure of K-DRUM model

유역 전체를 그리드로 등분할하여 각 셀이 가지고 있는 표고데이터에 따라 흐름방향을 결정한다(Figure 3.4). 각 셀들은 크게 지표 흐름과 수로 흐름의 속성을 가진 셀들로 구분되고 각 셀들은 흐름 속성 외에 경사, 조도계수, 토양 종류에 따른 침투율 등의 속성을 갖는다. 유역요소망의 각 셀들은 운동과 방정식에 의해 해석되어진다. 각 셀은 8가지의 방향성분을 가질 수 있으며, 연계된 셀에 대한 수리학적 흐름 분석방법은 후술하였다.

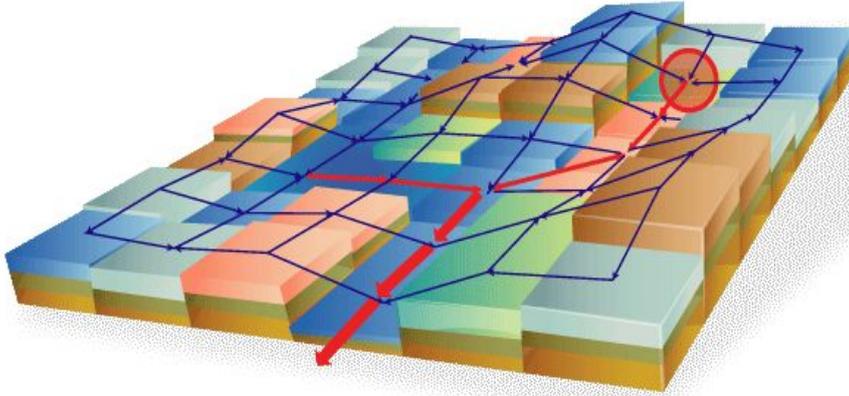


Figure 3.4 Finite element grid division

나. 유출과정 이론

지표 흐름 및 A층(얕은면 흐름)은 중간유출을 고려한 운동파법을 적용하였고, B층(지표하 흐름)과 C층(지하수 흐름)은 선형저류법을 적용하였다. 각층에서 유출해석을 위한 지배방정식과 각각의 변수에 대한 내용은 다음과 같다 (Beven, 1979).

지표 흐름 및 A층에 대한 지배방정식을 식 (3.1) ~ 식 (3.3)에 나타내었다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r, \quad r = R + U_B - f \quad (3.1)$$

$$q = \begin{cases} \alpha(h - d_A)^m + \beta h \\ \alpha h \end{cases}, \quad \text{when} \begin{cases} h \geq d_A \\ h < d_A \end{cases}, \quad d_A = \lambda_A D_A, \quad m = \frac{5}{3} \quad (3.2)$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{\sin\theta}}{n} \text{ (Manning type)}, \quad \beta = \frac{k_A \sin\theta}{\lambda_A} \text{ (Darcy type)} \quad (3.3)$$

여기서, h =수심(m), q =단위폭당 유량(m^2/sec), R =강우강도(m/sec), U_B =B층에서 A층으로 복귀하는 유량강도(m/sec), f =Green-Ampt식으로 산출한 침투강도(m/sec), d_A =A층의 포화저류가능량(m), λ_A =A층의 공극율, D_A =A층의 유효토심(m), θ =사면경사각, n =Manning의 조도계수, k_A =A층의 투수계수(m/sec)이다.

B층 흐름에 대한 지배방정식을 식 (3.4)와 식 (3.5)에 나타내었다.

$$U_B = \begin{pmatrix} S_B - d_B \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \text{when} \begin{pmatrix} S_B - d_B \geq 0 \\ S_B - d_B < 0 \end{pmatrix}, \quad d_B = \lambda_B D_B \quad (3.4)$$

$$\frac{dS_B}{dt} = I_B - O_B, \quad I_B = f_A + U_C, \quad O_B = O_{h_B} + O_{v_B}, \quad O_{h_B} = k_{h_B} S_B, \quad O_{v_B} = k_{v_B} S_B \quad (3.5)$$

여기서, S_B =B층의 저류량(m), d_B =B층의 포화저류가능량(m), λ_B =B층의 공극율, D_B =B층의 유효토심(m), I_B =B층의 유입강도(m/sec), O_B =B층의 유출강도(m/sec), U_C =C층에서 B층으로 복귀하는 유량강도(m/sec), O_{h_B} =B층에서의 횡방향 유출강도(m/sec), O_{v_B} =B층에서의 종방향 유출강도(m/sec), k_{h_B} =B층에서의 횡방향 투수계수(m/sec), k_{v_B} =B층에서의 종방향 투수계수(m/sec)이다.

C층 흐름에 대한 지배방정식을 식 (3.6)과 (3.7)에 나타내었다.

$$U_C = \begin{pmatrix} S_C - d_C \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \text{when} \begin{pmatrix} S_C - d_C \geq 0 \\ S_C - d_C < 0 \end{pmatrix}, \quad d_C = \lambda_C D_C \quad (3.6)$$

$$\frac{dS_C}{dt} = I_C - O_C, \quad I_C = O_{v_B} + O_{C_{VP}}, \quad O_C = O_{h_C}, \quad O_{h_C} = k_{h_C} S_C \quad (3.7)$$

여기서, U_C =C층에서 B층으로 복귀하는 유량강도(m/sec), S_C =C층의 저류량(m), d_C =C층의 포화저류가능량(m), λ_C =C층의 공극율, D_C =C층의 유효토심(m), S_C =C층의 저류량(m), I_C =C층의 유입강도(m/sec), O_C =C층의 유출강도(m/sec), $O_{C_{VP}}$ =C층의 상류경계로 유입하는 유입유량강도(m/sec), O_{h_C} =C층에서의 횡방향 유출강도(m/sec), k_{h_C} =C층에서의 횡방향 투수계수(m/sec)이다.

하도에서의 유출을 계산하기 위한 지배방정식과 각각의 변수에 대한 내용은 다음과 같다(Beven, 1979).

$$\frac{\partial A_r}{\partial t} + \frac{\partial Q_r}{\partial x} = q_r, \quad Q_r = \alpha_r A_r^{m_r}, \quad \alpha_r = \left(\frac{\sqrt{I}}{n} \right) \left(\frac{m}{(2\sqrt{1+m^3})^2} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad m_r = \frac{4}{3} \quad (3.8)$$

여기서, A_r =하도의 유하단면적(m²), Q_r =유량(m³/sec), q_r =횡유입량(m²/sec), I =하도경사, n =하도의 조도계수, m =하도의 법면경사이다.

각각의 격자에 적용한 초기조건 및 상류단 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A(0,x) &= A_0(x), & 0 \leq x \leq L \\ A(t,0) &= A_B(t), & 0 \leq t \end{aligned} \quad (3.9)$$

여기서, A =유하단면적(m^2), L =하도 및 사면의 길이(m), A_0 =시간 $t=0$ 에서의 유하단면적(m^2), A_B =격자의 상류단 유하단면적(m^2)이다.

지표흐름 및 하도흐름에 대한 지배방정식에 초기조건 및 경계조건을 이용하여 수치해를 얻기 위하여 본 모형에서 사용한 유한차분 근사기법은 각종 수치기법 중에서 비교적 안정적으로 계산이 수행되는 Beven(1979)의 차분이론을 적용하였다. 식(3.1)과 식(3.9)과 같은 형태의 편미분 방정식을 시간과 공간 평면상에서 적절한 차분간격에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{Q_i^{t+1} - Q_i^t}{\Delta t} + \gamma c_{i-1/2}^{t+1} \left(\frac{Q_{i+1}^{t+1} - Q_i^{t+1}}{\Delta x} - r \right) + (1 - \gamma) c_{i+1/2}^t \left(\frac{Q_{i+1}^t - Q_i^t}{\Delta x} - r \right) = 0 \quad (3.10)$$

$$c_{i-1/2} = 0.5(c_i + c_{i-1}), \quad c = \frac{dQ}{dA}$$

여기서, Δx =공간차분간격(m), Δt =시간차분간격(sec), Q_i^t =위치 i 와 시간 t 에서의 유량(m^3/sec), γ =시간가중계수, c =운동파 속도(m/sec)이다.

위 식은 미지의 값 q_{i+1}^{t+1} 에 대하여 비선형식이기 때문에 Newton-Raphson법을 이용하여 반복 수렴계산을 하여 q_{i+1}^{t+1} 을 구한다.

다. 침투과정 이론

강우발생시 토양내부로의 침투강도를 계산하기 위하여 Mein과 Larson(1973)이 제안한 Green-Ampt식을 이용하였고 수식은 다음과 같다. 토양으로 침투한 물은 마치 피스톤이 하강하듯이 상부 포화층과 하부 비포화 토

양층사이에 뚜렷한 경계면을 형성하며 흐름을 형성하는 것으로 가정한다 (Figure 3.5).

$$F_t = k_s \Delta t + \psi (\theta_s - \theta_0) \ln \left(1.0 + \frac{F_t}{\psi (\theta_s - \theta_0)} \right), \quad f_t = k_s \left(1.0 + \frac{\psi (\theta_s - \theta_0)}{F_t} \right) \quad (3.11)$$

여기서, F_t = t 시간에서의 누가침투량(m), k_s =유효투수계수(m/sec), Δt =계산 시간 간격(sec), ψ =습윤선 흡입수두(m), θ_s =포화 함수비, θ_0 =초기 함수비, f_t = t 시간에서의 침투강도(m/sec)이다.

t 시간에서의 누가침투량은 비선형식이기 때문에 Newton-Raphson법을 이용하였고 초기조건으로 전 시간단계에서의 누가침투량을 이용하였다.

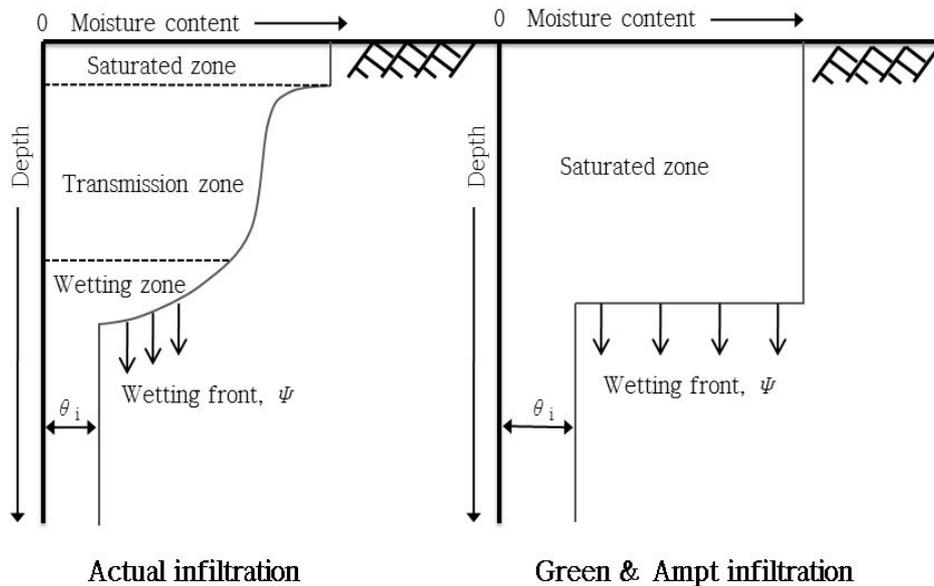


Figure 3.5 Green and Ampt infiltration diagram

3.2 유역 유사량 산정 모형

기후변화는 강우 강도를 국지적으로 보다 강하게 발생시킬 가능성이 있고, 이로 인해 토양침식이 가속화되며 침식된 토사가 하천을 따라 댐 저수지에 유입 될 경우 퇴사량을 증가시켜 댐 저수용량 감소를 불러일으킬 수 있다. 따라서 토양침식으로 인해 발생될 수 있는 다양한 문제를 사전에 파악하고 대응 방안을 수립하기 위해서는 토양침식의 발생과 규모에 대한 정확한 예측 및 정량적 평가가 필요하다. 이를 위해서는 실측에 의한 토양 침식량의 산정이 가장 바람직하지만 실질적으로 측정이 어렵고, 인력과 비용면에서의 비효율성, 결과에 대한 불확실성이 크기 때문에 간편한 경험식이나 집중형 토양침식모형(lumped erosion model)을 사용하여 토양침식량을 산정하는 것이 일반적이다.

기존의 토양침식량 산정기법은 대부분 연간 토양침식량을 산출하는 총량 또는 평균적 개념이며, 대표적으로는 USLE(Universal Soil Loss Equation)공식, RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation)공식, MUSLE(Modified Universal Soil Loss Equation)공식, TRB(Transport Research Board)모형, 그리고 원단위법 및 비유사량법 등이 있다.

토양침식현상은 지형, 지질, 강우 등 복합적인 요인과 유역 특성의 공간분포 형태에 따라 다양하게 발생되기 때문에 토양의 침식량을 산정하기 위한 회귀식 모형이나 집중형 토양침식 모형을 사용하기에는 다소 부족한 면이 있다. 회귀식 모형의 경우 수집된 자료들이 제한된 공간 및 시간에 대한 자료이므로 장기간 또는 적용범위를 벗어난 회귀식의 응용 결과에 상당한 불확실성이 내포되어있다(국립방재연구소, 1998). 집중형 모형의 경우 공간적으로 유역의 수문학적, 지형학적 이질성(heterogeneity)을 반영하기에 부족하기 때문에 적용

성에 한계가 있다. 따라서 강우-유출-유사도의 및 결과에 대한 시·공간적 변동성을 분석하기 위해서는 분포형 수문모형이 적절하다.

본연구에서는 물리적 기반의 분포형 모형을 활용한 유사량 산정모형인 EUROSEM(Morgan *et al.*, 1998)을 참고하여 기본방정식과 유사량 산정 기법 등을 분석하고 K-DRUM 모형에 적용하였다.

3.2.1 모형의 개요

유역에서 유사 발생하는데 영향을 미치는 것은 토양과 유역 경사 및 강우로 구분할 수 있다. 토양은 다양한 종류의 토질과 입경 등으로 구성되어 있으며 강우에 의한 박리와 지표면 흐름에 의한 침식이 발생된다. 유역경사는 강우에 의한 유출이 발생할 경우 전단응력에 영향을 미치게 되는 유속과 관련이 있으며, 유속이 클 경우 전단응력이 증가하여 침식 가능성이 높아지고 반대의 경우에는 낮아지게 된다. 강우는 지상으로 낙하시 위치에너지가 충격에너지로 변화함에 따라 토양의 박리를 야기 시키게 되며, 토양 내부로 침투되는 강우량 이상으로 강우가 지속될 경우 지표면 흐름이 발생되어 흐름에 의한 토양 침식이 시작된다.

또한 이러한 다양한 영향 인자들은 복합적으로 작용하며 유역의 상류에서 하류로 연속적으로 변화되며 발생하기 때문에 유역 전반에 걸친 유사발생 및 이송에 대한 산정은 수치모형에 의하거나 과거 관측 자료에 기반한 경험식을 사용하게 된다.

3.2.2 모형의 이론

토양입자는 빗방울의 충격과 흐름의 침식력이 그 침식력에 저항하는 토양 능력을 초과할 때 분리된다. 그 후 토양입자는 지표류에 의해 이송된다. 토양 입자의 퇴적은 입자의 중량이 이송시키려는 힘을 초과할 때 발생하며, 이 조건은 유사 이송능력(TC)을 초과하는 유사량으로 표현된다. 유출 생성, 토양 침식과 퇴적은 격자별로 계산되어지고 생성된 흐름 방향을 따라 상류격자로부터 하류격자로 추적되어진다. 유사량은 빗방울에 의한 토양분리(Soil detachment by raindrop ; DR)와 지표류 흐름에 의한 토양분리(Soil detachment by overland flow ; DF)에 의해서 계산되어지고, 지표류가 발생할 때 유사는 지표류에 의해 하도로 이송되어진다. 식 (3.12)는 유사 연속방정식을 나타내며, 식 (3.13)은 순 침식(net erosion)을 나타낸다.

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(QC)}{\partial x} - e(x,t) = q_s(x,t) \quad (3.12)$$

여기서, C =유사농도($m^3 m^{-3}$), A =유량의 횡단면적(m^2), Q =유량($m^3 s^{-1}$), q_s =유량의 단위 길이당 외부 유입 또는 유출 유사량($m^3 s^{-1} cm^{-1}$), e =유량의 단위 길이당 하상의 순 박리율 또는 침식율, x =평면 거리, t =시간 이다.

$$e = DET + DF \quad (3.13)$$

여기서, DET =빗방울 충격에 의한 흩입자 박리율, DF =흐름에 의한 흩입자

의 박리율과 침식을 사이의 균형을 의미한다.

Figure 3.6에 침식 및 퇴적작용에 대하여 강우, 유량의 연속방정식을 간단하게 나타내었다. 그림에서 단위 길이 기준으로 상류단 유입 유량 및 유사량, 횡방향 유입 유량 및 유사량, 그리고 내부 침식 또는 퇴적량과 하류 이송 유출량을 식 (3.12)로 나타 낼 수 있다. 식 (3.12)에서 단위길이에 대한 수체 단면적과 유량 관련 정보는 유출량 산정 부분에서 이미 계산이 되고, 계산된 정보를 이용하여 유사 유·출입과 단위길이당 순침식·퇴적량을 산정하게 된다.

K-DRUM 모형은 단위격자에 사면 2개소와 하도 1개소를 구성하고 있기 때문에 강우 및 흐름에 의한 토양 침식 또는 퇴적은 사면과 하도로 구분하여 산정되게 된다. 사면에서의 침식은 강우와 흐름에 의해 발생되며, 퇴적은 사면 수리 값을 통해 얻어진 유사 이송능력에 의해 발생된다.

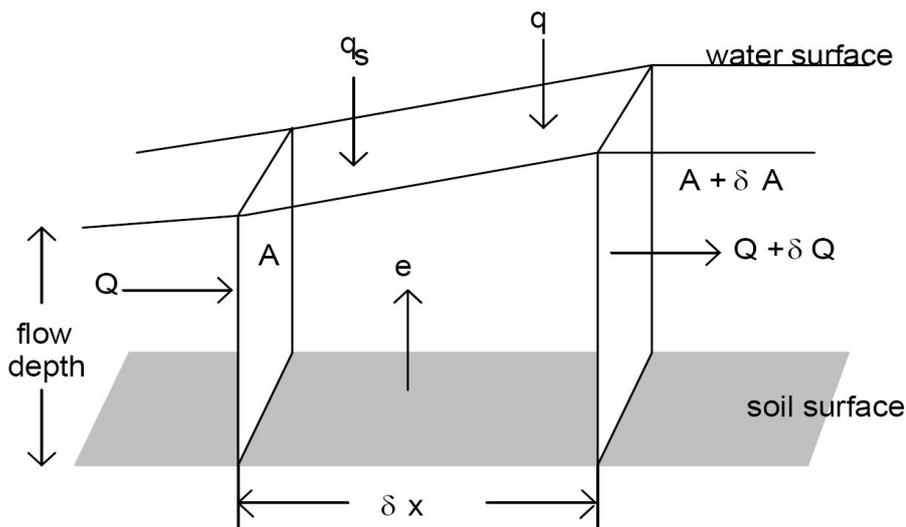


Figure 3.6 Schematic diagram of soil erosion continuous equation

가. 강우에 의한 토양 사면 침식량 산정

자연에서 강우에 의한 에너지($KE(DT); Jm^{-2}mm^{-1}$)가 토층에 바로 도달할 경우에는 Marshall 과 Palmer(1948)가 표현한 강우 크기 분포를 가정한다면, Brandt(1989)가 제안한 강우강도($r_i, mm\ hr^{-1}$)의 함수를 이용하여 표현할 수 있다.

$$KE(DT) = 8.95 + (8.44 \log r) \quad (3.14)$$

사면에 식생 등이 분포할 경우 강우는 식생에 의해 1차 차단되어지고, 식생의 잎 등에 의해 모아진 강우가 다시 2차로 토양에 도달하며 식생 배수 에너지($KE(LD); Jm^{-2}mm^{-1}$)가 발생하게 된다. 식생 배수 에너지는 Brandt(1990)이 제안한 것과 같이 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$KE(LD) = (15.8 PH^{0.5}) - 5.87 \quad (3.15)$$

여기서, PH =식생차단 유효높이(m) 이다. 음의 값을 방지하기 위하여 식생차단 유효높이가 14cm 이하의 경우는 식생 배수 에너지를 0으로 설정한다.

강우에 의해 사면 침식에 기여할 수 있는 총 운동에너지는 식 (3.14)와 식 (3.15)의 곱에 계수를 추가로 곱하여 얻을 수 있다.

강우에 의한 총 토양 침식($DET; gm^{-2}$)는 다음 식 (3.16)으로 얻게 된다.

$$DET = \frac{k}{\rho_s} (KE) e^{-bh} \quad (3.16)$$

여기서, k =토양 침식 지수($g J^{-1}$), ρ_s =토사의 단위중량($kg m^{-3}$), KE = 강우의 총 운동에너지($J m^{-2}$), b =지수(추천 값은 2, 범위는 0.9~3.1), h =지표면 흐름 깊이(m) 이다.

토양종류에 따른 k 의 범위는 Table 3.2와 같이 결정한다. 제시된 값들 중에서 토양 조건이 건조한 경우에는 최소 값을 포화된 경우에는 최대값을 사용한다. 침식이 불가능할 경우(도시화, 장갑화 등)에는 면적 비율을 고려하여 가감한다.

Table 3.3 Soil erosion detachability based on soil texture classes

Texture ¹⁾	Detachability (EROD : g/J)		
	Low	Mean	High
Clay	1.7	2.0	2.4
Clay loam	1.4	1.7	1.9
Silt	0.8	1.2	1.6
Silt loam	0.8	1.5	2.3
Loam	1.0	2.0	2.7
Sandy loam	1.7	2.6	3.1
Loamy sand	1.9	3.0	4.0
Find sand	2.0	3.5	6.0
Sand	1.0	1.9	3.0

1) Soil texture classes according to the USDA system

나. 토양 사면 유사농도 산정

토양 사면에서 유사농도를 산정하기 위해서 격자 상단부에 초기 유사농도를 부여할 필요가 있다. K-DRUM 모형에서는 단위격자의 사면은 독립된 사면으로 인정하기 때문에 모든 격자의 사면은 초기 유사농도 값을 적용 받게 된다.

초기 유사농도(C)는 EUROSEM의 user guide에 의거 식 (3.17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C(t_p) = \frac{DET}{q + v_s} \quad (3.17)$$

여기서, v_s =입자 침강속도($m s^{-1}$) 이다.

강우에 의한 사면 유출이 발생할 경우 유출유량에 의해 토양 사면에서 침식 또는 퇴적이 발생하게 된다. 유출에 의해 발생하는 사면 토양 침식은 토양 사면 흩 입자의 박리율(DF)을 산정하여 계산된다. 박리율은 사면 유출량에 포함된 토사 농도와 유사 이송능력의 차이로 나타나며 식 (3.18)과 같이 흐름 폭과 토립자 침강속도를 곱하여 산정된다.

$$DF = w v_s (TC - C) \quad (3.18)$$

여기서, w = 흐름 폭(m) 이다.

다. 하도에서 흐름에 의한 이송능력 산정

하도에서는 흐름에 의해서만 토사의 침식 및 퇴적이 산정된다. Govers(1990)은 유사 이송능력(TC)가 입경(50 ~ 150 μ m) 범위 내에서 다음 식과 같음을 보였다.

$$\omega = uS \quad (3.19)$$

$$TC = c(\omega - \omega_{cr})^\eta \quad (3.20)$$

$$c = [(d_{50} + 5)/0.32]^{-0.6} \quad (3.21)$$

$$\eta = [(d_{50} + 5)/300]^{0.25} \quad (3.22)$$

여기서, S =경사(cm cm⁻¹), u =평균 흐름 유속(cm/s), ω_{cr} =단위 수류력의 critical value(0.4cm/s), c , η =입경에 따른 실험 산정 계수 이다.

라. 이산화

방정식의 이산화를 위해 유출량 산정에 적용한 Beven 차분이론(1979, Preissmann 차분기법과 유사)과 동일한 형태의 음해법을 적용하였다. 수리 특성 값에 대한 정보는 유출계산을 수행하며 이미 산정이 되었고, 유사농도와 순침식 및 횡유입 유사를 추가하여 식 (3.23)과 같이 이산화를 수행하였다.

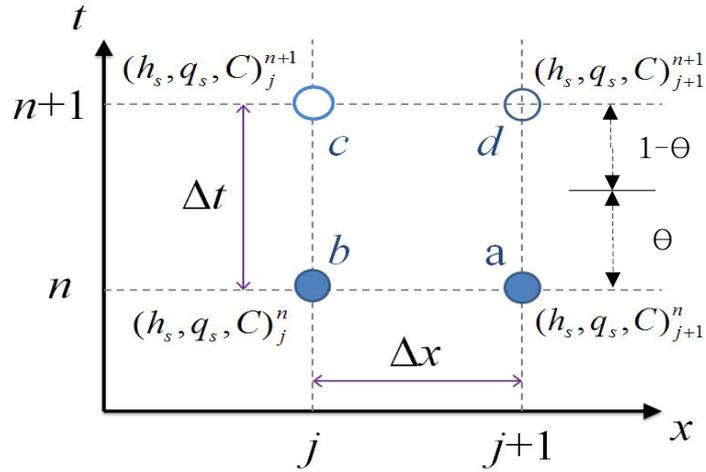
$$\begin{aligned}
f(C_{j+1}^{n+1}) = & \frac{(h_{s,j+1}^{n+1} C_{j+1}^{n+1})}{\Delta t} + \theta \left(\frac{q_{j+1}^{n+1} C_{j+1}^{n+1} - q_j^{n+1} C_j^{n+1}}{\Delta x} \right) \\
& + (1-\theta) \left(\frac{q_{j+1}^n C_{j+1}^n - q_j^n C_j^n}{\Delta x} \right) - (e + q_s) = 0
\end{aligned} \tag{3.23}$$

여기서, $\theta =$ 가중계수(weighting factor)이며 0이면 완전 양해법, 1이면 완전 음해법으로 구분된다. 가중계수는 보편적으로 0.5 ~ 0.8사이의 값을 적용하는 것으로 알려져 있으며, 본 연구에서는 계산시간과 모의안정성을 고려하여 0.7 값을 적용하였다.

$e =$ 순 침식이며 C_j^i 의 함수로서 다음과 같이 계산되어진다.

$$e = \alpha(TC_{j+1}^{n+1} - C_{j+1}^{n+1}) + kKEr_{j+1}^{n+1} e^{-bh_{s,j+1}^{n+1}} \tag{3.24}$$

이산화를 위한 공간 및 시간 차분 격자에 대한 계수별 기지값 및 미지값은 Figure 3.7과 같다. 격자점 a, b 값은 기지값이고, 격자점 c, d 값은 미지값으로 차분방정식을 이용하여 산정할 수 있다.



● Known Value ○ Unknown Value

Figure 3.7 Time and spatial difference variables

위의 방법에 의해서 각각의 단위 격자내 사면과 하도에서의 유사농도를 산정할 수 있다. 산정된 유사농도는 유사의 단위중량을 이용하여 유사량으로 환산할 수 있다.

본 연구에서는 물리적 특성의 유사거동을 반영하기 위하여 단순화된 수리학적 접근 방법을 사용하였다. 토사의 특성과 다양한 흐름 형태에 대한 고려는 적용하지 않았다. 향후 관련 연구성과를 참고로 보다 상세한 유사거동을 모의할 수 있도록 추가적인 개선이 필요할 것으로 판단된다.

3.3 저수지 퇴사 모형

3.3.1 모형의 개요

하상의 상승과 지하에 따른 하상변동에 대한 해석적인 연구방법이란 하천흐

름 및 유사 이송을 지배하는 연속방정식, 운동방정식, 흐름저항 방정식, 유사 연속방정식, 유사량 공식을 이용하여 수학적 방법에 의해 해법을 구하는 것이다. 주로 컴퓨터 발전에 힘입어 지배방정식과 수치해석 기법을 이용한 수학적 모형들이 많이 이용되고 있다(Korea Water Resources Corporation, 2008). 이러한 수치모형들의 기본적인 원리는 하천흐름 및 유사 이송을 지배하는 방정식을 유한차분법, 유한요소법등의 수치기법을 이용하여 해를 구하는 것이다.

본 연구에서는 국·내외적으로 하천 수리특성 및 유사 이송 해석에 많이 이용되고 있는 SMS(Surface-water Modeling System) 모형을 사용하였다. SMS 모형은 2차원 동수역학적 모형(Hydrodynamic modeling)으로서 미국 육군공병단의 WES(Waterways Experiment Station)와 미 연방도로국(U.S. Federal Highway Administration)이 연계하여 Brigham Young University의 Environmental Modeling Research Laboratory(EMRL)에서 개발 하였다. 개발 모형은 GFGEN 모형, RMA-2 모형, RMA-4 모형, SED2D 모형 등으로 구성 되어 있다(Enviromental Modeling Research Laboratory, 2000a, 2000b, 2000c, 2000d).

퇴사분포 해석을 위한 SED2D 모형에 필요한 매개변수는 K-water에서 실시한 퇴사량 조사 보고서(2001, 2012)의 값을 사용하였다. SED2D 모형의 좋은 재현성을 보이기 위해서는 모의시간의 간격이 중요하며, 모의시간의 간격이 과도하게 크지 않도록 주의가 필요하다.

3.3.2 모형의 이론

RMA-2 모형은 2차원 수심 평균한 유한요소 수치모형으로서 정류 및 부정

류 모의가 가능하고 전·후처리가 편리한 모델로 2차원 흐름영역에서 자유표면, 상류흐름의 수평방향 유속성분과 수위를 계산한다. Navier-Stokes 방정식에 난류의 흐름을 고려한 Reynolds 방정식으로 유한 요소법에 의해 그 해를 계산하는 모형이다. 이 모형에서 마찰력은 Manning의 조도계수나 Chezy의 평균 유속계수로 계산된다. 와점성계수(Eddy viscosity coefficient)는 난류의 특성을 정의하는데 사용되며, 정상류뿐만 아니라 부정류에서도 모의가 가능한 모형이다. RMA-2는 연속방정식과 Navier-stoke 방정식을 2개의 수평방향에 대하여 수심 적분한 식을 지배방정식으로 하며, 이는 식 (3.25), 식 (3.26) 및 식 (3.27)과 같다(King, 1990).

$$\begin{aligned}
 & h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left(\varepsilon_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \varepsilon_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + gh \left(\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right) \\
 & + \frac{n^2 g u}{h^{1/3}} \sqrt{(u^2 + v^2)} - \zeta v_a^2 \cos \psi - 2h w v \sin \varnothing = 0
 \end{aligned} \tag{3.25}$$

$$\begin{aligned}
 & h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left(\varepsilon_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \varepsilon_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + gh \left(\frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right) \\
 & + \frac{n^2 g v}{h^{1/3}} \sqrt{(u^2 + v^2)} - \zeta V_a^2 \sin \psi + 2h w u \sin \varnothing = 0
 \end{aligned} \tag{3.26}$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \tag{3.27}$$

여기서, u, v는 각각 직교좌표계에서의 수심 적분한 수평흐름속도, x, y, t는

직교좌표계 및 시간, ρ 는 유체의 밀도, ε 는 와점성계수, a 는 하상고, h 는 수심, g 는 중력가속도, n 은 Manning 조도계수, ς 는 바람에 의한 전단계수, v_a 는 풍속, ψ 는 풍향, \varnothing 는 국지위도, ω 는 지구의 회전 각속도를 나타낸다.

유사이송 모형인 SED2D는 2차원 정상 및 동수역학적인 유사이송과 하상변동을 모의할 수 있는 모형으로서 하상제원을 고려한 식 (3.28)의 이송-확산 방정식을 이용하여 하상변동을 모의한다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \alpha_1 C + \alpha_2 \quad (3.28)$$

여기서, x 와 y 는 좌표축, t 는 시간, C 는 농도, u 와 v 는 x 와 y 방향의 수심 평균유속, D_x 는 x 축 방향의 유효확산계수, D_y 는 y 축 방향의 유효확산계수, α_1 은 하상근원(bed source)에 대한 계수, α_2 는 하상근원(bed source)의 평형 농도계수이다.

IV. 대상유역 특성 및 연구방법

4.1 대상유역

본 연구에서는 홍수시 유역에서 유사발생 및 저수지 탁도 문제가 발생했을 뿐만 아니라 저수지 퇴사량 조사를 최근에 실시한 낙동강 수계를 대상으로 하였다. 수계내 주요지점인 합천댐, 임하댐, 거창1, 거창2, 영양 및 동천지점을 대상으로 강우에 따른 유역의 유출량 및 유사량을 산정한 후 합천댐의 저수지 퇴사량 거동분석을 통해 유역 유사량 발생 및 이송량을 검증 하고자 한다.

합천댐, 임하댐지점과 거창1, 거창2, 영양 및 동천지점 주요지점은 2010과 2011년에 지속적인 유량 및 유사량 관측이 이루어져 상대적으로 신뢰도가 높은 관측 자료를 보유하고 있어 선택하였다.

4.1.1 합천다목적댐

가. 유역개황

합천다목적댐은 낙동강 유역 종합개발계획의 일환으로 합천읍 북방16km 지점의 황강협곡에 건설한 높이 96m, 길이 472m, 체적 90만 m^3 의 콘크리트 중력식댐으로 유역면적 925 km^2 , 저수용량 7억9천만 m^3 이다.

합천댐은 1982년 4월에 공사를 착수한 이래 7년 1개월만인 1989년 12월에 건설공사를 완료하였다. 이 댐은 기존의 댐과는 달리 지형상의 특성을 고려하여 자연낙차를 최대한 효율적으로 활용하는 수로식 발전형식을 취하고 있다. 또한 본댐 하류 6.5km 지점에 높이 29m의 콘크리트 및 석괴혼합식의 조정지댐을 건설하여 용수공급을 원활히 하기 위해 시설용량 600kW인 2기의 발전설

비를 설치한 저녁차 소수력 발전소를 갖추고 있다.

합천댐이 위치한 황강은 낙동강 하구로부터 약 110km상류에서 본류와 합류하는 낙동강 제1지류로서 그 유역면적은 925km²이며 낙동강 유역면적의 4%를 점유하고 있다. 소백산맥의 대덕산에서 발원하여 63km의 유로를 남동류 하다가 합천댐 지점에서 유로 방향을 동쪽으로 바꿔 54km 떨어진 지점에서 낙동강 본류와 합류한다. 인접 유역으로는 북서쪽에서 금강유역과 접하며 남서방향으로 남강유역과 접하고 있다. 합천댐 유역은 유로연장 63km, 유역면적 925km²로서 황강 전 유역의 70%를 차지한다. 댐지점의 하상구배는 1/110정도이고 평균 고도는 해발 250 ~ 300m이다.

댐 지역에서의 하상고는 해발 89m이며 20%이하의 비교적 완만한 구배를 가진 면적은 전유역의 23.9%이다. 토지이용 상태는 18%가 농경지이며 나머지는 거의 산림으로 구성되어 있다. 연평균 강수량은 1,277.5mm이고 연평균 유입량은 573,200천m³이다. 본댐 하류 2.5km지점에 조정지댐이 위치하고 있다. 댐유역내 행정구역은 1군 2도 5개면 29리이다.

나. 강우관측소 현황

합천댐 유역내 강우관측소는 국토교통부 2개 관측소, 기상청 1개 관측소, K-water 6개 관측소를 포함 모두 9개 강우관측소가 위치하고 있다. 각 관측소에서 관측된 자료는 데이터베이스에 저장되며 K-DRUM 모형은 이 정보를 검색하여 입력자료로 사용하게 된다. 각 관측소의 세부 정보는 Table 4.1에 나타내었다.

Table 4.1 Precipitation station status at Hapcheon Dam watershed

Station	Type	Management Agency	Observation Date (dd-mm-yy)	Location (TM ¹⁾)	
				X	Y
Gabuk	T/M ²⁾	K-water	15-July-1992	289,413	251,738
Geochang	Magnetic	KMA ³⁾	01-Jan-1971	282,422	241,715
Geochang1	T/M	K-water	01-Oct-1987	281,178	242,968
Byeonggok	Magnetic	MOLIT ⁴⁾	03-Apr-1984	269,953	256,957
Buksang	T/M	K-water	01-Oct-1987	273,252	252,792
Yungyang	Magnetic	MOLIT	01-Nov-1926	282,862	256,514
Yungyang	T/M	K-water	01-Oct-1987	282,027	257,184
Jisan	T/M	K-water	15-July-1992	291,783	241,191
Chungyeon	T/M	K-water	01-Oct-1987	282,719	234,105

1) TM : Transverse mercator, 2) T/M : Telemeter, 3) KMA : Korea Meteorological Administration, 4) MOLIT : Ministry of Land, Infrastructure, and Transport

다. 수위관측소 현황

합천댐 유역 인근 수위관측소는 8개소가 위치하고 있으며 합천댐 상류유역에 3개소, 하류에 1개소, 합천댐과 조정지댐 및 방수로에 4개소가 위치하고 있다. 합천댐 상류유역의 세부 관측소 정보는 Table 4.2에 나타내었다.

Table 4.2 Water level station status at Hapcheon Dam watershed

Station	Type	Management Agency	Observation Date (dd-mm-yy)	Location (TM)	
				X	Y
Geochang1	T/M	K-water	01-Oct-1987	281,178	242,968
Geochang2	T/M	K-water	01-Oct-1987	283,685	246,504
Jisan	T/M	K-water	15-July-1992	291,783	241,191

4.1.2 임하다목적댐

가. 유역개황

임하다목적댐은 낙동강의 제1지류인 반변천의 상류 18km지점에 건설된 높이 73m, 길이 515m, 저수용량 5억9천5백만 m^3 , 홍수조절용량 8천만 m^3 의 사력댐이다. 이 댐은 1984년 12월에 착공하여 7년 6개월만인 1992년 6월에 공사가 완료되었다. 임하댐이 준공됨으로써 낙동강유역의 수자원을 효율적으로 개발하여 하류지역의 홍수피해를 경감시키고, 수질개선은 물론 낙동강 중·하류 지역의 급증하는 용수수요에 대처 할 수 있게 되었다. 한편, 연간 9천6백7십만kWh의 무공해 수력에너지를 생산 공급하여 국가 경제발전에 크게 기여하고 있다.

