

## 복합 조도계수 산정을 위한 단면 분할기법 개발

### Development of Subsection Division Method to Estimate a Composite Roughness Coefficient

김 지 성\* / 김 극 수\*\* / 김 원\*\*\*

Kim, Ji Sung / Kim, Keuk Soo / Kim, Won

#### Abstract

Practically, the composite roughness coefficient, which is the equivalent roughness coefficient of a cross-section where the wall roughness is not constant along the wetted perimeter, is used to describe the flow conditions in open channels. In this study, it was conducted that the previous formulae was classified according to a weighting factor of the local resistance. The new subsection division method was also developed based on the force-balance concept in each subsection. The accuracy of the proposed method was examined and the applicability and limitation of the 13 existing formulae were analyzed by comparing the calculated with the experimental measured data from Djajadi (2009) and Knight and Macdonald (1979). It was found that Horton's method might underestimate the total conveyance of a composite channel and Lotter's method showed a good agreement between calculated and measured data. However, the proper division method, such as the proposed method based on the Z-method, is required for the application of Lotter's method.

**Keywords** : composite roughness coefficient, subsection division, divided-channel method, Z-method

#### 요 지

실무적 목적으로 횡방향으로 흐름저항 요소가 변화하는 단면에서는 단면전체의 저항을 반영할 수 있는 복합 조도계수를 산정함으로써 개수로 흐름해석에 사용하고 있다. 본 연구에서는 기존 복합 조도계수 산정식을 가중치 부여방법에 따라 구분하고, 최적의 복합 조도계수 값을 산정하기 위하여 각 소단면 내에서 힘의 균형을 고려한 단면분할기법을 개발하였다. Djajadi (2009)와 Knight and Macdonald (1979)의 수리실험에 의한 실측 복합 조도계수와 비교함으로써 개발된 단면분할기법의 정확성과 타당성을 검증하였으며, 더불어 기존 13개 복합 조도계수 산정식들의 한계 및 적용성을 분석하였다. 분석결과, 대표적인 복합 조도계수 산정식인 Horton 방법은 단면의 통수능을 과소평가할 수 있으며, Lotter 방법은 실측치와 잘 일치하는 결과를 제공할 수 있으나, 선행조건으로 본 연구에서 제안된 Z-method에 근거한 방법처럼 적합한 단면분할방법이 사용되어야 함을 알 수 있었다.

**핵심용어** : 복합 조도계수, 소단면 분할, 단면분할방법, Z-method

\* 교신저자, 한국건설기술연구원 하천해안항만연구실 박사후연구원 (e-mail: jisungk@kict.re.kr)

Corresponding Author, Post-Doc., River & Coast Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang-si, Gyeonggi-do, Korea

\*\* 한국건설기술연구원 하천해안항만연구실 박사후연구원

Post-Doc., River & Coast Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang-si, Gyeonggi-do, Korea

\*\*\* 한국건설기술연구원 하천해안항만연구실 연구위원

Research Fellow, River & Coast Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang-si, Gyeonggi-do, Korea

## 1. 서 론

자연하천에서 홍수터와 저수로의 흐름저항 요소는 매우 다를 수 있다. 저수로의 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. 한편 저수로와 홍수터로 구분된 소단면은 서로 다른 형상을 나타내게 된다. 저수로와 홍수터 경계에서 발생하는 갑작스러운 단면형상의 변화로 인하여 강한 3차원 흐름특성이 나타나게 되고, 경계면에서 발생하는 와류로 인하여 저수로와 홍수터 사이에 운동량 교환이 발생하며, 운동량 교환으로 인한 저항은 수체 내부에 경계 전단응력으로 표현될 수 있다. 이러한 저항은 저수로와 홍수터의 형상이 명확히 구분되는 복단면 하도에서 중요한 흐름저항 요소가 되며, 이를 포함한 전체 저항은 합성 조도계수 (compound roughness coefficient)로 정의된다. Yen (1992, 2002)은 복합 조도계수와 합성 조도계수가 유사하게 처리될 수 있다고 평가하였고, 결과적으로 복합 조도계수 공식들을 복단면의 합성 조도계수 산정에도 적용하는 것이 실무적으로 일반적인 방법이다. 그러나 본 연구에서는 우선 기존 복합 조도계수 산정식들의 적용성을 검토하기 위하여 단면형상의 횡적 변화가 작고 흐름저항 요인이 횡적으로 변화하는 단면의 복합 조도계수 산정에 집중하여 분석하고자 한다.

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 복단면에서 소단면을 나누는 몇 가지 방법을 제안하였으나 각 공식에 적합한 단면분할 방법을 제시하지는 못했고, 다만 수직분할 방법이 일반적으로 사용되

는 방법이라고 하였다.

실험실 수로를 벗어나 자연하천에서 복합 조도계수 산정식들의 적용성을 평가하기 위하여 Motayed and Krishnamurthy (1980)는 미 지질조사국에서 수행된 36개의 자연 하천자료를 사용하였으며, Chow가 소개한 식들과 Krishnamurthy and Christensen (1972) 식을 검토한 결과, Lotter의 방법에 의한 계산 결과가 실측된 자료로부터 계산된 복합 조도계수와 가장 작은 오차를 나타낸다고 하였다. 한편 Djajadi (2009)는 소규모의 사다리꼴 단면 수로에서 하상과 측벽의 재료가 다른 4가지 조건의 실험을 수행하였고, 그 결과 하폭이 제한된 소규모 수로에서 복합 조도계수 산정을 위해서는 윤변이 가장 중요한 가중치가 되며, Lotter 방법은 상당히 낮은 정확도로 복합 조도계수를 계산함을 보였다.

하천 조도계수와 관련된 국내의 연구들은 주로 1차원 부정류 수치모형에 의한 매개변수 보정 및 최적화에 집중하였다 (김원 등, 1995; 황의준과 전경수, 1997). 최근에 들어 김지성 등 (2007, 2009)은 실측 수위와 유량자료를 이용한 조도계수 산정 연구 및 하상재료 조사를 통한 하상 저항 조도계수 추정 연구를 수행하였으나, 단면에서 횡적으로 변화하는 흐름저항 특성에 대한 복합 조도계수 산정을 위한 연구는 거의 수행되지 못했다.

본 논문은 두 가지 주요한 목적으로 가진다. 첫 번째로, 일반적으로 사용되고 있는 수직분할에 의한 분할단면방법 (Divided Channel Method, DCM)을 이용한 유량산정과 기존 복합 조도계수 산정식의 가용성을 평가하는 것이다. 이를 위하여 물리적으로 단순한 가정을 도입하여 DCM의 한계 분할단면 개수를 분석하였고, 각 복합조도 산정식을 비교하였으며, 적용 한계를 분석하였다. 두 번째로, 상이한 흐름요인에 의한 소단면을 구분함에 있어 Yen and Ho (1983)가 제안한 Z-method 개념을 이용한 새로운 단면분할기법을 개발하였고, 개발된 방법을 Knight and Macdonald (1979)와 Djajadi (2009)의 실험조건에 적용하고, 적용결과를 기존 복합조도 식들에 의한 계산결과 및 실측자료에 의한 결과와 비교함으로써 적용성 및 정확성을 검증하는 것이다.

