

현장실측에 의한 조도계수 산정의 불확실도 평가

Uncertainty Analysis in Estimation of Roughness Coefficient Using the Field Measurement Data

김 지 성* / 이 찬 주** / 김 원***
Kim, Ji Sung / Lee, Chan Joo / Kim, Won

Abstract

In this study, validity and limitation of the estimation of roughness coefficient using the measured field data are investigated and the errors of the calculated roughness coefficient are analyzed. The assumption of uniform flow led to much difference of the computed results in low flow, and this is due to change of the cross-section informations such as flow area and hydraulic radius rather than the difference of velocity head. From the comparison between the estimations of average roughness coefficient in the reach which is relatively long, the calculation using the modified Newton-Raphson method is very efficient and accurate. In the measured roughness coefficient, the errors of measured flow and stage are included and the lower flow is, the larger the magnitude of error of measured roughness coefficient is. But the error of depth and velocity associated with uncertainty of roughness coefficient is less than about 5% in the both of low and high flow, and it shows the validity of measured roughness coefficient.

keywords : roughness coefficient, uncertainty, field data, modified Newton-Raphson method

요 지

본 연구에서는 현장에서 실측된 유량 및 수위로부터 산정된 조도계수의 오차를 분석하고 그 타당성과 한계를 검토하였다. 자연 하천흐름을 등류로 가정하여 산정된 조도계수는 저유량 규모에서 부등류로 계산된 조도계수와 큰 차이를 나타내었으며, 이는 속도수두의 차이보다 평균 단면적, 동수반경 등 단면정보에 크게 영향을 받았다. 상대적으로 긴 구간에서 홍수량 규모의 평균 조도계수 산정에서는 구간 상하류만의 수위 자료를 이용하여 조도계수를 산정하는 수정 Newton-Raphson 방법이 구간 내 다수의 실측 수위로 산정된 평균 조도계수와 비교하여 효율적이고 정확한 해를 제공하였다. 현장 실측으로 조도계수를 산정할 경우, 수위 및 유량 측정오차로 인하여 홍수기보다 저유량 규모에서 산정된 조도계수의 불확실도가 증가되지만 이로 인하여 발생하는 수심 및 유속의 불확실도는 유량규모와 무관하게 5% 내외의 유사한 결과가 나타남으로써 실측 수위를 이용한 조도계수 산정의 타당성을 확인하였다.

핵심용어 : 조도계수, 불확실도, 현장자료, 수정 Newton-Raphson 기법

* 한국건설기술연구원 하천·해안연구실 박사후연구원
Post-Doc., River & Coast Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, Korea
(e-mail: jisungk@kict.re.kr)
** 한국건설기술연구원 하천·해안연구실 연구원
Researcher, River & Coast Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, Korea
*** 한국건설기술연구원 하천·해안연구실 책임연구원
Principal Research Fellow, River & Coast Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, Korea

1. 서론

이수, 치수 및 환경 등 다양한 목적의 하천 유지관리를 위하여 수치모형의 활용성은 더욱 증가되고 있다. 그러나 수치모형을 이용한 해석결과는 자연현상을 재현하는데 있어 하도의 종횡단 단면과 흐름저항 요소의 시·공간적 변화, 경계조건 및 모형검증을 위한 측정자료의 오차, 수치모형의 계산오차 등 많은 불확실한 요소를 내포하고 있으므로 이를 정성적, 정량적 분석하기 위한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 불확실성을 내포한 이러한 요소 가운데 조도계수에 국한하여 분석을 수행하고자 한다.

조도계수는 하상재료의 조도(roughness)를 나타내는 척도이지만, 실제 수치모형의 적용을 위해서는 하천에서 발생하는 모든 흐름저항, 다시 말해서 하상재료 및 하상표면 특성에 의한 하상마찰저항, 하상변화에 의한 형상저항, 식생에 의한 흐름저항, 수공구조물 등의 장애물에 의한 흐름저항, 유속잡물에 의한 흐름저항 등을 하나의 값으로 반영한 복합적 인자이다. 기존 연구결과(김원 등, 1995; 황의준과 전경수, 1997; 이정규와 이창현, 2004; 이신재와 박상우, 2006)로부터 조도계수는 유량의 증가에 따라 감소하는 정성적인 특성을 보인다. 이러한 특성은 유량의 증가로 인하여 구간의 평균 합성 조도계수에 상당한 영향을 미칠 수 있는 요소가 새롭게 발생하지 않는 경우에 상대조도의 감소로 인하여 발생하는 일반적인 현상이다.

조도계수의 불확실성은 수치모형의 계산결과인 수위 또는 유량의 결과에 영향을 미치게 된다. Fread(1988)는 Teton 댐 붕괴 모의에서 조도계수가 20% 변화할 때 5% 이하의 홍수심 변화가 발생됨을 보였으며, 이로부터 Manning 조도계수의 불확실도가 상당히 크더라도 수위계산 과정에서 그 효과가 상당히 감소한다고 하였다. 그러나 김원 등(1995)은 한강에서 일부구간의 조도계수를 20% 변화시켰을 때, 첨두 홍수위가 최대 10% 정도 변화된다고 하였으며, 이는 대상으로 하는 홍수사상의 유량크기에 따라 조도계수의 불확실도가 홍수위의 불확실도에 미치는 영향이 달라질 수 있음을 의미한다. Wohl(1998)은 5개 강의 과거 홍수흔적으로부터 4가지 방법으로 조도계수를 산정하여 홍수량을 계산하였다. 그의 연구결과에 의하면 하상경사가 0.01 이하일 경우, 조도계수가 25% 변화될 때 산정된 유량은 최대 20%의 변화가 있었으며, 홍수량이 큰 대규모하천에 비하여 수면폭과 수심의 비가 작은 급경사 소하천에서 조도계수의 민감도가 크게 나타나는 것으로 나타났다. 이는 조도계수의 변화가 유속의 산정에 큰 영향을 미칠 수 있