임하댐 지점은 하구로부터 약 356km 상류이고 낙동강 지류인 반변천 합류점으로부터 약 18km 상류에 위치하고 있다.

유역은 산악지대로 구성되어 있으며, 연평균 강우량은 871.4mm이며, 연평균기온은 12.55°이다. 유역면적은 1,361 km^2 이며 건설 당시 거주인구는 약 128천명으로서 대부분 농업 및 임업에 종사하고 있었으며 유역내 토지는 임야 1,136 km^2 를 제외하면 225 km^2 만이 전, 답, 또는 기타용지로 이용되고 있어 이용율은 16.5%에 불과하다.

나. 강우관측소 현황

임하댐 유역내 강우관측소는 국토교통부 6개 관측소, K-water 8개 관측소를 포함 모두 14개 관측소가 위치하고 있다. K-DRUM 모형은 강우 관측소 정보를 검색하여 모형의 입력자료로 사용하게 된다. 각 관측소의 세부 정보는 Table 4.3에 나타내었다.

Table 4.3 Precipitation station status at Imha-Dam watershed

Station	Type	Management Agency	Observation Date (dd-mm-yy)	Location (TM)	
				X	Y
Gilan	T/M	MOLIT	Aug-1964	371,304	327,350
Dopyeong	T/M	MOLIT	Mar-1998	384,251	313,831
Bunam	T/M	K-water	30-Sep-1987	385,467	316,509
Budong	T/M	K-water	01-Jan-2000	392,136	321,897
Seokbo	T/M	K-water	30-Sep-1987	391,676	340,331
Subi2	T/M	K-water	01-Jan-2000	396,734	357,440
Andong	Magnetic	MOLIT	01-Nov-1916	361,845	338,763
Yeongyang	T/M	K-water	30-Sep-1987	388,303	352,285
Ilyeol	T/M	K-water	30-June-1992	386,253	363,128
Imdong	Magnetic	MOLIT	01-July-1969	371,593	342,899
Jinbo	Magnetic	MOLIT	01-July-1969	383,024	338,755
Jinbo2	T/M	K-water	01-Jan-2000	384,993	338,643
Chungsong	T/M	K-water	30-Sep-1987	383,014	327,498
Hyeonseo	T/M	MOLIT	Aug-1961	371,888	307,903

다. 수위관측소 현황

유출 및 유사분석시 활용되는 임하댐 상류유역의 수위관측소는 3개소가 위치하고 있으며, 세부 관측소 정보는 Table 4.4에 나타내었다.

Table 4.4 Water level station status at Imha Dam watershed

Station	Type	Management Agency	Observation Date (dd-mm-yy)	Location (TM)	
				X	Y
Gilan	T/M	MOLIT	Jan-1988	371,304	327,350
Yeongyang	T/M	K-water	30-Sep-1987	388,303	352,285
Chungsong	T/M	K-water	30-Sep-1987	381,965	328,802

4.2 기초자료 구성

대상유역에 대한 K-DRUM 모형의 적용을 위하여 필요한 입력 자료는 유역의 수문매개변수들에 대한 격자단위 자료와 강우 및 기상자료로 구분된다. 공간적 수문매개변수 자료는 수치표고도(DEM), 경사도, 토지피복도, 토양도 및 유효토심도가 있으며, WAMIS(<http://www.wamis.go.kr>)에서 30m 단위의 해상도 자료를 제공 받아 사용하였다.

분포형 모형의 특성상 유역의 공간적 특성을 세밀하게 반영하는 것이 좋겠으나, 모형 구동 시간과 유출량 정확도를 고려하여 적절한 수준으로 해상도를 변경할 필요가 있다. 정성영(2011)은 남강댐 유역을 대상으로 K-DRUM 모형의 격자크기에 따른 유출량 오차 발생 특성을 파악하기 위하여 250m, 500m, 1,000m의 격자해상도에 대한 유출계산을 수행하였다. 결과적으로 오차발생은

격자해상도와는 특별한 상관성이 없고 계산단위 시간과 비례하여 증가한다고 제시하였다. 따라서 본 연구에서는 유역특성의 적절한 반영과 계산시간 단축을 위해 기초자료의 해상도를 합천댐의 경우 300m로, 임하댐의 경우 400m로 변경하여 입력 자료를 구축하였다.

4.2.1 지형특성 자료

지형특성 자료에는 수치표고도(DEM)와 경사도가 사용된다. 수치표고도를 이용하여 유역의 형상과 관측소 위치를 표기한 유역 현황도를 작성하게 되며, 수위관측소를 기점으로 상류유역에 대한 소유역을 구분하게 된다. 소유역 구분은 유출모의 수행 후 수문매개변수 조정시 유역 전체에 대한 조정에 비해 소유역별로 세부조정을 수행하는 것이 정확도 향상에 유리하기 때문이다.

가. 합천댐 유역

유역의 수치표고도를 이용하여 흐름방향도를 생성하고 이를 통해 하천망도를 작성하게 된다. 또한 유역내 강우, 기상, 수위 관측소에 대한 위치정보를 이용하여 배치하여 유역 현황도를 작성하게 된다. Figure 4.1에 합천댐 유역의 지형 및 현황도를 나타내었다. Figure 4.2는 합천댐 유역내 위치하고 있는 수위관측소 4개소(거창1, 거창2, 지산, 합천댐)를 기준으로 상류 소유역을 구분한 소유역도를 나타내고 있다. Figure 4.3에는 유역내 격자별 경사도를 나타내고 있다. K-DRUM에서는 각 격자에 사면과 하도가 위치하는 것으로 가정하게 되므로 경사도는 각 격자의 하도 경사를 의미하게 되고, 사면 경사도는 고해상도(원시자료)의 수치표고도를 이용하여 별도로 사면 경사도를 생성하게 된다.

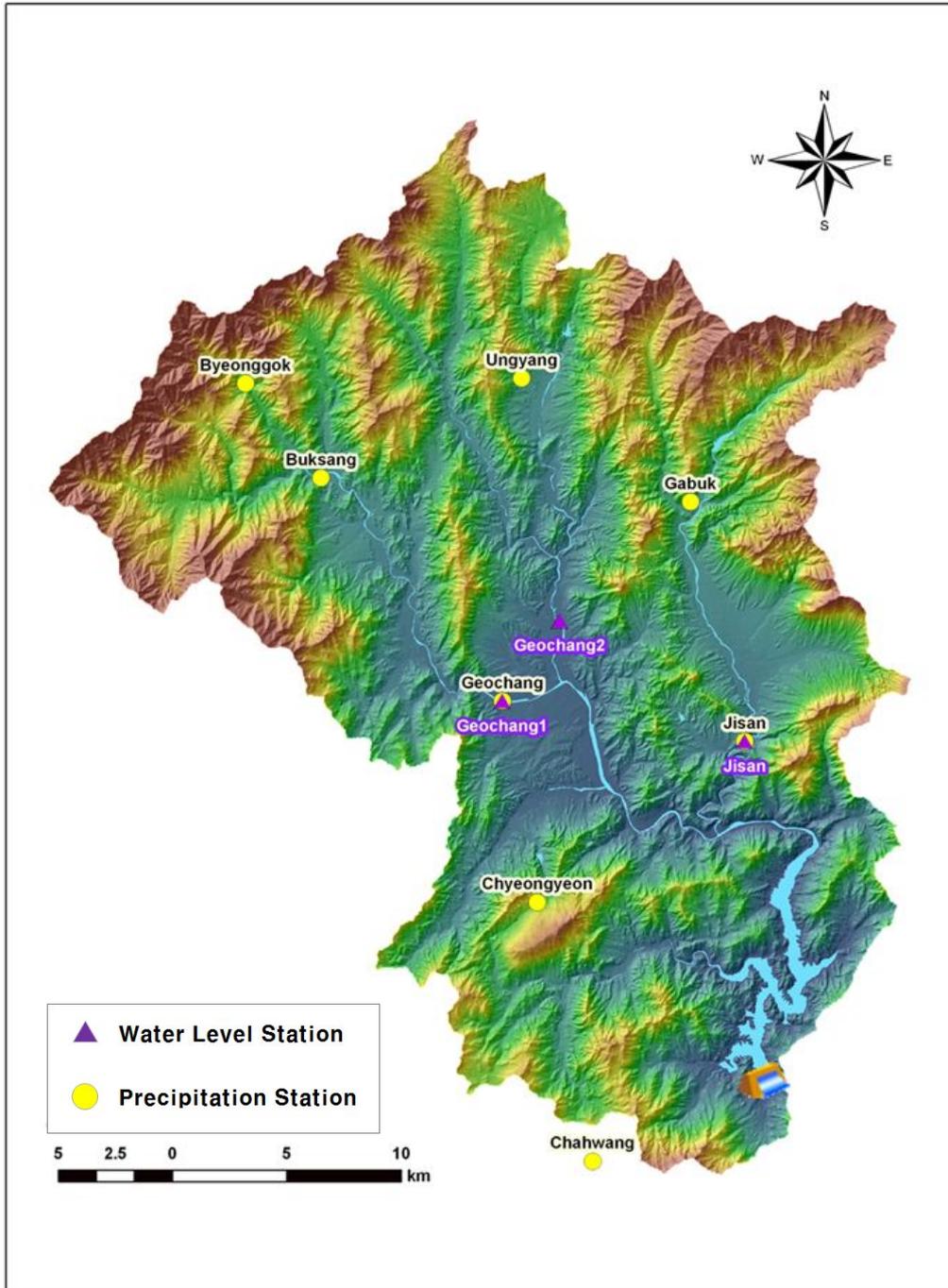


Figure 4.1 Digital elevation map of Hapcheon Dam watershed

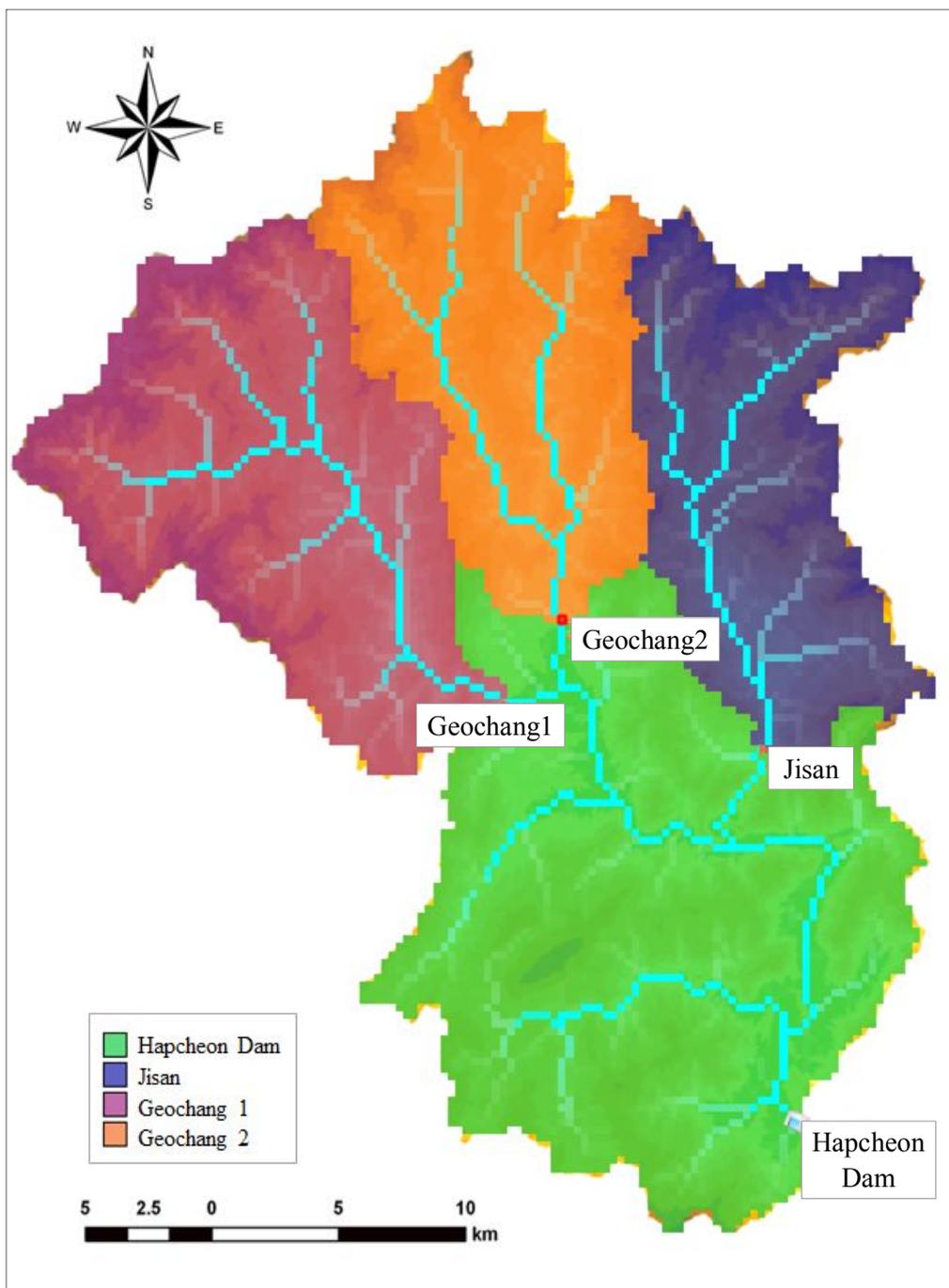


Figure 4.2 Sub-basin map of Hapcheon Dam watershed

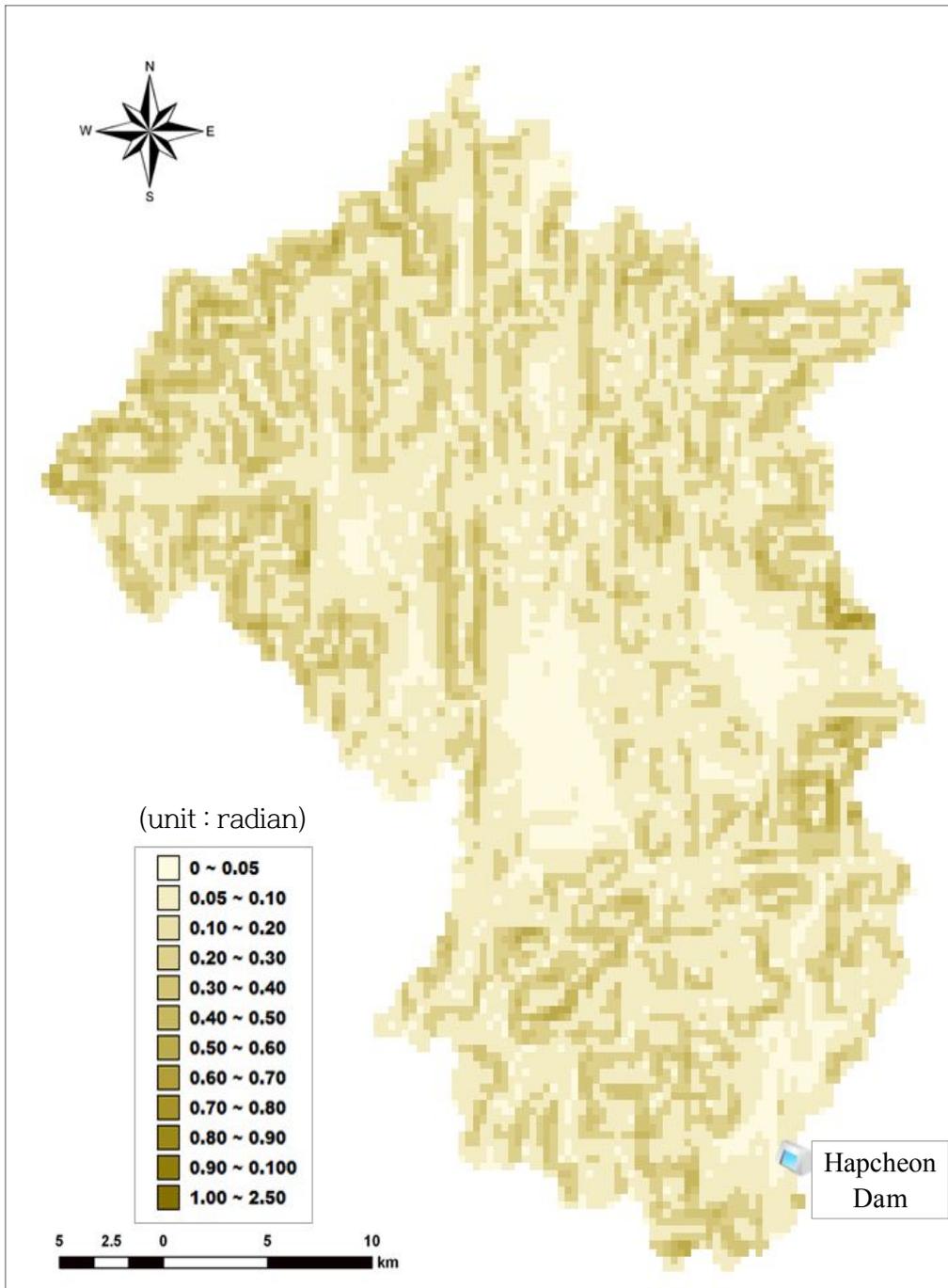


Figure 4.3 Basin slope map of Hapcheon Dam watershed

나. 임하댐 유역

임하댐 유역의 경우 Figure 4.4에 유역의 지형 및 현황도를 나타내었고, Figure 4.5에 유역내 위치하고 있는 수위관측소 6개소(송강, 광덕, 청송, 영양, 동천, 임하댐)를 기준으로 상류 소유역을 구분한 소유역도를 나타내고 있다. Figure 4.6에는 유역내 격자별 경사도를 나타내고 있다.

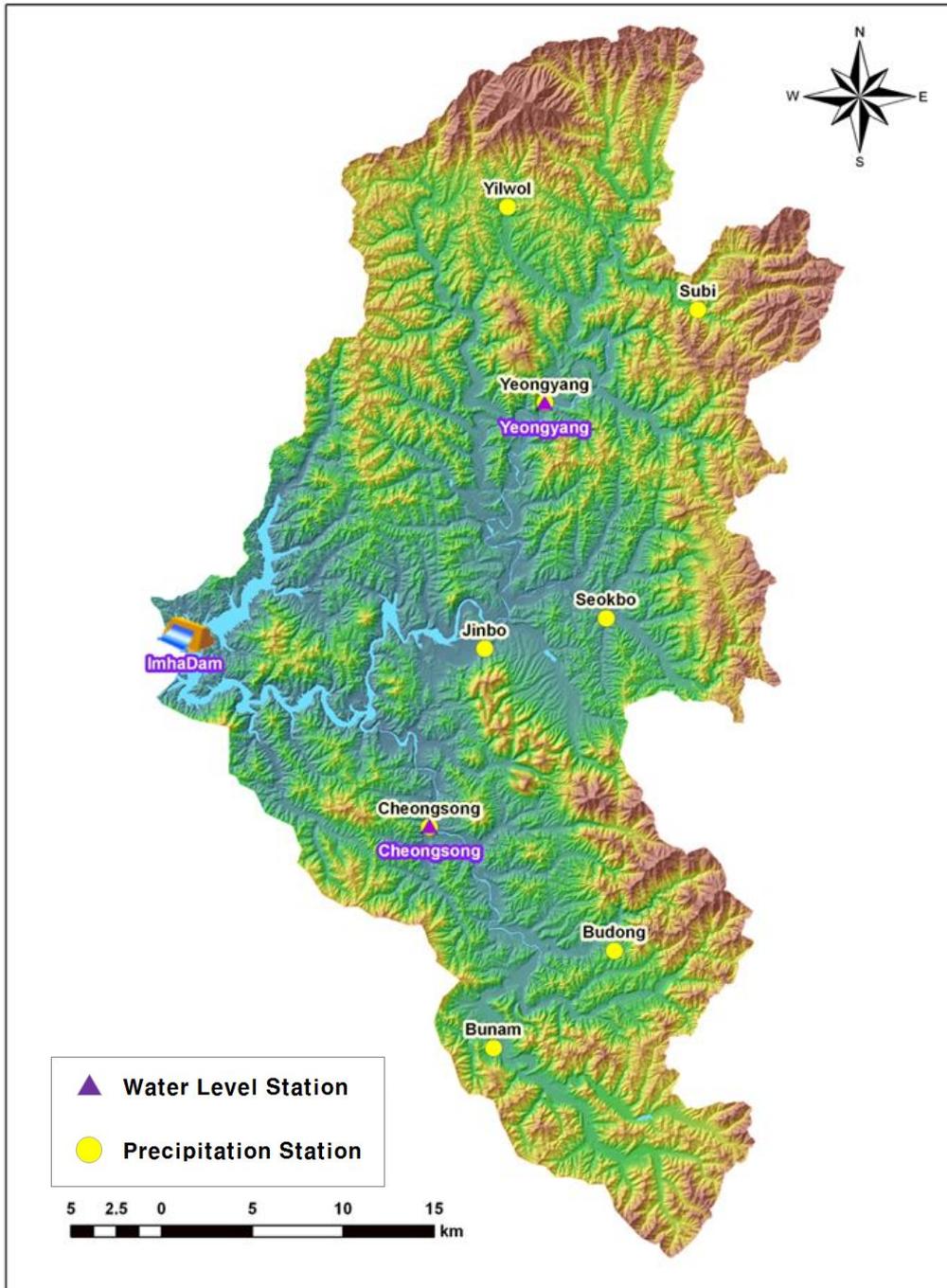


Figure 4.4 Digital elevation map of Imha Dam watershed

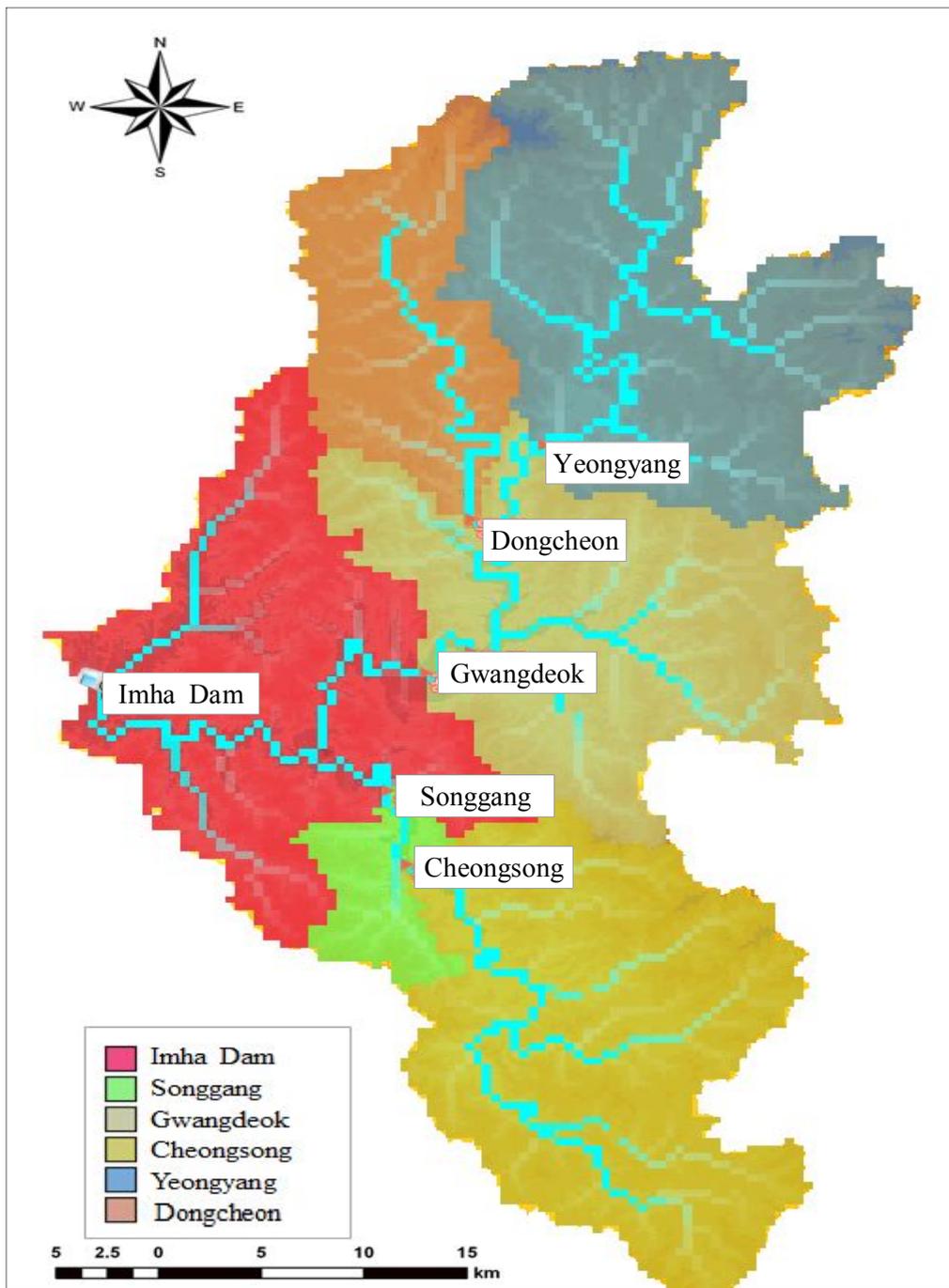


Figure 4.5 Sub-basin map of Imha Dam watershed

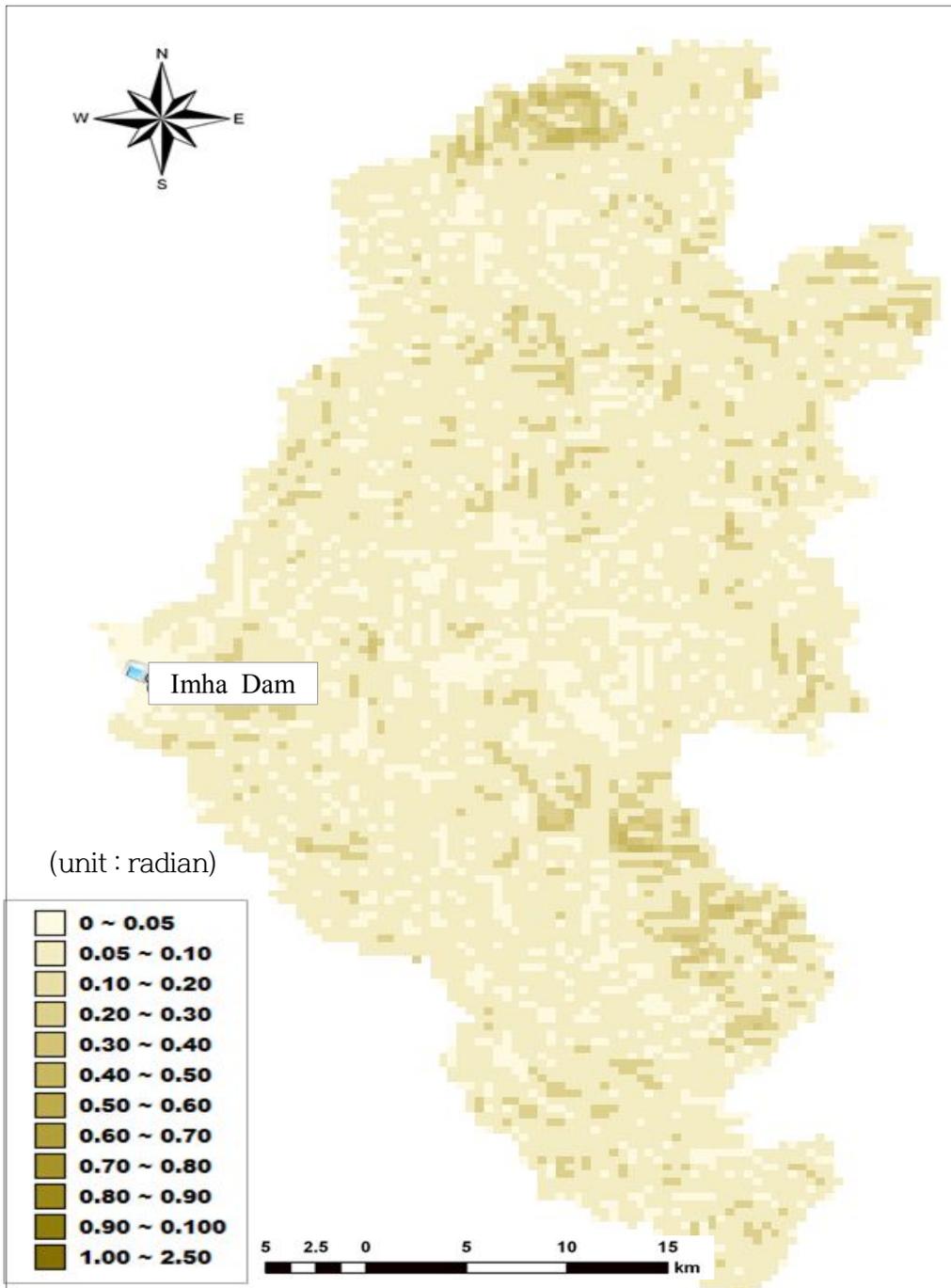


Figure 4.6 Basin slope map of Imha Dam watershed

4.2.2 토양특성 자료

토양, 토지피복자료는 유사량 산정에 매우 중요한 인자로 작용하게 된다. 토양 종류 및 토지피복 형태에 따라 수문태개변수가 각각 적용 된다. 본 연구에서는 Table 4.5 ~ Table 4.7과 같이 Vieux(2004)가 제시한 토지피복에 따른 조도계수, 토양종류에 따른 침투계수 및 유효토심에 따른 토심계수를 각각 적용하였다.

Table 4.5 Roughness coefficient

Class	Land Cover	Roughness Coefficient
1	Water Area	0.030
2	Urbanization	0.015
3	Eroded Land	0.035
4	Marsh	0.050
5	Grassland	0.130
6	Forest	0.100
7	Paddy Field	0.050
8	Cropland	0.035

(Source : Vieux, 2004)

Table 4.6 Green-Ampt infiltration coefficient

Class	Description	Effective porosity	Wetting front suction head (cm)	Saturated hydraulic conductivity (cm/hr)
1	Sandy Loam/Sands	0.415	7.980	6.435
2	Clay Loam/Silty Clay Loam	0.371	24.090	0.100
3	Sandy Loam (with gravels)	0.412	11.010	1.090
4	Sandy Loam/Clay	0.399	21.320	0.560
6	Silty Clay Loam/Clay	0.409	29.465	0.065
7	Clay Loam/Clay	0.347	26.255	0.065
14	Sandy Loam/Clay Loam	0.361	15.945	0.595
15	Clay Loam (with gravels)	0.309	20.880	0.100
16	Clay Loam/Silt	0.393	18.780	0.375
17	Clay Loam	0.309	20.880	0.100
49	Rocky Land	0.010	0.000	0.000

(Source : Vieux, 2004)

Table 4.7 Soil depth coefficient

Class	Description	Soil depth (cm)
1	Very deep	200
2	Very deep/deep	175
3	Deep	150
4	Moderate/deep	125
5	Moderate	100
6	Shallow/moderate	75
7	Shallow	50
8	Very shallow	25
49	Rocky land	10

(Source : Vieux, 2004)

가. 합천댐 유역

합천댐 유역에 대한 토지피복, 토양종류 및 토심도를 Figure 4.7 ~ 4.9에 각각 나타내었다. 토지피복은 산지 형태가 주로 분포되어 있고, 토양 종류는 사양질 내지 식양질 형태가 주로 분포되어 있으며, 유효토심은 얇음 형태가 주로 분포되어 있다.

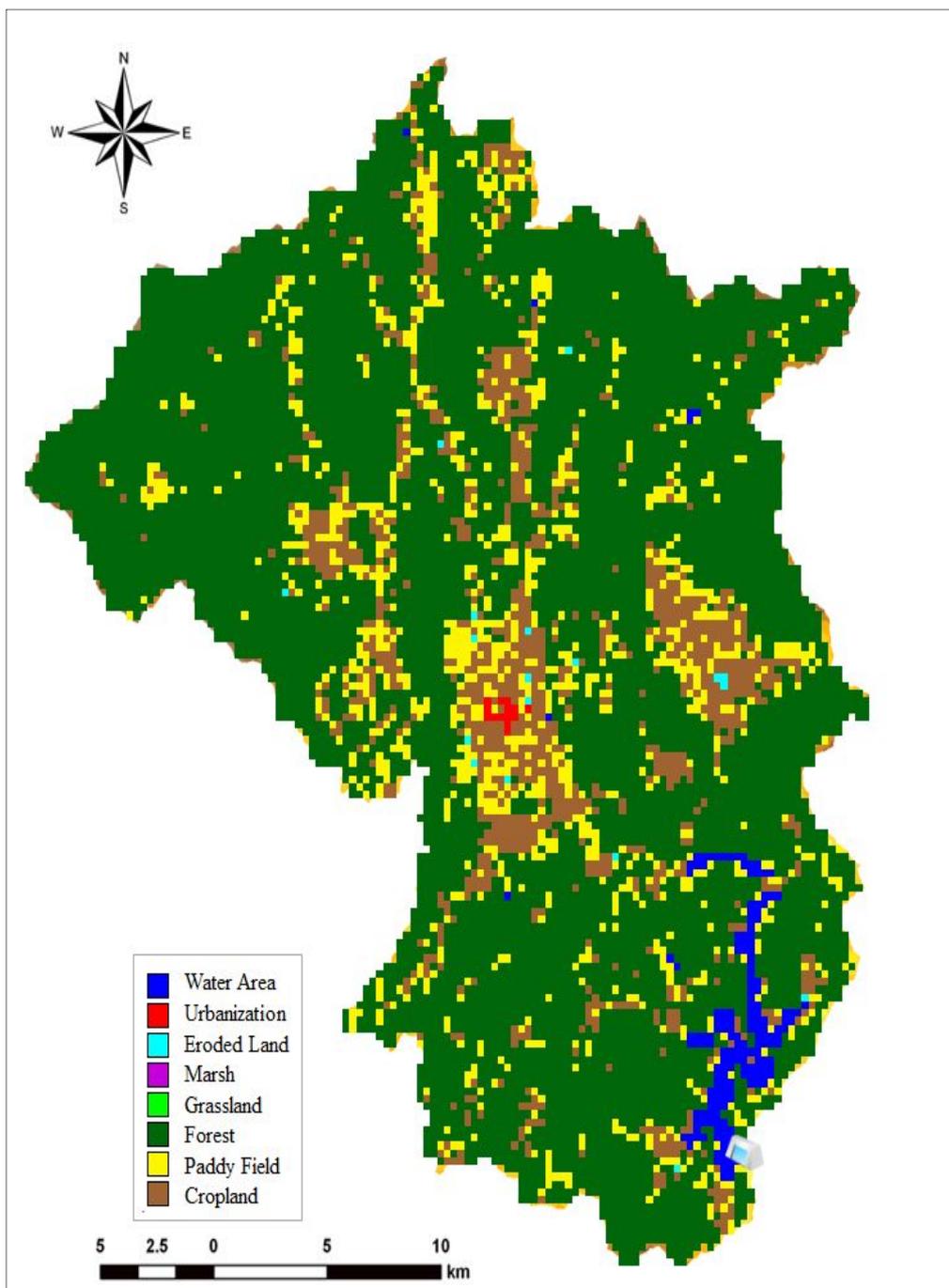


Figure 4.7 Land use map of Hapcheon Dam watershed

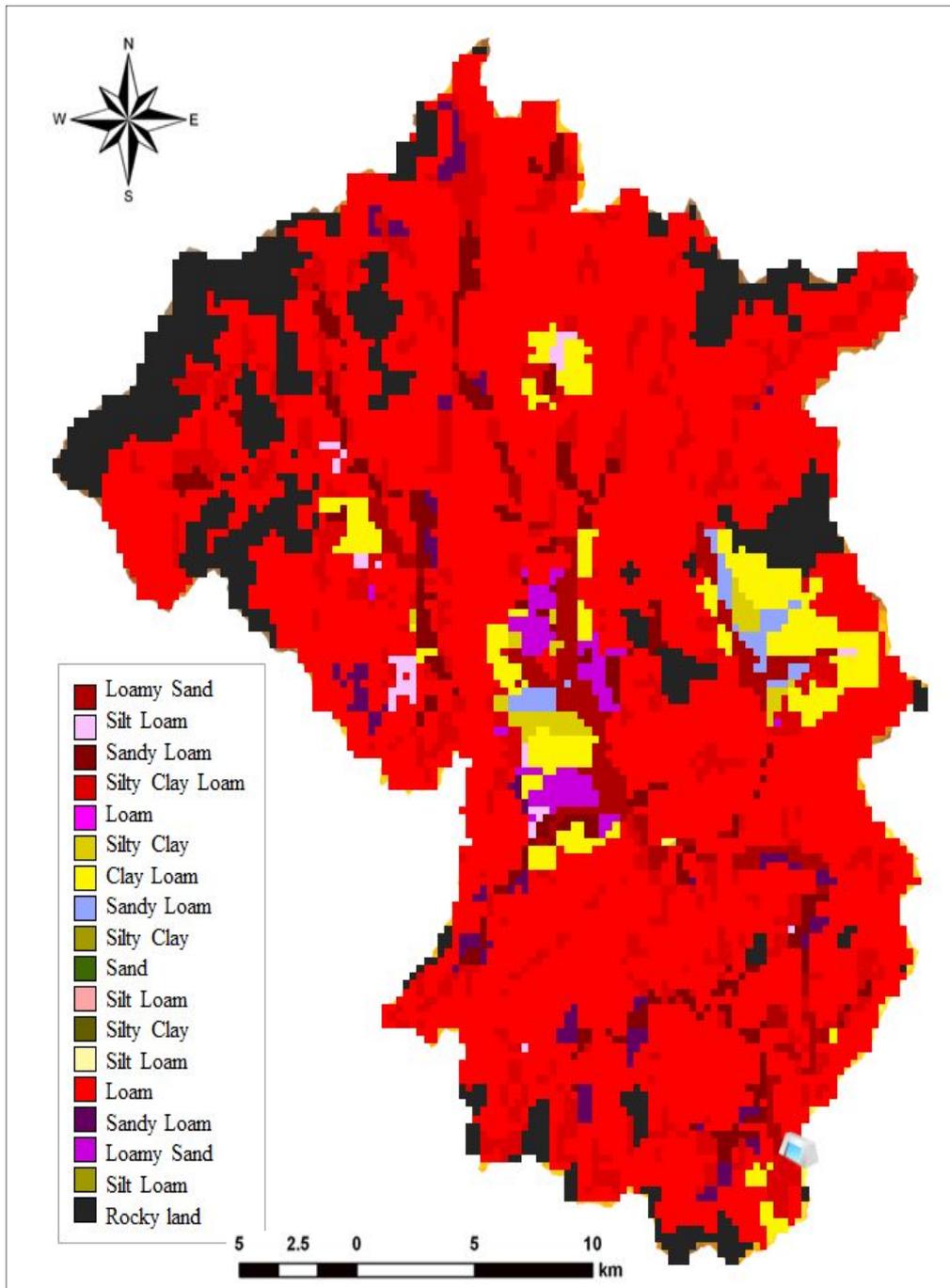


Figure 4.8 Soil map of Hapcheon Dam watershed

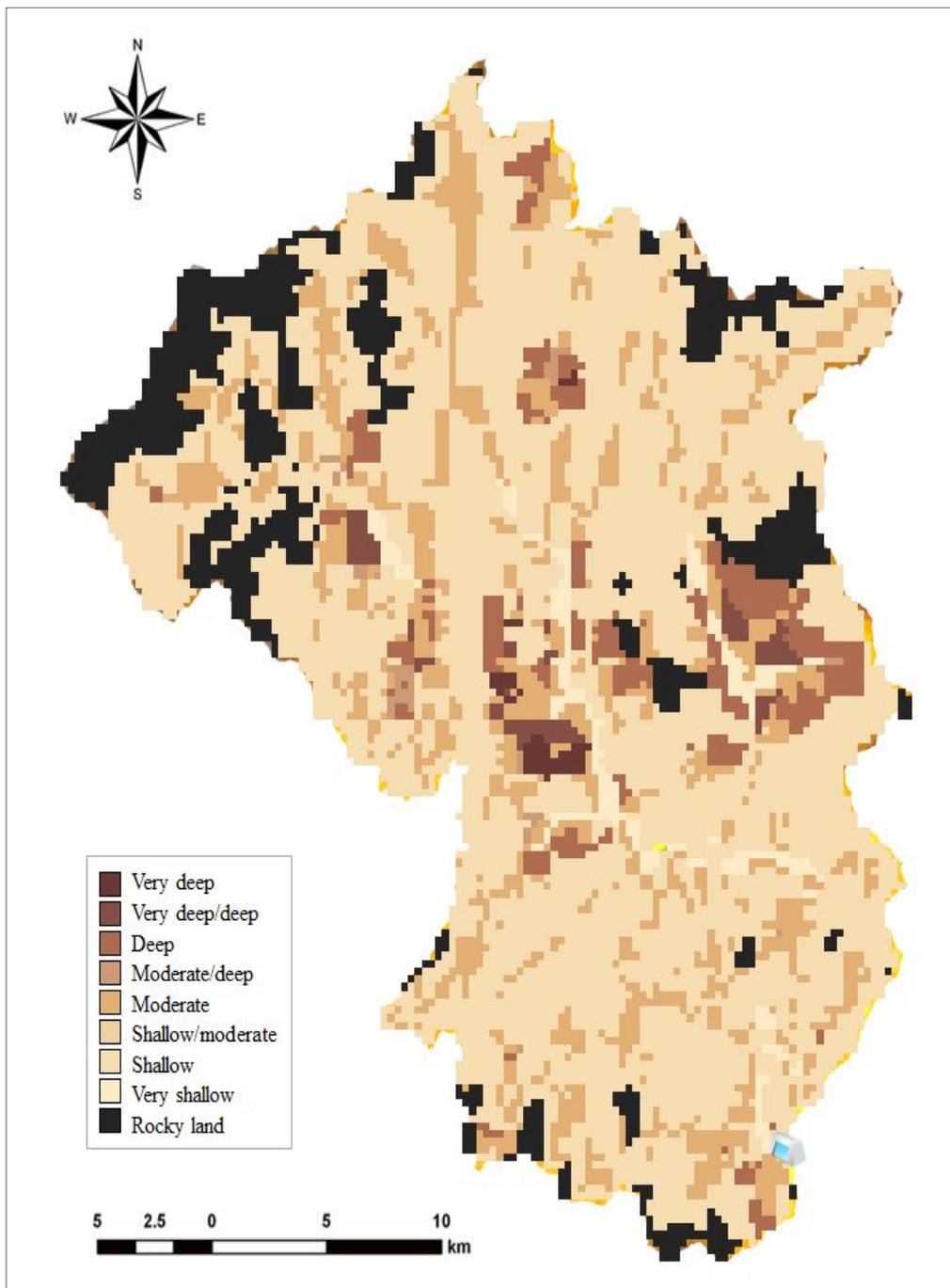


Figure 4.9 Soil depth map of Hapcheon Dam watershed

나. 임하댐 유역

임하댐 유역에 대한 토지피복, 토양종류 및 토심도를 Figure 4.10 ~ 4.12에 각각 나타내었다. 토지피복은 산지 형태가 주로 분포되어 있다. 토양 종류는 사양질 내지 식양질 형태가 주로 분포되어 있으며, 유효토심은 얇음 형태가 주로 분포되어 있다.

