

실측 자료를 이용한 국내하천의 조도계수 특성검토

Review of Roughness Coefficient Characteristics for Rivers in Korea

김주영* / 김한섭** / 이정규***

Kim, Jooyoung / Kim, Hansup / Lee, Jong-Kyu

Abstract

Manning's roughness coefficients for the Han River, the Nakdong River and the Geum River were determined by the hydraulic models using their field measurements. The roughness coefficients of present study were compared with the ones of the conventional references. The hydraulic models, such as HEC-2, HEC-RAS and FLDWAV models, are usually applied to a river flow analysis. In order to compute the accurate flood level with the numerical models, accurate information about river sections, the upstream and downstream boundary conditions, and the appropriate roughness coefficients are indispensable. It is hard to obtain the reasonable roughness coefficient of the river, in the other hand the river cross sectional data and the boundary conditions are relatively easy to acquire. The coefficient values from the references are applied in many applications without considering the variation of locations and discharges of the river, or the values are unreasonably estimated. The final results from this study will give a reasonable and important data to perform the flood routing in the Korea river.

Keywords : roughness coefficient, hydraulic model, flood routing, optimization

요 지

국내 주요 3대 하천인 한강, 낙동강, 금강에 대하여 하상재료의 입도분포를 이용하는 방법과 수치모형을 이용하는 방법으로 조도계수를 연구하였고, 기존의 하천정비기본계획에서 제시하고 있는 조도계수와 비교 검토하였다. 일반적으로 하천의 흐름을 해석할 때 수리학적 모형을 주로 이용하고 있으며, 특히 1차원 홍수위 계산을 위해 HEC-2, HEC-RAS, FLDWAV 모형 등을 이용하고 있다. 이들 수치모형을 이용하여 정확한 홍수위를 계산하기 위해서는 정확한 지형자료와 상·하류 경계조건 그리고 해석하고자 하는 하천 구간에 대응하는 최적의 조도계수가 필요하다. 이들 중 지형자료와 상·하류 경계조건은 비교적 손쉽게 정확한 자료의 확보가 가능하나, 조도계수의 경우 실무에서 일반적으로 사용하고 있는 값은 해석하고자 하는 위치와 유량에 관계없이 기존 문헌에 제시된 일정한 값을 적용하거나, 합리성이 결여된 방법으로 추정된 값을 사용하는 등 그 정확성 및 객관성에서 문제점이 있을 수 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 극복하고자 국내 3대 하천에 대하여 다양한 유량구간과 위치에 대응하는 최적화된 조도계수를 산정하고 비교 검토하였다. 본 연구에서 제안된 결과는 수리학적 모형을 이용하여 홍수추적을 수행하는데 있어 중요한 기초자료로 사용될 수 있을 것이라 판단된다.

핵심어 : 조도계수, 수리학적 모형, 홍수추적, 최적화

* 한국전력기술주식회사 환경기술그룹 과장 (e-mail: orion@kepco-enc.com)

Manager, Environmental Technology Department, KEPSCO E&C, Yongin-si 448-547, Korea

** 교신저자, 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 박사후 연구원 (e-mail: becool@hanyang.ac.kr)

Corresponding Author, Post-Doc., Dept. of Civil and Envir. Engrg., Hanyang Univ., Seoul 133-791, Korea

*** 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 명예교수 (e-mail: leejk@hanyang.ac.kr)

Professor Emeritus, Dept. of Civil and Envir. Engrg., Hanyang Univ., Seoul 133-791, Korea

1. 서론

자연 하천에서의 Manning 조도계수 n (이하 조도계수라고 부른다)은 주로 수위, 유량, 만곡, 하상재료, 하상경사, 수로바닥의 형상, 단면형상의 변화, 하상과 제방 비탈면에서의 식생 상태, 하천구조물의 영향 등, 상당히 복합적인 하천특성인자들에 의해서 영향을 받는다. 특히 공간적으로 때로는 시간적으로 변하는 값이기 때문에 조도계수를 일반화하기는 매우 어렵다. Cowan (1956)과 Chow (1959)는 각각의 하천특성인자들이 조도계수에 미치는 영향에 대해서 계수를 정하고 이들 계수의 조합으로 조도계수를 산정하는 방법을 제안하였으며, Barnes (1967)는 미국지역의 50개 하천에 대해서 사진과 설명 데이터들을 바탕으로 만재유량에 대해서 검증된 조도계수를 제시하였다. 일본 하도계획 검토안내서 (국토기술연구센터, 1989)에서는 세그먼트 이론에 기초하여 하도 특성별로 하상재료와 소규모 하상파의 형상을 고려하여 주수로의 조도계수를 산정하고 있다. 이 외에도 영국의 CES 방법과 뉴질랜드의 하천 조도 자료집을 참조하는 방법 등이 있다. 그러나 이러한 방법은 다소 주관적인 방법일 뿐만 아니라 하천 특성이 상이한 우리나라에 직접 적용하기에는 무리가 있는 방법으로 판단된다. 국내에서는 하상재료나 식생 상태 등과 조도계수 간의 관계에 관한 연구로 이신재와 박상우 (2006)의 자갈하천에서 조도계수 산정에 대한 연구, 이동섭 등 (2006)의 잔디 식생 제방의 조도계수에 관한 연구와 국내 조도계수 산정 및 활용 표준화 시스템 개발 (이코리버21 연구단, 2007) 등이 있으나 이러한 연구는 하상재료나 식생 이외의 조도계수에 영향을 미치는 수로의 형태, 만곡, 수로 단면의 변화, 수위, 유량 등에 대한 고려가 부족하여 실제 하천에 적용하기에는 무리가 따른다. 또한 수리학적 모형에 의한 조도계수 산정에 대한 연구로는 김지성 등 (2007)의 NCALC 모형을 이용한 남한강 일부 구간의 조도계수 산정, 이상호 (2001)의 DWOPER 모형을 이용한 낙동강 일부 구간에 관한 연구, FLDWAV 모형에 의한 한강 하류부의 조도계수 산정 (이정규와 이창현, 2004) 등의 연구가 있다. 이러한 연구들은 각 대상 하천의 일부 구간에 대한 제한적 결과로서 불규칙성이 매우 큰 실제 자연하천의 전체 구간에 적용하는 것은 하천의 흐름해석에 부정확한 해석 결과를 제공할 수 있기 때문에 주의를 기울여야 한다. 만약 자연하천 임의 구간에서 하상경사, 하상재료, 단면 등이 일정하고 규칙성을 보이는 구간이 존재하는 경우에는 불확실성이 상당히 제거되기 때문에 대표 조도계수를 적용하는 것이 가능할 것으로 판단되나 실제 자연하천에서는 대단히 복잡한 조도 특성이 나타나기 때문에 대표 조도계수를 제시하는 시도는

신중을 기해야 할 것이다.

이와 같이 조도계수에 관한 연구는 국·내외에서 다양하게 진행되고 있다. 현 시점에서 객관적이며 정확한 조도계수를 산정하는 방법은 실측 수위와 유량을 바탕으로 수리학적 모형을 이용하여 전 하천구간에 대하여 각각에 대응하는 조도계수를 산정하는 방법이 적절한 방법이라 할 수 있다. 본 연구에서는 국내 3대 하천인 한강, 낙동강, 금강의 분류 및 지류에 대해서 수위자료를 얻을 수 있는 수위관측소를 기준으로 하천구간을 분해하고 각 구간에서 시시각각으로 변하는 유량에 대응하는 평균 조도계수를 산정하였다. 관측 수위 및 유량 자료는 최근 10년 동안의 홍수사상 중 5개를 선정하여 사용하였고, 조도계수 산정을 위해서는 FLDWAV 모형을 이용하여 유량별 조도계수를 산정하였다. 또한 각 하천 구간에서 하상재료의 입경이 조도계수에 미치는 영향을 분석하기 위해서 하상재료를 채취하여 입경분석을 실시하였고 입경을 이용한 여러 조도계수 공식을 적용하여 유량과 수위를 산정하였으며 산정결과를 관측결과와 비교하였다.

2. 연구대상 하천 및 수위관측소 현황

본 연구의 대상 하천은 국가하천인 한강, 낙동강, 금강의 총연장 1,956.51 km이며 각각의 대상이 되는 하천 현황은 Table 1에 정리되어 있으며, 수위관측소 현황은 Table 2와 같다. 전체 대상하천은 국가하천 분류 및 제1지류, 제2지류 총 23개이며, 구간 내 수위관측소 및 댐은 113개소이다.

