

Non-Darcy 흐름을 고려한 최종체절 수리특성분석

Hydraulic Characteristic Analysis of Final Closing considering non-Darcy Flow

최 흥 식*, 박 정 수**, 신 흥 근***
Hung Sik Choi, Jung Soo Park, Heung Keun Shin

요 지

Non-Darcy 흐름에 따른 호안제체의 흐름과 배수갑문을 통한 유출·입 특성을 고려한 체절구간의 수리특성분석 모형에 의한 해석결과는 실측자료와 비교적 잘 일치하여 개발된 모형의 적용성이 있음을 보여주었다. 실측치와 비교한 계산결과는 本間(1958) 식에 의한 계산이 나(1987)에 의한 방법보다 비교적 정확하게 계산할 수 있음을 보여주었다. 아울러 완전 또는 불완전 월류의 구분이 없이 잠수도에 의한 계산을 통해서 하나의 유량계수 관계곡선을 사용하여 간편하게 사용할 수 있는 나 식의 사용성을 보여 주었다. 本間 식과 나 식에 의한 계산 값이 실측치보다는 유출입 특성이 크게 나타나고 있는 것으로 나타났다. 따라서 현장에서의 체절구간의 불규칙적인 단면 양상을 감안한 유량계수의 조정이 필요할 것으로 판단된다. 일반적으로 체절구간의 수리특성의 분석을 위해서 체절구간 유량의 고려는 Darcy 흐름에 기초하여 분석한 것이 지금까지의 분석이다. 체체를 통과하는 유량과 개방구간을 통과하는 유량의 비가 체절구간이 좁을수록 크게 나타나 체체의 정확한 유출입 특성을 고려한 체절구간의 수리특성을 분석해야할 필요가 있음을 확인하였다.

핵심용어 : non-Darcy흐름, 호안제체, 최종체절, 잠수도

1. 서 론

간척지 조성 또는 항만개발을 위한 해안매립을 위해서는 호안을 축조하게 되고, 이의 성공여부는 최종체절에 달려있다. 효과적인 체절을 위해서는 적절한 체절방법(점축식, 점고식 또는 이의 병행방식), 투하사석의 중량 또는 규격, 체절시기 등의 선택이 있다. 이를 위해서는 체절 중 내·외측 간의 수위차에 의한 개방구간에서의 정확한 유속의 예측이 필요하다.

매립공사를 위한 호안의 축조는 보통 입자가 큰 사석재료를 사용하게 되므로 체체를 통과하는 유량이 고려되어야한다. 따라서 내·외수위 차에 의한 체절 구간을 통한 해수의 유출·입 특성의 분석을 위해서는 체절구간의 조량의 유출·입과 체체를 통과하는 유량을 알아야만 호안 내의 수위를 알 수 있고, 이에 의한 외수위와의 차이에 의해 개방구간 또는 갑문을 통한 정확한 유량의 계산이 가능하다.

* 상지대학교 건설시스템공학과 부교수
** 상지대학교 건설시스템공학과 석사과정
*** (주)기흥건설 대표이사

제체를 통과하는 흐름의 해석을 위해서는 관수로흐름과 Taylor(1948)의 평균수리수심(mean hydraulic radius)에 기초한 사석제체흐름의 해석을 위한 non-Darcy 특성의 수두경사-평균유속 ($i-V$)관계를 적용하여 체절제체 구간의 투과흐름에 대한 수리특성을 분석한다. 아울러 체절개방 구간과 배수갑문을 통과하는 유량의 정확한 산정을 위해서는 적절한 식의 선정은 물론 그에 따른 정확한 유량계수의 입력이 필요하다.

본 연구에서는 제체를 통과하는 유량이 체절개방구간이 작을 시는 상대적으로 큰 값 또는 이 값과 크거나 유사할 수가 있어, 이 량의 고려가 필요함을 인식하고, 제체 단면을 통과하는 유량을 정확히 계산할 수 있는 과정을 포함하여 체절구간의 수리특성을 분석하였다.

2. 호안제체에서의 non-Darcy 흐름특성

사석제에서의 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 원형실험은 시간과 경제적인 측면에서 거의 불가능하기 때문에 여러 가지 사석규격, 형태에 따른 실험을 통해 이 관계식의 물리적 변수를 규명하였다. Li 등(1998)은 물리적 변수는 사석의 크기, 공극율, 그리고 입자의 형상에 지배된다고 하여 이들과의 관계식을 구성하였다. 즉, Darcy 흐름법칙이 적용되지 않는 흐름에서 일반적인 수두경사와 유속의 관계는 마찰계수와 Reynolds 수에 의한 마찰손실법칙에 의해서 결정하였다. 따라서 사석사이의 흐름은 관수로 흐름으로 해석 가능하다.

