

호안제체에서 Non-Darcy 흐름해석

Analysis of Non-Darcy Flow in Tide Embankment

최 흥 식*

Choi, Hung Sik

Abstract

The simulation results using $i-V$ relationship of non-Darcy flow through tide embankment by Li et al.(1998) agree well to the observed data. The use of $i-V$ relationship is applicable to the engineering practice and the correct input of porosity is necessary. The non-Darcy flow based on the pipe flow and Taylor's definition for mean hydraulics radius in rockfill material is applicable to the block and caisson materials. The correct calculation of flow through tide embankment enables the accurate calculation of velocity at final closing gap and the prediction of inner water level after tide embankment construction as well.

Keywords : non-Darcy flow, tide embankment, final closing, porosity, $i-V$ relationship

요 지

Li 등(1998)이 제안한 호안제체를 통과하는 non-Darcy 흐름에 대한 $i-V$ 관계식의 해석결과는 실측자료와의 비교결과 잘 맞는 것으로 나타났다. 따라서 이식의 사용은 현장에 적용성이 있는 것으로 평가되었고, 적용에 따른 변수인 공극율의 정확한 값의 입력이 요구된다. 관수로흐름과 Taylor의 평균수리수심에 기초한 사석에 적용되는 non-Darcy 특성의 흐름은 블록 및 케이슨 호안에도 적용 가능한 것으로 평가된다. 호안제체를 통과하는 흐름에 대한 정확한 계산은 호안의 최종체절 개방구간에서의 정확한 유속의 산정은 물론 축조 후의 호안 내의 수위의 변화를 예측할 수 있다.

핵심용어 : non-Darcy흐름, 호안제체, 최종체절, 공극율, $i-V$ 관계식

1. 서 언

간척지 조성 또는 항만의 개발을 위한 해안의 매립이 활발히 이루어지고 있다. 매립을 위해서는 호안을 축조하게 되고 이의 성공여부는 최종체절에 달려있다. 효과적인 체절을 위해서는 적절한 체절방법, 투하사석의 크기, 체절시기 등의 선택이 있다. 이를 위해서는 개방구간에서의 정확한 유속의 예측이 필요하다. 아울러

체절 중 및 후의 호안 내·외측간의 수위차를 검토하는 것이 필요하다.

매립공사를 위한 호안의 축조는 보통 입자가 큰 사석재료를 사용하게 되므로 제체를 통과하는 유량이 고려되어야한다. 따라서 내·외수위 차에 의한 체절 구간을 통한 해수의 유출·입 특성의 분석을 위해서는 체절구간의 조량의 유출·입과 제체를 통과하는 유량을 알아야만 호안 내의 수위를 알 수 있고, 이에 의한 외수위

* 상지대학교 건설시스템공학과 교수
 Prof., Dept. of Civil Engr., Sangji Univ., Wonju, Kangwon, 220-702, Korea.
 (E-mail: hsikchoi@mail.sangji.ac.kr)

와의 차이에 의해 개방구간 또는 갑문을 통한 정확한 유량의 계산이 가능하다.

사석채움은 제방, 댐, 호안, 방과제 등에서 많이 사용되어진다. 전형적인 댐에서와는 다르게 사석으로 채워진 댐, 호안, 방과제에서의 흐름양상을 해석하는 데는 Darcy 흐름법칙의 적용이 불가능하다. 이러한 구조물에서 침투수량과 침투압 및 흐름망을 계산하기 위해서 사석사이의 흐름은 Reynolds수가 큰 난류흐름이 되므로 신뢰할만한 non-Darcy 흐름관계가 필요하다. 따라서 이러한 구조물에서의 수두경사에 따른 유속관계의 정립이 필요하다.

non-Darcy 흐름구간에서 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 보통이나, 식에서의 물리적 변수(γ, s, c_0, c_1) 산정을 위한 실험이 필요하다. 그러나 이를 위한 원형 실험은 시간과 경제적인 측면에서 거의 불가능하기 때문에 여러 가지 사석규격, 형태에 따른 실험을 통해 이 관계식의 물리적 변수를 규명하였다. 이러한 연구로 McCorquodale 등(1977), Stephenson (1979), Li 등(1998)은 물리적 변수는 사석의 크기, 공극율, 그리고 입자의 형상에 지배된다고 하여 이들과의 관계식을 구성하였다. 그 외에 물리적인 변수에 의해서만 지배되는 것이 아닌 만큼 수리모형실험을 통한 투수계수의 결정이 필요함을 역설하였다(Abt 등, 1991).

따라서 본 연구에서는 사석 채움에서의 non-Darcy 흐름에 대한 일반식의 관계를 규명하고, 아산항 외곽 호안에 적용하여 모형의 적용성을 검토한다. 아울러 기존 이론식과의 비교와 non-Darcy 흐름에 대한 수리적 특성을 고찰하였다.