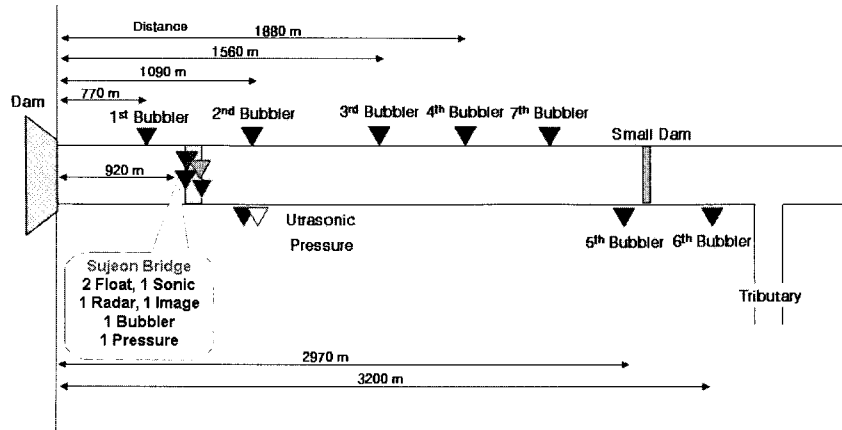
음을 의미하며, 중소규모 하천에서의 조도계수 산정방법에 특별한 주의가 요구됨을 알 수 있다.

하천설계기준(2002)에 따르면 하천의 조도계수는 하천 내 수문량 크기에 영향을 주는 인자, 하도의 종횡단 모양에 따른 변화, 하천 내 인위적 활동, 실측 및 기타 오차를 고려하여 연속적인 관측결과로부터 산정하고 검증하여야 함을 명시하고 있다. 그러나 연속적인 유량 및 수위 실측의 현실적 어려움, 그리고 기왕에 발생된 홍수량 추정치의 불확실성 및 가용한 흔적수위의 부족은 하천의 조도계수 산정이 매우 어려운 작업으로 남는 원인이 되고 있다. 이찬주 등(2007)은 1985년 이후에 발간된 국내 하천정비기본계획을 대상으로 전체 186개의 하천 조도계수 산정실태를 분석하였는데 약 47%가 하도 및 하상의 상황에 따라 제시된 도표를 활용하거나 기존 계획 또는 인근 하천에서 수립된 자료를 참고하여 조도계수를 활용함으로써 다소 임의적으로 조도계수가 산정되고 있음을 지적하였다.

본 연구에서는 실측자료를 이용한 기존 조도계수 산정의 타당성과 한계를 분석하고 유량규모에 따른 조도계수의 불확실도가 각각의 유량규모에서 수위 및 유속에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 이를 위하여 남한강 제1지류인 달천에서 실측을 통하여 산정된 조도계수와 하천정비기본계획에 수록된 조도계수를 비교하고 발생한 오차로 인한 수위의 변화를 분석하였다. 그리고 실측을 통한 조도계수 산정에는 수위 및 유량 측정의 오차에 영향을 받으므로 다양한 유량 규모에서 발생할 수 있는 조도계수의 불확실성을 정성적, 정량적으로 분석하였고, 또한 이에 상응하는 수위, 유속과 같은 수리학적 인자의 불확실성을 분석하였다.

2. 실측수위를 이용한 조도계수 산정방법

본 연구의 대상구간은 충북 괴산군 칠성면 외사리에 소재한 괴산댐으로부터 3.3 km 하류의 쌍천과 합류하는 구간이다. 괴산댐의 유역면적은 675.2 km²로 대상구간의 계획홍수량은 50년 빈도규모의 1,750 m³/s이며, 시험하천의 하상재료는 주로 호박돌이고 하상경사는 1/650 정도로서 일반적인 자갈하천의 양상을 보이고 있다. 대상구간에는 Fig. 1과 같이 총 8종 18대의 수위계가 설치되어 있으며 댐 방류량과 수위 실측자료로부터 다양한 유량 규모에서 조도계수의 산정이 가능하다. 본 연구에서는 2005년 7월 홍수사상에 취득한 연속적인 수위자료를 활용하였으며, 하천의 사행과 지류 유입의 영향을 배제할 수 있는 1번~5번 지점 수위, 수전교 수위를 사용하였다.



(a) Location of Water Level Measurement



(b) Sight of Each Reach

Fig. 1. Study Site and Location of Water Level Measurement Instruments

혼적 수위 또는 실측 수위에 의한 조도계수 산정 방법은 조도계수의 역산에 사용되는 방정식에 따라 등류, 부등류, 부정류 계산으로 구분할 수 있다. 이 때 부등류 및 부정류 계산의 마찰경사는 정상등류 조건의 Manning 식으로부터 추정된다. 등류 계산에 의한 조도계수 산정식은 Eq. (1)과 같다.

$$n^2 = \frac{\overline{A}^2 \overline{R}^{4/3}}{Q|Q|} \left(-\frac{dH}{dx} \right) \quad (1)$$

여기서 \overline{A} 와 \overline{R} 은 조도계수 산정 구간의 평균흐름단면적과 평균 동수반경을 의미하고, Q 는 구간의 유량, H 는 수위, n 은 Manning 조도계수이다.

실측자료를 이용하여 등류 계산으로 조도계수를 산정하는 경우, 구간의 상·하류가 비교적 균일하여 평균 유속의 변화가 크지 않은 것으로 가정함으로써 수면경사와 에너지경사를 같게 두고, 구간 내의 단면변화를 무시함으로써 한 단면의 흐름단면적과 동수반경을 사용하여 Eq. (1)로 조도계수를 산정한다. 그러나 이신재와 박상우(2006)는 섬진강 중하류부 구간에서 부정류 모형을 이용한 유량별 조도계수와 Eq. (1)에 의해 산정된 조도계수가 큰 차이를 보임을 확인하였으며 그 원인으로 해석방법 및 산정방법이 상이하여 발생하는 오차라고 하였다.

부등류 계산에 의한 조도계수 산정식은 Eq. (1)에서

속도수두의 차이를 고려한 Eq. (2)와 같다.

$$n^2 = \frac{\overline{A}^2 \overline{R}^{4/3}}{Q|Q|} \left(-\frac{d}{dx} \left(\frac{v^2}{2g} \right) - \frac{dH}{dx} \right) \quad (2)$$

$$= \frac{\overline{A}^2 \overline{R}^{4/3}}{Q|Q|} \left(\frac{Q^2 \overline{B}}{g A^3} \frac{dH}{dx} - \frac{dH}{dx} \right)$$

여기서 \overline{B} 는 구간의 평균 수면폭이며, g 는 중력가속도를 의미한다. 이 식을 적용하기 위해서는 구간 내 조도계수의 변화가 크지 않아야 하며, 하상은 거의 수평에 이르도록 경사가 작아야 한다. 또한 단면의 급 확대, 급 축소가 있는 경우 적용할 수 없다(하천설계기준, 2002).