## 2. 수직분할에 의한 분할단면방법 검토

동질의 하상재료로 구성된 직사각형 균일단면에서 DCM의 적용은 하나의 전체 단면을 이용하는 단일단면방법 (Single Channel Method, SCM)과 같은 유량 값을 산정할 수 있어야 한다. 이는 또한 동질-균일 수로에서 기존 산정식에 의한 복합조도계수가 하상재료에 의한 조도계수와 같아야 함을 의미한다. 수심 ( $h$ )에 비하여 수면폭

( $B$ )이 긴 하도에서 동수반경 ( $R$ )은 수리수심 ( $D=A/B$ )으로 대신 평가된다. 이는 대부분의 자연하천에서 윤변이 수면폭과 거의 같기 때문이다. Fread and Lewis (1998)는 수면폭이 수심의 10배보다 작을 경우 이러한 가정이 적합하지 않으며, 수면폭이 아닌 실제 윤변이 동수반경의 계산에 사용되어야 한다고 하였다.

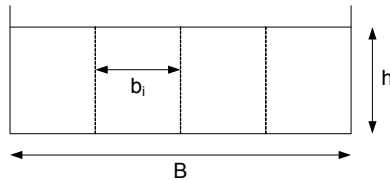


Fig. 1. Vertical Subsection Division

Fig. 1에서 등간격의  $N$ 개로 분할된 소단면과 전체단면에서의 에너지경사 ( $S$ )는 같다고 가정하면, SCM과 DCM으로 산정된 유량의 차는 Eq. (1)과 같다. 여기서 전체단면의 조도계수  $n$ 과 각 소단면의 조도계수  $n_i$ 는 동일하다.

$$\begin{aligned} (Q_{DCM} - Q_{SCM}) \frac{n}{S^{1/2}} &= \sum_{i=1}^N A_i R_i^{2/3} - A R^{2/3} \\ &= 2 \frac{(hb_i)^{5/3}}{(h+b_i)^{2/3}} + (N-2) \frac{(hb_i)^{5/3}}{b_i^{2/3}} - \frac{(Nh b_i)^{5/3}}{(2h+Nb_i)^{2/3}} \end{aligned} \quad (1)$$

Eq. (1)의 양변에 전체 단면의 윤변 ( $P$ )의  $2/3$ 승을 곱하고, 소단면 면적 ( $A_i$ )의  $5/3$ 승을 나누면 Eq. (2)와 같이 유량차  $\Delta Q$ 는  $h/B$ 와  $N$ 의 함수가 된다.

$$\begin{aligned} \Delta Q \frac{n}{S^{1/2}} \frac{P^{2/3}}{A_i^{5/3}} &= \\ \left\{ \frac{2}{(h/B+N^{-1})^{2/3}} + N^{2/3}(N-2) \right\} (2h/B+1)^{2/3} - N^{5/3} \end{aligned} \quad (2)$$

Eq. (1)로부터 2개의 분할단면 ( $N=2$ )이 사용될 경우 DCM과 SCM에 의해 산정된 유량이 같아짐을 알 수 있다. 그리고 Eq. (2)로부터 수심에 비해 하폭이 매우 넓어서  $h/B$ 가 0에 가까워지는 이상적인 조건에서는 분할단면의 개수와 상관없이 DCM과 SCM에 의한 계산유량의 차이는 0이 된다. 이는 전체 단면과 각 소단면의 윤변 계산에 있어 좌우 측벽은 고려하지 않고 각 수면폭으로 대신할 수 있음을 의미하고, 벽면 효과가 없는 중앙 수로부에서는 분할단면 개수와 무관하게 DCM과 SCM에 의한 계산유량이 같음을 의미한다. 그러나 실제 직사각형 수로에서 2개 이상의 분할 단면이 사용될 경우, DCM은 SCM보다 무조건 큰 값의 유량을 산정하게 하며, 따라서  $h/B$  조건에 따라 적합한 분할단면 개수의 평가가 필요하다.

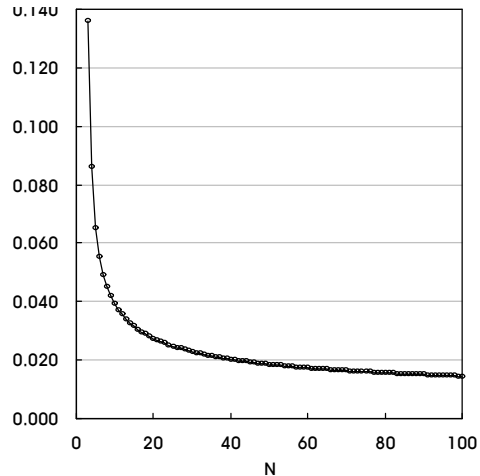


Fig. 2. Relationship of Subsection Division Number and  $h/B$

Eq. (2)의 양변에 SCM로 계산된 유량을 나누면, DCM로 계산할 경우 발생하는 유량 오차와 SCM으로 계산된 유량의 비를 알 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta Q}{Q_{SCM}} &= \\ \left\{ \frac{2}{N(Nh/B+1)^{2/3}} + 1 - \frac{2}{N} \right\} (2h/B+1)^{2/3} - 1 \end{aligned} \quad (3)$$

Eq. (3)에 Fread and Lewis (1998)에 제시된 광폭하천의 기준인  $h/B=0.1$ 을 적용하고, 유량차가 발생할 수 있는 최소 소단면 개수 ( $N=3$ )를 적용하면, 유량의 계산에 약 1%의 오차를 포함하고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 1%의 유량오차를 허용할 경우, 분할단면 개수  $N$ 과  $h/B$ 의 관계를 분석하였고, 그 결과는 Fig. 2와 같다.

Fig. 2로부터 벽면을 포함한 소단면의 허용할 수 있는 최소폭을 알 수 있는데, 예를 들어  $h/B$ 가 0.05일 경우는 하폭을 6등분한 소단면 폭이 가능하고,  $h/B$ 가 0.02일 경우는 하폭을 40등분한 소단면 폭이 가능함을 알 수 있다. 더불어  $h/B$ 가 0.136보다 큰 좁고 깊은 수로인 경우는 수직분할에 의한 DCM이 1%보다 큰 유량오차를 유발하게 되므로, 수직분할에 의한 DCM을 적용할 수 있는 한계가 될 수 있다.

