

제주의항 서방파제의 해수교환량 산정 Computation of Sea-water Exchange Discharge in Western Breakwater of Jeju New Harbor

이홍규¹, 광문수², 편종근³
 Hong Gyu Lee¹, Moon Su Kwak² and Chong Kun Pyun³

1. 서 론

기존의 방파제는 항내의 정온수역 확보 및 선박의 안전한 출입을 목적으로 하여 건설되었고, 이에 따라 항내 수질이 점점 악화되는 부작용이 나타나고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 최근에는 항내의수를 교환시키는 해수교환방파제가 건설되고 있다. 해수교환방파제는 조류의 흐름을 이용한 형식과 파랑을 이용한 월류제로 나눌 수 있다. 항 외측으로부터의 흐름의 영향이 거의 없는 경우에 파랑에 의한 해수교환 효과를 고려할 수 있다.

본 연구에서는 시간의존완경사방정식을 이용하여 한주기 동안의 단위폭당 월파량을 산정한 후 이것으로부터 해수교환방파제 전체의 월파량을 산정하는 방법을 제시하였다. 여기서는 월류식 해수교환방파제가 설치되어 있는 제주의항에 본 월파량 산정방법을 이용하여 월파량을 구하고, 이 월파량에 의한 항내 수교환 시간을 구하였다.

2. 월파량 산정

2.1 기본방정식 및 경계조건

본 연구에 사용된 파랑 해석모형의 기본방정식은 西村 등(1983)의 시간의존완경사방정식에 쇄파 감쇠항을 추가하여 천수, 굴절, 회절, 반사, 쇄파를 동시에 고려할 수 있는 모형이다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{n} \nabla \cdot (n \vec{Q}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{Q}}{\partial t} + C^2 \nabla \eta + F_D \vec{Q} = 0 \quad (2)$$

여기서,

$$\vec{Q} = \text{선유량 벡터}(Q_x, Q_y)$$

$$C = \text{파속}$$

$$\eta = \text{수면변위}$$

$$F_D = \text{쇄파감쇠계수}$$

$$n = \frac{C_g}{C}$$

이 모형은 공간상의 계산점에 대해서는 엇물림 격자(staggered grid system), 시간에 대해서는 Leap-Frog방법을 이용한 양해적 유한차분법(explicit finite difference method)을 써서 수치모형화 하였다. 쇄파대내에서는 식 (2)의 제 3항을 무시하고, 쇄파대외에서는 제 3항을 고려하여 차분하였다. 식 (1), (2)는 \vec{Q} 에 대해서 비선형인 방정식이지만 \vec{Q} 의 값을 일주기전의 값을 사용함으로써 선형화한 차분기법을 이용하였다. 계산영역내의 경계조건은 각각 외해측 입사경계조건, 측방 입사경계조건, 투과경계조건, 장애물에 대해서는 임의반사율 경계조건을 설정하였으며, 임의 반사율 경계에 필요한 구조물에 대한 입사각은 선유량 타원곡 수면변위의 관계로부터 결정하였다. 계산영역 주변의 개방경계에 대해서는 3

1 발표자: 명지대학교 토목환경공학과 석사과정

2 명지전문대학 토목과 부교수

3 명지대학교 토목환경공학과 교수

격자 정도의 가상영역을 접속시켜 경계조건으로 취급 및 수치계산이 용이하도록 하였다.

계산영역의 초기조건은 수위와 유량이 0인 정수면 상태를 가정하였고, 심해로부터 천해역으로 파랑을 전파시켜 정상상태의 해를 계산결과로 하였다. 차분계산의 시간간격 Δt 는 안정조건을 만족하도록 취하였다.

2.2 산정 방법

Fig. 1은 방파제에 있어서 해수교환기능을 평가하기 위한 월파량 산정방법을 나타낸 것이다. 우선 파형으로부터 구해지는 유입량에 대해서는 다음 월류량에 관한 Forchheimer의 식을 이용한 방법을 사용하였다 (森田 등, 2002; 尹, 2004).

$$Q_w = C_w L_w \left(\frac{h_1 + h_2}{2} \right)^{3/2} \quad (3)$$

여기서, Q_w 는 월류량(m^3/s), C_w 는 유량계수, L_w 는 월류장, h_1, h_2 는 월류수심이다. 이 식은 정상상태를 가정한 것이므로, 파랑에 의한 월파에는 그대로 적용할 수 없다.