2. 일반적인 사석투과흐름법칙

Darcy 흐름법칙이 적용되지 않는 흐름에서 일반적인 수두경사와 유속의 관계는 마찰계수와 Reynolds 수에 의한 마찰손실법칙에 의해서 결정한다. 따라서 사석사이의 흐름은 관수로 흐름으로 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. 이를 다시 정리하면 다음과 같다.

$$R = \frac{V_b \cdot n}{A_{MS} \cdot M_R} = \frac{e}{A_{VS}} \quad (2)$$

여기서, V_b 는 공극을 포함한 총체적(m^3), n 은 공극율($= V_v / V_b$)이고, e 는 공극비($= V_v / (V_b - V_v)$), A_{MS} 는 단위사석 질량당 표면적(m^2/kg), A_{VS} 는 단위사석 체적당 표면적(m^2/m^3), M_R 은 사석의 질량(kg)이다.

$$A_{VS} = \rho A_{MS} \quad (3)$$

여기서 ρ 는 사석의 밀도이다. 예로 평균직경이 d 인 구형사석에 대한 A_{VS} 는 다음과 같다

$$A_{VS} = \pi d^2 / (\frac{1}{6} \pi d^3) = \frac{6}{d} \quad (4)$$

따라서 A_{VS} 는 다음과 같이 표현된다.

$$A_{VS} = \frac{J}{d} \quad (5)$$

$$R = \frac{ed}{J} \quad (6)$$

여기서, J 는 상수이고, 구형의 경우 $J=6$ 이다. J 의 값은 사석의 표면적 효율(surface area efficiency)의 정도를 나타낸다. 형상계수 r_E 역시 상대적인 표면적 효율을 나타낸 것으로 다음과 같다.

$$r_E = \frac{J_{rock}}{J_{sphere}} = \frac{J_{rock}}{6} \quad (7)$$

따라서 일반사석의 A_{VS} 와 R 은 다음과 같다.

$$A_{VS} = \frac{6 r_E}{d} \quad (8)$$

$$R = \frac{ed}{6 r_E} \quad (9)$$

관수로 흐름에서 손실수두, h_f 는 다음과 같다.

$$h_f = f \frac{L}{4R} \frac{V_p^2}{2g} \quad (10)$$

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. 이 식을 마찰계수에 대해서 정리하면 다음과 같다.

$$f = \frac{h_f}{L} \frac{8gR}{V_p^2} \quad (11)$$

여기서, 수두경사 i 는 $i = h_f/L$ 이고, 평균유속 V 와

공극에서의 유속 V_p 는 $V_p = V/n$ 의 관계이므로 식 (11)은 식 (9)와 수두경사 i 그리고 사석에서의 유속 $V = n V_p$ 관계에 의해서 다음과 같다.

$$f = \frac{8 g i R n^2}{V^2} = \frac{4 e i d g n^2}{3 r_E V^2} \quad (12)$$

Reynolds수 R_e 은 다음과 같다.

$$R_e = \frac{V_p \cdot R}{\nu} = \frac{V \cdot R}{\nu n} \quad (13)$$

여기서, ν 는 물의 동점성계수(m^2/s)이다. 공극비와 공극율의 관계는 $e = n/(1-n)$ 이므로 이 관계와 식 (9) 및 $V = n V_p$ 에 의해 식 (13)은 다음과 같다.

$$R_e = \frac{e V d}{6 \nu n r_E} = \frac{V \cdot d}{6 \nu (1-n) r_E} \quad (14)$$

또는 $e = n/(1-n)$ 을 식 (12)에 대입하면 다음과 같다.

$$f = \frac{4 i d g n^3}{3 r_E V^2 (1-n)} \quad (15)$$

캐나다 Ottawa 대학에서 직경 1.6cm~4.0cm에 이르는 사석에 대해 모형실험(Hansen, 1992)을 실시한 결과를 이용하여 식(14) 및 (15)에서 정의한 R_e 과 f 의 관계는 다음과 같다.

$$f = \frac{98}{R_e} + 3 \quad (16)$$

이 식은 일반적으로 다음과 같은 형태이다.

$$f = \frac{a}{R_e} + b \quad (17)$$

여기서 a 와 b 는 실험결과의 분석에 의한 상수이고, 식 (12)와 (13)의 관계에서 식 (17)은 다음과 같다.

$$i = \frac{a \nu}{8 g R^2 n} V + \frac{b}{8 g R n^2} V^2 \quad (18)$$

식 (14)와 (15)의 관계에서 식 (17)은 다음과 같다.

$$i = \frac{4.5 a \nu r_E (1-n)^2}{d^2 g n^3} V + \frac{0.75 b r_E (1-n)}{d g n^3} V^2 \quad (19)$$

식 (18) 및 (19)는 모든 침투흐름에 적용 가능한 이차원 형태의 수두경사와 유속의 식으로 타당한 이론적 근거가 있다(George 등, 1992). 여기서 상수 a 와 b 는 결정되어야 한다. 사석 직경이 1.6에서 4.0cm크기의 재료를 이용한 투수실험에서 Hansen(1992)이 제안한 $a=98$, $b=3$ 을 식 (18) 및 (19)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$i = \frac{12 \nu}{R^2 g n} V + \frac{0.38}{R g n^2} V^2 \quad (20)$$

$$i = \frac{441 \nu r_E^2 (1-n)^2}{d^2 g n^3} V + \frac{2.3 r_E (1-n)}{d g n^3} V^2 \quad (21)$$

마찰계수와 R_e 수와의 관계는 멱함수 식의 형태로는 캐나다 Ottawa 대학의 실험결과(Hansen, 1992)를 회귀 분석해보면 다음과 같다.

$$f = 8.75 R_e^{-0.17} \quad (22)$$

따라서 일반식의 형태는 다음과 같이 된다.