### 3. 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. Table 1에 정리한 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 ( $P\sqrt{gRS} = \sum P_i \sqrt{gR_i S_i}$ )

### 3.1 윤편을 가중치로 사용하는 방법

Horton (1933)은 가정 A로부터 Eq. (4)를 제시하였고, Pavlovskii (1931)는 가정 B와 소단면 유속과 단면평균 유속의 관계를  $V_i/V=(R_i/R)^{1/6}$ 으로 가정함으로써 Eq. (5)를 제시하였다. 한편 가정 C와 각 소단면의 동수반경과 전체 단면의 동수반경의 관계를  $R_i/R=1$ 로 가정하면 Eq. (6)과 같은 Felkel (1960)식이 성립된다. Yen (1992)은 가정 D와  $V_i/V=(R_i/R)^{1/6}$ 의 가정을 도입함으로써 Eq. (7)과 같은 식을 제시하였다. 윤편을 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.

### 3.2 단면적을 가중치로 사용하는 방법

Colebatch (1941)는 Horton (1933)과 같은 가정조건으로 Eq. (8)을 제시하였으나 유도과정에 오류를 포함하고 있으며 (Yen, 2002), Cox (1973)는 가정 D와  $V_i/V=(R_i/R)^{7/6}$ 을 가정함으로써 Eq. (9)를 제시하였다. Cox (1973)는 Horton (1933), Colebatch (1941) 식과 자신의 식을 직사각형, 사다리꼴 수로 실험결과와 비교하였고, 벽면과 바닥의 저항 조건이 다른 직사각형 수로의 경우 단면분할방법으로 이분법을 사용하였다. Yen (2002)은 가정 B와  $V_i/V=(R_i/R)^{2/3}$ 를 가정함으로써 Eq. (10)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 고려해볼 때, 윤편을 매개변수로 고려하지 않는 것은 물리적으로 타당하지 않다 (Yen, 2002).

### 3.3 윤편과 동수반경의 조합을 가중치로 사용하는 방법

Lotter (1933)는 가정 C만 고려함으로써 Eq. (11)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 Eq. (12),  $V_i/V=(R_i/R)^{1/2}$ 로부터 Eq. (13),  $V_i/V=(R_i/R)^{2/3}$ 로부터 Eq. (14)이고, 가정 B와  $V_i/V=1$ 로부터 Eq. (15),

Table 1. Various Existing Formulae for the Composite Roughness Coefficient

Investigator	Formula		Investigator	Formula	
Horton (1933)	$n_c = \left[ \frac{\sum (P_i n_i^{3/2})}{P} \right]^{2/3}$	Eq. (4)	Lotter (1933)	$n_c = \frac{PR^{5/3}}{\sum (P_i R_i^{5/3}/n_i)}$	Eq. (11)
Pavlovskii (1931)	$n_c = \left[ \frac{\sum (P_i n_i^2)}{P} \right]^{1/2}$	Eq. (5)	Yen (1992)	$n_c = \frac{\sum (n_i P_i / R_i^{1/6})}{P/R^{1/6}}$	Eq. (12)
Felkel (1960)	$n_c = \frac{P}{\sum (P_i/n_i)}$	Eq. (6)	Yen (1992)	$n_c = \frac{\sum (n_i P_i R_i^{1/3})}{PR^{1/3}}$	Eq. (13)
Yen (1992)	$n_c = \frac{\sum (P_i n_i)}{P}$	Eq. (7)	Yen (2002)	$n_c = \frac{\sum (n_i P_i R_i^{1/2})}{PR^{1/2}}$	Eq. (14)
Colebatch (1941)	$n_c = \left[ \frac{\sum (A_i n_i^{3/2})}{A} \right]^{2/3}$	Eq. (8)	Yen (2002)	$n_c = \left[ \frac{\sum (n_i^2 P_i / R_i^{1/3})}{P/R^{1/3}} \right]^{1/2}$	Eq. (15)
Cox (1973)	$n_c = \frac{\sum (A_i n_i)}{A}$	Eq. (9)	Yen (2002)	$n_c = \left[ \frac{\sum (n_i^2 P_i R_i^{2/3})}{PR^{2/3}} \right]^{1/2}$	Eq. (16)
Yen (2002)	$n_c = \left[ \frac{\sum (A_i n_i^2)}{A} \right]^{1/2}$	Eq. (10)			

$V_i/V = (R_i/R)^{1/2}$ 로부터 Eq. (16)이다. 율변과 동수반경의 조합을 가중치로 사용하는 방법은 Manning 식의 흐름 변수를 모두 매개변수로 사용함으로써 물리적으로 타당하게 보인다. 그러나 각 소단면의 율변 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.

#### 4. Z-method에 근거한 단면분할기법 개발

Yen and Ho (1983)는 복단면 수로에서 하상의 실측 전단응력으로부터 하상 마찰력을 산정하고, 마찰력과 수체의 관성력이 균형을 이룰 수 있도록 소단면을 분할함으로써 이론적으로 소단면 경계면 사이의 저항이 없는 방법을 제안하고 이를 Z-method라 하였다. Z-method를 사용할 경우, 소단면 경계면 저항이 없으므로 소단면 사이의 경계면은 율변 계산에 포함할 필요가 없어진다. 그러나 이 방법을 사용하여 복합 조도계수 값을 계산하기 위해서는 하상 전단응력을 실측하고 난 후 소단면 분할을 결정할 수 있는 한계가 있어 실무에 거의 활용되지 못했다. 본 연구에서는 Z-method의 개념을 이용하여 단면을 분할하는 방법을 개발함으로써 Fig. 3과 같은 수직분할, 이분법에 의한 단면분할과 달리 소단면의 흐름저항 조건에 따라 변화하는 단면분할기법을 제시하였다.

단면평균 하상전단응력( $\tau_0$ )과 Chezy 식 그리고 Manning 식으로부터 Eq. (17)의 관계식이 성립된다.

$$\tau_0 = \gamma RS = \frac{\gamma V^2}{C^2} = \left(\frac{n}{R^{1/6}}\right)^2 \gamma V^2 \quad (17)$$

여기서  $C$ 는 Chezy 계수,  $n$ 은 Manning 계수이고,  $\gamma$ 는 물의 단위중량,  $R$ 은 동수반경,  $S$ 는 에너지경사,  $V$ 는 단면 평균 유속이다. 수심에 비하여 상대적으로 하폭이 넓은 ( $b \gg a$ ) Fig. 3과 같은 단면에서 벽면 저항의 영향을 크게

받는 소단면 I과 II의 평균유속이 같다고 가정하면, Eq. (17)로부터 두 소단면 전단응력의 비( $D$ )를 Eq. (18)과 같이 계산할 수 있다.

$$\frac{\tau_I}{\tau_{II}} = \left(\frac{n_w}{n_b}\right)^2 \left(\frac{\sqrt{1+s^2}H}{Hs+a}\right)^{1/3} = D \quad (18)$$

여기서 전단응력( $\tau$ )의 아래첨자는 각 소단면을 의미하고, Manning 계수의 아래첨자  $w, b$ 는 각각 벽면과 바닥을 의미하며,  $H, s, a$ 는 각각 수심, 사면경사, 소단면 I과 II의 경계면을 결정하는 값으로 Fig. 3에 표시되어 있다. 기존 복합 조도계수 산정식의 가정조건과 동일하게 각 소단면의 에너지 경사와 단면 전체의 에너지 경사는 같다고 가정하고, 하상저항 요인이 상이한 소단면 I과 나머지 소단면 II, III에서 힘의 균형을 고려하면 Eq. (19) and (20)가 성립된다.

