

기존 복합 조도계수 산정식의 적용성

Applicability of Existing Formulae for Composite Roughness

김지성*, 이찬주**, 김극수***, 김원****
Ji Sung Kim, Chan Joo Lee, Keuk Soo Kim, Won Kim

요 지

일반적으로 자연하천에서는 횡방향 흐름저항 요소가 매우 다를 수 있다. 이러한 하천은 흐름저항 요인에 따라 몇 개의 소단면으로 구분될 수 있으며, 1차원 해석을 위해서는 단면 전체를 대표하는 복합 조도계수(composite roughness coefficient)를 사용함으로써 수위 또는 평균유속의 계산이 가능해진다. 복합 조도계수는 각 소단면의 면적(A), 윤변(P), 또는 동수반경(R)을 적절히 조합하여 각 소단면의 조도계수에 가중치를 부여하면서 계산되는데, 각 산정식들의 개발과정에 도입된 가정 조건에 따라 상이한 가중치를 부여하게 되며, 일부 산정식들에서는 횡방향으로 동일한 재료로 구성된 조건에서도 복합 조도계수 산정 결과는 하상재료에 의한 조도계수와 다른 값을 산정하게 된다. 본 연구에서는 13개의 기존 복합 조도계수 산정식을 이론적으로 검토하였고, 소규모 실내 수리실험자료로부터 실측 복합 조도계수와 계산된 값을 비교·분석하였으며, 소단면 분할방법에 의한 기존 산정식의 적용성을 분석하였다. 분석결과, 윤변을 가중치로 사용하는 경우는 실측 복합 조도계수 그리고 각 산정식에 의한 계산 복합 조도계수의 차이가 비교적 작게 나타났으나 각 산정식의 가정조건에 유의하여야 하는 것으로 나타났다. 한편 단면적 또는 윤변과 동수반경을 조합하여 가중치로 사용하는 경우는 방법별로 큰 차이를 보이는 것으로 분석되었고, 그 원인은 단면분할 방법에 기인하므로 이러한 방법을 적용할 경우에는 소단면 분할방법에 특히 주의하여야 함을 알 수 있다.

핵심용어 : 복합 조도계수, 흐름저항, 소단면 분할

1. 서 론

자연하천에서 홍수터와 주수로의 흐름저항 요소는 매우 다를 수 있다. 주수로의 흐름저항 요인은 모래, 자갈, 거석 등 하상재료로 구성되는 반면, 홍수기에 침수되는 홍수터는 수풀, 수목 등의 식생, 경작지, 도로 등 하상재료 외 추가적인 저항요인들로 구성되어 흐름저항계수는 크게 차이가 나게 된다. 따라서 이러한 하천은 흐름저항 요인에 따라 몇 개의 소단면으로 구분될 수 있으며, 1차원 해석을 위해서는 단면 전체를 대표하는 복합 조도계수(composite roughness coefficient)를 사용함으로써 수위 또는 평균유속의 계산이 가능해진다. 복합 조도계수는 각 소단면의 면적(A), 윤변(P), 또는 동수반경(R)을 적절히 조합하여 각 소단면의 조도계수에 가중치를 부여하면서 계산된다. 복합 조도계수를 산정하는 공식들 가운데 Chow(1959)는 Horton(1933), Pavlovskii(1931), Lotter(1933) 식을 소개하였고, 최근 Yen(1992, 2002)은 기존에 널리 사용되고 있는 공식들과 복합 조도계수의 산정을 위하여 자신이 제안한 다양한 접근방법을 제시하였다. 이러한 공식들은 사용된 가정 조건에 따라 상이한 가중치를 부여하게 되며, 일부 공식들에서는 측벽과 하상이 동일한 재료로 구성된 조건에서도 복합 조도계수 산정 결과는 하상재료에 의한 조도계수와 다른 값을 산정하게 된다. 이는 각 소단면을 구분함에 있어 수직 경계면에 의한 분할방법을 사용하기 때문으로 판단된다. Yen(2002)은 복

