Journal of Korean Society on Water Environment, Vol. 34, No. 5, pp. 537-547 (September, 2018)
pISSN 2289-0971 eISSN 2289-098X https://doi.org/10.15681/KSWE.2018.34.5.537

국내 미계측 유역의 유사유출량 예측을 위한 군집별 유사전달율 산정식 도출 및 평가

이서로[1a] · 박상덕[2a] · 신승숙[2b] · 김기성[1b] · 김종건[1c] · 임경재[1d,†]

[1]강원대학교 지역건설공학과
[2]강릉원주대학교 토목공학과

Development and Evaluation of Sediment Delivery Ratio Equation using Clustering Methods for Estimation of Sediment Discharge on Ungauged Basins in Korea

Seoro Lee[1a] · Sang Deog Park[2a] · Seung Sook Shin[2b] · Ki-sung Kim[1b] · Jonggun Kim[1c] · Kyoung Jae Lim[1d,†]

[1]*Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University*
[2]*Department of Civil Engineering, Gangneung-Wonju National University*
(Received 28 August 2018, Revised 19 September 2018, Accepted 21 September 2018)

Abstract

Sediment discharge by rainfall runoff affects water quality in rivers such as turbid water, eutrophication. In order to solve various problems caused by soil loss, it is important to establish a sediment management plan for watersheds and rivers in advance. However, there is a lack of sediment data available for estimating sediment discharge in ungauged basins.. Thus, reasonable research is very important to evaluate and predict the sediment discharge quantitatively. In this study, cluster analysis was conducted to classify gauged watersheds into hydrologically homogeneous groups based on the watershed characteristics. Also, this study suggests a method to efficiently predict the sediment discharge for ungauged basins by developing and evaluating the SDR equations based on the PA-SDR module. As the result, the SDR equations for the classified watersheds were derived to predict the most reasonable sediment discharge of ungauged basins with 0.24 % ~ 10.89 % errors. It was found that the optimal parameters for the gauged basins reflect well characteristic of sediment movement. SDR equations proposed in this study will be available for estimating sediment discharge on ungauged basins. Also it is possible to utilize establishing the appropriate sediment management plan for integrated management of watershed and river in Korea.

Key words : Cluster analysis sediment management, Sediment delivery ratio, Sediment discharge, Ungauged basin

[1a] 박사과정(Ph.D. Student), https://orcid.org/0000-0001-6245-2078
[2a] 교수(Professor), https://orcid.org/0000-0003-2846-6518
[2b] 박사(Ph.D.), https://orcid.org/0000-0002-8995-7268
[1b] 교수(Professor), https://orcid.org/0000-0002-7647-6561
[1c] 박사(Ph.D.), https://orcid.org/0000-0001-8813-9282
[1d,†] Corresponding author, 교수(Professor), Kjlim@kangwon.ac.kr, https://orcid.org/0000-0001-6727-9059

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. Introduction

최근 급격한 기후변화는 기상패턴 변화의 원인이 되고 있으며, 이로 인해 홍수, 산사태, 가뭄 등 자연재해가 빈번하게 발생하고 있다(Han et al., 2017). 특히 우리나라 상류 유역에서는 여름철 집중호우 발생에 따라 다량의 토양이 유실되고 있다. 강우-유출에 의해 유실된 토양은 오염물질과 함께 하천으로 유입되어 탁수 및 부영양화와 같은 수질 악화 문제와 하상 상승, 하도 불안정 등 하상변동 문제를 초래하고 있다(Park et al., 2007; Son et al., 2014). 따라서 사전에 유역 및 하도 유사관리 대책을 수립하기 위해서는 하천이나 저수지로 유입되는 유사량을 정확하게 파악하고 예측하는 것이 무엇보다 중요하다(Kim and Kim, 2014). 이를 위해서는 장기적인 현장 모니터링 조사를 통한 유사량 자료 분석이 선행되어야 할 필요성이 있다. 그러나 장기간의 연속적인 유사량 관측은 인력과 비용 등의 문제로 강수량, 수위, 유량 등과 같은 주요 수문조사 항목에 비해 어려운 실정이다. 이에 국내·외 많은 연구에서는 유역 말단 및 임의 지점에서 발생하는 유사량을 예측하기 위해 다양한 수문모형과 유사전달율(Sediment Delivery Ratio, SDR)을 이용한 과학적인 분석 기법이 활용되고 있다. SDR은 유역에서 발생한 총 토양침식량과 유역의 말단 또는 임의 지점에서 발생한 유사량의 비로 이를 통해 미계측 유역의 유사유출량을 비교적 간편하고 효율적으로 예측할 수 있다(Walling, 1983). 따라서 국외 여러 연구자들은 유역면적 또는 경사도와 같은 주요 유역특성 인자와 SDR의 관계를 고려한 경험식을 제안하였다(Boyce, 1975; USDA, 1972; Vanoni, 1975; Williams, 1975; Williams and Berndt, 1977). 국외에서 제안된 SDR 경험식은 국내 계측 및 미계측 유역의 유사유출량을 검증 또는 예측함에 있어 보편적으로 사용되어 왔다(Ji et al., 2012; Kim and Kim, 2014; Lee et al., 2014; Lee at al., 2012). 그러나 국외 유역 및 하천 환경에 맞추어 제안된 SDR 경험식을 국내 미계측 유역에 적용하는 것은 유사유출량 예측 결과에 큰 불확실성을 발생시킬 수 있다. 따라서 불확실성을 포함할 수 있는 국외 SDR 경험식을 맹목적으로 적용하는 것보다는 국내 계측 유역의 특성을 고려하여 미계측 유역의 유사유출량을 효율적이고 합리적으로 예측할 수 있는 방법이 필요하다. 매개변수 지역화 방법은 계측 유역에 대해 추정된 매개변수를 미계측 유역으로 전이하는 방법으로 국내 많은 연구에서 활용되고 있다(Kang et al., 2013; Lee and Kang, 2007). Lee and Kang (2007)은 15개 계측 유역을 대상으로 수정 3단 Tank 모형의 9개 매개변수를 추정하고 회귀식을 개발하여 미계측 유역에 전이한 사례가 있다. 또한 Kang et al. (2013)은 미계측 저수지 상류 유역의 유출을 모의하기 위해 Tank 모형의 구성성분을 개선하고 매개변수 지역화를 통해 모형의 적용성을 평가한 바 있다. 그러나 계측 유역을 대상으로 다양한 유역특성인자에 대한 최적 매개변수를 산정하고 SDR 산정식을 도출하여 수문학적 동질성을 가지는 미계측 유역의 유사유출량을 예측하고 분석한 연구는 미흡하다. 따라서 본 연구에서는 국토교통부 유량조사사업단에서 운영하는 4대강 주요 유량 및 유사 계측 유역을 대상으로 유역특성인자에 대한 군집분석을 실시하여 수문학적 동질성을 가지는 유역 집단으로 분류하고, 유역별 및 군집별 SDR 산정식 도출 및 평가를 통해 미계측 유역의 유사유출량을 효율적이고 합리적으로 예측할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

2. Materials and Methods

2.1 군집분석을 통한 군집별 대표 유역 선정

2.1.1 계측 유역 선정 및 연구 대상 후보 유역 선정

유역 및 하천관리, 수리구조물, 댐 관리 등에 대한 관심이 증가함에 따라 수문조사 유관기관에서는 하천 유사량 조사 및 재검토를 통해 주요 수계지점에서 정기적으로 유량 및 유사량 측정을 실시하고 있다. 본 연구에서는 유량조사사업단에서 운영하는 4대강 주요 유량 및 유사 계측 유역을 대상으로 수리·수문 및 기상 자료의 수집과 유역의 유사 발생 특성 인자 분석이 용이한 35개의 계측 유역을 선정하였다(Fig. 1). 또한 유역별 및 군집별 SDR 산정식 도출 및 평가에 활용될 유역을 선정하고자 우선적으로 35개 계측 유역 중 유사량에 큰 영향을 미치는 중규모 이상의 댐을 포함하는 대규모 유역은 제외하고 유사량 측정 자료의 신뢰성과 하천 현황 관리 필요성 그리고 유역의 크기와 토지이용 상태 등을 고려하여 연구 대상 후보 유역을 선정하였다(Table 1).