$$f = C R_e^N \quad (23)$$

Hansen(1992)의 실험에 의하면 $R_e \geq 200$ 인 경우에 충분한 난류흐름이 발생되어, 완전난류흐름에서는 $N = 0$, $C = 3.15$ 로 마찰계수는 Reynolds수에는 관계없이 $f = 3.15$ 가 된다(Li 등, 1998). 식 (12), (13)식과 식(23)에서 다음이 얻어진다.

$$i = \frac{C}{8 g R^{1-N} n^{2+N} \nu^N} V^{2+N} \quad (24)$$

식 (14), (15)와 식 (23)에서 다음 식이 얻어진다.

$$i = \frac{3C (1-n)^{1-N} r_E^{1-N}}{4 (6 \nu)^N d^{1-N} g n^3} V^{2+N} \quad (25)$$

식 (24)와 (25)는 George 등(1992)이 제안한 모든 침투흐름에 적용 가능한 멱함수형태의 식으로, C 와 N 값의 적절한 입력이 필요하다. 따라서 층류와 난류흐름을 포함한 전 구간에 적용 가능한 $C = 8.75$ 와 $N = -0.17$ 을 식 (24) 및 (25)에 대입하면 다음과 같다.

$$i = \frac{1.1 \nu^{0.17} V^{1.83}}{g R^{1.17} n^{1.83}} \quad (26)$$

$$i = \frac{8.9 \nu^{0.17} (1-n)^{1.17} r_E^{1.17}}{d^{1.17} g n^3} V^{1.83} \quad (27)$$

Reynolds 수가 200보다 큰 완전한 난류상태에서 $N = 0$, $C = 3.15$ 이므로 평균유속 V 와 속도경사 i 는 다음과 같다.

$$i = \frac{C V^2}{8 g R n^2} = \frac{0.4 V^2}{g R n^2} \quad (28)$$

3. Stephenson식과의 관계 고찰

Stephenson(1979)은 여러 연구자의 마찰계수 f 와 사

석의 평균입경 d 를 이용한 Reynolds수 R_{es} 의 광범위한 실험결과를 토대로 이차원식 형태의 수두경사와 평균유속의 관계를 정립하였다.

$$R_{es} = \frac{Vd}{\nu} \quad (29)$$

마찰계수 f_s 는 다음과 같다.

$$f_s = \frac{i d g n^2}{V^2} \quad (30)$$

모서리 진 사석에 대한 당초 Stephenson(1979)의 f_s 와 R_{es} 의 관계는 다음과 같다.

$$f_s = \frac{800}{R_{es}} + 4 \quad (31)$$

Stephenson(1979)을 포함한 Hu 등(1988), Hansen(1992)의 실험결과를 통한 회귀분석식은 다음과 같다.

$$f_s = \frac{1298}{R_{es}} + 3.84 \quad (32)$$

이 경우는 $R_{es} > 2,000$ 에서 완전한 난류흐름현상이 발생되었다(Li 등, 1998). 속도경사 i 와 평균유속 V 사이의 이차원 형태의 식은 다음과 같다.

$$i = \frac{1300\nu}{d^2gn} V + \frac{3.84}{dgn^2} V^2 \quad (33)$$

식 (29),(30) 및 (31)을 이용한 관계는 다음과 같다.

$$i = \frac{800\nu}{d^2gn} V + \frac{4}{dgn^2} V^2 \quad (34)$$

식 (33)과 (34)에서 V 가 충분히 작다면 두 번째 항은 무시 가능하므로 이 식들은 Darcy식으로 정의되고, V 가 충분히 크다면 두 번째 항이 유속경사를 지배하게 된다. 제체에서 계산된 평균유속은 4.4에서 보듯이 10-2m/s 정도의 크기를 가지게 되어 제고의 여지가 있다. Stephenson(1979)에 의한 맥곡선 식의 관계는 다음과 같다.

$$i = \frac{K_t}{gdn^2} V^2 \quad (35)$$

여기서, 사석일 경우 $K_t=4$, 모서리를 둥글게 만든 돌의 경우 $K_t=2$, 그리고 매끈하게 다듬은 대리석 조각은 $K_t=1$ 이다.

4. 호안제의 적용 및 고찰

4.1 평택(아산항) 호안

평택(아산항) 호안은 총 660ha의 공유수면을 호안으로 축조하여 장래 항만으로 개발하도록 되어있는 현장으로 외곽호안 2,214m, 내항가호안 2,904m의 축조와 배수갑문을 설치하는 공사로서, 1998년 7월에 착공하여 2002년 12월에 완공되었다(그림 1).

그림 2는 내항 가호안과 외곽호안의 표준단면도이고, 표 1은 지점별 지반고를 나타낸 것이다.