$$\tau_I P_I = D \tau_{II} P_I = \gamma A_I S \quad (19)$$

$$\tau_{II} a + \tau_{III} (b-a) = \gamma (A_{II} + A_{III}) S \quad (20)$$

Eq. (20)의  $\tau_{III}$ 는 벽면저항 영향을 받지 않는 전단응력이므로  $\gamma HS$ 로 대체될 수 있으며, Eqs. (19) and (20)을 연립하여 풀이함으로써 소단면 I, II의 경계면을 결정하는  $a$ 를 계산할 수 있다.

$$a = H(D\sqrt{1+s^2} - s) \quad (21)$$

Eq. (21)에 Eq. (18)을 삽입하면, 소단면 I과 II의 하상 전단응력의 비  $D$ 가 Eq. (22)와 같아지며, 개발된 기법에 의한 소단면 분할경계가 단면의 측면경사( $s$ )와 벽면 Manning 계수( $n_w$ ) 그리고 바닥 Manning 계수( $n_b$ )로 결정될 수 있음을 알 수 있다.

$$D = \left(\frac{n_w}{n_b}\right)^{3/2} \quad (22)$$

Eqs. (21) and (22)로부터 벽면과 하상의 Manning 계수가 같을 경우, 소단면 I은 이등변 삼각형이 되며, 개발된

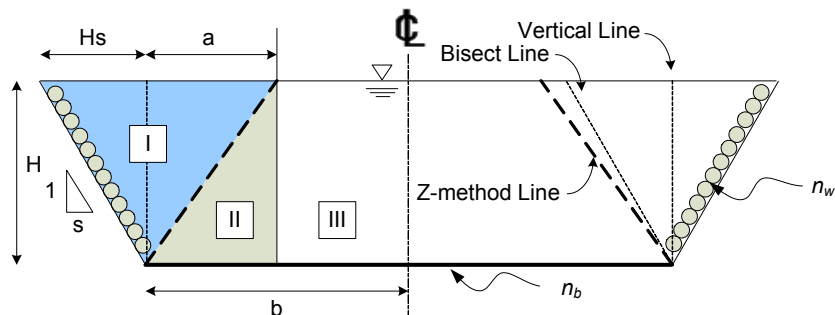


Fig. 3. New Subsection Division Method Based on the Z-method (Relatively Wide Channel)

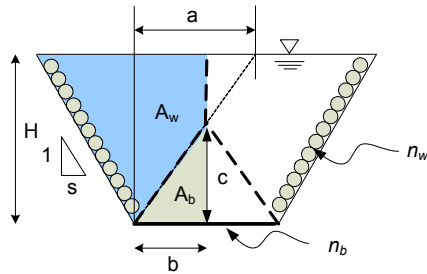


Fig. 4. New Subsection Division Method Based on the Z-method (Relatively Narrow Channel)

기법에 의한 단면분할이 이분법에 의한 단면분할과 같아짐을 알 수 있다. 다시 말해서, 이분법에 의한 단면분할은 하상 흐름저항이 동일한 경우에 더욱 적합할 것이며, 벽면 저항이 하상 저항보다 클 경우 소단면 분할경계는 하상쪽으로 좀 더 기울어 질 것이다. 이와 같이 각 소단면에서 힘의 균형을 고려하여 단면이 분할되면 Eq. (11)의 Lotter 등의 방법으로 복합 조도계수  $n_c$ 가 계산될 수 있을 것이다.

한편 실험실 소형 수로 또는 배수로와 같이 수심에 비하여 상대적으로 하폭이 좁은 ( $b < a$ ) 경우는 좌우 소단면 경계면이 교차하여 Fig. 4와 같이 소단면이 분할되며, Eqs. (18)~(20)이 성립되지 않는다. 이러한 경우에는 하상저항의 영향을 받는 소단면이 벽면저항의 영향을 받는 소단면보다 확연히 작아서 각 소단면의 평균유속이 같다고 가정하기도 어렵다. 본 연구에서 제안된 단면 분할방법은 벽면과 하상의 재료가 동일한 직사각형 수로 조건에서  $h/B$ 가 0.5인 경우가 적용한계이며, Fig. 4와 같이 상대적으로  $h/B$ 가 큰 단면에서는 추가적인 고려가 필요하다. Maghrebi (2006)는 자기장과 유속장의 유사성으로부터 단면 내 유속분포를 추정하는 방법을 제안하였으며, 동일한 재료로 구성된 직사각형 단면에서  $h/B$ 가 0.5보다 클 경우 운동량 보정계수  $\beta$ 가 1.02보다 작음을 보였다. Chow (1959)는 전형적인 자연하천에서도 운동량 보정계수가 1.05~1.17 사이에 있음을 보여주었으며, Maghrebi (2006)의 연구결과와 같이  $h/B$ 가 커서 상대적으로 깊고 좁은 단면의 유속 분포는 더욱 균일해 질 것이므로 운동량 보정계수로 1.00

의 값을 사용할 수 있다고 하였다. 운동량 보정계수 식으로부터 소단면의 유속과 단면 평균유속의 관계는 Eq. (23)과 같고, 각 소단면의 유속과 단면 평균유속에 Manning 식을 적용하면 복합 조도계수  $n_c$ 는 Eq. (24)와 같이 계산된다.

$$V_w^2 A_w + V_b^2 A_b = \beta (A_w + A_b) V^2 \quad (23)$$

$$n_c = \left[ \frac{\beta R^{4/3} \left( 1 + \frac{A_b}{A_w} \right)}{\frac{1}{n_w^2} R_w^{4/3} + \frac{A_b}{A_w} \frac{1}{n_b^2} R_b^{4/3}} \right]^{1/2} \quad (24)$$

상대적으로  $h/B$ 가 큰 단면에서 복합 조도계수를 계산하기 위하여 마지막으로 고려해야 되는 부분은 각 소단면의 경계를 결정하는 것이다. 그러나 소단면의 평균유속이 같지 않은 조건에서 소단면의 경계를 결정하는 것은 매우 어렵다. 그러므로 경계면을 결정하기 위한 대안으로 본 연구에서는 측벽 경사와 하상재료, 그리고 소단면 평균유속의 영향을 받는 Fig. 4의  $c$ 값이 Eq. (21)의  $a$ 로부터 계산된 결과와 크게 다르지 않을 것이라고 가정하였다.

## 5. 개발된 방법의 검증

### 5.1 소규모 사다리꼴 단면의 복합조도 실험

Djajadi (2009)는 바닥폭이 0.05m이고 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 (7~10 mm), 자갈 (12~17 mm)이며, 사용된 재료의 Manning 계수를 산정하기 위하여 동일한 재료로 구성된 수로에서 유량과 수심을 측정하였다. 그는 4가지 경우의 복합조도 단면을 구성하였고, 각 경우의 실험결과를 Table 2와 같다. 자세한 실험조건은 Djajadi (2009)를 참고할 수 있다.

