

# 부정류 모형을 이용한 한강 하류부 하도의 조도계수 산정

## Estimation of Channel Roughness Coefficients in the Han River Using Unsteady Flow Model

김 원\* · 김 양 수\*\* · 우 호 섭\*\*\*  
Kim, Won · Kim, Yang Su · Woo, Hyo Seop

---

### Abstract

Manning's roughness coefficient for the Han River (from Paldang dam to Indo Bridge) is estimated by one-dimensional unsteady flow model, NETWORK. The entire river is divided into two regions, one region of Paldang dam to Kwangjang, and another region of Jamsu Bridge to Indo Bridge, and changes of the roughness coefficient according to changes in discharge are estimated using data of the past flood events. Estimated roughness coefficients are compared with previous results. Finally, the stage variation according to the variation of channel roughness is presented.

---

### 요 지

본 연구에서는 한강 하류부(팔당댐-인도교) 구간의 하도에 대한 Manning 조도계수를 1차원 부정류 모형인 NETWORK을 이용하여 산정하였다. 전체 구간을 팔당댐-광장, 잠수교-인도교 등 두 구간으로 구분하고 과거 홍수사상자료를 이용하여 유량 규모별로 조도계수를 구하였다. 산정된 조도계수를 기존 연구결과와 비교하였으며 조도계수의 변화에 따른 수위의 변화를 검토하였다.

---

### 1. 서 론

하도의 흐름해석에서 가장 중요한 물리적 요소는

하도의 종횡단 형태와 하상의 조도계수이다. 하도의 종횡단 형태와 하상의 마찰력에 따라 흐름의 주요 특성이 결정되는데 하도의 종횡단 형태는 측량을 통해 확정적으로 구해질 수 있으나 하상의 조도

---

\* 한국건설기술연구원 수자원연구실 연구원  
\*\* 한국건설기술연구원 수자원연구실 선임연구원  
\*\*\* 한국건설기술연구원 수자원연구실장

는 확정적으로 구해질 수 없기 때문에 흐름해석에서 하상 조도의 산정은 중요하면서도 어려운 작업이다.

조도계수의 원래 의미는 하상재료의 조도(roughness)를 나타내는 척도로서, 하상재료 및 하상표면의 특성에 의해 결정되지만 실제 흐름계산에서는 식생, 하천구조물, 사행도, 단면 형태, 단면 변화양상 등 하도의 상황뿐만 아니라 유량이나 수위에 의해서도 변화하기 때문에(French, 1985) 이론적으로 조도계수를 정확하게 계산하는 것은 거의 불가능하다.

이에 따라 흐름계산시 조도계수를 산정하기 위해서는 많은 경험과 실험을 통해 제시된 하상 특성별 조도계수를 이용하는 것이 일반적이다. 그러나 이와 같이 조도계수를 산정하는 것은 임의성이 내포되어 있어서 산정된 조도계수에 대한 객관적인 타당성을 입증하기는 매우 어렵다. 가정된 조도계수를 검증하기 위해 부등류 모형을 사용하는 경우도 있는데 이 경우에는 고정 유량이 일정 하도 구간에 동일하게 유하하는 것으로 가정하고 그 유량에 대한 수위를 수위-유량 관계곡선에 의해 구하여 부등류 모형에서 계산된 수위와 일치하도록 조도계수를 보정한다. 따라서 시간과 공간에 따라 변화하는 실제 하천의 수위와 유량에 대해서 검증할 수 없는 한계를 안고 있다.

본 연구에서는 그 동안 많은 수리학적 홍수해석모형이 적용되어 왔지만 수리학적 모형에서 사용되는 조도계수에 대한 연구가 거의 이루어지지 않았던 한강 하류부(팔당댐-인도교) 구간에 대한 Manning의 조도계수를 일차원 부정류 모형에 의해 산정하였다. 또 산정된 조도계수를 이용하여 조도계수의 변화에 따른 수위의 변화양상을 검토하였다.

본 연구는 유량의 증가에 따라 사주나 세굴공 같은 하상요철의 영향감소 등으로 전체적인 하상마찰이 감소하는 것에 초점을 맞추었다. 따라서, 유량 증가에 의해 발생하는 하상형태의 변화와 그에 따른 마찰변화는 본 연구에서 제외하였다.

## 2. 관련 연구

조도계수는 하상표면의 특성을 나타내기 위해 사

용하는 변수이다. 자연하천의 하상은 유사의 퇴적과 세굴에 의해 계속 변화되며 홍수시에는 그 변화 폭이 더욱 크게 된다. 또 계절이 변화함에 따라 제방이나 고수부지에 자라는 여러 가지 식물의 형태와 종류도 달라진다. 이와 같이 하상은 고정되어 있는 것이 아니라 여러 가지 요인에 의해 그 표면 특성이 변화하기 때문에 수학적으로 확정적인 조도계수 값을 산정하기가 곤란하며 경험적으로 시간과 장소에 따라 적절하게 결정되는 것이 통상이다. 또한 하천의 흐름을 계산할 때에는 하상재료의 특성을 표현하는 원래의 의미 뿐만 아니라 종방향의 단면변화, 하상경사의 변화, 사행 등의 영향도 모두 조도계수에 의해 표현된다. 결국 조도계수는 하천 종횡단면 자료로 표현될 수 없는 하천의 모든 형태적 특성과 하상, 제방, 고수부지 등의 표면특성을 나타내는 유일한 변수인 것이다. 따라서 조도계수는 특정한 식에 의해 단순히 결정되지 않고 대상 하천의 특성에 따라 경험에 의해 적절히 산정되는 것이 일반적이다.

조도계수를 추정하는 방법에는 하도의 상황에 따라 기존에 제안된 값을 사용하는 방법과 수리학적 모형에 의해 과거 홍수사상을 가장 잘 재현하는 값을 사용하는 방법이 있다. 기존에 제안된 값을 사용하는 방법은 비교적 간단하지만 하상 재료에 따라 주관적으로 조도계수를 결정하기 때문에 임의적이다. 수리학적 모형에 의한 방법은 하상단면 자료를 필요로 하기 때문에 다소 복잡하기는 하지만 비교적 객관적으로 조도계수를 구할 수 있다.

국내에서 조도계수를 결정하는 일반적인 방법은 하상의 특성을 바탕으로 기존에 제안된 값을 적절히 선택한 후 HEC-2와 같은 부등류 모형에 의해 보정하여 결정하는 것이다. 한강본류에 대해서는 여러 보고서에서 수리학적 모형을 적용하기 위해 조도계수를 산정한 바 있는데 그 중 대표적인 결과는 다음과 같다.