* 정회원 · 한국건설기술연구원 하천 · 해안항만연구실 연구원 · E-mail : jisungk@kict.re.kr

** 정회원 · 한국건설기술연구원 하천 · 해안항만연구실 연구원 · E-mail : c0gnitum@kict.re.kr

*** 정회원 · 한국건설기술연구원 하천 · 해안항만연구실 연구원 · E-mail : keuksookim@kict.re.kr

**** 정회원 · 한국건설기술연구원 하천 · 해안항만연구실 책임연구원 · E-mail : wonkim@kict.re.kr

단면에서 소단면을 나누는 몇 가지 방법을 제안하였으나 각 공식에 적합한 단면분할 방법을 제시하지는 못했고, 다만 수직분할 방법이 일반적으로 사용되는 방법이라고 하였다. 본 연구에서는 일반적으로 사용되고 있는 단면분할방법 가운데 수직분할에 의한 기존 복합 조도계수 산정식의 가용성을 평가하였다. 이를 위하여 소규모 수리실험 조건에 적용하고, 적용결과를 기존 복합조도 식들에 의한 계산결과 그리고 실측자료에 의한 결과와 비교함으로써 적용성 및 정확성을 검토하였다.

2. 기존 복합 조도계수 산정식 검토

복합 조도계수 산정식들은 각 소단면의 조도계수에 가중치를 부여하는 방법으로 구분할 수 있다. 가중치 계산에 사용되는 매개변수는 각 소단면의 면적(A_i), 윤변(P_i), 그리고 동수반경(R_i)이며, 일반적으로 각 소단면의 에너지 경사와 단면 전체의 에너지 경사는 같다고 가정한다. 각 복합 조도계수 산정식들은 다음과 같이 식의 개발에 사용된 4가지의 기본 개념과 추가적인 가정으로부터 생성되었으며, 가정조건으로부터 사용되는 매개변수가 변화된다.

- 가정 A : 각 소단면의 평균유속이 단면평균 유속과 동일함 ($V_i/V=1$)
- 가정 B : 전체 저항력이 각 소단면 저항력의 합과 같음 ($\tau P = \sum \tau_i P_i$)
- 가정 C : 각 소단면 유량의 합이 전체 단면의 유량과 같음 ($Q = \sum Q_i$)
- 가정 D : 각 소단면 마찰속도의 가중합이 전체 단면의 마찰속도와 같음 ($P\sqrt{gRS} = \sum P_i \sqrt{gR_i S_i}$)

2.1 윤변을 가중치로 사용하는 방법

Horton(1933)은 가정 A로부터 식 (1)을 제시하였고, Pavlovskii(1931)는 가정 B와 소단면 유속과 단면평균 유속의 관계를 $V_i/V=(R_i/R)^{1/6}$ 으로 가정함으로써 식 (2)를 제시하였다. 한편 가정 C와 각 소단면의 동수반경과 전체 단면의 동수반경의 관계를 $R_i/R=1$ 로 가정하면 식 (3)과 같은 Felkel(1960)식이 성립된다. Yen(1992)은 가정 D와 $V_i/V=(R_i/R)^{1/6}$ 의 가정을 도입함으로써 식 (4)와 같은 식을 제시하였다. 윤변을 가중치로 사용하는 방법들은 단면 분할방법과는 무관하게 복합 조도계수를 계산하며, 동일한 재료로 구성된 수로에서 계산된 복합 조도계수 값이 하상재료의 조도계수와 같아야 하는 기본적인 조건을 만족하지만, 각 식의 개발과정에 사용된 추가적인 가정조건에 유의하여야 한다.

2.2 단면적을 가중치로 사용하는 방법

Colebatch(1941)는 Horton(1933)과 같은 가정조건으로 식 (5)를 제시하였으나 유도과정에 오류를 포함하고 있으며(Yen, 2002), Cox(1973)는 가정 D와 $V_i/V=(R_i/R)^{7/6}$ 을 가정함으로써 식 (6)을 제시하였다. Cox(1973)는 Horton(1933), Colebatch(1941) 식과 자신의 식을 직사각형, 사다리꼴 수로 실험결과와 비교하였고, 벽면과 바닥의 저항조건이 다른 직사각형 수로의 경우 단면분할방법으로 이분법을 사용하였다. Yen(2002)은 가정 B와 $V_i/V=(R_i/R)^{2/3}$ 를 가정함으로써 식 (7)을 제시하였다. 단면적을 가중치로 사용하는 방법들은 단면분할방법에 따라 상이한 복합 조도계수 값을 나타낼 수 있으나, 동일한 재료로 구성된 수로에서는 언제나 하상재료의 조도계수와 같은 값을 나타내는 기본적인 조건을 만족한다. 그러나 저항력이 경계면에서 작용함을 고려해 볼 때, 윤변을 매개변수로 고려하지 않는 것은 물리적으로 타당하지 않다(Yen, 2002).

