

투과성 방파제 주변의 파랑장 해석 Wave Field Analysis around Permeable Breakwaters

곽문수¹ · 이기상² · 편종근³

Moon Su Kwak¹, Ki Sang Lee², and Chong Kun Pyun³

1. 서 론

항만을 계획함에 있어서 방파제는 가장 대표적인 계획요소로서 주된목적은 외해로부터 내습하는 파랑을 차단하여 항내의 정온수역을 확보하는 것이다. 그러나 불투과성 방파제의 경우는 폐쇄성이라는 특성 때문에 연안에서의 물질순환 체계가 구조물 건설 전의 환경과는 근본적으로 달라져 심각한 환경부작용이 초래되어 왔다. 육상으로부터 유입된 유기물질이 외해로 확산되지 못하고 항내에서 누적됨으로서 부영양화가 일어나며 항외에서의 산소를 포함하고 있는 해수의 유입이 차단됨으로서 항내는 만성적인 산소부족현상이 발생하게 된다. 현재 국내 대부분의 항만은 해수의 자정능력 상실로 인하여 항내수질이 극도로 악화되어 생태계에 악영향을 미치고 있으며 이러한 현상을 개선할 목적으로 최근들어 해수교환을 허용하는 투과성 방파제의 건설이 추진되고 있다. 투과성 방파제의 경우는 해수교환을 촉진하여 항내수질 개선에는 많은 도움을 주는 장점이 있지만 한편으로는 항내에 전달파를 발생시켜 정온도에 나쁜 영향을 주기도 한다. 따라서 방파제의 설계시 우선적으로 고려되어야 할 사항은 정온도로서 항내정온이 확보되는 전제하에서 해수교환을 위한 투과성 방파제가 고려 될 수 있을 것이다.

투과성 방파제의 수치모형에 대한 연구로서는 井島(1973) 등이 Green함수를 이용하여 항내파랑해석법을 일반화하고 방파제내의 유체운동에 대한 저항이 유속에 비례한다는 가정하에 투과방파제에 의

한 파의 산란 해석법을 제시하였고, 酒井(1978) 등은 임의반사율 경계조건을 투과파에 대해서도 적용할 수 있도록 확장하여 반무한제의 이론해와 비교하였으며, 鈴木(1984) 등은 에너지평형방정식 모형에 투과제를 통과하기 직전의 격자에서 다음격자로 유입하는 파 에너지를 투과율에 대응하여 감소시키는 방법을 사용하고 평면수리실험과 비교하였다. 또한 Yu(1995) 등은 선형포텐셜이론에 기초하여 투과성 방파제에의 회절에 관하여 연구하였고, 국내에서는 조일형(2001) 등이 직접 슬릿 방파제의 반사율과 투과율 그리고 슬릿판에 작용하는 파력을 계산하고 수리모형실험을 수행하여 비교하였고, 전인식(2002) 등은 투과파를 허용하는 부유식 방파제의 반사·투과 경계조건을 적용하여 항내정온도를 해석하였다.

한편 투수성 구조물에 대한 수리실험연구는 樺木(1992) 등이 투과파 해석의 주요변수인 선형저항계수에 대하여 차원해석을 이용 검토하고 수리실험을 통하여 파고, 피복제의 공극대표경의 효과와 선형저항계수에 미치는 레이놀즈수와와의 관계를 검토하였으며, Van Gent(1995) 등은 U튜브에서 투과제를 통과하는 흐름을 이용하여 투과율을 측정하였고, Lynett(2000) 등은 유공벽과 장파와의 상호작용을 해석하고 실험을 통하여 검증하였다. 국내에서는 서경덕(1992) 등, 박우선(1993) 등이 유공방파제에 대한 수리실험을 통하여 수리특성을 검토하였으며, 박현주(2002) 등은 경사식방파제의 반사율, 전달율, 간극수압등 제 수리특성을 해석할 수 있는 수치모형을 제시하고 실험을 통하여 검증하였

¹ 명지전문대학 토목과 (Civil Engineering, Myongji College, Seoul 120-103, Korea)

² (주)삼안건설기술공사 항만부 (Harbor & Coastal Dept., Saman Engineering Consultants Co., Ltd.)

³ 명지대학교 토목·환경공학과 (Civil & Environmental Engineering, Myongji University, Yongin 449-728, Korea)

계상의 값을 직접 계산하지 않아도 그 이전 격자점에서의 값의 시간적 변화로부터 구할 수 있다는 것을 나타내고 있다.