파동의 경우에는 Fig. 1과 같은 시간파형에서, 1주기 동안의 월파량 Q'_w 은 그림의 빗금친 부분의 면적이 되고 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$Q'_w = \frac{1}{\omega} \{ H \sin \omega t_1 - 2(h_c - h) \omega t_1 \} \quad (4)$$

여기서, h_c 는 방파제의 하단에서부터 높이, t_1 은 월파되는 시간의 반이고 H 는 파고이다. 식 (3)의 오른쪽 월류수심의 항은 평균수심 h_w 로 나타내어주면, 식 (3)에 의해서 방파제 전체의 월류량을 구할 수 있다.

$$h_w = \frac{Q'_w}{2t_1} \quad (5)$$

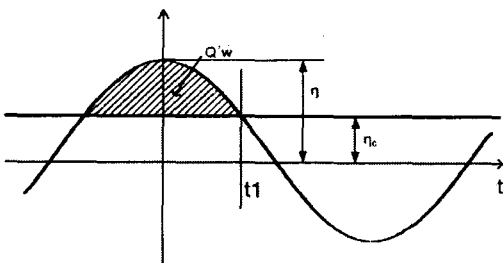


Fig. 1. 한주기 동안의 월파량 모식도

월파량은 Forchheimer의 식을 이용하여 계산하고, 이를 투과경계의 선유량으로 바꾸어 넣는 방식을 이용한다. 또, 투과경계의 선유량은 월파할 때에만 한정하여 투과경계 조건을 주기로 하고, 안정이 될 때까지 계산을 수행한다. 한편 실험으로부터 얻어진 유량계수를 이용하여, 시간의 존완경사방정식의 선유량을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$Q_i = C_w (\eta - \eta_c) \Delta s dt \quad (6)$$

여기서, Q_i 는 i 방향 성분의 선유량, η 는 수면 변위, η_c 는 방파제 하단에서부터 수면 높이, Δs 는 공간 차분간격, dt 는 시간 차분간격이다.

3. 수리모형실험

정확한 월파량을 산정하기 위해서는 유량계수 C_w 의 추정이 중요하다. 본 연구에서는 수리모형 실험을 통해서 유량계수를 추정하였다.

본 연구에 사용된 단면수조는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 폭 0.7m, 높이 1.4m, 길이 30m의 피스톤 타입의 수조이다. 축척은 1/49을 적용하여 원형에서는 22.0m의 수심을 모형에서는 45cm로 하고, 구조물의 높이는 원형에서 23.5m, 모형에서는 48cm로 하여 실험을 하였다.

Fig. 3, 4는 수리모형실험을 위해 설치된 모형의 단면과 월파량 측정장치를 나타낸 것이다. 월파량 측정장치는 방파제를 넘어 월파된 유량을 담을 수 있게 제작이 되었다. 월파량 측정장치에 담긴 유량을 펌프를 이용하여 가로×세로(50cm×50cm)의 직사각형 수조에 옮겨 담아 월파량을 측정하였다. Table. 1에는 실험케이스를 나타내었다.

