

현장 실측에 의한 조도계수 산정 방법과 그 적용

Method for estimation of roughness coefficient by field measurement and its application

이찬주*, 김지성**, 김용전***, 김원****

Chan Joo Lee, Ji Sung Kim, Yong Jeon Kim, Won Kim

요 지

조도계수는 하천의 흐름 저항을 총량적으로 나타내는 변수로서 흐름 계산에 큰 영향을 미치며 그 결과로 하천의 제방고 등 치수 시설물의 설계에 중요한 요인이 된다. 이에 따라 객관적이고 정량적인 조도계수의 산정은 오래 전부터 연구자들의 관심을 끌어들였다. 본 연구에서는 수위와 유량에 대한 현장 실측 자료를 토대로 Manning 식에 의해 조도계수를 산정하는 방법을 개괄하고 이를 실제 하천에 적용한 결과를 제시하였다. 2007년부터 2009년까지 호박돌, 자갈, 모래 하천과 자연 하천과 도시 하천을 포함하는 총 28개의 다양한 지점에 대해 조도계수가 산정되었다. 그리고 각 지점에서 산정된 유량에 따른 조도계수의 변화 특성이 분석되었다. 자갈 및 호박돌이 주된 하상재료인 하천에서는 조도계수가 유량 증가에 따라 대체로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 반면에, 모래하천이나 도시 하천의 경우 유량 증가에 따른 조도계수의 변화가 거의 없거나 종종 조도계수가 증가하는 특성으로 나타나기도 한다. 자갈 하천의 경우 상대수심과 조도계수의 관련성을 분석한 결과 수심이 증가하면서 조도계수가 감소하는 특성이 잘 나타나고 있으며, 그 경향성은 Limerinos(1970)이 제시한 식과 상당히 근접한 결과를 나타내고 있다. 또한, 국내 하천의 자료를 이용하여 추정된 경험식을 제시하였다.

핵심용어 : 조도계수, 현장 실측, 수위, 유량

1. 서론

물의 흐름에 저항하는 수로의 저항 정도에 관한 모든 정보를 포괄적으로 나타내는 수리량인 조도계수는 개수로, 특히 하천 및 홍수터의 구성재료(하상재료 및 강터재료), 중·횡단 형상, 식생의 밀도와 특성, 만곡, 불규칙한 장애물 등의 변화특성을 나타낸다. 조도계수는 수리학자들에게 하도 계획을 수립하는데 있어 가장 중요한 매개변수의 하나로서 그 값은 하천 수위와 유속 분포 등 흐름 해석에 대단히 큰 영향을 미치므로 정확한 조도계수의 산정은 홍수위 산정, 하천 시설물의 설계, 호안의 안정성 평가 등을 수행함에 있어 매우 중요하다.

이러한 조도계수의 중요성으로 인해 객관적이고 정량적인 조도계수의 산정은 오래 전부터 연구자들의 관심을 끌어들였다. 외국에서는 자갈하천, 모래하천 등 다양한 유형의 하천에 대해 실측에 의한 조도계수 산정 연구가 많이 이루어졌으며, 하상재료 및 상대수심과 관련하여 조도계수 경험식을 제시하는 등의 노력을 많이 하였다. 국내에서는 유권규 등(1993)의 연구와 김지성 등(2007), 김지성 등(2009), 이찬주 등(2010)의 사례가 중소하천에 대한 실측을 바탕으로 조도계수를 산정한

* 정회원 · 한국건설기술연구원 하천해안항만연구실 전임연구원 · E-mail : c0gnitum@kict.re.kr
** 정회원 · 한국건설기술연구원 하천해안항만연구실 박사후연구원 · E-mail : jisungk@kict.re.kr
*** 정회원 · 한국건설기술연구원 하천해안항만연구실 연구원 · E-mail : wasu3ri@kict.re.kr
**** 정회원 · 한국건설기술연구원 하천해안항만연구실 연구위원 · E-mail : wonkim@kict.re.kr

연구이며, 수위 실측 자료가 많은 한강과 같은 대하천을 사례로 한 논문도 여러 편 나와 있다. 이와 관련한 기존의 연구에 대해서는 김지성 등(2007), 이찬주 등(2010)에 간략히 제시되어 있으므로 본 논문에서는 생략한다.