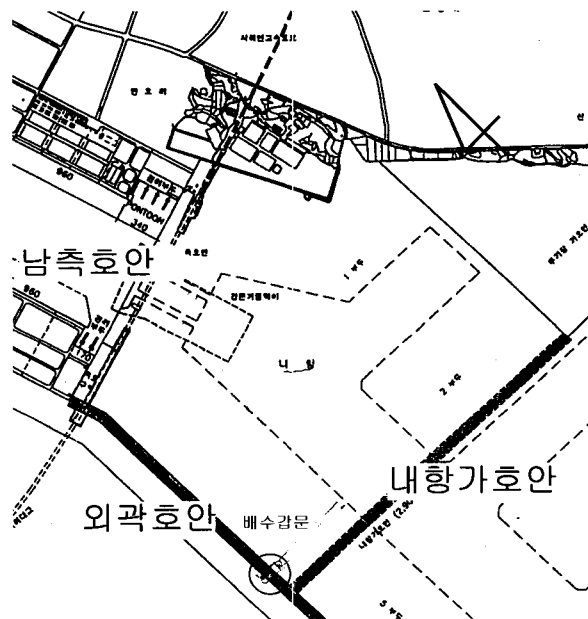


그림 1. 평택(아산항) 호안 평면도

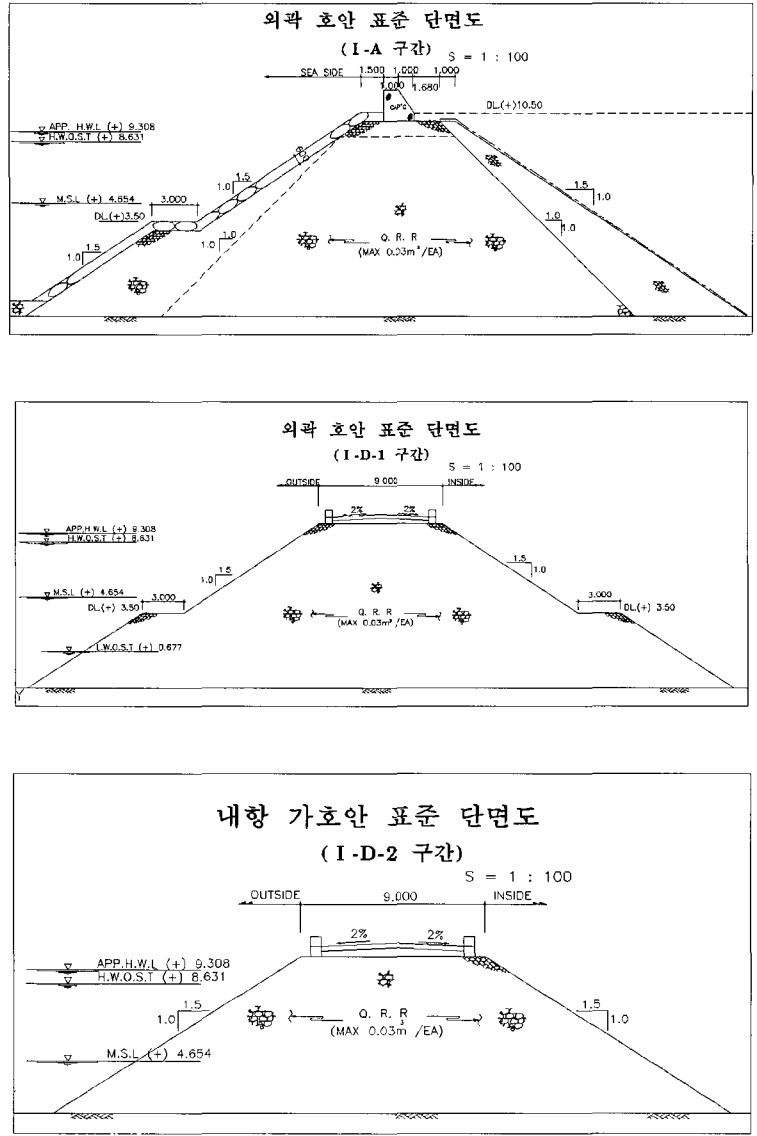


그림 2. 호안 표준단면도

표 1. 호안의 지반고

축척	지반고(DL. m)	거리(m)
No.0 ~No.75(내항가호안)	0	1,500
No.75~No.145(내항가호안)	-1.5	1,400
No.145~No.160(외곽호안)	-1.5	300
No.160~No.220(외곽호안)	-3.0	1,200
No.220~No.235(외곽호안)	-9.0	300
No.235~No.260(외곽호안)	-4.0	500

평택(아산항) 남측호안의 안벽구간의 표준단면도는 그림 3에서와 같고, 블록으로 구성된 729.7m와 케이슨으로 이루어진 520.3m, 그리고 일부 사석제 구간을 포함하여 1364.03m이다. 아울러, 평택(아산항) 외곽호안은

향후 항내 수위조절을 위하여 배수갑문을 시공하였으며, 현재로는 개방된 상태로 존속하고 있다. 그 체원으로는 폭 3.5m×4면 콘크리트 암거로 바닥표고는 DL(+) 4.1 m이고, 상단표고는 DL(+) 10.0 m이다.