3. 연구방법

각 하천 구간의 조도계수 산정은 FLDWAV 모형을 이용한 방법과 하상도 입경 공식을 이용한 방법을 사용하였다. 각 방법에 의한 산정절차는 Fig. 1과 같다. FLDWAV 모형으로 각 구간의 조도계수를 산정하기 위해서는 하천 단면 자료와 상·하류 경계조건 등의 정확한 입력자료를 필요로 한다. 단면 자료에서 수위와 폭의 관계를 나타내는 절점 선택이 부적절할 경우 IHEC-RAS 모형에서의 통수 단면적과 차이가 발생하여 FLDWAV 모형에서 산정한 조도계수가 IHEC-RAS 모형에서는 정확도가 저하되는 문제점이 발생할 수 있다. 또한 상·하류 경계조건의 신뢰성이 떨어질 경우 부정확한 조도계수가 산정되기 때문에 이들 입력 자료를 선정하는 데 세심한 주의가 필요하다. 본 연구에서는 FLDWAV 모형의 수위-수면폭 관계를 얻기 위해서 한 단면에 대하여 8개 절점을 사용하였고, 상·하류 경계조건 및 수위관측소에서의 수위를 선정하기

Table 1. Summary of Basic Data

하천 코드	하천명	제1지류	제2지류	하천연장 (km)	유역면적 (km ²)	하천 코드	하천명	제1지류	제2지류	하천연장 (km)	유역면적 (km ²)
1000010	한강			265.36	25,953.60	2001550	낙동강	갑천		41.20	1,004.18
1000870	한강	달천		15.20	1,614.37	2001950	낙동강	금호강		69.30	2,107.87
1001330	한강	섬강		58.18	1,490.06	2002860	낙동강	황강		78.80	1,344.19
1001630	한강	청미천		25.20	595.70	2004040	낙동강	남강		145.40	3,467.52
1002190	한강	북하천		19.80	308.50	2006950	낙동강	밀양강		33.20	1,421.26
1002710	한강	북한강		155.86	10,761.20	2007500	낙동강	양산천		10.00	243.22
1003000	한강	북한강	소양강	77.30	2,798.50	3000010	금강			360.70	9,912.15
1004290	한강	경안천		22.50	575.32	3001490	금강	갑천		33.53	648.87
1005090	한강	충랑천		20.47	296.04	3001620	금강	갑천	유등천	15.53	289.14
1005380	한강	안양천		20.70	281.56	3001810	금강	미호천		39.13	1,855.35
2000010	낙동강			400.70	23,384.21	3003970	금강	논산천		21.45	667.16
2000830	낙동강	내성천		27.00	1,814.71						
대상하천				23개		총하천연장				1,956.51 km	

Table 2. List of Dams and Gauging Stations

순번	하천명	개소수	수위관측소 및 댐
1	한 강	38	행주대교, 신정, 시흥, 안양, 한강대교, 갈수교, 증랑교, 우이, 영등대교, 광장, 팔당대교, 팔당댐, 평동, 경안, 청평, 청평댐, 강촌, 춘천, 천전, 서원, 춘천댐, 화천댐, 평화의댐, 소양강댐, 양평, 이포, 북하교, 여주, 우만, 강천, 청미, 문막, 북계, 단곡, 달천, 충주역조경지댐, 의암댐, 잠실수중보
2	낙동강	47	거룡강, 고령교, 구미, 구포, 낙동, 달지, 마수원 사벌, 삼랑진, 성주, 수산, 왜관, 월촌, 일선교, 임해진, 적포교, 지보, 진동, 현풍, 화원, 안동, 구담, 죽곡, 대암, 월포, 죽진, 김천, 천산, 금호, 단포교, 동촌, 성서, 하양, 산격, 죽교, 함천, 정암, 산청, 진주, 관문, 밀양, 밀양2, 화성, 양산, 가산, 안동역조경지댐, 남강댐
3	금 강	28	임포, 강경, 논산, 반조원, 규암, 진두, 공주, 마어구, 금남, 함강, 석화, 북일, 오창, 부강, 매포, 회덕, 복수, 도룡, 유성, 기수원, 용촌, 현도, 대청역조경지댐, 옥천, 양강교, 호탄, 제원, 수봉
총		113	

위해서 최근 10년간의 상류 댐 수문자료를 분석하여 방류량이 최대인 수문사상 10개를 선정된 뒤 모든 수위관측소 및 강우관측소에서 결측이 없는 최적의 수문사상 5개를 조도계수 산정을 위한 입력 자료로 최종 선정 하였다. 또한, 보다 정확한 조도계수의 산정을 위해서는 수위관측소와 관측소 사이의 미계측 측방유입량을 산정해야하는데 본 연구에서는 이들 유입량을 간류유입량이라 정의하고 HEC-HMS 모형에 의해 이들 유입량을 모두 계산하여 조도계수 산정에 사용하였다. 하상재료를 이용한 조도계수 공식을 적용하기 위하여 모든 수위관측소 주변 하상의 입경을 분석하여 조도계수를 산정하였다. 특히 하상재료의 입경이 37.5mm 이상 자갈인 경우에는 체분석 시험이 불가능하기 때문에 격자틀을 이용한 사진 촬영 후 디지털 영상 작업을 통하여 입도를 분석하고 각 조도계수 공식에서

필요한 입도분포를 구하여 조도계수를 산정하였다.

4 하상재료를 이용한 조도계수 산정

4.1 기존 관련 연구

하상토사 입경으로부터 조도계수를 추정하기 위해 많은 경험적 방법들이 제안되었다. 이 중에서 Henderson (1966)은 Strickler의 연구에 기초하여 d 는 하상 재료의 중앙값 (d_{50})이라고 기술하고 다음과 같은 방정식을 산출하였다.

$$n = 0.034d^{1/6} \tag{1}$$

여기서, d 의 단위는 ft이다.

Garde and Raju (1978)는 다양한 흐름으로부터 자료분석을 통하여 Strickler 식에 기초한 다음 식을 유도하였다.

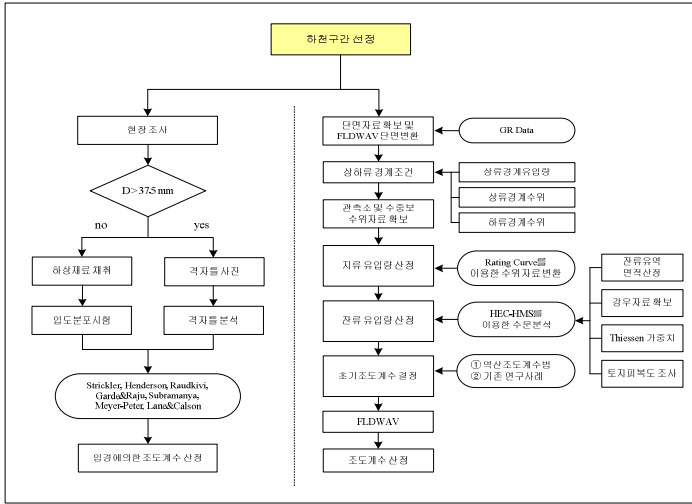


Fig. 1. Flow Chart for Determination of Roughness Coefficients

$$n = 0.039d_{50}^{1/6} \quad (2)$$

여기서, d_{50} 은 토사재료의 통과백분율 50%에 해당하는 입경 (ft)이다.

Meyer-Peter and Müller (1948)는 다음과 같은 식을 제안했다.

$$n = 0.038d_{90}^{1/6} \quad (3)$$

여기서, d_{90} 은 토사재료의 통과백분율 90%에 해당하는 입경 (m)이다.

자갈로 구성된 운하를 포함한 현장실험 결과로부터 Lane and Carlson (1953)은 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$n = 0.026d_{75}^{1/6} \quad (4)$$

여기서, d_{75} 은 토사재료의 통과백분율 75%에 해당하는 입경 (in)이다.

위와 같이 기존의 입경을 이용한 연구는 주로 하상의 입경 대표크기에 관한 경험식으로 표현되었다.