Table 2. The Summary of Djajadi's Experiment Data

No.	Roughness		Depth (m)	Measured composite Manning's n	Reference Manning's n
	Bottom	Sidewall			
1	P	SA	0.0275	0.0166	P : 0.013 SA : 0.019 MA : 0.021 LA : 0.028
2	P	MA	0.0240	0.0184	
3	P	LA	0.0224	0.0205	
4	SA	LA	0.0274	0.0224	

P. plaster; SA. small-size aggregate; MA. medium-sized aggregate; LA. large-sized aggregate

Djajadi (2009)의 실험조건은 수심에 비하여 상대적으로 바닥폭이 좁고, 좌우 사면의 조도가 바다 조도보다 커서 Fig. 4의 조건이 성립된다. 따라서 Eq. (24)로부터 복합 조도계수를 산정할 수 있다. Fig. 5에는 Table 1의 13가지 기존 복합조도계수 산정식에 의한 결과와 본 연구에서 제안한 Eq. (24)에 의한 산정결과를 실측 복합조도계수와 비교하였다. 각 식들의 비교를 위하여 3장에서 구분한 가중치 부여방법에 따라 분리하였고, 기존 산정식의 단면분할은 수직분할방법을 사용하였으며, 본 연구에서 제안한 방법에 의한 계산결과를 모든 경우에 함께 나타내었다.

Fig. 5의 예측율 (Predicted ratio)은 계산결과와 실측결과와의 비를 의미한다. Fig. 5(a)에 나타낸 윤편을 가중치로 사용하는 4가지 경우의 예측율은 0.96에서 1.05의 값을 나타내며, 4가지 방법의 평균예측율은 1.02로서 각 방법에 따른 산정결과와의 차이가 비교적 작게 나타났다. 이는 윤편을 가중치로 사용하는 경우, Djajadi (2009)의 실험과 같은 소규모 수로에서 산정결과와의 차이가 크지 않음을 보이는 것이다. 한편 Felkel (1960)의 방법 (Eq. (6))에 의한 값은 나머지 3가지 경우와 다르게 전반적으로 낮은 값을 예측하고 있으며, 이는 식의 유도과정에  $R_f/R=1$ 이라는 비현실적인 가정조건에 기인하는 것으로 판단된다. Felkel의 방법을 제외한 나머지 경우에는 좌우 사면의 저항이 증가함에 따라 예측결과가 과대산정되는 공통적인 특징

이 발견되었다. 이는 사면자갈 (LA)에 의하여 큰 저항영향을 받는 소단면에서 유속이 감소하는 특성을 반영하지 못하고, 단순히 윤편의 길이로 가중치를 계산하기 때문으로 판단된다.

Fig. 5 (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. 실측 복합조도계수와 단면분할 방법에 따른 3가지 산정식의 계산결과 차이는 Table 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.

Fig. 5 (c)의 윤편과 동수반경을 가중치로 사용하는 경우는 방법별로 실측결과와 큰 차이를 보이고 있다. 특히 흐름 조건에 가장 작은 가정을 도입한 Lotter 방법의 경우,

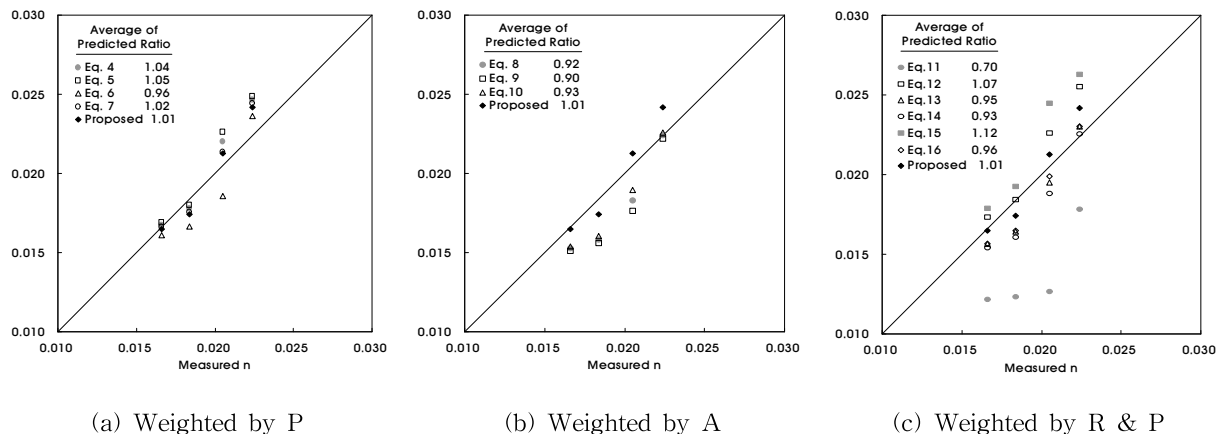


Fig. 5. Comparison of Calculated and Measured Composite Roughness Coefficients

Table 3. Differences between Calculated and Measured Composite Roughness Coefficients

No.	Vertical line			Bisect line		
	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

자연하천에서 적용한 Krishnamurthy and Christensen (1972)의 연구결과와 상이하게 가장 큰 오차를 나타내는 것으로 나타났다. 이는 윤변과 동수반경을 가중치로 사용하는 경우, 단면분할방법이 매우 중요함을 의미한다. 윤변과 동수반경을 가중치로 사용하는 6가지 방법 가운데, 각 소단면의 유속이 동일함 ( $V_i/V=1$ )을 가정한 Eqs. (12) and (15)에 본 연구에서 제안한 단면분할방법을 적용하였다. 또한 실측값과 비교결과 가장 편차가 크게 나타난 Lotter 방법에도 본 연구에서 제안한 단면분할방법을 적용하여 Fig. 6에 나타내었다. 분석결과 3가지 방법 모두 수직분할에 비하여 확연히 개선된 결과를 나타내었으며, 무엇보다도 Lotter 방법의 경우 본 연구에서 제안한 방법과 거의 유사한 예측 정확도를 나타내는 것으로 분석되어 적절한 단면분할이 선행된다면 매우 정확한 값을 제공하는 것으로 분석되었다.