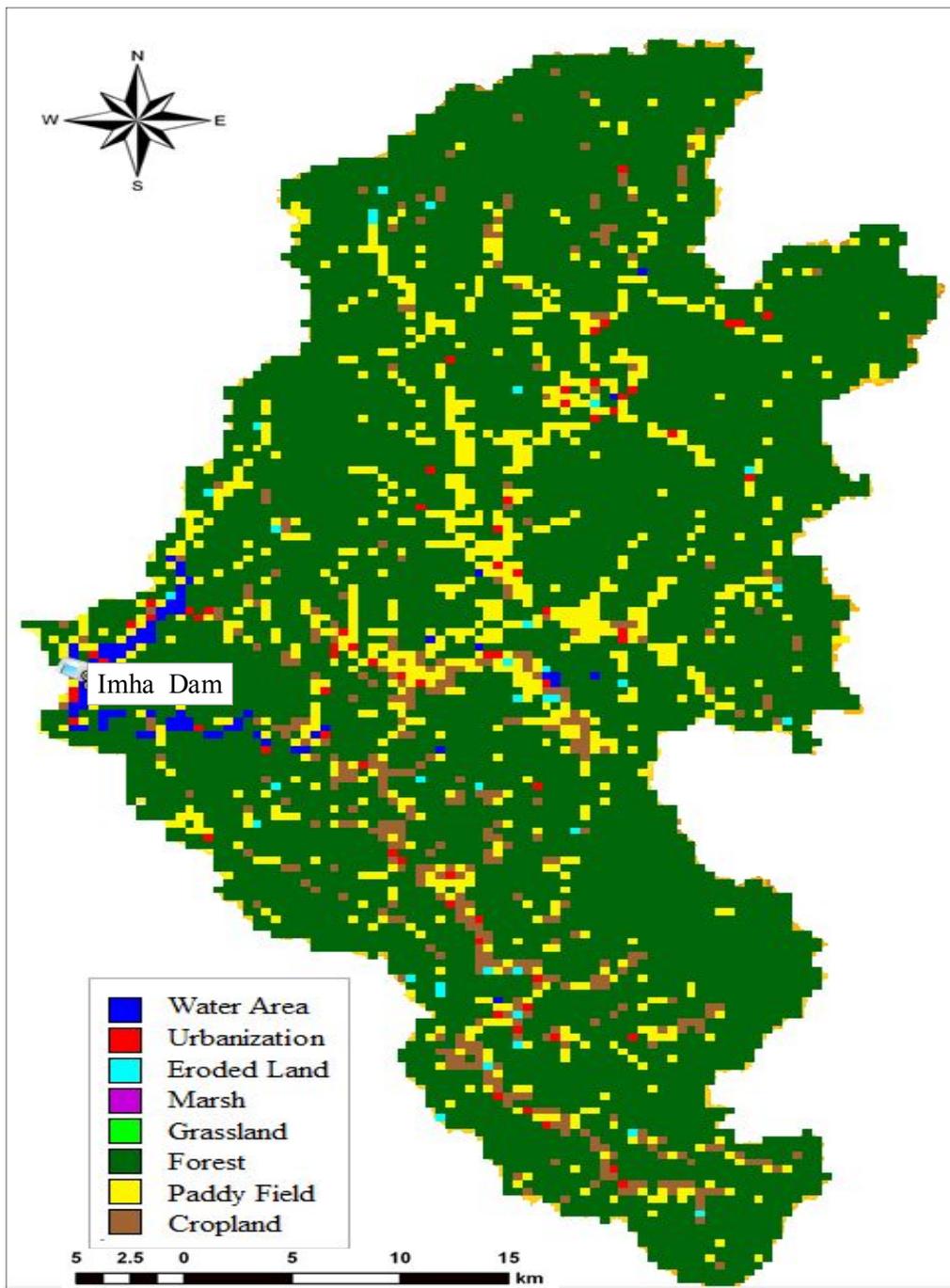


Figure 4.10 Land use map of Imha Dam watershed

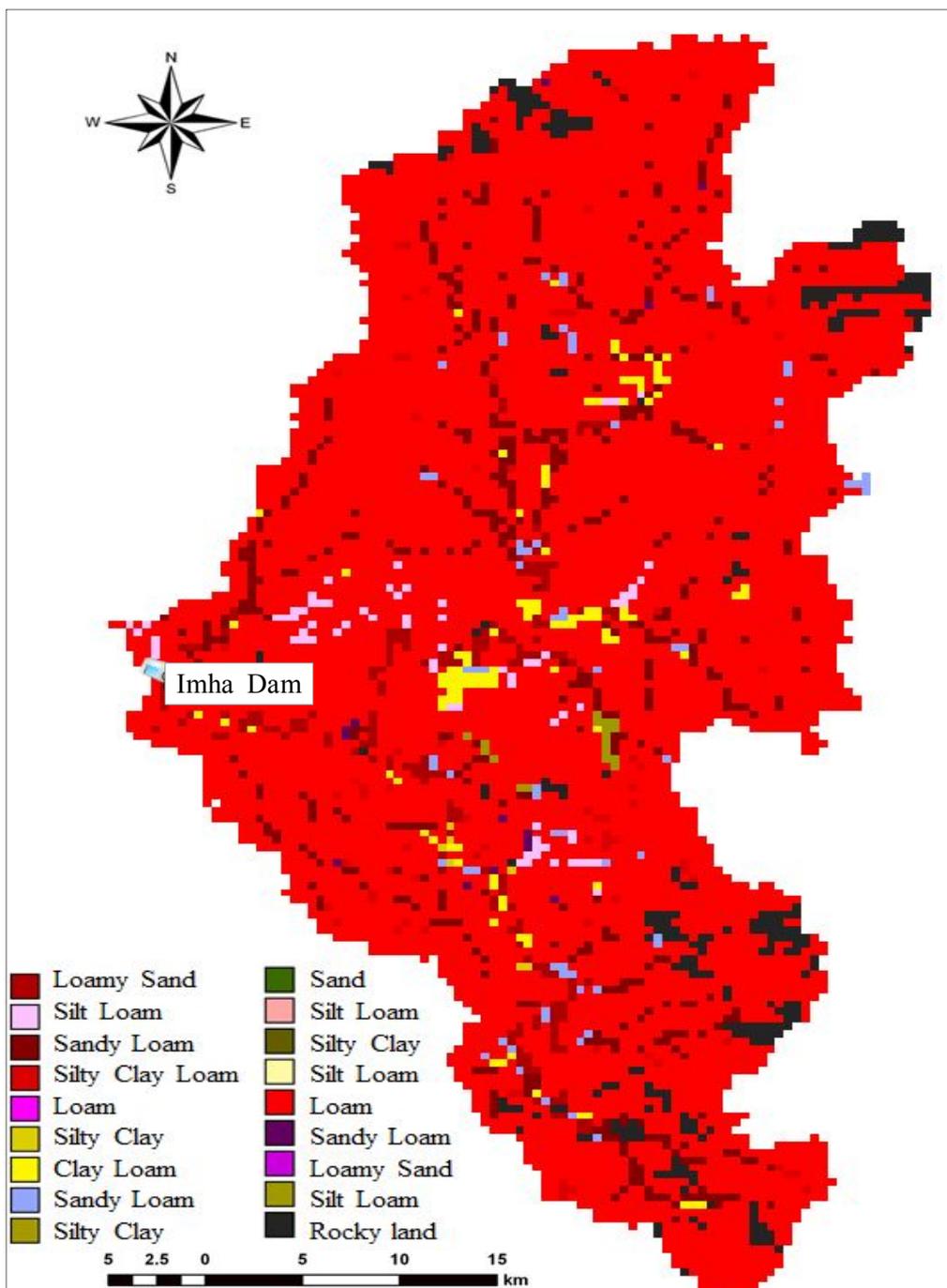


Figure 4.11 Soil map of Imha Dam watershed

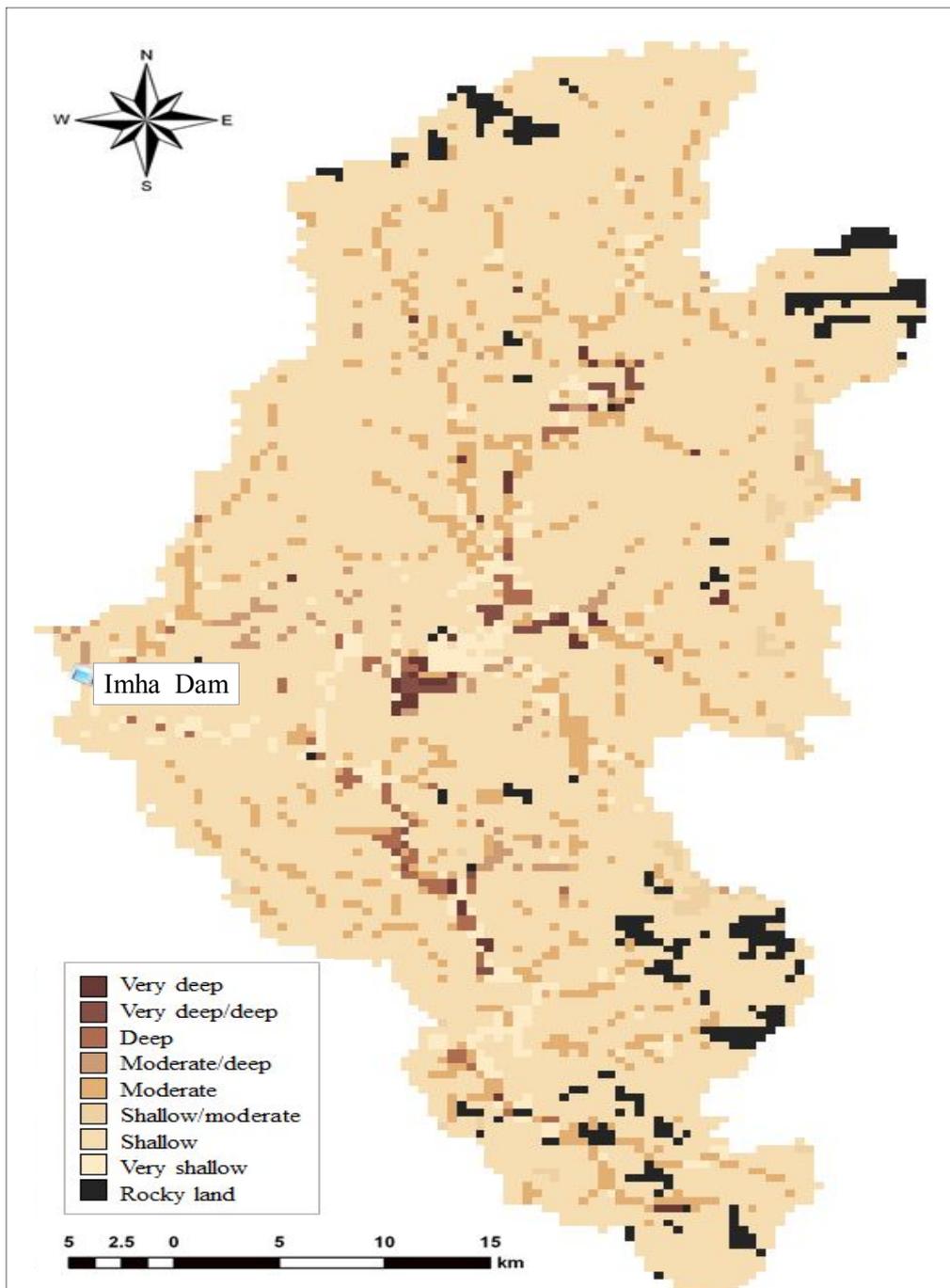


Figure 4.12 Soil depth map of Imha Dam watershed

4.2.3 강우-유출량 분석

본 연구에서는 유출량 분석을 위해 2010년과 2011년 호우사상이 있는 기간을 대상으로 선정하였다. 이는 대상구역에서 공식적인 유사량 측정을 수행하였고, 유사량 측정기간을 포함하여 유출분석을 수행하기 위하여 동일한 연도를 대상으로 선정하였다.

댐별 2개의 기간에 대해 모의를 수행하였으며 세부사항은 Table 4.8에 나타내었다.

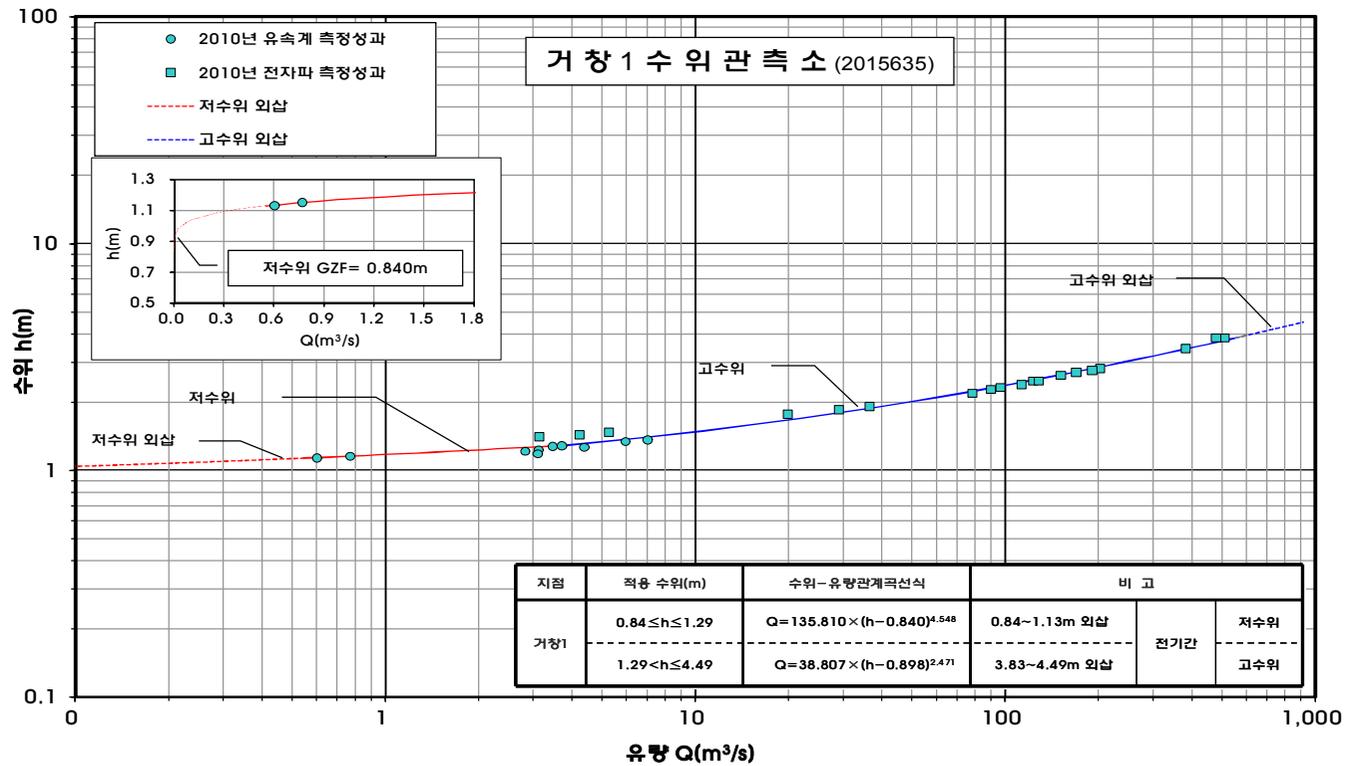
Table 4.8 Simulation conditions

Case	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Site	Hapcheon Dam		Imha Dam	
Simulation Period	July 2010 ~ September 2010	March 2011 ~ December 2011	February 2010 ~ September 2010	January 2011 ~ December 2011
Station	Geochang1	Geochang2	Yeongyang	Dongcheon

강우유출 모형은 강우에 대해 유역 전체의 유출량을 산정하기 때문에 지점별 관측 수위를 수위-유량 관계곡선식(Rating curve)를 이용하여 유량으로 환산하여 비교하여야 한다. 이를 위해 한국수문조사연보(국토해양부, 2011)에서 각 수위관측소 지점별 대상기간의 수위-유량 관계곡선식을 조사하였으며 Table 4.9와 Figure 4.13 ~ 4.17에 나타내었다.

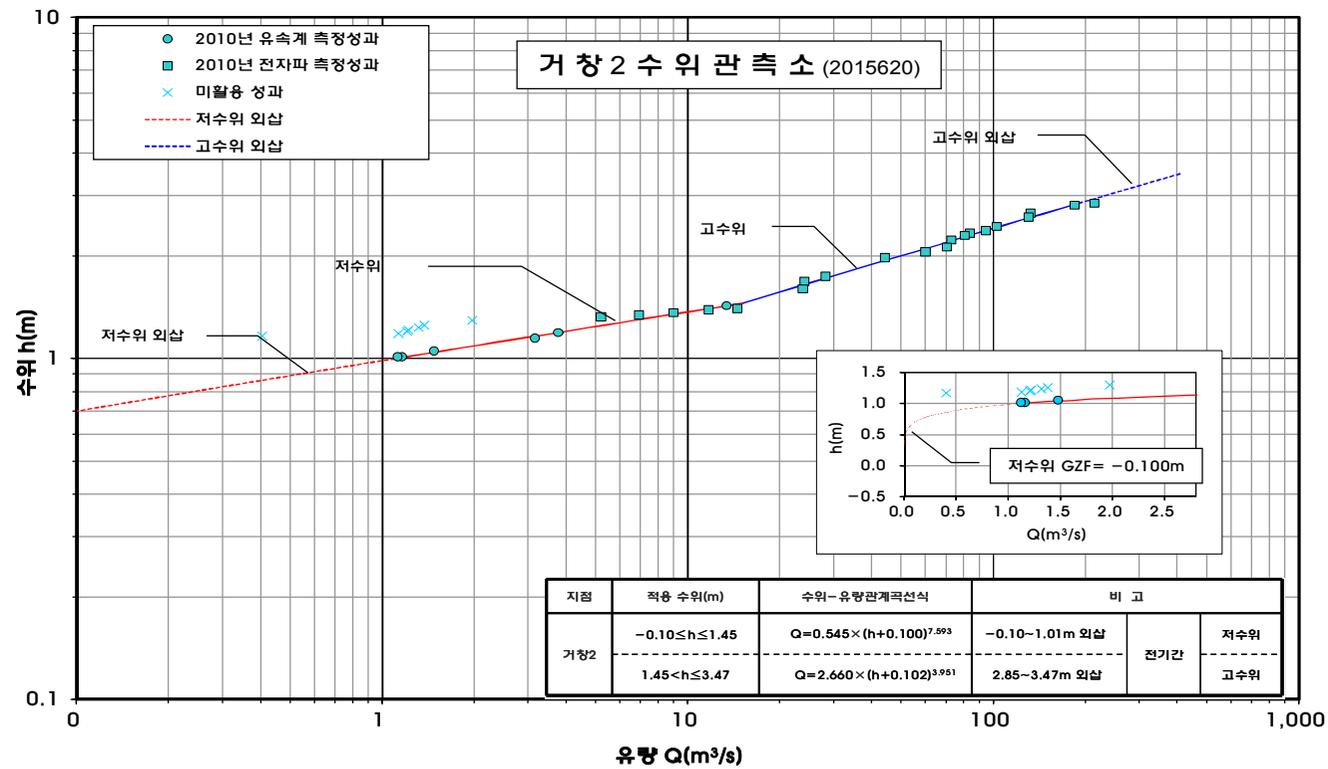
Table 4.9 Rating curve of water level stations

Year	Station	Water Level	Rating Curve	Note
2010	Geochang1	$0.84 \leq h \leq 1.29$	$Q = 135.810 \times (h - 0.840)^{4.548}$	0.84~1.13m (Extrapolation)
		$1.29 < h \leq 4.49$	$Q = 38.807 \times (h - 0.898)^{2.471}$	3.83~4.49m (Extrapolation)
	Geochang2	$-0.10 \leq h \leq 1.45$	$Q = 0.545 \times (h + 0.100)^{7.593}$	-0.10~1.01m (Extrapolation)
		$1.45 < h \leq 3.47$	$Q = 2.660 \times (h + 0.102)^{3.951}$	2.85~3.47m (Extrapolation)
	Yeongyang	$0.46 \leq h \leq 2.21$	$Q = 25.226 \times (h - 0.460)^{2.374}$	0.46~0.59m (Extrapolation)
		$2.21 < h \leq 2.85$	$Q = 26.924 \times (h - 0.275)^{1.923}$	2.60~2.85m (Extrapolation)
2011	Geochang2	$0.80 \leq h \leq 1.70$	$Q = 33.098 \times (h - 0.800)^{2.025}$	0.80~0.94m (Extrapolation)
		$1.70 < h \leq 4.98$	$Q = 41.639 \times (h - 0.870)^{2.407}$	3.36~4.98m (Extrapolation)
	Dongcheon	$0.63 \leq h \leq 1.47$	$Q = 15.569 \times (h - 0.630)^{3.921}$	0.63~0.90m (Extrapolation)
		$1.47 < h \leq 2.80$	$Q = 11.646 \times (h - 0.580)^{3.454}$	
		$2.80 < h \leq 4.50$	$Q = 17.745 \times (h - 0.489)^{2.600}$	4.00~4.50m (Extrapolation)



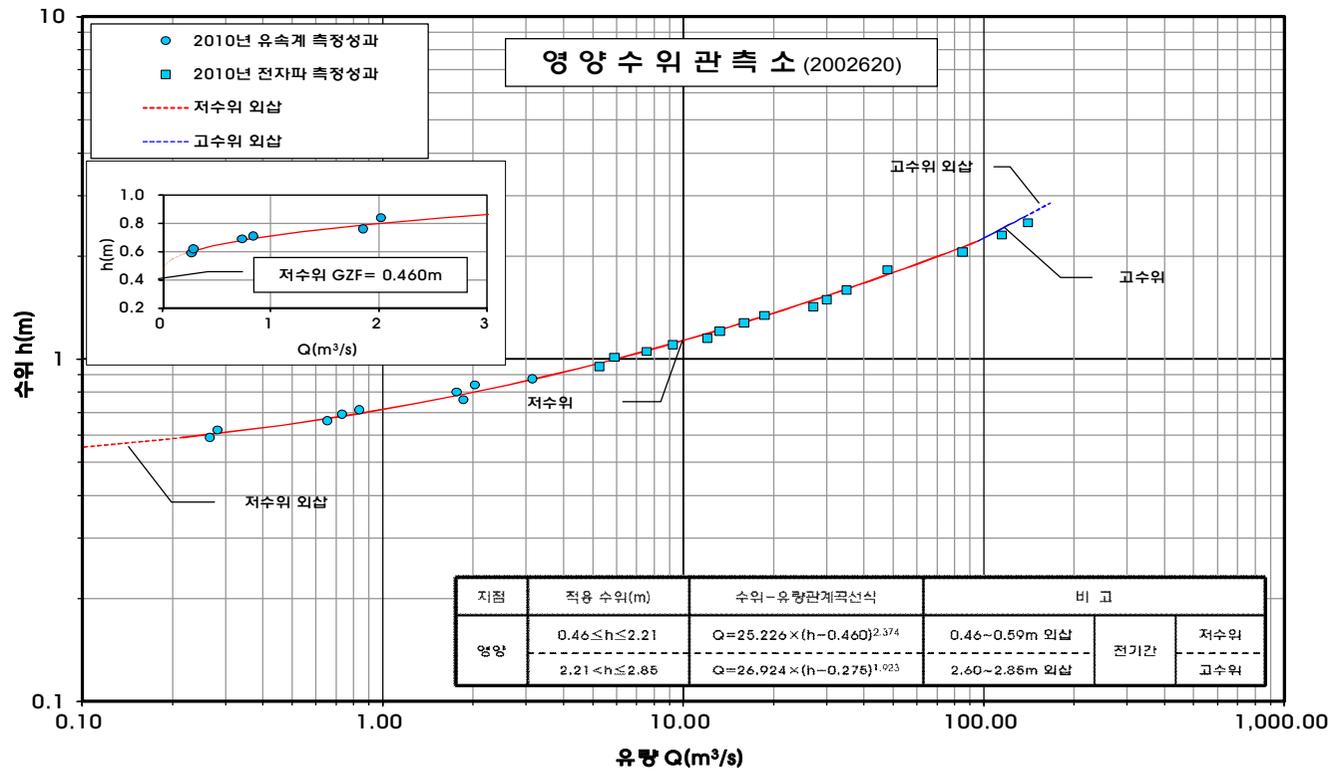
(Source : MOLIT, 2011)

Figure 4.13 Stage-discharge relation at Geochang 1 station in 2010



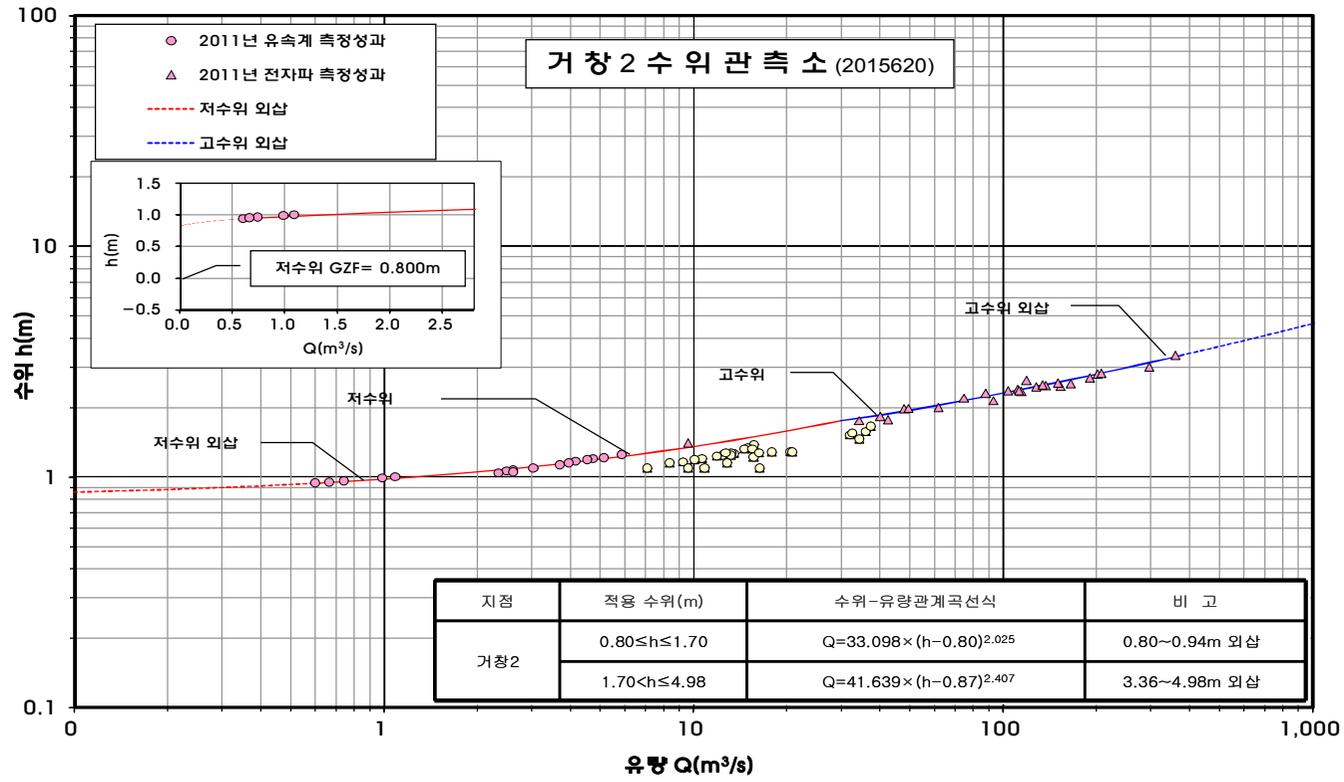
(Source : MOLIT, 2011)

Figure 4.14 Stage-discharge relation at Geochang 2 station in 2010



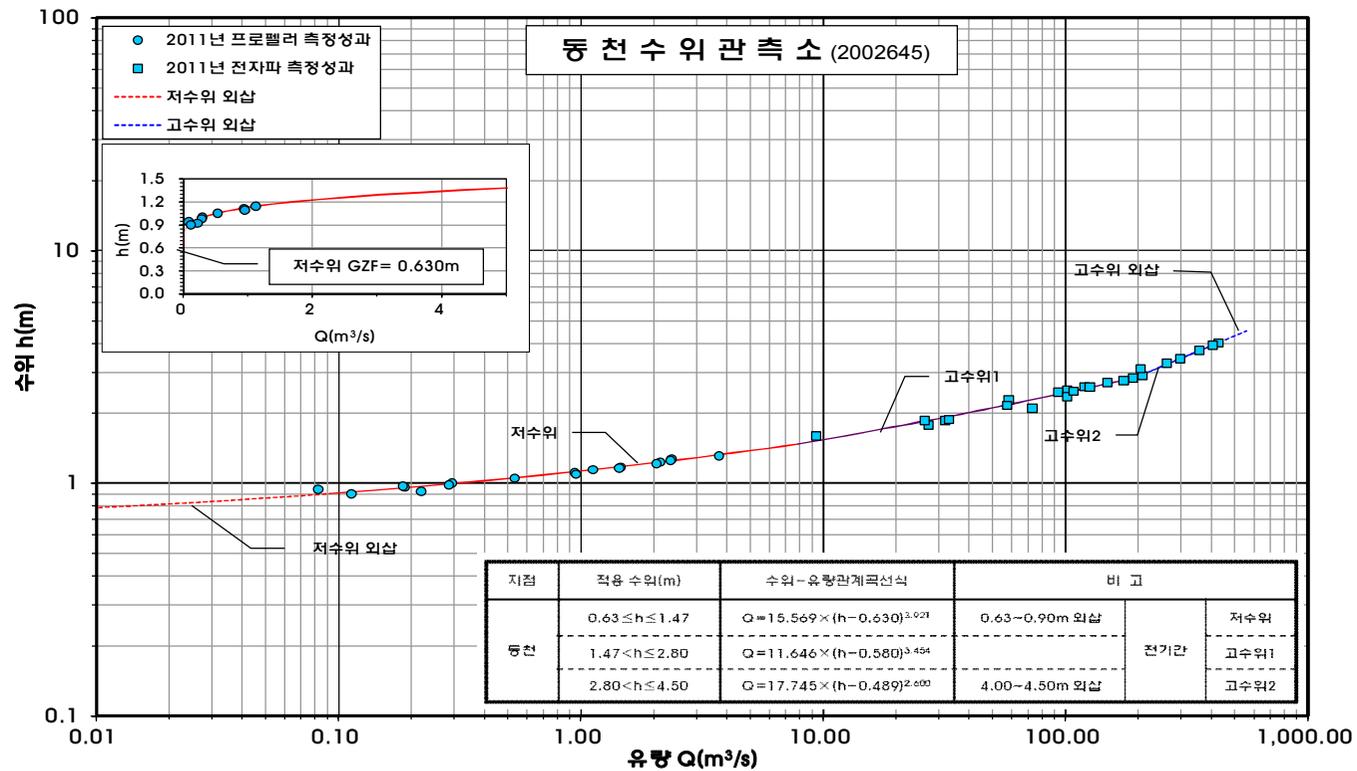
(Source : MOLIT, 2011)

Figure 4.15 Stage-discharge relation at Yeongyang station in 2010



(Source : MOLIT, 2011)

Figure 4.16 Stage-discharge relation at Geochang 2 station in 2011



(Source : MOLIT, 2011)

Figure 4.17 Stage-discharge relation at Dongcheon station in 2011

4.2.4 유역 유사량 분석

합천댐과 임하댐을 대상으로 유사량 산정을 위해 본 연구에서 개발한 유사 분석 기능을 적용하였으며, 분석결과와 관측결과를 비교하기 위해서는 유사량 관측정보가 확보되어야 한다. 본 연구에서는 기존에 댐 유역 상류에서 관측된 유사량 자료를 이용하여 비교 후 분석 하였다.

가. 합천댐 유역

합천댐 유역 상류에 위치한 거창1 수위관측소에서 유량 및 유사량 관측은 2010년 7월에서 9월까지 총 15회 측정을 하였고, 거창2 수위관측소에서는 2011년 3월에서 12월까지 총 19회에 걸쳐 측정을 하였으며 관측시간별 자료는 Table 4.10 ~ 4.11에 나타내었다.