4.2 시료채취

하상재료 채취 방법은 KS 4364에서 제시하고 있는 방법을 기준으로 하였다. KS 4364의 하상재료 채취 절차 및 위치 선정은 일반적인 하상재료 채취 방법으로, 본 연구의 조도계수 산정을 위한 하상재료 채취 목적과는 큰 차이가 있기 때문에 현장의 여건에 따라 달라질 수 있다. 예를 들어 KS 4364의 "4. 채취 절차"에서 보면 코어형 (core-



Fig. 2. Bed Material Sampler

type) 채취기의 사용이 권장된다고 되어 있으나 이는 사실 본 연구에서는 거의 불필요하며 어려운 방법이고, "5. 위치선정"에서는 하상 재료의 이동량 계산이나 흐름의 추정을 위한 하상 재료 채취 위치에 대한 설명으로 본 연구와는 거리가 있다. 따라서 본 연구에서 중요하게 판단되는 하상재료의 입도 분포 특성을 조사하기 위해서는 코어형 채취기 등은 사용하지 않았고 Fig. 2와 같이 90도 경량 그랩 채취기를 사용하여 하상의 재료를 채취하였다. 만약 수심이 얕아 접근이 가능한 경우에는 삼 등을 이용한 직접채취 방법을 사용하였다 (Fig. 3).

4.3 격자틀

하상재료의 크기가 37.5mm 이상의 자갈인 경우에는 채



Fig. 3. Direct Sampling from River Bed



Fig. 4. Grid Frame (Hotan Gauging Station)

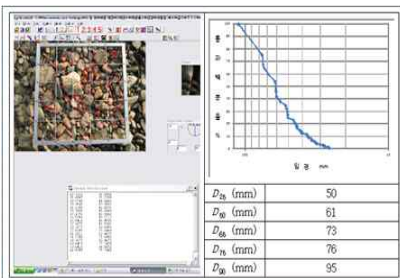


Fig. 5. Grid Frame Analysis (Hotan Gauging Station)

분석 시험으로 입도분석을 할 수 없기 때문에 격자틀 분석을 실시하였다. 50×50cm 크기에 10cm 간격의 격자틀을 제작하였으며 하천설계기준 해설 (한국수자원학회, 2005)에서는 “10장 이상의 사진을 찍어 분석하는 것이 바람직하다”라고 제시하고 있으나 이를 분석하는데 너무 많은 시간이 소요되어 현장에서 1회에 걸쳐 격자틀 내의 자갈에 대해서 장축, 단축, 중간축의 입경을 입경조사표에 기록하고 3회에 걸쳐 사진분석을 통한 디지털이징을 수행하

였다. Figs. 4 and 5는 금강 호탄수위관측소에서의 격자틀 사진과 분석 사진이다.

5. 수리학적 모형을 이용한 조도계수 산정

5.1 잔류역의 유출량 산정

유역에 강우가 발생하면 해당 강우로 인해 발생하는 총 유출량과 침투유출량은 수문학자들에게 매우 큰 관심사이다. 또한 유역의 유출량 특성을 알기 위해 하천의 수위나 유량을 측정하는 것도 매우 중요한 일이라고 할 수 있다. 가장 흔히 사용되는 유출량 산정법은 가능한 모든 지천의 유입량을 측정하고, 하도추적을 거쳐 총 유출량을 결정하는 과정으로 이루어진다. 그러나 실제 수위표를 설치하여 계측이 이루어진 지점이라고 하더라도 신뢰할만한 수위-유량 관계곡선을 가지고 있지 않은 경우가 많고, 수위표의 계측 수위자료 또한 신뢰도가 낮은 것이 현실이다. 그러므로 본 연구에서는 3대강에 포함되어 있는 국가하천을 대상으로 수위표에 신뢰할만한 수위-유량 관계곡선이 존재하는 경우를 계측유역으로 구분하였고, 반대로 신뢰할만한 수위-유량 관계곡선이 존재하지 않거나, 측정된 유량자료가 존재하지 않아서 유출량 계산이 불가능하거나 혹은 수위 또는 유량 측정값의 신뢰성이 낮아 직접적으로 활용이 어렵다고 판단되는 경우에는 미계측유역, 즉 잔류역으로 구분하여 해석하였다.

5.1.1 잔류역의 선정

전 절에서 구분한 잔류역에서의 유출량 산정에는 수문학적인 기법을 사용하였다. 대상 잔류역의 출구에는 산정된 유출량의 검증에 위한 수위-유량 관계곡선이 존재하지 않으므로, 최대한 정밀하게 유역의 특성을 고려하여 유출량을 산정하도록 하였다. 국가하천이 제1지류인 경우도 있지만, 제2지류, 제3지류인 경우도 있으므로 잔류역의 선정 시 주의를 요한다. 본 절에서는 잔류역 선정방법과 절차에 대해 자세히 설명하였다.

가. 관측소와 관측소 사이의 측방유입에 기여하는 유역 특정 수위관측소 B와 상류에 인접한 다른 수위 관측소 A와의 사이에 지류가 없거나 또는 계측이 안 되는 지류가 존재하는 경우를 Fig. 6의 왼쪽에 도시하였다. 상류에 존재하는 관측소 A에서의 유출량은 수위-유량곡선이 있어 유출량 산정이 가능하다고 가정하면, A관측소에서의 유역 면적은 A_A 이고 B관측소의 유역면적이 A_B 이다. 이때 잔류역은 Fig. 6의 우측의 A_B 로 표현할 수 있으며 이를 E_C (5)로 정의할 수 있다.

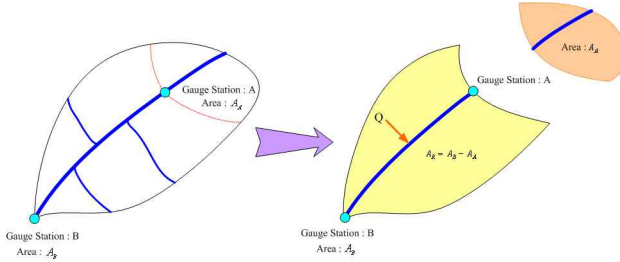


Fig. 6. Residual Basin without Gauging Station

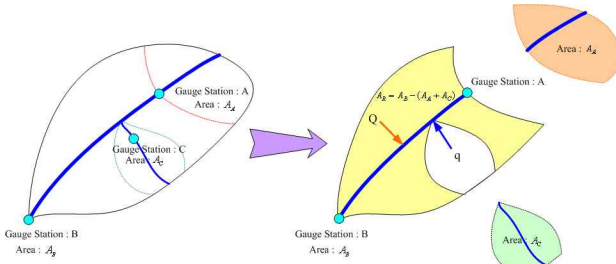


Fig. 7. Residual Basin including Subbasin with Gauging Station

$$A_R = A_B - A_A \quad (5)$$

나. 관측소와 관측소 사이에 계속유역으로 분류된 지류가 존재하는 유역

수위관측소 사이에 유량을 알 수 있는 지류가 유입할 경우를 Fig. 7의 왼쪽에 나타내었다. A 관측소에서의 유역면적은 A_A 이고 B관측소의 유역면적이 A_B , 관측소와 관측소 사이에 존재하는 유출량이 계속되는 지류의 유역면적을 A_C 라고 하면, Fig. 7의 오른쪽 그림에서와 같이 각각의 유역을 나눌 수 있다. 이때 최종 잔류역은 B수위관측소의 전체 유역 면적에서 상류 A수위관측소에서의 유역면적을 제외하고, 관측소와 관측소 사이에 계속 유역으로 분류된 지류의 유역면적 A_C 를 제외한 유역면적 A_R 로 표현된다. 이를 식으로 나타내면 Eq. (6)과 같다.

$$A_R = A_B - (A_A + A_C) \quad (6)$$

5.1.2 손실유량 산정

유출량 산정을 위해서는 강우-유출 모형에 입력되는 유효우량의 시간 분포를 표현하는 유효우량추상도를 총우량추상도로부터 작성하여야 한다. 이를 위해 강우 중 토양으로의 침투를 고려한 손실량의 산정이 필요하다. HEC-HMS에서 제공하는 유효우량추상도를 작성하는 방법에는

일정비법, 일정손실률법, 초기손실-일정손실률법, Green-Ampt 방법, SCS 방법 및 Soil Moisture Accounting 방법 등이 있다.

일정비법은 강우기간 전체에 걸쳐 같은 양의 손실이 발생한다고 가정하는 방법이고, 일정손실률법은 강우기간 전체에 걸쳐 같은 비율로 손실이 발생한다고 가정하는 방법이다. 이 두 가지 방법을 혼합하여, 초기손실을 설정한 후, 초기손실 후에는 일정한 비율로 손실이 발생한다는 가정을 한 것이 초기손실-일정손실률법이다. 이 세 가지 방법은 유역의 특성을 전혀 고려하지 못하고, 지나친 단순화 작업으로 인해 손실량을 합리적으로 계산하지 못하는 단점이 있다.