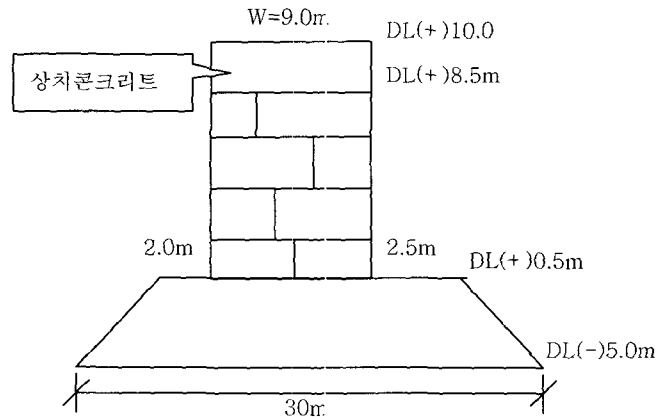


그림 3. 블록과 케이슨구간을 가진 남측호안 표준단면도

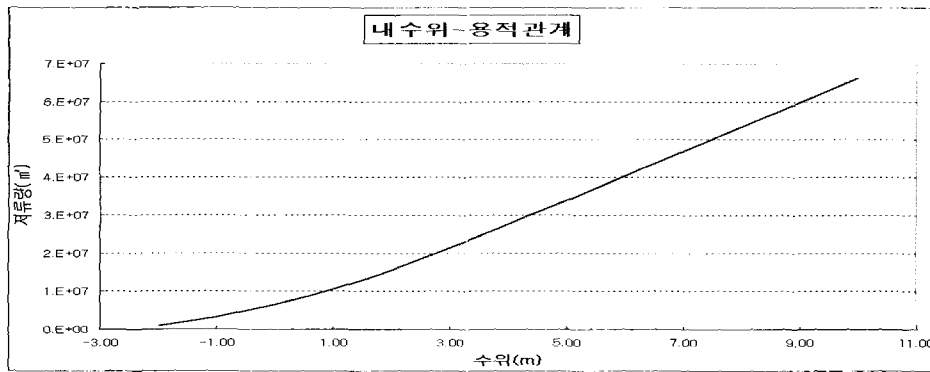


그림 4. 평택(아산항) 호수의 수위-내용적 곡선

4.2 수위-내용적 관계 및 내·외수위차 관측자료

평택(아산항) 외곽호안의 내측의 수위와 내용적 관계는 내항 측량 결과를 이용하여 산정한 것으로 그림 4에 서와 같다.

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

조위 측정은 3월 30일에 시작하여, 6월 19일까지 측정하였으며, 초기의 시행착오 등에 의하여 일부 측정하지 못한 경우와 4월 15일 전후에 실시한 끝물막이 기간을 제외하고는 연속적으로 측정하였다. 이들 자료 중 본 분석에 부합되는 자료로 4월 17일 소조기의 240분간의 연속자료와 5월 22일에서 24일까지 대조기의 10분 간격으로 측정된 연속 3개 자료를 선정하였다. 이때, 제체를 통한 non-Darcy 흐름특성의 분석이 목적이므로 체

절 완료후의 자료로 내·외측 수위가 배수갑문의 유출·입이 없는 수위 DL(+)4.10m 미만의 자료를 선정하였다.

4.3 $i-V$ 관계식

사석구간에서의 $i-V$ 관계식을 구하기 위해서 Li 등(1998)과 Stephenson(1979)이 제안한 식(28)과 식(35)를 사용할 때 사석의 직경과 그에 따른 평균수리수심 및 공극율이 필요하다. 평택(아산항) 호안의 축조재료의 사석크기가 $0.001 \sim 0.03m^3/EA$ 이을 감안하여 구형으로 환산하여 계산한 사석재료의 평균입경 d_{50} 은 0.255m이고, 이는 그림 5에서와 같이 광양항 중마 일반부두의 d_{50} 이 0.2m임을 미루어 가능하고, 그때의 평균수리수심은 0.017m이다. 이 등(2001)에 의하면 평택(아산항) 외곽호안의 간극비는 0.4로 그에 따른 공극율은 0.28정도로 공극율은 호안축조 중의 다짐과 축조후의 압밀 또는 공극의 메임으로 인하여 정확한 계산은 어려우므로 이 기준 값을 전후로 한 범위인 0.27에서 0.29까지 변화시

켜 2001년 5월 22일 21시 50분에서 5월 23일 1시 10분까지의 현장에서의 내·외수위 실측자료와의 비교를 통해서 분석하였다. 분석결과 그림 6에서 보는 바와 같이 공극율이 0.28일 때가 비교적 잘 맞았고, RMS(Root Mean Square)오차는 0.023이다. 따라서 아산항 외곽호안의 공극율을 0.28로 하여 여러 형태의 조석조건에 대해서 수치실험 하였다.

표 2는 사석, 블록 및 케이슨 구간의 각 식에 의한 $i-V$ 관계식을 나타낸 것이다. 이때 블록과 케이슨 호안에 대한 침투흐름은 공극이 충분히 크고, 각각의

평균수리수심이 0.015m와 0.02m로 Darcy흐름의 적용이 아닌, 앞서 제시한 pipe를 통과되는 흐름에 대한 마찰손실공식으로부터 유도된 수두경사 i 와 평균유속 V 에 대한 non-Darcy 흐름으로 해석하였다. 따라서 직사각형 블록과 케이슨 구간에 대한 $i-V$ 관계식의 변수를 재조명해 볼 필요는 있으나, 이는 실험 또는 현장관측을 통한 규명이 필요하고, 일반적인 사석 투과흐름에 제시된 변수의 적용을 통해서 해석하였다. 수두경사에 따른 평균유속의 계산결과는 2차식과 멱함수식이 큰 차이가 없으므로 본 연구에서는 멱함수식을 적용하였다.