한강하류부 이동상 수리모형 실험보고서(1983)와 잠실수중보 수리모형 실험보고서(1984)에서는 수리모형실험 결과를 이용하여 Manning 공식으로 한강하류부의 조도계수를 산정하였다. 그 결과는 각각 표 1 및 2와 같다.

표 1. 한강하류부 이동상 수리모형실험(Manning 공식)에 의해 결정된 한강하류부의 조도계수

유량(cms)	200	500	1,000	5,000	30,000
조도계수	0.085	0.067	0.057	0.040	0.032

표 2. 잠실수중보 수리모형실험(Manning 공식)에 의해 결정된 한강하류부의 조도계수

유량(cms)	5,000	12,000	25,000	37,000
조도계수	0.040	0.035	0.032	0.030

표 3. HEC-2 모형에 의해 결정된 한강하류부의 조도계수

유량(cms)	75	125	200	500	1,000	5,000	7,300	12,000이상
조도계수	0.078	0.0625	0.052	0.042	0.037	0.032	0.031	0.030

표 4. HEC-6 모형에 의해 결정된 유량별 한강하류부의 조도계수

유량 (cms)	200	2,501	31,275
조도계수	0.085	0.045	0.030
발생년월일	1988. 8. 4	1990. 7. 14	1990. 9. 11

한강주운개발사업 타당성 조사보고서(1989)에서는 HEC-2모형을 이용하여 잠실수중보 상류 하도에 대한 조도계수를 산정한 바 있다. HEC-2에 의한 계산수위와 수위표 지점 수위-유량 관계곡선상의 수위가 근접하도록 조도계수를 조정하여 표 3과 같이 한강하류부에 대한 유량별 조도계수를 산정한 바 있다.

한강하류부 수질보전 대책수립 조사보고서(1993)에서는 한강하류부 서울시 구간에 HEC-6모형을 적용하기 위해 조도계수를 산정한 바 있다. 이 연구에서는 한강하류부 배수위 계산시 사용한 유량규모별 조도계수를 기준으로 이 값을 조금씩 변화시켜 가면서 3가지 유량에 대해 인도교, 잠수교, 광장 수위표 지점의 HEC-6에 의한 계산 수위와 실측 수위가 근접하도록 조도계수를 추정하였다. 산정된 결과는 표 4와 같다.

앞에서 살펴본 바와 같이 부등류 모형을 이용하여 조도계수를 구할 경우에는 실제 홍수시에 나타나는 연속적인 유량과 수위에 대해 적용할 수 없고 단일 수위, 단일 유량에 대해서만 조도계수를 추정하기 때문에 실제 적용에는 한계를 가지고 있다.

부등류 모형에 의해 조도계수를 산정하는 방법과 부정류 모형에 의해 조도계수를 산정하는 방법은 사용하는 지배방정식의 형태에 따라 구분된다. 등

류, 부등류, 부정류 등은 운동량 방정식에서 각 항의 포함여부에 따라 식 (1)과 같이 구분된다.

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (1)$$

여기서,  $Q$ 는 유량,  $A$ 는 단면적,  $x$ 는 거리,  $t$ 는 시간,  $y$ 는 수심,  $g$ 는 중력가속도,  $S_0$ 는 하상경사,  $S_f$ 는 마찰경사이다.

식 (1)의 첫번째 항은 국부가속도항, 두번째 항은 대류가속도항, 세번째 항은 압력항, 네번째 항은 중력항, 다섯번째 항은 마찰항을 나타낸다. 부등류 모형에 의해 조도계수를 산정할 경우에는 국부가속도항은 무시하고 대류가속도항, 압력항, 중력항, 마찰항만을 고려하여 흐름을 해석하기 때문에 흐름의 시간에 대한 변화를 고려할 수 없다. 실제 조도계수를 산정하는 방법은 적절한 조도계수 값을 가정하여 부등류 방정식의 해(유량과 수위)를 구한 후 실측치와 비교하여 최적의 조도계수를 구하는 것이다. 일반적으로 부등류 해석을 위해 많이 사용하고 있는 HEC-2 모형은 운동량 방정식을 사용하지 않고 에너지 방정식을 사용하나 이러한 기본 개념에는 큰 차이가 없다. 부정류 모형에 의해 조도계수를 산정할 경우에는 국부가속도 항까지

포함하여 흐름의 시간에 대한 변화를 고려한 부정류 방정식의 해를 구한 후 실측치와 비교하여 최적의 조도계수를 구한다.

따라서 유량의 변화가 크지 않은 경우에는 일정 구간에 대해 시간에 따른 유량의 변화가 없다고 가정하여 부정류 모형을 사용할 수 있다. 그러나 홍수시와 같이 유량이 크고 시간에 따른 유량이나 수위의 변화가 심한 경우에는 일정 구간에 유량이나 수위가 시간에 따라 변화하지 않고 동일하게 유지된다고 가정하는 것은 한계가 있다. 홍수시에는 시간에 따라 수위와 유량이 계속해서 변화하고 수위-유량 관계곡선도 일정한 단일곡선 형태로 나타나지 않으므로 조도계수를 구하기 원하는 유량에 대한 실제의 검증수위를 알 수가 없다. 그러나 부정류 모형의 경우에는 시간에 따라 변화하는 유량이나 수위를 그대로 사용하여 조도계수를 검증할 수 있다. 따라서 유량의 시간에 따른 변화를 무시할 수 있는 경우에는 부정류 모형을 사용하여 조도계수를 검증할 수 있지만 유량이 크고 변화가 심한 홍수시에는 적절하게 현장의 실제 상황을 반영하여 조도계수를 검증하기가 곤란하다.

국내에서는 부정류 모형을 이용하여 조도계수를 산정한 연구가 많지 않은데 김현영과 박승우(1989)가 금강 하류의 홍수에 대한 부정류 해석을 실시하면서 부정류 모형을 이용하여 금강 하류부하도의 조도계수를 산정한 바 있다. 이 연구에서는 공주에서 하구까지를 5개 구간으로 구분하여 조도계수를 산정하였는데 유량의 증가에 따른 조도계수의 변화는 고려하지 않았으며 하나의 홍수사상에 대해서 검증을 실시하였다. 검증결과 홍수 초기부분을 제외하고는 전 기간에 걸쳐 좋은 결과를 나타내었다.