Green-Ampt 방법은 토양의 최대 가능침투량과 흡양고(suction head) 등 물리적인 인자를 직접 고려하는 방법이나, 실제로 한강유역 등과 같은 대단위 유역에서는 그 매개변수의 정확한 추정이 쉽지 않으므로 실무에서 사용하기가 쉽지 않다. 또한, Soil Moisture Accounting 방법은 유역의 토양층을 저수지의 형태로 가정하여 각 유출계수 등을 결정해 주어야 하는 방법으로, 적절한 입력자료를 결정하는데 한계가 있다. 마지막으로 SCS 방법은 미국 토양보존국(SCS, 현재 NRCS)에서 개발된 방법으로 유출량자료가 없는 유역에 대하여 유역의 토양형과 토이 사용태에 따라 유출량을 결정하는 방법이다. 이는 유역의 특성을 고려하면서도 최대 가능침투량이나 토양층의 유

출계수 등 보정하기 어려운 변수를 가지고 있지 않으므로, 사용이 가장 용이한 방법으로 알려져 있다. 또한 SCS 방법은 유역의 불투수율을 고려하여 그 손실량을 계산하므로, HEC-HMS에서 제공하는 방법들 중 가장 실제현상에 부합하는 방법이라고 판단된다. 그러므로 본 연구에서는 토양 및 토지피복 상태를 고려하여 유효우량을 산정할 수 있는 SCS 방법을 채택하여 적용하였다.

5.1.3 직접유출량 산정

HEC-HMS는 유역의 직접유출량 산정을 위해 Clark, 수정 Clark, Snyder, SCS 단위도법을 제공하고 있다. 이 중 SCS 단위도법은 미 토양보존국에서 개발된 무차원 단위도를 이용하는 방법이다. 그 단위도 자체가 미국의 특정지역에 대해 개발된 방법으로 여타 유역에는 부적합한 면이 있다. 또한, 유역 도달시간 등의 특성치들을 고려하여 표준단위도를 이용하는 Snyder 단위도법도 한국 유역에의 적용성이 충분히 입증되지 않았다. 그러므로 현재 국내의 여러 유역종합치수계획에서 사용되고 있는 Clark 단위도법을 채택하였다. Clark 단위도법은 유역의 도달시간과 저류상수를 이용하여 유역의 유출량에 기여하는 시간에 따른 면적을 계산하여 그 유출량을 산정하고, 유역의 출구에 선형저수지가 존재한다고 가정하여 유역의 저류효과를 고려하므로 실제 유출량 계산에 가장 가까운 방법이라고 알려져 있다. 마지막으로 Clark 단위도법과 같은 방법을 사용하지만, 전체 유역의 대표 매개변수가 아닌 유역을 격자로 나누어 격자들의 도달시간과 저류상수 등의 대표매개변수를 사용하는 수정 Clark 단위도법은 이론적으로는 매우 훌륭한 방법이지만, 본 연구와 같은 대규모 유역에 적용하기에는 정확한 입력자료의 구축이 어렵다는 단점이 있다.

5.1.4 기저유량 산정

단위도 방법을 이용한 유출량 산정에서는 단위도에 의한 해당 상위의 유효우량에 의한 유출량에 기저유량(base flow)을 더하여 추정한다. 기저유량은 철두유량에 미치는 영향이 상대적으로 미미하므로 중요시되지 않고 있으나, 유출총량에는 어느 정도 영향을 미친다.

HEC-HMS에서는 Monthly Constant, Recession, Non-linear Boussinesq 등의 방법들이 기저유량계산을 위해 내장되어 있다. 통상 사용되는 방법인 Recession 방법은 특정유량으로부터 기저유량을 지수함수로 계산하는 방법으로 가장 이론적인 유출량 산정법이다. 이는 실무계산에 많이 사용되나, 그 매개변수의 보정이 용이하지 않다. 또한, Non-linear Boussinesq 방법도 실제유출량을 이용하여 보정이 불가능한 본 연구와 같은 경우에는 사용이 제한된다. 따라서 본 연구에서는 Monthly Constant 방법을 사용하였다.

5.2 FLDWAV 모형

본 연구에서는 국내 하천의 구간과 유량에 따른 조도계수를 객관적으로 산정하기 위해서 조도계수 산정 옵션을 지원하는 FLDWAV 모형을 이용하였다. 본 모형은 측정된 수위와 유량 자료를 이용하여 조도계수를 자동보정하는 기능을 가지고 있다. 지배방정식은 연속방정식과 운동량 방정식으로 구성된 확장된 Saint-Venant 방정식으로서 Eqs. (7) and (8)이고, 수치기법으로는 가중4점음해법(Weighted four point implicit scheme)을 이용하며, 비선형 연립방정식을 Newton-Raphson 방법으로 해석한다.

$$\frac{\partial(A+A_0)}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (7)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial y}{\partial x} + \frac{Q|Q|}{K^2} + S_e \right) = 0 \quad (8)$$

여기서, $Q = Q(x,t)$ 및 $y = y(x,t)$ 는 각각 유량과 수위를 나타내며, A 와 K 는 흐름단면적과 통수능으로서 각각 y 의 함수이다. A_0 는 흐름에 기여하지 않는 저류 단면적이며, q 는 단위 길이 당 측방 유출 또는 유입량으로서 각각 기지의 값을 갖는다. α 는 에너지 보정계수, g 는 중력가속도이며, x 와 t 는 각각 공간 및 시간좌표를 나타낸다. S_e 는 단면의 급확대 또는 축소에 따라 국소적으로 발생하는 단위 길이당 손실수두를 나타낸다. 통수능 K 는 Manning의 조도계수 n 을 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K = \frac{1}{n} AR^{2/3} \quad (9)$$

상류단 경계조건으로는 매 시각 유량 또는 수위를 부여할 수 있다. 하류단 경계조건으로는 매 시각 유량 또는 수위가 주어지거나 수위-유량 관계식이 주어질 수 있으나 본 연구에서는 하류단 관측수위를 사용하였다.

5.2.1 FLDWAV 모형의 초기 조도계수 산정 및 조도계수 산정절차

FLDWAV 모형에서 조도계수 산정을 위해서는 적절한 초기조도계수를 선택해야 한다. Fread and Lewis (1998)는 초기 조도계수 n_0 의 적절한 선택은 조도계수를 결정하는데 있어서 반복횟수에 영향을 주는 요소라 하였다. FLDWAV 모형은 조도계수를 결정하기 위해서 Newton-Raphson Method를 사용하기 때문에, 만약 초기 조도계수 값이 최적해와 너무 큰 차이가 있을 경우 프로그램은 수렴하지 않고 발산하게 된다. 이런 경우에는 새로운 초기 조도계수값을 가정하고 다시 반복해서 쉽게 수정할 수 있다. 초기 조도계수값을 결정하는 방법으로는 에너지 경

사를 이용하여 Manning 식 Eq. (10)에 대입하여 계산할 수 있다.

$$n_j^1 = \frac{1}{M_j} \sum \mu \frac{AR^{2/3}}{Q} \left(\frac{h_A' - h_B'}{|x_A - x_B|} \right)^{1/2} \quad (10)$$

여기서, M_j 는 j 번째 구간에서의 수위-유량 관측치의 수이고, 유량 Q 는 x_A 와 x_B 사이에서의 평균 유량이며, A 와 B 는 평균 단면적과 통수반경을 의미한다. h_A' 와 h_B' 는 A 와 B 지점에서의 관측수위이다. 조도계수의 초기값으로는 산정하고자 하는 구간에서의 조도계수 산정 사례가 있으면 이를 사용하는 것이 가장 바람직하다.

Eq. (10)을 사용하기 위해서는 관측지점에서의 유량과 수위를 알아야 하는데 수위의 경우 수위관측소에서 실시간으로 관측하지만 유량의 경우에는 실제 관측하는 횟수가 적고, 수위-유량 관계곡선을 이용하여 유량을 산정한다

다 할지라도 부정확한 곡선식이 많기 때문에 초기 조도계수 값을 수정·반복해야만 한다. 따라서 본 연구에서는 이들의 문제점을 종합하여 조도계수를 산정하는데 아래와 같은 절차를 따랐다.

첫째, 구하고자 하는 하천 구간에 대하여 기존의 연구 결과가 있을 경우 이를 참고로 초기 조도계수 값 n_j^1 을 결정한다.

둘째, 수위관측소에서의 관측치 h_A' , h_B' 를 결정하고, 수위-유량 관계곡선을 이용하여 Eq. (10)의 Q 를 산정하여 초기 조도계수 값 n_j^1 을 결정한다.