2.3 윤변과 동수반경의 조합을 가중치로 사용하는 방법

Lotter(1933)는 가정 C만 고려함으로써 식 (8)을 제시하였다. 이 방법은 흐름 조건에 가장 적은 가정을 도입함으로써 가장 대표적인 복합 조도계수 산정식으로 평가된다. Lotter 방법 이외에 Yen(1992, 2002)은 가정 B와 가정 D, 그리고 소단면의 유속과 단면평균 유속의 여러 가지 관계를 가정함으로써 다수의 식을 제시하였다. 제시된 식들은 가정 D와 추가적인 가정 $V_i/V=1$ 로부터 식 (9), $V_i/V=(R_i/R)^{1/2}$ 로부터 식 (10), $V_i/V=(R_i/R)^{2/3}$ 로부터 식 (11)이고, 가정 B와 $V_i/V=1$ 로부터 식 (12), $V_i/V=(R_i/R)^{1/2}$ 로부터 식 (13)이다.

윤변과 동수반경의 조합을 가중치로 사용하는 방법은 Manning 식의 흐름변수를 모두 매개변수로 사용함으로써 물리적으로 타당하게 보인다. 그러나 각 소단면의 윤변 길이뿐만 아니라 단면 분할방법에 따라 상이한 복합 조도계수 값을 나타내며, 특히 수직분할방법과 함께 사용할 경우, 동일한 재료로 구성된 수로에서도 하상재료의 조도계수와 다른 값을 나타낼 수 있으므로, 적합한 단면분할방법의 사용에 유의하여야 한다.

표 1. 기존 복합 조도계수 산정식

Investigator	Formula		Investigator	Formula	
Horton	$n_c = \left[\frac{\sum(P_i n_i^{3/2})}{P} \right]^{2/3}$	(1)	Lotter	$n_c = \frac{PR^{5/3}}{\sum(P_i R_i^{5/3}/n_i)}$	(8)
Pavlovskii	$n_c = \left[\frac{\sum(P_i n_i^2)}{P} \right]^{1/2}$	(2)	Yen	$n_c = \frac{\sum(n_i P_i / R_i^{1/6})}{P/R^{1/6}}$	(9)
Felkel	$n_c = \frac{P}{\sum(P_i/n_i)}$	(3)	Yen	$n_c = \frac{\sum(n_i P_i R_i^{1/3})}{PR^{1/3}}$	(10)
Yen	$n_c = \frac{\sum(P_i n_i)}{P}$	(4)	Yen	$n_c = \frac{\sum(n_i P_i R_i^{1/2})}{PR^{1/2}}$	(11)
Colebatch	$n_c = \left[\frac{\sum(A_i n_i^{3/2})}{A} \right]^{2/3}$	(5)	Yen	$n_c = \left[\frac{\sum(n_i^2 P_i / R_i^{1/3})}{P/R^{1/3}} \right]^{1/2}$	(12)
Cox	$n_c = \frac{\sum(A_i n_i)}{A}$	(6)	Yen	$n_c = \left[\frac{\sum(n_i^2 P_i R_i^{2/3})}{PR^{2/3}} \right]^{1/2}$	(13)
Yen	$n_c = \left[\frac{\sum(A_i n_i^2)}{A} \right]^{1/2}$	(7)			

3. 소규모 실내 수리실험조건에 적용 및 비교

Djajadi(2009)는 바닥폭이 0.05m 이고 45° 경사의 소규모 사다리꼴 단면에서 좌우 사면에 바닥과 상이한 조도의 재료를 부착함으로써 복합조도 단면을 구성하였고, 기존 복합조도계수 산정식의 계산결과와 실험결과를 비교함으로써 각 식의 적용성을 평가하였다. 실험에 사용된 재료는 시멘트 플라스터(plaster), 잔자갈(2~3 mm), 중간자갈(7~10mm), 자갈(12~17mm)이며, 사용된 재료의 Manning 계수를 산정하기 위하여 동일한 재료로 구성된 수로에서 유량과 수심을 측정하였다. 그는 4가지 경우의 복합조도 단면을 구성하였고, 각 경우의 실험결과는 표 2와 같다. 자세한 실험조건은 Djajadi(2009)를 참고할 수 있다.

표 2. Djajadi 수리실험 조건

No.	조도계수		수심 (m)	측정된 Manning 복합 조도계수	재료 Manning 조도계수
	하상	측벽			
1	P	SA	0.0275	0.0166	P : 0.013
2	P	MA	0.0240	0.0184	SA : 0.019
3	P	LA	0.0224	0.0205	MA : 0.021
4	SA	LA	0.0274	0.0224	LA : 0.028

Note) P : plaster, SA : small-size aggregate, MA : medium-sized aggregate, LA : large-sized aggregate

그림 1에는 표 1의 13가지 기존 복합조도계수 산정식에 의한 계산결과를 실측 복합조도계수와 비교하였다. 각 식들의 비교를 위하여 2장에서 구분한 가중치 부여방법에 따라 분리하였고, 단면분할은 수직분할방법을 사용하였다.