본 논문은 현장실측에 의한 조도계수 산정과 관련하여 최근에 수행된 일련의 연구를 중간 정리 차원에서 작성된 것이다. 본 논문에서는 조도계수 산정을 위한 현장 실측 방법을 기술하고 전국적으로 다양하면서도 우리나라 하천 특성을 잘 대표할 수 있는 28개 하천(표 1)에 대하여 실시한 조사 결과를 제시하며, 하상재료 및 하천에 따른 특성을 분석하고 그 결과를 제시하고자 한다.

표 1. 실측에 의한 조도계수 산정 대상 하천(2007~2009년)

연도	지점	하천	D_{50}	하천특성	연도	지점	하천	D_{50}	하천특성
2007년	방림	평창강	99.9	호박돌	2008년	덕산	한천	1.6	모래
	서면	홍천강	71.8	호박돌		남평	지석천	37.9	자갈-모래
	괴산	달천	137.7	호박돌		월곡	풍영정천	0.9	모래/도시
	현도1	금강	67.5	호박돌		고산	만경강	82.4	호박돌
	현도2	금강	133.8	호박돌	2009년	장현	섬강	104.9	호박돌
	북정	탄천	22.8	자갈-모래/도시		이포	한강	75.9	호박돌
	평은	내성천	2.2	모래		왕성동	내린천	287.8	거석
	이원	금강	33.2	자갈-모래		법천	법천천	86.7	호박돌
곡성	섬진강	252.8	거석	옥동		옥동천	95.6	호박돌	
2008년	화촌	홍천강	81.2	호박돌		울곡	양화천	4.7	자갈-모래
	성남	탄천	53.7	자갈-모래		점촌	영강	75.5	호박돌
	동촌	금호강	63.8	호박돌		월곡	금강	93.0	호박돌
	향석	내성천	1.2	모래	합강	미호천	2.6	모래	
	정암	남강	0.5	모래	적성	임진강	2.1	자갈-모래	

2. 현장 실측에 의한 조도계수 산정 방법

본 현장 실측을 통해 조도계수를 산정하는 방법은 다음의 과정을 거쳐 이루어진다. 첫 번째 단계에서는 조도계수를 산정할 지점을 도상 조사를 통해 선정하는 작업으로 항공사진이나 위성사진과 지형도를 이용하여 하천의 특성을 파악한다. 이 때 대상 지점의 하상 재료와 식생의 분포, 하도의 특성, 유량 측정 여부 등을 평가하여 대상 지점을 선정한다. 다양한 특성을 가진 하도를 선정하기 위해 본 연구에서는 하상재료를 기준으로 i) 거석하천, ii) 호박돌 하천, iii) 자갈과 모래가 혼합된 하천, iv) 모래하천으로 구분하고, 추가로 인공적인 하천인 v) 도시하천으로 구분하였다. 두 번째 단계에서는 대상 지점을 실제로 답사하며, 도상 조사 결과와 비교하면서 현장 실측 지점으로 적절함을 평가한다. 이때 흐름의 정체나 배수 여부, 인위적인 구조물에 의해 조도계수가 왜곡될 가능성 등을 평가하며, 다양한 하천이 될 수 있도록 지점을 선정한다. 세 번째는 확정된 지점에 대해 수위계를 설치하고, 측량 및 하상재료의 조사, 유량 측정을 수행한다. 네 번째는 이렇게 실측된 자료를 이용하여 조도계수를 계산하고 그 특성을 분석하며, 자료를 정리한다.

위의 네 가지 단계 중에서 세 번째 실측 단계를 보다 자세하게 살펴보면 다음과 같다.

수위계의 설치와 운영 : 조도계수의 산정을 위해서는 반드시 상하류 단면의 수면차를 측정하여야 하므로, 본 연구에서는 자체에 로거를 내장한 수위계를 설치하고 운영하여 수위를 측정한다.

수준/단면 측량 : 수위계를 설치한 후 상하류 및 중간 단면에 대한 단면 측량을 실시한다. 단면 자료는 조도계수 산정 프로그램의 입력자료로 활용된다. 단면 측량은 통상 광과측량기를 활용하여 실시한다. 또한 상하류, 중간 단면의 표고를 일치시키기 위해 수준 측량을 실시한다. 이 때, 수위계의 영점 기준값도 실측한다. 단면 측량과는 달리 수준 측량의 경우 정밀한 측량이 필요하므로 수준의(level)를 이용하여 측량하며, 왕복 측량한다.