한편, 이동상 하상에서 하상변화에 의한 하상마찰의 변화에 관한 연구가 최근에 유권규 등(1993)에 의해 수행된 바 있다. 이 연구에서는 우리나라 중소규모 총적하천을 대상으로 실측 자료를 이용하여 동류계산으로 Manning의 조도계수를 산정하였다. 이 연구결과에 의하면 유량이 증가함에 따라 조도계수가 증가하여 전술한 연구결과와는 상반되는데 이는 유량의 증가에 따른 하상형태의 변화와 그에 따른 하상마찰의 증가를 고려해 주었기 때문

이다. 반면에 기존 연구를 포함한 본 연구에서는 대하천에서 유량의 증가에 따라 하상요철의 저항효과가 감소하고 그에 따라 하상마찰이 감소하는 것에 초점을 둔 것이다.

### 3. 부정류 모형에 의한 조도계수 산정방법

본 연구에서는 팔당댐-인도교 구간의 조도계수를 구하기 위해 Fread와 Smith(1978)에 의해 개발된 방법을 사용하였다. 이 방법은 부정류 모형을 이용하는 방법으로 과거의 홍수사상에 모형을 적용하여 측정수위와 계산수위의 오차가 가장 작게 되도록 조도계수를 결정하는 것이다. 계산수위는 부정류의 지배방정식인 St.Venant 방정식을 유한차분법에 의해 결정된다. 이 방법에서는 특정 시간의 특정 수위에 대해서만 조도계수를 산정하는 것이 아니라 홍수사상 전 시간에 대한 수위수문곡선의 계산치와 측정치가 오차 범위내에 들어 올 수 있도록 조도계수를 산정한다. 따라서 실제 홍수사상 자료에 대해 검증할 수 있기 때문에 좀 더 객관적으로 타당성있는 조도계수를 산정할 수 있다.

구체적인 조도계수 산정절차는 다음과 같다.

① 조도계수가 동일하다고 생각되며, 관측된 수위자료가 있는 지점을 기준으로 전체 하도를 몇 개의 동일 조도계수 구간으로 구분한다.

② 각 조도계수 구간에서 조도계수가 동일하다고 생각되는 유량 구간을 적절히 구분하고 그에 따른 조도계수를 가정한다.

③ 각 조도계수 구간에서 상류경계조건으로는 관측된 유량 수문곡선, 하류경계조건으로는 관측된 수위수문곡선을 사용한다.

④ St. Venant 방정식의 해로부터 수위와 유량을 구한다.

⑤ 각 조도계수 구간의 상류단에서 계산 수위와 관측 수위를 비교하여 다음과 같은 목적함수를 구성한다.

$$\min \phi_s = \left| \sum_{j=1}^J \phi_j \right| = \left| \sum_{j=1}^J \frac{1}{M_j} \sum_{i=1}^{M_j} (h_A^i - h_A^i) \right| \quad (2)$$

여기서  $J$ 는 유량 규모의 구분 수,  $h_A$ 는 계산수위,  $h_A$ 는 관측수위,  $M_j$ 는  $j$ 번째 유량 규모내에 포함되어 있는 수위의 총 갯수이다.

⑤ 각 유량 구간에서 다음과 같은 수정된 Newton-Raphson 반복법에 의해 최적의 조도계수를 구한다.

$$n_j^{k+1} = n_j^k - \frac{\Phi_j^k (n_j^k - n_j^{k-1})}{(\Phi_j^k - \Phi_j^{k-1})} \quad k > 2; j=1, 2, \dots, J \quad (3)$$

여기서,  $k$ 는 반복횟수이며  $\Phi_j$ 는 유량 규모별 편차이다.

반복횟수가 2보다 큰 경우에 윗 식을 적용하며 처음에는 다음과 같이 계산한다.

$$n_j^{k+1} = n_j^k \frac{1.0 - 0.01\Phi_j^k}{\Phi_j^k} \quad k=1; j=1, 2, \dots, J \quad (4)$$

⑥ 윗 식을 계산편차가 허용 범위내에 들어올 때까지 반복계산한다.

⑦ 최적화된 조도계수를 이용하여 계산된 하류단의 유량은 다음 조도계수 구간에서 상류 경계조건으로 사용된다.

이 방법은 미국의 많은 하천에 적용된 바 있으며 미국 국립기상청(National Weather Service)에서 개발된 NETWORK 모형내에 포함되어 있다.

#### 4. 한강하류부 하도의 조도계수 산정 및 분석

##### 4.1 단면자료 및 홍수사상

본 연구의 대상구간은 팔당댐-인도교 구간인데, 구간별로 다음과 같이 최근의 단면 측량자료를 수집하였다.

■ 팔당댐-왕숙천 유입부: 1986년 측량 결과 (경기지구 한강종합개발계획보고서, 1987)

■ 왕숙천 유입부-인도교: 1992년 측량 결과 (서울시 관내 하천제방 안전도 검토 및 치수종합대책 수립보고서, 1992)

수집된 자료를 이용하여 이 구간내에 87개 단면으로 입력자료를 구성하였다.

팔당댐에서 인도교 구간 내에는 고안, 광장, 청담, 잠수교, 인도교 등의 수위표가 있으나, 청담 수위표 지점에서는 양질의 시수위 자료를 구할 수 없었기 때문에 고안, 광장, 잠수교, 인도교 수위표의 수위 자료를 이용하여 조도계수를 산정하였다. 이 4개 지점에서 공통적으로 시수위 자료를 획득할 수 있는 홍수사상은 표 5와 같다.

표 5에서와 같이 본 연구에서 고려된 홍수사상의 기간들은 '89-'91년으로서, 이 기간에는 서울시 구간의 한강종합개발이 이미 끝났고 경기도 구간은 자연상태 하도이었으므로 상기와 같은 단면측량자료를 사용하여도 큰 무리가 없는 것으로 볼 수 있다.

#### 4.2 조도계수의 산정

조도계수를 구하기 위해 전체 하도구간을 고안-광장, 광장-잠수교, 잠수교-인도교 등의 3구간으로, 유량 규모를 12개 구간으로 구분하였다.

고안과 인도교 사이의 조도계수를 구하는 데 있어서 가장 어려운 점은 잠실수중보의 해석 문제이다. 광장과 잠수교 구간에는 잠실수중보가 설치되어 있는데 그 높이는 6.2m로 전체 하도의 흐름에 많은 영향을 미친다. 조도계수는 하상의 조도뿐만

표 5. 조도계수 산정을 위해 선정된 홍수사상

번호	홍수기간	팔당댐 최대 방류량 (cms)	인도교 최대 수위 (m)
1	1989. 7.27-7.30	6,400	3.98
2	1990. 6.20-6.22	11,200	5.88
3	1990. 6.23-6.27	8,600	5.47
4	1991. 7.19-7.22	7,000	3.33

아니라 하천형태나 하천구조물의 영향도 반영하는데 하천구조물이 있는 지점에서는 매우 크게 나타난다. 이로 인해 수중보 지점의 조도계수는 매우 커지게 되고 수중보를 포함한 상태에서 계산한 광장과 잠수교 구간의 조도계수는 비현실적으로 크게 나타나게 된다. 즉 수중보 자체로 인한 조도계수의 상승이 이 구간 전체에 영향을 미쳐서 이 구간의 조도계수는 실제 조도계수보다 비현실적으로 크게

나타날 수 있다. 따라서 본 연구에서는 잠실수중보를 고려하지 않은 상태에서 3개의 구간중 고안-광장, 잠수교-인도교 구간의 최적 조도계수를 구하고 광장-잠수교 사이의 조도계수는 잠수교-인도교 구간의 조도계수와 동일한 것으로 가정하였다.