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(최, 2004).

3. 체절개방구간에서의 흐름

3.1 체절개방구간에서의 수리특성

3.2.1 월류 흐름특성

그림 2에서와 같이 체절 개방구간이 일시에 축소되는 경우에 있어서 단면축소에 의한 배수곡선이 발생되며 상류부 배수곡선의 영향이 시작되는 부분을 단면 1로 하면 여기서부터의 흐름은 점변류 흐름이 된다. 체절 폭의 0.5~2 배 되는 상류에서부터 유속은 가속되기 시작하여 축소단면이 끝나는 지점을 단면 2라 하면 여기까지의 흐름은 급변류가 되며, 흐름단면은 갑자기 축소되어 심한 난류의 상태로 되고 유속은 최대가 된다. 따라서 단면 2에서의 실제 유속은 축조재료의 투하안정 및 유실에 중요한 역할을 하기 때문에 이의 정확한 해석이 요구된다.

단면 2를 지난 흐름은 점축식인 경우에 중앙부에서 서서히 유속이 줄어들고 양쪽 가장자리 부근에서는 와류가 발생하고, 흐름은 분리되어 점변류로 바뀌며 이 구간을 지나서 등류흐름으로 되

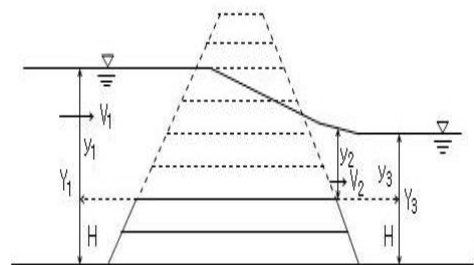


그림 2. 최종체절구간의 수리특성

는 지점을 단면 3으로 하면 단면 1에서 단면 3까지를 단면의 축소로 인하여 흐름의 영향을 받는 범위라 할 수 있다.

3.2.2 유량계수 추정

나(1987)의 실험에 의하면 완전월류와 불완전월류의 구분 없이 유량계수는 $S = y_3/y_1$ 으로 정의되는 잠수도와 관계가 있는 것으로 판단되어 나온 결과는 그림 3에서와 같다.

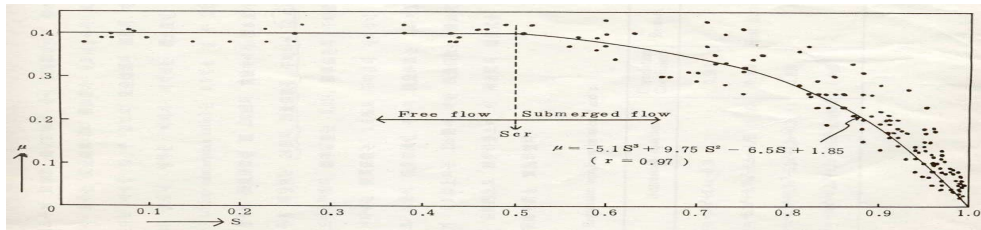


그림 3. 잠수도, S 에 따른 유량계수, μ (나, 1987)

그림 3에서 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.

3.3 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.

$$\text{완전월류(free flow)} \quad Q = \mu' b y_1 \sqrt{2g y_1} \quad (1)$$

$$\text{불완전월류(transitional flow)} \quad Q = (\alpha y_3/y_1 + \beta) b y_1 \sqrt{2g y_1} \quad (2)$$

$$\text{잠수월류(submerged flow)} \quad Q = \mu'' b y_3 \sqrt{2g(y_1 - y_3)} \quad (3)$$

여기서 α , β 는 상수이고, μ' , μ'' 는 유량계수로서 월류단면과 흐름조건에 따른 값이다.

3.4 모형의 구성

그림 4는 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 총유량이 계산된다. 아울러 체절에 따른 내외수위의 변화를 출력하게 된다.

