ORIGINAL ARTICLE

한천의 대표입경을 이용한 조도계수 산정

이준호 · 양성기* · 김동수¹⁾

제주대학교 토목공학과, ¹⁾단국대학교 토목환경공학과

Estimation of Roughness Coefficient Using a Representative Grain Diameter for Han Stream in Jeju Island

Jun-ho Lee, Sung-kee Yang*, Dong-su Kim¹⁾

Department of Civil Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

¹⁾Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University, Yongin 448-701, Korea

Abstract

Roughness coefficient was computed for review of applicability based on measurement of the representative grain diameter reflecting channel characteristics of Han Stream. After field survey, collection of bed material, and grain analysis on the collected bed material, roughness coefficient was computed using representative grain and existing empirical equation for roughness coefficient. Value of roughness coefficient calculated using equation by Meyer-Peter and Muller (1948) was 0.0417 for upstream, 0.0432 for midstream, and 0.0493 for downstream. As a result of comparing the computed roughness coefficient to other empirical equations for review of applicability, the coefficient was larger in Strickler (1923) equation by 0.006. Smaller coefficient was shown by Planning Report for River Improvement Works. Equation by Garde and Raju (1978) was larger by 0.004, and equations by Lane and Carlson (1953) and by Meyer-Peter and Muller (1948) were larger by 0.001. Such precise roughness coefficient is extremely important when computing the amount of flood in rivers to prevent destruction of downstream embankments and property damages from flooding. Since roughness coefficient is a factor determined by complicated elements and differs according to time and space, continued management of roughness coefficient in rivers and streams is deemed necessary.

Key words : Roughness coefficient, Representative grain diameter. Hanchun

1. 서론

최근 기후변화로 인한 강우량은 지속적으로 증가하지만 강우일수는 줄어들어 집중호우현상이 증가하는 추세를 보이고 있다. 이 같은 현상은 제주지역에서도 뚜렷하게 나타나고 있어 강우량의 양극화 현상이 관측되고 있으며, 인구증가 및 도시화로 인한 불투수층의 증가로 인해 지하로 침투되는 양이 감소하고 지

표유출량이 크게 증가하여 침수 및 범람이 자주 발생하고 있다(Park과 Moon, 2010).

하천기본계획은 유역의 강우, 유량, 하도특성, 환경, 수자원개발 및 이용현황 등 하천의 홍수관리, 용수공급, 하천환경보전 등에 관한 제반사항을 조사·분석하여 대상 하천에 대한 종합적인 정비와 보전 및 이용이 가능하도록 하고 있다. 이 같은 기본계획 수립은 구조물의 축조높이 및 하천제방의 단면 등에 활용되

Received 8 November, 2012; Revised 14 March, 2013;

Accepted 8 April, 2013

*Corresponding author : Sung-kee Yang, Department of Civil Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea
Phone: +82-64-754-3451
E-mail: skyang@jejunu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© 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.

는 침투홍수량을 산정하기 위해서는 다양한 현장조건을 충분히 반영하여 산정하여야만 한다. 따라서 보다 정밀한 홍수위 및 홍수량 계산을 위해서는 조도계수 산정이 매우 중요한 필수요소이다.

조도계수는 자연하천의 흐름해석에 사용되는 매우 중요한 변수로서, 하천의 단면, 하상입자들의 크기 및 형상, 식생, 수로단면의 변화, 수로의 만곡, 수위와 유량 등 매우 복합적인 요소의 영향을 받는 경험적 매개변수이기 때문에 그 값을 정확히 산정하는 것은 매우 어렵다(Chow, 1959). 자갈층이 하상표면의 대부분을 덮고 있으므로 흐름에 대한 저항은 주로 자갈입자로 구성된 하상표면과의 접촉에 의해 발생하게 된다. 이 같은 점에서 유권(Flow regime)변화에 따라 하상파(Bed form)가 변하고 흐름 저항이 달라지는 모래하천과는 뚜렷이 구별되고 있다(Lee 등, 2010).

국내에서는 수많은 하천공사가 시행되어 왔지만 아직까지 체계적인 연구는 이루어지지 않아 많은 문제점이 있다(Ecoriver21 Research Program, 2007). Wohl(1998)은 5개 강의 과거 홍수흔적으로부터 조도계수를 산정하여 홍수량을 계산하여, 하상경사가 0.01 이하일 경우, 조도계수가 25% 변화될 때 산정된 유량은 최대 20%의 변화가 있었으며, 홍수량이 큰 대규모 하천보다 수면폭과 수심의 비가 작은 급경사 소하천에서 조도계수 민감도가 크게 나타나는 것을 보였다.