2.1.2 군집분석을 통한 군집별 대표 유역 선정

군집분석은 유사성이 높은 개체들을 집단으로 분류하고 군집에 해당되는 개체들의 유사성과 서로 다른 군집에 속한 개체간의 상이성을 규명하는 통계 분석 방법이다. 일반적으로 군집분석을 수행할 때 군집분석에 사용되는 인자의 단위와 규모를 고려하지 않고 군집분석을 실시한다면 특정 인자에 의해 군집이 분류되어 군집분석 결과에 오류를 범할 수 있다. 이에 본 연구에서는 35개 계측 유역을 대상으로 무차원 인자(형상계수, 밀집도, 원상율, 지류길이비) 등을 포함하여 총 9개의 유역특성인자를 산정하고 통계프로그램 SYSTAT12을 통해 유역특성인자에 대한 군집분석을 실시하였다. 군집분석에는 형상계수, 밀집도, 원상율과 지류길이비, 하천밀도, 하폭, 하천경사, 투수계수, 유출곡선지수가 사용되었다. 군집분석 방법은 계층적 방법인 Ward 방법과 비계층적 방법인 K-평균군집분석법을 이용하였으며, 개체의 군집화를 위한 유사성 거리의 측정방법은 유클리디안 거리를 사용하였다. 유클리디안 식은 아래와 같은 식 (1)처럼 표현된다.

$$d(A,B) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(X_{A_i} - X_{B_i})^2} \quad (1)$$

여기서, $d(A,B)$는 개체 A와 B사이의 거리, X_{ij}는 j의 변수

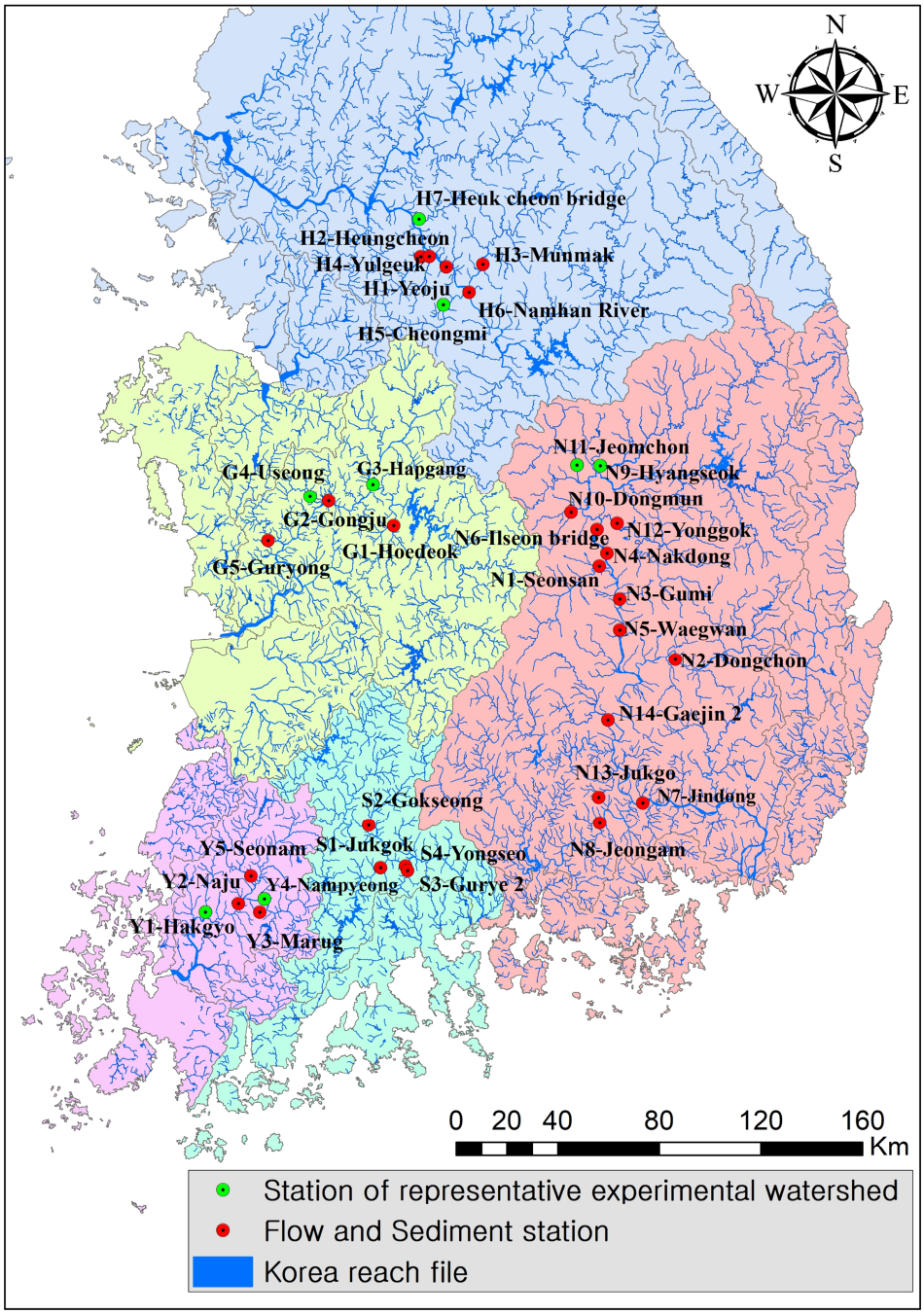


Fig. 1. Locations of flow and sediment stations.

Table 1. Result of the expected watershed

River name	Watershed ID
Han-river	Bockha-cheon(H2), Cheongmi-cheon(H5), Heuk-cheon(H7)
Nakdong-river	Naeseong-cheon(N9), Yeong-river(N11), Hoe-cheon(N14)
Geum-river	Gap-cheon(G1), Miho-cheon(G3), Yugu-cheon(G4)
Yeongsan-river	Gomakwon-cheon(Y1), Jiseok-cheon(Y4), Hwangryong-river(Y5)

i의 좌표, n은 측정 변수의 개수를 의미한다. 군집분석 결과, 대부분 유역은 크게 4개(A, B, C, D)의 군집으로 분류되었으며, 앞서 선정한 연구 대상 후보 유역이 군집별 고르게 분포하는 것으로 나타났다(Table 2). Fig. 2는 환산거리 1.5를 기준으로 계층적 방법에 의해 분류된 군집을 보여주고 있으며, Table 3은 군집별 유역특성인자의 평균값과 표준

Table 2. Results of watershed classification by cluster analysis

Cluster	Watershed ID			
	Hierarchical Method	N.E.W.	Nonhierarchical Method	N.E.W.
A	H1, H6, N1, N2, N7, N8, N13, G2, **G3**, **Y1**, Y3, S2, S3	2	H1, H6, N1, N2, N7, N8, N13, G2, **G3**, **Y1**, Y2, Y3, **Y5**, S1, S2, S3	3
B	H3, H4, **H5**, **N9**, N10, Y2, **Y5**, S1	3	H3, H4, **H5**, **N9**, N10	2
C	**H2**, **H7**, N3, N4, N5, N6, N12, **N14**, **G1**, **Y4**, S4	5	**H2**, **H7**, N3, N4, N5, N6, N12, **N14**, **G1**, **Y4**, S4	5
D	**N11**, **G4**, G5	2	**N11**, **G4**	2