이 구간내에 포함되어 있는 왕숙천, 탄천, 중랑천 등의 지류 유입량은 수위-유량 관계곡선이 개발되어 있는 지점에서 단위도를 개발하고 이를 이

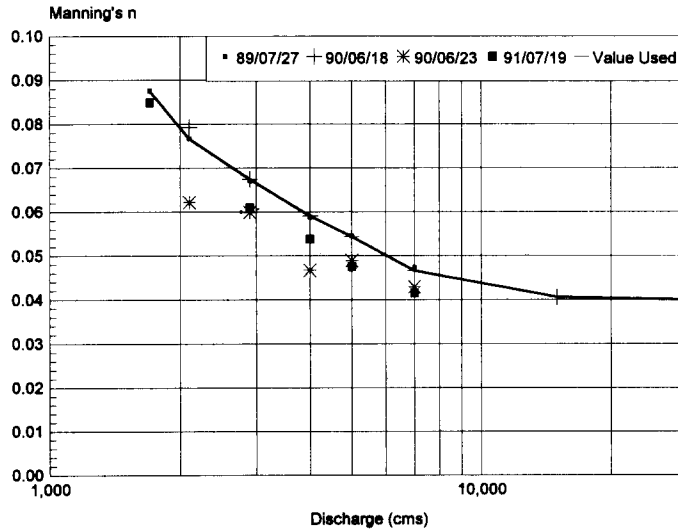


그림 1. 고안-광장 구간의 조도계수

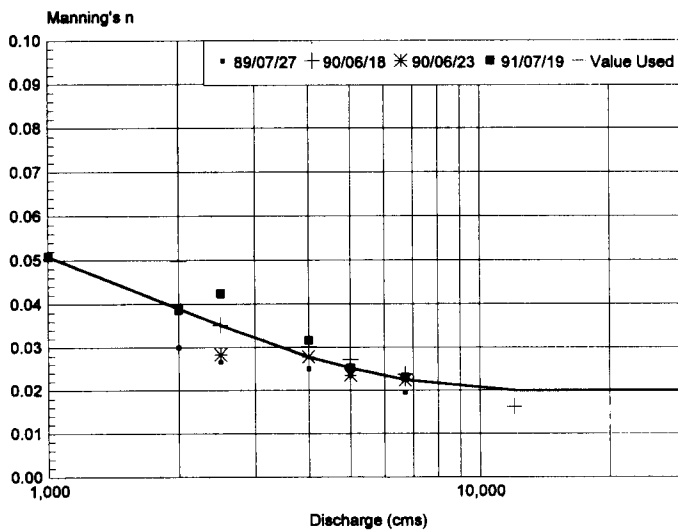


그림 2. 잠수교-인도교 구간의 조도계수

표 6. 본 연구에서 결정된 최적 조도계수

고안-광장 구간		잠수교-인도교 구간	
유량 (cms)	조도계수	유량 (cms)	조도계수
1,700	0.088	1,000	0.051
2,100	0.077	2,500	0.035
2,900	0.068	4,000	0.028
4,000	0.059	5,000	0.025
5,000	0.054	6,700	0.022
7,000	0.047	12,000	0.020
15,000	0.041	30,000	0.020
30,000	0.040	-	-

용하여 면적비로 처리하였다.

이러한 방법으로 결정된 유량별 최적 조도계수는 그림 1, 그림 2, 표 6에 나타내었다.

그림 1과 그림 2에서 보는 바와 같이 본 연구에서 구한 조도계수는 유량이 커짐에 따라 감소하였다. 조도계수는 하상재료나 하천형태 등에 의해서 변화될 뿐만 아니라 수위나 유량에 따라서도 그 크기가 변하는데 유량이 커질수록 작아지는 것이 일반적인 경향이다. 그러나 지역에 따라서는 유량이 늘어남에 따라 조도계수가 커질 수도 있으므로 유량에 따른 조도계수의 변화가 반드시 일정한 경향을 나타내는 것은 아니라고 알려져 있다(Fread, 1989). 현재의 한강 하도상황으로 미루어 보아 유량이 커짐에 따라 조도계수가 작아진다는 본 연구의 결과는 합리적인 것으로 판단된다.

결정된 조도계수를 구간별로 살펴보면 고안-광장 구간의 조도계수는 최대값이 유량 1,700 cms에서 0.088, 최소값이 유량 15,000 cms에서 0.040으로 나타나고 약 3,000 cms 이하의 유량에서는 0.060이상으로 나타나고 있다. 또 잠수교-인도교 구간의 조도계수는 최대값이 유량 1,000 cms에서 0.051, 최소값이 유량 12,000 cms에서 0.020으로 나타나서 이 구간의 조도계수는 0.05와 0.02사이에 있다. 이와 같이 두 구간의 조도계수가 많이 다르게 나타나는 것은 두 구간의 하상재료와 하도형태의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 우선 고안-광장 구간을 살펴보면 팔당댐으로 인해 유사 유입이 차단된 팔당댐 하류 수 km 지역은 안정화된 하도이면서 최심 하상고의 변화도 심한 편

이어서 어느 정도 큰 조도계수를 나타낼 수 있다. 이에 비해 잠수교-인도교 구간에서는 하폭도 거의 일정하고 고안-광장 구간에 비해 최심 하상고의 변화도 적은 편이다. 이와 같은 영향으로 잠수교-인도교 구간의 조도계수보다 고안-광장 구간의 조도계수가 크게 나타난 것으로 판단된다. 결정된 조도계수를 이용하여 계산한 각 홍수사상별, 각 수위표 지점의 계산된 수위와 실측 수위를 그림 3, 그림 4, 그림 5 및 그림 6에 나타내었다. 잠실수중보 지점의 수위를 모의하기 위해 과거 홍수사상 자료를 이용하여 이 지점의 수위-유량 관계곡선을 작성하였다. 그림 3은 다른 홍수사상과는 달리 행주대교 지점의 시수위 자료를 획득할 수 있었기 때문에 하류 경계를 행주대교로 설정하고 잠수교-인도교 구간의 조도계수를 인도교-행주대교 구간과 동일한 것으로 가정하여 계산한 각 지점의 수위이다. 이 홍수사상에 대한 잠실수중보 수위자료는 구할 수가 없었다. 네개의 홍수사상중 89/07/27 홍수사상(그림 3)과 90/06/23 홍수사상(그림 5)에서는 각 지점의 계산 수위가 실측 수위와 매우 잘 일치하여, 평방자승근 오차(root mean square error)가 0.32m 이하로 나타나고 있다. 90/06/20 홍수사상(그림 4)과 91/07/19 홍수사상(그림 6)에서는 상대적으로 오차가 조금 크게 나타나고 있다.