제주도 하천은 한라산을 중심으로 방사상 형태를

이루고 있으며, 하천의 발원지인 한라산을 중심으로 하여 유로연장은 15 km 내외로 짧은 편이고, 하천의 경사는 상류부에서 급하며, 하류부로 갈수록 완만하다. 남·북부의 지역은 동·서부 지역보다 하천이 많이 분포하고 있다(Yang, 2007). 또한 연 평균 강우량은 우리나라 최대이지만 화산섬의 좋은 투수성으로 인해 지하로 침투하여 평상시 대부분의 하천들은 건천을 이루고 있다(Jung과 Yang, 2009).

제주도 하천의 하천기본계획(2009)에서는 Chow (1959)에서 제시한 도표를 활용하여 조도계수 산정하였고, 이에 뒷받침할 만한 구체적인 자료를 제시하지 못하였으며, 전 구간에 대해 공히 단 하나의 조도계수를 적용하는 실정이다. 또한 제주도에서는 조도계수 연구는 전무한 상태이므로 기초자료인 하상재료를 이용하고 10개의 구간으로 나누어 정밀한 조도계수를 산정하였다. 또한 제주도하천기본계획에 제시된 조도계수와 타 경험식들과 비교·분석하고 제주도 하천의 조도계수에 대한 타당성과 한계를 밝혀 치수 및 방재계획을 수립하는 데 기여하고자 하였다.

2. 연구자료

제주도 북부 중앙부에 위치한 한천은 한라산 EL.1,950 m 고지에서 계곡하천을 형성하여 제주시 용담동 해안으로 유출되는 지방하천이다. 하상경사는 매우 급한 편이며 산지와 농지 및 도심지를 유과하는 하천으로

Fig. 1. Basin for the study.

서 하상은 대부분 거석, 입도가 큰 자갈로 구성되어 있다. 또한 하천연장은 11.5 km, 유역면적은 37.39 km², 유역평균 폭은 3.25 m, 형상계수는 0.28이다. 유역의 형상은 좌안으로 토천이 유입되는 것을 제외하고는 지류가 거의 없는 수지상에 가까운 하천형태를 보이고 있다(Fig. 1). 한천 중류부에는 재해 방재용 저류지가 2개소가 설치되어 운용 중에 있다.

3. 연구방법

3.1. 조도계수 경험식

하상토사 입경으로부터 n 값을 추정하기 위해 많은 경험적 방법들이 연구되었다. 이들 중에서 가장 널리 알려진 것은 Strickler(1923)의 연구로서 Manning의 n 값과 하상재료 사이에 1/6승의 관계를 다음 식과 같이 제시하였다.

$$n = 0.047 d_{50}^{1/6} \quad (1)$$

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

Meyer-Peter와 Muller(1948)는 거친 조직의 크기를 중요한 비율로 섞은 재료의 혼합물에 대해서 다음의 방정식을 제시하고 있다.

$$n = 0.038 d_{90}^{1/6} \quad (2)$$

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

Lane와 Carlson(1953)은 자갈로 구성된 운하를 포함한 현장실험 결과로부터 다음과 같은 식을 제시하고 있다.

$$n = 0.026 d_{75}^{1/6} \quad (3)$$

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

Garde와 Raju(1978)는 다양한 흐름으로부터 자료 분석을 통하여 Strickler식에 기초하여 다음 식을 유도하였다.

$$n = 0.039 d_{50}^{1/6} \quad (4)$$

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

3.2. 조도계수 산정과정

자갈하천은 자갈층이 하상표면을 덮고 있으며, 자갈입자로 구성된 하상표면과의 접촉에 의해서 발생하는 특징이 있다. 흐름 저항의 주요인인 하상이 변형되지 않고 그 형태를 유지하고 있어야 하며, 이러한 가정을 통해 다음의 과정으로 하천의 조도계수를 산정하였다. 첫째, 대상 하천구간은 지형도 및 위성사진을 통해 대상구간을 나누어 도상조사를 하였으며, 둘째, 대상구간은 실제 하천현장을 답사하여 도상조사 결과와 비교하였다. 이때 도상조사에서는 확인 할 수 없는 하상재료의 크기 및 인공구조물은 현장에서 확인·조사하였다. 셋째, 확정된 대상구간에서 채취한 재료의 입경을 분석한 후 대표입경을 d_{20} , d_{50} , d_{75} , d_{90} 으로 각각 나누어 경험식을 이용하여 조도계수를 산정하였다.