## 5.2 Knight and Macdonald (1979)의 복합조도 실험

Djajadi (2009)의 실험은 수심과 바닥폭의 비 ( $h/B$ )가 0.45~0.55인 비교적 폭이 좁은 소규모 수로에서 수행되었다. 따라서 본 연구에서 제안한 단면분할방법에 의한 각 소단면의 유속 차이가 크지 않으며, 자연하천 조건과는 상이하다. 수심에 비하여 하폭이 넓은 일반적인 자연하천에서 개발된 단면분할기법을 검증하기 위해서는 상당히 작은  $h/B$ 의 값에서 수행된 실험결과와의 비교가 필요하며, 이를 위하여 본 연구에서는  $h/B$ 가 0.067~0.675의 범위에서 수행된 Knight and Macdonald (1979)의 실험결과를 활용하였다. 그들은 폭이 460 mm이고 높이가 380 mm

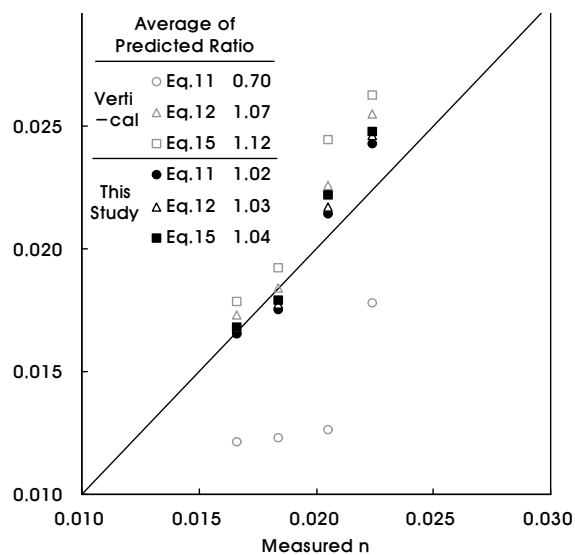


Fig. 6. Improvement of Calculated Results according to Subsection Division Method

인 직사각형 단면을 사용하였고, 바닥면 전체 폭에 횡방향으로 한 면의 길이가 3 mm인 정사각형 유리막대 (perspex strip)를 1,000 mm (Series 01), 500 mm (Series 02), 250 mm (Series 03), 125 mm (Series 04), 62.5 mm (Series 05), 41.7 mm (Series 06), 31.2 mm (Series 07), 20.8 mm (Series 08), 15.6 mm (Series 09), 10.4 mm (Series 10)의 간격으로 설치함으로써 막대를 설치하지 않은 경우 (Series 00)와 함께 총 11개의 조건에서 실험을 수행하였으며, 각 조건에서 다양한  $h/B$ 의 경우를 수행함으로써 전체 50개의 실험결과를 제시하였다. 그들은 막대의 간격이 줄어들수록 바닥저항이 증가하다가 최고의 저항에 다다르며, 이후 막대의 간격이 더 줄어들면 바닥저항이 감소하는 현상을 실측하였으며, 이러한 현상으로부터 6가지 형태의 흐름을 유형화하였다. 또한 등간격으로 부착한 막대로 인하여, 하상저항 요인이 막대 부분과 막대 사이 홈으로 구성되어 공간적으로 비균일한 저항조건에서는 막대사이의 간격, 크기, 형상 등이 하상저항 크기의 변수가 되며, 하상저항의 크기가 수심의 증가에 따라 비선형적인 거동을 나타냄을 보였다. 자세한 실험 조건 및 실측 결과는 Knight (1981)에 수록되어 있으며, 수록된 실측 결과를 활용하여 계산된 복합 조도계수는 Fig. 7과 같다.

실험결과 Series 06까지 바닥저항이 증가하다가 Series 07, 08에서는 Series 06과 거의 유사한 바닥저항을 나타내고, Series 09와 10은 오히려 바닥저항이 감소함을 보이고 있다. Fig 7의 복합 조도계수 측정결과는 이러한 경향을 잘 나타내고 있으며, 막대가 부착되지 않은 Series 00에서는 수심별 조도계수의 변화가 크지 않음을 알 수 있고, 나머지 경우에는 수심이 증가할수록 바닥저항의 영향이 잠식되어 복합조도계수의 크기가 감소함을 알 수 있다. 그러나 이 실험에서는 벽면과 바닥의 Manning 계수를 구분하여 측정하지는 않았다. 따라서 본 연구에서는 막대를 설치하지 않은 Series 00의 바닥과 벽면 저항이 동

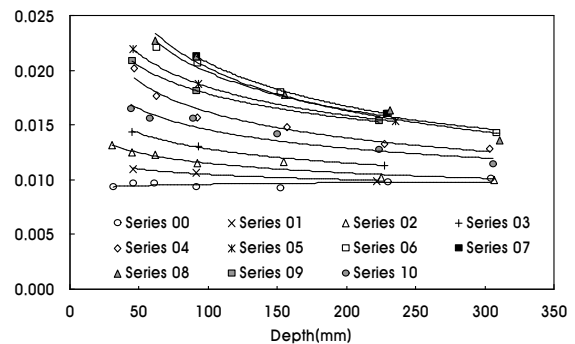
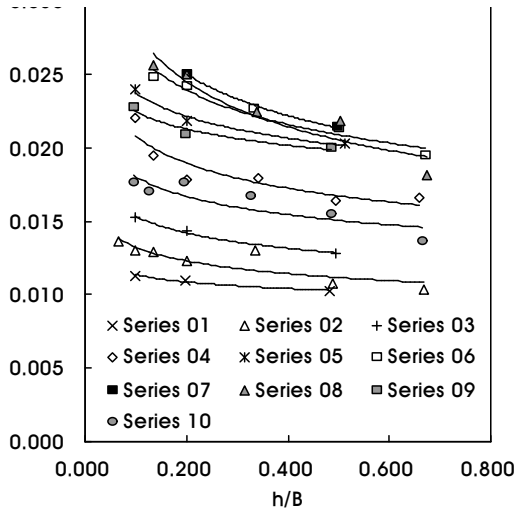
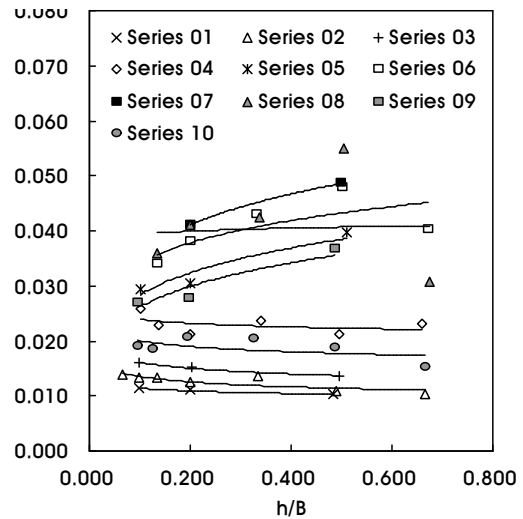


Fig. 7. Measured Composite Roughness Coefficients of Knight and Macdonald's Experiment