부정류 계산에 의한 조도계수 산정식은 부정류에 관한 운동방정식으로부터 Eq. (3)과 같다.

$$n^2 = \frac{\overline{A}^2 \overline{R}^{4/3}}{Q|Q|} \left(-\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q\overline{B}}{gA^2} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{Q^2 \overline{B}}{gA^3} \frac{dH}{dx} - \frac{dH}{dx} \right) \quad (3)$$

여기서 유량의 시간도함수 항과 수위의 시간도함수 항은 서로 다른 부호를 나타내고 있다. 이는 조도계수 산정에 있어 시간에 따른 수위 및 유량의 변화 영향이 상당부분 감소할 수 있음을 의미한다.

자연하천에서 연속적인 유량의 실측은 매우 어려운

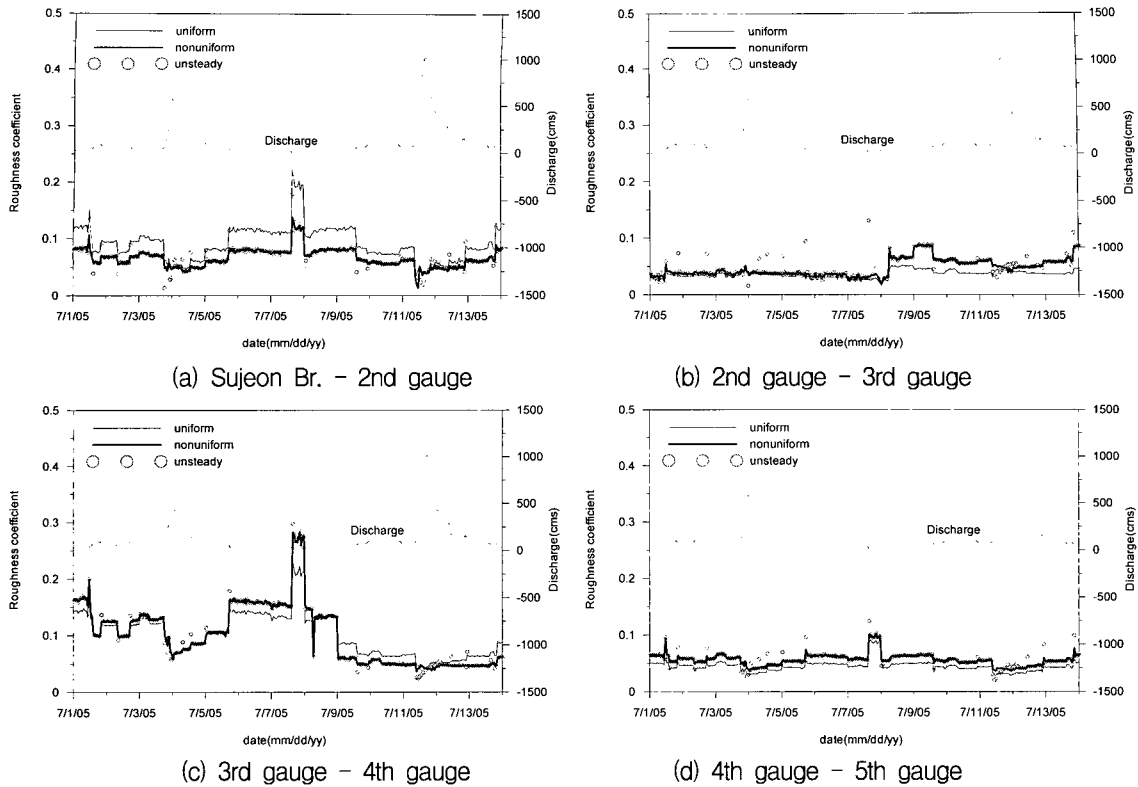


Fig. 2. Roughness Coefficients Calculated by 3 methods : uniform with 1 section information, nonuniform, unsteady calculation

일이다. 따라서 본 연구에서는 대상구간의 각 관측지점에서 실측한 수위와 댐 방류량 자료를 사용하여 세 가지 방법에 의한 조도계수를 산정하였다. 각 구간의 평균값은 상·하류단 값의 기하평균값을 사용하였고 산정 결과는 Fig. 2와 같다.

부등류와 부정류 계산에 의하여 산정된 조도계수는 유량이 상승하거나 하강하는 시점을 제외하고 유사한 결과를 보이고 있다. 이는 Eq. (3)에서 시간의 도함수 항이 지배적이지 않는 경우 Eqs. (2) and (3)이 동일한 식이기 때문이다. Fig. 2에서는 유량이 하강하는 시점에서 부등류 및 부정류 계산에 의한 조도계수의 차가 유량이 상승하는 시점에 비하여 크게 나타나는데, 이는 댐 방류량의 감소 시 각 수위측정 지점의 유량 감소를 과대하게 추정함으로써 인하여 발생하는 문제이며, 각 측정지점의 연속적인 유량자료가 확보된다면 그 차이가 줄어들 수 있을 것으로 판단된다. 한편 각 구간 하류단 한 단면에서 등류 계산에 의해 산정된 조도계수는 구간에 따라 다소 큰 차이를 보이고 있다. Fig. 1 구간현황에서 알 수 있듯이 2-3번 수위계 구간, 4-5번 수위계 구간의 경우 하류부에 위치한 돌보와 보에 의한 배수영향을 크게 받으므로 분석대상에서 제외하더라도, 수전교와 2번 수위계 구간에서는 한 단면을 사용한 등류계산 결과가 크게 산정되었고 3-4번 수위계 구간에서는

작게 산정되었다. 특히 3-4번 수위계 구간에서는 유량의 규모가 커짐에 따라 등류계산 결과가 다시 크게 산정되는 결과를 나타내었다. 이는 Manning 식에 적용되는 한 단면이 구간의 평균적인 값을 대표할 수 없기 때문이며, 또한 그 단면의 수면경사가 아니라 구간의 수면경사가 사용되었기 때문이다. 그러나 유량이 증가함에 따라 한 단면의 정보와 구간 평균 단면의 정보차이가 줄어들며 수면경사 또한 선형화되어 부등류 계산결과와의 차이가 감소한다. 본 연구의 수전교와 2번 수위계 구간에서는 최저유량인 $16m^3/s$ 에서 최대 63.4%의 차이를 나타내었으며, $400m^3/s$ 이상의 유량규모에서 약 10%의 차이를 나타내었다.