N.E.W.: Number of Expected Watersheds

Table 3. Average values of watershed characteristics by cluster analysis

Cluster		Shape factor	Compact-ness	Circularity ratio	Tributary length ratio	Drainage density	Channel width	Channel slope	Permeability coeffcient	CN
H.M.	A	0.17(0.1)	2.67(0.27)	0.14(0.02)	0.81(0.09)	0.32(0.07)	0.33(0.13)	1.77(0.19)	0.73(0.31)	72.22(3.09)
	B	0.25(0.12)	2.47(0.28)	0.16(0.04)	0.70(0.14)	0.31(0.08)	0.30(0.17)	1.03(0.43)	1.28(0.74)	72.42(2.23)
	C	0.21(0.11)	2.33(0.24)	0.18(0.04)	0.77(0.1)	0.30(0.06)	0.34(0.15)	2.81(0.43)	0.80(0.23)	71.57(2.8)
	D	0.20(0.08)	2.23(0.37)	0.21(0.06)	0.62(0.06)	0.37(0.18)	0.20(0.03)	6.53(1.24)	0.70(0.29)	69.68(0.71)
N.M.	A	0.18(0.11)	2.67(0.24)	0.14(0.02)	0.81(0.08)	0.33(0.07)	0.34(0.14)	1.65(0.32)	0.68(0.3)	72.16(2.83)
	B	0.24(0.01)	2.33(0.46)	0.19(0.07)	0.62(0.09)	0.28(0.14)	0.19(0.04)	5.84(0.47)	0.86(0.1)	69.3(0.38)
	C	0.21(0.11)	2.33(0.24)	0.18(0.04)	0.77(0.1)	0.30(0.06)	0.34(0.15)	2.81(0.43)	0.82(0.23)	71.57(2.8)
	D	0.26(0.11)	2.35(0.3)	0.18(0.04)	0.63(0.13)	0.26(0.05)	0.25(0.13)	0.98(0.56)	1.76(0.4)	72.75(2.67)

H.M.: Hierarchical Method, N.M.: Nonhierarchical Method

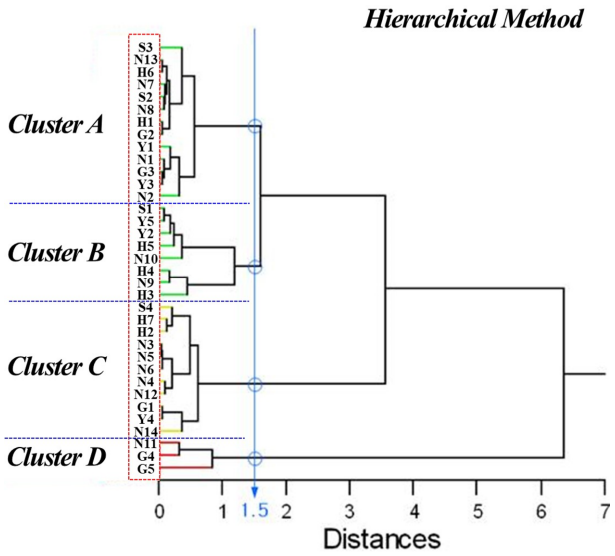


Fig. 2. Results of cluster tree by Hierarchical method.

편차를 보여주고 있다. 본 연구에서는 앞서 선정한 연구 대상 후보 유역과 군집별 유역을 비교하여 4대강 유역별 2개의 유역이 포함될 수 있도록 각 군집별 2개씩 총 8개 유역(A: 미호천, 고막원천, B: 청미천, 내성천, C: 흑천, 지석천, D: 영강, 유구천)을 연구 대표 유역으로 선정하였다.

2.2 유사전달율 산정을 위한 기초자료 구축

2.2.1 SWAT 모형 개요

SWAT 모형은 미국 농무성(United States Department of Agriculture, USDA) 농업연구소(Agricultural Research Service, ARS)에서 개발된 유역단위 준분포형 장기 강우-유출 모형이다. SWAT 모형은 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 물과 유사 및 농업화학물질의 거동에 대한 토지관리 방법의 영향을 예측하고 모의할 수 있다(Arnold et al., 1998). 수문, 토양유실, 영양물질, 하도추적 4가지 부모형으로 구성된 SWAT 모형은 유역을 몇 개의 소유역으로 구분하고 소유역 내에서 동일한 토지이용과 토양의 조합인 수문반응단위(Hydrologic Response Unit, HRU)로 세분화하여 유역단위 수문현상을 모의한다. 또한 SWAT 모형은 식 (2)와 같이 수정범용토양침식모델(Modified Universal Soil Loss Equation, MUSLE)을 통해 강우 사상별 HRU에서 발생한 토양유실량을 산정한다. MUSLE 모형은 강우인자 대신에 유출인자를 사용하기 때문에 단일호우사상에 대한 모의가 가능한 장점이 있다.

$$Y = 11.8 \times (Q_{surf} \times q_{peak} \times A_{hru})^{0.56} \times K_{USLE} \times C_{USLE} \times P_{USLE} \times LS_{USLE} \times CFRG \quad (2)$$

여기서, Y는 유사량(metric tons), Q_{surf}는 지표유출량(m^3/ha), q_{peak}는 첨두유출량(m3/sec), A_{hru}는 수문반응단위의 면적(ha), K_{USLE}는 토양침식인자, C_{USLE}는 작물관리인자, P_{USLE}는 토양보전인자, LS_{USLE}는 경사길이와 경사도인자, $CFRG$는 토양입자 형상계수를 의미한다.

Table 4. USLE P factor according to landuse and slope

Landuse	Percent of slope	P factor
Bare land	-	1.00
Paddy	Percent of slope < 2	0.12
	Percent of slope 2 ~ 7	0.10
	Percent of slope 7 ~ 15	0.12
	Percent of slope 15 ~ 30	0.16
	Percent of slope > 30	0.18
Field	Percent of slope < 2	0.60
	Percent of slope 2 ~ 7	0.50
	Percent of slope 7 ~ 15	0.60
	Percent of slope 15 ~ 30	0.90
	Percent of slope > 30	1.00
Pasture	-	1.00
Forest	-	1.00
Orchard	-	1.00

2.2.2 SWAT 모형 입력자료 구축 및 토양침식량 산정

본 연구에서는 군집별 대표 유역을 대상으로 SWAT 모형을 이용하여 토양침식량을 산정하기 위해 SWAT 모형에 필요한 유역 내 기상자료, 토양특성자료, 지형자료, 식생 및 토지이용 자료 등 입력자료를 구축하였다. 수치표고모형은 국립지리원에서 제공하는 수치지도(1:5,000)로부터 격자크기 30 m DEM(Digital Elevation Model, DEM)을 제작하여 이용하였다. 토지이용도는 환경부 환경공간정보서비스에서 제공하는 2007년 기준으로 작성된 23개 중분류 토지이용자료(1:25,000)를 이용하였으며, 토양도는 농촌진흥청 농업과학기술원에서 제공하는 개략토양도(1:50,000) 자료를 이용하였다. 기상자료는 유역 인근 지배 기상관측소로부터 2007년부터 2014년까지 8개년도의 일 강수량(mm), 기온(°C), 태양복사량(MJ/m^2), 풍속(m/sec), 상대습도(%) 자료를 제공받아 구축하였다. 구축된 모형 입력자료를 바탕으로 본 연구에서는 모형 안정화 기간을 고려하여 2011년부터 2014년까지 SWAT 모형 모의를 통해 군집별 대표 유역의 월단위 토양침식량을 산정하였다. 유역 내 발생한 토양침식량 값은 하도추적과정을 고려하지 않은 HRU별 유사 발생량의 합을 전체 유역의 총 토양침식량 값으로 가정하였으며, 기본적으로 MUSLE 모형에 필요한 유출에너지인자, 토양침식인자(K), 경사길이와 경사도인자(LS), 작물관리인자(C) 등 4개 인자는 강우량 및 지형자료를 바탕으로 산정하였다. 또한 보전관리인자(P)는 환경부 표토의 침식 현황 조사에 관한 고시를 참고하여 토지 이용 및 경사도에 따른 보전관리인자(P) 값을 적용하였다(Table 4).