셋째, 결정된 초기 조도계수 값 n_j^1 을 기준으로 +, -범위로 다양한 초기 조도계수 값들을 대입하여 최종 수렴하는 조도계수 값들을 결정한다 (Fig. 8).

넷째, 수렴된 여러 조도계수 중 일관성 있게 수렴되어 있는 값들을 평균하여 최종 조도계수 값을 결정한다 (Fig. 9).

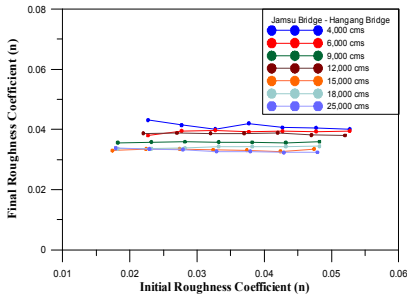


Fig. 8. Convergence between Initial and Final Roughness Coefficients

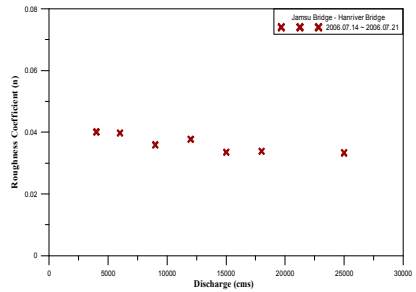


Fig. 9. Final Roughness Coefficients (Jamsu Bridge-Han River Bridge)

Table 3. Selected Flood Events

하천	순번	대 상 기 간	모의시간(hr)
한강	1	2002년 08월 04일 01시 ~ 08월 13일 23시	239
	2	2003년 08월 24일 01시 ~ 08월 31일 23시	191
	3	2003년 11월 20일 01시 ~ 11월 27일 23시	191
	4	2006년 07월 13일 01시 ~ 07월 21일 23시	191
	5	2007년 08월 05일 01시 ~ 08월 13일 23시	215
낙동강	1	2002년 08월 27일 01시 ~ 09월 02일 23시	167
	2	2004년 08월 17일 01시 ~ 08월 22일 23시	143
	3	2006년 07월 13일 01시 ~ 07월 18일 23시	143
	4	2006년 08월 06일 01시 ~ 08월 13일 23시	191
	5	2007년 09월 15일 01시 ~ 09월 19일 23시	119
금강	1	2004년 07월 16일 01시 ~ 07월 22일 23시	167
	2	2005년 08월 21일 01시 ~ 08월 28일 23시	191
	3	2006년 07월 14일 01시 ~ 07월 23일 23시	239
	4	2007년 09월 01일 01시 ~ 09월 08일 23시	191
	5	2007년 09월 15일 01시 ~ 09월 21일 23시	167

5.2.2 FLDWAV 모형을 이용한 조도계수 산정 결과

1차원 부정류 수치모형인 FLDWAV 모형을 하천의 각 구간에 적용하기 위해서 2000년부터 2009년까지의 10년간 수문자료 중에서 각 하천의 해석구간 최상류의 댐 방류량이 비교적 크면서 각 수위 및 강우관측소에서의 오측이나 결측이 없는 홍수수문사상을 Table 3과 같이 선정하였다. 이를 이용하여 유량별 조도계수를 산정하고

산정된 조도계수를 회귀식을 이용하여 대표조도계수로 제시하였다. 적용 범위는 조도계수의 신뢰성 확보를 위해 실제 관측 수문사상 최대·최소치와 ±20% 상·하한을 두어 제시하였다.

가. 한강

한강 수계의 구간별 조도계수 산정결과는 Table 4와 같으며 Figs. 10, 11은 유량에 따른 조도계수 산정결과 예이다.

Table 4. Results of Roughness Coefficients for Han River

구 간	산정식	적용범위 (cms)	수문사상 이용년도
팔당댐-팔당대교	$n = 0.1042Q^{-0.0980}$	$160 \leq Q \leq 27,000$	02, 03, 06, 07
팔당대교-영동대교	$n = 0.3072Q^{-0.2835}$	$160 \leq Q \leq 27,000$	02, 03, 06
팔당대교-광장	$n = 0.0346Q^{-0.0239}$	$1,600 \leq Q \leq 10,800$	07
광장-영동대교	$n = 0.0453Q^{0.0104}$	$1,600 \leq Q \leq 14,400$	07
영동대교-잠수교	$n = 0.0461Q^{-0.0397}$	$1,600 \leq Q \leq 27,000$	02, 03, 06, 07
잠수교-한강대교	$n = 0.2576Q^{-0.2172}$	$800 \leq Q \leq 27,000$	02, 03, 06, 07
한강대교-행주대교	$n = 0.0015Q^{0.2986}$	$4,800 \leq Q \leq 27,000$	02, 03, 06, 07
충주조정지댐-목계	$n = 0.0572Q^{-0.0779}$	$120 \leq Q \leq 16,200$	02, 03, 06
목계-우만	$n = 0.1611Q^{-0.1992}$	$120 \leq Q \leq 13,500$	02, 03, 06
우만-여주	$n = 0.0300Q^{-0.0442}$	$600 \leq Q \leq 22,500$	02, 03, 06, 07
여주-이포	$n = 0.0547Q^{-0.0661}$	$120 \leq Q \leq 16,200$	02, 03, 06
이포-양평	$n = 0.1318Q^{-0.2101}$	$600 \leq Q \leq 16,200$	02, 03, 06
춘천댐-서원	$n = 0.2210Q^{-0.2784}$	$80 \leq Q \leq 5,400$	02, 03, 06
서원-춘천	$n = 0.2696Q^{-0.2080}$	$80 \leq Q \leq 5,400$	02, 03, 06
춘천댐-춘천	$n = 0.1013Q^{-0.1744}$	$80 \leq Q \leq 3,600$	02
의암댐-강촌	$n = 0.1658Q^{-0.2037}$	$400 \leq Q \leq 7,200$	03, 06, 07
청평댐-청평	$n = 0.5934Q^{-0.2616}$	$120 \leq Q \leq 13,500$	02, 06
인양-시흥	$n = 0.1675Q^{-0.2643}$	$8 \leq Q \leq 384$	03, 06, 07
시흥-신정	$n = 0.1277Q^{-0.3349}$	$16 \leq Q \leq 384$	03, 06, 07
광동-경안	$n = 0.236Q^{-0.163}$	$64 \leq Q \leq 384$	07
청미-청미천 합류점	$n = 0.0392Q^{-0.0262}$	$40 \leq Q \leq 540$	02, 03, 07
분막-설강 합류점	$n = 0.2456Q^{-0.2458}$	$120 \leq Q \leq 5,900$	02, 06, 07
달천-탄금	$n = 0.026Q^{0.0506}$	$300 \leq Q \leq 1,152$	07
소양강댐-천진	$n = 0.036Q^{0.0443}$	$120 \leq Q \leq 1,620$	02, 03, 06, 07
천진-소양강 합류점	$n = 0.2644Q^{-0.2031}$	$120 \leq Q \leq 1,620$	02, 03, 06, 07

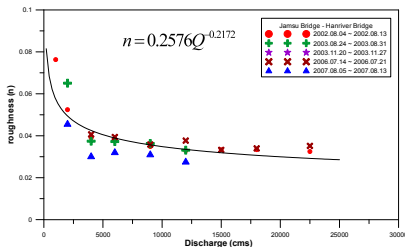


Fig. 10. Roughness Coefficients (Jamsil Bridge-Han River Bridge)

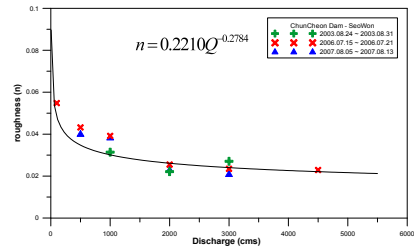


Fig. 11. Roughness Coefficients (Chun Cheon Dam-Seo Won)

나. 낙동강

낙동강 수계의 구간별 조도계수 산정결과는 Table 5와 같으며 Figs. 12, 13은 유량에 따른 조도계수 산정결과 예이다.

다. 금강

금강 수계의 구간별 조도계수 산정결과는 Table 6과 같으며 Figs. 14, 15는 유량에 따른 조도계수 산정결과 예이다.