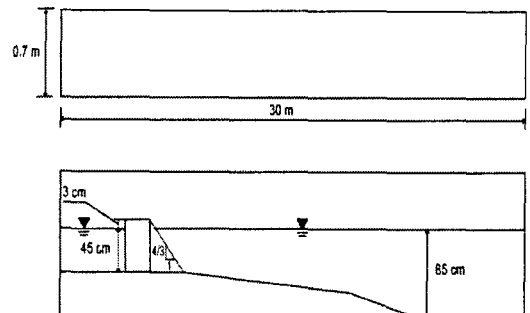


Fig. 2. 수조의 제원 및 실험단면

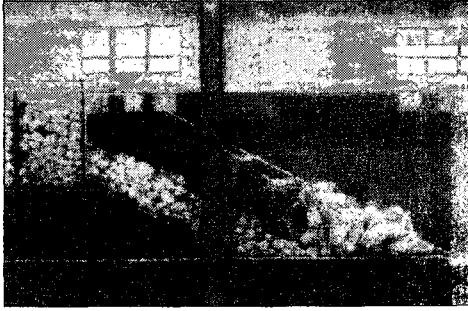


Fig. 3. 모형단면



Fig. 4. 월파랑 측정장치

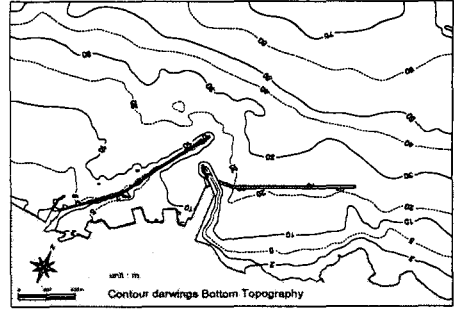


Fig. 5. 등수심도

Table 1. 수리모형실험 조건

| 수심 (cm) | 원형 | | 모형 | | 비교 측척 |
|------------|--------|------|--------|-------|----------|
| | T(sec) | H(m) | T(sec) | H(cm) | |
| (-)45.0 | 7.5 | 2.0 | 1.1 | 4.1 | 1/49 |
| | | 3.0 | | 6.1 | |
| | | 4.0 | | 8.2 | |
| | | 5.0 | | 10.2 | |
| | 8.5 | 2.0 | 1.2 | 4.1 | |
| | | 3.0 | | 6.1 | |
| | | 4.0 | | 8.2 | |
| | | 5.0 | | 10.2 | |
| | 9.5 | 2.0 | 1.4 | 4.1 | |
| | | 3.0 | | 6.1 | |
| | | 4.0 | | 8.2 | |
| | | 5.0 | | 10.2 | |

4. 수치계산

4.1 계산조건

본 연구에서는 제주외항의 서방파재에 설치된 해수교환방파재의 월파랑을 산정하였다. 파랑조건은 평상시의 조건으로 적용하여 입사파향 NNW, 입사파고 3.7m, 주기 8.5sec으로 하였다. 그리고 수치계산의 안정성을 위해 C.F.L 안정조건을 만족하도록 계산시간간격 Δt 는 0.1 sec로 하였으며 계산격자 간격은 $\Delta x = \Delta y = 10m$ 로 하였다. Fig. 5는 대상지역의 수심도를 나타낸 것이다.

4.2 계산결과

Fig. 6은 파향벡터도를 나타낸 것이고, Fig. 7은 수치계산과 수리모형실험을 통하여 파고변화에 의한 단위폭당 월파랑을 비교하여 나타낸 것이다. 월파랑은 동일주기 상태에서 파고가 증가함에 따라 월파랑도 같이 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 8의 유량계수는 수치계산과 수리모형실험의 결과로 산정하였다. 각 주기대별 결과에서 유량계수를 산정하면, 주기 7.5sec에서는 0.15, 주기 8.5sec에서는 0.2, 주기 9.5sec에서는 0.25의 유량계수를 추정할 수 있었다.