2.2.3 유량-총유사량 관계곡선식을 통한 총유사량 산정

총유사량은 유수의 작용으로 인해 물속에 떠다니면서 이동하는 토사들이 하천의 한 단면을 통과할 때의 총량을 의미한다. 총유사량 추정은 수리 구조물의 설계 및 유지관리, 하도관리 등 유역 및 하천 유사 관리에 있어 매우 중요하다(Gwon et al., 2014). 총유사량을 추정하기 위해서는 실제 현장에서 직접 실측하는 방법이 가장 좋은 방법이지만 하천의 하상에 소류하여 이송되는 소류사량을 실측하는 것은 상당히 많은 시간과 노력이 요구된다. 이에 하천에서 직접 채취한 부유사량으로 수정 아인쉬타인 방법(Modified Einstein Procedure, MEP) 등을 이용하여 총유사량을 간접적으로 추정하는 것이 일반적인 방법이다(Ahn et al., 2010). 국토교통부 유량조사사업단은 4대강 수계 주요 지점에서 실제 측정한 유량과 유사량 측정 자료를 바탕으로 수정 아인쉬타인 방법에 기반하여 유량-총유사량 관계곡선식을 개발하고 실무에 활용하고 있다. 본 연구에서는 군집 유역별 수위관측소에서 2011년부터 2014년까지 측정된 유량조사사업단의 유사량 성과를 이용하여 유량-총유사량 관계곡선식을 도출하고 이를 통해 총유사량을 산정하였다(Table 5). 유량-총유사량 관계곡선식에 필요한 유량자료는 각 수위관측소에서 개발된 수위-유량관계곡선식으로부터 산정한 유량자료를 이용하였다.

Table 5. Sediment rating curve used in this study

Cluster		Sediment rating curve
A	G3	$Q_{ts} = 1.2335 \times Q^{1.5021}(2012)$
	Y1	$Q_{ts} = 0.0232 \times Q^{2.2459}(2013)$, $Q_{ts} = 0.6091 \times Q^{1.6754}(2014)$
B	H5	$Q_{ts} = 0.4696 \times Q^{1.9454}(2012)$
	N9	$Q_{ts} = 5.3859 \times Q^{1.4007}(2011)$, $Q_{ts} = 0.2502 \times Q^{1.8236}(2012)$
C	H7	$Q_{ts} = 0.6949 \times Q^{1.4591}(2013)$
	Y4	$Q_{ts} = 0.0294 \times Q^{2.1385}(2012)$, $Q_{ts} = 0.0107 \times Q^{2.1350}(2014)$
D	N11	$Q_{ts} = 0.0149 \times Q^{2.1513}(2013)$, $Q_{ts} = 0.1789 \times Q^{1.4813}(2014)$
	G4	$Q_{ts} = 0.0882 \times Q^{2.0875}(2013)$

2.3 유사전달율(Sediment Delivery Ratio, SDR)

유사전달율(Sediment Delivery Ratio, SDR)은 유역에서 발생한 총 토양침식량과 유역의 최종 출구나 임의 지점에서 발생한 유사량의 비를 의미한다. 효과적으로 유역 및 하천을 관리하기 위해서는 유역에서 발생하는 토양침식량에 대한 관리 대책 수립도 중요하지만 수체에 도달하는 유사량의 관리가 무엇보다 중요하다(Kim and Kim, 2013). SDR은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며, S_y(ton/yr)는 최종 출구 혹은 임의 지점에서의 유사량을 의미하며, T(ton/yr)는 유역에서 발생한 총 토양침식량을 의미한다.

$$SDR = \frac{S_y}{T} \tag{3}$$

SDR은 유역면적, 유역 및 하천 경사, Curve Number, 유역

형상, 강우 패턴, 토지이용도, 토양 입자, 하천 밀도 등과 같은 다양한 물리적 인자와 관련이 있다(Park et al., 2007). 그러나 이러한 모든 자연 요소를 고려하여 SDR을 식으로 정의하는 것은 현실적으로 어려움이 있다. 이에 여러 연구자들은 선행연구를 통해 주요 몇 가지 인자를 고려한 경험식을 제안하였다. 아래 식 (4)~(7)은 SDR과 유역면적 및 하천 경사의 함수로 표현된 경험식(Boyce, 1975; USDA, 1972; Vanoni, 1975; Williams, 1975)이며, 식 (8)은 유역면적, 유역 평균 경사, Curve Number 3가지 인자를 고려한 경험식이다(Williams and Berndt, 1977). 또한 Lim et al. (2005)과 Park et al. (2010)에 의해 개발된 SATEEC (Sediment Assessment Tool for Effective Erosion Control, SATEEC) ArcView GIS 시스템에는 유역면적 및 하천 경사를 고려한 SDR 산정식 이외에 식 (8)에서 고려하고 있는 유역특성인자에 대한 최적 매개변수를 산정할 수 있는 GA (Genetic Algorithm)-SDR 모듈이 탑재되어 있다.

$$SDR = 0.5656 \times Area^{-0.11} \quad (4)$$

$$SDR = 0.4724 \times Area^{-0.125} \quad (5)$$

$$SDR = 0.3750 \times Area^{-0.2382} \quad (6)$$

$$SDR = 0.627 \times Slope^{0.403} \quad (7)$$

$$SDR = 1.366 \times 10^{-11} \times Area^{-0.0998} \times Slope^{0.3629} \times CN^{5.444} \quad (8)$$

2.4 Parasol 알고리즘을 이용한 Parasol-SDR 모듈 개발

2.4.1 Parasol 알고리즘(Parameter solution, Parasol)

Parasol(Parameter solution, Parasol) 알고리즘은 최적의 매개변수를 찾아내기 위한 방법으로 목적함수 SSQ (Sum of the squares of the residuals, SSQ)를 기준으로 SCE-UA 알고리즘을 사용하여 매개변수들을 변환한다. SSQ는 아래의 식 (9)를 통해 계산되며 Q_i는 실측값, S_i는 모의값을 의미한다. SSQ는 최종적으로 NSE (Nash-sutcliffe model efficiency coefficient, NSE)를 산정하기 위한 식 (10)에서 사용되며 여기서 $\overline{Q}$는 실측값의 평균을 의미한다. NSE는 최종 매개변수를 결정하는데 사용되며 1에 수렴하거나 또는 SSQ의 수치가 작을수록 실측값과 모의값의 상관관계가 높아진다.

$$SSQ = \sum_{i=1}^{n} (Q_i - S_i)^2 \quad (9)$$

$$NSE = 1 - \frac{SSQ}{\sum_{n=1}^{n} (Q_i - \overline{Q})^2} \quad (10)$$

2.4.2 Parasol 알고리즘을 이용한 PA-SDR 모듈 개발

본 연구에서는 군집 유역에 대한 최적 SDR을 산정하기 위해 일련의 과정을 자동적으로 반복하여 유역특성인자에 대한 최적 매개변수를 산정하는 Parasol 알고리즘 기반 PA (Parasol Algorithm, PA)-SDR 모듈을 개발하였다(Fig. 3). 기존에 개발된 GA-SDR 모듈은 Curve Number 값을 단일유

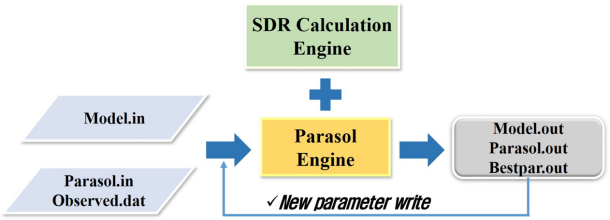


Fig. 3. Flow chart of Parasol-SDR module.

역특성인자로 고려하였지만, 본 연구에서 개발한 PA-SDR 모듈은 세부적으로 각 토지이용별 면적가중 계산된 Curve Number 값을 SDR 산정식의 유역특성인자로 고려하였다. 또한 추가적으로 다양한 유역특성인자를 고려하고자 단위면적당 하천길이를 의미하는 하천밀도와 토양층 0~10 cm 깊이에 해당하는 점토 비율을 고려하였다. PA-SDR 모듈 내 SDR 산정식은 아래 식 (11)과 같다.

$$SDR = A \times Area^{B} \times Slope^{C} \times R_1 CN_1^{D} \times R_2 CN_2^{E} \times R_3 CN_3^{F} \times D_d^{G} \times Clay^{H} \quad (11)$$

여기서, $A \sim H$는 계수 또는 지수, $Area$는 유역면적(km^2), $Slope$는 평균 유역 경사도(%), $R_{1\sim3}$는 토지이용별 면적비, $CN_{1\sim3}$는 토지이용별 유역 Curve Number, D_d는 하천밀도(km/km^2), $Clay$는 토양층 0~10 cm 내 점토비율(%)을 의미한다.