5.2.3 홍수추적 결과 및 검증

산정된 조도계수에 대한 검증을 위해서 Table 3의 과거수문사상에 대한 홍수추적을 수행하고 각각에 대한 RMS 오차를 계산하였다. Figs. 16~19는 각각 팔당댐 하류, 북한강, 낙동강, 금강의 대표 홍수추적 결과이다. 이들의 RMS 오차는 0.26 m, 0.10 m, 0.08 m, 0.08 m의 값을 보였으며 전체 구간에서 계산한 RMS 오차의 평균값은 한강, 낙동강, 금강에 대해서 0.23 m, 0.28 m, 0.17 m의 결과를 보였다.

Table 5. Results of Roughness Coefficients for Nakdong River

구간	산정식	적용범위 (cms)	수문사상 이용년도
지보-달지	$n = 0.1170 Q^{-0.1900}$	$80 \leq Q \leq 3,600$	04, 06, 07
왜관-성주	$n = 0.3560 Q^{-0.3500}$	$400 \leq Q \leq 10,800$	02, 04, 07
화원-고령교	$n = 0.1490 Q^{-0.2700}$	$400 \leq Q \leq 9,000$	02, 04, 06, 07
고령교-현풍	$n = 0.0740 Q^{-0.1400}$	$800 \leq Q \leq 10,800$	02, 04, 06, 07
현풍-대암	$n = 0.0720 Q^{-0.1500}$	$2,400 \leq Q \leq 10,800$	06, 07
대암-적포교	$n = 0.0960 Q^{-0.1900}$	$2,400 \leq Q \leq 10,800$	06, 07
적포교-진동	$n = 0.8490 Q^{-0.4200}$	$400 \leq Q \leq 19,200$	02, 04, 06
진동-임해진	$n = 0.0220 Q^{-0.0030}$	$1,600 \leq Q \leq 15,000$	02, 04
임해진-수산	$n = 0.0360 Q^{-0.0500}$	$800 \leq Q \leq 9,000$	02, 04, 07
수산-삼랑진	$n = 0.0250 Q^{-0.0600}$	$2,400 \leq Q \leq 10,800$	06, 07
삼랑진-월촌	$n = 0.3760 Q^{-0.3300}$	$400 \leq Q \leq 15,000$	02, 04, 06, 07
죽전-내성천 합류점	$n = 0.1403 Q^{-0.2166}$	$20 \leq Q \leq 2,700$	04, 07
김천-선산	$n = 0.0080 Q^{0.1770}$	$320 \leq Q \leq 2,160$	02, 04, 06, 07
선산-감천 합류점	$n = 0.0100 Q^{0.1350}$	$160 \leq Q \leq 3,600$	02, 04, 06, 07
합천-죽고	$n = 0.4420 Q^{-0.3300}$	$100 \leq Q \leq 900$	02, 04, 06, 07
죽고-황강 합류점	$n = 0.0990 Q^{-0.1900}$	$100 \leq Q \leq 2,750$	02, 04, 06, 07
남강댐-진주	$n = 0.1720 Q^{-0.2477}$	$24 \leq Q \leq 4,500$	04
정암-거룡강	$n = 0.0292 Q^{-0.0311}$	$24 \leq Q \leq 2,700$	02, 04, 06, 07
밀양2-밀양강 합류점	$n = 1.5696 Q^{-0.7526}$	$40 \leq Q \leq 1,800$	06, 07

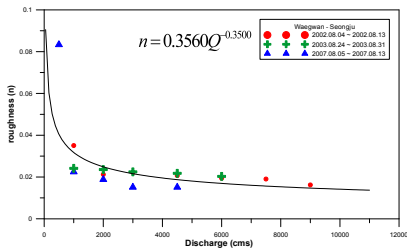


Fig. 12. Roughness Coefficients (Waegwan-Seongju)

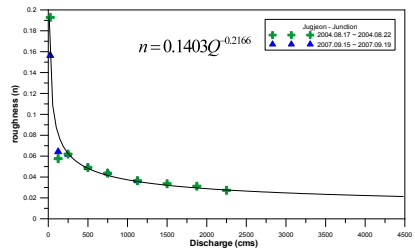


Fig. 13. Roughness Coefficients (Jugjeon-Junction)

Table 6. Results of Roughness Coefficients for Geum River

구간	산정식	적용범위 (cms)	수문사상 이용년도
현도 - 매포	$n = 1.6999Q^{-0.4661}$	$400 \leq Q \leq 2,400$	07
매포 - 부강	$n = 0.0049Q^{0.1995}$	$400 \leq Q \leq 2,400$	07
부강 - 금남	$n = 3.3866Q^{-0.5031}$	$800 \leq Q \leq 3,600$	07
금남 - 마어구	$n = 0.3631Q^{-0.3288}$	$80 \leq Q \leq 2,400$	04, 05, 06, 07
마어구 - 공주	$n = 0.1468Q^{-0.1671}$	$400 \leq Q \leq 3,600$	04, 05, 06, 07
공주 - 진두	$n = 0.0918Q^{-0.1599}$	$80 \leq Q \leq 5,400$	04, 05, 06, 07
진두 - 규암	$n = 0.0397$	$400 \leq Q \leq 5,400$	04, 05, 06, 07
규암 - 반조원	$n = 0.4666Q^{-0.3772}$	$80 \leq Q \leq 7,200$	04, 05, 06, 07
반조원 - 강경	$n = 0.0699Q^{-0.1510}$	$80 \leq Q \leq 7,200$	04, 05, 06, 07
강경 - 입포	$n = 1.2866Q^{-0.4624}$	$80 \leq Q \leq 7,200$	04, 05, 06, 07
오창 - 북일	$n = 0.1281Q^{-0.1653}$	$160 \leq Q \leq 1,440$	04, 05, 06, 07
논산 - 논산천 합류점	$n = 0.0467Q^{-0.1327}$	$16 \leq Q \leq 1,080$	04, 05, 06, 07
수룡 - 제원	$n = 0.0610Q^{-0.0839}$	$180 \leq Q \leq 1,620$	06, 07
제원 - 호탄	$n = 0.0476Q^{0.0246}$	$180 \leq Q \leq 1,620$	06, 07

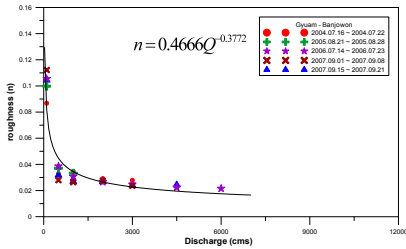


Fig. 14. Roughness Coefficients (Gyuam-Banjowon)

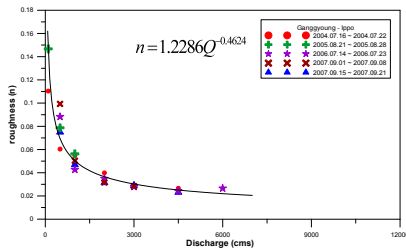


Fig. 15. Roughness Coefficients (Gangyoung-Ippo)

6. 산정된 조도계수의 비교 및 분석

국내 대표 3대강의 분류를 대상으로 상류에서 하류방향으로 각 구간에 대하여 FLDWAV 모형으로 산정한

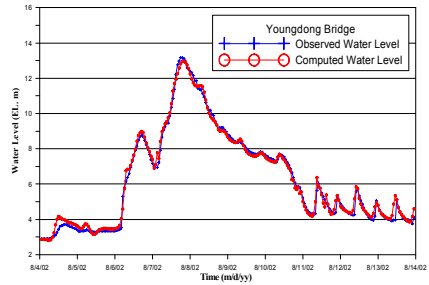


Fig. 16. Youngdong Bridge (2002)

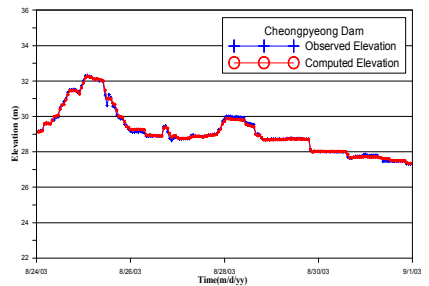


Fig. 17. Cheongpyeong Dam (2003)

조도계수와 임경을 이용한 여러 공식 중에서 대표로 Henderson 공식을 사용한 조도계수 그리고 기존의 하천 정기기본계획에서 제시하고 있는 조도계수를 비교 분석

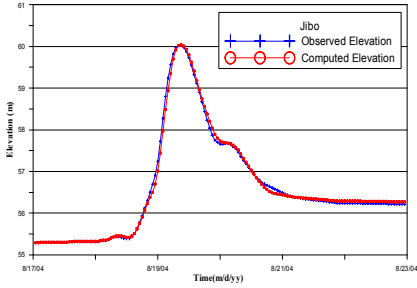


Fig. 18. Jibo (2004)