식(10)에서 $-(1-K_{r1})$ 항의 1이 입사파유량에 대응하는 항, $-K_{r1}$ 이 반사파유량에 대응하는 항인 것으로부터 입사파만의 유량은 $1/(1-K_{r1}) \cdot Q_{10}$ 으로 주어진다. 따라서, 경계면에서의 투과파 η_i 에 의한 유량은 $K_{r1}/(1-K_{r1}) \cdot Q_{10}$ 로 주어진다. 여기서, K_{r1} 은 경계면에서의 투과율이다. 제체 폭 B 의 반대측 경계 $20(x=-B)$ 에서의 투과파유량 ${}_i Q_{20}$ 은 방파제 폭 B 를 투과파가 통과하는데 필요한 위상차를 고려하여 다음 식으로 주어진다.

$${}_i Q_{20} = K_{r1}/(1-K_{r1}) \cdot {}_{ir} Q_{10}^{-B \sin \beta_1/c} \quad (14)$$

여기서 첨자 i 는 투과파에 대한 것을 나타내고, ir 은 입사파와 반사파에 의한 것을 나타낸다. 그리고 c 는 방파제 내에서의 투과파의 파속이다.

마찬가지로 그림 좌측으로부터 입사한 파의 반사파에 대해서도 동일하게 표시할 수 있다. 즉,

$${}_{ir} Q_{20} = A_2 \cdot {}_{ir} Q_2^{-\tau_2} \quad (15)$$

$${}_i Q_{10} = K_{r2}/(1-K_{r2}) \cdot {}_{ir} Q_{20}^{-B \sin \beta_2/c} \quad (16)$$

여기서 첨자 2는 좌측으로부터의 입사파에 의한 것을 나타낸다. 식(11)을 첨자를 붙여서 바꾸어 쓰면,

$${}_{ir} Q_{10} = A_1 \cdot {}_{ir} Q_1^{-\tau_1} \quad (17)$$

이고, A_2, τ_2 는 식(12), (13)에 있어서 1을 2로 바꾸어준 식으로 주어진다.

양경계에서의 경계조건은 양경계에서의 x 방향 유량을 Q_{10}, Q_{20} 으로 하여 다음식으로 주어진다.

$$Q_{10} = {}_{ir} Q_{10} + {}_i Q_{10} \quad (18)$$

$$Q_{20} = {}_{ir} Q_{20} + {}_i Q_{20} \quad (19)$$

식(14), (16)으로부터 ${}_i Q_{10}, {}_i Q_{20}$ 은 각각 ${}_{ir} Q_{10}, {}_{ir} Q_{20}$ 으로 주어지고 식(15), (17)로부터 ${}_{ir} Q_{10}, {}_{ir} Q_{20}$ 은 ${}_{ir} Q_1, {}_{ir} Q_2$ 로 주어진다. 이들은 각 격자점에서의 유량중 입사파 및 반사파에 의한 것이고, 각 격자점에서의 유량

$$Q_1 = {}_{ir} Q_1 + {}_i Q_1 \quad (20)$$

$$Q_2 = {}_{ir} Q_2 + {}_i Q_2 \quad (21)$$

로부터, 투과파에 의한 유량 ${}_i Q_1, {}_i Q_2$ 을 빼줄 필요가 있다. 이것들은 각각 투과파가 1격자간격 Δs 를 통과 하는데 필요한 위상차만큼 지체된 ${}_i Q_{10}, {}_i Q_{20}$ 으로 생각해서 다음 식으로 주어진다.

$${}_i Q_1 = {}_i Q_{10}^{-\Delta s \sin \beta_2/c} \quad (22)$$

$${}_i Q_2 = {}_i Q_{20}^{-\Delta s \sin \beta_1/c} \quad (23)$$

이렇게 하여 투과파가 있는 경우에 대한 경계조건이 주어지며 ${}_i Q_1, {}_i Q_2$ 의 값은 실제 수치계산에 있어서는 계산시간 증분에 따라 ${}_i Q_{10}, {}_i Q_{20}$ 으로부터 τ 시간 이전의 값을 2차 보간법으로 구한다. y 방향의 유량에 대해서도 동일한 방법에 의해 구해진다.