3.5 모형의 적용 및 검토

그림 5는 대조기인 아산항 외곽호안의 최종체절 기간인 2001년 4월7일 0시부터 16시 까지 개방구간 146.8m와 배수갑문을 통한 유량을 고려한 체절개방구간의 유속계산결과와 그에 따른 실측 내수위와 계산내수위로 실 측치와 잘 일치하여 모형의 적용성이 있음을 보여주었다. 이때 本間(1958) 식에 의한 체절구간의 유속은 약 3.0 m/s에서 4.0 m/s으로 나타났다. 나(1987)의 식의 적용을 통한 내수위의 계산결과는 本間(1958) 식의 적용에 의한 계산결과 보다는 고조 때는 비교적 잘 일치하나, 저조에서 나(1987)의 식에 의한 결과가 유출을 크게 나타냈다.

실측치와 계산치의 상대오차는 本間(1958) 식의 경우는 최대 17%, 나(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.

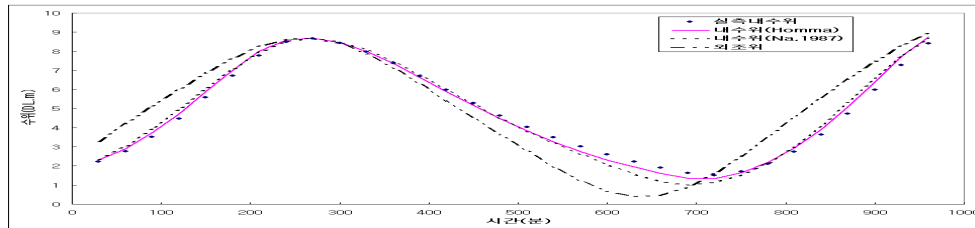


그림 5. 실측 및 계산 내수위의 변화(2001. 4. 7)

그림 6은 개방구간이 146.8m 일 경우 창/낙조시 최대유출입이 일어날 시 체체구간의 투과유량이 체절개방구간의 유량에 창조시 약 75~78%, 낙조시 약 74~81%로 나타나 체체구간의 유출입 특성을 고려한 체절구간의 수리특성을 분석해야함을 보여준다. 창조 시에 本間(1958) 식의 사용에 의한 체절개방구간의 유량이 크게 나타났고, 낙조 시에는 나(1987) 식에 의한 유량 계산결과가 다소 크게 나타났다.

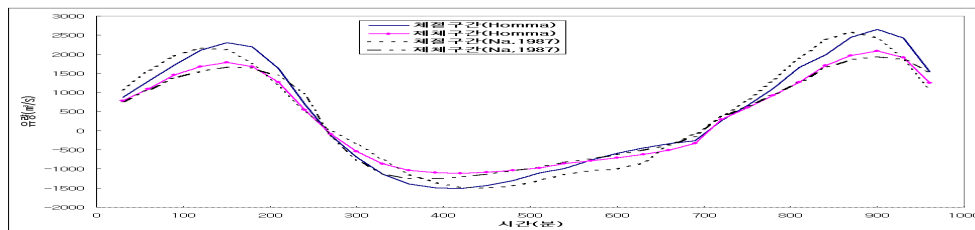


그림 6. 체체와 체절개방구간의 통과유량(2001. 4. 7)

그림 7은 소조기인 아산항 외곽호안의 최종체절 기간인 2001년 3월 30일 10시 50분부터 18시 20분까지 개방구간 235.97m와 배수갑문을 통한 유량을 고려한 체절개방구간의 유속계산결과와 그에 따른 실측 내수위와 계산내수위로 실측치와 잘 일치하였다.

실측치와 계산치의 상대오차는 本間(1958)식의 경우는 최대 19%, 나(1987) 식의 경우는 약 22%로 나타났다. 아울러 RMS 오차는 Homma식의 경우 0.31, 나(1987) 식의 경우 0.32로 나타났다.