2.5 PA-SDR 모듈을 통한 유사전달율 산정식 도출 및 평가

본 연구에서는 군집 유역별 PA-SDR 모듈에 필요한 유역특성인자를 추출하고 토양침식량 및 유사량 자료를 선행 구축하였다. Table 6은 PA-SDR 모듈에 사용된 군집 유역별 유역특성인자를 보여주고 있다. 하천밀도 특성은 한국형 국가하천도(Korea Reach File, KRF) 자료를 이용하여 추출하였으며, 유역 내 토양 속성 비율은 국내에서 가용할 수 있는 농촌진흥청 토양통 자료를 바탕으로 면적·깊이 가중 방법을 적용하여 산정하였다. 이를 바탕으로 PA-SDR 모듈을 통해 유역특성인자에 대한 최적 매개변수를 산정하고 유역별 및 군집별 SDR 산정식을 도출하였다. 또한 계측유역에 대한 최적 매개변수가 수문학적 동질성을 가지는 미계측 유역의 유사유출량을 예측하는데 미치는 영향을 두 가지 방법을 통해 간접적으로 분석하였다. 첫 번째 방법은 군집 내 각 유역을 미계측 유역으로 가정하고 유역별 최적 매개변수를 각 유역에 전이하는 매개변수 교차방법이다. 두 번째 방법은 군집별 두 개의 유역을 모두 미계측 유역으로 가정하고 군집별 최적 매개변수를 해당 군집 내 유역에 전이하는 방법이다. 최종적으로 본 연구에서는 두 가지 방법을 이용하여 미계측 유역으로 가정된 유역의 유사유출량을 예측하고 실측 유사유출량과 비교 분석하였다. 또한 기존에 USDA (1972), Vanoni (1975), Boyce (1975) 등이 제안한 SDR 경험식을 이용하여 미계측 유역의 유사유출량을 예측하고 실측 유사유출량과 비교 분석하여 PA-SDR 모듈을

Table 6. Sediment rating curve used in this study

Cluster		Area (km^2)	Slope of watershed (%)	Landuse (Curve number)			Drainage density (km/km^2)	Clay 0 ~ 10 cm (%)
				Urban	Agriculture	Forest		
A	G3	1,850.03	17.60	0.08(89.81)	0.33(78.11)	0.47(64.48)	0.28	16.26
	Y1	190.14	18.00	0.04(88.64)	0.41(78.25)	0.46(65.66)	0.39	22.68
B	H5	513.57	16.00	0.07(93.15)	0.37(78.55)	0.41(62.29)	0.30	14.99
	N9	1,512.01	22.70	0.04(92.64)	0.24(75.72)	0.63(59.93)	0.23	12.89
C	H7	306.66	27.03	0.04(93.23)	0.10(77.81)	0.75(60.17)	0.34	17.32
	Y4	580.27	28.10	0.03(89.05)	0.19(77.14)	0.69(66.80)	0.45	24.30
D	N11	614.45	32.50	0.03(93.37)	0.11(75.95)	0.80(61.72)	0.18	19.77
	G4	257.51	22.00	0.02(90.33)	0.18(77.38)	0.74(72.72)	0.39	15.52

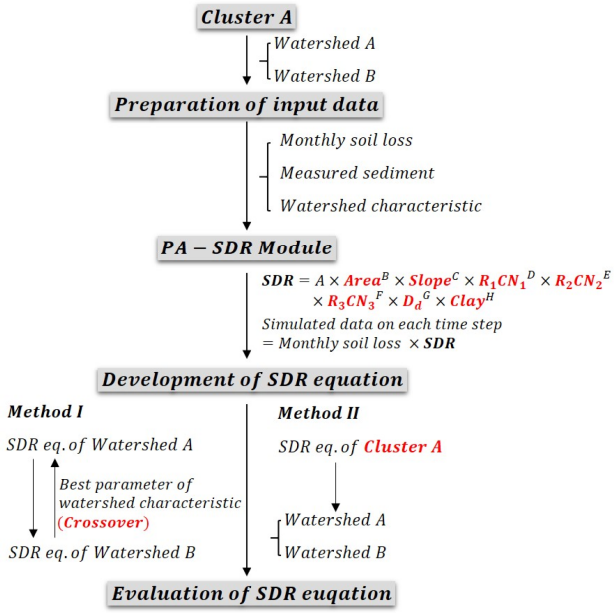


Fig. 4. Flow chart of research method.

통해 도출된 SDR 산정식의 적용성을 평가하였다. Fig. 4는 위에서 언급한 SDR 산정식 도출 및 적용성 평가 과정을 보여주고 있다.

3. Results and Discussion

3.1 토양침식량 및 총유사량 산정 결과

본 연구에서는 군집별 대표 유역을 대상으로 토양침식량과 총유사량을 산정하고 유역면적으로 나누어 환산하여 분석하였다. 분석 결과, 유역별 토양침식량과 총유사량의 범위는 각각 578.2 ~ 2,354.3 ton/km^2/yr, 5.4 ~ 265.3 ton/km^2/yr로 분석되었다. C 군집에 속한 흑천에서 토양침식량이 가장 높게 나타났으며, 두 번째로 B 군집에 속한 내성천 유역에서 토양침식량이 가장 높게 나타났다(Fig. 5). 특히 B 군집과 C 군집에 속한 유역은 군집분석에 의해 수문학적 특성이 비슷한 군집으로 분류되었지만 토양침식량이 A, D 군집에 비해 비교적 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이는 토양침식 발생에 있어 군집 내 유역별 강우 발생 차

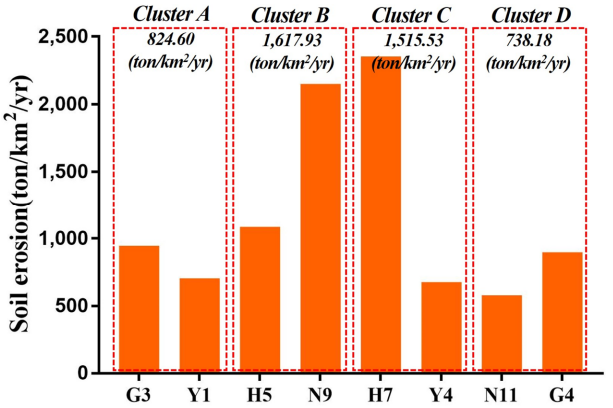


Fig. 5. Result of estimated soil erosion for classified watersheds.

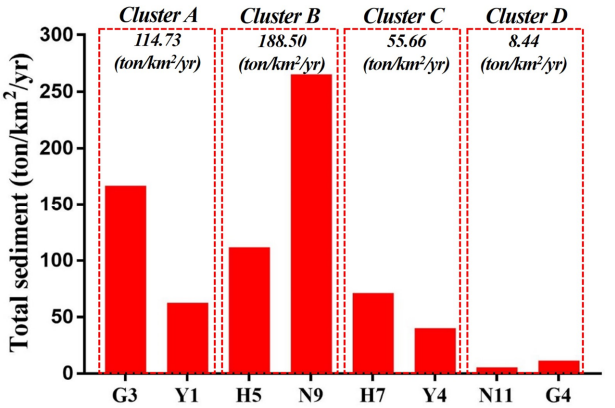


Fig. 6. Result of estimated sediment for classified watersheds.

