

# Non-Darcy 흐름특성을 고려한 최종체절 수리특성분석

## Hydraulic Characteristic Analysis of Final Closing considering Non-Darcy Flow

최 흥 식\*

Choi, Hung Sik

### Abstract

The simulation results of final closing by the developed model considering the flows through tide embankment of non-Darcy and through sluice gate agree well to the observed data which shows the model applicability. In comparative analysis with observed data, the simulation results by Homma(1958) are more accurate than those by Na(1987). The free flow equation with discharge coefficient, regardless of free or submerged flows, by Na based on the submergence ratio is applicable to the engineering practices. Because two simulated discharges are greater than the actual one, the correction of discharge coefficients reflecting the irregular section of actual closing gap situation is necessary. In the hydraulic analysis of final closing, the flow through tide embankment has been generally analysed by Darcy. Hydraulic analysis by the correct discharge through tide embankment of non-Darcy flow is necessary, because the ratio between flows through tide embankment and closing gap is relatively great at final closing.

**Keywords** : non-Darcy flow, tide embankment, final closing, submergence ratio

### 요 지

Non-Darcy 제체내 침투수 흐름과 배수갑문을 통한 흐름의 특성을 고려한 최종체절의 수리특성분석 모형에 의한 해석결과는 실측자료와 잘 일치하여 개발된 모형의 적용성이 있음을 보여주었다. 실측치와의 비교에서 本間(1958) 식에 의한 계산결과가 나정우(1987)에 의한 방법보다 비교적 정확함을 보여주었다. 아울러 완전 또는 불완전 월류의 구분이 없이 완전월류식에 잠수도를 이용한 유량계수식을 사용한 나정우 식의 사용성을 보여 주었다. 本間 식과 나정우 식에 의한 계산 값이 실측치보다는 유출입 특성이 크게 나타나 현장에서 체절구간의 불규칙적인 단면 양상을 감안한 유량계수의 조정이 필요할 것으로 판단된다. 일반적으로 최종체절의 수리특성 분석에서 제체구간의 침투수 흐름의 고려는 Darcy 흐름에 기초하여 분석하여왔다. 제체내 침투수의 유량과 개방구간을 통과하는 유량의 비가 체절구간이 좁을수록 크게 나타나, 제체내 침투수의 정확한 해석에 의한 체절구간의 수리특성을 분석해야할 필요가 있다.

**핵심용어** : non-Darcy흐름, 호안제체, 최종체절, 잠수도

### 1. 서 론

간척지조성 또는 항만개발을 위해서는 호안을 축조

하게 되고, 이의 성공여부는 최종체절에 달려있다.

효과적인 체절을 위해서는 적절한 체절방법 (점축

\* 상지대학교 이공과대학 건설시스템공학과 교수

Prof., Dept. of Civil Engrg., Sangji Univ., 660 Woosan-dong, Wonju, Kangwon-do, 220-702, Korea

(E-mail: hsikchoi@mail.sangji.ac.kr)

식, 점고식 또는 이의 병행방식), 투하사석의 중량 규격, 체질시기 등의 선택이 있다. 이를 위해서는 체질 기간 중 내·외측 간의 수위차에 따른 개방구간에서의 정확한 유속의 예측이 필요하다. 호안의 축조는 보통 입자가 큰 사석재료를 사용하게 되므로 제체내 침투수 흐름이 고려되어야 한다. 따라서 내·외수위 차에 의한 체질 개방구간의 해수 유출·입 특성의 분석을 위해서는 체질구간의 해수 유출·입과 제체내 침투수 흐름의 량을 알아야만 호안 내의 수위를 알 수 있고, 이 내수위와 외수위와의 차이에 따른 개방구간, 제체 그리고 갑문을 통한 정확한 유량의 계산이 가능하다.

제체내 침투수흐름의 해석을 위해서는 관수로흐름과 Taylor(1948)의 평균수리수심(mean hydraulic radius)에 기초한 사석사이의 흐름해석을 위한 non-Darcy 특성의 수두경사-평균유속 ( $i-V$ ) 관계를 적용하여 제체내 침투수 흐름에 대한 수리특성을 분석한다. 아울러 체질개방구간과 배수갑문을 통과하는 유량의 정확한 산정을 위해서는 적절한 식의 선정은 물론 그에 따른 정확한 유량계수의 입력이 필요하다.

Lane(1920)은 단면 축소되는 수공구조물에 대한 수리특성의 이해를 위한 수리모형실험을 실시한 이후 미국 지질조사국(USGS)의 Kindvater 등(1953)은 불완전 월류(submerged flow)인 상태에서의 단면일시 축소구간에 대하여 유량 및 배수효과에 대한 종합적인 연구가 시작되어 보다 정확하게 수리특성을 분석할 수 있는 기초를 마련하였고, 유량계수에 영향을 주는 인자를 차원 해석을 통하여 도출하여 이에 의한 무차원식과 도표를 제시하였다. Skogerboe 등(1967), Skogerboe 등(1970), Barrett 등(1973)은 단면일시 축소구간에 대한 수리특성의 분석을 위한 연구로 단면축소부 상류와 하류의 수심의 비인 잠수도(submerged ratio)를 이용하여 유량계수에 대한 지수함수식을 개발하여 실용적인 유량계수를 추정하였다. Fiuza 등(1983)은 위의 연구와 비교분석을 하여 계산의 정확도를 분석하였다. 그러나 이들의 방법은 모두 단면이 점축되는 경우에 대한 연구로 점축과 점고가 동시에 이루어지는 구조물에 대한 수리특성의 이해를 위해서는 부족한 연구결과이다.

체질단면이 점고되는 구간에서의 흐름특성은 사다리꼴 광정웨어 위를 흐르는 유량공식을 이용하여 분석할 수 있다. Woodburn(1932), Kindvater(1964)는 웨어의 경사면이 흐름에 영향을 주는 인자로 간주하고 유량계수를 수두와 웨어의 길이 비인 무차원 매개변수를 함수로 하여 유량계수를 정의하였으나, 웨어의 형상계수를 이용한 일반적인 유량관계식을 도출하는 못했다.