Table 4.10 Observed discharge and sediment at Geochang 1 station

Time (dd-mm-yy hh:mm)	Discharge (m ³ /sec)	Sediment (ton/day)
11-July-2010 15:30	169.2	10,302.3
11-July-2010 18:35	151.0	7,584.8
11-July-2010 20:50	122.9	6,671.8
12-July-2010 10:27	29.1	979.6
12-July-2010 14:38	19.9	505.9
14-July-2010 15:18	3.1	68.8
10-Aug-2010 16:55	78.3	4,786.1
10-Aug-2010 19:00	89.8	5,202.4
11-Aug-2010 07:07	508.1	33,491.5
11-Aug-2010 12:40	381.9	22,388.4
22-Aug-2010 11:03	4.2	63.9
02-Sep-2010 00:13	36.5	1,349.7
02-Sep-2010 03:12	478.2	31,536.3
02-Sep-2010 10:13	190.4	10,310.1
16-Sep-2010 18:55	5.3	157.6

Table 4.11 Observed discharge and sediment at Geochang 2 station

Time (dd-mm-yy hh:mm)	Discharge (m ³ /sec)	Sediment (ton/day)
29-Mar-2011 13:30	0.7	4.8
05-Apr-2011 15:00	0.7	6.6
25-June-2011 20:14	34.3	560.3
26-June-2011 15:00	61.7	1,774.0
25-June-2011 19:30	103.5	2,216.7
09-July-2011 13:40	92.8	2,400.9
10-July-2011 21:25	359.5	21,119.5
11-July-2011 10:30	112.1	2,428.7
27-July-2011 13:40	10.8	29.9
27-July-2011 21:00	13.2	55.2
28-July-2011 16:30	8.3	22.1
01-Aug-2011 22:40	15.6	878.6
02-Aug-2011 08:15	16.3	228.1
02-Aug-2011 13:20	20.8	375.9
07-Aug-2011 14:20	7.1	77.6
08-Aug-2011 03:55	118.6	1,275.7
08-Aug-2011 14:30	34.2	140.0
01-Dec-2011 13:30	4.0	216.1
02-Dec-2011 12:03	2.8	153.4

나. 임하댐 유역

임하댐 유역 상류에 위치한 영양 수위관측소에서 유량 및 유사량 관측은 2010년 5월에서 9월까지 총 9회 측정을 하였고, 동천 수위관측소에서는 2011년 5월에서 11월까지 총 12회에 걸쳐 측정을 하였으며 관측시간별 자료는 Table 4.12 ~ 4.13에 나타내었다.

Table 4.12 Observed discharge and sediment at Yeongyang station

Time (dd-mm-yy hh:mm)	Discharge (m ³ /sec)	Sediment (ton/day)
17-May-2010 15:40	0.3	1.4
10-July-2010 19:10	0.7	5.4
11-July-2010 18:00	5.2	40.0
11-July-2010 21:00	13.2	208.7
12-July-2010 12:00	9.2	103.9
11-Aug-2010 12:10	15.9	266.9
11-Aug-2010 15:50	47.6	1,886.1
11-Aug-2010 20:50	139.8	19,485.7
10-Sep-2010 15:50	3.2	241.6

Table 4.13 Observed discharge and sediment at Dongcheon station

Time (dd-mm-yy hh:mm)	Discharge (m ³ /sec)	Sediment (ton/day)
31-May-2011 12:00	1.0	351.6
14-June-2011 11:00	0.2	1.5
24-June-2011 17:35	355.8	26,196.9
24-June-2011 18:50	404.2	30,643.3
25-June-2011 07:55	93.0	4,596.1
11-July-2011 11:50	31.8	1,306.5
11-July-2011 18:05	125.8	12,380.0
12-July-2011 02:00	72.9	5,014.9
18-Aug-2011 00:00	58.2	2,086.2
18-Aug-2011 09:38	203.2	20,501.5
18-Aug-2011 22:00	33.0	611.8
14-Oct-2011 10:00	0.2	71.0

관측된 유수량 자료와 유량자료를 이용하여 각 관측소별 유량-유수량 관계를 분석한 결과 결정계수(R^2)가 0.8 이상으로 매우 양호한 수준으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 유량-유수량 관계식을 이용하여 본 연구에서 개발된 유수량 산정기법의 정확도를 비교 평가하기에 적절하다고 판단된다.

유수량 관측지점별 유량-유수량 관계식을 Table 4.14에 나타내었다.

Table 4.14 Discharge–sediment relation in Hapcheon & Imha Dam watershed

Class	Geochang1	Geochang2	Yeongyang	Dongcheon
Sediment rating curve (year)	$15.138 * Q^{1.2505}$ (2010)	$9.3736 * Q^{1.1533}$ (2011)	$8.3813 * Q^{1.4226}$ (2010)	$71.056 * Q^{0.9688}$ (2011)
R ²	0.9928	0.8047	0.9249	0.8496

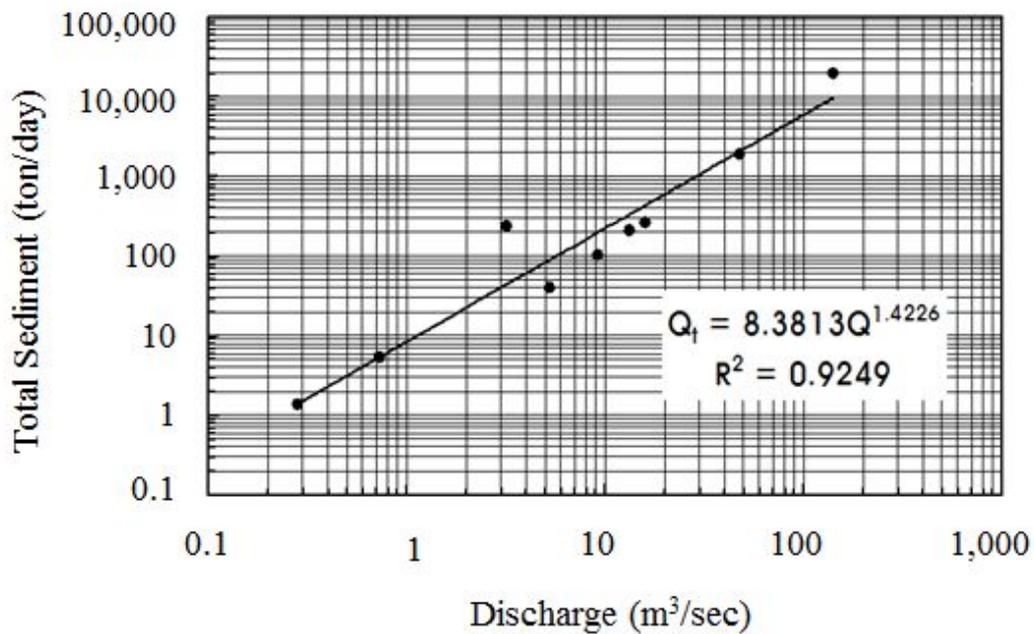


Figure 4.18 Discharge–sediment relation at Yeongyang station

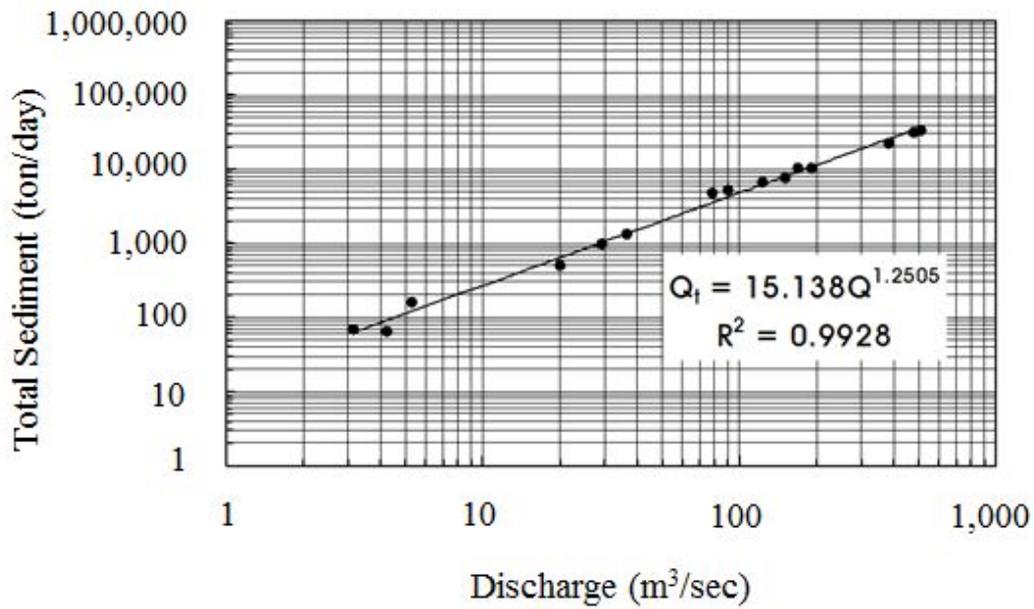


Figure 4.19 Discharge-sediment relation at Geochang 1 station

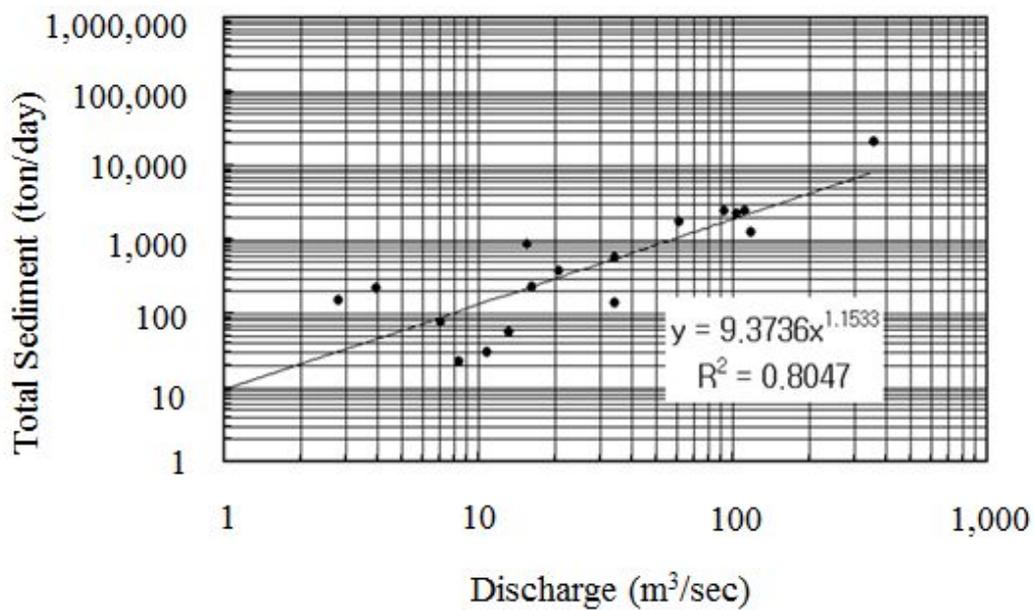


Figure 4.20 Discharge-sediment relation at Geochang 2 station

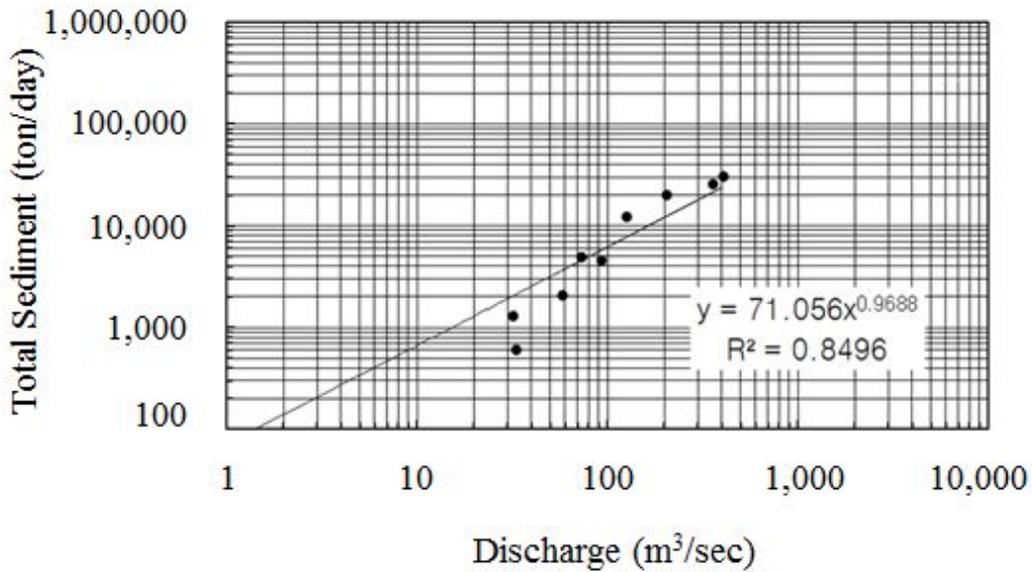


Figure 4.21 Discharge-sediment relation at Dongcheon station

4.2.5 저수지 퇴사 분석

본 연구에서는 유입된 유사로 인한 저수지내 퇴사분포를 조사·분석하고, 2차원 수치모형 SED2D를 통해 저수지 퇴사분포를 검토하여 향후 저수지 운영의 기초자료로 제공하려고 한다. 본 연구 대상지역인 합천댐의 주요 제원은 Table 4.15와 같다. 합천댐을 대상지역으로 선정한 이유는 K-water에서 저수지 퇴사영향 분석을 위해 1회/10년 주기로 실측한 수심자료와 지형자료가 구축되어 있고, 2차원 수치모의시 필요한 수위, 유량, 유사량 관측 자료의 확보가 가능하기 때문이다.

합천댐 유역의 지형자료는 K-water에서 2001, 2012년 수행한 합천댐 퇴사량 측량용역시 실측한 정사영상, 수치지도, LiDAR 측량 자료, 수심자료를 확보하여 이용하였다. 2001년 퇴사량 측량용역 자료의 형태는 합천댐 상류유역부터 합천댐 까지 24km 구간을 실측한 자료로 육상측량과 항공측량, 수심측

량으로 세분화 하여 실측한 자료이다. 육상측량은 1급 기준점 1개, 3급 기준점 18개, 4급 기준점 40개로 총 59개의 지상기준점을 설치하여 측량을 수행하였으며, 수심측량은 단빔을 사용하여 유역의 지형적 특성에 따라 400 ~ 500m 간격으로 총 48개 단면으로 나누어 수심값을 취득하였다. 2012년 퇴사량 측량 자료는 정밀한 수치표고 자료 및 수심측량 자료를 확보하기 위하여 LiDAR 항공측량 및 음파생성 기법 장비인 멀티빔 시스템(Seabat 8125) 장비를 도입하여 1×1m 격자의 정밀한 지형자료를 확보하고 있다(Figure 4.22). 이에 본 연구에서는 K-water에서 수행한 2001년, 2012년 자료를 확보하고 수치화하여 적용하였다.

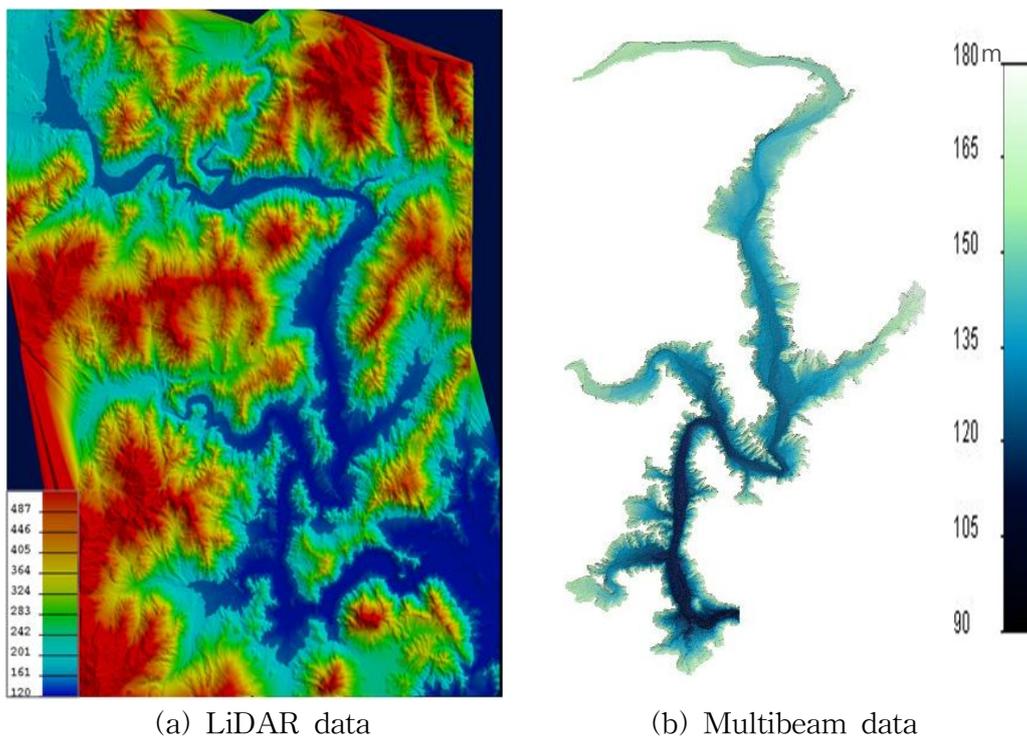
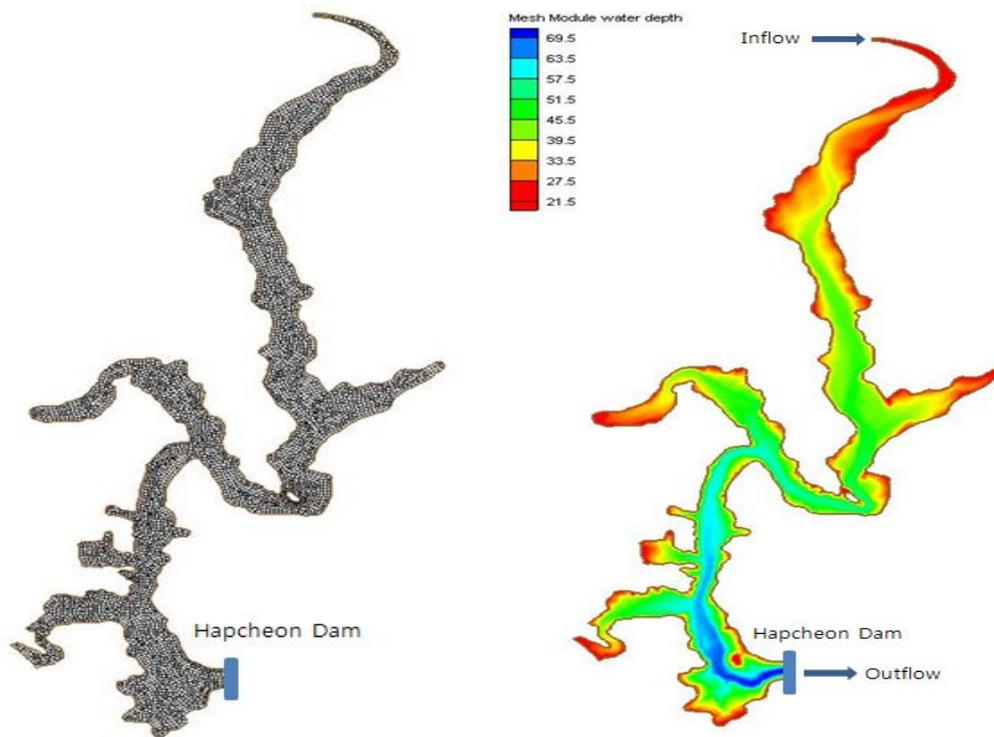


Figure 4.22 LiDAR data and multibeam data

모형에 적용한 저수지의 총 길이는 약 16km, 최대하폭 1.2km 최소하폭 50m, 최대수심 70m이며, 격자의 구성은 Element 6,451개 Node 16,917개의 삼각형 격자로 황강 본류와 지류 하천 2개 구획으로 구분하여 구축하였다. 구성된 격자망과 수심도를 Figure 4.23에 나타내었다.



(a) Grid generation of SMS model (b) Study area bathymetry

Figure 4.23 Model grid and bathymetry

Table 4.15 Characteristics of Hapcheon Dam

Characteristics	Unit	Value
Drainage area	km ²	1,329
Channel length	km	63
Maximum water level	EL.m	179
Normal high water level	EL.m	176
Effective storage	m ³	560 × 106
Flood control storage	m ³	80 × 106
Mean depth	m	40

또한 적용모형의 검증에 위하여 Figure 4.24와 같이 합천댐 퇴사량 조사시 댐 상류에서 퇴적층의 코어채취조사를 실시한 자료를 활용하였다. 코어 채취 지점의 선정은 과거 2001년 퇴사량 조사시 수행한 지층조사 지점 및 탄성과 조사 지점에서 접근이 용이한 지점을 선정하여 수행하였으며, 시료교란에 대한 오차를 최소화하기 위하여 동일지점에서 2회 이상 코어채취를 수행하였다. 채취한 코어는 2001년 수행한 지층조사 및 탄성과 조사 자료인 지층별 분포 상태, 주상도, 토질분류, 흙의 색조 등을 비교 분석하여 원지반과 퇴적 지반을 구분하였다.



Figure 4.24 Sedimentation survey in Hapcheon Dam watershed

4.2.6 정확도 평가

유출량 모의결과와 관측값의 시계열 자료 비교를 통해 유출량 모의 경향이 관측값과 유사한 것으로 판단되었으나, 보다 정량적인 평가 기법을 활용하여 모형의 성능을 평가하고자 한다.

평가에 활용된 기법은 유출분석 평가에 주로 사용되는 결정계수(Coefficient of determination)와 Moriasi *et al.*(2007)가 제시한 유역 유출모형별 성능평가

기법을 사용하였다. Moriasi *et al.*(2007)는 월단위 관측자료와 모형의 모의결과를 토대로 통계기법을 적용하였다. Table 4.16과 같이 결과에 따라 4단계인 매우 좋음(very good), 좋음(good), 충분함(satisfactory), 불충분함(unsatisfactory)으로 구분하였다. 본 연구에서도 Moriasi *et al.*(2007)이 모형 평가에 적용한 무차원 지수인 효율성 지수(NSE, Nash-Sutcliffe efficiency)와 지시오차 통계기법인 평균편차의 비율(PBIAS, percent bias), 그리고 평균제곱근오차 대 관측값 표준편차 비율(RSR, RMSE-observations standard deviation ratio)을 사용하였다. 각각의 평가항목에 대한 산출식은 다음과 같다.

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{cal})^2}{\sum(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (5.1)$$

$$PBIAS = \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{cal}) \times 100}{\sum Q_{obs}} \quad (5.2)$$

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum(Q_{obs} - Q_{cal})^2}}{\sqrt{\sum(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2}} \quad (5.3)$$

여기서, Q_{obs} 는 관측유량(m^3/sec), Q_{cal} 는 계산유량(m^3/sec), \bar{Q}_{obs} 는 평균 관측유량(m^3/sec)이다.

Table 4.16 Performance evaluation standard of numerical analysis model

Performance Rating	NSE	PBIAS (%)	RSR
Very good	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$PBIAS < \pm 10$	$0.00 < RSR \leq 0.50$
Good	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$0.50 < RSR \leq 0.60$
Satisfactory	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$	$0.60 < RSR \leq 0.70$
Unsatisfactory	$NSE \leq 0.50$	$\pm 25 \leq PBIAS$	$0.70 < RSR$

(Source : Moriasi et al., 2007)

4.3 연구방법

본 연구는 분포형 강우-유출모형(K-DRUM)을 이용하여 유역의 유출량을 산정하고 유사량 산정기능을 개발하여 대상유역에 적용성을 검증하는 것을 목적으로 하며 다음 절차에 따라 연구를 수행하였다.

1. 분포형 강우-유출모형(K-DRUM) 모형을 활용하여 유사산정 모듈 개발
 - 가. 유역 유사량 산정 모형에 대한 자료를 수집한다.
 - 나. K-DRUM 모형의 구조를 분석하여 유역 유사량 산정을 위한 최적의 방법을 선정한다.
 - 다. 선정된 방법을 기반으로 K-DRUM 모형의 코드를 수정하고 유사량 산정 모듈을 추가한다.
 - 라. 유사량 산정이 가능한 개선된 K-DRUM 모형을 개선한다.

2. 개선된 K-DRUM 모형 검증

- 가. 대상유역을 선정하고 유역 특성을 분석한다.
- 나. 대상유역의 강우 및 수위관측소 정보를 수집하고 수위-유량 관계식을 활용하여 유출량으로 변환하고, 관측 유사량 자료를 수집한다.
- 다. 수집된 자료를 이용하여 유역 유출량 및 유사량 산정을 위해 개선된 K-DRUM 모형 적용한다.
- 라. 계산결과와 관측자료를 비교하여 개선된 K-DRUM 모형의 성능을 검증한다.

3. 개선된 K-DRUM의 저수지 퇴사 업무 적용성 평가

- 가. 적용 대상 저수지의 지형자료를 수집한다.
- 나. 개선된 K-DRUM 모형을 적용하여 유역 유출량 및 유사량을 산정한다.
- 다. 산정된 유역 유출량 및 유사량은 저수지 퇴사모의를 위한 SED2D 모형의 경계조건으로 활용하기 위해 주요지점의 시단위 시계열 유량과 유사농도로 변환한다.
- 라. 저수지 운영 및 유역 유입 조건을 적용하여 퇴사분석을 수행한다.
- 마. 관측된 퇴사분포 자료와 계산된 결과를 비교 분석하여 개선된 분포형 강우-유출모형(K-DRUM)의 퇴사 업무 적용성을 평가한다.

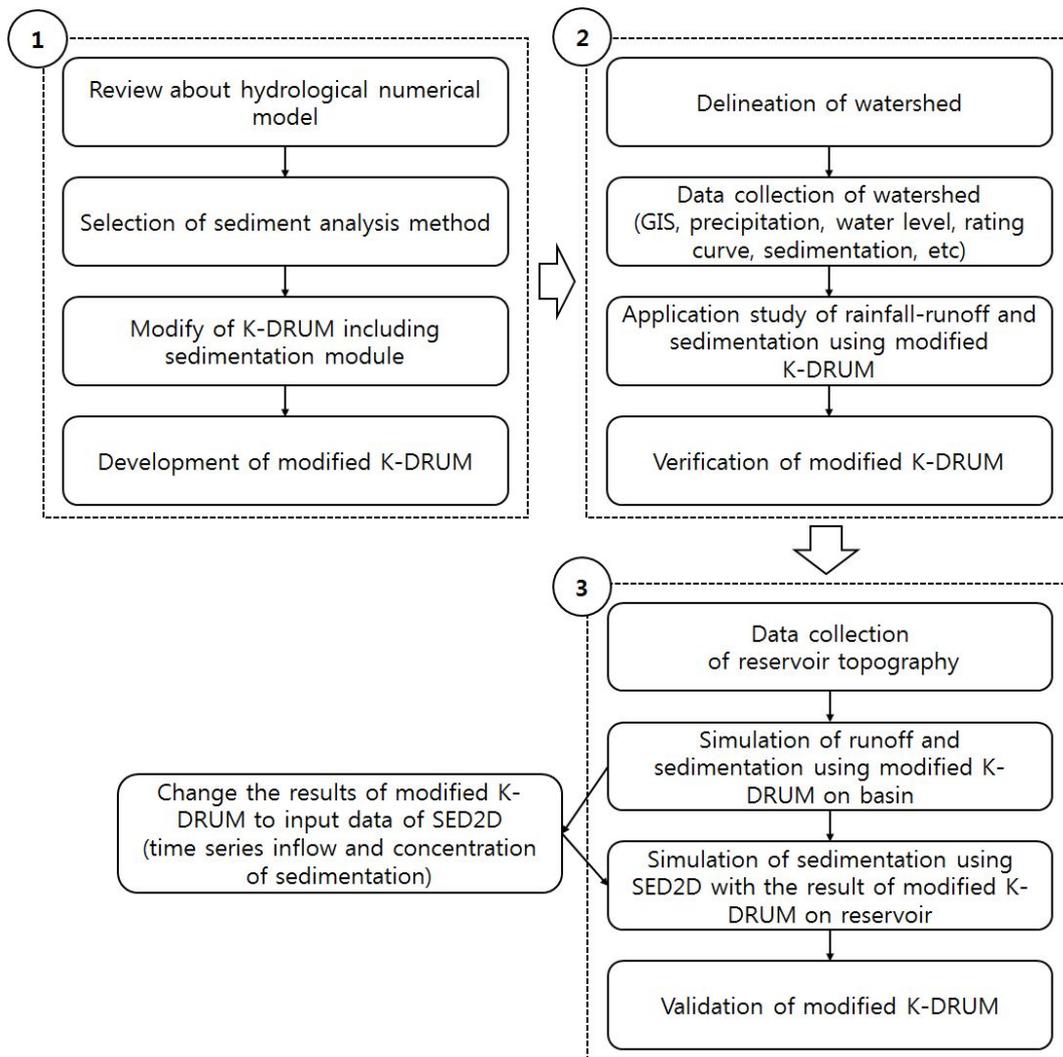


Fig. 4.25 Study flow chart

V. 결과 및 고찰

5.1 유출량 분석 결과

유역 유출량 산정 모형은 유역에 대한 다양한 특성을 기반으로 물리적 방법에 의해 유출을 모의하게 된다. 실제 자연현상에서 발생하는 유출 해석을 위한 완벽한 공학적 기법이 부족하기 때문에 다소의 불확실성을 보완하여 실제의 유출량과 유사한 수준으로 모의하기 위한 수문매개변수 조정이 필요하다. 이를 위해 호우사상을 포함하여 일정 정도의 기간 동안 유출량 분석을 수행하고 관측 유출량과 모의 유출량을 비교하며 매개변수를 조정하게 된다. 매개변수 조정에는 강우 총량에 대한 유출 총량의 비교, 침투 유출량의 발생시간, 수문곡선의 상승과 하강 형태를 기준으로 수행하게 된다. 일반적으로 강우 총량에 대해서는 증발산량과 지하수 거동 등 장기적인 손실량 이외에 단기간에 대한 유출 모의시 손실량이 전체 유출량에 비해 크지 않기 때문에 총량 측면에서는 유사한 수준의 결과를 나타낸다. 침투 유출량 발생시간에 대해서는 조도계수를 조정하여 보정하게 된다. 수문곡선의 상승과 하강 형태에 대해서는 조도계수도 다소의 영향이 있으나 대체적으로 토양내 흐름과 강한 상관관계를 가지고 있기 때문에 층별 토심계수를 보정하게 된다.

5.1.1 합천댐 유역

합천댐 유역에 대한 유출량 모의를 위해서는 전술한 수문매개변수를 토양특성에 따라 적용하게 되며 조정이 필요한 사항은 토양층 구분에 대한 비율과 하도 저항계수를 보정할 필요가 있다. 유출량 분석을 통해 보정된 매개변수를

Table 5.1에 나타내었다. 표에서 코드(Code)는 K-water 데이터베이스(DB)에서 각 관측정보 취득을 위한 고유번호를 의미한다.

Table 5.1 Parameters of K-DRUM model in Hapcheon Dam watershed

No.	Code	Station Name	Depth coefficient			River roughness
			A Layer	B Layer	C Layer	
1	2015110	Hapcheon Dam	0.8	1.0	1.0	0.05
2	2015638	Geochang 1	0.4	1.0	1.0	0.10
3	2015620	Geochang 2	0.8	1.0	1.0	0.10
4	2015650	Jisan	0.4	1.0	1.0	0.09

K-DRUM 모형을 이용하여 유출모의를 수행한 결과는 Figure 5.1 ~ 5.4에 나타내었다. 그림에서 가로축은 분석 기간을 나타내었고, 세로축은 좌측이 유출량, 우측은 강우량을 나타내었다. 관측 강우량은 그래프 위에 나타내었고, 관측수위를 환산한 유출량은 원으로 나타내었다. K-DRUM 모형을 이용한 모의결과는 실선으로 나타내었다.

2개의 대상기간에 대해 모의된 결과를 이용하여 합천댐 지점과 거창1 및 거창2 지점의 유출량을 시계열 자료로 추출하여 관측값과 비교하였으며, 결과를 보면 유출량의 상승과 하강 및 피크 유량이 관측값과 매우 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

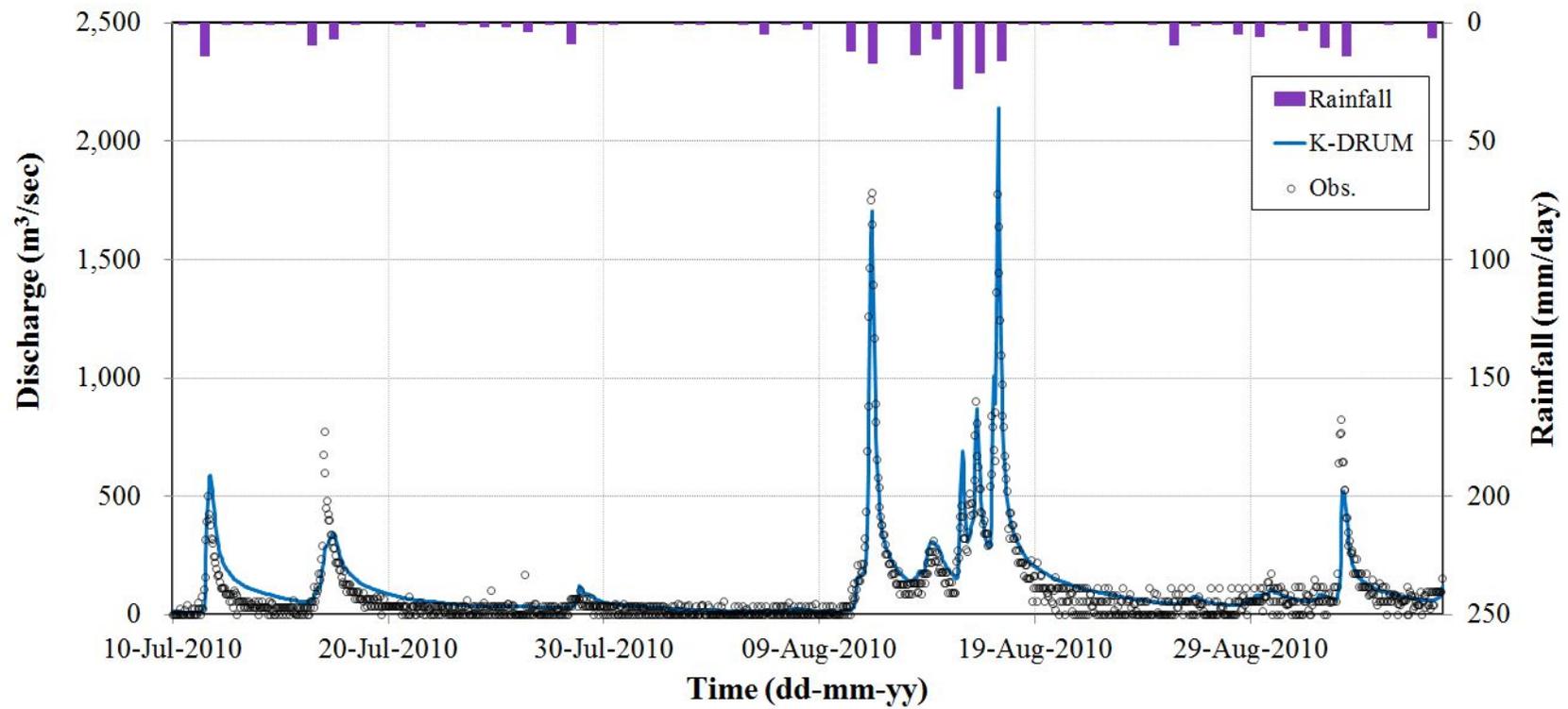


Figure 5.1 Discharge simulation results at Hapcheon Dam (Case 1)

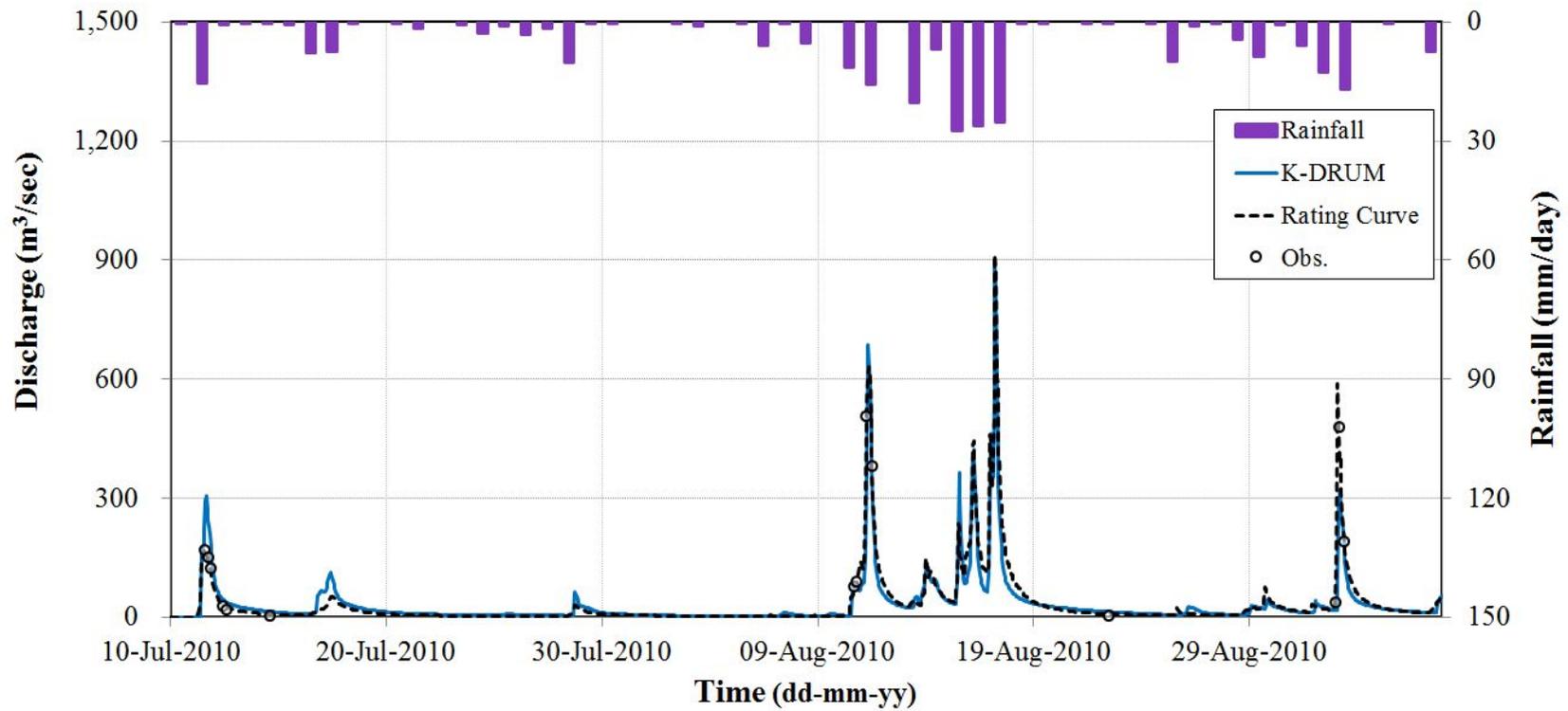


Figure 5.2 Discharge simulation results at Geochang 1 station (Case 1)