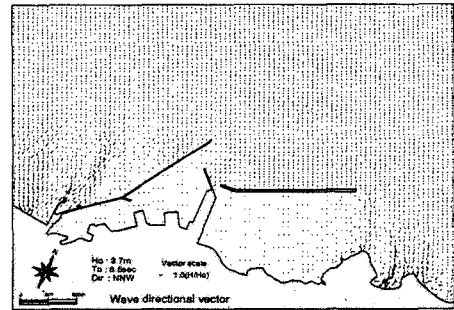


Fig. 6. 파향벡터도

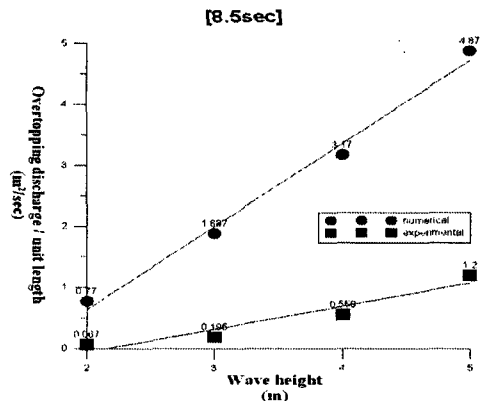


Fig. 7. 단위폭당 월파랑 비교

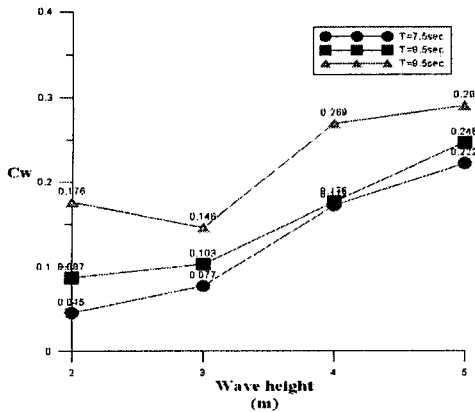


Fig. 8. 유량계수

5. 항내 수교환 시간 산정

본 연구에서는 제주의항 서방파제의 해수교환방파제에 의한 항내 수교환 시간을 추정하였다. Fig. 9에서 빗금친 부분은 수면적 계산을 위한 항내측의 단면적을 표시한 것이다. 항내측 해수소통구의 크기는 2m×2m이고, 항외측의 해수소통구 한 칸의 폭은 4.575m이다. 그리고 해수소통구의 길이는 약 60m 이다. 제주의항의 해수교환구간을 통한 월파량은 27.5m³/sec로서, 항내수가 월파량으로 인해 교환이 되는 시간은 4일이 걸리는 것으로 추정되었다(Table. 2)

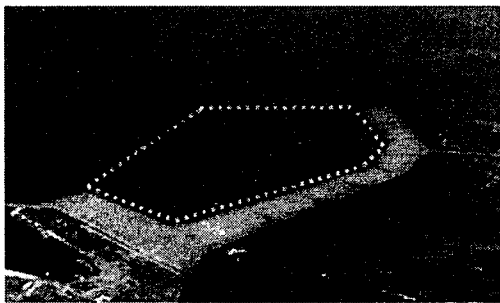


Fig. 9. 항내측 단면적

Table. 2. 항내 수교환 시간

| | |
|--------------------------|-------------------------|
| 항내측 면적(A) | 658,150m ² |
| 평균 수심(h) | 14.54m |
| 항내 체적(V) | 9,562,960m ³ |
| 월파량(m ³ /sec) | 27.5m ³ /sec |
| 항내 수교환 시간(hr) | t = V/Q = 4.0day |

6. 결 론

본 연구에서는 Forchheimer의 월류량 산정식을 이용해 월파량의 평면 2차원 해석 모델을 수립하였다. 본 연구에서 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

1. 수리모형실험을 통해 산정된 제주의항의 유량계수는 주기 7.5sec→0.15, 주기 8.5sec→0.2, 주기 9.5sec→0.25.
2. 월파량은 동일과고에서는 주기에 따른 변화는 작으며 동일주기에서는 파고변화에 따라서 월파량도 크게 증가하는 것을 알 수 있다.
3. 제주의항 서방파제의 해수교환방파제는 평상파 조건(NNW, H=3.7m, T=8.5sec) 일 때, 해수교환량은 27.5 m³/sec, 항내 수교환에 소요되는 시간은 약 4일이 걸리는 것으로 추정되었다.

참고문헌

- 森田修二, 尹晟鎭, 出口一郎 (2002). 通水路型防波堤の波動による海水交換機能に関する研究, 海洋開發論文集, 第18卷, 521-526.
- 尹晟鎭 (2004). 通水路型防波堤による港内の海水交換と堆砂制御に関する研究, 大阪大學大学院工学研究科博士學位論文.
- 西村仁嗣, 丸山康樹, 平口搏丸 (1983). 直接數値積分による波の場の解析, 第30回 海洋工學講演會論文集, 土木學會, 126-127.