Thomas(1966)는 Kindvater(1964)의 연구결과와 같이

완전월류상태의 흐름방정식에 적용되는 유량계수를 완전월류와 불완전월류의 구분 없이 웨어 상부위를 기준으로 한 잠수도를 이용하여 여러 가지 사다리꼴 웨어에 대해 적용한 연구를 수행하였다. 本間(1958)의 식은 우리나라의 여러 체질공사에 적용하였고(농림부, 1971), 이는 장방형 광정웨어 위를 월류하는 흐름에 대한 유량계수의 적용이다. 아울러 웨어의 높이가 웨어 상부를 기준으로 한 상류수심의 2배 이상이 되는 사다리꼴 광정웨어에 있어서 유량공식을 완전월류, 천이월류와 잠류인 상태로 구분하고 각각의 경우에 있어서 웨어의 상하류측 수면경사에 따른 유량계수를 제시하였다.

국내에서는 나정우(1987)가 Thomas(1966)가 제안한 잠수도의 개념을 도입하여 이에 따른 완전 및 불완전 월류의 구분과 완전월류시의 유량계수의 재조명과 불완전월류시 유량계수를 잠수도의 함수로 표시하였고, 월류단면에서의 수심을 잠수도의 함수로 제시하여, 평균유속에 의한 월류단면에서의 최대유속과 유속의 수심방향의 분포성을 고려하여 제시되는 극최대유속의 관계식을 규명하였다. 따라서 본 연구에서는 나정우(1987)의 연구결과의 적용과 本間(1958)식의 사용결과와의 비교분석을 목적으로 연구하였다.

아울러 체질개방구간에서의 흐름은 일반적으로 사다리꼴 광정웨어 위를 월류하는 흐름으로 本間(1958)의 식, USGS(Kindvater 등, 1953)식, 나정우(1987)식 등에 의해서 계산되고, 제체내 침투수흐름은 개방구간의 유량에 비해서 상대적으로 작은 것으로 간주되어 고려치 않는 것이 보통이나, 김채수(1988)는 이 값이 체질 개방구간의 유량을 계산하는 유량계수에 영향을 주고 있음을 확인하였다. 본 연구에서는 제체내 침투수 흐름의 량이 체질개방구간이 작을 시는 상대적으로 큰 값 또는 이 값과 크거나 유사할 수가 있어, 이 량의 고려가 필요함을 인식하고, 제체내 침투수흐름량을 정확히 계산할 수 있는 과정으로 non-Darcy 해석을 포함하여 체질구간의 수리특성을 분석하였다.

## 2. 제체에서의 non-Darcy 흐름특성

사석채움은 제방, 댐, 호안, 방파제 등에서 많이 사용되어진다. 전형적인 댐에서와는 다르게 사석으로 채워진 댐, 호안, 방파제에서의 흐름양상을 해석하는 데는 Darcy 흐름법칙의 적용이 불가능하다. 이러한 구조물에서 침투유량, 침투압, 흐름망 등을 계산하기 위해서 사석사이의 흐름은 Reynolds수가 큰 난류흐름이므로 신뢰할만한 non-Darcy 흐름관계가 필요하다.

non-Darcy 제체내 투수흐름구간에서의 수두경사,  $i$

와 평균유속,  $V$ 의 관계는 2차 식 (quadratic form,  $i = \gamma V + s V^2$ ) 및 멱함수 (power form,  $i = c_0 V^{c_1}$ )곡선식의 형태로 주어지는 것이 보통이다. 각각의 식에서  $\gamma, s$ 는 축조재료의 특성에 지배되는 계수이고,  $c_0, c_1$ 은 축조재료의 공극율과 흐름조건에 따른 계수로 이들 값의 산정을 위한 실험이 필요하다. 그러나 이를 위한 원형실험은 시간과 경제적인 측면에서 거의 불가능하기 때문에 여러 가지 사석규격, 형태에 따른 실험을 통해 이 식의 계수를 산정하였다. Li 등(1998)은 이 계수는 사석의 크기, 공극율, 그리고 입자의 형상에 지배된다고 하여 이들과의 관계식을 구성하였다. 즉, Darcy 흐름법칙이 적용되지 않는 흐름에서의 일반적인 수두경사와 유속의 관계는 마찰계수와 Reynolds 수에 의한 마찰손실법칙에 의해서 결정하였다. 따라서 사석사이의 투과흐름은 관수로흐름으로 해석 가능하다. Taylor(1948)는 공극을 가진 사석에서의 평균수리수심(mean hydraulic depth),  $R$ 을 다음과 같이 정의하였다.

$$R = \frac{V_v}{S_A} \quad (1)$$

여기서,  $V_v$ 는 검사체적 내 공극의 체적( $m^3$ )이고,  $S_A$ 는 공극의 표면적( $m^2$ )이다. 관수로 흐름에서의 손실수두,  $h_f$ 는 다음과 같다.

$$h_f = f \frac{L}{4R} \frac{V_p^2}{2g} \quad (2)$$

여기서,  $h_f$ 는 관의 길이  $L$ 에서의 손실수두( $m$ ),  $f$ 는 마찰계수,  $V_p$ 는 관수로내의 평균유속( $m/s$ ),  $R$ 은 평균수리수심( $m$ ),  $g$ 는 중력가속도( $m/s^2$ )이다. 이의 관계를 이용하여 Li 등(1998)이 제안한  $i-V$ 관계식은 다음과 같다.

$$i = \frac{0.4 V^2}{gR n^2} \quad (3)$$

여기서  $n$ 은 공극율이다.

Non-Darcy 흐름에 대한 식으로는 Stephenson(1979)이 개발한 식과 그 이전에 개발된 여러 가지 식이 있는데 Stephenson(1979)식의 경우에는 같은 수두경사에서 Li 등(1998)이 제안한 식보다 큰 유속으로 제체내 투과흐름의 양을 과다하게 산정하여(최홍식, 2004) Li 등(1998)이 제안한 식을 사용하였다.