3. 모형의 검증

3.1 이안제 배후의 파고분포계산

대상으로 한 모델케이스는 일본 토목학회 해안공학 위원회에서 제시한 것으로서 가로 600m, 세로 400m인 영역의 중앙에 이안제가 설치된 경우이며, 이안제의 반사율 (K_R)은 0.4, 투과율 (K_T)은 0.3 이고(Fig.2), 계산조건은 Table 1과 같다.

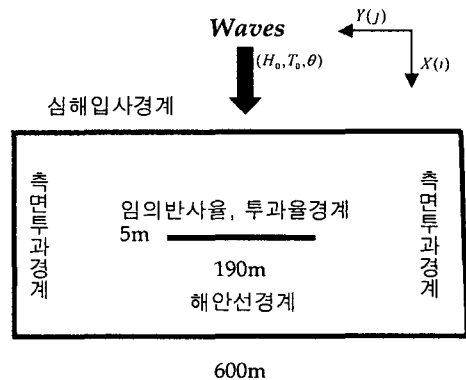


Fig. 2. Sketch of computation region for Permeable detached breakwater.

사용하여 1.03 으로 하였다. Fig.6 은 수치모형상에서 파가 정상상태에 도달했을 때의 수위값을 이용하여 그래프화 한 것으로 체제후면에 투과파가 형성됨을 잘 보여주고 있다. Fig. 7은 모형의 검증을 위하여 각 계측점에서 수리실험과 수치모형의 수위값을 비교 한 것이다.



Fig. 6. Wave profile by numerical model test.

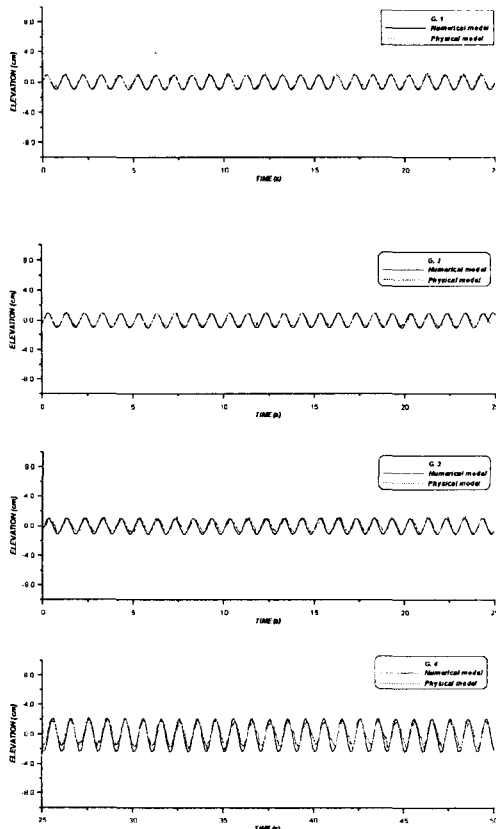


Fig. 7. Comparison of physical model test and numerical model test.

체제전면에 위치한 G4의 결과는 투과제를 통과하기 이전의 수위값으로 약 4.0cm의 분포를 나타내고 있으며, 수치모형에 의한 값이 실험에서 얻어진 값보다 약간 크게 나타나고 있으나 비교적 잘 일치하고 있다. 체제후면의 G1, G2, G3의 결과는 체제의 영향으로 수위가 작아짐을 알 수 있으며 약

2.5cm의 수위분포를 나타낸다. 두 결과는 3 계측점에서 모두 매우 좋은 일치를 보여 주고 있다.

3.3 투과성방파제에 대한 평면 실험과의 비교

본 연구에서는 모형의 현저 적용성을 검토하기 위하여 제주의항의 투과제 설치구간에 본 모형을 적용하고 평면수리실험 결과와 비교하였다. 수리실험결과는 건설기술연구원(2001)에서 실시한 실험내용을 사용하였다.