그림 1의 예측율(Predicted ratio)은 계산결과와 실측결과의 비를 의미한다. 그림 1(a)에 나타난 윤변을 가중치로 사용하는 4가지 경우의 예측율은 0.96에서 1.05의 값을 나타내며, 4가지 방법의 평균예측율은 1.02로서 각 방법에 따른 산정결과의 차이가 비교적 작게 나타났다. 이는 윤변을 가중치로 사용하는 경우,

Djajadi(2009)의 실험과 같은 소규모 수로에서 산정결과와 차이가 크지 않음을 보이는 것이다. 한편 Felkel의 방법(식 3)에 의한 값은 나머지 3가지 경우와 다르게 전반적으로 낮은 값을 예측하고 있으며, 이는 식의 유도 과정에 $R_i/R=1$ 이라는 비현실적인 가정조건에 기인하는 것으로 판단된다. Felkel의 방법을 제외한 나머지 경우에는 좌우 사면의 저항이 증가함에 따라 예측결과가 과대산정되는 공통적인 특징이 발견되었다. 이는 사면 자갈(LA)에 의하여 큰 저항영향을 받는 소단면에서 유속이 감소하는 특성을 반영하지 못하고, 단순히 윤변의 길이로 가중치를 계산하기 때문으로 판단된다.

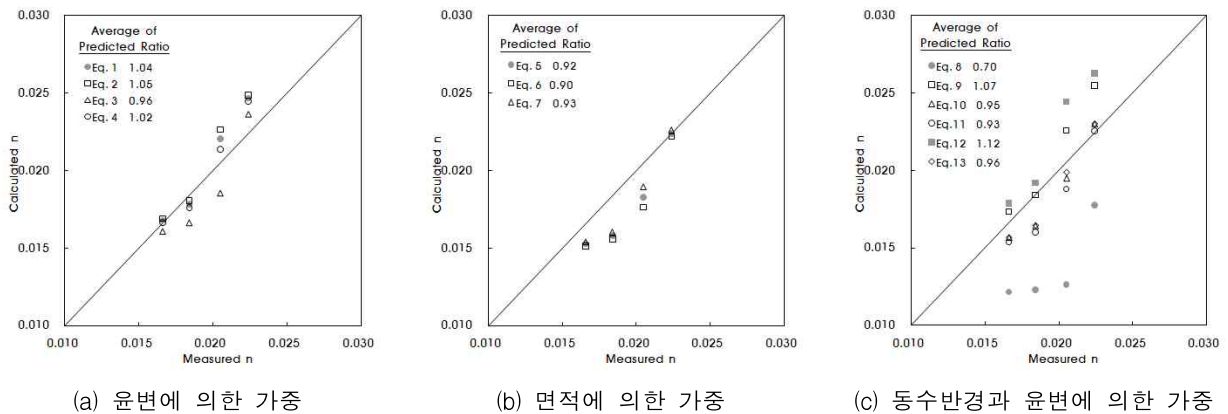


그림 1. 측정된 Manning 복합 조도계수와 계산값 비교

그림 1(b)의 단면적을 가중치로 사용하는 3가지 산정식은 전반적으로 복합 조도계수를 과소산정하였다. 이는 수직단면분할방법으로 인하여 상대적으로 저항이 작은 바닥부 저항을 크게 가중하기 때문이며, Cox(1973)가 제안한 이분법에 의한 단면분할을 사용하면 바닥부 저항의 가중치를 줄여줄 수 있을 것이다. 실제 복합조도계수와 단면분할 방법에 따른 3가지 산정식의 계산결과 차이는 표 3과 같다. 이분법을 사용할 경우, 바닥 및 사면저항의 가중치가 조정됨으로써 SA-LA가 조합된 No. 4를 제외한 모든 경우에서 수직분할방법보다 실측결과에 근접하는 것을 확인할 수 있다. 한편 No. 4의 경우 이분법을 사용하면 복합 조도계수를 과대산정하게 되는데, 사면저항은 동일하고 바닥저항이 상이한 No. 3과 No. 4를 단면분할 방법별로 비교함으로써 바닥저항이 증가할수록 바닥저항의 영향을 받는 소단면이 증가하여 복합 조도계수 산정에 크게 가중되어야 함을 알 수 있다.