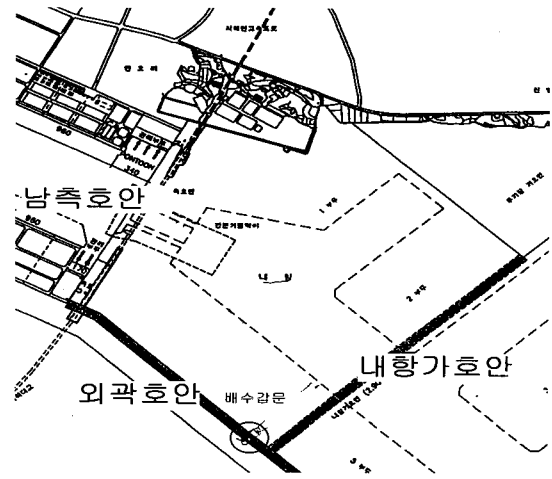


그림 1. 아산항 호안평면도

최홍식(2004)은 이 식을 그림 1에서와 같은 콘크리트 블록, 케이슨 그리고 사석으로 구성된 아산항 외곽호안에 적용하였다. 이때 호안사석의 평균입경은 0.255m로 공극율은 0.28로 나타났다. 그때의 평균수리수심은 0.017m이다. 아산항 호안은 총 660ha의 공유수면을 호안으로 축조하여 장래 항만으로 개발하도록 되어있는 현장이다. 아산항 호안축조공사는 외곽호안 2,214m, 내항가호안 2,904m의 축조와 배수갑문을 설치하는 공사로서, 1998년 7월에 착공하여 2002년 12월에 완공되었다. 그림 2는 내항가호안과 외곽호안의 표준단면도이다.

아산항 남측호안의 안벽구간의 표준단면도는 그림 3에서와 같고, 블록으로 구성된 729.7m와 케이슨으로 이루어진 520.3m, 그리고 일부 사석제 구간을 포함하여 1364.03m이다. 아산항 외곽호안은 향후 항내 수위조절을 위하여 배수갑문을 시공하였으며, 현재로는 개방된 상태이다. 그 제원으로는 폭 3.5m×4면 콘크리트 암거로 바닥표고는 DL(+) 4.1 m이고, 상단표고는 DL(+) 10.0 m이다.

아산항 외곽호안의 내측의 수위와 내용적 관계는 내항측량 결과를 이용하여 산정한 것으로 그림 4에서와 같다.

아산항 외곽호안의 끝물막이 전과 끝물막이 이후에 해측과 내측에 조위계를 설치하여 10분 간격으로 조위를 측정하였다. 조위계는 Richard Brancker Reacher Ltd.사의 XR-420-TD 모델을 사용하였으며, 해측과 내측에서 동일한 시간에 조위를 측정하였다(이승한 등, 2001).

그 결과 Li 등(1998)이 제안한 제체내를 침투하는 non-Darcy 흐름에 대한  $i-V$ 관계식의 해석결과는 실측자료와의 비교결과 잘 맞는 것으로 나타났다. 제체내를 침투하는 흐름은  $R_e$ 수가 200이상으로 완전 난류흐름으로 평가되어 non-Darcy 흐름특성을 적용하여야한다(최홍식, 2004).

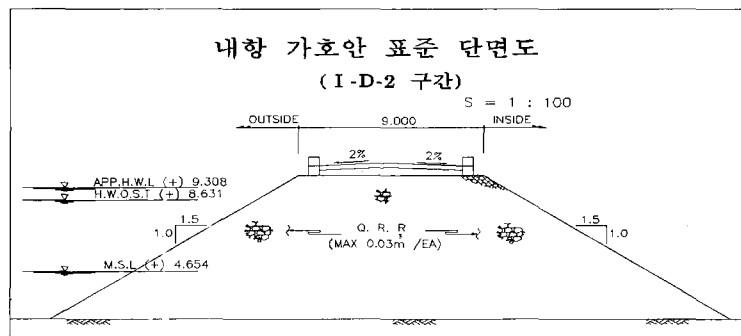
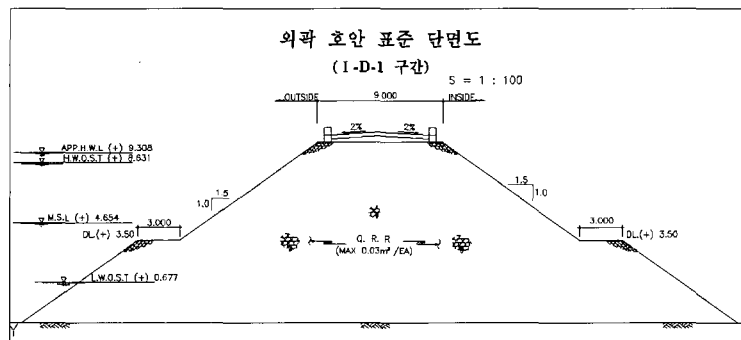
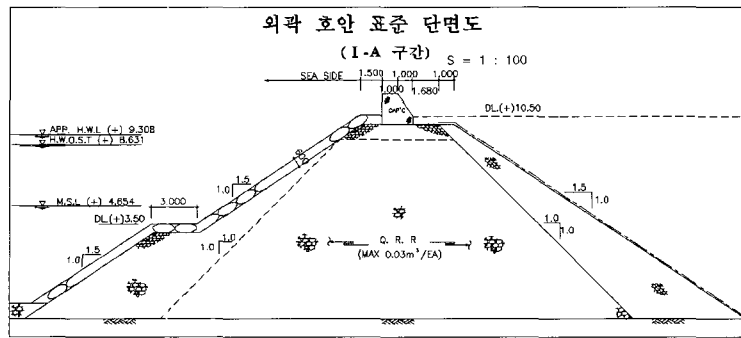