계산에 사용된 심해파의 파랑제원은 주기 11.0sec, 파고 7.0m, 주파향은 NNW 방향이고, 수리모형실험과 동일한 조건으로 비교하기 위해서 주파수 5 성분의 단일방향 불규칙파로 계산하였다. 격자형성은 주파향인 NNW 방향에 대하여 직각으로 하였으며, 격자간격은 10.0m, 계산시간간격은 CFL 조건을 만족하는 0.2sec 로 하였다. 계산에 사용된 구조물의 평면 배치는 항의 개발이 완성된 상태이다. 수치계산에서는 구조물의 반사특성을 계산에 적절히 반영하기 위해서 직립벽의 경우 0.9, 소파블록은 0.4, 자연해안은 0.1의 반사율을 적용하였다. 관심대상인 투과제의 경우, 반사율은 소파블록과 마찬가지로 0.4를 적용하였으며 투과율은 수리모형실험시 발생한 월파를 고려하여 0.6을 적용하였다. Fig. 8은 평면수조에 설치된 파고계와 유속계의 위치를 나타내고 있으며, 서방파제 두부 약 100m 구간을 단면경사 1:4/3으로 하고 64ton의 T.T.P를 피복한 투과제를 설치하였다.

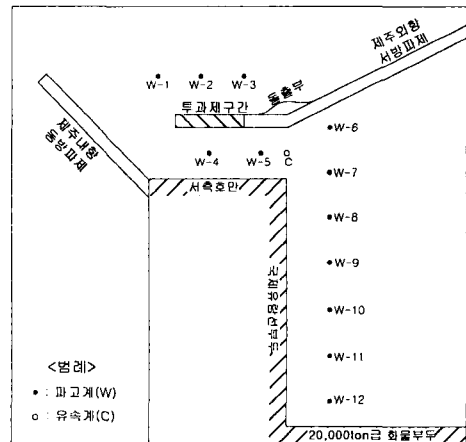


Fig. 8. Measured points of physical model test.

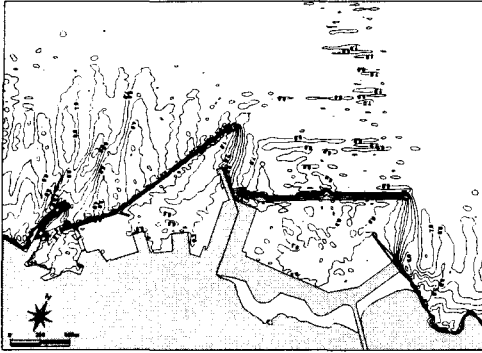


Fig. 9. Distribution of wave height ($K_T = 0.0$).

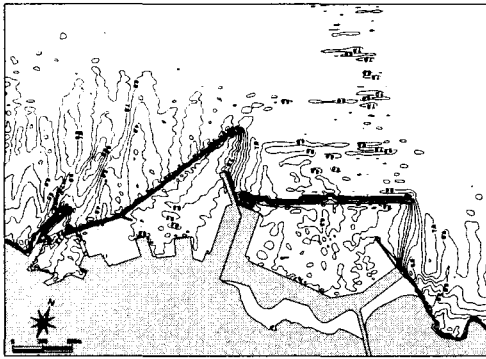


Fig. 10. Distribution of wave height ($K_T = 0.6$).

수치계산은 동일한 조건에서 $K_T = 0.0$ 불투과 인 경우와 투과율 $K_T = 0.6$ 인 경우에 대하여 수행하였으며, 각각의 계산결과는 등파고선도로 나타내었다.

Fig.9 는 불투과제 설치시의 계산결과로서 투과제 설치구간배후의 유람선 부두 전면의 파고는 0.2m 이하이다.

투과제를 설치한 Fig. 10 의 결과는 유람선 부두 전면에서 불투과의 결과에서는 나타나지 않던 0.3m 등파고선을 확인할 수 있다. Fig. 11 은 계측점별 평균파고비 값으로서 수치모형실험의 결과 및 본 모형에 의한 계산결과를 막대그래프로 도시한 것이다. 투과제 배후에 위치한 계측점 4 와 5 는 투과파의 영향으로 파고비 0.3, 0.24 의 높은 파고를 나타내고 있으며 투과율 $K_T = 0.6$ 의 결과는 수치실험 결과와 잘 일치하는 반면 투과율 $K_T = 0.0$ 의 불투과 결과는 과소평가됨을 알 수 있

다. 투과파의 차폐영역에 속하는 계측점 8~12 의 결과는 투과, 불투과 계산 모두 실험결과보다 과소평가 되고 있으며 이것은 시간의존 환경사 방정식 모형의 회절평가가 엄밀하지 못하기 때문으로 판단된다.