표 3. 단면분할방법에 의한 복합 조도계수 산정결과와의 차이

No.	수직분할			이분법		
	Colebatch	Cox	Yen	Colebatch	Cox	Yen
1	0.0013	0.0015	0.0012	0.0005	0.0006	0.0003
2	0.0026	0.0028	0.0024	0.0015	0.0017	0.0013
3	0.0022	0.0029	0.0016	0.0002	0.0009	-0.0004
4	0.0000	0.0002	-0.0002	-0.0013	-0.0011	-0.0015

그림 1(c)의 윤변과 동수반경을 가중치로 사용하는 경우는 방법별로 실측결과와 큰 차이를 보이고 있다. 특히 흐름 조건에 가장 작은 가정을 도입한 Lotter 방법의 경우, 가장 큰 오차를 나타내는 것으로 나타났다. 뿐만 아니라 윤변과 동수반경을 가중치로 사용하는 6가지 방법은 전반적으로 윤변을 가중치로 사용하는 방법, 단면적으로 가중치로 사용하는 방법보다 예측율이 높지 않은 것으로 나타났다. 이는 윤변과 동수반경을 가중치로 사용하는 경우, 단면분할방법이 산정결과에 큰 영향을 미치며, 적절한 분할방법이 필요함을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 공간적으로 저항요인이 상이한 단면에서 기존의 복합 조도계수 산정방법의 적용성에 대하여 검토하였다. 이를 위하여 Djajadi(2009)의 복합조도 실험결과를 사용하였고, 가중치 부여방법에 따라 구분된 기존 복합 조도계수 산정식의 한계를 분석하였다. 분석결과 각 산정식의 개발과정에 사용된 기본 가정조건이 상이하하며, 산정결과 또한 차이를 보임을 확인하였다. 또한 단면적에 의한 가중 그리고 윤변과 동수반경의 조합을 가중치로 사용하는 경우에는 흐름조건을 고려하지 않고 고정되는 수직분할방법 또는 이분법 외에 각 소단면 저항조건에 따라 변화되는 단면분할방법이 필요함을 확인하였다.

감사의글

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

참고문헌

1. Chow, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*, McGraw-Hill, New York.
2. Colebatch, G. T. (1941). "Model Tests on the Lawrence Canal Roughness Coefficients." *J. Inst. Civil Eng. (Australia)*, 13(2), pp. 27-32.
3. Cox, R. G. (1973). "Effective Hydraulic Roughness for Channels having Bed Roughness different from Bank Roughness." *Misc. Paper H-73-2*, U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.
4. Djajadi, R. (2009). "Comparative Study of Equivalent Manning Roughness Coefficient for Channel with Composite Roughness." *Civil Engineering Dimension*, Vol. 11, No. 2, pp.113-118.
5. Felkel, K. (1960). "Gemessene Abflüsse in Gerinnen mit Weidenbewuchs." *Mitteilungen der BAW*, Heft 15, Karlsruhe, Germany.
6. Horton, R. E. (1933). "Separate Roughness Coefficients for Channel Bottoms and Sides." *Eng. News-Rec.*, 111(22), pp. 652-653.
7. Lotter, G. K. (1933). "Soobrazheniia k Gidravlicheskomu Raschetu Rusel s Razlichnoi Sherokhovatostiiu Stenok." (Considerations on hydraulic design of channels with different roughness of walls.), *Izvestiia Vsesoiuznogo Nauchno-Issledovatel'skogo Instituta Gidrotekhniki* (Trans. All-Union Sci. Res. Inst. Hydraulic Eng.), Leningrad, Vol. 9, pp. 238-241.
8. Pavlovskii, N. N. (1931). "K Voprosu o Raschetnoi dlia Ravnornernogo Dvizheniia v Vodotokahk s Neodnorodnymi Stenkami." (On a design formula for uniform flow in channels with nonhomogeneous walls.) *Izvestiia Vsesoiuznogo Nauchno-Issledovatel'skogo Instituta Gidrotekhniki* (Trans. All-Union Sci. Res. Inst. Hydraulic Eng.), Leningrad, Vol. 3, pp. 157-164.
9. Yen, B. C. (1992). *Channel Flow Resistance: Centennial of Manning's Formula*, Water Resources Publications, Littleton, Colorado.
10. Yen, B. C. (2002). "Open Channel Flow Resistance." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 128, No. 1, pp. 20-39.