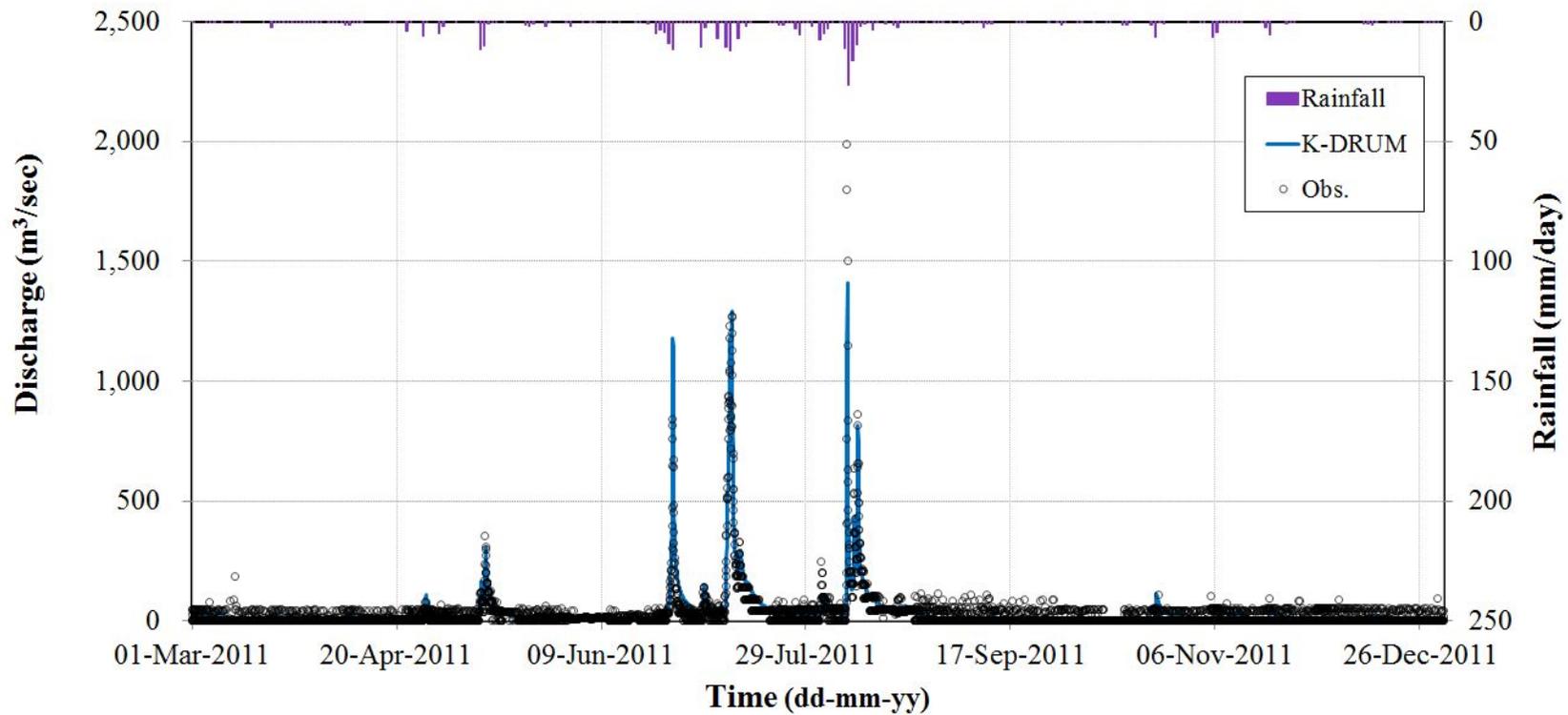


Figure 5.3 Discharge simulation results at Hapcheon Dam (Case 2)

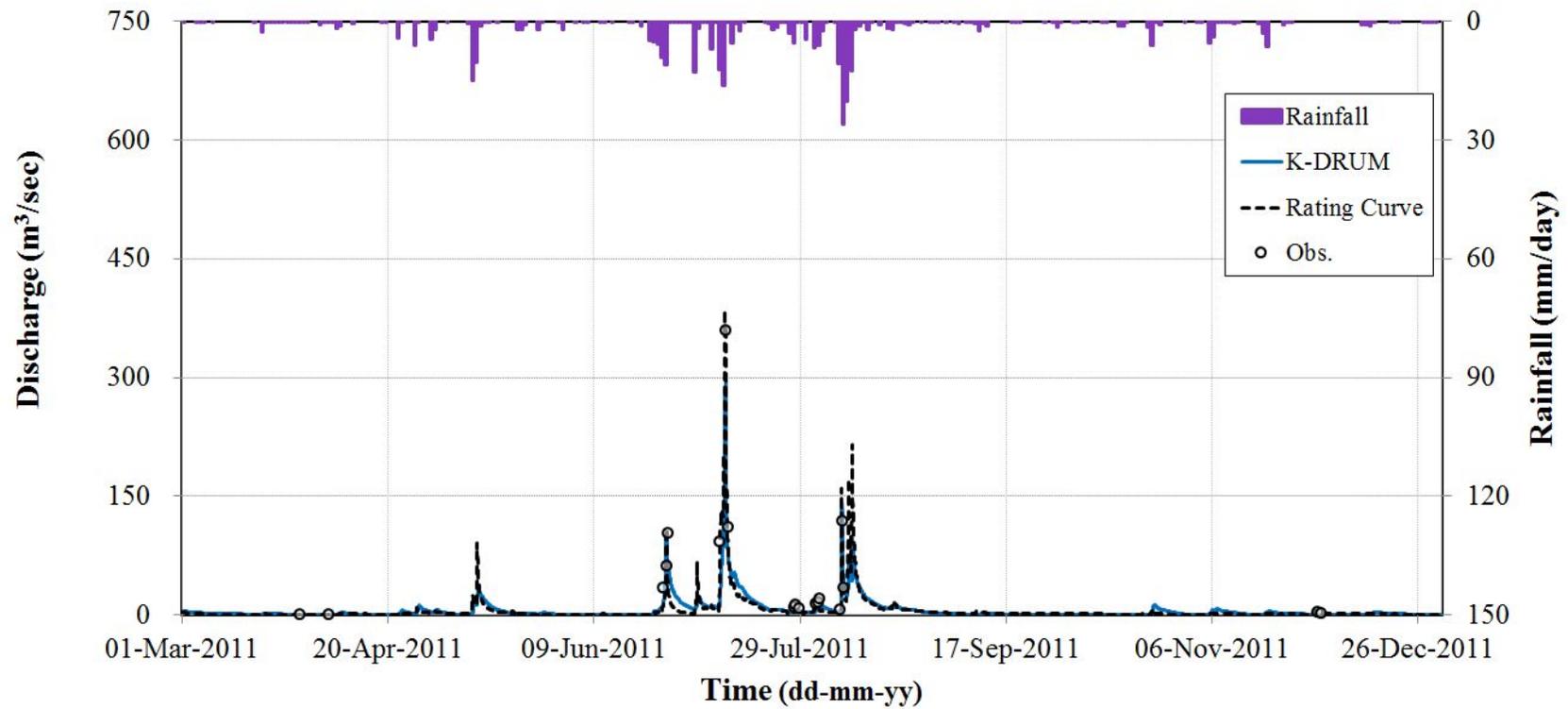


Figure 5.4 Discharge simulation results at Geochang 2 station (Case 2)

합천댐 유역을 대상으로 유출모의 결과를 관측값과 비교한 결과 각 평가항목별 평가결과를 Table 5.2 ~ 5.3에 나타내었다. 평가지점은 댐 지점과 상류 수위관측소를 같이 평가하였으며, 결과적으로 양호한 수준의 정확도를 나타내고 있다고 판단된다.

Table 5.2 Discharge simulation results (Case 1) (unit : $10^6 m^3$)

Statistical Method	Hapcheon Dam	Geochang1
	Discharge	Discharge
Observation	506.01	174.24
Total volume	616.76	169.52
Percentage	121.89%	97.29%
R ²	0.89	0.88
NSE	0.87	0.88
PBIAS	-21.89	2.71
RSR	0.36	0.35

Table 5.3 Discharge simulation results (Case 2) (unit : $10^6 m^3$)

Statistical Method	Hapcheon Dam	Geochang2
	Discharge	Discharge
Observation	717.11	145.75
Total volume	880.85	149.36
Percentage	122.83%	102.47%
R ²	0.85	0.84
NSE	0.85	0.82
PBIAS	-22.83	-2.47
RSR	0.39	0.42

합천댐 유역에 대한 Case 1과 Case 2의 유출량 모의결과를 토대로 평가 항목별 평균값을 이용하여 모형의 성능 평가 결과를 Table 5.4에 나타내었다. 평가결과 매우좋음에서 좋음 수준으로 나타났으며 결과적으로 모형 성능이 우수하게 나타남을 알 수 있다.

Table 5.4 Performance evaluation result of Hapcheon Dam

NSE	PBIAS (%)	RSR
0.86 (Very good)	-11.12 (Good)	0.38 (Very good)

5.1.2 임하댐 유역

임하댐 유역에 대한 유출량 모의를 위해서는 전술한 수문매개변수를 토양특성에 따라 적용하게 되며 유출 모의를 통해 조정이 필요한 사항은 토양층 구분에 대한 비율과 하도 저항계수를 보정하였다. 보정된 매개변수를 Table 5.5에 나타내었다.

Table 5.5 Parameters of K-DRUM model in Imha Dam watershed

No.	Code	Station Name	Depth coefficient			River roughness
			A Layer	B Layer	C Layer	
1	2002110	Imha Dam	0.8	1.0	1.0	0.070
2	2002620	Yeongyang	0.4	0.4	0.4	0.060
3	2002645	Dongcheon	1.0	1.0	1.0	0.030
4	2002640	Heunggu	0.5	1.0	1.0	0.070
5	2002630	Gwangduk	0.3	0.5	1.0	0.050
6	2002650	Chungsong	0.2	0.2	0.2	0.070
7	2002660	Songgang	0.2	0.2	0.2	0.035

임하댐 유역에 대한 유출모의 수행 결과를 Figure 5.5 ~ 5.8에 나타내었다. 그림에서 가로축은 분석 기간을 나타내었고, 세로축은 좌측이 유출량, 우측은 강우량을 나타내었다. 관측 강우량은 그래프 위에 나타내었고, 관측수위를 환산한 유출량은 원으로 나타내었으며 K-DRUM 모형을 이용한 모의결과는 실선으로 나타내었다.

2개의 대상기간에 대해 모의된 결과를 이용하여 임하댐 지점과 영양 및 동천 지점의 유출량을 시계열 자료로 추출하여 관측값과 비교하였으며, 결과를 보면 댐 지점에서 저유량 범위에서 노이즈가 발생하고 있어 직접 비교가 다소 어렵고, 피크유량에서 다소의 차이가 발생하지만 전반적으로 관측값과 경향이 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

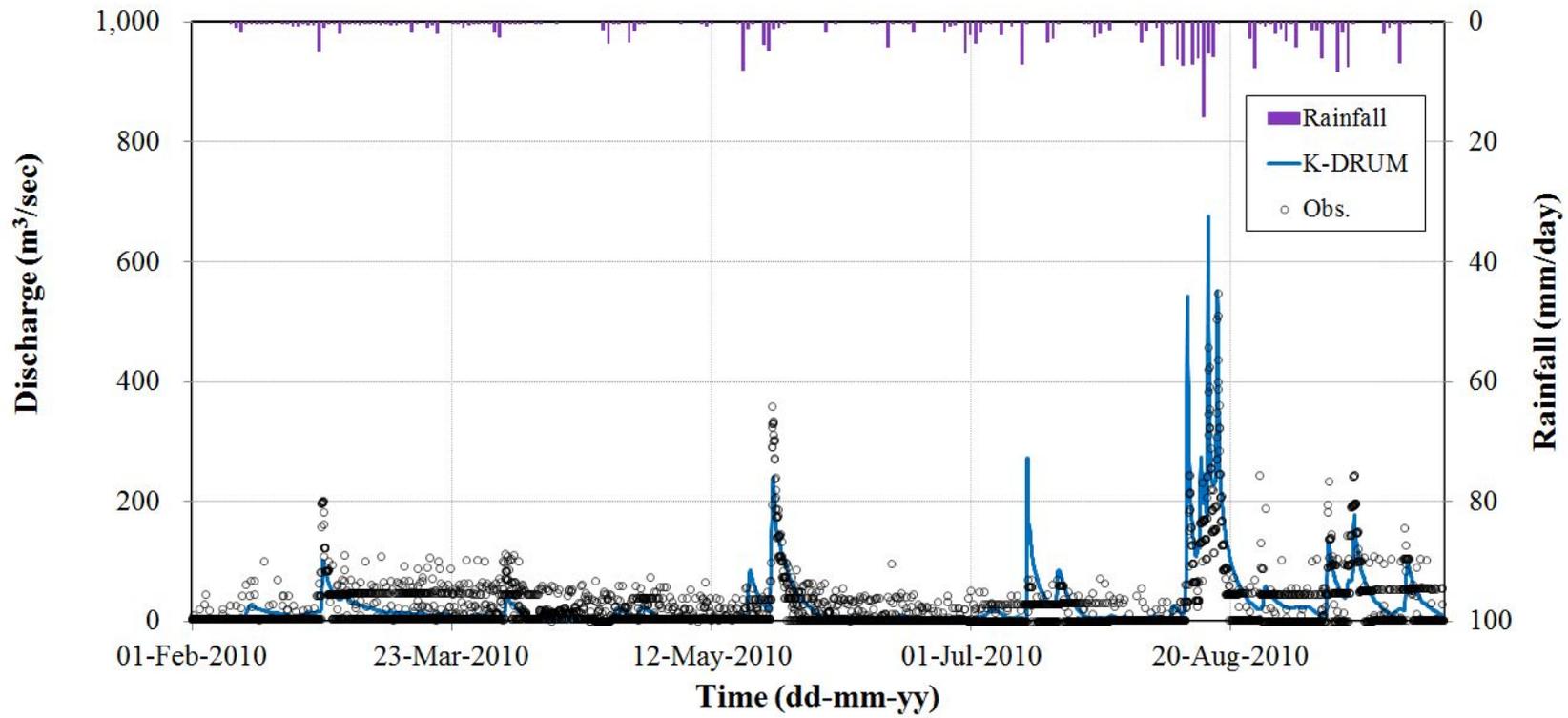


Figure 5.5 Discharge simulation results at Imha Dam (Case 3)

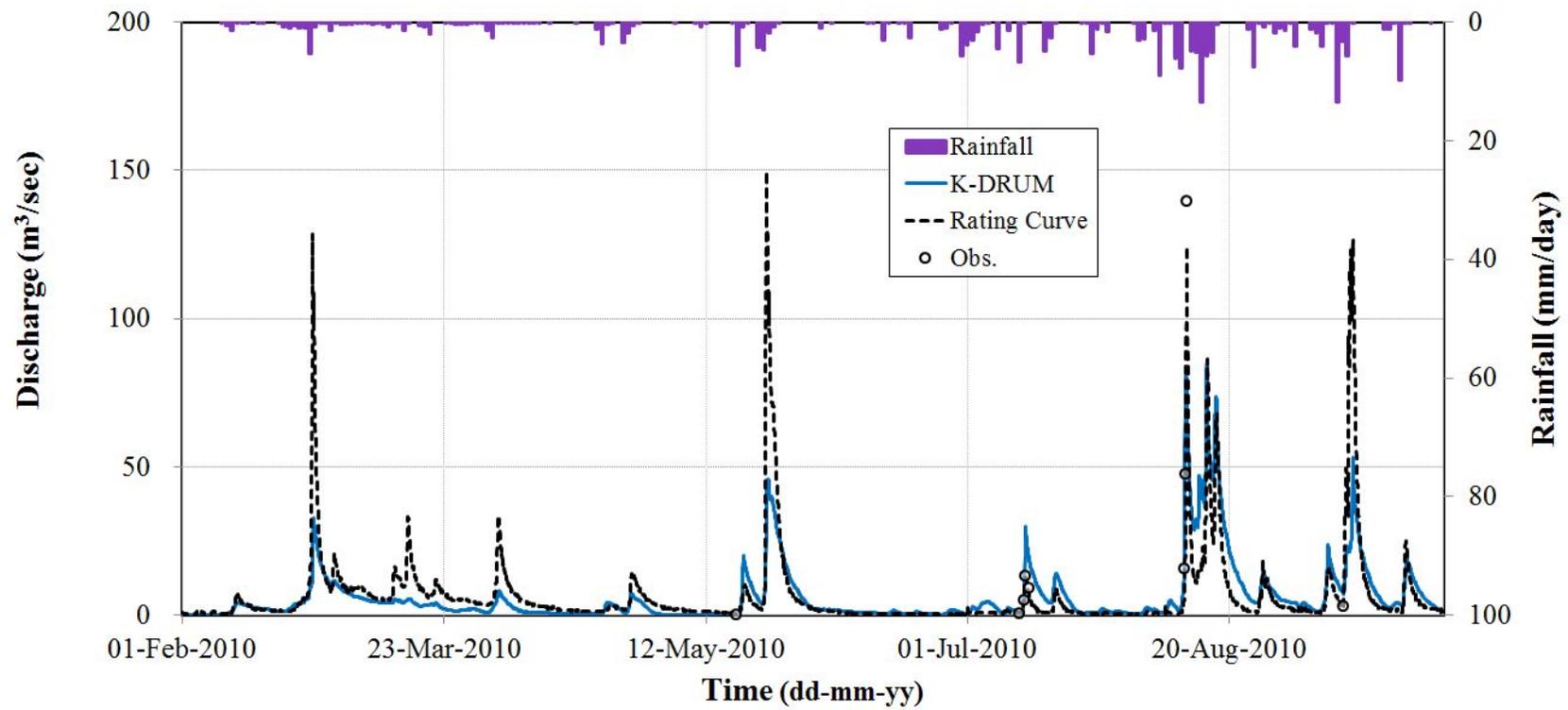


Figure 5.6 Discharge simulation results at Yeongyang station (Case 3)

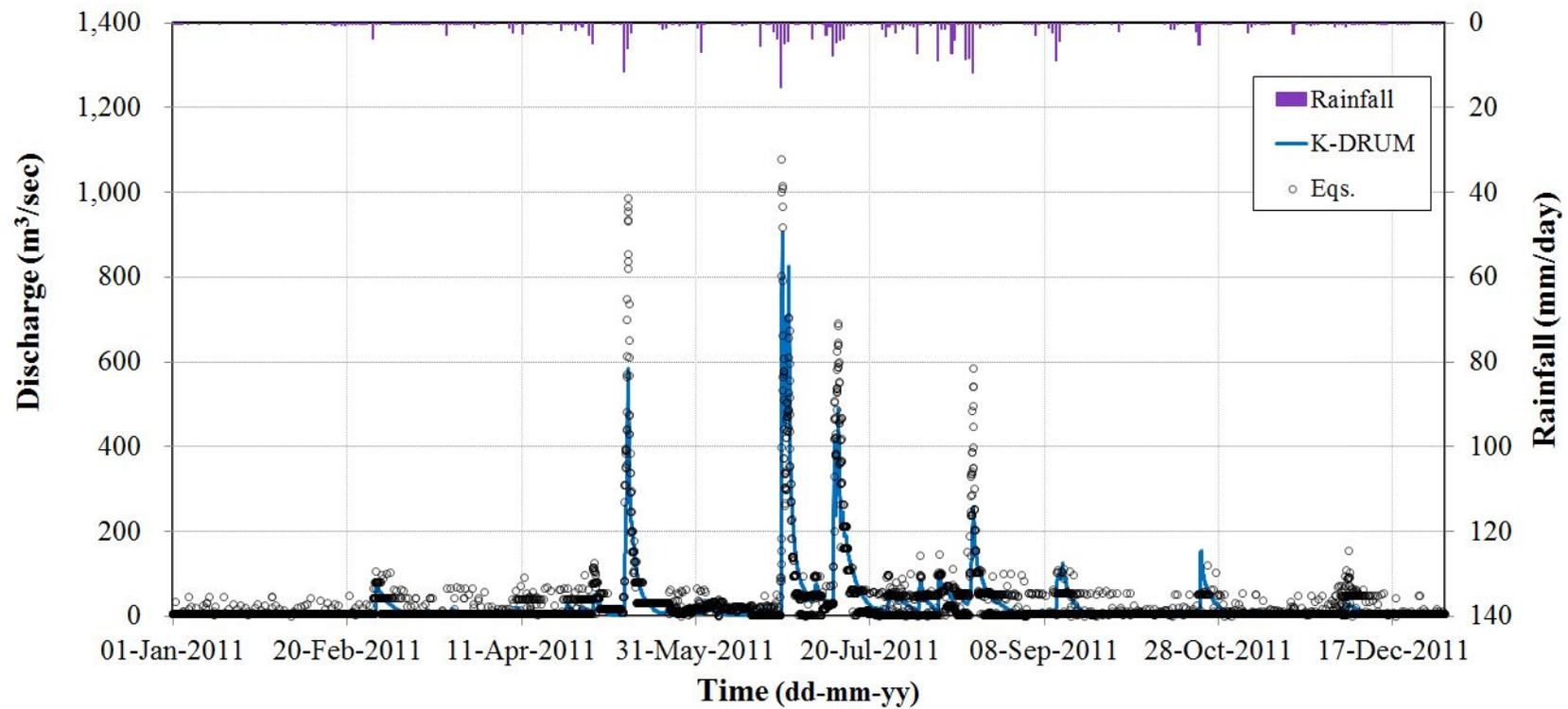
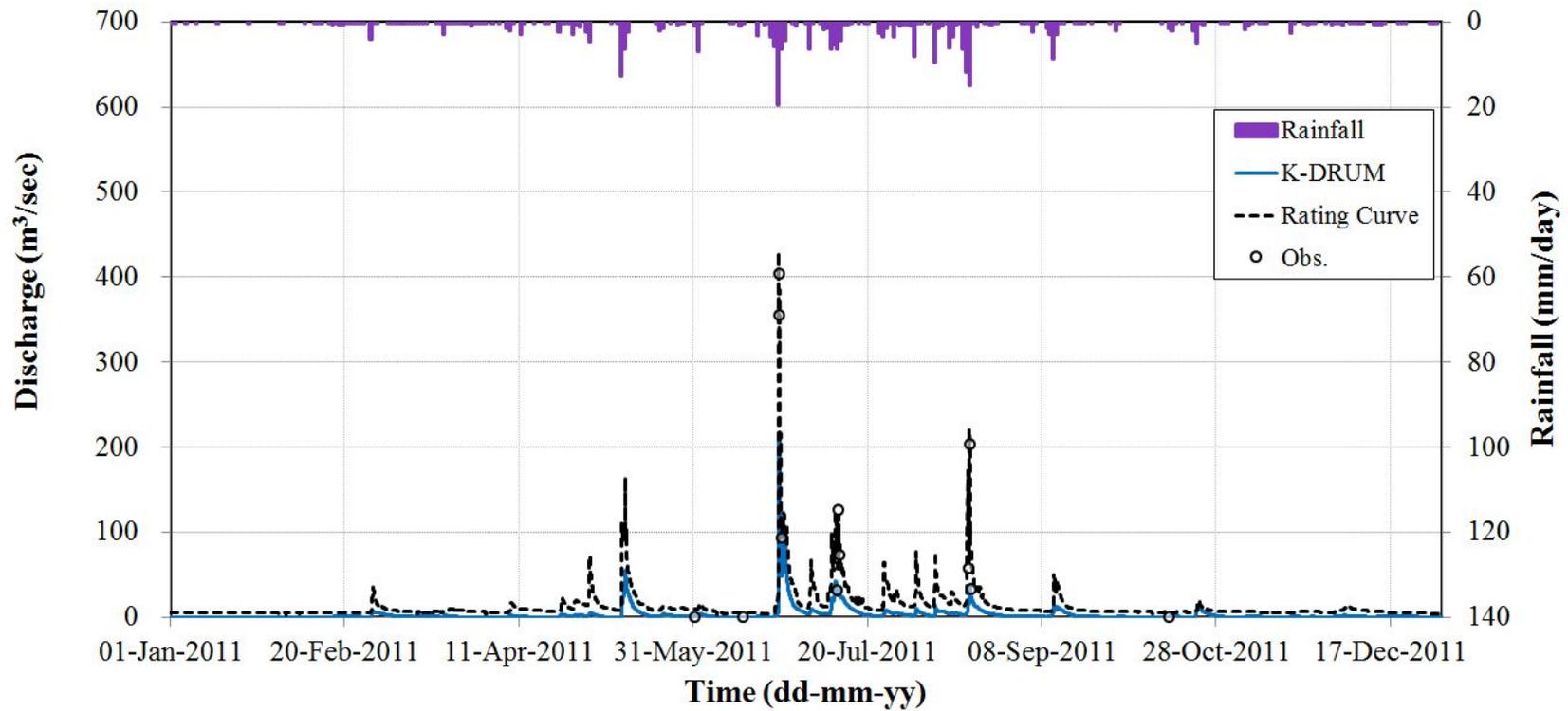


Figure 5.7 Discharge simulation results at Imha Dam (Case 4)



re 5.8 Discharge simulation results at Dongcheon station (Case 4)

임하댐 유역을 대상으로 유출모의 결과를 관측값과 비교한 결과 각 평가항목별 평가결과를 Table 5.6에 나타내었다. 평가지점은 댐 지점과 상류 수위관측소를 같이 평가하였으며, 결과적으로 양호한 수준의 정확도를 나타내고 있다고 판단된다.

Table 5.6 Discharge simulation results (Case 3) (unit : $10^6 m^3$)

Statistical Method	Imha Dam	Yeongyang
	Discharge	Discharge
Observation	439.27	142.78
Total volume	585.26	125.54
Percentage	133.23	87.92
R ²	0.80	0.57
NSE	0.66	0.56
PBIAS	-33.23	12.08
RSR	0.58	0.67

Table 5.7 Discharge simulation results (Case 4)

(unit : 10^6 m^3)

Statistical Method	Imha Dam	Dongcheon
	Discharge	Discharge
Observation	731.98	402.06
Total volume	839.44	89.85
Percentage	114.68%	22.35%
R ²	0.80	0.80
NSE	0.80	0.34
PBIAS	-14.68	77.65
RSR	0.45	0.81

임하댐 유역에 대한 Case 3과 Case 4의 유출량 모의결과를 토대로 평가 항목별 평균값을 이용하여 모형의 성능 평가 결과를 Table 5.8에 나타내었다. 평가결과 좋음에서 양호 수준으로 나타났으며 결과적으로 모형 성능이 양호하게 나타남을 알 수 있다.

Table 5.8 Performance evaluation result of Imha Dam

NSE	PBIAS (%)	RSR
0.59 (Satisfactory)	10.46 (Good)	0.63 (Satisfactory)

5.2 유역 유사량 분석 결과

본 연구에서 개발된 유사량 분석 기능을 활용하여 합천댐과 임하댐을 대상으로 유역 유사량 모의를 수행하였다.

모의에 적용한 매개변수는 유출량 산정에서 사용한 값과 동일하다. 그러나 유사량 산정을 위해서는 추가로 유사량 보정 매개변수가 사용된다. 유사량 보정 매개변수는 유사량 관측값과 모의값의 차이를 보정하기 위해서 적용하는 계수로서, 유사량 관측자료가 있는 소유역별로 다르게 적용된다. 이는 K-DRUM 모형에서 유사량 산정을 위한 방법이 단일 입경을 대상으로 유사 농도와 단위 수류력 기반으로 모의하기 때문에 실제 유사량과 차이가 발생하게 되는 것으로 판단된다.

따라서, 합천댐과 임하댐의 소유역별 유사량 보정 계수를 관측 유사량과의 비교를 통해 2.0 ~ 25.0까지 다양하게 적용하였으며, 조정된 값을 Table 5.9 ~ 5.10에 나타내었다.

Table 5.9 Sediment coefficient in Hapcheon Dam watershed

No.	Code	Station Name	Sediment coefficient
1	2015110	Hapcheon Dam	3.0
2	2015638	Geochang 1	25.0
3	2015620	Geochang 2	3.0
4	2015650	Jisan	3.0

Table 5.10 Sediment coefficient in Imha Dam watershed

No.	Code	Station Name	Sediment coefficient
1	2002110	Imha Dam	2.0
2	2002620	Yeongyang	3.0
3	2002645	Dongcheon	2.0
4	2002640	Heunggu	2.0
5	2002630	Gwangduk	2.0
6	2002650	Chungsong	2.0
7	2002660	Songgang	2.0

5.2.1 합천댐 유역

합천댐 유역을 대상으로 거창1 지점과 거창2 지점에 대한 실제 측정된 유수량 자료와 유량-유수량 관계식에 의한 유수량 산정결과 및 K-DRUM 모형으로 모의한 결과를 Figure 5.9 ~ 5.10에 나타내었다. 그림에서 가로축은 모의 시간을 나타내며, 세로축은 유수량을 나타낸다. 거창1 지점에서는 관측값과 매우 유사한 수준으로 모의결과가 나타남을 알 수 있으며, 거창2 지점의 경우 실제 관측값 중에서 최대 값이 발생한 경우에는 모의결과가 과소 추정하고 있으나 유량-유수량 관계식과는 매우 유사한 수준으로 모의하고 있음을 알 수 있다. 결과적으로 K-DRUM 모형을 이용한 유수량 산정결과는 대체적으로 양호한 수준인 것을 알 수 있다.

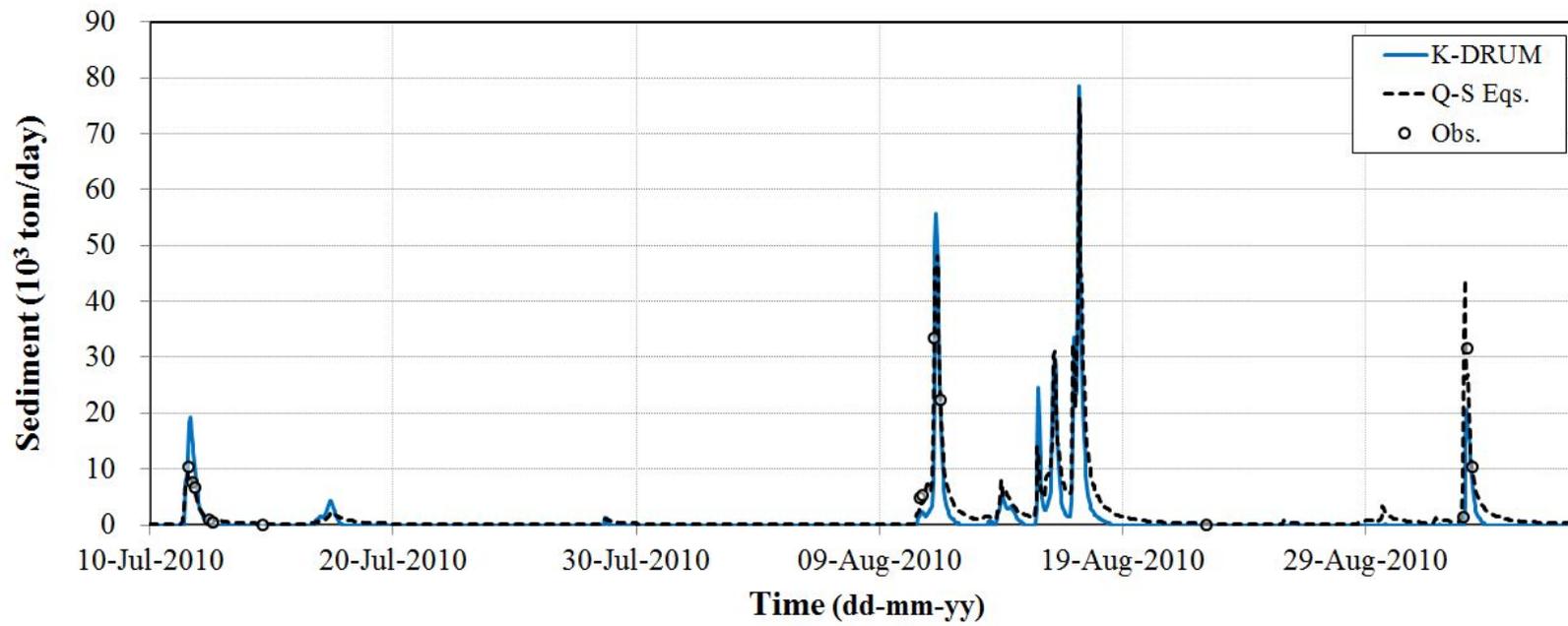


Figure 5.9 Sediment simulation results at Geochang 1 station

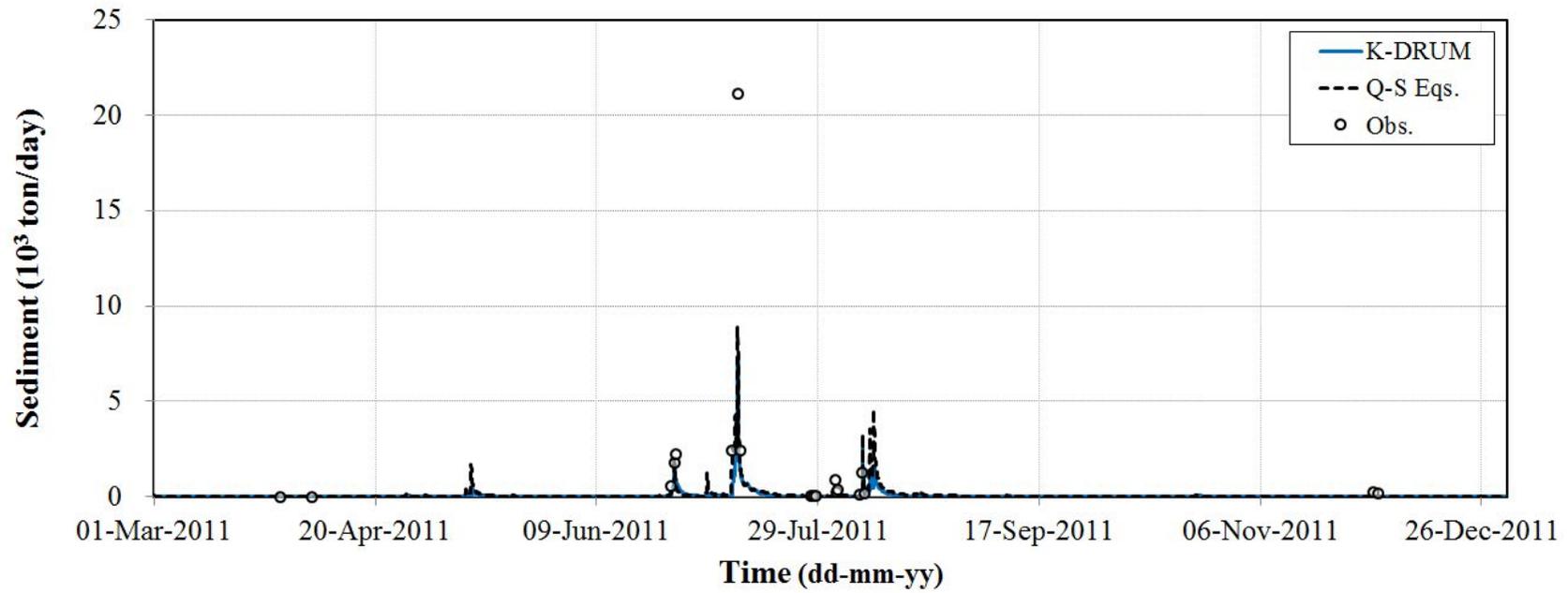


Figure 5.10 Sediment simulation results at Geochang 2 station

합천댐 유역에 대한 Case 1과 Case 2의 유사량 산정결과를 평가기법을 활용하여 평가한 결과를 Table 5.11에 나타내었다.

Table 5.11 Sediment simulation results (Case 1)

K-DRUM	Geochang1	
	Peak Discharge (m ³ /sec)	Peak Sediment (ton/day)
Observation	914.4	76,380.3 (1,718.2)
Total volume	898.6	78,458.8 (1,150.9)
Percentage	98.27%	102.7% (64.62%)
R ²	0.88	0.86
NSE	0.88	0.84
PBIAS	2.71	35.38
RSR	0.35	0.39

평가결과 R²가 최소 0.84 이상 나타나고 있으며 다른 평가항목에서도 우수한 수준으로 나타나고 있다.