그림 2. 호안 표준단면도

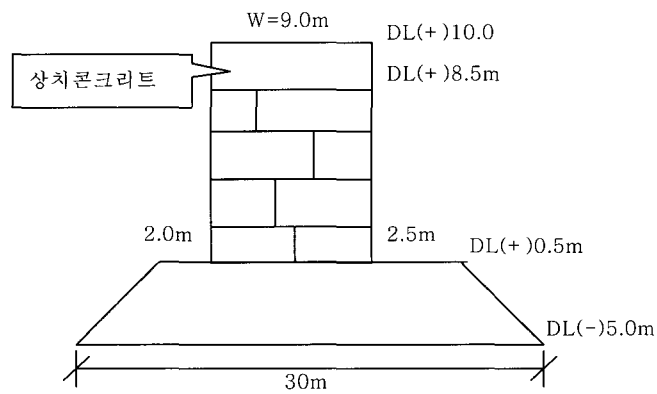


그림 3. 블록과 케이슨구간을 가진 남측호안 표준단면도

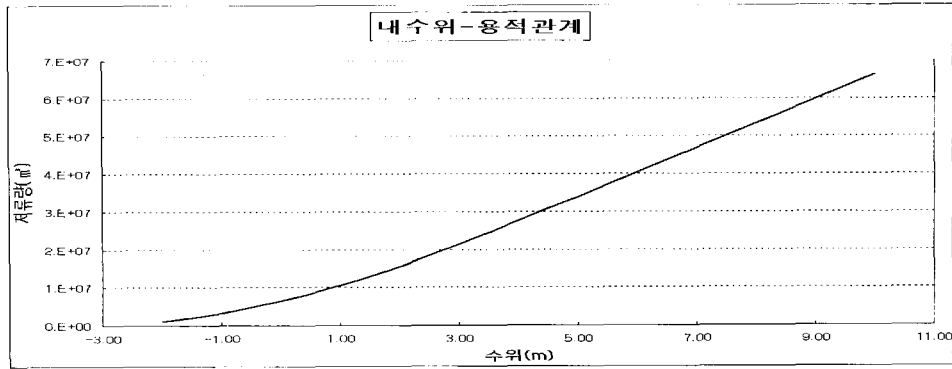


그림 4. 이상항호의 수위-내용적 곡선

### 3. 최종체질 수리특성 분석 및 검토

#### 3.1 체질개방구간에서의 수리특성

##### 3.1.1 월류 흐름특성

그림 5에서와 같이 체질 개방구간이 일시에 축소되는 경우에 있어서 단면축소에 의한 배수곡선이 발생되며 상류부 배수곡선의 영향이 시작되는 부분을 단면 I로 하면 여기서부터의 흐름은 점변류 흐름이 된다. 체질 폭의 0.5~2배 되는 상류에서부터 유속은 가속되기 시작하여 축소단면이 끝나는 지점을 단면 II라 하면 여기까지의 흐름은 급변류가 되며, 흐름단면은 갑자기 축소되어 심한 난류상태로 되고 유속은 최대가 된다. 따라서 단면 II에서의 실제 유속은 축조재료의 투하안정 및 유실에 중요한 역할을 하기 때문에 이의 정확한 해석이 요구된다. 단면 II를 지난 흐름은 점축식인 경우에 중앙부에서 서서히 유속이 줄어들고 양쪽 가장자리 부근에서는 와류가 발생하고, 흐름은 분리되어 점변류로 바뀌며 이 구간을 지나서 등류흐름으로 되는 지점을 단면 III으로 하면 단면 I에서 단면 III까지를 단면축소로 인한 흐름의 영향을 받는 범위라 할 수 있다.

단면 축소에 의한 수면저하가 생기지 않는 단면 I과

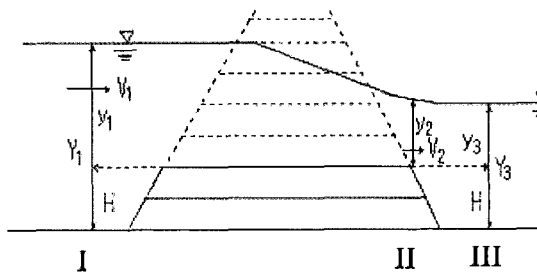


그림 5. 최종체질구간의 수리특성

유속이 최대가 되는 단면 II에 대해서 웨어의 상부 연장선을 기준면으로 하여 Bernoulli 정리를 정리하면 다음과 같다.

$$y_1 + V_1^2/2g = y_2 + V_2^2/2g \quad (4)$$

식 (4)를 단면 II의 평균유속  $V_2$ 에 대해서 정리하면 다음과 같다.

$$V_2 = \sqrt{2g(y_1 + V_1^2/2g - y_2)} \quad (5)$$

사다리꼴인 단면 II와 평균 폭을  $b$ 라 하면 연속방정식은 다음과 같다.

$$Q = by_2 V_2 = by_2 \sqrt{2g(y_1 + V_1^2/2g - y_2)} \quad (6)$$

웨어 위의 흐름은 일정한 에너지 수두일 때 유량을 최대로 할 수 있는 수심  $y_2$ 가 발생하게 되므로 식 (6)에서  $dQ/dy_2 = 0$ 를 만족시키는 수심  $y_2$ 를 구하면 다음과 같다.

$$y_2 = 2/3(y_1 + V_1^2/2g) \quad (7)$$

식 (7)을 식 (6)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$Q = 2/(3\sqrt{3}) b(y_1 + V_1^2/2g) \sqrt{2g(y_1 + V_1^2/2g)} \quad (8)$$

식 (8)에서 접근유속수두를 포함한 유량계수를  $\mu$ 라 하면 다음과 같다.

$$Q = \mu by_1 \sqrt{2gy_1} \quad (9)$$

식 (9)는 체질 개방구간에서의 유량을 계산하는 식이 된다. 식 (5)와는 다르게 다음의 식은 단면 II에서의 평균유속을 구하는 간단한 식이다.

$$V_2 = Q/by_2 \quad (10)$$

### 3.1.2 유량계수 추정

나정우(1987)의 실험에 의하면 완전 및 불완전월류의 구분 없이 식 (9)에 의한 유량계수는  $S = y_3/y_1$ 으로 정의되는 잠수도와 관계가 있는 것으로 판단되어 나온 결과는 그림 6에서와 같다.

그림 6에서 보듯이 잠수도  $S$ 가 0.5이하에서는 유량계수가 일정한 상수로 되어 하류수심에 영향을 받지 않는 완전월류로 나타났다. 그러나 잠수도  $S$ 가 0.5이상에서는 유량계수가 감소하는 경향을 보여 잠수도가 1에 도달하면 유량계수는 0에 접근하였다. 따라서 완전월류와 불완전월류의 경계는 한계잠수도( $S_{cr}$ , critical submerged ratio)가 0.5이고, 잠수도가 0.5이하인 완전월류에서의 유량계수는 0.4이다. 잠수도가 0.5이상인 불완전월류에서의 유량계수는 나정우(1987)에 의한 126회의 수리모형실험결과와 유량계수  $\mu$ 와 잠수도  $S$ 와의 관계는 3차원 다항식의 형태로 다음과 같이 분석되었고, 이때의 회귀상관계수는 0.97로 나타났다.