본 연구에서 사용한 유량규모는 광장 수위표 지점의 수위자료 부족으로 인해 1,000-12,000 cms로 한정되었다. 만일 광장수위표 지점의 수위자료를 무시하고 조도계수 구간을 고안, 잠수교, 인도교 등으로 설정하면 조도계수를 구할 수 있는 유량

범위도 넓어지고 훨씬 많은 홍수사상에 대해 조도계수를 구할 수 있다. 그러나 하도형상, 하천개수 상황 등으로 미루어보아 고안에서 잠수교까지를 동일한 조도계수 구간으로 보는 것은 무리가 있는 것으로 판단되어 자료의 부족에도 불구하고 광장지점을 기준으로 하였다.

본 연구에서 구한 조도계수의 타당성을 두가지 방법에 의해 검토하였다. 먼저 Manning의 평균 유속공식에 의해 잠수교-인도교 구간의 유량별 조도계수를 산정하여 본 연구에서 구한 조도계수와 비교하였으며 다음으로 기존에 다른 연구에서 결정된 한강 본류구간의 조도계수와 비교하였다.

### 4.3 비교 분석

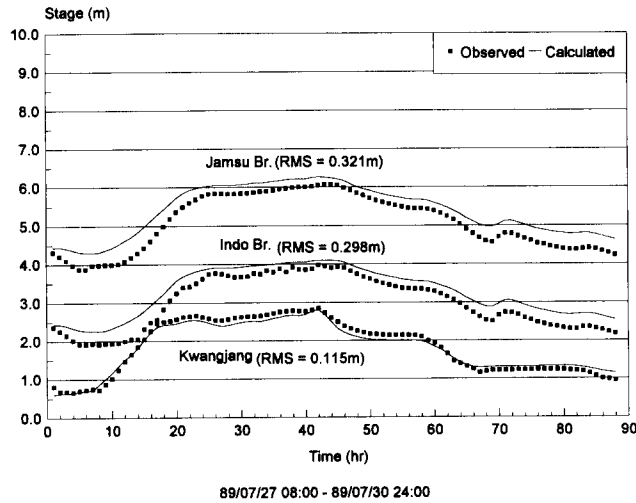


그림 3. 각 수위표 지점의 계산수위와 실측수위 ('89/07/27 홍수사상)

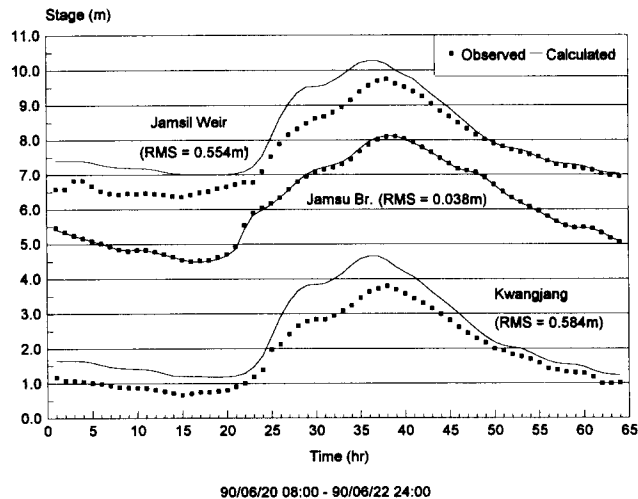


그림 4. 각 수위표 지점의 계산수위와 실측수위 ('90/06/20 홍수사상)



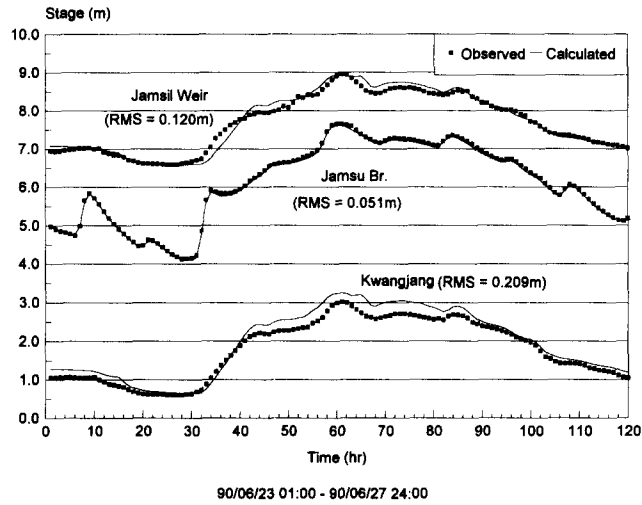


그림 5. 각 수위표 지점의 계산수위와 실측수위 ('90/06/23 홍수사상)

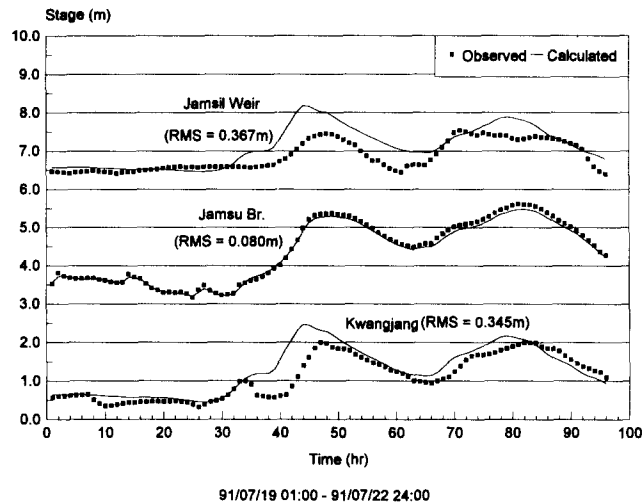


그림 6. 각 수위표 지점의 계산수위와 실측수위 ('91/07/27 홍수사상)

#### 4.3.1 Manning의 평균 유속공식에 의한 조도 계수와의 비교

식(5)로 표현되는 Manning의 평균 유속공식에 의해 조도계수를 산정하기 위해서는 유량측정성과 대상구간의 해당유량에 대한 마찰경사를 알아야 한다.