유량의 변화가 크지 않으며, 단면이 급변하지 않는 자연하천에서 속도수두의 차이가 조도계수 산정에 미치는 영향은 다소 적을 것으로 예상된다. 따라서 앞서 분석한 네 구간에서 한 단면에 의한 정보가 아닌 상·하류 두 단면의 기하평균값을 사용하여 등류 계산한 결과를 부등류 계산결과와 비교하여 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3으로부터 두 단면의 정보를 이용하여 산정된 조도계수와 부등류 계산에 의해 산정된 조도계수는 거의 같게 계산됨을 알 수 있으며, 수전교와 2번 수위계 구간의 경우 저유량에서 10%이하의 차이를 나타내고 있으며, 모든 유량규모에서 평균 4%의 차이를 나타내었다.

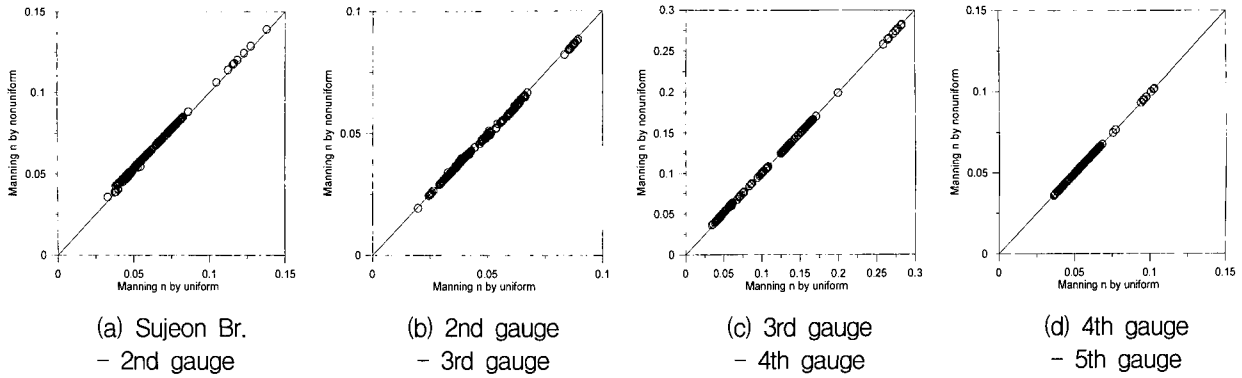


Fig. 3. Comparison of Roughness Coefficients : uniform with 2 sections information, nonuniform calculation

3. 구간 평균 조도계수 산정 및 불확실도 분석

실측을 통한 하천 조도계수의 산정결과는 조도계수가 공간적으로 매우 다른 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 특성은 저유량의 경우 더욱 두드러지며 유량이 증가함에 따라 그 효과가 줄어들고 있다. 이는 유량의 증가로 인한 수위의 상승으로 흐름저항에 영향을 줄 수 있는 요소들의 잠식으로 공간적 변화가 줄어들고, 각 구간에서의 수면경사 변화가 줄어들기 때문인 것으로 판단된다. 공간적으로 상이한 조도계수를 각 측량단면마다 다르게 적용하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 하천설계기준(2002)에서는 종횡단면형상이나 하상재료가 크게 변하는 지점을 조도계수의 변환점으로 택하거나 계산수위와 실측수위의 차가 크게 변화하는 지점을 택하여 구간평균 조도계수를 산정할 것을 명시하고 있다. 이러한 기준은 공간적으로 상이한 조도계수를 모두 반영할 수 없는 현실을 고려해 볼 때 반드시 필요한 것이지만 실무에 적용하기 위하여 다소 부족하고 주관적인 기준이 될 수 있으므로 향후 관련된 연구가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서 대상 하천구간의 평균 조도계수를 역산하는 과정은 다음과 같다.

- ① 조도계수가 일정할 것으로 예상되는 구간을 분할하고 각 구간의 상·하류단 수위와 유량을 측정한다.
- ② 하류단 수위로부터 부등류 배수계산을 수행하고 각 구간 상류단 계산수위(h_u)와 실측수위(h'_u)의 차를 Eq. (4)로 계산한다.
- ③ Eq. (4)는 구간 평균조도계수 n 의 함수이므로 Eq. (5)와 같이 수정 Newton-Raphson 기법으로 적절한 n 값을 산정한다.
- ④ 수정 Newton-Raphson 기법의 초기 계산을 위하여 초기 가정치 n^0 의 1%을 변화시킨 Eq. (6)으로

초기 구배를 계산하고, 허용오차가 0.0001m 일 때 까지 반복해법을 수행한다.

$$\Phi = h_u - h'_u \quad (4)$$

$$n^{k+1} = n^k - \frac{\Phi^k}{(\Phi^k - \Phi^{k-1}) / (n^k - n^{k-1})} \quad (5)$$

$$n^1 = n^0 (1.0 - 0.01 |\Phi^0| / \Phi^0) \quad (6)$$

3.1 대상구간의 적용

본 연구의 대상구간은 전체 3.3 km 구간으로 홍수기 수면경사가 크게 변하지 않으므로 하천정비기본계획 수립 시 전체구간에서 동일한 조도계수가 사용되었다. 따라서 본 연구에서는 조도계수의 변환점이 없이 전 구간의 평균 조도계수를 앞서 소개된 절차로 1번 수위계를 상류단, 5번 수위계를 하류단으로 지정하여 산정하였다. 모든 유량조건에서 초기 조도계수는 0.1을 사용하였으며, 유량이 37 m³/s인 경우와 1,000.0 m³/s인 경우 조도계수의 수렴과정은 Fig. 4와 같고 대부분의 유량규모에서 10회 이하 반복 후 수렴하였다.