하상재료 샘플링/분석 : 하상 마찰에 의한 조도계수 특성을 분석하기 위해 하상재료를 샘플

링하고 분석한다. 대상이 되는 하상재료에 따라 자갈, 호박돌, 거석의 경우 선격자법(Grid sampling method)을 주로 이용하며, 모래나 자갈과 모래가 섞인 경우 증량표본법(Bulk sampling method)을 사용하여 표본을 채취한다. 하상재료의 분석이 완료되면, 도표법(graphical method)으로 대표입경인 d16, d25, d50, d84, d90 등을 계산한다.

유량 측정 : 유량 측정은 직접 수행하거나 유량조사사업단의 자료를 이용하며, 종종 수위-유량관계곡선을 활용하기도 한다.

조도계수의 산정 : 유량과 수위의 실측이 이루어지면, Manning 식을 이용하여 조도계수를 계산한다. 본 연구에서는 미지질조사국에서 개발한 NCALC 모형을 사용하여 조도계수를 계산하였다. 방법에 대한 자세한 설명과 공식은 이찬주 등(2010)에 제시되어 있다.

3. 유량에 따른 조도계수 특성

3.1 자갈하천

전체 28개 대상하천 중에서 자갈하천은 거석 2곳, 호박돌 14곳, 자갈과 모래가 섞인 곳이 6곳 정도이다. 이들 중에서 조도계수의 특성이 보다 뚜렷한 9개 지점의 자료를 분석해 보았다(그림 1). 자갈하천들은 대체로 유량이 증가하면서 조도계수가 감소하는 특성을 나타내고 있다. 하지만, 이 중 곡성, 괴산, 화촌 지점의 경우처럼 유량 증가에 따른 조도계수의 감소가 급격한 특성을 나타내는 지점이 있는가하면, 조도계수가 완만하게 감소하는 특성을 보이는 지점은 나머지 6개 지점이다. 유량 증가에 따라 조도계수가 급격하게 감소하는 지점은 여울과 소가 반복되어 유량이 적은 저수시에 수면경사가 선형적인 특성을 나타내지 않으며, 이에 따라 조도계수는 종종 0.10 이상에 달하기도 하는 등 다소 과도하게 산정되는 특성을 나타낸다. 하지만 다른 6개 지점의 경우 구간 내에서 비교적 일정한 경사를 가지고 있어 이러한 불규칙성이 덜한 편이며, 조도계수의 범위도 0.08 이하로 나타난다. 어쨌든, 그림 1은 유량이 증가함에 따라 자갈하천에서 조도계수가 감소하는 특성을 잘 보여준다. 자갈하천의 조도계수가 나타내는 또 한가지 특성은 고유량에서 대체로 조도

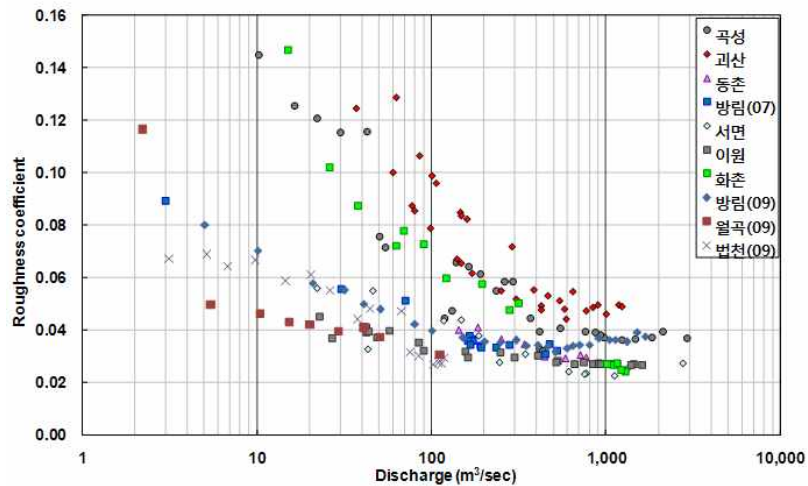


그림 1. 유량에 따른 조도계수의 변화(자갈하천)
 계수가 일정하게 수렴한다는 점이다. 위의 9개 지점에서 대부분 지점별 조도계수는 약 0.027~0.045의 범위에서 수렴하는 특성을 나타내고 있다.