$$\mu = -5.1S^3 + 9.75S^2 - 6.5S + 1.85 \quad (11)$$

### 3.1.3 개방구간의 평균유속과 최대유속 및 극최대유속

체절개방구간의 평균유속 산정은 통과유량을 통수단면적으로 나누어 계산하는 것이 가장 정확하다. 그러나 개방구간에서의 내·외수위차에 의해서 급격하게 발달하는 유속상태에서 월류수심을 알아내는 것은 매우 어렵다. 이를 위해서 나정우(1987)는 수리모형실험을 통해 상류수심  $y_1$ , 하류수심  $y_3$ , 그리고 월류수심  $y_2$ 를 측정하여 이들의 회귀상관식을 구하였다.

$$y_2/y_1 = 0.51y_3/y_1 + 0.48 \quad (12)$$

즉 식 (12)에서 잠수도를 이용하여 월류수심을 알 수 있고, 월류수심을 알면 바로 웨어를 월류하는 구간에서의 평균유속의 계산은 식 (10)을 이용해서 계산이 가능하다. 그러나, 실제의 체절의 경우에는 축조재료 또는 체절재료의 규격과 체절방식의 결정을 위해서는 평균유속( $V_{2M}$ )의 개념이 아닌 수심방향의 유속분포에 따른 최대유속( $V_{2MAX}$ )과 통수단면이 급격히 축소됨에 따른 체절단면 선단부에서의 극최대유속( $MV_{2MAX}$ )이 필요할 수가 있다. 이를 위해서 나정우(1987)의 실험을 정리하면 다음과 같다.

$$V_{2MAX} = 1.22 V_{2M} \quad (13)$$

$$MV_{2MAX} = 1.27 V_{2M} \quad (14)$$

### 3.2 本間(1958)식에 의한 체절개방구간의 흐름

우리나라에서 방조제 체절구간의 유량 계산 시에 자주 사용되는 本間(1958)방법의 유량공식은 다음과 같이 흐름상태에 따라 3가지로 세분되어 있다.

완전원류 (free flow)

$$Q = \mu b y_1 \sqrt{2gy_1} \quad (15)$$

천이월류 (transitional flow)

$$Q = (\alpha y_3/y_1 + \beta) b y_1 \sqrt{2gy_1} \quad (16)$$

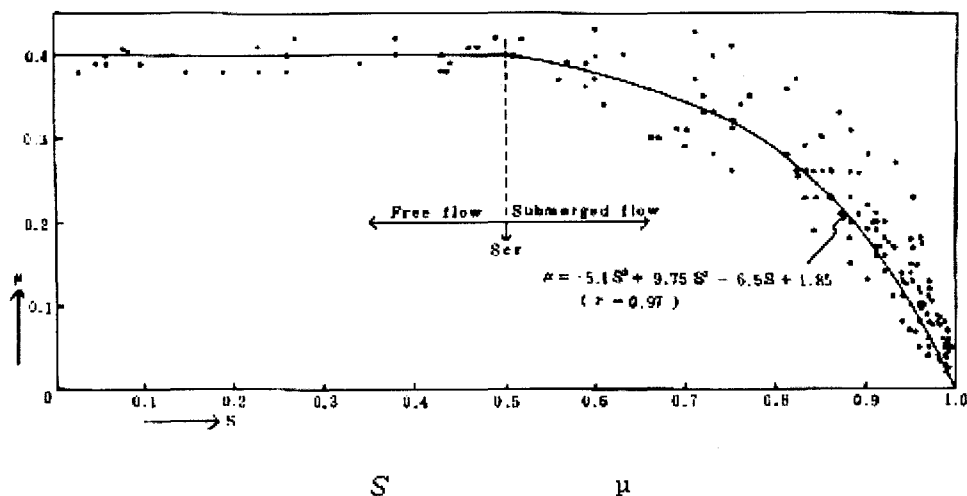


그림 6. 잠수도,  $S$ 에 따른 유량계수,  $\mu$ (나정우, 1987)

잠수유희류 (submerged flow)

$$Q = \mu'' b y_3 \sqrt{2g(y_1 - y_3)} \quad (17)$$

여기서  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 상수이고,  $\mu'$ ,  $\mu''$ 는 유량계수로서 유희단면과 흐름조건에 따른 값이다.

USGS(Kindvater 등, 1953)식과 나정우(1987)에 의한 식은 수리모형실험에 의한 식으로 그 과정이 합리적인 인정되나, 사용성에 있어서 보편성을 가지지 못한 것으로 판단되어, 적용성을 검토한 후 사용되어야 할 것으로 평가된다. 따라서 수리학적 특성을 잘 반영할 수 있는 Belanger 법칙에 기초한 本間(1958)의 식을 사용하는 것이 보편적이다. 本間(1958) 식에서의 완전유희류 시 유량계수는 나정우(1987)의 실험값과 비교할 때 0.69로 나타났다. 과거 농림부(1971)에서 사용한 값을 기준으로 완전유희류 식 (15)에서 0.8, 잠수유희류인 불완전유희류 시는 흐름의 양상에 따라서 그 값을 달리하나, 잠수유희류식 (17)에서 0.7의 값을 사용하였다.

### 3.3 모형의 구성

개발된 모형은 제체내 침투수흐름에 대해서는 non-Darcy 흐름특성에 의한  $i-V$ 관계식을 사용하였고, 체절개방구간과 배수갑문을 통한 유출입 특성을 위해서는 本間(1958)의 식 (15) 및 (17)과 나정우(1987)에 의한 식 (9) 및 (11)을 사용하였고, 그에 따른 유량계수를 입력하였다. 그림 7은 체절구간의 수리특성의 규명을 위한 개발된 모형의 흐름도이다.

모형의 적용에 따른 입력자료는 제체구간의 제원으로 표준단면도에서의 각 치수와 각 호안의 지반표고를 변화하는 구간별로 입력이 요구되고, 제체의 물리적 특성으로 제체 구성재료의 평균입경과 공극율, 수위-내용적곡선, 외조위, 배수갑문의 제원, 체절구간의 단면형상에 대한 좌표 등이 요구된다. 출력자료는 제체를 통과하는 유량을 구간별로 계산하고 제체를 통한 단위통과유량이 계산된다. 아울러 제체통과 흐름에서의 수두경사와 평균유속 그리고 Reynolds 수 등이 계산된다. 배수갑문을 통한 유량과 유속의 계산이 되고, 체절개방구간에서의 세부 단면별 유속과 유량을 물론 전체 개방구간의 평균유속과 유량이 계산된다. 총유량은 각각 계산된 제체내 통과흐름, 체절개방구간의 흐름, 그리고 배수갑문 통과흐름의 합이고, 이 값에 의해서 새로운 내수위가 계산된다. 아울러 체절에 따른 내외수위의 변화를 출력하게 된다. 또한, 체절단계에 따른 개방구간에서의 최대유속을 계산한다.