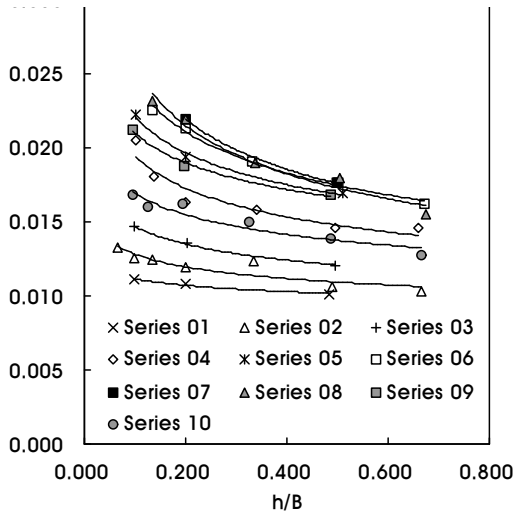




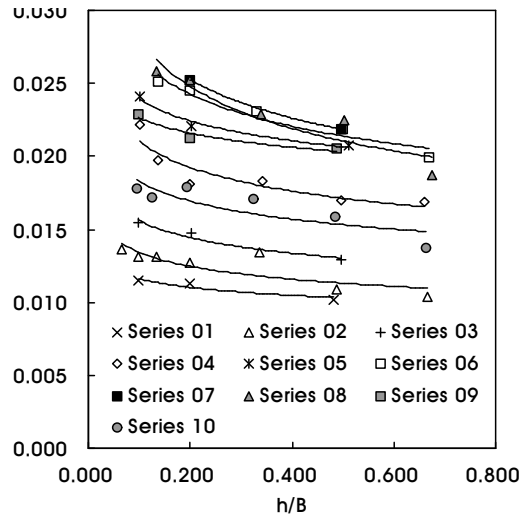
(a) Horton



(b) Felkel



(c) Cox



(d) Lotter

Fig. 8. Inverse Calculation of Bottom Roughness Coefficient

일하므로 벽면의 Manning 계수를 0.0096으로 추정하였고, Table 1의 13개 기준 산정식 중 윤편을 가중치로 사용하는 Horton과 Felkel 방법과 단면적을 가중치로 사용하는 Cox 방법, 그리고 윤편과 동수반경을 가중치로 사용하는 Lotter 방법을 역산함으로써 바닥 저항을 추정하였으며, 그 결과는 Fig. 8과 같다.

Fig. 8 (b)의 Felkel 방법에 의한 바닥저항 추정결과는 Series 04~10에서 다른 방법에 의한 결과와 매우 다르게 나타났다. 이는 5.1절에서 검토된 바와 같이 Felkel 식의 가정조건이  $R_b/R=1$ 이기 때문이며, 공간적으로 저항의 변화가 심한 하천에서는 사용될 수 없음을 나타낸다. Fig. 8 (c)의 Cox 방법은 Horton과 Lotter 방법에 비하여 Series 04~10에서 산정된 바닥저항의 값의 변화가 크게 산정되었다. 이는 단면적을 가중치로 사용할 경우, 본 연구에서

제안된 단면분할방법으로 일관성 있는 해석결과를 기대할 수 없으며, 새로운 단면분할방법이 필요함을 의미한다. 그러나 저항요인에 따른 흐름특성의 변화를 반영하지 않고 단면적으로만 가중치를 부여할 경우, 적합한 분할방법의 제안은 물리적으로 쉽지 않은 일이다. 한편 Horton과 Lotter 방법에 의하여 산정된 바닥저항의 값은 거의 비슷한 값을 나타내었다. 특히  $h/B$ 가 작은 경우에는 모든 Series에서 거의 동일한 값을 나타내었는데 이는 복합 조도계수의 주요 가중치가 바닥저항에 집중되기 때문이며, 이를 수심에 비하여 넓은 하폭에 의한 윤편이 바닥저항의 가중치로 사용되기 때문이다.

### 5.3 고찰

실무적 목적으로 사용되는 복합 조도계수의 경우, 각 식

의 가정조건으로부터 다양한 산정식이 존재한다. 다양한 산정식 가운데 Lotter 방법이 가장 적은 가정조건을 도입하고 있으며 (3장 참조), 실제 하천에서의 적용결과 또한 우수한 것으로 알려져 있다 (Krishnamurthy and Christensen, 1972). 그러나 HEC-RAS, FLDWAV 등 범용하천모형에서는 계산의 편의성 때문에 Horton 방법처럼 운변에 의한 가중치로 산정된 복합 조도계수를 주로 사용하고 있으며, 본 연구결과 실험수로에서의 실측결과와의 비교로부터 Horton 방법 또한 비교적 정확도가 높은 것으로 나타났다.

Horton 방법은 식의 유도과정에 각 소단면의 유속이 단면 평균유속과 같다는 가정조건을 포함하고 있다. 따라서 각 소단면의 유속이 같아질 수 있도록 단면이 분할되어야 한다. 그러나 Horton 방법은 운변만을 가중치로 사용하기 때문에 단면분할방법은 복합 조도계수 산정결과에 어떠한 영향도 미칠 수 없다. 일례로 저수로에 비하여 넓은 홍수터에 수목 및 식생 등 큰 저항요인이 있는 경우, 홍수터의 유속과 저수로의 유속은 큰 차이를 나타낼 수 있다. 이 때 Horton 방법에 의해 복합 조도계수를 산정하면 넓은 홍수터로 인하여 홍수터 저항이 큰 가중치를 가지게 될 것이며, 복합 조도계수의 결과 또한 저수로 저항보다 홍수터 저항의 값에 가깝게 과대 산정될 것이다. 이는 홍수터 저항으로 인한 저수로의 가속흐름을 반영하지 못하고 단면 전체의 통수능을 과소 추정하게 된다. 반면 수직분할에 의한 Lotter 방법이 적용되면 복합 조도계수가 과소 산정되어, 단면 전체의 통수능을 과대 추정하게 된다. 이는 본 연구에서 개발된 단면분할방법에서도 알 수 있듯이 흐름저항 요인이 큰 소단면과 그렇지 않은 소단면 사이에는 저항요인이 작은 소단면 쪽으로 단면분할선이 편향되는 것을 알 수 있는데, 수직분할이 사용되면 복합 조도계수 산정에 있어 홍수터 저항요인의 가중치가 실제보다 작게 반영되기 때문이며, 만약 수직분할 방법을 사용해야 할 경우에는 홍수터와 저수로의 유속차로 인한 경계부 저항을 추가적으로 고려하여야 적합한 복합 조도계수를 산정할 수 있을 것이다.