3.3. 하상재료 채취방법

하상재료의 입도특성을 이용하여 조도계수를 산정하기 위한 하상재료 채취방법에는 선 격자법과 면 격자법이 있다. 선 격자법은 하상주변에 위치해 있는 자갈 중 큰 것을 선택하여 자갈의 입경만큼 같은 간격으로 이동하여 하상의 샘플을 100개 채취하여 입경분포를 분석하는 방법이며, 면 격자법은 자갈 하상에 일정한 크기의 격자망을 형성하여 격자점 바로 아래 있는 입자를 채취하는 방법이다. 1 m²보다 작은 크기의 사각형 격자판을 사용할 경우 사진촬영을 하여 축척을 고려한 사진판독으로 입경을 구할 수 있다. 이 연구에서는 한천의 하상재료 입경은 크기를 고려하여 선 격자법(ISO4364)을 이용하여 하상재료를 채취하였다.

한천의 전 하천구간 10.0 Km를 수회에 걸쳐 현장 답사와 조사를 실시하였다(Fig. 2). 하상재료의 채취 방법은 하천의 종단방향으로 1 Km 간격, 각 구간에 대해 3개 지점에서 시료를 채취하였다. 또한 시료 채취 시 여울이나 하상재료의 변화가 심한 구역은 제외하였으며, 각 구간에서 보편적인 하상재료를 선택하였다. 표준화된 하상재료채취를 위해, 하상재료의 입경크기를 고려하고, 각 구간마다 서로 다른 위치에서 300개의 자갈 입자를 채취하여 총 3000개의 표본을 채취하여 중경(intermediate axis)을 측정하였다(Fig. 3).

Fig. 2. Reconnaissance section of Han stream(left) and bed materials at each section(right).

Fig. 3. Collection of bed materials using Line-grid method.

3.5. 입도분포 시험

채취한 시료는 ISO 9195 기준으로 한 입도분포를 구하였으며(Fig. 4), 그 결과를 이용하여 대표입경을 산정하였다(Table 1). 입도분석 결과, 하류부(NO.1) 지점의 평균 하상입경은 328 mm이며, 중류부(NO.5)

지점은 479 mm, 상류부(NO.10)지점은 520 mm로 측정되었다. 하상재료는 상류부로 올라갈수록 대부분 거석 및 큰 호박돌로 구성되어 있었으며, 하천 고도별 하상재료가 상의한 것으로 판단된다.

Fig. 4. Grain size analysis using bed material(NO.01 ~ NO.10).

Table 1. Diameter of bed material for each measurement section

Section		d ₂₀ (mm)	d ₅₀ (mm)	d ₇₅ (mm)	d ₉₀ (mm)	Sampling Method
NO.1	Left	205	345	476	547	Line-Grid Method
	Middle	214	323	417	517	
	Right	197	317	401	538	
NO.2	Left	286	429	587	737	
	Middle	364	513	632	782	
	Right	324	478	561	642	
NO.3	Left	268	357	447	547	
	Middle	349	508	648	736	
	Right	374	524	603	690	
NO.4	Left	311	406	492	597	
	Middle	388	509	630	723	
	Right	385	497	580	628	
NO.5	Left	322	449	560	644	
	Middle	305	437	594	690	
	Right	383	522	588	648	
NO.6	Left	347	487	711	1254	
	Middle	328	500	718	1021	
	Right	450	774	1049	1418	
NO.7	Left	272	419	623	954	
	Middle	352	492	721	1110	
	Right	401	617	975	1369	
NO.8	Left	375	537	877	1362	
	Middle	372	501	692	1153	
	Right	369	539	949	1418	
NO.9	Left	232	367	658	1753	
	Middle	299	410	721	1107	
	Right	285	475	728	1192	
NO.10	Left	381	537	921	1663	
	Middle	305	482	695	1130	
	Right	355	542	1013	1625	

4. 결과 및 고찰

4.1 조도계수 산정

한천의 하상재료 특징은 대부분 거석 및 큰 호박돌로 혼재되어 있어, 거친 조직의 크기를 중요한 비율로 섞은 재료의 혼합물에 대한 Meyer-Peter와 Muller(1948)식을 적용하여 조도계수를 산정하였다.