### 3.4 모형의 적용 및 검토

제체 침투 non-Darcy 흐름해석에 의한 제체 침투 유량과 배수갑문 유량을 고려한 체절개방구간의 수리특성분석 모형의 적용성 검토를 위해서 2장에서 적용한 아산항 외곽호안 축조시의 최종체절구간에 자료를 이용하였다. 이때 개방구간의 수리특성을 위한 흐름식은 本間(1958)식을 적용하였다. 아울러 나정우(1987)에 의해 개발된 잠수도와 그에 따른 유량계수의 적용을 통한 계산결과를 분석하여 이 식의 사용성을 분석하였다.

그림 8은 대조기인 아산항 외곽호안의 최종체절 구간인 2001년 4월7일 0시부터 16시까지 개방구간 146.8m와 배수갑문을 통한 유량을 고려한 체절개방구간의 유속계산결과와 그에 따른 실측 내수위와 계산내수위로 실측치와 잘 일치하여 모형의 적용성이 있음을 보여주었다. 일반적으로 체절구간을 통한 유출입이 실제보다 크게 산정된 것으로 미루어 유량계수의 조정은 필요하

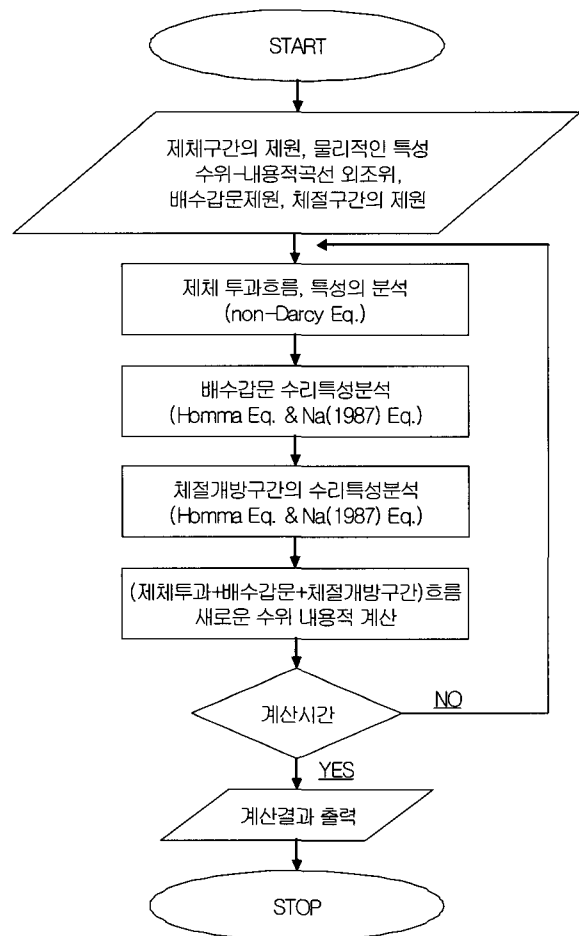


그림 7. 최종체절구간 수리특성 분석을 위한 흐름도

다. 이는 本間(1958)과 나정우(1987)의 식은 실험식으로 체절개방구간이 잘 정리된 실험영역에서 실험한 계수이고, 실제의 체절현상은 현장여건에 따라서 체절구간의 바닥과 측면에서의 잘 정리되지 못한 영향으로 추정된다. 따라서 현장에서의 체절구간의 불규칙적인 단면양상을 감안한 유량계수의 조정이 필요할 것으로 판단된다. 이때 本間(1958)식에 의한 체절구간의 유속은 약  $3.0\text{ m/s}$ 에서  $4.0\text{ m/s}$ 로 나타났다. 나정우(1987)식의 적용을 통한 내수위의 계산결과는 本間(1958)식의 적용에 의한 계산결과 보다는 고조 때는 비교적 잘 일치하나, 저조에서 나정우(1987)식에 의한 결과가 유출을 크게 나타냈다.

실측치와 계산치의 상대오차는 本間(1958)식의 경우는 최대 17%, 나정우(1987)식의 경우는 약 39%로 나타났다. 그러나 이 값이 상대적으로 크게 나타난 것은 실측 및 계산 내수위 값이 최저인 지점에서 나타난 것으로 절대오차는 그리 크지 않았다. 아울러 RMS(Root Mean Square) 오차는 本間(1958)식의 경우 0.23, 나정우(1987)식의 경우 0.36으로 나타났다. 따라서 완전 또는 불완전 월류의 구분이 없이 잠수도에 의한 계산을 통해서 하나의 유량계수 관계식을 사

용하여 간편하게 사용할 수 있는 나정우(1987)식의 사용성을 보여 주었다.

그림 9는 체절 개방구간과 제체구간을 침투하는 유량을 나타낸 것이다. 일반적으로 체절구간의 수리특성분석을 위해서 제체구간의 침투유량의 고려는 Darcy 흐름에 기초하여 분석한 것이 지금까지의 분석이다. 그러나 그림 9에서 보는 바와 같이 개방구간이 146.8m 일 경우 창/낙조시 최대유출입이 일어날 시 제체내의 침투유량이 체절개방구간의 유량에 창조시 약 75~78%, 낙조시 약 74~81%로 나타나 제체구간의 침투수에 의한 유출입 특성을 고려한 체절구간의 수리특성을 분석해야함을 보여준다. 창조 시에 本間(1958)식의 사용에 의한 체절개방구간의 유량이 크게 나타났고, 낙조 시에는 나정우(1987)식에 의한 유량 계산결과가 다소 크게 나타났다. 아울러 제체를 침투하는 유량은 두식에 의한 서로 다른 량의 유출입 유량에 의한 내수위의 영향을 받아 약간의 상이함은 있으나, 적용식이 같은 관계로 유사한 경향을 보여준다.