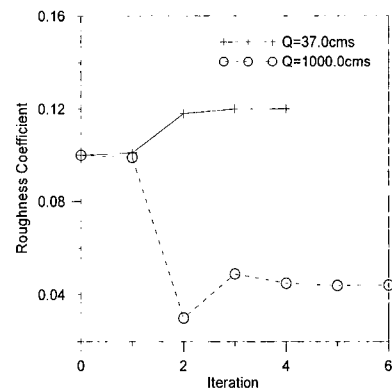
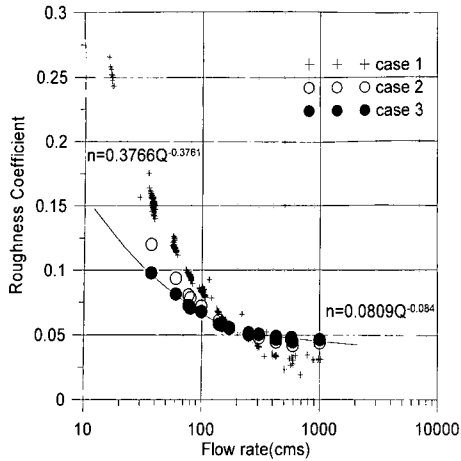
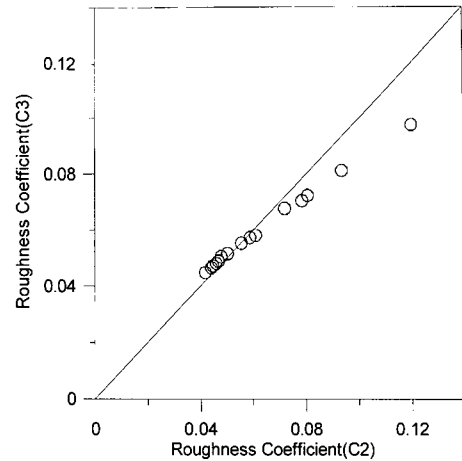


Fig. 4. Estimate of Roughness Coefficient by Modified Newton-Raphson Method



(a) Variation of Manning n associated with flow



(b) Comparison of Inverse-Calculated and Measured n

Fig. 5. Average Roughness Coefficient in Study Reach

대상구간에서 상류단과 하류단의 단면정보와 두 단면에서의 수면경사를 이용하여 Eq. (2)의 부등류 계산으로 산정된 유량별 조도계수(case 1)와 본 연구에서의 절차로 산정된 유량별 조도계수(case 2), 그리고 대상구간의 모든 실측 수위자료를 사용하여 Eq. (7)과 같이 Barnes(1967)가 제안한 방법으로 산정된 유량별 조도계수(case 3)를 Fig. 5에 비교하였다. Hicks and Mason (1991)은 Eq. (7)을 사용하여 뉴질랜드 하천의 실측자료로부터 조도계수를 산정한 바 있다.

$$n = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{(h_1 + h_{v_1}) - (h_m + h_{v_m}) - \sum_{i=2}^m (k_{i-1,i} \Delta h_{v_{i-1,i}})}{\sum_{i=2}^m \frac{L_{i-1,i}}{Z_{i-1} Z_i}}}$$

(7)

여기서 Z 는 $AR^{2/3}$ 이고, Δh_v 는 속도수두차, L 은 단면 사이 거리이며, k 는 수축/확장계수로 단면이 수축되는 경우는 0, 확장되는 경우는 0.5로 가정된다.

Fig. 5(a)에서 상하류 두 단면 정보를 이용한 부등류 계산 결과(case 1)는 다른 방법으로 산정된 조도계수와 큰 차이를 나타낸다. 이는 구간의 평균 조도계수 산정에 있어 구간 내의 단면정보를 반영하지 않고 상하류 단면에서 실측된 값으로 조도계수를 산정할 경우, 전 유량규모에서 구간을 대표할 수 없는 조도계수가 산정될 수 있음을 의미하며, 최대 49%, 평균 27%의 차이를 나타내었다. 반면에 반복해법을 이용하여 역산한 조도계수(case 2)의 경우, 다수의 실측자료에 의해 산정된 조도계수(case 3)와 100.0m³/s 이상의 유량에서 약 5%의 차이를 나타내고 있으며, 저유량에서는 약 20%의

차이를 보인다. Fig. 5(b)에서 조도계수 0.05 이상의 저유량에서 20%의 차이를 보이는 것은 전 구간을 동일한 조도계수로 가정함으로써 조도계수의 공간적 변화를 고려하지 못하였기 때문이며, 저유량의 경우 홍수기에 고려되는 조도계수의 구간 분할보다 세밀한 분할이 필요함을 알 수 있다.

3.2 조도계수에 의한 수리학적 인자의 불확실도 분석

실측값으로부터 조도계수를 산정하는 경우, 실측된 유량범위를 벗어나는 경우에 조도계수의 외삽이 필요하다. 대상구간에서는 Fig. 5(a)의 유량별 실측 조도계수 산정결과(case 3)로부터 200.0m³/s를 기준으로 2개의 회귀식을 작성할 수 있으며, 고유량 범위의 식으로부터 계획홍수량인 1,750m³/s의 조도계수는 0.043으로 추정할 수 있다. 하천정비기본계획에 기 수립된 대상구간의 조도계수는 0.033으로 본 연구에서 추정된 조도계수보다 약 23% 작게 산정되었음을 알 수 있으며, 과소하게 적용된 조도계수로 인하여 발생할 수 있는 계산수위 및 유속의 불확실도를 분석할 필요가 있다. 이를 위하여 하천정비기본계획에 수록된 조도계수를 참값으로 가정하고 +20%의 변화를 고려하였을 때, 유량이 최소 37 m³/s에서 계획홍수량인 1,750m³/s까지, 전체 7개 유량 규모의 경우를 분석하여 Fig. 6에 나타내었다. 계획홍수량 규모에서의 하류단 수위는 대수보의 계획홍수위인 111.31m를 적용하였으며, 나머지 유량규모에서는 5번 수위계의 실측 수위를 적용하였다.