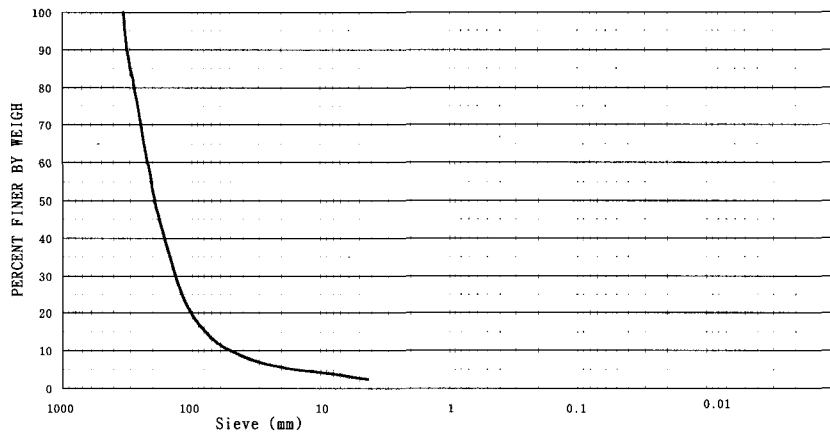


그림 5. 호안 사석의 입경분포도(광양항)

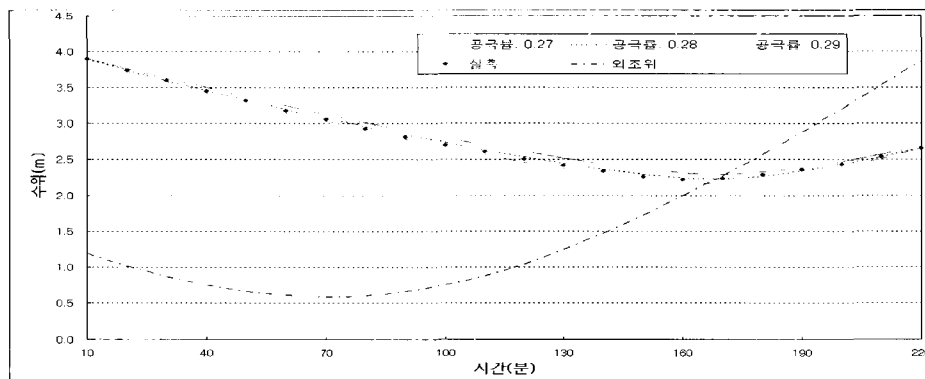


그림 6. 적정 공극율 산정을 위한 수치실험결과

표 2. 사석, 블록 및 케이슨구간의 $i-V$ 관계식

구분	Li 등(1998)		Stephenson(1978)	
	quadratic form	power form	quadratic form	power form
사석	$i=0.0165 V+29.09 V^2$	$i=30.62 V^2$	$i=0.0045 V+20.42 V^2$	$i=19.03 V^2$
Block	$i=0.336 V+9675.73 V^2$	$i=10184.97 V^2$	$i=0.00017 V+70.68 V^2$	$i=70.68 V^2$
Caisson	$i=0.403 V+33566.06 V^2$	$i=35332.69 V^2$	$i=0.00004 V+107.25 V^2$	$i=107.25 V^2$

4.4 적용결과 및 고찰

그림 7은 Stephenson(1979)과 Li 등(1998)이 제안한 $i-V$ 곡선에 대한 비교이다. Stephenson(1979)이 제안한 식은 같은 수두경사에 따른 유속이 크게 산정되어 호안을 통한 유량이 Li 등(1998)에 의한 방법보다 크게 계산된다. 이는 Li 등(1998)은 R_e 수가 200이상의 흐름에서 완전난류가 형성된 반면, Stephenson이 제안한 식은 R_e 수가 2,000이상에서 완전난류현상이 발생한 것으로 실험대상의 적용범위에 따른 차이일 것으로 판단된다. 여기서 R_e 와 R_{es} 의 관계는 $R_{es} = JR_e/e$ 로 $J=6$ 과 $e=0.4$ 적용 시 $R_{es} = 15R_e$ 의 관계가 된다.

일반적으로 사석 호안을 통과하는 non-Darcy 흐름에 대한 실험 또는 이론식의 현장에 적용시 적합한 지를 판단하기 위한 시도는 부재한 실정이다. 또한, 호안의 특성상 블록과 케이슨 구간이 동시에 존재할 경우 더욱 적용성에 대한 문제를 다룬 예는 없다. 따라서 서로 상이한 3가지의 조석주기에 대해서 수치실험을 실시하였다.

그림 5와 6에서 아산항 외곽호안의 사석의 크기가

$0.001 \sim 0.03 m^3/EA$ 이어서 평균입경 d_{50} 을 0.255m로 하였을 시 적합한 공극율은 0.28로 판단되었다. 아울러 블록과 케이슨 구간은 그 거치 상태가 그림 3에서와 같이 되어 환산 평균입경과 공극율의 계산이 가능하다.

그림 8은 2001년 5월 23일 10시 40분에서 13시 40분까지의 180분 자료를 이용한 아산항 외곽조위와 제체를 통과하는 흐름에 따른 내수위의 변화를 나타낸 것으로 실측자료와 잘 일치하였고, 이때 RMS오차는 0.027이다. 이때, 수두경사는 0.003에서 0.068까지이고, 그에 따른 평균유속은 0.009에서 0.046 m/s이다. R_e 수는 554에서 2,732로 Li 등(1998)이 제안한 완전난류흐름인 R_e 수 200이상으로 나타났다.

그림 9는 2001년 5월 23일 22시 20분에서 다음 날 1시 50분까지의 210분 자료를 이용한 수치실험 결과로 이 역시 실측자료와 잘 일치하였고, RMS오차는 0.037이다. 이때, 수두경사는 0.004에서 0.075까지이고, 그에 따른 평균유속은 0.011에서 0.049 m/s이다. R_e 수는 653에서 2,878로 Li 등(1998)이 제안한 완전난류흐름의 R_e 수 200이상이다. 이 두 가지의 경우는 외조위의 변화가 비교적 큰 대조시의 계산 예이다.