그림 10은 소조기인 아산항 외곽호안의 최종체절 기간인 2001년 3월 30일 10시 50분부터 18시 20분까지 개

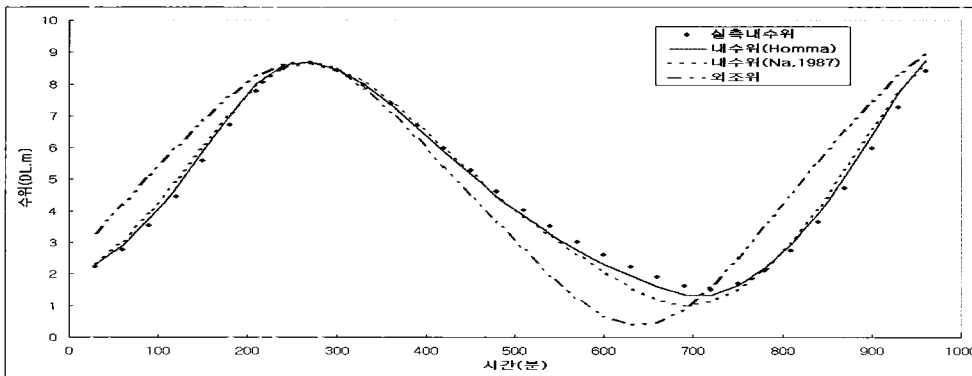


그림 8. 실측 및 계산 내수위의 변화 (2001. 4. 7)

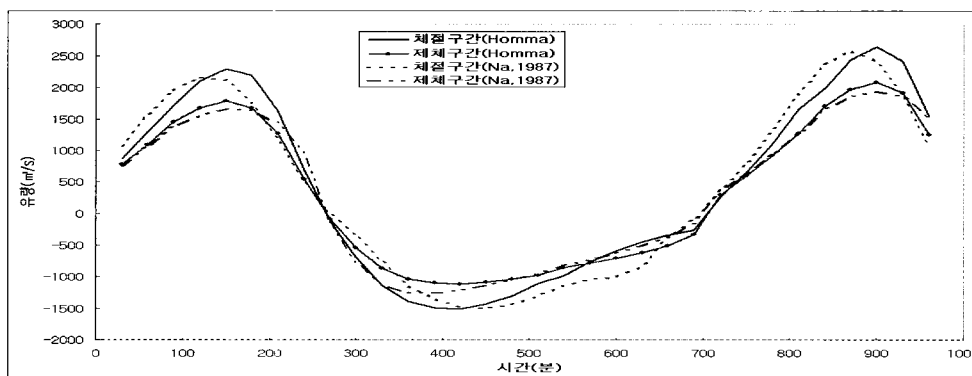


그림 9. 제체와 체절개방구간의 통과유량 (2001. 4. 7)



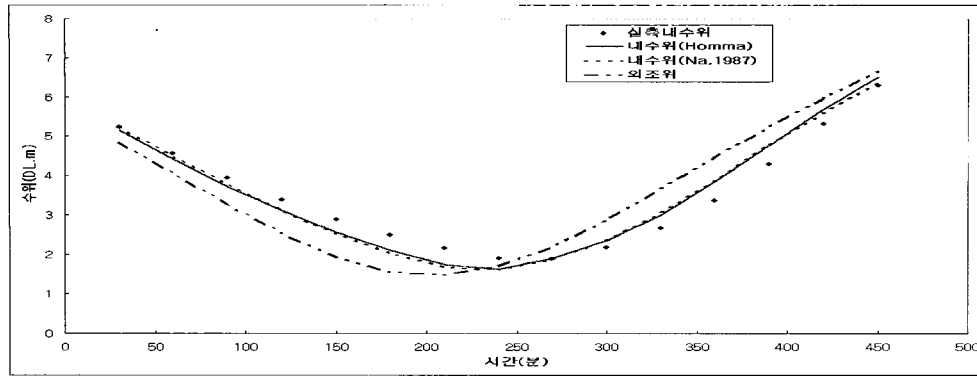


그림 10. 실측 및 계산 내수위의 변화 (2001. 3. 30)

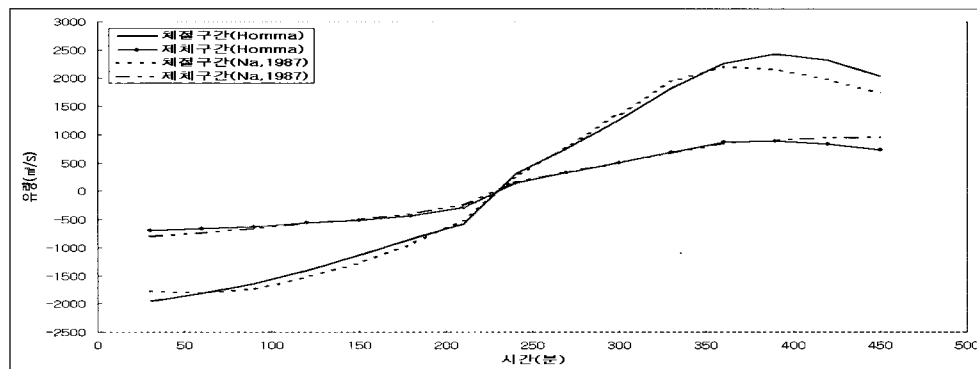


그림 11. 제체와 체절개방구간의 통과유량 (2001. 3. 30)

방구간 235.97m와 배수갑문을 통한 유량을 고려한 체절개방구간의 유속계산결과와 그에 따른 실측 내수위와 계산내수위로 실측치와 잘 일치하였다. 일반적으로 체절구간을 통한 유출입이 실제보다 크게 산정된 것으로 미루어 유량계수의 조정은 필요한 것으로 앞서의 분석과 같다. 이 기간은 소조기로 비교적 넓은 개방구간과 작은 조차로 인하여 그림 8에서와는 다르게 本間(1958)식과 나정우(1987)식의 적용을 통한 내수위의 계산결과는 모두 유사하게 나타났다.

실측치와 계산치의 상대오차는 本間(1958)식의 경우는 최대 19%, 나정우(1987)식의 경우는 약 22%로 나타났다. 그러나 이 값이 상대적으로 크게 나타난 것은 실측 및 계산 내수위 값이 최저인 지점에서 나타난 것으로 절대오차는 그리 크지 않았다. 아울러 RMS 오차는 本間(1958)식의 경우 0.31, 나정우(1987)식의 경우 0.32로 나타났다.