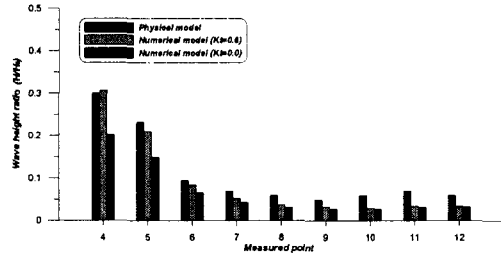


Fig. 11. Comparison of wave height ratio.

4. 결 론

본 연구에서는 해수교환방파제와 같이 투과성 방파제 주변의 파랑장을 해석하기 위하여 시간의존 환경사 방정식을 지배방정식으로 하고 입의 반사율 및 입의 투과율 경계조건을 사용하여 수치모형을 수립하였다. 또한 모형의 검증은 위하여 T.T.P 투과제에 대한 단면 2차원 수치모형실험을 실시 하였으며, 본 모형에 의한 결과는 검증실험결과와 좋은 일치를 보여주었다.

특히 본 모형의 결과는 투과제 후면의 투과파에 대해서 수치모형실험의 결과를 잘 재현함을 알 수 있었다. 여기서는 단면실험에서 얻어진 투과율과 반사율을 수치모형에 적용하였지만, 실제의 항만 계획 시에는 기존 실험연구에서 보고된 투과성 구조물의 투과율, 반사율을 적절히 선택하여야 할 것이다.

참고문헌

- 건설기술연구원, 2001. 제주외항 대안 입찰 수치모형 실험 보고서.
- 박우선·전인식·이달수, 1993. 유공방파제의 반사특성에 관한 수치실험. 한국해양·해양공학회지, 5(3): 198-203.
- 박현주·전인식·이달수, 2002. 경사식 방파제의 수치특성 결정을 위한 수치해석. 한국해양·해양공학회지, 14(11): 19-33.
- 서경덕·오영민·전인식·이달수, 1992. 혼성방파제의 무공 및 유공 케이스의 수치특성에 관한 실험. 한국해양·해양공학회지, 4(4): 243-249.

- 전인식·최민호·심재설·오병철, 2002. 부유식 방파제의 반사·투과경계조건을 적용한 항만 정온도 해석. 한국해양·해양공학회지, 14(1): 76-85.
- 조일형·김남형, 2001. 직립슬릿 케이스 방파제에 의한 반사율 해석. 한국해양·해양공학논문집, 12: 84-93.
- 井島武士·周宗仁·湯村やす·田淵幹修, 1973. 任意形状の透過および不透水過防波堤による波の散亂と波力. 第20回海岸工學講演會論文集, 79-87.
- 酒井哲郎·佐藤孝夫·岩垣雄一, 1978. 任意反射率·任意透過率の防波堤による平面的な波の變形の數値計算. 第25回海岸工學講演會論文集, 98-102.
- 西村仁嗣·丸山康樹·平口博丸, 1983. 直接數値積分法による波の場の解析. 30回海岸工學講演會論文集, 123-127.
- 榎木亨·井田康夫·後野正雄·菅智浩, 1992. 透過性構造物による波變形の模型實驗の限界について. 海岸工學論文集, 第39卷, 616-620.
- 日本土木學會海岸工學委員會, 1993. 波·構造物·地盤の調査·設計手法 調査·研究報告書. pp. 58.
- 鈴木康正·森川高德·辻安治·永末英之·平石哲也, 1994. 環境保全型防波堤周邊の波浪變形計算. 海岸工學論文集, 第41卷, 991-995.
- Lynett, P.J., Liu, P. L.-F., Losada I. J., and Vidal C., 2000. Solitary wave interaction with porous breakwater. *J. Watrwy., Port, Coast. and Oc. Engrg.*, Vol. 126, No. 6, pp. 314-322.
- Sollitt, C. K. and Cross, R. H., 1972. Wave refraction and transmission at permeable breakwaters. *Ralph M. Parsons Laboratory, MIT, Report No. 147*, pp. 250.
- Van Gent, M.R.A., 1995. Porous flow through rubble mound material. *J. Watrwy., Port, Coast. and Oc. Engrg.*, Vol. 121, No. 3, pp. 176-181.
- Yu, X., 1995. Diffraction of water waves by porous breakwaters. *J. Watrwy., Port, Coast. and Oc. Engrg.*, Vol. 121, No. 6, pp. 275-282.