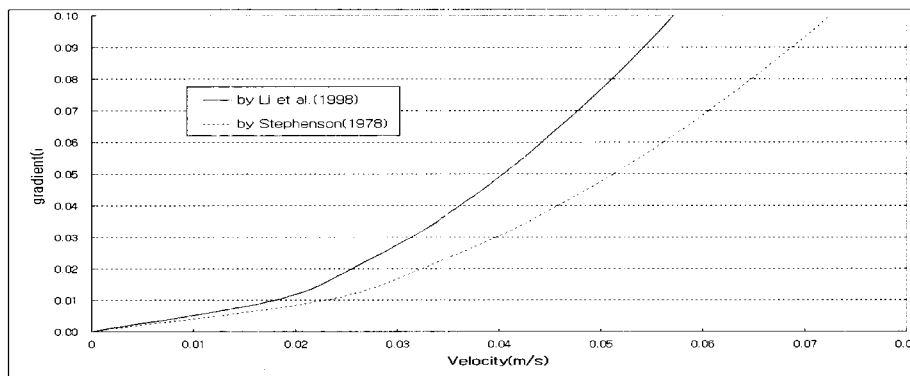


그림 7. 사석호안의 $i-V$ 관계식($d_{50}=0.255m$, porosity $n=0.28$)

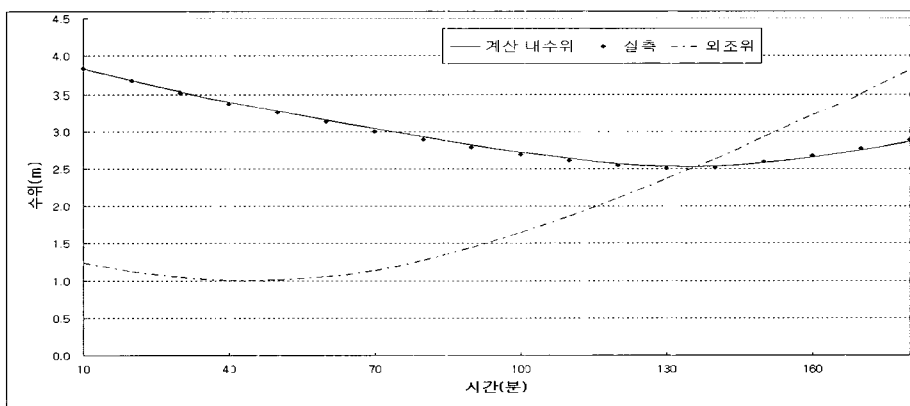


그림 8. 호안을 통한 non-Darcy 흐름에 의한 내수위 산정결과(2001. 5. 23)

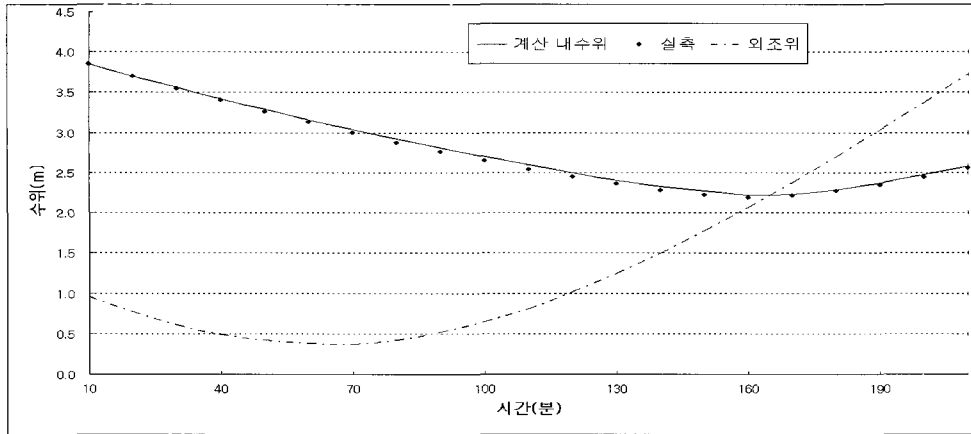


그림 9. 호안을 통한 non-Darcy 흐름에 의한 내수위 산정결과(2001. 5. 24)

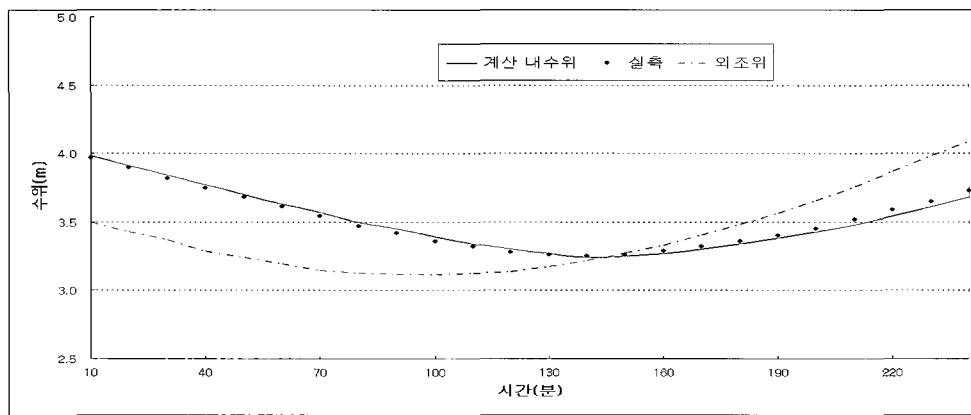


그림 10. 호안을 통한 non-Darcy 흐름에 의한 내수위 산정결과(2001. 4. 17)

그림 10은 소조기의 호안 통과흐름에 대한 수치실험 결과로 이 역시 실측자료와 잘 일치하였고, 이때 RMS 오차는 0.026이다. 이때, 수두경사는 0.001에서 0.014까지이고, 그에 따른 평균유속은 0.010에서 0.021 m/s 이다. R_e 수는 270에서 1,235로 Li 등(1998)이 제안한 완전난류흐름의 R_e 수 200이상으로 나타났다.