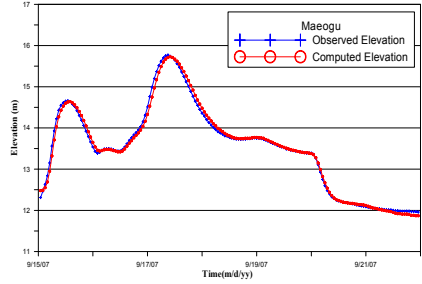


Fig. 19. Maeogu (2007)

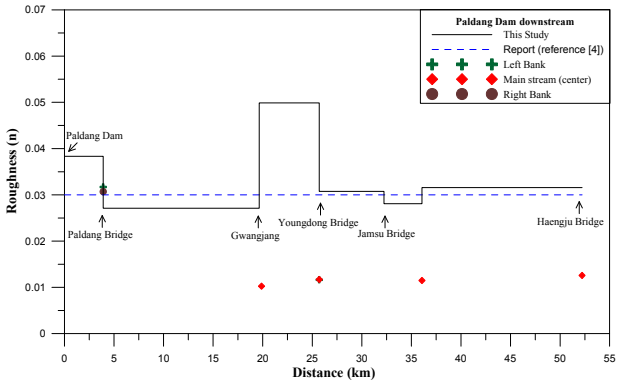


Fig. 20. Roughness Coefficients (Downstream from Paldang Dam)

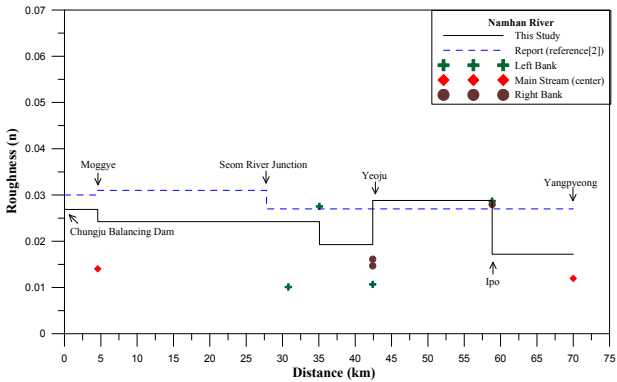


Fig. 21. Roughness Coefficients (South Han River)

하였다. FLDWAV 모형에 의한 조도계수는 유량의 함수이므로 설계홍수량에 대응하는 조도계수를 Tables 4~6의 식을 이용하여 계산하였고, 만약 관측치 최대 침투유량

이 설계홍수량보다 작은 경우에는 관측치 최대 침투 유량의 20% 범위의 조도계수를 비교 대상으로 하였다. 최종 조도계수는 본 연구에서 지수식으로 산정한 조도계수와 하

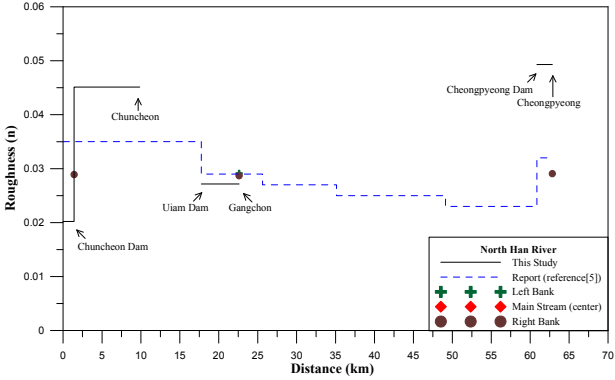


Fig. 22. Roughness Coefficients (North Han River)

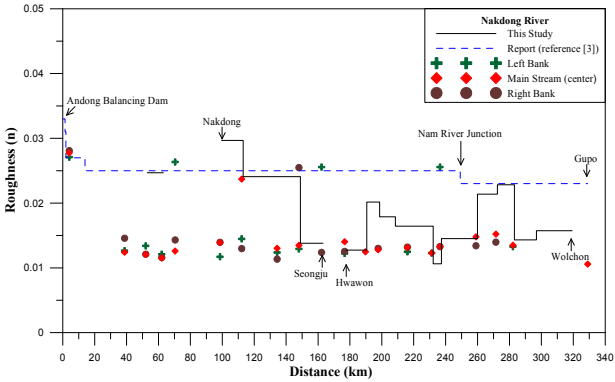


Fig. 23. Roughness Coefficients (Nakdong River)

천정비가 본계획에서 제시하고 있는 조도계수(건설교통부, 1992a, 1992b, 1993, 2002a, 2002b) 그리고 하상재료의 좌안, 주수로, 우안의 Henderson 공식을 이용한 조도계수를 위치에 따라 비교하였다.

6.1 한강 수계

한강 수계의 팔당댐 하류부, 남한강, 북한강의 경우, 각각 팔당댐, 충주역조정지댐, 춘천댐으로부터의 하류방향 거리에 따른 구간별 조도계수를 Figs. 20~22와 같이 비교하였다. 팔당댐 하류의 경우 하천정비기본계획에서는 조도계수 $n=0.03$ 을 적용하고 있지만 본 연구에서 산정된 조도계수는 팔당댐에서 팔당대교 구간, 광장에서 영동대교 구간은 0.04와 0.05로 다른 구간보다 다소 크게 산정되었다. 팔당댐에서 팔당대교 구간은 거석 하천구간으로 조도계수가 매우 큰 구간이며 광장에서 영동대교 구간 사이

에는 잠실수증보가 존재하여 수증구조물의 영향으로 다른 구간에 비해 크게 산정된 것으로 판단된다. 팔당대교 하류부의 입도분포는 대부분 모래 등급 이하의 입경을 가지고 있어 Henderson 공식으로 산정된 조도계수는 0.015 정도의 매우 작은 값이 산정되었다.

남한강의 경우에는 하천정비기본계획에서 제시하고 있는 조도계수 값보다 FLDWAV 모형으로 산정된 조도계수가 여주~이포구간을 제외하고는 다소 작게 산정되었다. 하상재료는 대부분 모래 이하로 구성되어 입경을 이용한 조도계수는 0.015 정도로 매우 작은 값이 산정되었다. 북한강의 경우에는 청평댐, 의암댐, 춘천댐, 화천댐에 의해서 호수로 형성된 구간이 많아 하상재료 채취가 어려웠으며 FLDWAV 모형으로 산정된 조도계수는 신뢰성이 떨어져 제시하지 않았다. 춘천수위관측소 상류와 강촌수위관측소의 하상재료는 대부분 거석 또는 자갈이상의 하

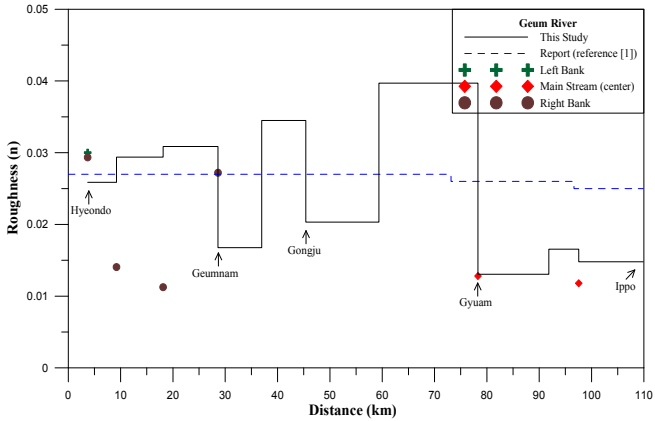


Fig. 24. Roughness Coefficients (Geum River)

천으로 구성되어 있어 입경을 이용한 조도계수는 0.03 이상의 큰 값이 산정되었다.

6.2 낙동강 수계

낙동강 수계의 안동댐으로부터 하류 방향으로의 구간별 조도계수는 Fig. 19와 같다. 유량이 적으면 하천 구간에서 여울 또는 수면 불연속 흐름이 발생할 가능성이 높아지며 불연속 흐름은 부정류 모형을 해석할 때에 치명적인 오차 또는 부정확한 조도계수를 산정하는 원인이 된다. 낙동강의 경우 일부 상류 구간은 유량이 적어 불연속 흐름이 발생 가능하며, 하류 구간은 하구둑의 배수영향으로 조도계수 산정 시 수렴이 되지 않는 경우가 발생하였다. 전반적으로 하천정비기본계획에서 제시하고 있는 조도계수가 상당히 크게 제시되어 있으며 입경을 이용한 조도계수는 대부분 0.015의 값을 갖는다.