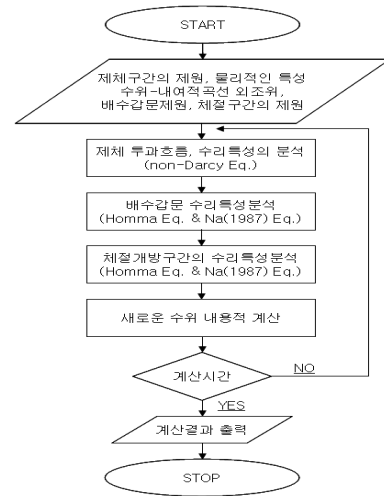


그림 4. 최종체절구간 수리특성 분석을 위한 흐름도

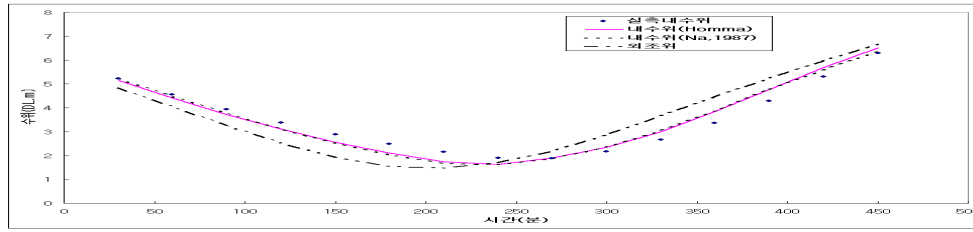


그림 7. 실측 및 계산 내수위의 변화(2001. 3. 30)

그림 8은 개방구간이 약 236m 일 경우 창/낙조시 최대유출입이 일어날 시 제체구간의 투과유량이 체절개방구간의 유량에 창조시 약 36~43%, 낙조시 약 43~44%로 나타나 이 때 역시 제체구간의 유출입 특성을 고려한 체절구간의 수리특성을 분석해야함을 보여준다. 창조 및 낙조 시에 本間(1958) 식의 사용에 의한 체절개방구간의 유량이 다소 크게 나타났다.

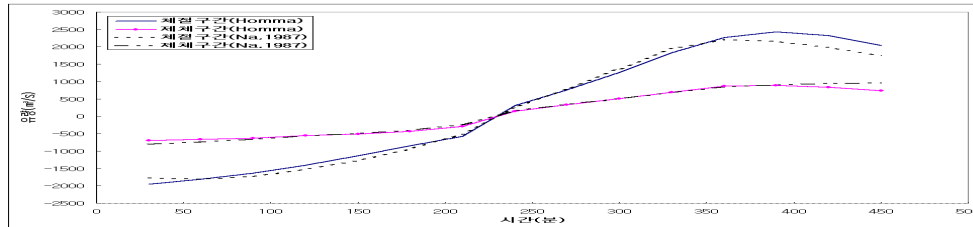


그림 8. 제체와 체절개방구간의 통과유량(2001. 3. 30)

4. 결론

체절방식이 점축/점고의 병행양상임을 감안하여 본 연구에서는 本間(1958) 식의 적용과 잠수도를 이용하여 완전 및 불완전 월류의 구분이 없이 사용할 수 있는 식인 나(1987)에 의해 개발된 식을 이용하여 사용성을 검토하였다. 本間(1958) 식의 사용에 따른 유량계수는 완전월류시 0.8, 불완전월류시 0.7을 사용하였다. 아울러 제체통과유량에 대한 non-Darcy 흐름관계인 $i-V$ 관계식에 의한 제체통과 유량과 배수갑문을 통한 유출입 특성을 고려한 체절구간의 수리특성분석 모형에 의한 계산결과는 아산항 외곽호안의 대조기 때의 최종체절 기간인 2001년 4월7일의 개방구간 146.8m와 소조기 때인 2001년 3월 30일 개방구간 약 236m에 대해 적용에 따른 실측 내수위와 계산내수위는 잘 일치하여 개발된 모형의 적용성이 있음을 보여주었다. 따라서 완전 또는 불완전 월류의 구분이 없이 잠수도에 의한 계산을 통해서 하나의 유량계수 관계곡선을 사용하여 간편하게 사용할 수 있는 나(1987) 식의 사용성을 보여 주었다.

참 고 문 헌

1. 나정우, (1987). 방조제 체절구간에서의 수리특성에 관한 실험적 연구, 서울대학교 대학원 석사학위논문.
2. 本間仁, 石原藤次郎, (1958). 應用水理學, 丸善, pp. 154-156.
3. 최홍식 (2004). “호안제체에서 non-Darcy 흐름해석”, 한국수자원학회논문집, 37(2), pp. 97-96.
4. Li, B., Garga, V.K., and Davies, M.H., (1998). Relationship for non-Darcy flow in rockfill, *J. Hydr. Eng.*, ASCE, 124(2), pp. 206-212.
5. Taylor, D.W. (1948). *Fundamentals of soil mechanics*, John Wiley and Sons Inc., New York.