계획홍수량이 1,750m³/s인 달천에서 20%의 조도계수 증가는 최대 약 15%의 수심 증가와 유속 감소를 야기하며, 그 크기는 수심의 경우 약 70cm 증가하고, 유

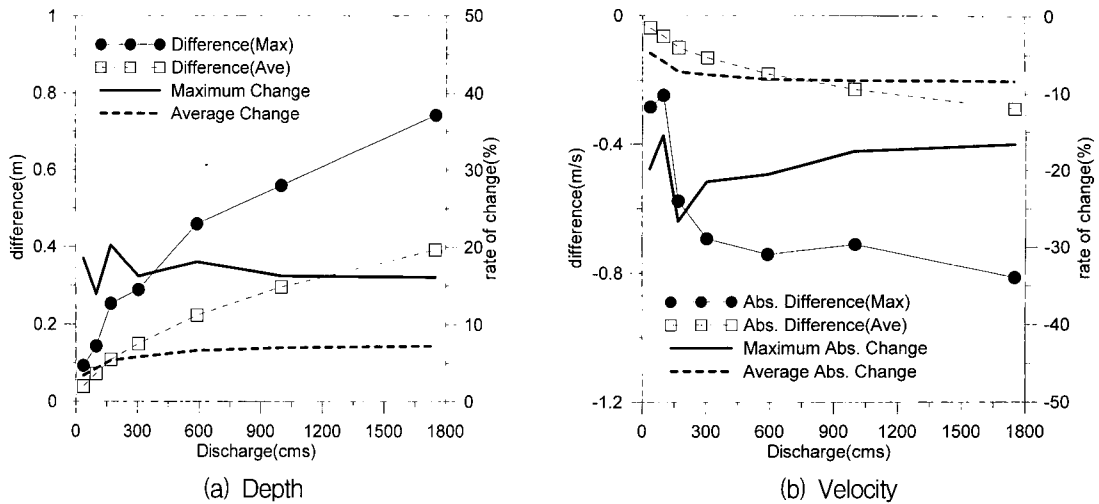


Fig. 6. Variation of Hydraulic Parameter associated with Discharges

속은 약 $0.8m/s$ 감소한다. 또한 일부 단면의 최대변화 뿐만 아니라 전 구간에서 평균적으로 7%의 수심증가, 8%의 유속감소를 야기한다. 유량규모가 줄어들수록 20%의 조도계수 증가가 수심과 유속에 미치는 최대 변화는 일부 특정 단면에서 발생하는 현상으로 유량에 따른 변화를 일반화할 수 없다. 그러나, 평균적인 변화는 유량규모가 줄어들어 따라 수심과 유속 모두 감소하는 경향이 있다. 1장에서 언급한 바와 같이 조도계수의 변화가 수위 계산에서 상당부분 감소되어 그 영향이 미미해지는 현상은 대규모의 유량규모에서 발생하는 현상이며 중소하천의 홍수량 산정에 있어 조도계수의 불확실도는 수심 및 유속에 매우 큰 영향을 줄 수 있음을 확인할 수 있다.

4. 실측오차에 의한 조도계수 산정의 불확실도

실측 수위와 유량자료를 이용한 조도계수 산정 결과인 Fig. 5로부터 기존 하천정비기본계획에 수립된 조도계수는 매우 큰 불확실성을 내포하고 있으며, 이로 인한 수위 산정에도 큰 불확실성이 포함되고 있음을 알 수 있다. 3장에서 분석된 바와 같이 조도계수의 불확실성이 수위 및 유속 산정의 불확실성에 미치는 평균적인 영향은 유량규모가 줄어들어 따라 감소하는 특성이 있지만, 실제 저유량의 조도계수는 홍수기 조도계수에 비하여 매우 크게 산정되며, 달천의 경우와 같이 그 크기가 홍수기 실측 조도계수의 100%를 초과할 수 있다. 따라서 하천의 조도계수 산정에는 반드시 실측 수위를 통한 직접적인 산정이 필요하며 저유량의 경우는 공간적인 조도계수의 변화가 크기 때문에 좀더 세밀한 조도계수 구간의 분할이 필요하다.

실측을 통한 조도계수의 산정에는 실측과정에서 발생할 수 있는 두 가지의 불확실성이 포함되어 있다. 첫

번째는 수위측정의 오차이다. 이상호(2001)는 수위계의 기계 오차와 바람에 의한 중력과의 크기한계를 고려하여 관측소별로 $\pm 40.48mm$ 의 오차를 가지고 있으며, 이러한 수위관측오차는 평균이 "0"이고 표준편차가 σ 인 표준정규분포를 따르는 것으로 가정하였고, 오차 표본의 99%가 오차범위에 들도록 하기 위하여 표준편차를 $15.71mm$ 로 산정하였다. 두 번째는 유량측정의 오차이다. 21세기 프론티어 연구개발사업에서는 국내의 유량 측정오차를 선진국 수준인 10%로 향상시키고, 최대 5% 유량측정오차를 목표로 연구가 수행중이다. 따라서 본 연구에서는 유량측정의 불확실도를 5%와 10%로 가정하여 오차의 최대값과 최소값을 산정하였으며, 균등분포를 따르는 것으로 가정하였다. 두 입력자료의 불확실도를 고려하여 유량이 $37m^3/s$, $1,000.0m^3/s$ 인 경우 산정된 조도계수의 불확실도는 Fig. 7과 같다.

Fig. 7에 도시된 Monte Carlo 모의를 통하여 추출된 조도계수로부터 대상구간의 수심, 유속과 같은 수리학적 인자의 변화를 살펴보기 위하여 각 조도계수를 사용한 부등류 계산을 수행하였다. 그리고 하천정비기본계획에 수록된 대상하천의 조도계수를 두 유량규모에 적용할 경우 발생될 수 있는 수심, 유속의 변동성을 Fig. 8에 함께 나타내었다.