이에 의한 영향이 기인한 것으로 판단된다. 총유사량의 경우 B 군집에서 188.5 ton/km^2/year로 가장 높게 나타났으며, A 군집, C 군집, D 군집 순으로 높게 나타났다. 토양침식량 경우 C 군집에 속한 흑천 유역에서 가장 많이 발생하는 것으로 나타났지만 Ji et al. (2012)의 연구 결과 경향과 동일하게 B 군집에 속한 내성천 유역에서 유사전달 영향에 의해 가장 많은 양의 유사가 하천이나 댐으로 유입 될 잠재성을 가지고 있는 것으로 나타났다(Fig. 6). B 군집의 경우 형상계수와 투수계수가 다른 군집에 비해 상대적으로 크게 나타났는데 일반적으로 형상계수와 원상율이 크면 유출 발생시간이 짧아져 첨두홍수량이 증가하고, 투수계수가

Table 7. Sediment rating curve used in this study

Cluster		Coefficient of Watershed characteristics							
		A	B	C	D	E	F	G	H
A	G3	1.512	-0.052	1.564	0.310	0.348	0.422	1.634	-1.590
	Y1	3.448	-0.067	1.587	0.590	0.235	0.585	1.970	-2.305
B	H5	3.164	-0.042	1.871	0.431	0.412	0.370	2.748	-2.151
	N9	3.517	-0.056	1.340	0.372	0.546	0.057	1.683	-1.538
C	H7	3.656	-0.098	1.366	0.649	0.524	0.230	2.018	-2.428
	Y4	1.923	-0.051	1.685	0.325	0.201	0.761	2.453	-2.084
D	N11	1.058	-0.058	1.153	0.968	0.223	0.203	1.598	-1.977
	G4	2.955	-0.054	1.398	0.546	0.421	0.207	1.489	-2.686

크면 침투수량이 증가하여 지표유출은 감소한다(Kim et al., 2013). 그러나 토양 특성상 사질토를 많이 포함하고 있으며, 유역 내 농경지에서의 영농활동 등에 의한 농업 비점오염물질들이 강우시 대량으로 유출되어 유사 공급이 증가하는 결과를 초래한 것으로 판단된다. 따라서 수계로 유입되는 유사량에 의한 탁수, 생태계 등 문제를 사전 대비하기 위해서는 유사전달 영향이 큰 유역을 중심으로 강우에 의한 토양침식과 유사 유출을 저감시킬 수 있는 일반적인 방안들이 중점적으로 적용되어야 할 것으로 판단된다.

3.2 PA-SDR 모듈을 통한 유사전달율 산정식 도출 결과

본 연구에서는 군집별 유역을 대상으로 PA-SDR 모듈을 통해 유역특성인자에 대한 최적 매개변수를 산정하고 유역별 및 군집별 SDR 산정식을 도출하였다. 최적 매개변수는 Table 7과 같으며, 이를 통해 산정된 유역별 SDR은 0.9 % ~ 17.8 % 범위로 유역별 상이한 특성으로 인해 다양한 값의 분포를 나타내었다. 또한 군집별 SDR 산정식은 식 (12) ~ 식 (15)와 같으며, 군집별 평균 SDR은 A 군집 13.7 %, B 군집 10.4 %, C 군집 5.0 %, D 군집 1.1 % 순으로 분석되었다. 특히 A, B 군집의 SDR은 C, D 군집에 비해 높게 나타났는데 이는 유역의 지형적 특성에 따른 첨두홍수량의 증가와 토양 및 토지이용 특성 차이 영향에 기인한 것으로 판단된다. 또한 영강, 유구천 유역이 속한 D 군집의 SDR이 가장 낮게 산정된 원인은 유역 내 농업용저수지 및 상류 유사 차단 구조물 분포의 영향이 퇴적량 및 이송되는 유사량 차이를 발생시켰을 것이라 판단된다(Choi et al., 2017). 또한 본 연구에서는 결정계수(Coefficient of determination, R^2)와 유효지수(Nash-sutcliffe model efficiency coefficient, NSE)를 이용하여 군집 내 유역별 매개변수 교차방법과 군집별 SDR 산정식의 적용성을 평가하였다(Fig. 7). 군집 내 유역별 매개변수 교차방법을 통해 예측된 유역별 유사유출량을 실측 유사유출량과 비교 분석한 결과, R^2는 0.17 ~ 0.95, NSE는 -0.87 ~ 0.92 범위로 분석되었다. D 군집을 제외한 모든 군집 내 계측 유역에 대한 최적 매개변수는 미계측 유역의 유사이동 특성을 비교적 잘 반영하는 것으로 나타났다. 일반적으로 유사량의 양과 질은 기상학적 요인, 지형적 요인 그리고 물리적 요인에 의해 큰 영향을 받기 때문에 계측 유역에 대한 최적 매개변수만으로 미계측 유역의 유사이동 현상을 유효하게 표현하는데 어려움이 있다고 판단된다. 또한 군집별 유역을 모두 미계측 유역으로 가정한 상태에서 군집별 SDR 산정식을 통해 예측된 유역별 유사유출량을 실측 유사유출량과 비교 분석한 결과, R^2는 0.77 ~ 0.96, NSE는 0.77 ~ 0.96 범위로 D 군집을 포함한 모든 군집에서 계측 유역에 대한 최적 매개변수가 미계측 유역의 유사이동 특성을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 군집별 SDR 산정식의 경우 군집 내 유역의 특성을 모두 고려하여 최적 매개변수를 산정되었기에 유역별 매개변수 교차방법에 비해 미계측 유역의 유사유출량을 더욱 잘 예측할 수 있는 것으로 판단된다.

$$SDR = 3.830 \times Area^{-0.054} \times Slope^{0.653} \times R_1CN_1^{0.551} \times R_2CN_2^{0.682} \times R_3CN_3^{0.732} \times D_d^{1.432} \times Clay^{-2.445} \ (Cluster\ A) \quad (12)$$

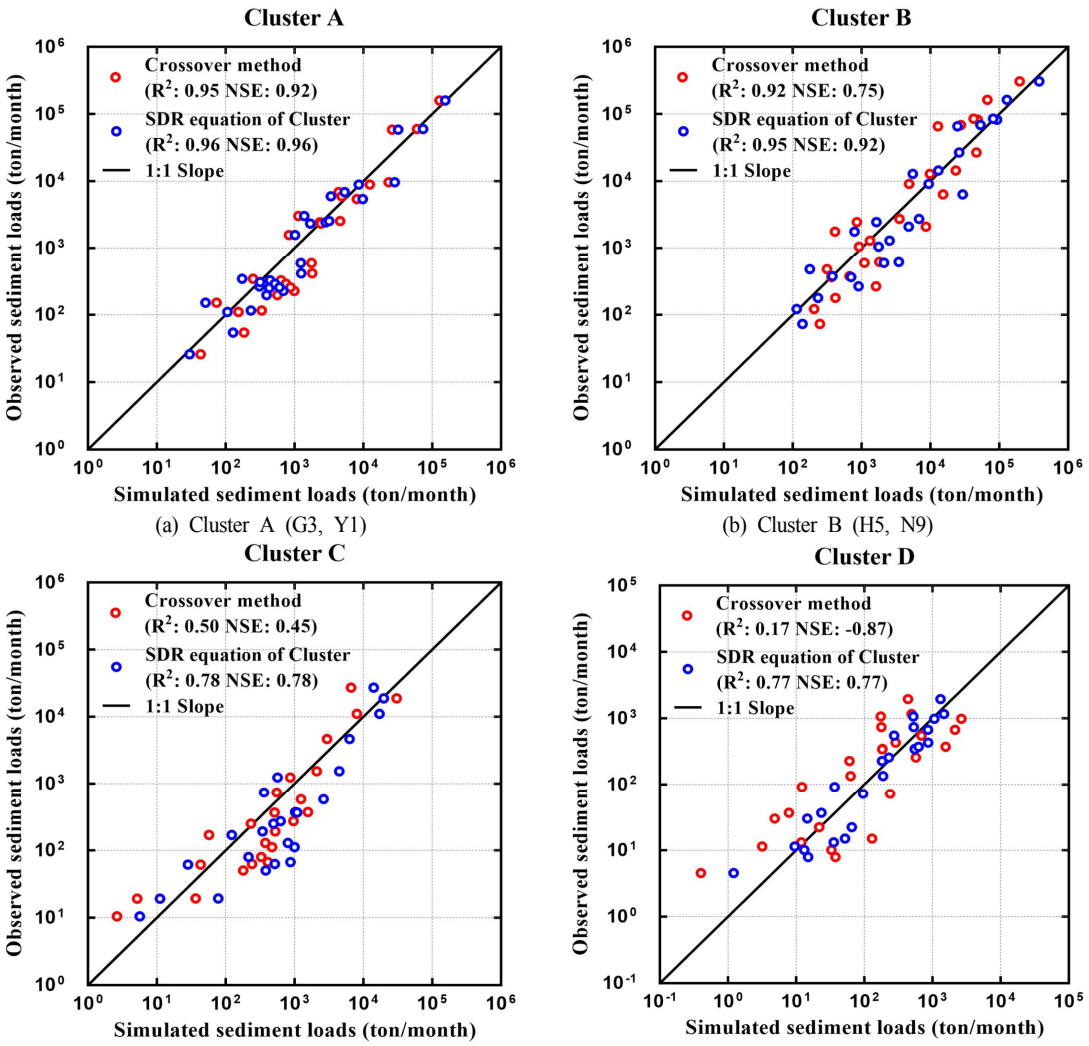
$$SDR = 2.504 \times Area^{-0.068} \times Slope^{2.197} \times R_1CN_1^{0.085} \times R_2CN_2^{0.032} \times R_3CN_3^{1.088} \times D_d^{0.880} \times Clay^{-3.098} \ (Cluster\ B) \quad (13)$$