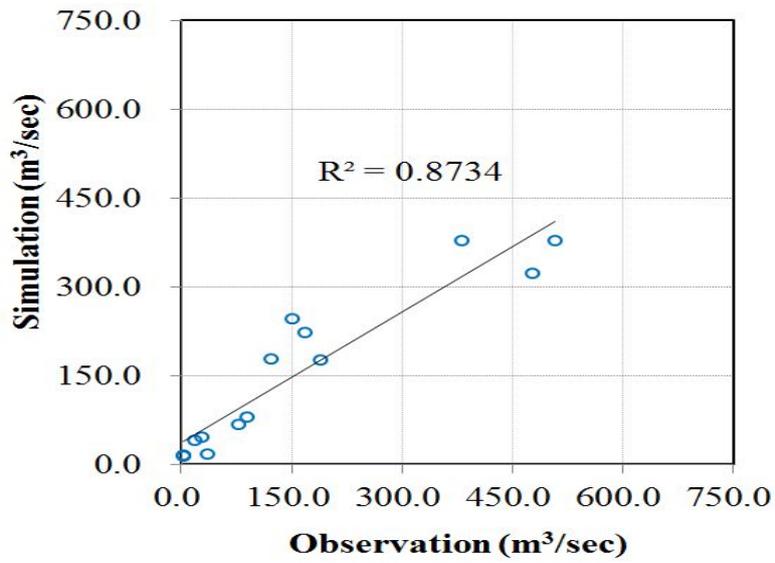


Figure 5.11 Comparison between observed and simulated discharge at Geochang 1 station (Case 1)

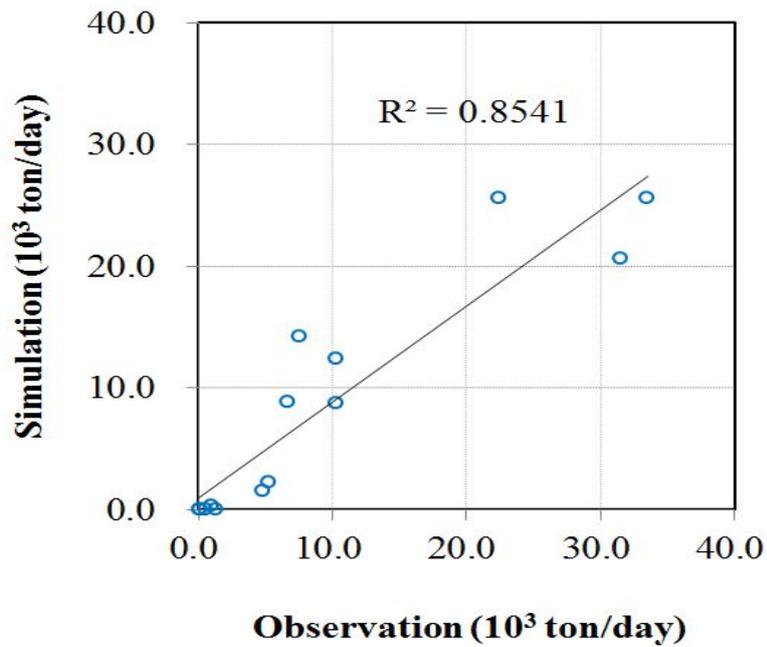


Figure 5.12 Comparison between observed and simulated sediment at Geochang 1 station (Case 1)

Table 5.12 Sediment simulation results (Case 2)

K-DRUM	Geochang2	
	Peak Discharge (m ³ /sec)	Peak Sediment (ton/day)
Observation	298.3	8,994.3 (86.0)
Total volume	385.2	7,059.4 (48.1)
Percentage	77.44%	78.5% (55.8%)
R ²	0.84	0.85
NSE	0.82	0.79
PBIAS	-2.47	44.13
RSR	0.42	0.46

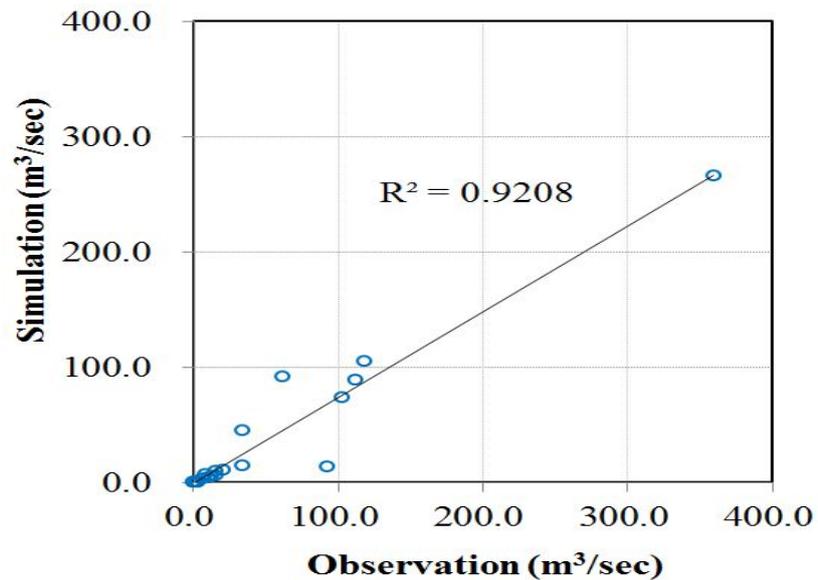


Figure 5.13 Comparison between observed and simulated discharge at Geochang 2 station (Case 2)

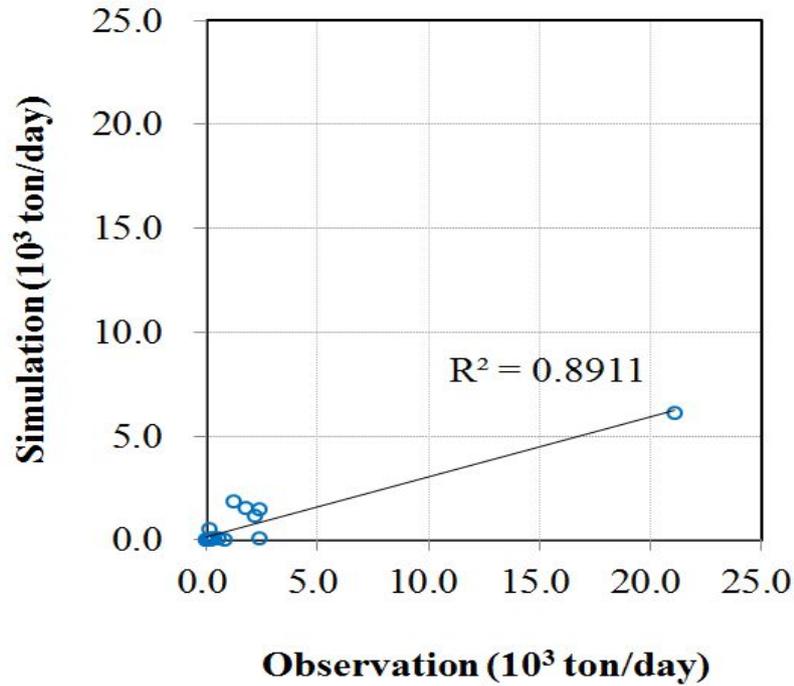


Figure 5.14 Comparison between observed and simulated sediment at Geochang 2 station (Case 2)

합천댐 유역에 대한 Case 1과 Case 2의 유출량 모의결과를 토대로 평가 항목별 평균값을 이용하여 모형의 성능 평가 결과를 Table 5.13에 나타내었다. 평가결과 매우 좋음에서 양호 수준으로 나타났으며 결과적으로 모형 성능이 양호하게 나타남을 알 수 있다.

Table 5.13 Performance evaluation result of Hapcheon Dam

NSE	PBIAS (%)	RSR
0.83 (Very good)	19.94 (Satisfactory)	0.41 (Very good)

5.2.2 임하댐 유역

임하댐 유역을 대상으로 영양 지점과 동천 지점에 대한 실제 측정한 유사량 자료와 유량-유사량 관계식에 의한 유사량 산정결과 및 K-DRUM 모형으로 모의한 결과를 Figure 5.15 ~ 5.16에 나타내었다. 두 지점에서 관측값에 비해 모의결과가 다소 과소 추정되는 경향이 있으나 유량-유사량 관계식과는 유사한 수준으로 나타나고 있으며 전반적으로 양호한 수준인 것을 알 수 있다.

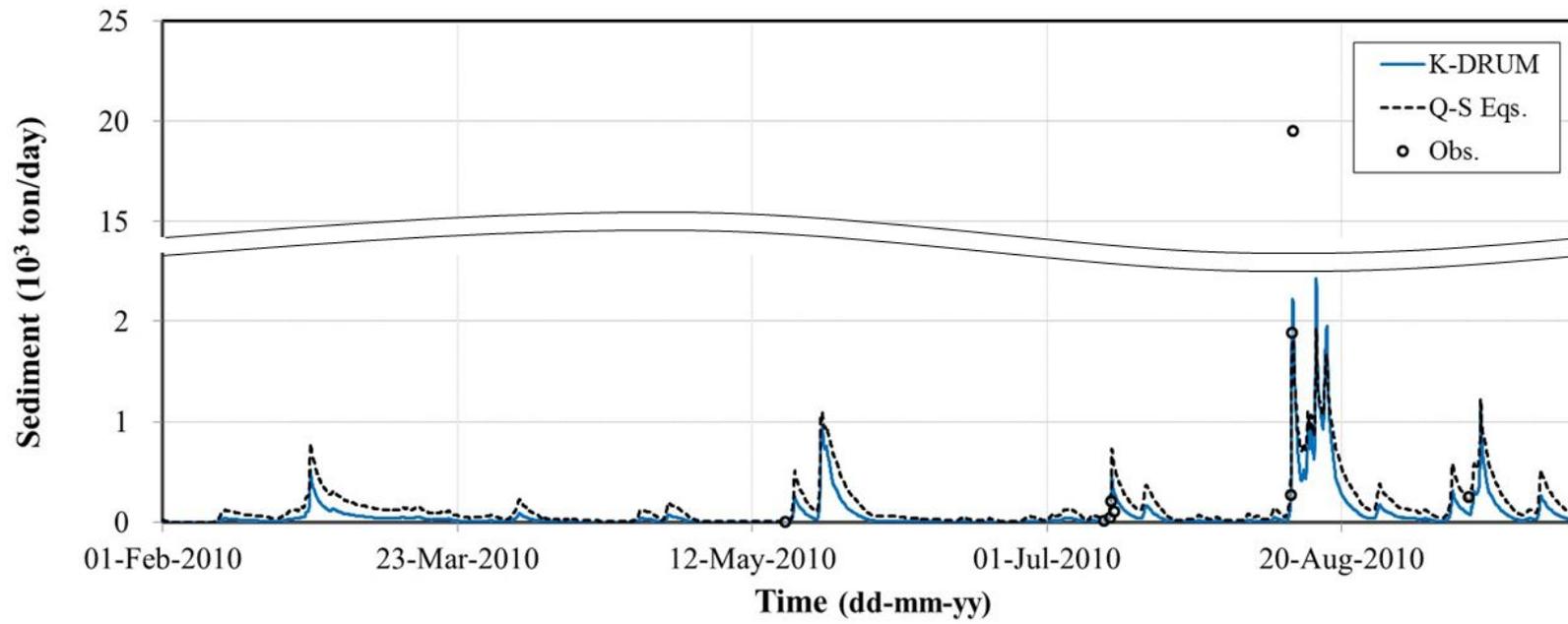


Figure 5.15 Sediment simulation results at Yeongyang station

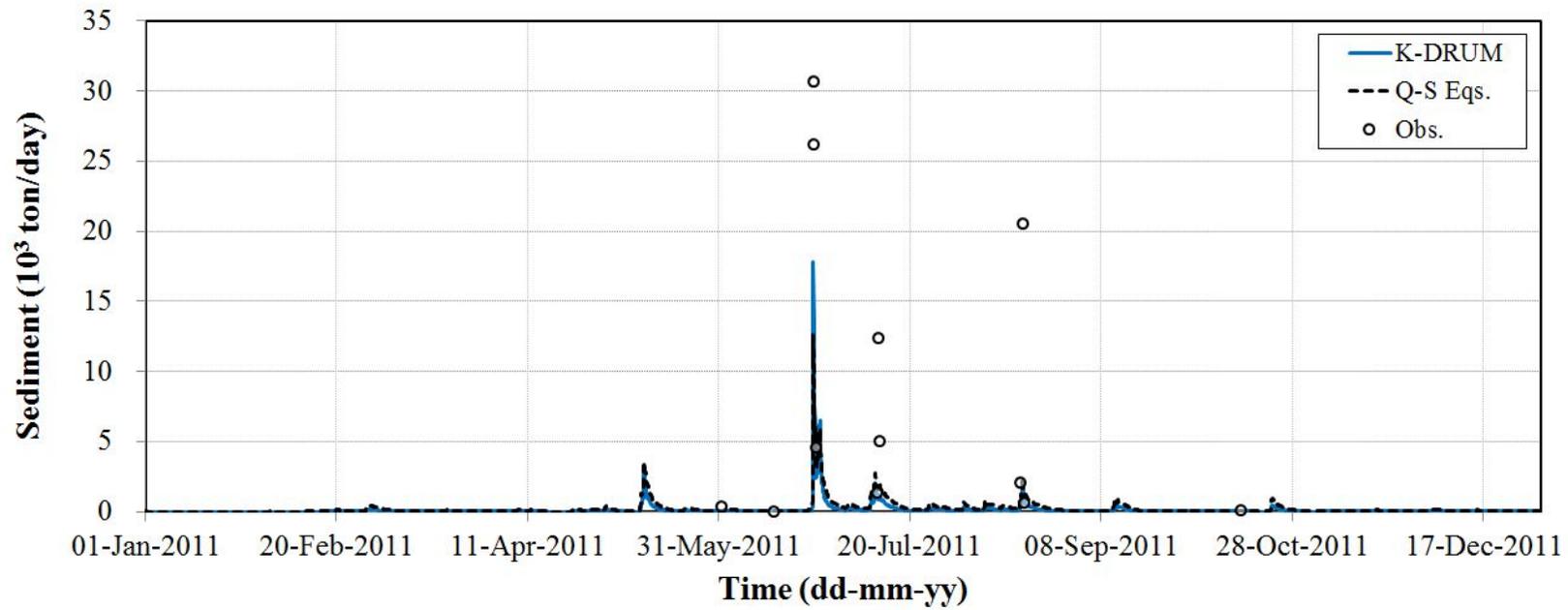


Figure 5.16 Sediment simulation results at Dongcheon station

임하댐 유역에 대한 Case 3과 Case 4의 유사량 산정결과를 평가기법을 활용하여 평가한 결과를 Table 5.14에 나타내었다.

Table 5.14 Sediment simulation results (Case 3)

K-DRUM	Yeongyang	
	Peak Discharge (m ³ /sec)	Peak Sediment (ton/day)
Observation	149.9	1,925.4 (157.8)
Total volume	85.9	2,425.4 (83.40)
Percentage	57.3%	125.9% (52.9%)
R ²	0.57	0.91
NSE	0.56	0.81
PBIAS	12.08	47.10
RSR	0.67	0.44

평가결과 R²가 최소 0.57 이상 나타나고 있으며 다른 평가항목에서도 양호한 수준으로 나타나고 있다.

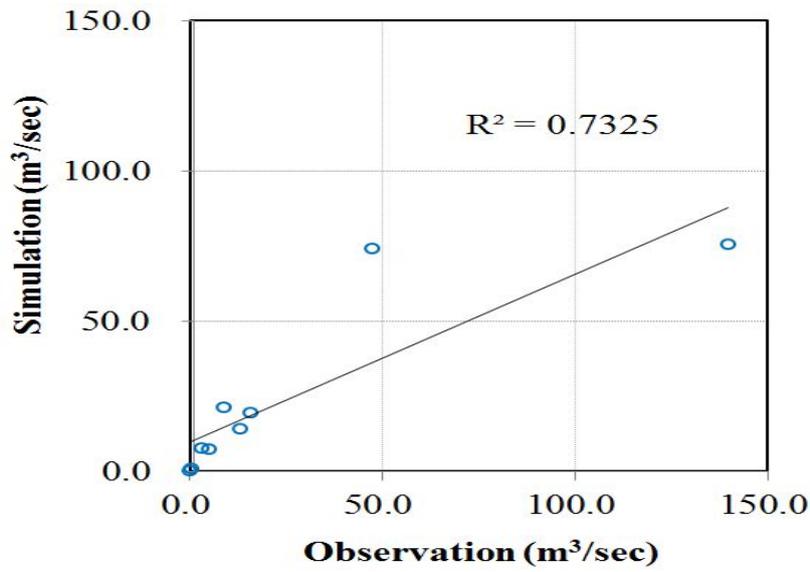


Figure 5.17 Comparison between observed and simulated discharge at Yeongyang station (Case 3)

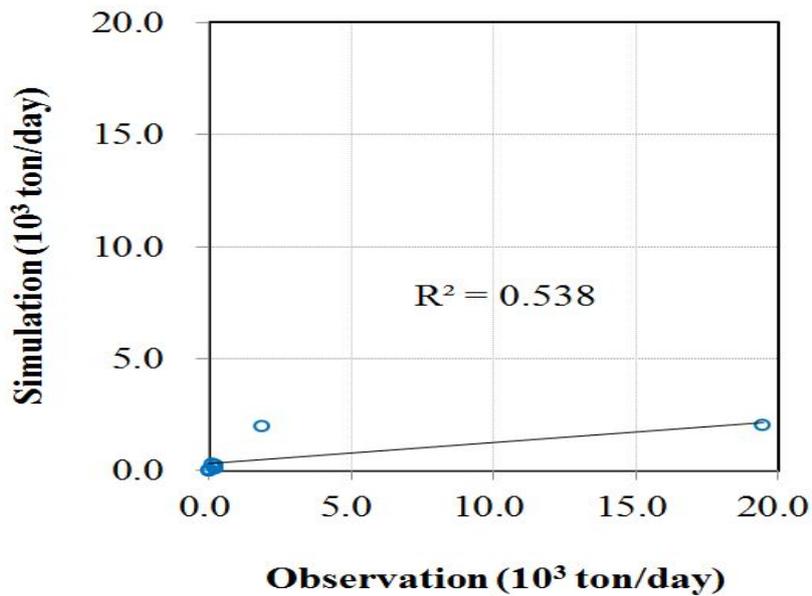


Figure 5.18 Comparison between observed and simulated sediment at Yeongyang station (Case 3)

Table 5.15 Sediment simulation results (Case 4)

K-DRUM	Dongcheon	
	Peak Discharge (m ³ /sec)	Peak Sediment (ton/day)
Observation	428.6	12,636.4 (187.7)
Total volume	210.1	17,799.2 (100.6)
Percentage	49.0%	140.8% (53.58%)
R ²	0.80	0.89
NSE	0.34	0.86
PBIAS	77.65	46.42
RSR	0.81	0.37

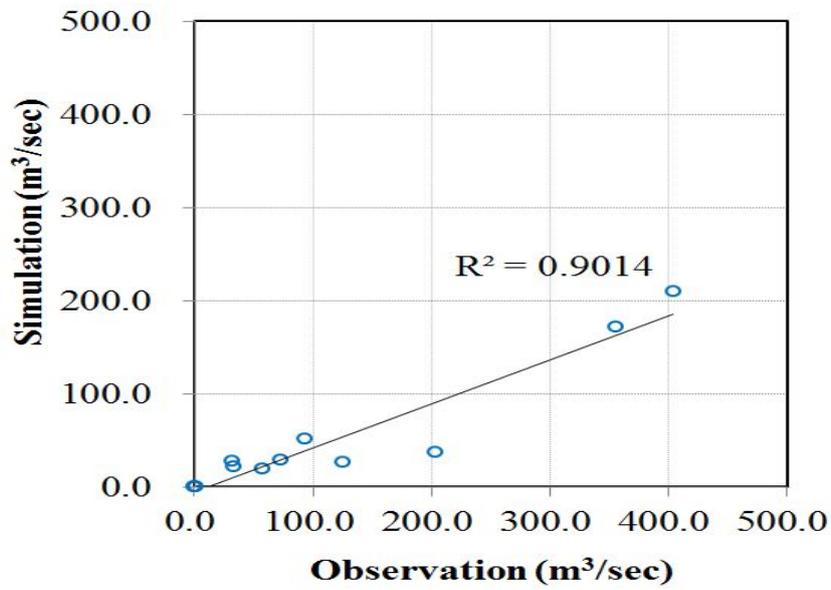


Figure 5.19 Comparison between observed and simulated discharge at Dongcheon station (Case 4)

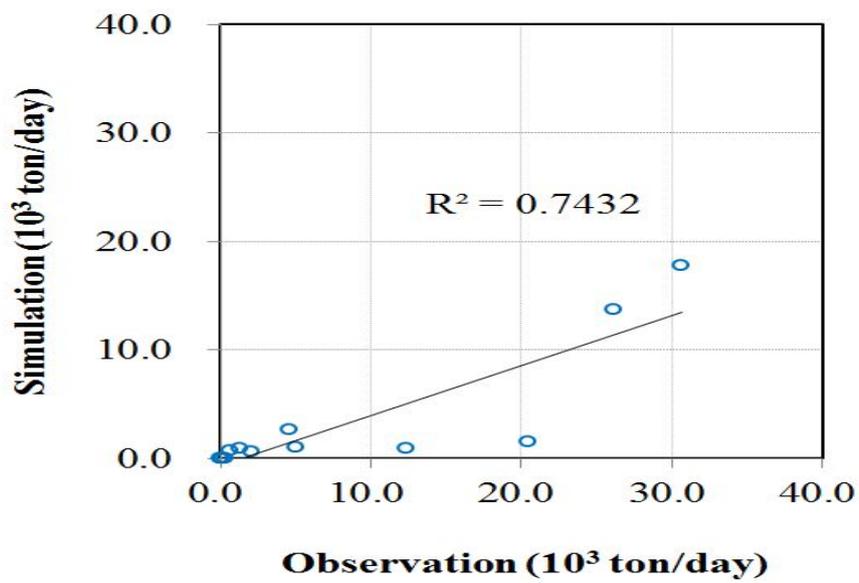


Figure 5.20 Comparison between observed and simulated sediment at Dongcheon station (Case 4)

임하댐 유역에 대한 Case 3과 Case 4의 유출량 모의결과를 토대로 평가 항목별 평균값을 이용하여 모형의 성능 평가 결과를 Table 5.16에 나타내었다. 평가결과 좋음에서 불량 수준으로 나타났으나, 2개 항목에서 양호 이상이 나타났으므로 모형 성능이 비교적 양호하다고 판단된다. 그러나 동천지점의 경우는 다른 지점들에 비해 다소 낮은 평가결과가 발생하고, 유사량 관측값과 유량-유사량 관계식을 이용한 값과의 차이도 크게 나타나는 이유는 동천지점의 유역면적이 임하댐유역의 약 1/10정도이나 관측 유출량값은 1/2이상으로 수위-유량관계곡선식의 재검토 및 정확한 유량측정 조사가 필요하며 추가적으로 모형의 매개변수 등 재검토가 필요할 것으로 판단된다.

Table 5.16 Performance evaluation result of Imha Dam

NSE	PBIAS (%)	RSR
0.64 (Satisfactory)	45.81 (Unsatisfactory)	0.57 (Good)

5.3 저수지 퇴사 분석 결과

5.3.1 유역 유사량 산정

저수지에 발생하는 퇴사는 상류 유역의 유사발생량과 저수지 운영방법에 따라 단기간에 걸쳐 급격히 발생할 수 있고, 반대로 장기간에 걸쳐 서서히 나타날 수 있다. 국내 다목적댐 저수지의 연간 수위 변화를 보면 배사를 위한 조작이나 급격한 수위 저하 등의 운영이 없는 것으로 볼 때 저수지 퇴사문제는 호우사상 등 단기간에 문제를 발생시키기 보다는 수년간에 걸쳐 발생될 것으로 판단된다. 따라서 국내 댐 퇴사량 조사 기간도 약 10년을 주기로 시행하고 있는 실정이다.

따라서 저수지 퇴사문제를 파악하기 위해서는 약 10년간의 유역 유사량 자료가 필요하게 된다. 본 연구에서는 11년간의 유역 유사량을 산정하기 위하여 K-DRUM 모형의 적용성 검토에 사용한 자료와 매개변수를 그대로 적용하여 11년간의 강우 및 기상자료를 입력자료로 확장하여 유역 유사량을 산정하였다.

산정된 11년간의 유역 유사량 자료는 저수지의 저수구간에 대한 퇴사거동 모형의 입력자료로 사용되게 된다.

본 연구에서는 저수구간의 경계조건으로 저수지 상류 물꼬리 부근의 3개 지점(경계1, 경계2, 경계3)을 입력자료 생성지점으로 선정하였다(Figure 5.21). 선정된 지점에 대한 시계열 유량 및 유사량 자료는 저수지 퇴사거동 모형의 입력자료로 활용되게 된다.

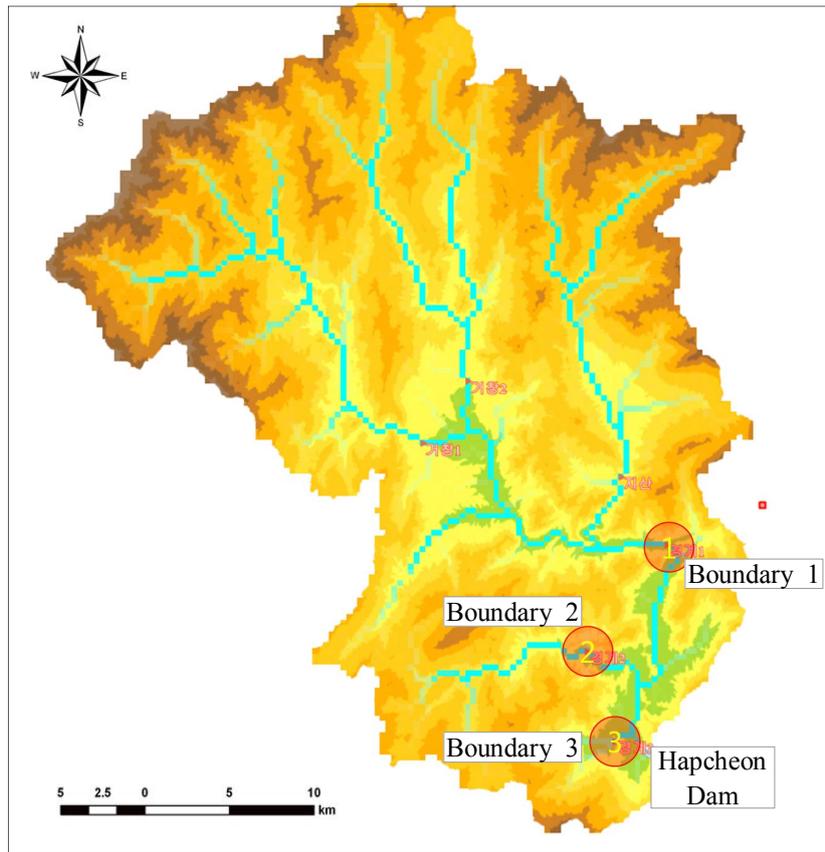


Figure 5.21 Points of inflow generation in Hapcheon Dam

저수지 퇴사거동 분석을 위한 경계조건 지점과 유량 및 유사량 관측지점이 다를 수 있으며, 이 경우 경계조건으로 사용된 자료의 품질을 사전에 관측지점을 대상으로 평가하여 모의 정확도 확보할 필요가 있다. 본 연구에서는 11년간 댐 유역에 대한 장기 유출량 및 유사량의 모의 정확도를 분석하기 위하여 댐 지점과 상류 수위관측소 지점에서의 모의값과 수위-유량관계식 및 유량-유사량 관계식을 이용하여 산출한 관측값과 비교 평가하였다. Figure 5.22 ~ 5.26에 합천댐 유역의 11년간 유출량 및 유사량 모의결과와 관측값을 비교하

여 나타내었다. Figure 5.22는 합천댐 지점의 유출량을 비교하여 나타낸 그래프로써 연도별 유출량의 변화가 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 댐 지점과 상류 관측소에서의 유출량 및 유사량 모의결과 비교 그래프를 보면 모의 결과가 관측자료와 유사한 수준으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 이를 통해 댐 지점과 상류 관측소 사이에 위치한 저수지 퇴사분석 지점의 경계조건 부여지점 3개소의 모의자료도 역시 양호한 수준의 결과가 얻어질 것으로 판단된다.

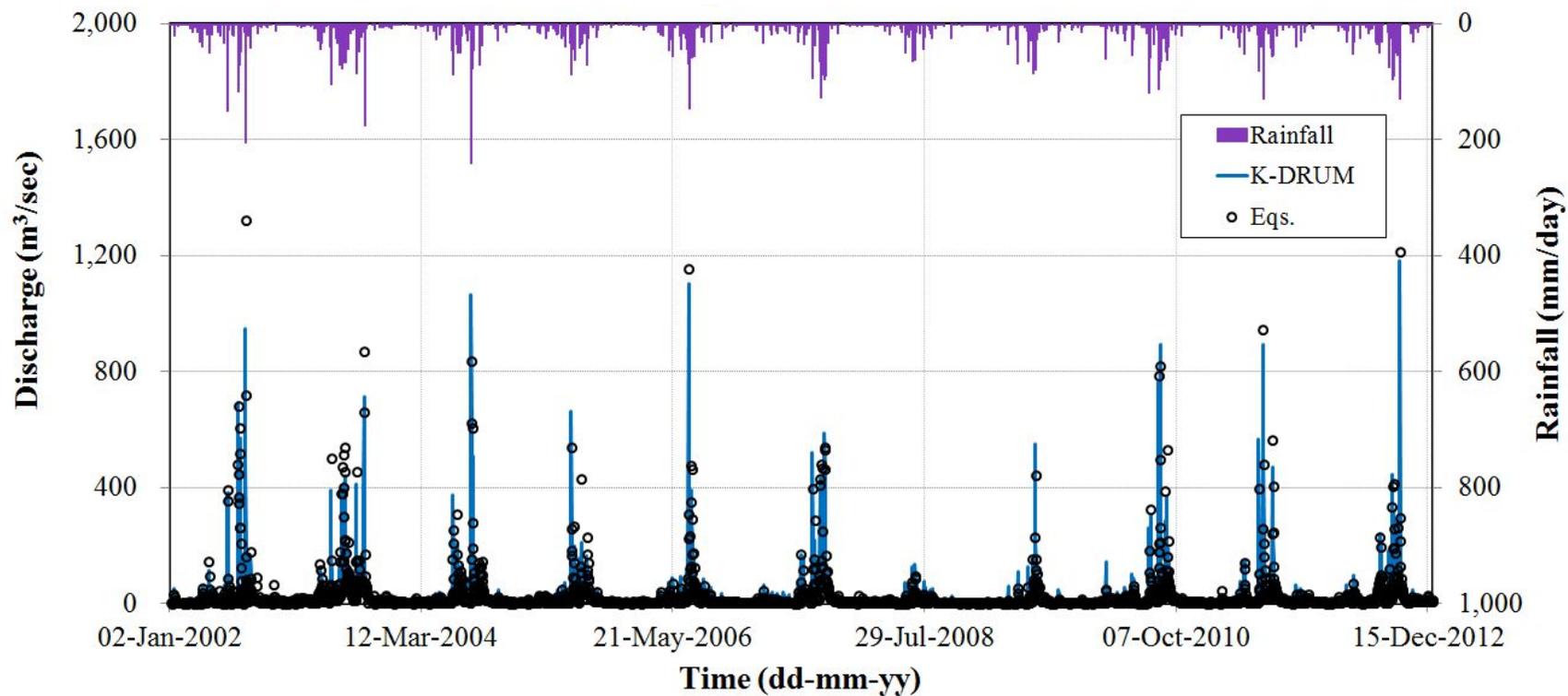


Figure 5.22 Long term discharge simulation results at Hapcheon Dam

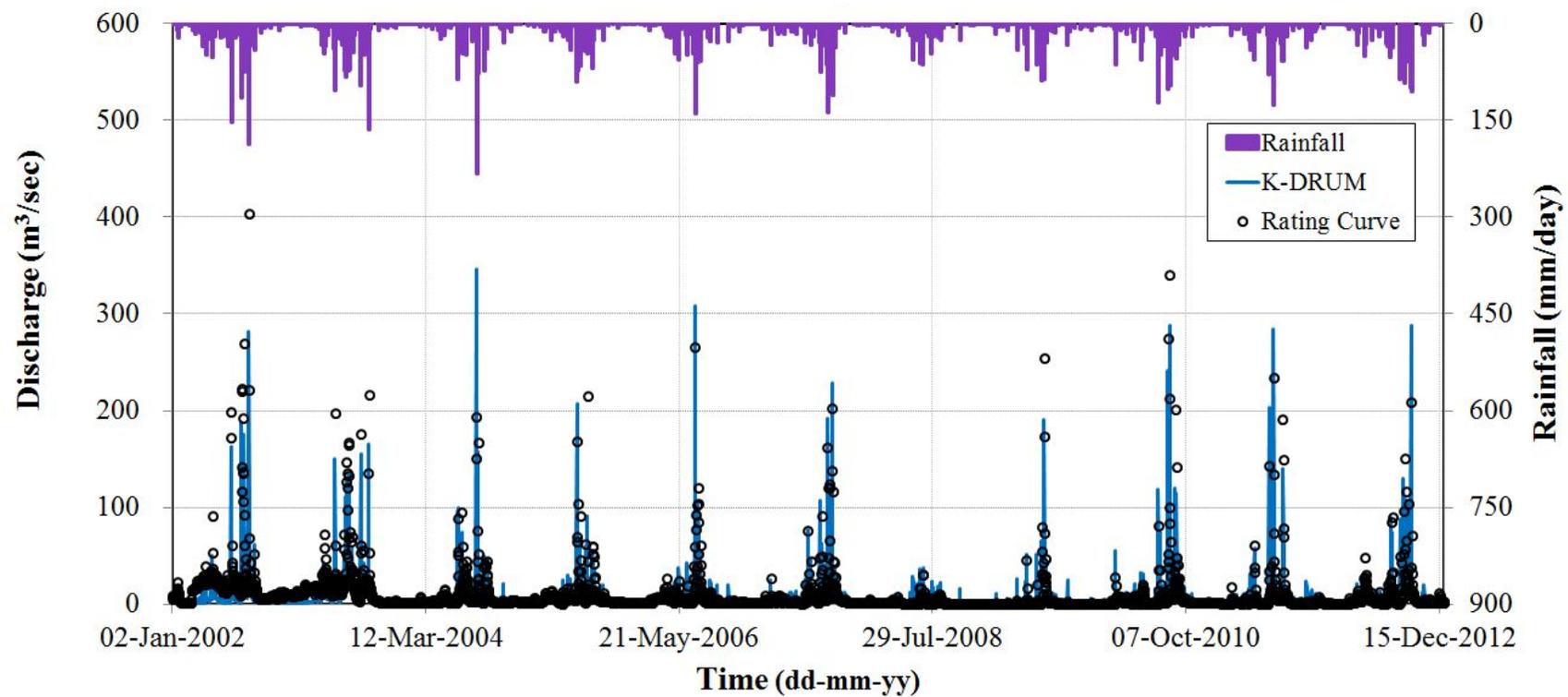


Figure 5.23 Long term discharge simulation results at Geochang 1 station

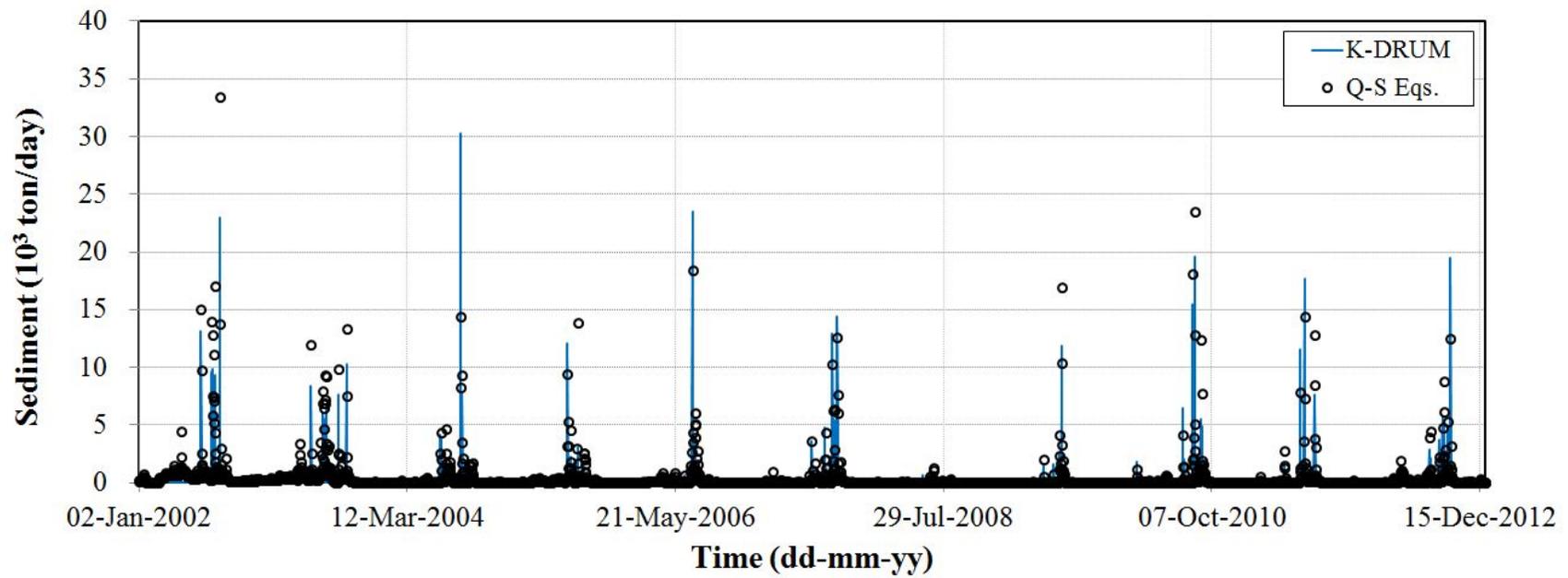


Figure 5.24 Long term sediment simulation results at Geochang 1 station

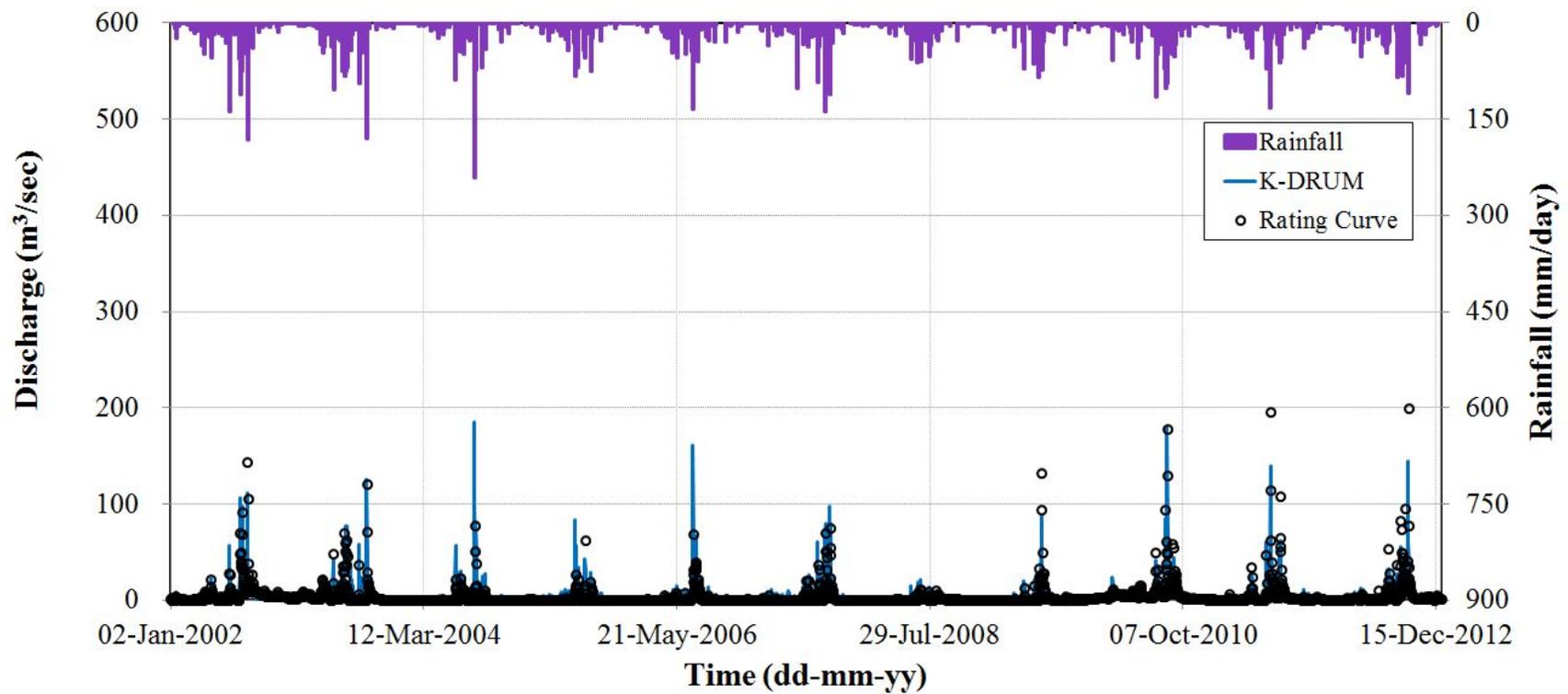


Figure 5.25 Long term discharge simulation results at Geochang 2 station

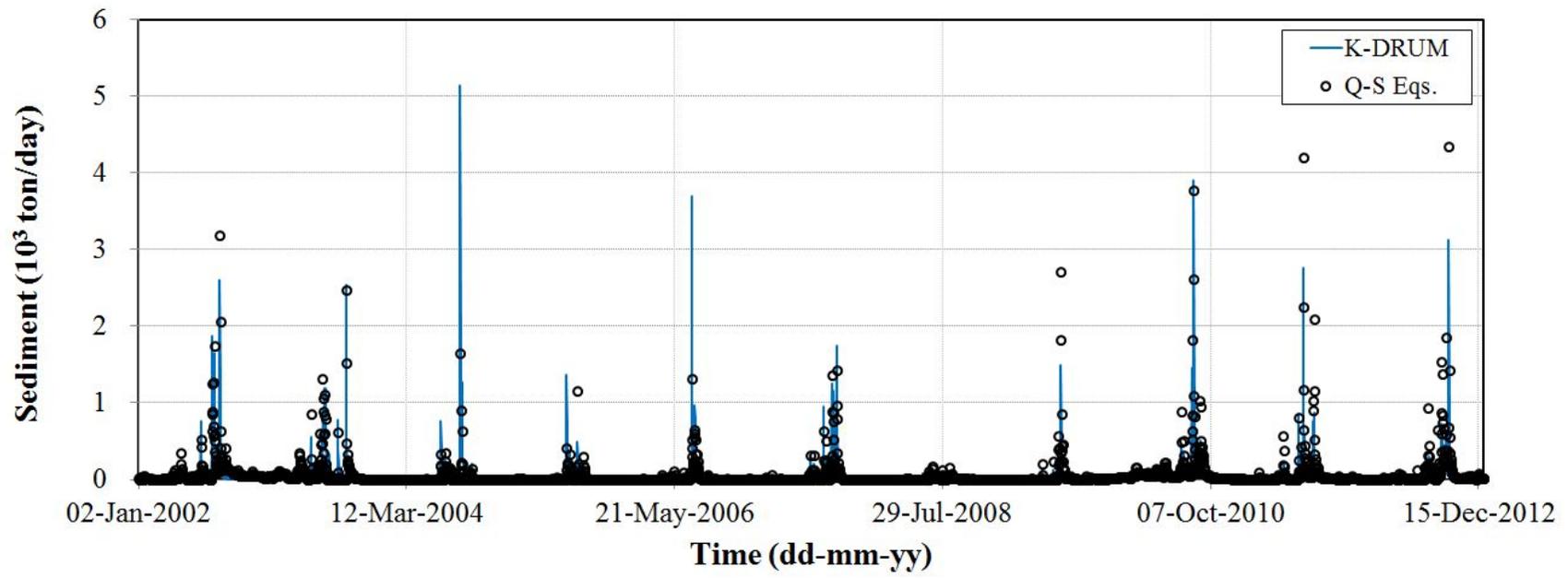


Figure 5.26 Long term sediment simulation results at Geochang 2 station

Table 5.17 Long term discharge simulation results in Hapcheon Dam watershed

K-DRUM	Dam	Geochang1		Geochang2	
	Discharge (m ³ /sec)	Discharge (m ³ /sec)	Sediment (ton)	Discharge (m ³ /sec)	Sediment (ton)
Observation	8,091.47	3,193.22	1,450,619.77	1,401.19	221,533.53
Total volume	9,847.63	2,627.31	599,212.93	1,740.68	165,115.07
Percentage	121.70%	82.28%	41.31%	124.23%	74.53%
R ²	0.93	0.87	0.78	0.57	0.72
NSE	0.93	0.86	0.76	0.50	0.70
PBIAS	-21.70	17.72	58.69	-24.23	25.47
RSR	0.27	0.37	0.49	0.71	0.55