그림 11은 개방구간이 약 236m 일 경우 창/낙조시 최대유출입이 일어날 시 제체내 침투유량이 체절개방구간의 유량에 창조시 약 36~43%, 낙조시 약 43~44%로 나타나, 개방구간이 상대적으로 작은 그림 9의 경우보다 작게 나타났으나, 이 때 역시 제체구간

의 유출입 특성을 고려한 체절구간의 수리특성-을 분석해야함을 보여준다. 창조 및 낙조 시에 本間(1958)식의 사용에 의한 체절개방구간의 유량이 다소 크게 나타났다.

#### 4. 결 론

체절방식이 점축/점고의 병행양상임을 감안하여 본 연구에서는 本間(1958) 식의 적용과 잠수도를 이용하여 완전 및 불완전 율류의 구분 없이 사용할 수 있는 식인 나정우(1987)식의 사용성을 검토하였다. 本間(1958) 식의 사용에 따른 유량계수는 완전율류시 0.8, 잠수율류시 0.7을 사용하였다. 아울러 제체내 투과유량에 대한 non-Darcy 흐름관계인  $i-V$ 관계식에 의한 제체내 투과유량과 배수갑문을 통한 유출입 특성을 고려한 체절구간의 수리특성분석 모형에 의한 계산결과는 아산항 외곽호안의 대조기 때의 최종체절 기간인 2001년 4월 7일의 개방구간 146.8m와 소조기 때인 2001년 3월 30일 개방구간 약 236m에 대해 적용에 따른 실측 내수위와 계산내수위는 잘 일치하여 개발된 모형의 적용성이 있음을 보여주었다. 또한, 완전

또는 불완전 월류의 구분이 없이 잠수도에 의한 계산을 통해서 하나의 유량계수 관계식을 이용하여 간편하게 사용할 수 있는 나정우(1987)식의 사용성을 보여 주었다.

실측치와 비교하여 볼 때 本間(1958)식에 의한 해석결과가 나정우(1987)에 의한 결과보다 정확함을 보여주었다. 아울러 本間(1958)식과 나정우(1987)식에 의한 계산값이 실측값 보다는 유출입 특성이 크게 나타나고 있는 것으로 나타났다. 이는 두 식은 실험에 의해서 결정된 식으로 체절개방구간이 잘 정리된 실험영역에서 실험한 계수이고, 실제의 체절 현상은 현장여건에 따라서 체절구간의 바닥과 측면에서의 잘 정리되지 못한 영향으로 추정된다. 따라서 실제 체절구간의 불규칙적인 단면 양상을 감안한 유량계수의 조정이 필요할 것으로 판단된다.

일반적으로 체절구간의 수리특성의 분석을 위해서 제체내 침투유량의 고려는 Darcy 흐름에 기초하여 분석한 것이 지금까지의 분석이다. 그러나 체절개방구간을 통과하는 유량과 제체내를 침투하는 유량의 비가 체절구간이 좁을수록 제체내 침투유량이 상대적으로 크게 나타나 제체내 침투흐름을 고려한 체절구간의 수리특성을 분석해야함을 보여준다.

체절개방구간을 통과하는 유량은 本間(1958)식에 의한 계산 값이 나정우(1987)식에 의한 계산 값보다 크게 나타났으나, 제체를 침투하는 유량은 체절개방구간에 적용된 두 식의 차이로 인한 서로 다른 체절 개방구간의 유출입 유량에 의한 내수위의 영향을 받아 약간의 상이함은 있으나, 적용식이 같은 관계로 유사한 경향을 보여준다.

## 감사의 글

본 연구는 2003년도 상지대학교 연구비 지원에 의한 연구입니다.

## 참 고 문 헌

김채수 (1988). 하구둑 최종물막이 시에 내수위 예측을 위한 유량계수 결정. 동국대학교 대학원 박사학위논문.  
 나정우 (1987). 방조제 체절구간에서의 수리특성에 관한 실험적 연구. 서울대학교 대학원 석사학위논문.  
 농림부 (1971). **농지개량사업 계획설계기준 해면간척편**. p. 144.  
 本間仁, 石原藤次郎 (1958). 応用水理学, 丸善. pp. 154-156.  
 이승환, 박형섭 (2001). “호안제체 투수계수 및 최종체

절구간을 통한 흐름의 유량계수.” **대한토목학회지**, 제49권, 제12호, pp. 105-109.  
 최홍식 (2004). “호안제체에서 non-Darcy 흐름해석.” **한국수자원학회논문집**, 제37권, 제2호, pp. 97-96.  
 Barrett, J.W. and Skogerboe, G.V. (1973). “Computing backwater at open channel constrictions.” *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 99, No. HY7, pp. 1043-1056.  
 Fiuzat, A.A. and Skogerboe, G.V. (1983). “Comparison of open channel constriction ratings.” *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 109, No. 12, pp. 1589-1602.  
 Kindvater, C.E. (1964). Discharge characteristics of embankment-shaped weirs. *U.S. Geological Survey, Water-Supply*, Paper 1617-A.  
 Kindvater, C.E., Carter, R.W., and Tracy, H.J. (1953). Computation of peak discharge at constrictions. *U.S. Geological Survey, Circ.* 284.  
 Lane, E.W. (1920). “Experiments on the flow of water through contractions in an open channel.” *Transaction*, ASCE, Vol. 83, pp. 1149-1208.  
 Li, B., Garga, V.K., and Davies, M.H. (1998). “Relationship for non-Darcy flow in rockfill.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 2, pp. 206-212.  
 Skogerboe, G.V., Austin, L.H., and Chang, K.T. (1970). *Subcritical flow of open channel structures. Bridge Constrictions PRWG 71-2*, Utah Water Research Laboratory, Utah State University, Logan, Utah.  
 Skogerboe, G.V. and Hyatt, M.L. (1967). “Analysis of submergence in flow measuring flumes.” *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 93, No. HY4, pp. 183-200.  
 Stephenson, D. (1979). *Rockfill in hydraulic engineering*. Elsevier Science Pub. BV (North-Holland), Amsterdam, The Netherlands, pp. 19-24.  
 Taylor, D.W. (1948). *Fundamentals of soil mechanics*. John Wiley and Sons Inc., New York.  
 Thomas, W.A. (1966). *Submerged weir characteristics*. M.S. Thesis, Department of Civil and Sanitary Engineering, MIT, Cambridge, Massachusetts.  
 Woodburn, J.G. (1932). “Test of broad-crested weirs.” *Transaction*, ASCE, Vol. 96, pp. 387-416.  
 (논문번호:04-34/접수:2004.03.30/심사완료:2004.07.06)