$$SDR = 2.318 \times Area^{-0.054} \times Slope^{1.177} \times R_1CN_1^{0.056} \times R_2CN_2^{1.223} \times R_3CN_3^{0.372} \times D_d^{3.597} \times Clay^{-1.845} \ (Cluster\ C) \quad (14)$$

$$SDR = 3.710 \times Area^{-0.062} \times Slope^{0.019} \times R_1CN_1^{0.085} \times R_2CN_2^{0.069} \times R_3CN_3^{0.342} \times D_d^{0.214} \times Clay^{-0.483} \ (Cluster\ D) \quad (15)$$

3.3 유사전달율 산정식을 이용한 미계측 유역의 유사유출량 예측 적용성 평가

본 연구에서는 PA-SDR 모듈을 통해 도출된 SDR 산정식의 적용성을 평가하기 위해 기존에 국외에서 USDA (1972), Vanoni (1975), Boyce (1975) 등이 제안한 SDR 경험식과 PA-SDR 모듈을 통해 도출된 SDR 산정식을 이용하여 미계측 유역의 유사유출량을 예측하고 실측 유사유출량과 비교 분석하였다(Fig. 8). 국외 SDR 경험식을 통해 예측된 미계측 유역의 유사유출량은 실측 유사유출량과 4.43 % ~ 2888.88 %의 큰 오차 범위를 보였으며, 유역별 어떠한 경험식을 적용하는지에 따라 실측 유사유출량과 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다(Table 8). 국외 SDR 경험식은 유역면적의 크기만을 SDR에 영향을 미치는 인자로 고려하고 있으며, 국내 유역의 다양한 특성을 충분히 반영하지 못하



(a) Cluster A (G3, Y1) (b) Cluster B (H5, N9)

(c) Cluster C (H7, Y4) (d) Cluster D (N11, G4)

Fig. 7. Result of SDR equation developed by PA-SDR module.

Table 8. Comparative analysis of empirical formulas and PA-SDR equation

Cluster			Total sediment load(ton/yr)				
		Observed data	Applied SDR formula			PA-SDR equation	
			USDA (1972)	Vanoni (1975)	Boyce (1975)	Crossover method	Cluster equation
A	G3	308,828	109,410	322,497	432,248	254,509	311,772
	Percentage Error		64.57	4.43	39.96	17.59	0.95
	Y1	11,887	14,400	32,824	42,518	17,162	11,962
	Percentage Error		21.14	176.12	257.67	44.37	0.63
B	H5	57,931	47,657	121,668	159,992	92,294	51,623
	Percentage Error		17.73	110.02	176.18	59.32	10.89
	N9	401,128	213,537	615,235	822,117	215,977	411,731
	Percentage Error		46.77	53.38	104.95	46.16	2.64
C	H7	21,841	69,299	166,724	217,519	35,323	23,150
	Percentage Error		217.28	663.34	895.90	61.72	5.99
	Y4	23,262	32,385	83,736	110,298	11,799	25,129
	Percentage Error		39.22	259.97	374.16	49.28	8.03
D	N11	3,317	28,900	75,210	99,152	1,129	3,309
	Percentage Error		771.17	2,167.16	2,888.88	65.97	0.24
	G4	2,958	23,144	54,593	71,039	8,054	3,192
	Percentage Error		682.49	1,745.77	2,301.81	172.29	7.93

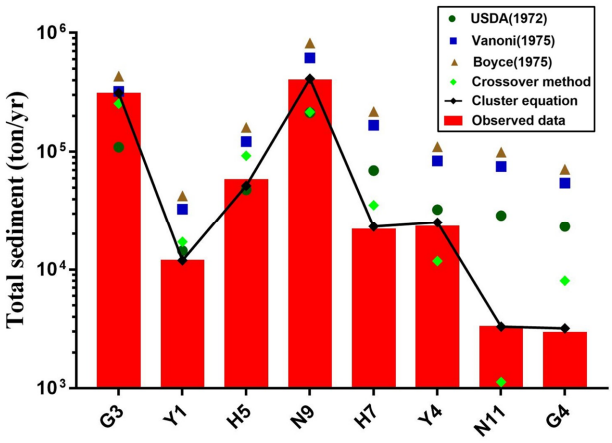


Fig. 8. Comparative analysis of empirical formulas and PA-SDR equation.

기 때문에 미계측 유역의 유사유출량을 예측하는데 어려움이 있는 것이라 판단된다. 반면 본 연구에서 PA-SDR 모듈을 통해 도출된 유역별 및 군집별 SDR 산정식을 이용하여 미계측 유역의 유사유출량을 예측한 결과, 매개변수 교차방법을 통해 예측된 미계측 유역별 유사유출량은 실측 유사유출량과 17.59 %~172.29 %의 오차 범위를 보이는 것으로 나타났다. 또한 군집별 SDR 산정식을 통해 예측된 미계측 유역의 유사유출량은 실측 유사유출량과 0.24 %~10.89 %의 오차 범위로 실측 유사유출량과 가장 근접한 결과를 보이는 것으로 분석되었다. Johnson et al. (2000)은 일반적으로 유사량의 경우 -50~200 % 범위의 오차는 유사량 자료의 불확실성을 감안할 때 적합한 결과라고 언급한 바 있다. 따라서 본 연구에서 PA-SDR 모듈을 통해 도출된 군집별 SDR 산정식은 국내 미계측 유역의 유사유출량을 보다 합리적으로 예측하기에 타당한 것으로 판단된다.