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2} \quad (5)$$

$$n = \frac{AR^{2/3} S^{1/2}}{Q} \quad (6)$$

여기서,  $Q$ 는 유량,  $n$ 은 조도계수,  $A$ 는 유수단면적,  $R$ 은 동수반경,  $S$ 는 마찰경사이다.

본 연구에서는 '90부터 '93년까지의 한강 인도교 지점에 대한 유량측정성적을 수집하여 분석에 이용

하였다(홍수량측정조사보고서, 1990; 한강유역 유량측정 및 유출분석 보고서, 1991; 한강유역 유량측정 및 유출분석 보고서, 1993).

등류공식을 이용해서 조도계수를 구하는데 있어서 가장 어려운 점은 마찰경사의 결정이다. Manning의 평균 유속공식은 원래 등류공식이지만 등류가 아닌 흐름에도 적용성이 있는 것으로 알려져 있다. 흐름이 등류이면 마찰경사와 수면경사, 하상

경사 등이 모두 동일하기 때문에 하상경사를 이용하여 조도계수를 계산할 수 있지만 흐름이 부정류가 되면 마찰경사를 알아야만 조도계수를 계산할 수 있다. 본 연구에서는 잠수교 지점의 수위와 인도교 지점의 수위를 이용해서 구할 수 있는 이 구간의 수면경사를 마찰경사로 가정하였다. 인도교 지점과 잠수교 지점의 유속차가 크지 않은 것을 감안하면 이와같은 가정은 타당하다고 판단된다. 이

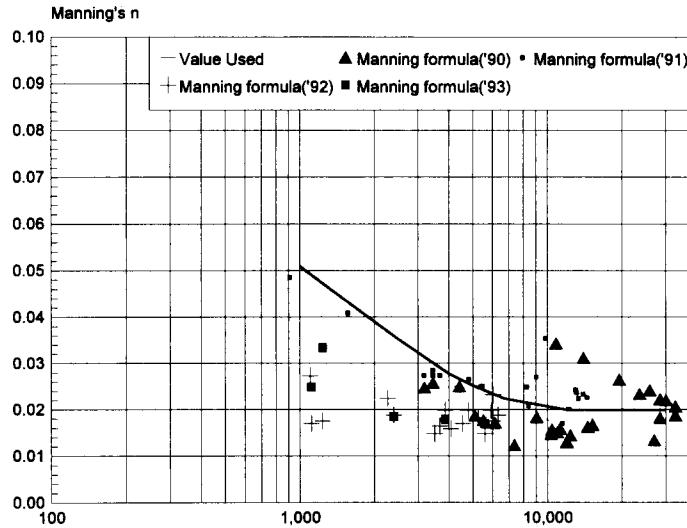


그림 7. 본 연구에서 구한 조도계수와 Manning의 평균유속공식에 의한 조도계수

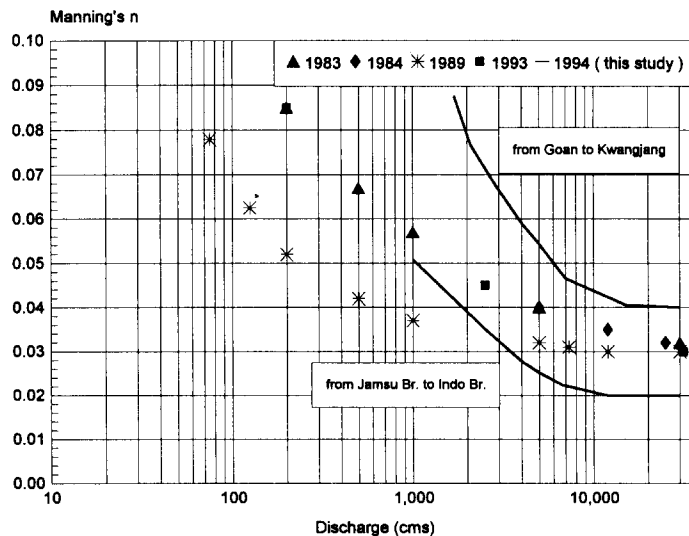


그림 8. 기존 연구결과와의 비교

(그림에서 연도표시는 각각 표 1(1983), 표 2(1984), 표 3(1989), 표 4(1993)를 나타냄)

와같은 방법에 의해 구한 조도계수를 본 연구에서 구한 조도계수와 비교하여 그림 7에 나타내었다.

Manning의 평균유속공식에 의해 구한 조도계수 값은 0.010에서 0.050 사이에 있으며 변화폭이 비교적 큰 것을 그림에서 확인할 수 있다. 이와 같이 변화폭이 크게 나타나는 것은 유량측정오차와 수위 오차 때문일 것으로 판단된다. 유량측정은 어느 한 순간에 이루어지지 않고 보통 30분에서 2시간 가량의 시간이 소요되므로 유량을 측정하는 동안에 수위의 변화가 심한 경우에는 수위에 따라 민감하게 변화하는 두 지점간의 수면경사를 결정하는 것이 쉽지 않고 그에 따라 조도계수값도 변화폭이 크게 된다. 그러나 전반적인 값의 범위는 본 연구에서 구한 값을 크게 벗어나지 않으며 특히 본 연구에서 자료의 부족으로 인해 추정하였던 10,000 cms 이상의 유량에 대한 조도계수 값도 유사한 경향으로 나타나는 것을 알 수 있다.

#### 4.3.2 기존 연구 결과와의 비교

본 연구에서 결정된 팔당댐 하류 구간의 조도계수를 이전 연구결과와 비교하여 보면 그림 8과 같다.