Meyer-Peter와 Muller(1948) 식에 대표입경을 대입하여 조도계수를 산정한 결과를 그래프로 도식화(Fig. 5)하고, 각각의 구간별 조도계수를 Table 2에 나타내었다.

조도계수 산정결과, 하류부(NO.1)지점은 0.0415, 중류부(NO.5)지점은 0.0435, 상류부(NO.10)지점은 0.0473 측정되었다. 하류부는 하천기본계획과 유사하였으나, 상류부로 올라 갈수록 차이를 보였으며, 지류

가 합류되는 NO.6지점에서부터 조도가 급격히 낮아지는 현상을 확인할 수 있었다. 따라서 이 연구에서는 하천특성을 반영하여 하천기본계획보다 정밀한 조도계수를 산정할 수 있었다.

Fig. 5. Roughness coefficient for each section using Meyer-Peter and Muller(1948) equation.

Table 2. Roughness coefficient for each section using bed material

Section	Left Bank	Middle	Right Bank	Remarks
NO.1	0.0419	0.0415	0.0418	Basic Plan for River Maintenance 0.04
NO.2	0.0440	0.0445	0.0430	
NO.3	0.0419	0.0440	0.0435	
NO.4	0.0425	0.0439	0.0429	
NO.5	0.0430	0.0435	0.0431	
NO.6	0.0481	0.0465	0.0491	
NO.7	0.0460	0.0471	0.0488	
NO.8	0.0488	0.0474	0.0491	
NO.9	0.0509	0.0471	0.0477	
NO.10	0.0504	0.0473	0.0502	

4.2. 조도계수의 비교

한천의 하상재료 입경을 이용한 조도계수와 경험식에 의해 산정된 결과를 비교·검토하고 타당성을 분석하였다. 경험식은 Meyer-Peter와 Muller(1948)식과 Garde와 Raju(1978), Lane과 Carlson(1953), Strickler (1923)식을 계산하여 각 구간 중앙부의 조도계수값을 비교하여 제시하였다(Table 3).

비교 결과, Strickler(1923)식은 조도계수가 대부분 0.05 이상 과다산정이 되었으며, Garde와 Raju(1978)식의 하류부(NO.1)지점은 하천기본계획 보다 낮게 산정이 되었으나, 그 외 구간은 하천기본계획과 비슷한 결과를 나타냈다. Lane과 Carlson(1953)식은 Meyer-Peter와 Muller(1948)식과 매우 비슷한 조도계수값을 얻을 수 있었다.

조도계수 산정한 결과를 비교·검토하기 위하여

타 경험식과 하천기본계획의 조도계수를 평균제곱근오차(RMSE)로 계산하였다(Table 4).

Table 4. Analysis on RMS error of Meyer-Peter and Muller (1948) and empirical formula

Section	Representative Grain Diameter	Method	RMSE
Meyer-Peter and Muller(1948)	d_{90}	$n = 0.038d_{90}^{1/6}$	-
Strickler(1923)	d_{50}	$n = 0.047d^{1/6}$	0.006
Garde and Raju(1978)	d_{50}	$n = 0.039d_{50}^{1/6}$	0.004
Lane and Carlson(1953)	d_{75}	$n = 0.026d_{75}^{1/6}$	0.001
Basic Plan for River Maintenance	-	Chow Table	0.006

분석 결과, 본 연구에서 산정한 조도계수와 Strickler (1923)공식, 하천기본계획의 RMS 는 0.006으로 가장 크게 오차를 보였으며, Garde와 Raju(1978)식은 0.004, Lane과 Carlson(1953)식은 0.001로 매우 유사한 값을 나타내었다.

Lane과 Carlson(1953)식은 자갈하천과 자갈로 구성된 운하를 포함한 현장시험으로부터 얻은 경험식으로서 근접한 결과값을 얻을 수가 있었다.