4. Conclusion

본 연구에서는 국내 미계측 유역의 유사유출량을 효율적이고 합리적으로 예측할 수 있는 방안을 제시하고자 4대강 계측 유역을 대상으로 유역특성인자에 대한 군집분석을 실시하고 군집별 대표 유역(A: 미호천, 고막원천, B: 청미천, 내성천, C: 흑천, 지석천, D: 영강, 유구천)을 대상으로 PA-SDR 모듈을 통해 유역의 특성을 고려한 최적 매개변수와 SDR 산정식을 도출하였다. PA-SDR 모듈을 통해 산정된 유역별 최적 SDR은 0.9 %~17.8 % 범위로 유역별 상이한 유역 특성으로 인해 다양한 값의 분포를 나타내었고 군집별 평균 SDR은 A 군집 13.7 %, B 군집 10.4 %, C 군집 5.0 %, D 군집 1.1 % 순으로 분석되었다. 또한 본 연구에서는 PA-SDR 모듈을 통해 도출된 SDR 산정식의 적용성을 평가하기 위해 군집 내 유역별 매개변수 교차방법과 군집별 SDR 산정식을 이용하여 미계측 유역으로 가정된 유역의 유사유출량을 산정하고 실측 유사유출량과 비교 분석하였다. 군집 내 유역별 매개변수 교차방법을 통해 예측된 미계측 유역의 유사유출량은 실측 유사유출량과 유역별 17.59 %~172.29 % 범위의 오차를 보이는 것으로 나타났다. 또한 군집별 SDR 산정식을 통해 예측된 미계측 유역의 유사유출량은 실측 유사유출량과 0.24 %~10.89 % 범위의 오차로 계측 유역에 대한 최적 매개변수가 미계측 유역의 유사이동 특성을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 특히 국내 많은 연구에서 사용되고 있는 국외 SDR 경험식을 통해 예측된 미계측 유역의 유사유출량은 실측 유사유출량과 4.43 %~2,888.88 % 범위의 오차로 예측 결과 값의 차이가 큰 것으로 나타났다. 따라서 국내 미계측 유역의 유사유출량을 효율적이고 합리적으로 예측하기 위해서는 PA-SDR 모듈을 통해 도출된 국내 유역 특성을 고려한 군집별 SDR 산정식을 사용하는 것이 보다 타당할 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서 도출된 군집별 SDR 산정식은 군집별 대표 유역에 대한 유역 특성을 바탕으로 도출되었기에 타 유역으로의 확대 적용시 유사유출량 예측 결과에 불확실성을 내포할 수 있다. 또한 본 연구에서는 유역 내 유출·유사에 영향을 미칠 수 있는 농업용 저수지 또는 보와 같은 수리 구조물의 영향을 고려하지 못한 한계점이 있다. 따라서 향후 이에 대한 불확실성을 최소화하기 위해서는 계측 유역에 대한 신뢰성 있는 장기적인 유사량 자료 확보가 필수적이며, 실질적으로 유사전달에 민감한 인자를 분석하고 선별하는 과정을 중요시해야 할 것으로 판단된다. 그리고 이를 바탕으로 타 계측 유역의 자료를 추가적으로 고려하여 SDR 산정식을 보완하여 도출한다면 국내 미계측 유역에 대한 유사유출량을 합리적으로 예측하는데 효율적인 방안이 될 수 있을 것이라 판단된다. 최근 유역 및 하도유사 관리에 대한 중요성이 부각되며 장래 우리나라의 국토관리 및 하천관리를 위한 현재 상황과 향후 나아가야 할 방향성 설정이 요구되는 시점에서 본 연구의 결과는 그동안 유역 유사이송 분석 시 제기되어 왔던 유역에 대한 동질성 문제를 해결할 수 있을 뿐만 아니라 홍수에 의해 미계측 유역에서 발생하는 유사량을 정량적으로 예측하여 국내 하천 유사관리 측면과 유역 유사 통합관리 측면에서 적합한 관리방안을 수립하는데 기초자료로 활용될 수 있을 것이라 사료된다.

Acknowledgement

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술원의 지원으로 수행되었음(과제번호 18AWMP-B083066-05).

References

Ahn, J. M., Lyu, S. W., and Lee, N. J. (2010). A study on the optimal sediment discharge formula for Hyeongsan river, *Journal of Korea Water Resources Association*, 43(11), 977-984. [Korean Literature]

Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., and Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development, *Journal of American Water Resources Association*, 34(1), 73-89.

Boyce, R. C. (1975). *Sediment routing with sediment delivery ratios*, In: Present and Prospective Technology for ARS, USDA, Washington, D. C, 61-65.

Choi, S. W., Ban, C. W., and Choi, S. U. (2017). Numerical simulation of turbidity currents intruding into a reservoir, *Journal of Korea Water Resources Association*, 50(3), 201-210. [Korean Literature]

Gwon, D. S., Park, Y. H., Lee, Y. G., Jeong, S. W., and Jo, H. S. (2014). 2012 analysis of sediment characteristic in the river, *Journal of Korea Water Resources Association (Water for future)*, 47(4), 17-25. [Korean Literature]

Han, J. H., Lee, D. J., Kang, B. S., Chung, S. W., Jang, W. S., Lim, K. J., and Kim, J. G. (2017). Potential impacts of future extreme storm events on streamflow and sediment in Soyang-dam watershed, *Journal of the Korean Society on Water Environment*, 33(2), 160-169. [Korean Literature]

Ji, U., Hwang, M. H., Yeo, W. K., and Lim, K. S. (2012). Risk assessment and potentiality analysis of soil loss at the Nakdong river wetershed using the land use map, revised universal soil loss equation, and landslide risk map, *Journal of Korea Water Resources Association*, 45(6), 617-629. [Korean Literature]

Johnson, B. E., Julien, P. Y., Molnar, D. K., and Watson, C. C. (2000). The two dimension-upland erosion model CASC2D-SED, *Journal of the American Water Resources Association*, 36(1), 31-42.

Kang, M. G., Lee, J. H., and Park, K. W. (2013). Parameter regionalization of a tank model for simulating runoffs from ungauged watersheds, *Journal of Korea Water Resources Association*, 46(5), 519-530. [Korean Literature]

Kim, D. P. and Kim, J. H. (2014). Estimation of soil erosion and sediment outflow in the mountainous river catchment, *Journal of Wetlands Research*, 16(2), 221-233. [Korean Literature]

Kim, J. G., Kim, J. M., and Kang, B. S. (2013). Estimation of synthetic unit hydrograph using geospatial shape factors and nash model in mid-size watershed, *Journal of Korea Water Resources Association*, 46(5), 547-558. [Korean Literature]

Kim, T. G. and Kim, M. J. (2013). Estimation of sediment delivery ratio in upper Geum river basin using watershed model, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 22(6), 695-703. [Korean Literature]

Lee, J. H., Shim, E. J., Lee, Y. K., and Kim, T. W. (2012). A study on the estimation of soil erosion quantity using USLE in the upper region of ManKyoung river basin, *Journal of Wetlands Research*, 14(3), 317-328. [Korean Literature]

Lee, M. H., Yu, I. S., Necesito, I. V., Kim, H. Y., and Jeong, S. M. (2014). Estimation of sediment yield using total sediment yield formulas and RUSLE, *Journal of Korean Society Hazard Mitigation*, 14(4), 279-288. [Korean Literature]

Lee, S, H. and Kang, S. U. (2007). A parameter regionalization study of a modified tank model using characteristic factors of watershed, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 27(4), 379-385. [Korean Literature]

Lim, K. J., Sagong, M., Engel, B. A., Zhenxu, T., Choi, J. D., and Kim, K. S. (2005). GIS-based sediment assessment tool, *Catena*, 64, 61-80.

Park, Y. S., Kim, J. G., Kim, N. W., Kim, K. S., Choi, J. D., and Lim, K. J. (2007). Analysis of sediment yields at watershed scale using area/slope-based sediment delivery ratio in SATEEC, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 23(5), 650-658. [Korean Literature]

Park, Y. S., Kim, J. G., Kim, N. W., Kim, S. J., Jeon, J. H., Engel, B. A., Jang, W. S., and Lim, K. J. (2010). Development of new R,C and SDR modules for the GIS system, *Computers and Geosciences*, 36, 726-734.

Son, H. G., Lee, J. S., Shin, S. C., and Moon, C. G. (2014). A study of sediment discharge and bed change characteristics of the local rivers in Korea, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, 15(6), 31-39. [Korean Literature]

United States Department of Agriculture (USDA). (1972). *Sediment source, yields, and delivery ratios*, National Engineering Handbook, Section 3 Sedimentation.

Vanoni, V. A. (1975). *Sedimentation engineering, manual and report No. 54*, American Society of Civil Engineers, New York, N.Y.

Walling, D. E. (1983). The sediment delivery problem, *Journal of Hydrology,* 65, 209-237.

Williams, J. R. (1975). *Sediment yield prediction with universal equation using runoff energy factor*, In: Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources for ARS, USDA, Washington, D.C, 244-252.

Williams, J. R. and Berndt, H. D., (1977). Sediment yield prediction cased on watershed hydrology, *Transactions of the ASAE*, 20(6), 1100-1104.