합천댐 유역에 대한 장기 유출량과 유사량 모의결과를 토대로 모형의 성능을 평가하여 Table 5.18에 나타내었다. 평가결과 유출량 산정 결과는 대부분의 항목에서 매우좋은 수준으로 나타났으나, 유사량 산정 결과는 좋음에서 불량 수준으로 나타났다.

Table 5.18 Performance evaluation result for long term of Hapcheon Dam

Class	NSE	PBIAS (%)	RSR
Discharge	0.76 (Very good)	-9.40 (Very good)	0.45 (Very good)
Sediment	0.73 (Good)	42.08 (Unsatisfactory)	0.52 (Good)

5.3.2 저수지 퇴사 분석

저수지 퇴사분석 모형 SED2D를 이용한 모형의 검증은 K-water에서 2001년, 2012년 수행한 합천댐 퇴사량 조사보고서(Korea Water Resource Corporation, 2001, 2012) 자료를 사용하였으며, 검증 방법은 2001년 지형자료를 모의 시작단면으로 하여 2012년 실측 지형 단면 자료와 비교하였다.

본 연구에서는 Figure 5.27과 같이 적용대상 구간을 상류시작 지점 No.48 지점부터 하류 방향으로 2 km 떨어진 No.42번 지점부터 하류 방향으로 No.1 지점인 합천댐까지 모의를 수행하였다. 상류지점 No. 42 지점부터 모의를 수행한 이유는 No.46~No.43 지점의 하폭 및 수심이 갈수기에 급격히 좁아지고 수심이 낮아져 수치모의시 wet/dry 현상으로 인한 오류가 발생하기 때문에 이를 최소화하기 위해서 수심이 급격히 낮아지고 하폭이 좁아지는 상류 유역을 제외 하였다.

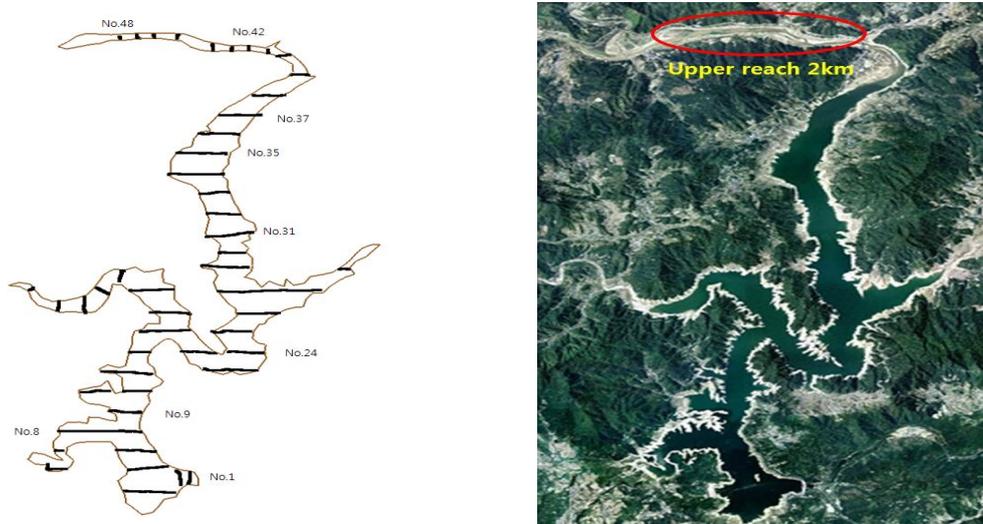


Figure 5.27 Study area in Hapcheon Dam

모형의 경계조건 자료인 수문자료는 2001년 11월부터 2012년 11월까지 실측 자료를 이용하였으며, 유량 및 유사량 자료는 K-DRUM 모형을 통해 산정된 계산값을 적용하였다. 적용된 유량 및 유사량 자료를 Figure 5.28 ~ 5.30에 나타내었다.

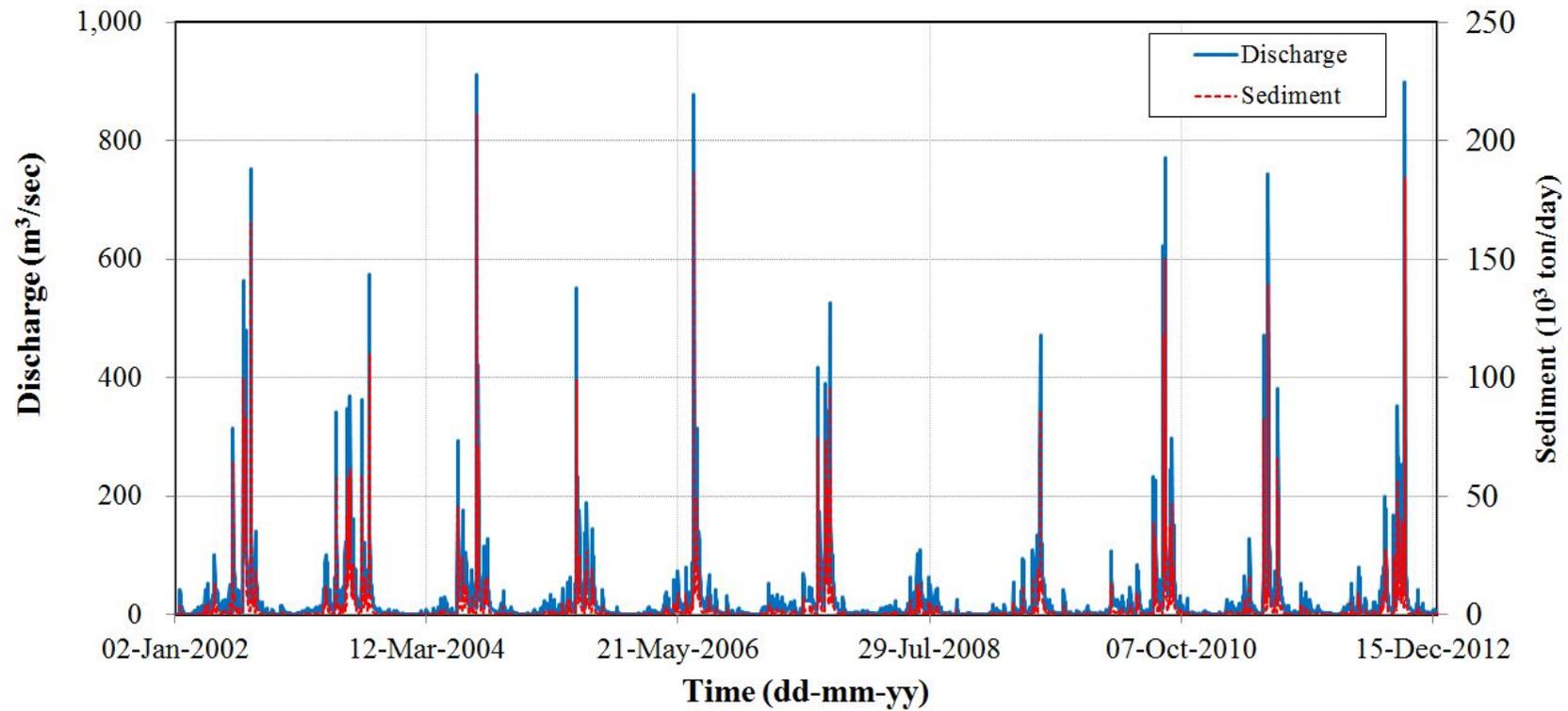


Figure 5.28 Observed and simulated discharge at boundary 1

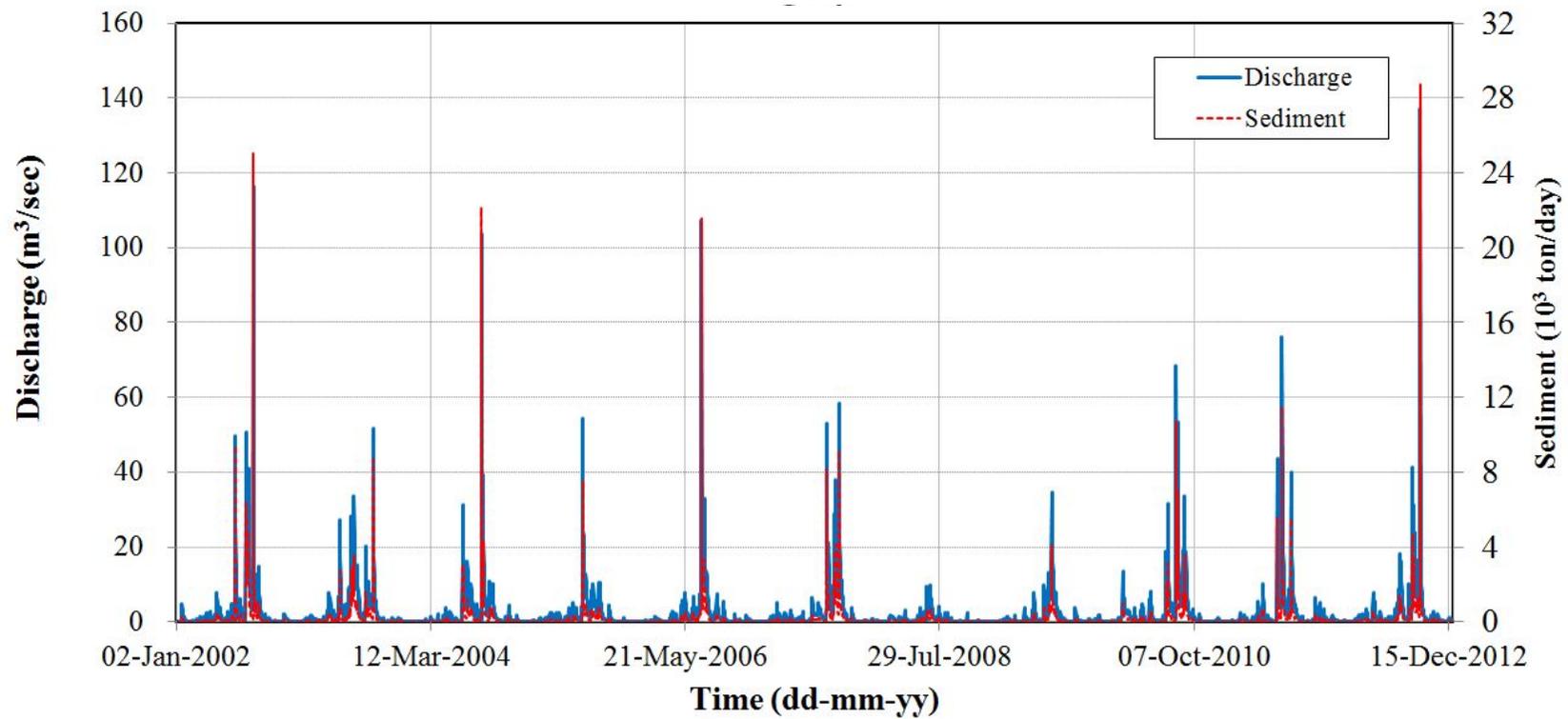


Figure 5.29 Observed and simulated discharge at boundary 2

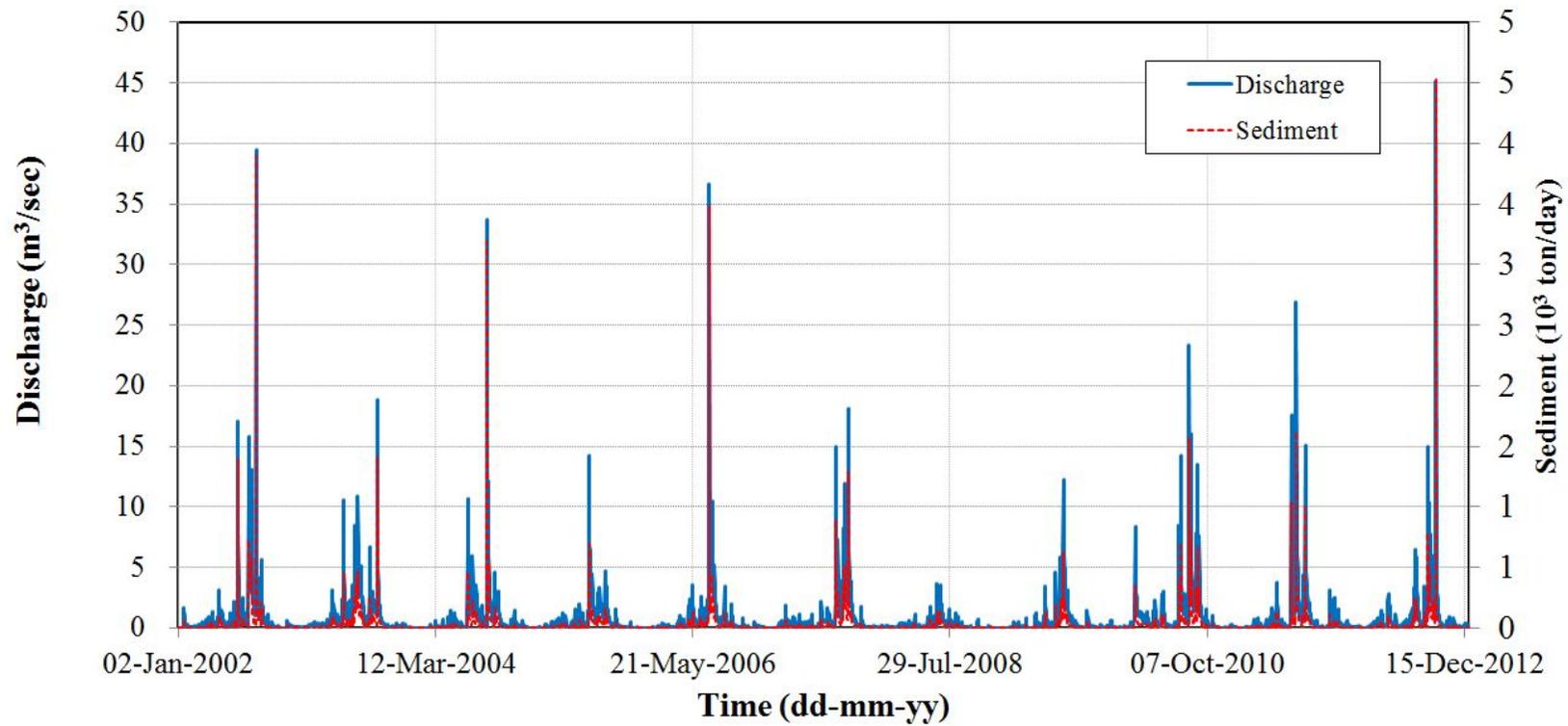


Figure 5.30 Observed and simulated discharge at boundary 3

계산결과 지점별 하상변동 변위는 최대 0.267m, 최소 0.003m로 지점 No. 42에서 가장 큰 하상변동 값이 나타났으며 No.1 지점에서 가장 작은 하상변동 변위 값이 나타났다. 지점별 관측값과 계산값의 오차 분석 결과 Table 5.19와 같이 측점 No.42 지점에서 0.063m의 오차가 발생하였으며, No.37 ~ No.24 지점에서 0.018 ~ 0.04m, No.9 ~ No.1 지점에서는 0.068 ~ 0.076m의 오차가 발생하였다. 대상 구간의 전체적인 하상변동 형태는 느린 유속 분포를 갖는 저수지 특성상 침식보다 퇴사가 우세하게 나타났다.

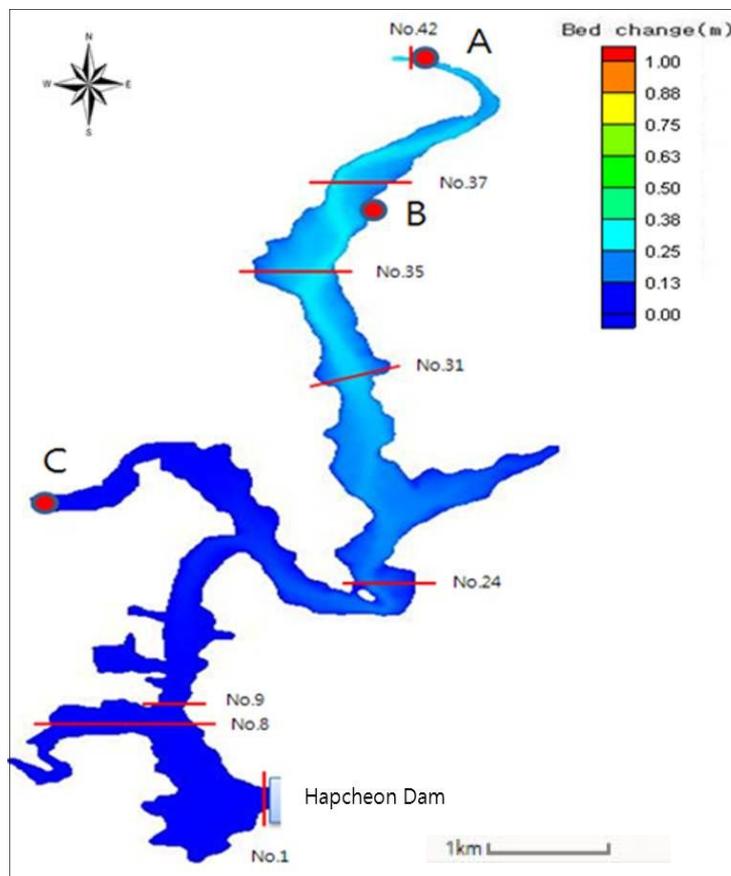


Figure 5.31 Bed change simulation results in 2012

K-water에서 수행한 합천댐 퇴사량 조사보고서(2012)에 의하면 저수지 3개 지점에서 코어채취를 실시하였다. 저수지 상류의 A지점과 중류인 B지점, 그리고 지류 유입지점 C지점으로 퇴사변동량이 다른 지점보다 큰 상류 A지점에서는 실측값과 계산값의 오차가 다소 크게 나타난 반면, 퇴사량이 적은 중류 B지점에서는 오차가 작게 나타났다. 특히, 지류 유입지점인 C지점에서는 실측값과 계산값의 오차가 가장 크게 분석되어 향후 지류 대상지점은 좀더 확대하여 조사 재검토할 필요가 있는 것으로 판단된다.

Table 5.19 Measured and predicted bed change from 2001 to 2012

Section (No.)	Variation of Measured Bed Changes (m)	Variation of Simulated Results Bed Changes (m)	Error (m)
No.42	0.33	0.267	0.063
No.37	0.26	0.234	0.026
No.35	0.25	0.232	0.018
No.31	0.23	0.210	0.020
No.24	0.06	0.100	-0.040
No.9	0.10	0.032	0.068
No.8	0.10	0.024	0.076
No.1	0.10	0.003	0.070

Table 5.20 Comparison of the bed changes simulated in the model and measured in the field

Section	Class	Value (m)
A	Observed	0.26
	Calculation	0.21
	Variation	-0.05
B	Observed	0.19
	Calculation	0.17
	Variation	-0.02
C	Observed	0.21
	Calculation	0.13
	Variation	-0.08

VI. 결 론

본 연구에서는 K-water에서 자체 개발하여 활용중인 분포형 강우유출모형인 K-DRUM을 기반으로 유역 유사량 산정기능을 추가 개발하여 합천댐과 임하댐을 대상으로 유출량과 유역 유사량을 산정하고 모형의 성능을 평가하였다. 이후 산정된 합천댐 유역 유사량을 저수지 유입경계조건으로 저수지 퇴사 분포를 분석 하였다.

이상의 분석 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. K-DRUM에 유역 유사량 산정 기능을 추가하기 위해 유사발생 매커니즘과 유사 연속방정식, 강우에 의한 토양사면 침식량과 유사농도, 그리고 하도에 서 흐름에 의한 유사이송 능력에 대한 기본방정식을 제시하였다.

2. 합천댐과 임하댐 유역의 주요지점을 대상으로 2010년과 2011년에 실측 조사한 수위 - 유량 및 유량-유사량 관계곡선식을 활용하여 각 시나리오별로 유출량과 유역 유사량을 산정하였다. 산정된 결과는 Moriasi가 제시한 모형 성능 평가방법을 활용하여 4단계로 평가 하였다.

3. 분석기간 동안 최적의 유출량 모의를 위해 침투 유출량 발생시점에 대해서는 Vieux가 제시한 조도계수를 근거로 매개변수를 조정하였고, 수문곡선의 상승과 하강형태는 토양의 층별 토심계수를 조정하였다.

4. 합천댐에서 유출량 모의결과는 관측유출량보다 22% 정도 상회하고, 임하

댐은 모의결과가 관측유출량보다 15% 정도 많은 것으로 분석되었다. 그리고 임하댐 상류 동천수위표지점 모의결과 관측유출량치보다 현저하게 작게 분석되어 앞으로 수위-유량관계곡선식 등 추가 검증이 필요할 것으로 판단된다.

5. 유역 유사량 분석결과 4개지점 동일하게 관측치보다 모의결과가 53% ~ 65% 정도로 작게 분석 되었으며, 합천댐 상류 거창2지점과 임하댐 상류 영양, 동천수위표지점에서 홍수발생시 실측 조사한 최대유사량과 모의결과는 다소 많은 차이가 나타나는 것으로 분석되었다.

6. 11년 동안 합천댐 저수지 퇴사 모의결과 전체적인 하상변동은 저수지입구부에서 27cm, 댐체 인근에서 2cm정도 퇴적되는 것으로 분석되었으며, 2012년 합천댐 퇴사량 조사시 실시한 코아 채취조사 결과와도 비슷하게 분석되었다. 저수지내의 하상변동 형태는 상류구간에서 퇴적이 활발하게 발생하고, 느린 유속분포를 갖는 저수지 특성상 퇴적이 우세하게 나타났다.

7. 본 연구결과는 향후 수자원조사 및 계획 수립시, 그리고 다목적댐 등 저수지 운영 및 관리 등 효율적인 의사결정에 필요한 기초자료로 제공 될 수 있으며, 앞으로 모형의 정확도를 높이기 위해서 실측조사와 연계하여 더 많은 유역에 적용 및 검증하여 모형의 보완이 필요하다.

참 고 문 헌

- 고덕구(1989), 소유역의 장기유출 예측을 위한 모의발생 수문모형의 개발, 박사학위논문, 서울대학교.
- 국립방재연구소(1998), 개발에 따른 토사유출량 산정에 관한 연구.
- 국토해양부(2011), 한국수문조사연보(강수량편, 수위편).
- 건설부(1978), 수문조사서.
- 건설교통부(1999), 한탄강댐 기본설계 보고서.
- 권형중·김성준(2003), “TOPMODEL과 Muskingum 기법을 연계한 안성천 유역의 홍수유출 분석,” 한국지리정보학회지, 6(1), 제1호, 1-11.
- 김광섭·김종필·배동준(2007), “Radar를 이용한 초단시간 강우예측 자료의 강우-유출 모형 적용성 분석,” 한국수자원학회 2007년도학술발표회 논문집, 한국수자원학회, 1896-1899.
- 김대근(2012), “SED2D모형을 이용한 저수지 퇴사거동 모의-모의시간간격의 민감도를 중심으로,” 상수도학회지, 26(1), 87-95.
- 김문모·이정우·이재웅(2007), “격자기반의 도시유역 지표면 유출모형의 개발 및 적용,” 한국수자원학회 논문집, 40(1), 25-38.
- 김상현(1997), “인공배수유역에서의 TOPMODEL의 적용,” 한국수자원학회 논문집, 30(5), 539-548.
- 김성준(1998), “격자기반의 운동과 강우유출모형 개발(I),” 한국수자원학회 논문집, 31(3), pp. 303-308.
- 김성준·이남호·윤광식·홍성구·이윤아(2000), “농촌 소유역 축산폐수의 유

- 역관리기법 개발 - 자연정화처리를 위한 완충대 적지분석,” **한국농촌계획학회**, 6(2), 43-49.
- 김용태(1998), 분포형 개념을 이용한 토사유출량 산정에 관한 연구. 석사학위논문, 고려대학교.
- 김진택(1995), 농업비점원 오염모형을 위한 지리정보시스템 호환모형의 개발 및 적용, 박사학위논문, 서울대학교.
- 김진택·박승우(1993), “관개용 저수지의 퇴사량과 포착효율의 추정,” **한국수문학회지**, 26(3), 63-74.
- 김진택·박승우·서승덕(1993), “관개용 저수지의 퇴사량과 유역 유사량 추정식,” **한국농공학회지**, 35(2), 104-115.
- 김철겸·김남원(2008), “충주댐 유역의 오염원에 따른 오염부하량 발생 특성,” **수질보전 한국물환경학회지**, 24(4), 465-472.
- 김충수·김학수(2007), “도시하천 소배수구역에서의 분포형 수문모형의 효율성 평가,” **한국수자원학회 2007년도학술발표회 논문집**, 1829-1833.
- 김종호·박무중·강인주·윤용남(2002), “토사유출량 산정을 위한 분포형 모형과 총괄형 모형의 비교연구,” **한국수자원학회 2002년도 학술발표회 논문집 (II)**, 934-939.
- 류시창·민병향(1975), “저수지의 퇴사에 관한 연구 - 진양지구를 중심으로-,” **한국농공학회지**, 17(3), 3840-3847.
- 류희정·김치원(1976), “저수지의 퇴사에 관한 연구,” **한국수문학회지**, 9(2), 67-75.
- 박진혁·강부식(2006), “댐유역 홍수예측을 위한 GIS기반의 분포형모형과 집

- 중형모형의 유출해석 비교,” 한국지리정보학회지, 9(3), 171-182.
- 박진혁·허영택(2008a), “초기토양조건에 대한 분포형모형 유출민감도 분석,” 대한토목학회논문집, 28(4B), 375-381.
- 박진혁·허영택(2008b), “유역특성을 반영한 공간격자기반의 분포형모형 개선,” 대한토목학회논문집, 28(3D), 431-436.
- 박진혁·허영택(2008c), “홍수유출해석을 위한 운동파기반의 분포형모형 개발 및 적용,” 한국수자원학회 논문집, 41(5), 455-462.
- 배덕효·김진훈·권원태(2000), “TOPMODEL의 단일유역 홍수예보능에 관한 연구,” 한국수자원학회 논문집, 33(1), 87-98.
- 손광익(2001), “해외 토사유출량 산정공식의 국내 적용성 검토(1) - RUSLE를 중심으로,” 한국수자원학회 논문집, 34(3), 199-208.
- 안재현·장수형·최원석·윤용남(2006), “저수지 장기운영을 위한 퇴적토사의 효율적 관리(1) : 저수지 퇴사량 산정,” 수질보전 한국물환경학회지, 22(6), 1088-1093.
- 유동훈·오윤창(2000), “지표면-지하수의 연계 수치모형,” 한국수자원학회 학술발표회논문집, 359-364.
- 유동훈·이정영(2000), “지표면-하천 유출의 연계 수치모형,” 한국수자원학회 논문집, 33(1), 65-70.
- 유완식(2010), 매개변수의 불확실성을 고려한 강우-유사-유출량 산정에 관한 연구, 석사학위논문, 충남대학교.
- 윤세의·이종태·정재욱(1997), “하천 유역의 유사량 산정 및 하상변동 예측을 위한 영향인자의 평가 분석,” 대한토목학회 논문집, 30(5), 561-270.

- 윤용남(1981), “관개용 저수지의 연평균퇴사량과 저수용량 감소율의 계산,” **대한토목학회 논문집**, 19(1), 69-76.
- 이근상·김유리·예령·이을래(2009), “GIS 기반 SWAT 모델을 이용한 동향·천천유역의 부유사량 분석,” **한국지리정보학회지**, 12(2), 82-98.
- 이기하·유완식·장창래·정관수(2010), “분포형 수문모형을 이용한 침식 및 퇴적의 시·공간 변동성 분석,” **한국수자원학회 논문집**, 43(11), 995-1009.
- 이승중·김영오·이상호·이길성(2005), “WEP 모형을 이용한 도립천 유역 물순환 모의,” **한국수자원학회 논문집**, 38(6), 449-460.
- 이창림·김현식·신철균·허영택·장선우(2013), “다목적댐 유역에 대한 K-DRUM 모형의 적용성 검토,” **한국수자원학회 학술발표집**, 638.
- 이창희·한건연·최규현(2006), “SWMM을 연계한 DEM기반의 도시침수해석 모형,” **한국수자원학회 논문집**, 39(5), 441-452.
- 장철희·김현준·노성진·김철겸(2005), “GSSHA 모형을 이용한 경안천 유역의 물순환 해석,” **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 75-79.
- 정성영(2011), 격자기반 분포형 강우-유출모형의 병렬처리기법 적용, 박사학위 논문, 충남대학교
- 정하우·김성준·최진용·김대식(1995), “소유역 지표유출의 시간적·공간적 재현을 위한 GIS응용모형,” **한국GIS학회지**, 3(2), 135-146.
- 조홍제·조인률·김정식(1997), “TOPMODEL을 이용한 강우-유출해석에 관한 연구,” **한국수자원학회 논문집**, 30(5), 515-526.
- 최민하·이승오·안재현·윤용남(2008), “SMS 모형을 이용한 포천천 유역에서의 장기하상변동 분석,” **한국방재학회 논문집**, 8(2), 139-147.

한국건설기술연구원(2003), 건강한 물순환체계 구축을 위한 유역진단기법 개발 연구.

K-water(1987), 낙동강 하구독운영관리보고서.

K-water(2001), 합천댐 퇴사량 조사용역 보고서.

K-water(2012), 합천댐 퇴사량 조사용역 보고서.

홍준범 · 김병식 · 윤석영(2006), “ V_{flo} TM 모형을 이용한 물리기반의 분포형 수문모형의 정확성 평가,” 대한토목학회 논문집, 26(6), 613-622.

Alonso, C. V., Neibling, W. H., and Foster, G.R.(1981). “Estimating sediment transport capacity in watershed modeling,” *Transactions of the ASAE* 24(5), 1211-1220.

APIP, Tachikawa, Y., Sayama, T., and Takara, K.(2008), “Lumping a physically-based distributed sediment runoff model with embedding river channel sediment transport mechanism,” *Annals of Disas. Prev. Res. Inst.*, Kyoto University, No. 51 B.

Beven, K.(1979), “On the generalized kinematic routing method,” *Water Resources Research*, 15, 1238-1242.

Chang, H. H., and Hill, J. C.(1976), “Computer modeling of erodible flood channels and deltas.” *J. of Hydraulic Division, ASCE*, 102(10), 1461-1477.

Cummings, N. W.(1935), “Evaporation from water surfaces: Status of present knowledge and need for further investigations,” *Transactions-American Geophysical Union*, 16(2), 507-510.

- Dooge, J. C. I.(1959), "A general theory of the unit hydrograph," *Journal of Geophysical Research*, 64(2), 241-256.
- Environmental Modeling Research Laboratory(2000a), *SMS (Surface Water Modeling System) GFGEN version 4.27 user's manual*. Brigham Young University.
- Environmental Modeling Research Laboratory(2000b), *SMS (Surface Water Modeling System) RMA-2 version 4.3 user's manual*. Brigham Young University.
- Environmental Modeling Research Laboratory(2000c), *SMS (Surface Water Modeling System) SED2D- WES version 4.3 user's manual*. Brigham Young University.
- Environmental Modeling Research Laboratory(2000d), *SMS (Surface Water Modeling System) tutorials version 7.0 user's manual*. Brigham Young University.
- Fair, G. M., and Hatch, L. P.(1933), "Fundamental factors governing the streamline flow of water through sand," *Journal of American Water Works Association*, 25, 1551-1565.
- Freeze, R. A. and Harlan, R. L.(1969), "Blueprint for a physically based, digitally-simulated hydrologic response model," *Journal of Hydrology*, 9, 237-258.
- Green, W. H., and Ampt, G.(1911), "Studies of soil physics, Part I - The flow of air and water through soils," *The Journal of Agricultural*

Science, 4, 1-24.

Hewlett, J. D.(1961a), "Soil moisture as a source of base flow from steep mountain watersheds," *Southeast Forest Experimental Station Paper No. 132*. Athens, GA: USDA Forest Service.

Hewlett, J. D.(1961b), "Some ideas about storm runoff and baseflow," *Southeast Forest Experiment Station Annual Report*, Athens, GA: USDA Forest Service, 62-66.

Holly, F. M., and Rahuel, J. L.(1990). "New numerical/ physical framework for mobile-bed modeling: part 1, numerical and physical principles." *J. of Hydraulic Research*, 28(4), 401-416.

Hoover, M. D., and Hursh, C. R.(1943), "Influence of topography and soil-depth on runoff from forest land," *Transactions - American Geophysical Union*, 24, 693-697.

Horton, R. E.(1919), "Rainfall interception," *Monthly Weather Review*, 147, 603-623.