따라서, 호안 사석의 크기 $0.001 \sim 0.03 m^3/EA$ 인 아산항 외곽호안의 공극율을 0.28일 때 수치실험결과와 실측자료가 잘 일치하는 것으로 보아 적절한 값의 적용이라 판단된다. 아울러 그림 6에서 보듯이 공극율에 따른 투수량의 변화가 큰 것으로 판단되어 non-Darcy 흐름에 따른 Li 등(1998)의 제안식을 사용할 때 정확한 이 값의 입력이 요구된다.

관수로 흐름과 Taylor의 평균수리수심에 기초하여 사석에 적용되는 non-Darcy 특성의 흐름에 대한 $i-V$ 곡선의 적용이 블록 및 케이스 호안에도 적용 가능한 것으로 평가되나, 추가적인 고찰이 필요하다. 아울러 개발된 $i-V$ 곡선의 현장 적용결과 실측자료와 잘 맞아서 적용 가능한 식으로 평가되고, Stephenson(1979)에 제

안한 식은 다소 호안을 통과하는 흐름의 양을 크게 계산하는 것으로 나타났다.

5. 결 론

Darcy 흐름의 적용이 불가능한 사석으로 축조된 호안을 통과하는 흐름의 특성을 규명하기 위하여 수두경사, i 와 평균유속, V 의 관계를 고찰하였다. 이의 적용성 평가를 위해서 2001년 완공된 사석채움과 블록 및 케이스를 가진 아산항 외곽호안에 적용하여 non-Darcy 흐름특성을 분석하였다.

그 결과 Li 등(1998)이 제안한 호안제체를 통과하는 non-Darcy 흐름에 대한 $i-V$ 관계식의 해석결과는 실측자료와의 비교결과 잘 맞는 것으로 나타났다. 제체를 통과하는 흐름은 R_e 수가 200이상으로 완전 난류흐름으로 평가되어 non-Darcy 흐름특성을 적용하여야한다. 이식의 사용은 실제 현장에 적용성이 있는 것으로 평가되었고, 적용에 따른 변수인 공극율의 정확한 값의 입력이 요구된다. 관수로 흐름과 Taylor의 평균수리수심에 기초하여 사석에 적용한 non-Darcy 흐름에 대한

$i-V$ 곡선에 의한 해석방법을 블록 및 케이슨 호안에도 적용한 결과는 재검토의 여지는 있으나, 적용이 가능할 것으로 평가된다. Stephenson(1979)에 제안한 식은 다소 호안을 통과하는 흐름의량을 크게 계산하는 것으로 나타났다. 호안제체를 통과하는 흐름에 대한 정확한 계산은 호안의 최종체절 개방구간에서의 정확한 유속의 산정은 물론 축조 후의 호안 내의 수위의 변화를 예측할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2001년도 상지대학교 연구비 지원에 의한 연구이고, 연구 자료를 제공해준 (주)대림산업의 박형섭님과 이승한님께 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

이승한, 박형섭 (2001). "호안제체 투수계수 및 최종 체절구간을 통한 흐름의 유량계수." **대한토목학회지**, 제49권, 제12호, pp. 105-109.

Abt, S.R., Ruff, J.F., and Wittler, R.J. (1991). "Estimating flow through riprap." *J. Hydr. Eng.*, ASCE, Vol. 117, No. 5, pp. 670-675.

George, G.H. and Hansen, D. (1992). "Conversion between quadratic and power law for non-

Darcy flow." *J. Hydr. Eng.*, ASCE, Vol. 118, No. 5, pp. 792-797.

Hansen, D. (1992). *The behaviour of flow through rockfill dams*. Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Eng. Univ. of Ottawa, Ottawa, Ont., Canada.

Hu, Q. and Li, B. (1988). "Studies on the simulation of overtopped rockfill dams." *Internal Report*, Nanjing Hydraulic Research Institute.

Li, B., Garga, V.K., and Davies, M.H. (1998). "Relationship for non-Darcy flow in rockfill." *J. Hydr. Eng.*, ASCE, Vol. 124, No. 2, pp. 206-212.

McCorquodale, J.A., Hannoura, A.A., and Nasser, M.S. (1977). "Hydraulic conductivity of rockfill." *J. Hydr. Res.*, Vol. 16, No. 2, pp. 123-137.

Stephenson, D. (1979). *Rockfill in hydraulic engineering*. Elsevier Science Publishers BV (North-Holland), Amsterdam, The Netherlands, pp. 19-24.

Taylor, D.W. (1948). *Fundamentals of soil mechanics*. John Wiley and Sons Inc, New York.

(논문번호:03-103/접수:2003.11.06/심사완료:2004.01.02)