기존의 하천정비기본계획에 수록된 조도계수는 본 연구에서 산정된 조도계수에 비하여 $37m^3/s$ 의 경우 72.5%, $1,000m^3/s$ 의 경우 25% 작은 값으로 이러한 조도계수를 사용하여 수위와 유속을 산정할 경우 다소 큰 오차를 포함하게 될 것이다. 본 연구구간에서는 수심의 경우 $37m^3/s$ 유량에서 최대 61.33%, 평균 24.72%, $1,000m^3/s$ 유량에서 최대 20.17%, 평균 10.32%의 절대 오차가 발생하였고, 유속의 경우에는 $37m^3/s$ 유량에서 최대 233%, 평균 68%, $1,000m^3/s$ 유량에서 33%, 15%

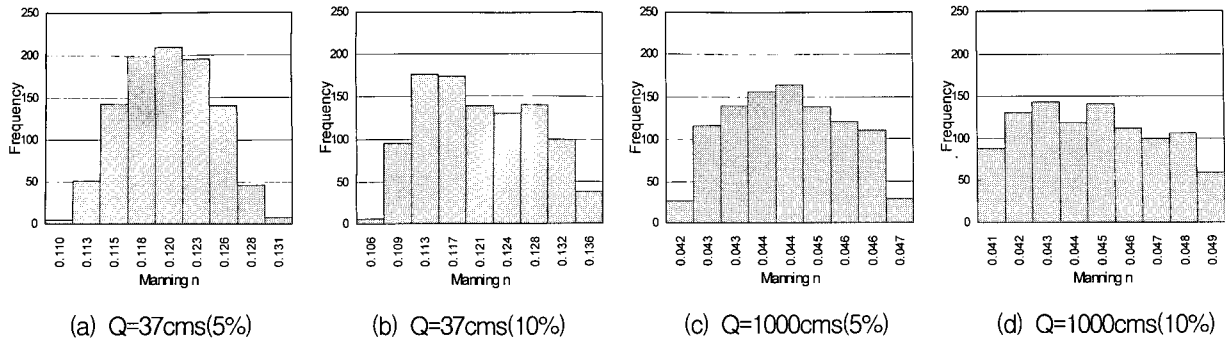


Fig. 7. Uncertainty of Calculated Manning n due to Error of Measurement

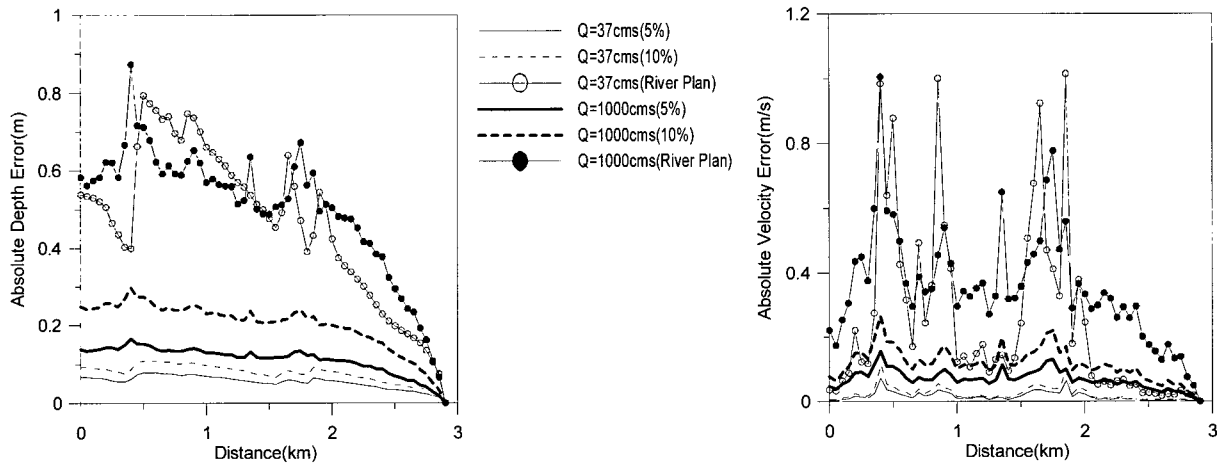


Fig. 8. Absolute Error of Hydraulic Parameters (Depth and Velocity)

Table 1. Statistics of Hydraulic Parameters associated with Error of Roughness Coefficient

	$Q=37\text{m}^3/\text{s}$ Error 5%			$Q=37\text{m}^3/\text{s}$ Error 10%			$Q=1000\text{m}^3/\text{s}$ Error 5%			$Q=1000\text{m}^3/\text{s}$ Error 10%		
	min.	ave.	max.	min.	ave.	max.	min.	ave.	max.	min.	ave.	max.
Manning n	0.109	0.120	0.132	0.104	0.121	0.137	0.042	0.044	0.047	0.040	0.044	0.049
Standard Deviation	0.004			0.007			0.001			0.002		
Variation(%)	9.85			14.03			6.21			11.25		
Absolute Depth Error(%)	max.	ave.	max.	ave.	max.	ave.	max.	ave.	max.	ave.	max.	ave.
	6.09	2.89	8.51	4.05	3.88	2.32	6.91	4.17				
Absolute Velocity Error(%)	max.	ave.	max.	ave.	max.	ave.	max.	ave.	max.	ave.	max.	ave.
	11.83	4.69	17.74	6.97	5.12	3.06	8.69	5.14				

의 절대오차가 발생하였다. 최근 하천 생태를 고려한 생태유량 산정 등에 수치모형이 활용되고 있으나 평저수량의 조도계수에 대한 연구가 부족한 실정으로 홍수기 조도계수를 준용하는 경우가 간혹 존재한다. 이때 평저수량의 조도계수는 홍수기 조도와 매우 큰 차이를 나타낼 수 있으며, 이로 인하여 산정된 수리학적 인자들에 대한 신뢰성이 상당히 떨어질 수 있다.

측정오차로 인하여 산정된 조도계수의 불확실도가 수리학적 인자들에 전파되어 각 인자의 불확실성을 야

기하게 되는데 Table 1에 유량규모와 유량실측오차로 구분하여 정리하였다. 모든 경우 측정수위의 오차는 동일하게 적용되었다. 유량 및 수위의 실측오차에 의한 조도계수 산정오차는 유량규모와 상관없이 유량 측정오차에 크게 영향을 받는 것으로 판단된다. 대상구간에서 $37\text{m}^3/\text{s}$ 의 경우, 5%, 10%의 유량측정오차는 약 10%, 14%의 조도계수 산정오차를 유발하고, $1,000\text{m}^3/\text{s}$ 의 경우 약 6%, 11%의 조도계수 산정오차를 유발하여 저유량의 실측 조도계수가 고유량에 비하여 보다 큰 불확실

도를 내포하게 된다. 이는 실측을 통한 조도계수의 산정에 있어서 홍수기보다 저유량 규모의 경우 더 큰 불확실도가 내포될 수 있음을 의미한다.