기존 연구결과에 의하면 5,000 cms 이상의 유량에서는 대부분 0.04-0.03 사이의 값들을 나타내고 있

다. 그러나 본 연구에서 구한 조도계수는 고안-광장 구간에서는 유량 5,000 cms 이상일 때 0.054-0.041으로 기존의 값보다 크고 잠수교-인도교 구간에서는 0.025-0.020으로 기존의 값보다 많이 작다. 또한 유량 1,000-5,000 cms 에서 고안-광장 구간의 조도계수는 기존 연구 결과보다 훨씬 크게 나타나고 있지만 잠수교-인도교 구간의 조도계수는 기존 연구결과와 크게 차이가 나지 않는다. 전체적인 조도계수의 범위를 살펴보면 기존의 연구결과가 최대 0.087, 최소 0.030, 본 연구의 결과가 최대 0.088, 최소 0.020의 범위에 있어 큰 차이를 나타내지 않는다. 1,000 cms 이상 유량에 대한 기존 조도계수는 고안-광장 구간의 조도계수와 잠수교-인도교 구간의 조도계수 사이에 위치하고 있다. 이와 같이 전체적인 범위는 비슷하지만 유량에 따른 조도계수가 많이 다르게 나타나는 것은 조도계수 산정방법의 차이에 일차적인 이유가 있다고 판단된다. 기존 연구결과들은 HEC-2와 같은 부등류 모형을 이용하여 고정된 유량에 대한 조도계수를 구하였으나 본 연구에서는 부정류 모형인 NETWORK 모형을 이용하여 과거 실제 홍수수문곡선을 가장 잘 재현할 수 있는 최적화된 조도계수를 구하였기 때문에 결과에 다소 차이가 있을 수 있다.

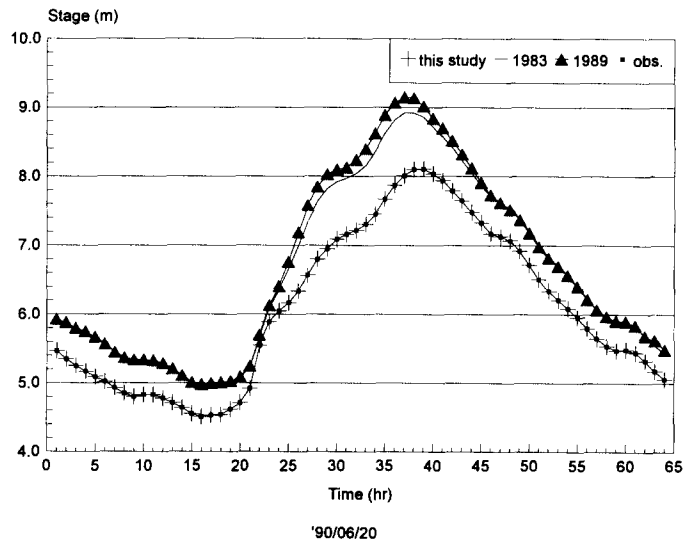


그림 9. 본 연구에서 구한 조도계수와 기존의 조도계수에 의해 구한 잠수교 지점의 수위 비교 (그림에서 연도표시는 각각 표 1,2,4(1983), 표 3(1989)을 나타내고 obs.는 실측치를 나타냄)

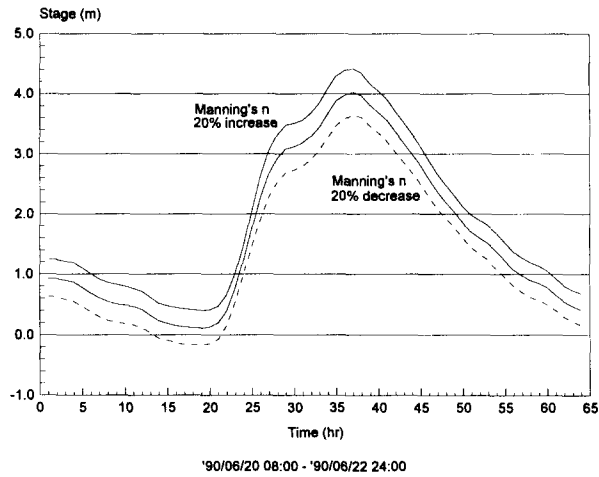


그림 10. 조도계수의 변화에 따른 수위의 변화

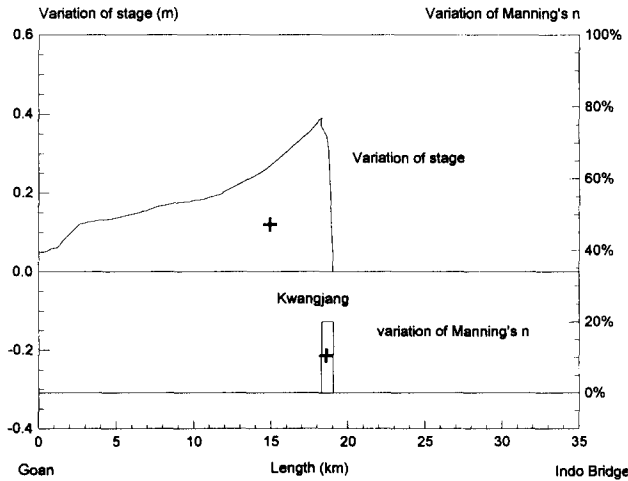


그림 11. 조도계수를 20% 증가시켰을 때의 수위변화

기존 연구결과에서 제시된 한강 본류의 조도계수와 본 연구에서 구한 잠수교-인도교 구간의 조도계수를 이용하여 구한 잠수교 지점의 수위변화를 그림 9에 나타내었다. 잠수교 지점은 하류경계인 인도교로부터의 거리가 3.66km로 비교적 짧고 하류경계조건을 인도교의 수위로 했기 때문에 큰 수위차는 발생하지 않고 있다. 그러나 본 연구에서 구한 조도계수에 의한 수위는 실측치와 일치하고 있으나 기존의 연구결과에서 구한 조도계수에 의한

수위는 수문곡선의 침투부분에서 1m 정도 크게 나타나고 있다.

본 연구에서 과거 홍수사상을 이용하여 구한 조도계수는 기존 연구 결과들보다는 대체로 크고 잠수교-인도교 구간에서 유량이 3,000 cms를 넘을 때는 작게 나타내지만 Manning의 평균유속공식에 의해 계산된 조도계수, 본 연구와 기존연구와의 비교결과 등을 고려할 때 적절하다고 판단된다.