3.2 모래하천

그림 2는 모래하천에서 유량에 따른 조도계수의 변화를 나타내는 그래프이다. 모래하천에서는 자갈하천과 달리 유량이 증가함에 따라 조도계수가 감소하는 뚜렷한 특성이 발견되지 않는다. 그 대신, 유량에 따라 조도계수가 거의 일정하거나, 조도계수가 증가하였다가 감소하거나 또는 감소

하였다가 증가하거나 하는 복합적 특성을 나타낸다. 이러한 특성은 유량 증가에 따라 수반되는 유속의 증가와 그 결과인 하상과의 변동을 반영하는 것으로 분석될 수 있다. 다만, 하상과에 따라 조도계수가 영향을 미치는 결과가 일정하지 않으므로 자갈하천에 비해 유량에 따른 조도계수 변화 특성의 경향성이 불분명하다. 한편, 모래하천의 경우 조도계수값의 범위 자체가 0.04 이하로 전체적으로 자갈하천에 비해 조도계수가 낮게 나타나며, 일부 지점의 경우 조도계수가 0.015 이하도 다소 비정상적인 결과를 나타낸 곳도 있었다.

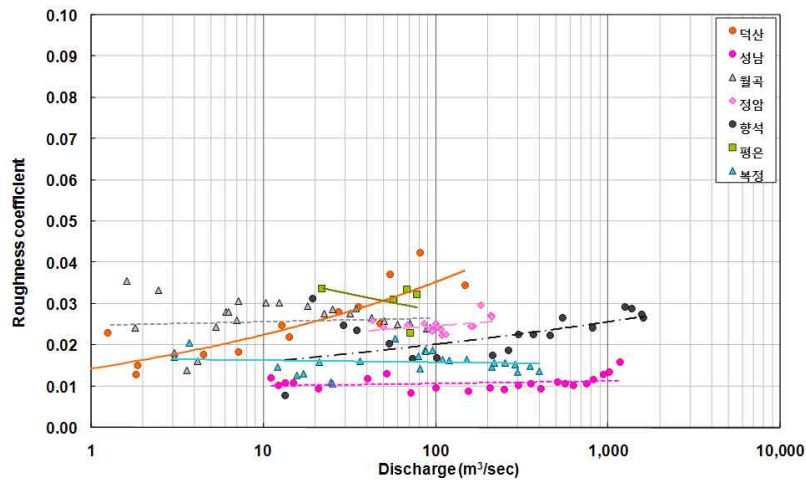


그림 2. 유량에 따른 조도계수의 변화(모래하천)

4. 자갈하천에서 상대수심과 조도계수의 관계

유량에 따른 조도계수의 변화의 경향성이 비교적 뚜렷한 자갈하천에서는 하상재료의 영향이 크다. 그런데, 하상재료가 흐름을 지체시키는 효과는 수심이 깊은 흐름보다는 수심이 얇은 흐름에서 더욱 크다는 점이 조도계수의 산정시 고려되어야 한다. 이로 인해 기존의 연구들은 상대수심에 주목하였다. 본 연구에서도 역시 이 점을 반영하여 자갈하천에서 상대수심에 따른 조도계수 특성을 살펴보았다. 이 때 조도계수를 나타내는 값으로는 일반적인 n 을 사용하지 않고 Darcy-Weisbach 마찰계수와 직접 비교하는 조도인자 $n/R^{1/6}$ 로 변환하여 사용하였다.