각 유량규모에서 Monte Carlo 분석을 통하여 산정된 조도계수의 불확실도가 수위 및 유속 산정에 미치는 영향을 분석하여 Table 1에 함께 나타내었다. 유량규모와 상관없이 동일한 조도계수 오차로부터 수위 및 유속의 오차를 산정한 Fig. 6에서 알 수 있듯이 저유량에서의 높은 불확실도는 고유량의 경우에 비하여 수리학적 인자에 미치는 영향이 상당부분 감소하게 된다. 따라서 37m³/s의 경우 실측 조도계수의 상대적으로 큰 불확실도에 상응하는 구간 평균 절대수심오차는 3%, 4%이고, 1,000m³/s의 경우 2%, 4%로 유사한 결과가 나타나게 되며, 오히려 산정된 수심의 편차는 저유량의 평균수심과 고유량의 평균수심의 비에 따라 저유량에서 더욱 작아질 것이다. 평균 절대유속오차의 경우에서도 수심의 경우와 유사한 결과가 계산되어, 37m³/s의 경우 5%, 7%이며, 1,000m³/s의 경우 3%, 5%이다.

5. 결 론

본 연구에서는 실측을 통한 조도계수의 산정에 있어 발생할 수 있는 오차를 분석하고 그 타당성과 한계를 검토하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 기존 실측수위를 이용하여 조도계수를 산정하는 경우, 산정과정의 편의를 위하여 구간의 수면경사와 상하류 단면 중에서 한 단면의 정보만으로 등류계산을 이용하는 것은 저유량의 조도계수 산정 결과에 큰 오차를 유발하게 된다. 대상구간에서는 최대 63.4%의 차이를 나타내었으며 저수량의 조도계수가 홍수량에서의 조도계수에 비하여 일반적으로 매우 큰 값을 고려해 볼 때 조도계수 값의 차이는 더욱 커질 수 있다. 그러나 상하류 두 단면의 정보를 이용하여 등류계산으로 산정된 조도계수는 부등류계산 결과와 비교하여 전 유량규모에서 평균 4%의 차이를 나타내었다.
- 2) 실측자료로부터 구간 평균조도계수를 산정하기 위하여 도입된 수정 Newton-Raphson 반복기법은 구간 내 다수 지점의 실측수위로부터 산정된 구간 평균조도계수와 비교하여 고유량에서 5% 이내의 차이를 나타냄으로써 조도계수 산정에 구간 상하류단의 수위 및 유량실측 만으로 높은 정확도의 구간 조도계수가 효율적으로 산정될 수 있음을 확인하였으며, 조도계수의 공간적 변화가 더욱 큰

저유량에서는 약 20%의 차이를 나타냄을 확인하였다.

- 3) 대상구간의 기존 하천정비기본계획에 수록된 조도계수는 실측을 통한 조도계수와 비교하여 홍수기 약 20%의 오차가 있음을 확인하였고, 1,750 m³/s의 계획홍수량 규모에서 20%의 조도계수 증가는 약 15%의 수심 증가를 야기할 수 있으며, 그 차이는 최대 70cm의 홍수위 차이를 유발하였다. 한편, 저유량에서의 조도계수는 70% 이상의 오차가 있음을 확인하였고, 이에 따른 수심 산정에 평균 24.72%, 유속산정에 평균 68%의 오차가 발생하였다.
- 4) 수위 및 유량 실측오차로 인하여 조도계수 산정에 발생할 수 있는 조도계수의 불확실도를 저유량과 고유량의 경우로 구분하여 정량적으로 분석하였다. 저유량의 경우 최대 14%, 고유량의 경우 최대 11%로 저유량에서 실측 조도계수의 불확실도가 높아질 수 있으나 이에 상응하는 수심 및 유속의 수리학적 인자의 불확실도는 5% 내외의 유사한 결과가 나타남으로써 실측을 통한 조도계수는 유량규모와 무관하게 수리학적 인자 산정에 충분한 정도의 값을 제공할 수 있으므로, 실측을 통한 조도계수 산정의 필요성을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 및 한국건설교통기술평가원 건설핵심기술연구개발사업의 연구비지원(06건설핵심 B01)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 (2002). **하천설계기준**. pp. 144-153.
- 김원, 김양수, 우효섭 (1995). "부정류 모형을 이용한 한강 하류부 하도의 조도계수 산정." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제28권, 제6호, pp. 133-146.
- 이상호 (2001). "수위관측과 수리학적 하도추적에 의한 수위-유량 관계식 작성." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제34권, 제5호, pp. 551-560.
- 이신재, 박상우 (2006). "수위-유량 자료가 부재한 자갈 하천의 조도계수 산정에 관한 연구." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제12호, pp. 985-996.
- 이정규, 이창현 (2004). "수리학적 홍수추적 모형을 이

- 용한 한강하류부의 조도계수 산정.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제24권, 제1B호, pp. 23-32.
- 이찬주, 김원, 김지성 (2007). “국내하천의 조도계수 산정 방법 분석.” **2007년 한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회.
- 충청북도 (1995). **달천 하천정비기본계획보고서**
- 황의준, 전경수 (1997). “한강 본류에 대한 부정류 계산 모형: 모형의 보정.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제30권, 제5호, pp. 549-559.
- Barnes, H.H., Jr. (1967). *Roughness characteristics of natural channels*. U.S. Geological Survey, Water-Supply Paper 1849.
- Fread, D.L. (1988). *The NWS DAMBRK model : Theoretical Background/User Documentation*, NOAA, Silver Spring.
- Fread, D.L. and Lewis, J.M. (1998). *The NWS FLDWAV Model Quick Users Guide*. NOAA, Silver Spring.
- Hicks, D.M. and Mason, P.D. (1991). *Roughness characteristics of New Zealand Rivers*. DSIR Marine and freshwater, Wellington.
- Wohl, E. E. (1998). “Uncertainty in flood estimates associated with roughness coefficient.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 2, pp. 219-223.

(논문번호:07-72/접수:2007.07.31/심사완료:2007.09.13)