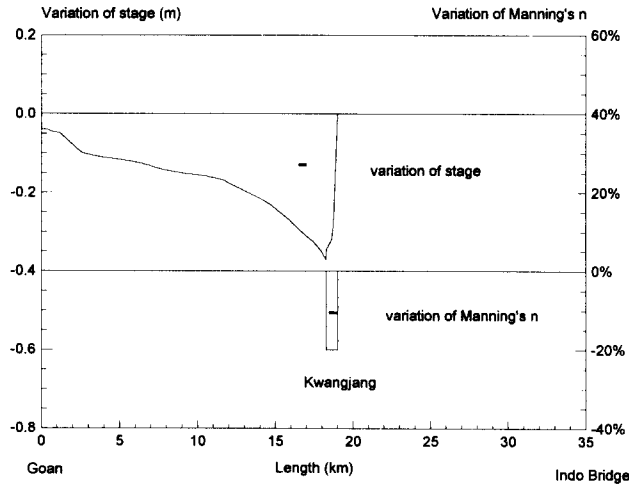


그림 12. 조도계수를 20% 감소시켰을 때의 수위변화

#### 4.4. 조도계수의 변화에 따른 수위의 변화

조도계수는 수학적으로 계산되는 절대적인 값이 아니라 각 하도의 특성에 따라 하도단면별로 추정되는 값이기 때문에 어느 정도 불확실성을 갖는다. 부정류 모형에 의해 계산된 조도계수도 모형에서 발생할 수 있는 여러 가지 오차요소를 모두 포함하고 있기 때문에 해당 지점의 물리적 특성을 정확하게 나타내는 것이라고 말할 수는 없다. 이러한 견지에서 조도계수의 변화에 따른 흐름요소의 변화는 조도계수의 특성을 나타낼 수 있는 하나의 인자가 될 수 있다. 본 연구에서는 조도계수의 변화에 따른 수위의 변화를 살펴보기 위하여 일정 구간의 조도계수를 20% 증가 또는 감소시켰을 때 나타나는 특정 지점 수위수문곡선의 변화와 전 구간에 걸친 수위변화량을 분석하였다.

광장-잠실수중보 구간의 조도계수를 20% 증가, 감소시켰을 때 나타나는 광장지점의 수위 변화는 그림 10과 같다. 수위가 급격하게 상승하는 상승부에서는 조도계수의 변화에 따른 수위변화가 크지 않지만 그 외의 부분에서는 수위변화가 크게 나타나고 있다. 침두부에서는 0.4m 정도, 즉 침두수위의 10% 정도의 수위변화를 나타내고 있다. 조도계수가 증가함에 따라 수위도 증가하며 조도계수

가 감소함에 따라 수위도 감소하는 것을 알 수 있다.

광장-잠실수중보 구간의 조도계수를 20% 증가, 감소시켰을 때 침두시간에 나타나는 전 구간에 대한 수위변화는 그림 11, 그림 12과 같다. 이 때 상류경계조건은 고안 지점의 유량이며 하류경계조건은 인도교 지점의 수위이다. 광장-잠실수중보 구간의 조도계수를 20% 증가시키면 광장지점에서는 0.4m 정도의 수위가 증가하는데 이 영향은 배수효과에 의해 상류경계인 고안지점까지 계속 연장되어 고안지점에서는 0.1m 정도의 수위상승을 보이고 있다. 광장지점에서 최대 0.4m 정도 증가한 수위는 조도계수가 증가구간이 끝나는 잠실수중보 지점에서 원래의 수위로 환원되고 있다. 조도계수를 20% 감소시키면 부호는 다르지만 유사한 결과가 나타난다. 이와 같이 하도내 일정구간의 조도계수 변화는 수위를 상승 또는 하강시키며 이 영향은 배수효과에 의해 상류의 상당한 구간까지 전파된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 부정류 모형인 NETWORK을 이용하여 한강 하류부(팔당댐-인도교) 구간에 대한 조도계수를 산정하였다. 전체 하도를 고안-광장, 잠수교-인도교 등 두 구간으로 구분하여 유량 구

모델로 조도계수를 산정하였다. 주요 연구결과는 다음과 같다.

(1) 산정된 조도계수는 유량이 커짐에 따라 작아지는 대하천에서의 일반적인 경향을 나타내고 있다.

(2) 고안-광장 구간의 조도계수는 0.088-0.040, 잠수교-인도교 구간의 조도계수는 0.051-0.020으로 나타났다.

(3) 산정된 조도계수를 이용하여 계산한 각 수위표 지점의 수위와 실측 수위는 비교적 잘 일치하였다.

(4) 본 연구결과를 기존 연구결과와 비교한 결과 유량에 따른 조도계수는 차이가 나지만 전체적인 범위는 유사하였다.

(5) 조도계수에 대한 수위의 민감도 분석 결과, 조도계수를 20% 증가 또는 감소시키기에 따라 수위는 10% 정도 증가 또는 감소하였다.

(6) 일정 구간에 대한 조도계수의 변화는 상류의 상당한 구간까지 수위 변화를 발생시켰다.

본 연구에서 산정한 한강 하류부의 조도계수는 하상의 조도를 표현하는 절대적인 값은 될 수 없으나 부정류 모형을 이용한 흐름계산시 직접 사용될 수 있을 것이며 부정류 모형을 이용해 흐름을 계산할 경우 또는 기타 다른 목적의 하천흐름 해석시에도 조도계수 산정을 위한 일차적인 값이 될 수 있을 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부 한강홍수통제소에서 한국건설기술연구원에 의뢰한 [홍수자료관리시스템 구축(1994)] 사업중 수리학적 모형을 이용한 실시간 홍수예보모형의 개발 부분중의 일부이다. 본 연구를 지원해 주신 한강홍수통제소 담당관들에게 감사드린다.

## 참 고 문 헌

경기지구 한강종합개발계획 보고서 (1986). 경기도.

김현영, 박승우 (1989). “금강 하류 홍수의 부정류 해석.” 한국수문학회지, 제22권, 제1호, pp. 99-107.

서울시 관내 하천제방 안전도 검토 및 치수종합대책 수립보고서 (1992). 서울특별시.

유권규, 김형섭, 김활곤, 우효섭 (1993). “충적하천의 하상마찰 변화에 대한 조사 분석.” 대한토목학회 논문집, 제13권, 제4호, pp. 111-121.

잠실수중보 수리모형 실험보고서 (1984). 국립건설시험소, 건설부.

한강유역 유량측정 및 유출분석 보고서 (1991). 한강홍수통제소, 건설부.

한강유역 유량측정 및 유출분석 보고서 (1993). 한강홍수통제소, 건설부.

한강주운개발사업 타당성 조사보고서 (1989). 한국수자원공사, 건설부.

한강하류 수질보전 대책수립 조사보고서 (1993). 한강관리사업소, 서울특별시.

한강하류부 이동상 수리모형 실험보고서 (1983). 국립건설시험소, 건설부.

홍수량측정조사보고서 (1990). 한강홍수통제소, 건설부.

홍수자료관리시스템 구축 (1994). 한강홍수통제소, 건설부.

Fread, D.L., and Smith, G.F. (1978). “Calibration technique for 1-D unsteady flow models.” *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 104, No. HY7, pp. 1027-1044.

Fread, D.L. (1989). “Flood routing and the Manning n.” *Proc. of the International Conference for Centennial of Manning's Formula and Kuichling's Rational Formula*, B.C. Yen, ed., Charlottesville, Va., pp. 699-708.

French, R.H. (1985). *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill, New York.

〈접수: 1995년 6월 5일〉