따라서 복합 조도계수를 산정하고자 하는 경우에는 각 산정식의 가정조건을 엄두에 두고, 대상구간에 적합한 식을 선정하여야 하며, Lotter 방법을 적용할 경우에는 단면분할에 특히 주의하여야 함을 알 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 공간적으로 저항요인이 상이한 단면에서 기존의 복합 조도계수 산정방법의 적용성에 대하여 검토하였다. 이를 위하여 Djajadi (2009)와 Knight and

Macdonald (1979)의 복합조도 실험결과를 사용하였고, 각 소단면에서의 힘의 균형을 고려한 단면분할방법을 개발하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 하상 및 측벽 재료가 동일한 직사각형 수로에서 분할단면에 의한 유량산정방법 (DCM)을 사용할 경우, 단일단면에 의한 유량산정방법 (SCM)과 1%의 유량오차를 허용할 수 있는 소단면의 최소폭이 수심조건에 따라 결정되었다. 즉 각 소단면은 최소한 수심의 7.35배의 폭 ( $h/B=0.136$ )이 필요하며, 흐름저항에 영향을 주는 재료 및 단면형상에 따라 그 값은 달라질 수 있다.
- (2) 기존 복합 조도계수 산정식을 각 소단면의 조도계수에 가중치를 부여하는 방법으로 구분하였다. 각 산정식마다 기본 가정조건이 상이하며, 산정결과 또한 차이를 보였다. 단면적에 의한 가중 그리고 운변과 동수반경의 조합을 가중치로 사용하는 경우에는 흐름조건을 고려하지 않고 고정되는 수직분할방법 또는 이분법 외에 각 소단면 저항조건에 따라 변화되는 단면분할방법이 필요함을 확인하였다.
- (3) 본 연구에서는 각 소단면의 힘의 균형을 고려한 단면분할방법이 개발되었다. 개발된 방법에 의하면 분할경계가 단면의 기하형상과 두 소단면 사이의 흐름저항 비로부터 결정되었으며, 이분법에 의한 단면분할은 흐름저항 요인이 동일한 경우에 더욱 적합한 것으로 판단되었다.
- (4) 두 가지 실험의 실측결과와 각 산정식에 의한 계산결과를 비교해 보면, Felkel 방법을 제외한 운변을 가중치로 사용하는 식들은 전반적으로 양호한 결과를 보였으나, 큰 저항이 예상되는 소단면에서 발생하는 유속의 감소를 적절히 반영하지 못하고 단순히 운변의 길이로 가중함에 따라 복합 조도계수를 과대산정할 수 있는 것으로 나타났다.
- (5) 단면적을 가중치로 사용하는 식들을 사용할 경우, 단면분할방법에 따라 상이한 복합 조도계수 값을 산정하게 된다. 따라서 적합한 단면분할방법이 필요하지만 본 연구에서 제안된 방법은 단면적을 가중치로 사용하는 식들에 의한 산정결과와 정확도를 높일 수 없었으며, 단면적만으로 저항요인에 따른 흐름특성의 변화를 반영하는 것은 물리적으로 매우 어려울 것으로 판단된다.
- (6) 동수반경과 운변을 가중치로 사용하는 식들의 경우에는 본 연구에서 제안된 단면분할기법으로부터 확연히 개선된 결과를 확인하였다. 특히 기존 식 가운데 가장 작은 가정조건을 도입한 Lotter 방법은 본 연구에서 개발된 분할기법을 사용할 경우 매우 높

은 정확도로 복합 조도계수를 산정할 수 있는 것으로 분석되었다.

본 연구에서 개발된 단면분할기법은 단면형상을 사다리꼴 또는 직사각형으로 근사화 할 수 있으며, 바닥부와 사면의 저항특성이 구분되는 경우로 국한된다. 또한 각 저항특성으로부터 구분되는 소단면을 비선형적으로 구분하지 않고 선형적으로 근사화한 점에서도 한계가 있다. 향후 매우 불규칙적인 자연하천 단면형상과 저수로와 홍수터가 명확히 구분되는 복단면에서 기존 복합조도계수 산정식의 적용성을 검토할 필요가 있으며, 복단면 경계에서 발생하는 이차류 효과, 그리고 난류흐름의 와점성 효과를 반영한 경계부 저항까지 고려한 합성-복합 (compound-composite) 조도계수 산정방법이 개발된다면 매우 효율적이면서 정확한 1차원 수치모의가 가능할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 논문은 국토해양부 및 한국건설교통기술평가원 건설핵심기술연구개발사업의 연구비지원 (06건설핵심B01)에 의해 수행된 것으로서, 이 연구를 지원하는 기관에 감사사를 드린다.

### 참고문헌

김 원, 김양수, 우효섭 (1995). "부정류 모형을 이용한 한강 하류부 하도의 조도계수 산정." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제28권, 제6호, pp. 133-146.

김지성, 김용진, 이찬주, 김 원 (2009). "등가조도를 이용한 자갈하천의 하상저항 산정." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제8호, pp. 619-629.

김지성, 이찬주, 김 원 (2007). "실측 수위에 의한 자갈하천의 조도계수 산정." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제10호, pp. 755-768.

황의준, 전경수 (1997). "한강 분류에 대한 부정류 계산모형: 모형의 보정." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제30권, 제5호, pp. 549-559.

Chow, V.T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*, McGraw-Hill, New York.

Colebatch, G.T. (1941). "Model Tests on the Lawrence Canal Roughness Coefficients." *J. Inst. Civil Eng. (Australia)*, Vol. 13, No. 2, pp. 27-32.

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.

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.

Felkel, K. (1960). "Gemessene Abflüsse in Gerinnen mit Weidenbewuchs." *Mitteilungen der BAW*, Heft 15, Karlsruhe, Germany.

Fread, D.L., and Lewis, J.M. (1998). *NWS FLDWAV Model*, Hydrologic Research Laboratory Office of Hydrology National Weather Service, NOAA.

Horton, R.E. (1933). "Separate Roughness Coefficients for Channel Bottoms and Sides." *Eng. News-Rec.*, Vol. 111, No. 22, pp. 652-653.

Knight, D.W. (1981). "Boundary Shear in Smooth and Rough Channels." *Journal of the Hydraulic Division*, Vol. 107, No. HY7, pp. 839-851.

Knight, D.W., and Macdonald, J.A. (1979). "Hydraulic Resistance of Artificial Strip Roughness." *Journal of the Hydraulic Division*, Vol. 105, No. HY6, pp. 675-690.

Krishnamurthy, M., and Christensen, B.A. (1972). "Equivalent Roughness for Shallow Channels." *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 98, No. HY12, pp. 2257-2263.

Lotter, G.K. (1933). "Soobrazheniia k Gidravlicheskomu Raschetu Rusel s Razlichnoi Sherokhovostiiu 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.

Maghrebi, M.F. (2006). "Application of the Single Point Measurement in Discharge Estimation." *Advances in Water Resources*, Vol. 29, pp. 1504-1514.

Motayed, A.K., and Krishnamurthy, M. (1980). "Composite Roughness of Natural Channels." *Journal of the Hydraulic Division*, Vol. 106, No. HY6, pp. 1111-1116.

Pavlovskii, N.N. (1931). "K Voprosu o Raschetnoi dlia Ravnornernogo Dvizheniia v Vodotokakh 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.

Yen, B.C. (1992). *Channel Flow Resistance: Centennial of Manning's Formula*, Water Resources Publications, Littleton, Colorado.

Yen, B.C. (2002). "Open Channel Flow Resistance." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 128, No. 1, pp. 20-39.

Yen, C.L., and Ho, S.Y. (1983). Discussion of "Discharge Assessment in Compound Channel Flow." *Journal of the Hydraulic Division*, ASCE, Vol. 109, No. 11, pp. 1561-1567.

논문번호: 10-024	접수: 2010.03.09
수정일자: 2010.08.12/10.25	심사완료: 2010.10.25