5. 결 론

이 연구에서는 제주도 대표하천인 한천에서 실측한 자료를 이용하여 하천의 특성을 반영한 조도계수

Table 3. Roughness coefficient for each section using empirical equation

Section	Meyer-peter and Muller	Garde and Raju	Lane and Carlson	Strickler	Basic Plan for River Maintenance
NO.1	0.0415	0.0394	0.0414	0.0475	0.04
NO.2	0.0445	0.0425	0.0444	0.0513	
NO.3	0.0440	0.0425	0.0446	0.0512	
NO.4	0.0439	0.0425	0.0444	0.0512	
NO.5	0.0435	0.0414	0.0440	0.0499	
NO.6	0.0465	0.0424	0.0454	0.0510	
NO.7	0.0471	0.0422	0.0454	0.0509	
NO.8	0.0474	0.0424	0.0451	0.0511	
NO.9	0.0471	0.0410	0.0454	0.0494	
NO.10	0.0473	0.0421	0.0451	0.0507	

를 산정하고 적용성을 비교·분석하기 하였다. 이를 위해 하천구간을 총 10개 구간으로 나누고, 각 구간마다 300개 샘플을 채취하였으며, 입도분석을 실시하여 한천의 대표입경을 이용한 조도계수를 산정한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 연구대상인 한천의 실제 현장답사를 실시하여 하천 고도별 하상재료가 상의하고 상류부로 올라갈수록 입경이 커지고 있었으며, 지류가 합류되는 NO.6지점에서부터 조도가 급격히 낮아지는 현상을 확인할 수 있었다. 구간별 조도계수 값은 상류는 0.0417, 중류는 0.0432, 하류는 0.0493으로 산정되었다.

2. 이 연구에서 산정한 조도계수와 하천기본계획, 타 경험식을 이용한 조도계수의 산정 타당성을 비교·분석을 위해 평균제곱근오차(RMSE)를 계산하였다. Strickler(1923) 공식, 하천기본계획의 RMS는 0.006으로 가장 크게 오차를 보였으며, Garde와 Raju(1978)식은 0.004, Lane과 Carlson(1953)식은 0.001로 매우 유사한 값을 나타내었다.

3. Garde와 Raju(1978)식은 다양한 흐름과 다양한 하천의 특성에 적용된 식이지만, 한천의 특성인 산지하천 및 자갈하천에 제대로 반영하지 못하였으며, Lane과 Carlson(1953)식은 자갈하천과 자갈로 구성된 운하를 포함한 현장시험으로부터 얻은 경험식으로서 Meyer-Peter와 Muller(1948)식과 매우 유사한 조도계수 값을 도출할 수가 있었다.

향후 연구에서는 부정류 모형을 이용하여 실측한 유량과 수위를 적용한 조도계수를 산정한다면 보다 정밀한 조도계수를 산정할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설교통기술지역특성화사업의 연구비 지원(10지역기술혁신B02, 제주수자원연구단)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- Chow, V. T., 1959, Open-Channel Hydraulics, McGraw-Hill Book Co., New York, 680.
- Ecoriver 21 Research Program, 2007, Tree Management and Technical Development in Floodplain.
- Garde, R. J., Ranga 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.
- Jung, W. Y., Yang, S. K., 2009, Simulation on Runoff of Rivers in Jeju Island Using SWAT Model, J. Environ. Sci., 18(9), 1045-1055.
- Lane, E. W., Carlson, E. J., 1953, Some factors affecting the stability of canals constructed in coarse granular materials, proc Minnesota, Intern., Hydraulic Conv., IAHR, pp. 37-48.
- Lee, C. J., Kim, Y. J., Kim, J. S., Kim, W., 2010, Analysis of Roughness Coefficient in Gravel-bed Rivers, J. Korean. Soc. Civil Eng., 30(2B), 149-157.
- Meyer-Peter, Muller R., 1948, Formulas for Bed-Load Transport., Proceedings of the 3rd Meeting of IAHR Stockholm, pp. 39-64
- Ministry of Construction Transportation, 2009, Basic Plan for River Maintenance(Han Stream)
- Park, W. B., Moon, D. C., 2010, Basic Research of Hydrological and Water Quality Characteristics for Utilization of Stream Runoff, Jeju Development Institute, 2010-3.
- Stickler, A., 1923, Beitrage zur Frage der Geschwindigkeits - Formel und der Rauheitszahlen fur Strome, Kanale und Geschlossene Leitungen, (Some contributions to the question of a velocity formula and roughness data for streams, canals and closed conduits), Mitteilungen des Eidgenossischen Amtes fur Wasserwirtschaft, Bern, Switzerland, No. 16g.
- Wohl, E. E., 1998, Uncertainty in food estimates associated with roughness coefficient, J. Hydraul. Eng., ASCE, 124(2), 219-223.
- Yang, S. K., 2007, River Management and Improvement Measures of Jeju Island, River & Culture, Korea River Assoc., 3(4), 104-115.