그림 3에서 나타나는 전체적인 경향은 상대수심이 증가함에 따라 조도인자가 감소한다는 점

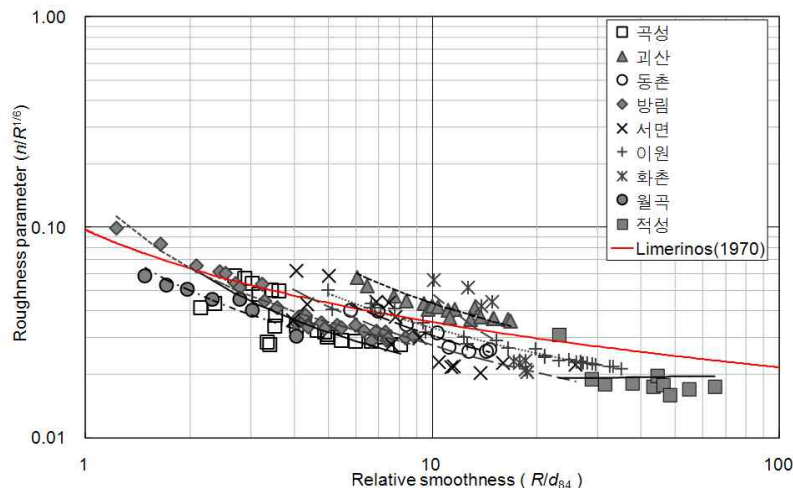


그림 3. 상대수심과 조도인자와의 관계(자갈하천)
 으로 이는 유량에 따라 조도계수가 감소하는 것과 같은 맥락이다. 상대수심 증가에 따라 조도인자

가 감소하는 기울기 역시 지점별로 비슷하다. 그런데, 외국에서 연구된 상대수심과 조도인자와의 관계식 중에 널리 쓰이는 Limerinos(1970) 식과 비교하여 보면, 지점에 따라 기울기의 차이가 있으나 전체적으로 경향성이 유사함을 알 수 있다. 다만, 지점에 따라 Limerinos 식의 위쪽에 분포하거나 아래쪽에 분포하는 차이가 있다.

그림 3에 해당되는 9개 지점의 자료를 이용하여 Limerinos와 같은 형태의 경험식을 도출한 결과는 표 2와 같다. 본 연구에서 실측한 자료를 이용하여 Limerinos 식과 같은 이론적인 형태의 식을 적용했을 때, D_{50} 과 D_{84} 모두에서 Limerinos 식과 매우 유사한 식을 나타낸다는 점을 알 수 있다. 역으로 말하면, Limerinos 식이 국내 하천과도 잘 맞는다는 것을 보여준다.

표 2. 상대수심에 따른 조도계수 산정식

구분	대표입경	식	RMSE	
Limerinos(1970)	D_{50}	$1/\sqrt{f} = 2.03 \log(R/D_{50}) + 0.35$	0.235	
	D_{84}	$1/\sqrt{f} = 2.03 \log(R/D_{84}) + 1.16$	0.229	
본 연구	최소자승법 적합식	D_{50}	$1/\sqrt{f} = 2.24 \log(R/D_{50}) + 0.64$	0.247
		D_{84}	$1/\sqrt{f} = 2.31 \log(R/D_{84}) + 1.34$	0.248
	상수 b 에 이론값 사용 (Limerinos Type)	D_{50}	$1/\sqrt{f} = 2.03 \log(R/D_{50}) + 0.53$	0.225
		D_{84}	$1/\sqrt{f} = 2.03 \log(R/D_{84}) + 1.23$	0.228

5. 결론

본 연구에서는 국내 28개 하천에서 현장실측에 의해 조도계수를 산정하고 그 결과를 간략하게 제시하였다. 조도계수 산정의 방법을 간략하게 제시하고 자갈하천과 모래하천에서 유량에 따른 조도계수 변화를 살펴보았다. 또한 자갈하천에서 상대수심에 따른 조도계수 특성과 실측 자료를 이용한 경험식을 제시하였다. 본 연구의 결과는 자갈하천에서는 유량과 상대수심 증가에 따라 조도계수가 감소하지만, 모래하천에서는 다소 상반된 결과가 있을 수 있다는 것을 보여준다. 한편, Limerinos 형태의 경험식을 수립한 결과 국내 하천의 자료를 이용할 경우에도 Limerinos 식과 매우 유사한 결과를 보임으로써 역으로 그 적용성을 보여주었다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 및 한국건설교통기술평가원 건설핵심기술연구개발사업의 연구비지원(06건설핵심B01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 김지성, 이찬주, 김원 (2007). “실측 수위에 의한 자갈하천의 조도계수 산정.” **한국수자원학회논문집**, 제40권, 제10호, pp. 755-768.
- 유권규, 김형섭, 김활근, 우효섭 (1993). “충적하천의 하상마찰 변화에 대한 조사·분석.” **대한토목학회논문집**, 제13권, 제4호, pp. 111-121
- 이찬주, 김용전, 김지성, 김원 (2010). “자갈하천의 조도계수 특성 분석.” **대한토목학회논문집**, 제30권, 제2B호, pp. 149-157
- Limerinos, J.T. (1970). *Determination of the Manning coefficient from measured bed roughness in natural channels*. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1898-B.