Horton, R. E.(1933), "The role of infiltration in the hydrologic cycle," *Transactions - American Geophysical Union*, 14, 446-460.

Horton, R. E.(1935), "Surface runoff phenomena, Part 1 - Analysis of hydrograph," *Horton Hydrology Laboratory Publication, No. 101*, N.Y.: Voorheesville.

Horton, R. E.(1939), "Analysis of runoff plot experiments with varying infiltration capacities," *Transactions - American Geophysical Union*,

20(4), 683-694.

Horton, R. E.(1940), "An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity," *Soil Science Society of America Proceedings*, 5, 399-417.

Horton, R. E.(1945), "Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative geomorphology," *Bulletin Geological Society of America*, 56, 275-370.

Hursh, C. R.(1936), "Storm water and absorption," *Transactions - American Geophysical Union*, 17(2), 301-302.

Hursh, C. R., and Brater, E. F.(1944), "Separating hydrographs into surface and subsurface flow," *Transactions - American Geophysical Union*, 25, 863-867.

Imbeau, M. E.(1892), "La Durance: Régime, crues et inondations," *Ann. Ponts Chaussees, Mem. Doc. [in French], Ser, 3(1), 5-18.*

Izzard, C. F.(1944), "The surface profile of overland flow," *Transactions - American Geophysical Union*, 25(6), 959-968.

Jacob, C. E.(1943), "Correlation of groundwater levels and precipitation on Long Island, New York: 1. Theory," *Transactions - American Geophysical Union*, 24, 564-573.

Jacob, C. E.(1944), "Correlation of groundwater levels and precipitation on Long Island, New York: 2, Correlation of data," *Transactions - American Geophysical Union*, 24, 321-386.

- Keulegan, G. H.(1944), "Spatially variable discharge over a sloping plane," *Transactions - American Geophysical Union*, 25(6), 959-965.
- King, I. P.(1990), Program documentation RMA-2V, two dimensional finite element model for flow in estuaries and streams. Ver. 4.3 Resources Management Associates, Lafayette.
- Kostiakov, A. M.(1932), "On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and of the necessity of studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration," *Trans. 6th Communication, International Soil. Science and Society, Part 1*, 17-29.
- Lighthill, M. J., and Whitham, G. B.(1955), "On kinematic waves: 1. Flood movement in long rivers," *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 229, 281-316.
- Lowdermilk, W. C.(1934), "Forests and stream-flow: A discussion of Hoyt-Trozell report," *Journal of Forestry*, 21, 296-307.
- Mein, R. G. and Larson, C. L.(1971), *Modeling the infiltration component of the rainfall-runoff process*, Water Resources Research, Bull. 43.
- Moore, I. and Burch, G.(1986), "Physical basis of the length-slope factor in the Universal Soil Loss Equation," *Soil Society of America Journal*, 50, 1294-1298.
- Morgan, R.P.C., Quinton, J.N., Smith, R.E., Govers, G., Poesen, H.W.A., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D., Styczen, M.E., Folly, A.J.V(1998), "The European Soil Erosion Model(EUROSEM): documentation and user

- guide”, Silsoe College Cranfield University, United Kingdom.
- Morris, G. L.(1996), “Reservoirs and integrated management.” *Technical Documents in Hydrology*, 2, 135–148.
- Mosley, M. P.(1972), An experimental study of rill erosion. MSc thesis, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, USA.
- Mosley, M. P.(1974), “Experimental study of rill erosion,” *Transactions ASAE*, 17, 909–913.
- Moss, A. J.(1979), “Thin-flow transportation of solids in arid and nonarid areas: a comparison of processes,” *Hydrology of Areas of Low Precipitation*, IAHS Publ. 128.
- Nash, J. E.(1957), “The form of the instantaneous unit hydrograph,” *IASH Publication 45*, 3–4.
- Nielsen, D. R., Kirkham, D., Wijk, W. K.(1959), “Measuring water stored temporarily above the field moisture capacity,” *Soil Science Society of America Proceedings*, 23, 408–412.
- Penman, H. L.(1948), “Natural evaporation from open water, bare soil and grass,” *In. Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 193, 120–145.
- Puls, L. G.(1928), “Flood regulation of the Tennessee River,” *In Proceedings of the 70th Congress, 1st Session*, H. D. 185, Part 2, Appendix B.
- Refsgaard, A. and Storm, B.(1996), “Distributed physically-based modelling

of the entire land phase of the hydrological cycle,” in *Distributed Hydrological Modelling*, eds., Kluwer Academic, 55-70.

Renard, K. D., Foster, G. A., and Weesies, P. J.(1991), “Revised universal soil loss equation,” *Journal of Soil and Water Conservaation*, 46(1), 30-33.

Renfro, W. G.(1975), “Use of erosion equation and sediment delivery ratios for predicting sediment yield,” In: *Present and Prospective Tecnology for Predicting Sediment Yields and Sources*. US Dept. Agric, Publ. ARS-S-40, 33-45.

Remson, I., Randolf, J. R., Barksdale, H. C.(1960), “The zone of aeration and ground water recharge in sandy sediments at Sea-brook,” New Jersey. *Soil Science*, 89, 145-156.

Roessel, B. W. P.(1950), “Hydrologic problems concerning the runoff in headwater regions,” *Transactions - American Geophysical Union*, 31, 431-442.

SCS(Soil Conservation Service)(1956), Supplement A, Section 4, Chapter 10, Hydrology. *National engineering handbook*, Washington, DC: USDA.

Sherman, L. K.(1932), “Streamflow from rainfall by the unit-hydrograph method,” *Engineering News Record*, 108, 501-505.

Theis, C. V.(1935), “The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of well using groundwater storage,” *Transactions - American Geophysical Union*, 16,

519-524.

Thornthwaite, C. W.(1948), "An approach toward a rational classification of climate," *Geography Review*, 38, 55-94.

U.S. Army Corps of Engineers(1936), Method of flood routing: U.S. Army Corps of Engineers, Zanesville Dist., App. 5 of Survey Rept. on Muskingum River.

USBR(1949), *Bureau of Reclamation project feasibilities and authorizations*, Washington, U. S. Govt. Print. Off.

Williams, J. R. and Berndt, A. D.(1972), "Sediment yield computed with universal equation," *Proc. Am. Soc. Agr. Eng.* 36(4), 2087-2098.

Wischmeier, W. H., and Smith, D. D.(1965), Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. Agr. Handbook No. 282, U.S. Dept. Agr., Washington, DC.

Wischmeier, W. H., and Smith, D. D.(1978), Predicting rainfall erosion losses. Agr. handbook No. 537, U.S. Dept. of Agr., Science and Education Administration.

Yang, J. C.(1986), Numerical simulation of bed evolution in multi channel river systems. Ph.D. Thesis Dissertation, The University of Iowa, Iowa City, Iowa.

Yang, C. T.(1972). "Unit Stream Power and Sediment Transport," *Journal of the Hydraulic Division, ASCE*, 18(10), 1805-1826.

Appendix

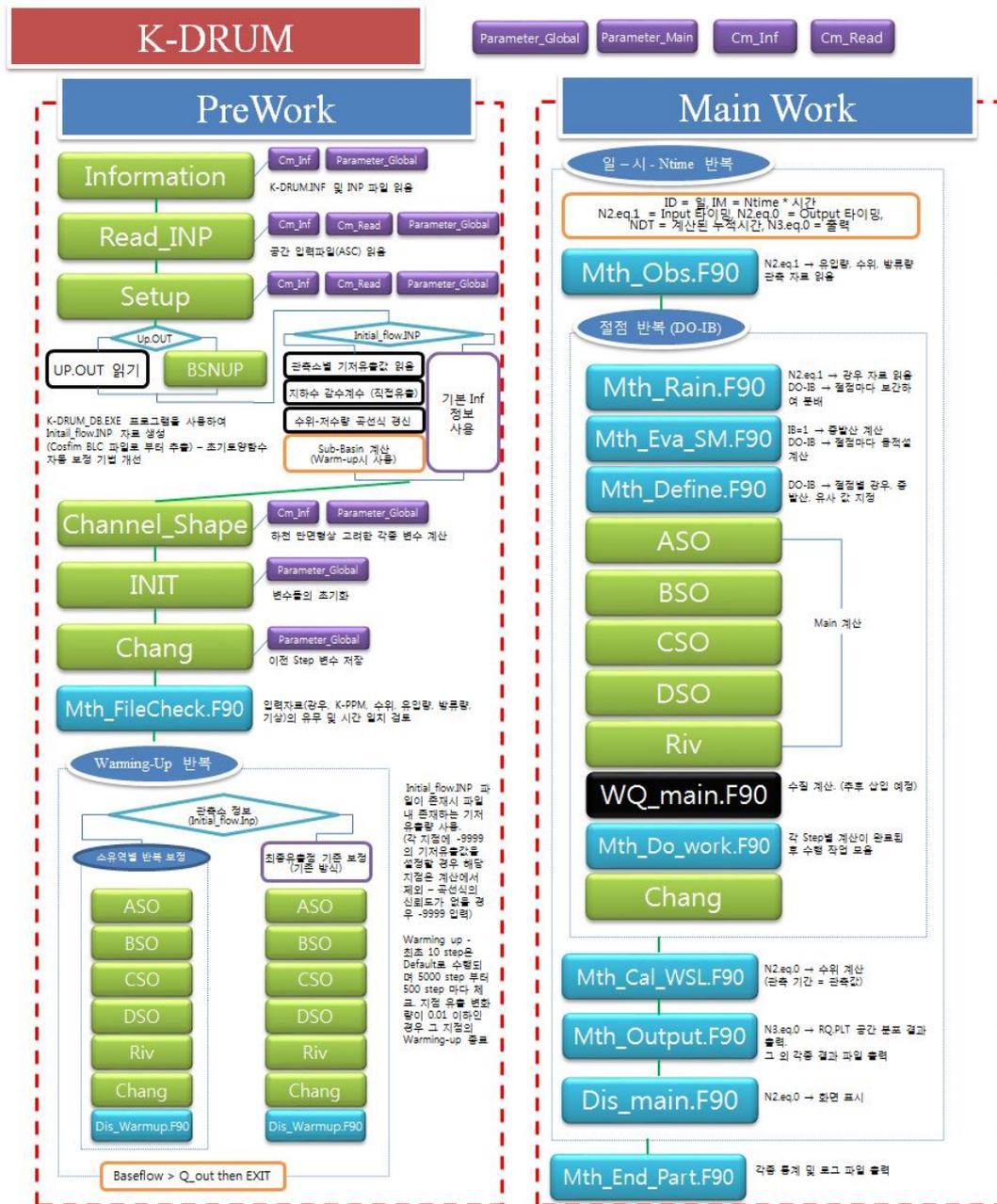


Fig. A.1 Structure of K-DRUM

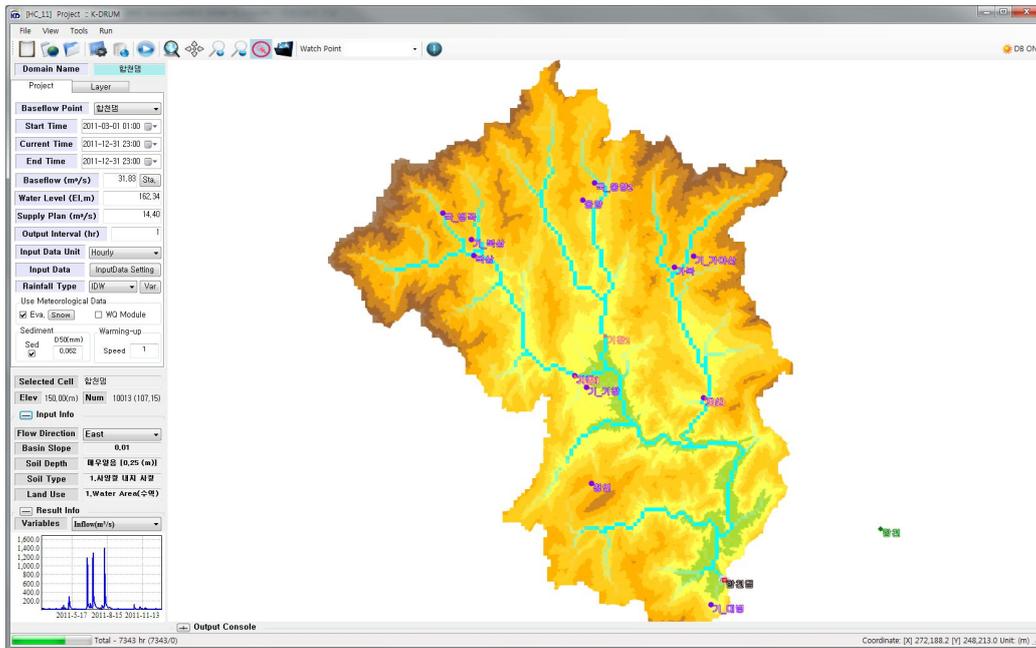


Fig. A.2 K-DRUM GUI

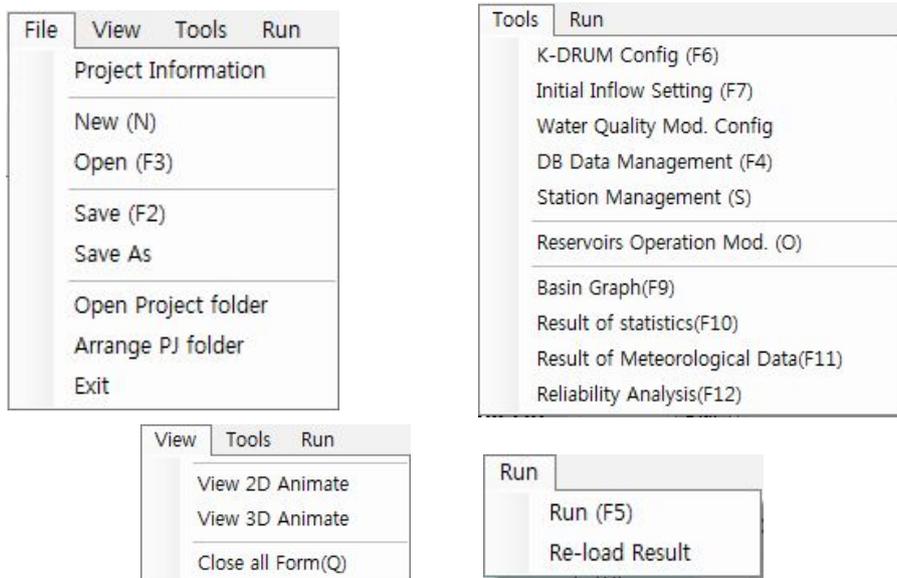


Fig. A.3 User menu

Project Layer

Baseflow Point 합천댐

Start Time 2011-03-01 01:00

Current Time 2011-12-31 23:00

End Time 2011-12-31 23:00

Baseflow (m³/s) 31.83 [Sta.]

Water Level (El.m) 162.34

Supply Plan (m³/s) 14.40

Output Interval (hr) 9999

Input Data Unit Hourly

Input Data InputData Setting

Rainfall Type IDW Var

Use Meteorological Data

Eva. Snow WQ Module

Sediment Warming-up

Sed D50(mm) 0.062

Speed 1

<Project tab>

Project Layer

Map Layers

- Meteorological OBS
- Dam
- WaterLevel OBS
- Rainfall OBS
- Flow Direction
- Stream
- Sub-Basin
- Cell Grid
- Soil Use
- Soil Type
- Soil Depth
- Slope
- DEM30
- DEM300

<Layer tab>

Selected Cell 합천댐

Elev 150.00(m) Num 10013 (107,15)

Input Info

Flow Direction East

Basin Slope 0.01

Soil Depth 매우얇음 [0.25 (m)]

Soil Type 1.사양질 내지 사질

Land Use 1.Water Area(수역)

Result Info

Variables Inflow(m³/s)

<Cell Information>

Fig. A.4 Control menu

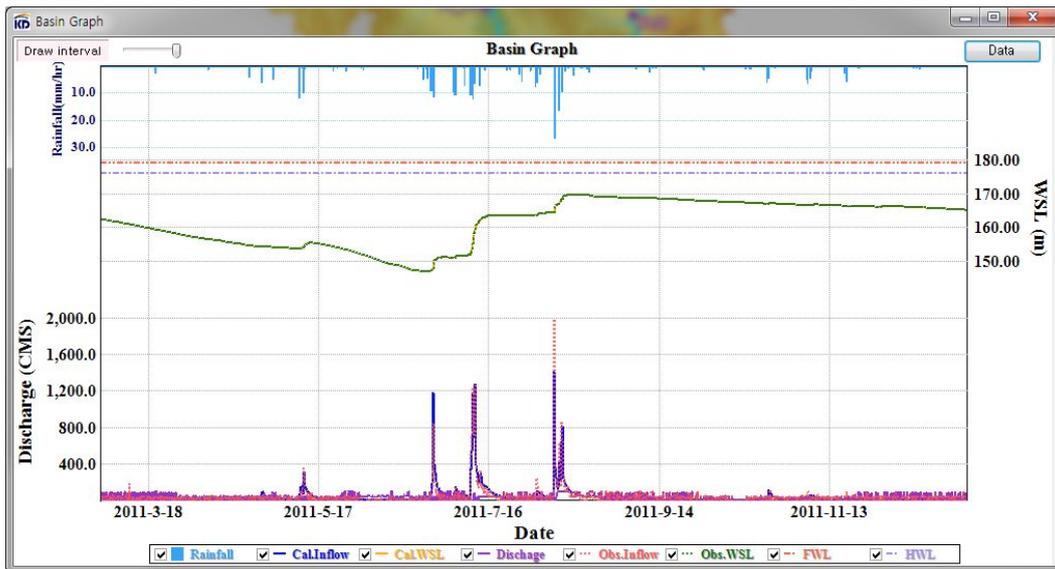


Fig. A.5 Discharge and water level data graph

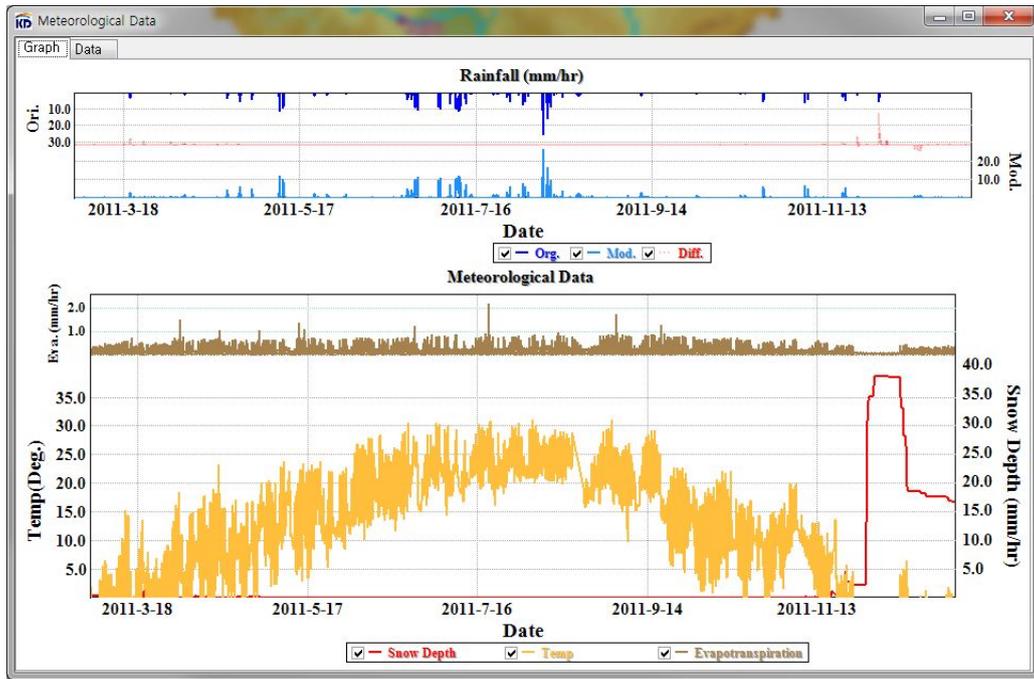


Fig. A.6 Rainfall and meteorological data graph

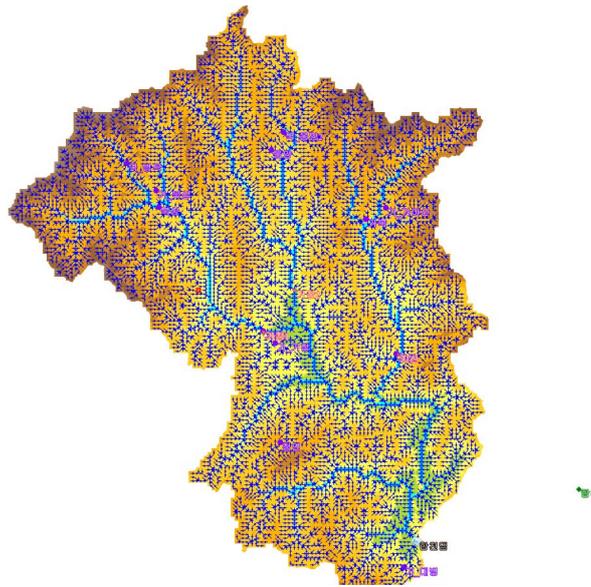


Fig. A.7 Flow direction layer

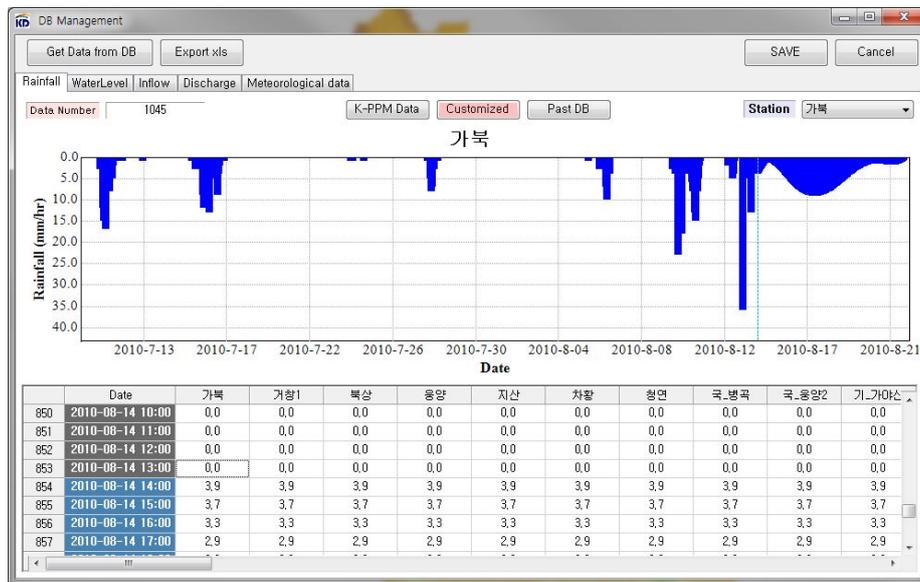


Fig. A.8 DB(data base) management

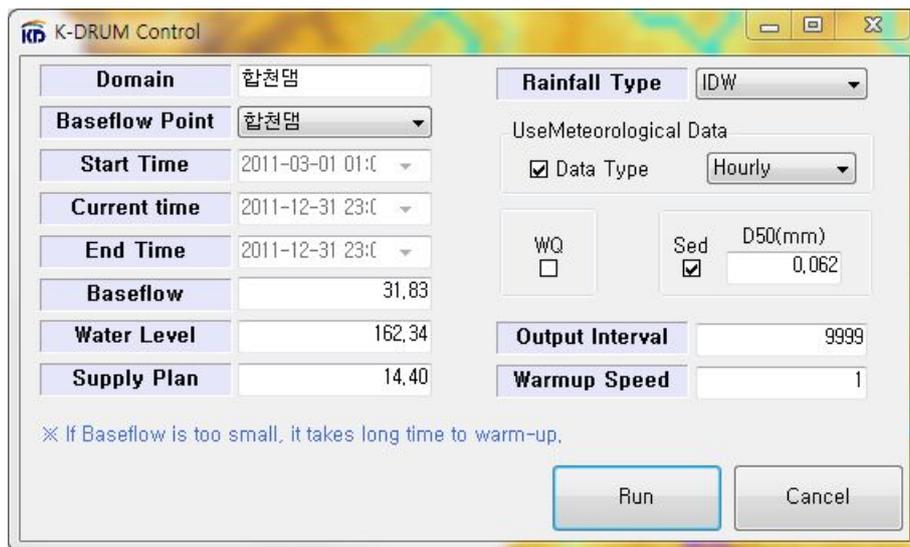


Fig. A.9 Run preview

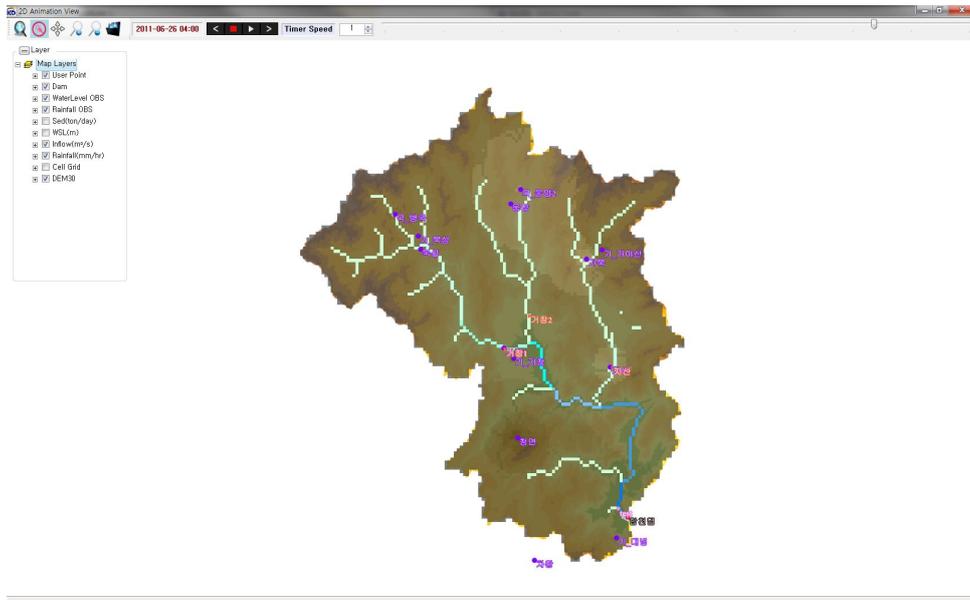


Fig. A.10 2D animation view

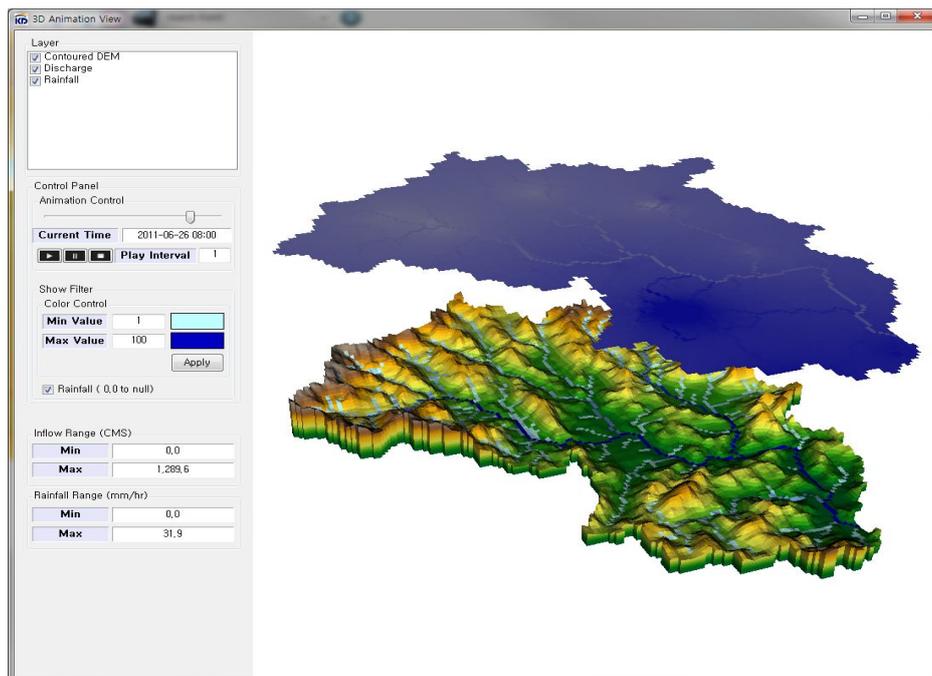


Fig. A.11 3D animation view

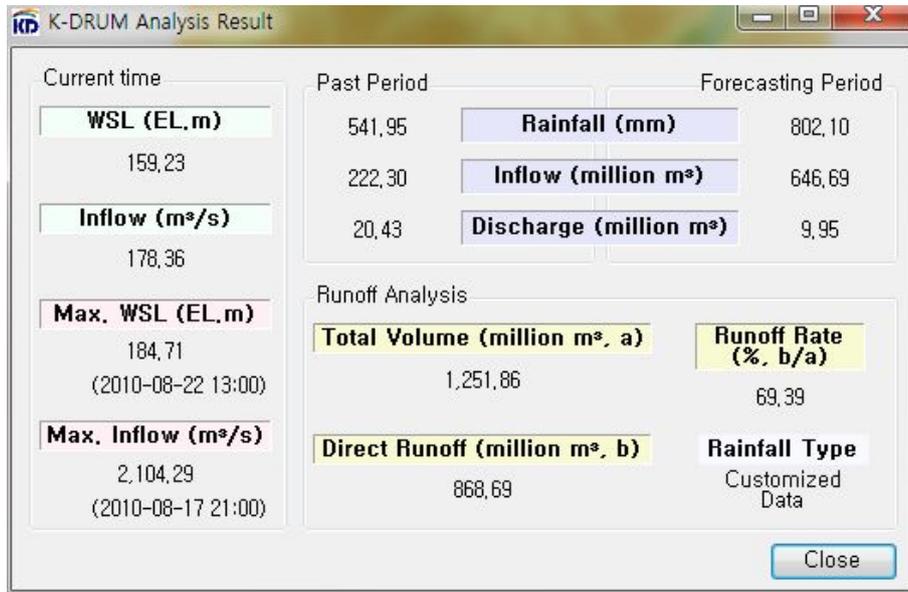


Fig. A.12 Analysis result

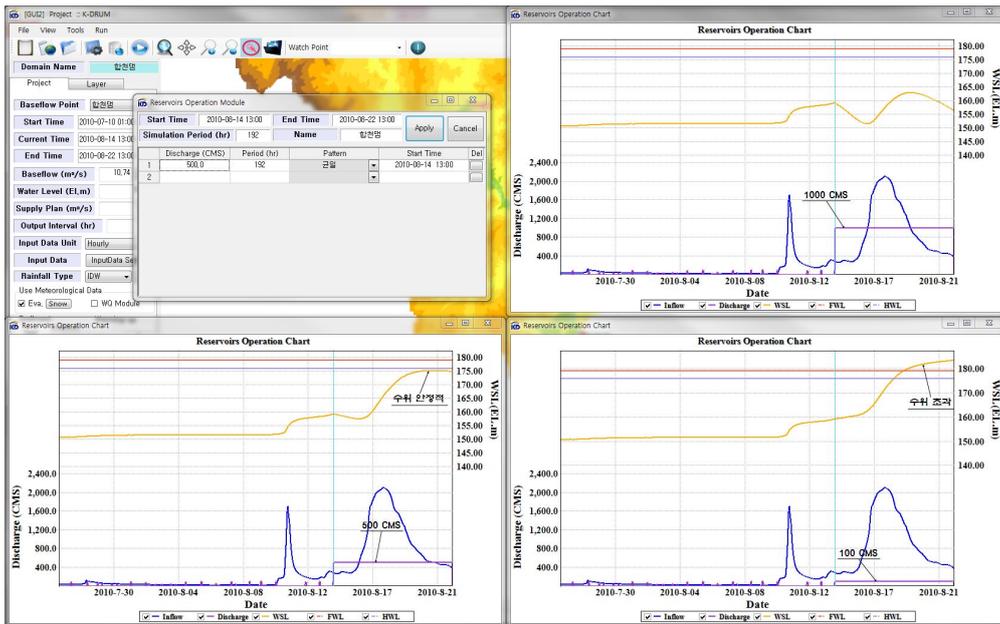


Fig. A.13 Reservoir operation tool

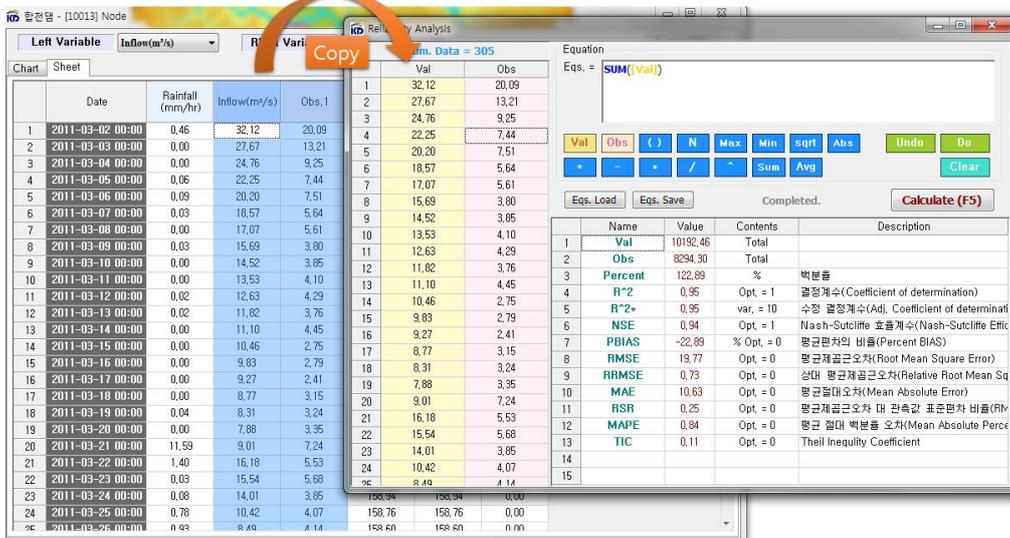


Fig. A.14 Reliability analysis tool

Table A.1 Reliability analysis method and equation

No.	Method	Name	Equation
1	R^2	Coefficient of determination	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}$
2	R^{*2}	Adj. Coefficient of determination	$R^{*2} = 1 - \frac{N-1}{N-k-1} \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad k = 10$
3	NSE	Nash-Sutcliffe Efficiency	$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}$
4	PBIAS	Percent BIAS	$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - M_i)}{\sum_{i=1}^N O_i} \times 100$
5	RMSE	Root Mean Square Error	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - M_i)^2}{N}}$
6	RRMSE	Relative Root Mean Square Error	$RRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - M_i)^2}{N}}}{\bar{O}}$
7	MAE	Mean Absolute Error	$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N O_i - M_i }{N}$
8	RSR	RMSE-observations standard deviation ratio	$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - M_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}}$
9	MAPE	Mean Absolute Percentage Error	$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^N \left \frac{M_i - O_i}{O_i} \right }{n}$
10	TIC	Theil Inequality Coefficient	$TIC = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N M_i^2 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N O_i^2}}$

※ O : Observed data, M : Calculation data

감사의 글

늦게나마 시작한 박사학위 과정, 항상 마음 한켠에는 빨리 마무리해야 하는데라는 생각만 해오다 이제야 여러 고마우신 분들의 많은 관심과 도움으로 마무리를 하게되어 진심으로 감사의 마음을 전하고자 합니다.

먼저, 박사과정을 시작하도록 마음 결정부터 논문을 완성하기까지 변함없는 관심과 격려, 그리고 적절한 시기에 마칠 수 있도록 논문 방향설정과 내용에 아낌없는 시간을 할애 해주시고 지도해 주신 맹승진 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

그리고 제 부족한 논문을 보다 더 완성된 학위논문이 될 수 있도록 세심한 관심과 지도로 가르침을 주신 김진수 교수님, 박종화 교수님, 김성준 교수님, 그리고 차기욱 처장님께 진심으로 감사를 드립니다.

회사생활을 하면서 업무와 병행하여 학위과정을 하다보니 무사히 마치기가 쉽지 않았지만 아낌없는 관심과 든든한 후원자가 되어 주신 염경택 본부장님, 김종해 본부장님, 황필선 본부장님, 정구열 본부장님, 김한수 원장님, 김진수 단장님, 차형선 처장님께 진심으로 감사의 마음을 드립니다. 그리고 함께 생활 하며 항상 격려와 도움을 주신 이경배 단장님, 김한경 처장님, 이한구 처장님, 박종택 팀장님, 신영호 팀장님, 김종래 팀장님, 최기선 팀장님, 길준표 센터장님, 이찬진 센터장님과 이화익 팀장님을 비롯한 물관리센터, 조사기획처, 물정보기술원 직원분들에게도 감사의 마음을 전합니다.

특히, 논문을 작성하는데 커다란 도움과 조언을 해준 허영택 박사, 강신욱 박사, 조완희 박사, 이창립 석사 그리고 대학원 연구실의 김형산 박사, 황주하, 이승욱, 김태우 심지훈, 정지혜, 아잠, 전경수, 손주영, 장우석 후배들과 맹수희 선·후배님들 모든 분들에게도 진심으로 감사 드립니다.

비록 좁은 지면으로 한분한분 감사의 마음을 모두 다 전할 수 없어 아쉽지만 제게 큰 힘과 사랑을 베풀어 주신 모든 지인분들에게도 감사의 마음을 드리며, 여러분의 기대에 어긋나지 않도록 더욱 열심히, 그리고 보다 멋진 인생을 살 수 있도록 노력하겠습니다.

돌아가시기 전까지 가장 큰 믿음과 희생을 보여주셨던 하늘에 계신 아버님, 그리고 항상 멀리서 넉넉한 사랑과 격려를 보내주신 어머님과 장모님 은혜는 평생 가슴에 간직하면서 살겠습니다.

끝으로 오늘 제가 이 자리에 서기까지 항상 제 옆에서 끊임없는 사랑과 배려를 보여준 세상에서 제일 사랑하는 아내 정은아, 그리고 딸 하연, 유미에게 정말 고맙다는 말과 함께 기쁨과 감사를 영원히 나누고자 합니다.

2015년 8월

김 현 식