6.3 금강 수계

금강 수계의 구간별 조도계수는 Fig. 24와 같다. 금강 분류의 경우 FLDWAV 모형으로 산정된 조도계수는 하천 구간마다 상당히 큰 차이를 보이고 있으며 규암 하류의 조도계수는 0.015의 아주 작은 조도계수가 산정되었다. 입경을 이용한 조도계수는 상류의 경우 거석하천으로 조도계수가 0.035 정도의 큰 값을 보였으나 규암 수위관측소 하류는 0.012의 매우 작은 조도계수를 보였다.

6.4 고찰 및 토의

지금까지 국내 주요하천인 한강, 낙동강, 금강의 국가 하천구간에 대하여 FLDWAV 모형을 이용한 방법과 입

경공식을 이용한 방법으로 조도계수를 산정하였다. 하천 정비기본계획에서 제시하고 있는 조도계수는 주로 하상재료 구성 물질 및 하상상태, 자연하천에서의 일반적인 조도계수 그리고 기 수립된 하천정비기본계획이나 관련 보고서 등을 참고하여 조도계수를 추정하고 있어 산정된 조도계수 값의 객관성이 다소 떨어지며 실측수위와 검증되지 않는 등의 문제점을 가지고 있는 것으로 판단된다. FLDWAV 모형으로 산정된 조도계수는 각 하천 구간에 따라서 다소 큰 변화를 보이고 있어 실제 자연하천의 조도계수는 각 구간마다 크게 차이가 있음을 알 수 있다. 또한 낙동강의 경우에는 하천연장 340km 중에서 약 240km 구간에서 하천정비기본계획에서 제시하고 있는 조도계수보다 작게 산정되어 전반적으로 큰 차이를 보이고 있다. 하상재료 공식을 이용한 조도계수는 단순히 하상재료의 효과만을 반영하기 때문에 전체적으로 상당히 작게 산정됨을 알 수 있다. 그 이유는 하천에서는 하상재료 뿐만 아니라 수위, 유량, 만곡, 하상경사, 수로바닥의 형상, 단면형상의 변화, 하상과 제방 비탈면에서의 식생의 상태, 하천구조물 등이 조도에 영향을 미치기 때문이다.

7. 요약 및 결론

한강, 낙동강, 금강의 분류 및 지류에 대해서 수위관측소를 기준으로 구간을 분해하고 과거 홍수 수문사상을 선정하여 부정류 해석을 통해 다양한 유량에 대한 하천 구간별 조도계수를 산정하였다. 현재 국내 하천정비기본계획 수립 및 하천설계 시 적용되고 있는 조도계수는 구체적인 기준으로 산정된 값이 아니고 이전부터 또는 관행적

으로 적용되어 왔으며, 조도계수의 결정기준이 명확하지 않은 상태이다. 따라서 이와 같이 부정확한 조도계수의 사용으로는 홍수위를 산정할 때 정확한 수위를 구할 수 없으며, 특히 유량이 작을 때 계산수위의 정확성이 상당히 떨어진다. 따라서 조도계수의 부정확성 문제를 최소화하고 실무에서 보다 객관적이며 정확한 조도계수를 적용하기 위해서 국내 주요 하천에 대하여 실측치를 이용하여 조도계수를 산정하였다. 본 연구에서 얻은 내용을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 강우 유출 해석을 위한 잔류 유입량 산정 기준을 마련하여 조도계수 산정 시 지류유입량을 고려하였다.

둘째, FLDWAV 모형을 이용한 조도계수 산정 절차를 제시하였고 한강, 낙동강, 금강의 분류 및 지류에 대해서 유량에 따른 구간별 조도계수를 지수식으로 제시하였다.

셋째, 한강, 낙동강, 금강의 수위관측소를 기준으로 하상재료를 채취하여 입경을 이용한 조도계수 산정 공식에 대입하여 하천 지점에 대한 조도계수를 산정하였고 본 연구와 기존의 하천정비기본계획에서 제시하고 있는 조도계수와 비교 검토하였다.

넷째, 산정된 조도계수를 비교한 결과 하상재료를 이용한 조도계수 산정결과가 전반적으로 작은 값을 보였으며, FLDWAV 모형을 이용하여 산정한 조도계수는 각 구간에 따라서 크게 변화하는 결과를 보였다. 특히, 낙동강의 조도계수 산정결과는 기존 하천정비기본계획에서 제시하고 있는 조도계수에 비해 거의 전 구간에 걸쳐 약 0.01 정도가 작게 산정되었으며, 금강의 경우에는 구간별로 산정된 조도계수가 상당히 큰 차이를 보였다.

조도계수는 시간과 공간에 따라 달라지는 매우 복잡한 인자이기 때문에 매년 홍수수문사상에 따라서 변동할 수 있으며, 하천구조물의 건설이나 준설 등과 같이 하천 단면과 경사가 바뀌면 조도계수 또한 변화한다. 본 연구에서 산정된 조도계수는 수위관측소와 수위관측소 사이에서의 평균 조도계수로서 실제 자연하천에서의 임의의 지점에서의 조도계수는 본 연구 결과의 조도계수와 다를 수 있다는 한계가 있다. 이러한 문제점 때문에 조도계수는 매년 지속적인 보완과 검증이 필요하며, 특히 본 연구에서 산정한 조도계수는 관측수문사상을 이용하여 산정한 값이기 때문에 설계홍수량 이상의 홍수에도 적용할 수 있는 조도계수에 대한 지속적인 연구가 요망된다.

감사의 글

본 연구는 한국수자원공사의 연구비 지원에 의한 연구 결과의 일부이며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

건설교통부 (1992a). 금강 하천정비기본계획 (보안).
 건설교통부 (1992b). 한강수계지수기본계획 (남한강 하천 정비기본계획).
 건설교통부 (1993). 낙동강 하천정비기본계획 (보안III).
 건설교통부 (2002a). 한강 수계 하천정비기본계획 (변경).
 건설교통부 (2002b). 북한강 수계 하천정비기본계획 (보안).
 국토기술연구센터 (일본) (1989). 하도계획 검토 안내서.
 김지성, 이찬주, 김원 (2007). "실측 수위에 의한 자갈하천의 조도계수 산정." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제10호, pp. 755-768.
 이동섭, 우효섭, 권보애, 안홍규 (2006). "식생 조도 계수 산정을 위한 선별된 식생에 관한 실험 연구." **한국수자원학회 2006년도 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 1291-1294.
 이상호 (2001). "수위관측과 수리학적 하도추적에 의한 수위-유량 관계식 작성." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제34권, 제5호, pp. 551-560.
 이신재, 박상우 (2006). "수위-유량자료가 부재한 자갈하천의 조도계수 산정에 관한 연구." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제12호, pp. 985-996.
 이경규, 이창현 (2004). "수리학적 홍수추적 모형을 이용한 한강하류부의 조도계수 산정." **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제24권, 제1B호, pp. 25-32.
 이코리버21연구단 (2007). 홍수터 수목관리 기술개발, 한국건설기술연구원.
 한국수자원학회 (2005). 하천설계기준 해설.
 Barnes, H.H. (1967). Roughness characteristics of natural channels. United States Geological Survey Water-supply Paper 1849, USGS.
 Chow, V.T. (1959). Open-Channel Hydraulics, McGraw-Hill Book Co., New York.
 Cowan, W.L. (1956). "Estimating hydraulic roughness coefficients." **Agricultural Engineering**, Vol. 37, No. 7, pp. 473-475.
 Fread, D.L., and Lewis, J.M. (1998). The NWS FLDWAV Model Quick Users Guide, NOAA, Silver Spring.
 Garde, R.J., and Raju, K.G. (1978). Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems, Wiley Eastern, New Delhi.
 Henderson, F.M. (1966). Open Channel Flow. Macmillan, London.
 Lane, E.W., and Carlson, E.J. (1953). "Some factors

affecting the stability of canals constructed in coarse granular materials.” Proceedings, Minnesota International Hydraulics Convention, Minneapolis, MN, 1-4 September 1953, pp. 37-48.
Meyer-Peter, E., and Müller, R. (1948). “Formulas for

bed-load transport.” Proceedings of the 3rd Meeting of IAHR Stockholm, pp. 39-64.

논문번호: 11-018	접수: 2011.02.15
수정일자: 2011.07.12/08.08	심사완료: 2011.08.08