

이중곡면 방파호안의 월파특성 연구 Overtopping Characteristics of Waves on Rubble-Mound Breakwaters Capped with Doubly-Curved Seawall

유병화¹, 김성민², 박승현², 조용식³
Byung-Hwa Yoo¹, Sung-Min Kim², Seung-Hyun Park² and Yong-Sik Cho³

1. 서 론

외해로부터 진입하는 파랑에 대하여 배후지역의 월파저지를 위한 각종호안 및 항내정은 확보를 위한 방파제로는 경사제, 직립제, 혼성제 등 다양한 구조형식이 적용되어 왔다.

최근 각종 수면개발로 인한 조위편차 발생, 지구온난화 및 해일고 상승, 이상파랑 발생 등으로 인한 배후지 침수 및 항내교란 등 많은 피해가 발생하여 호안 및 방파제의 첨단고 상향, 소파형경사제 도입, 반파공 설치 등 노력을 기울이고 있다.

경사제 및 직립제에 대하여 제체설치지역의 파랑조건, 제체의 제원, 내습파랑조건에 따른 많은 실험 및 연구를 통하여 월파고 및 월파량에 대한 자료가 축적되어 호안 및 방파제 시설계획에 활용되고 있으며, 항만 및 어항 설계기준(해양수산부, 2005)에도 기술되어 있다.

그러나, 반파공 형식의 호안 및 방파제에 대하여는 입사파랑 및 반파공 제원에 대한 월파와 관련된 사전정보가 부족하여, 현재는 경사제 또는 직립제의 월파특성을 참고하여 반파공을 계획하고, 특별한 경우에 한하여 수리실험 또는 수치실험으로 계획단면의 적정성을 확인하고 있다.

본 연구에서는 원지반에 경사제 기초를 형성한 후 상부에 월파저지를 위한 이중 곡면 반파공을 설치한 호안(또는 방파제)에 대하여 수치파동수를 이용하여 수치해석을 수행하였다.

수치해석모형은 난류흐름의 운동을 표현하는 Reynolds 방정식을 지배 방정식으로 사용하고 난류 운동에너지와 소산율을 나타내는 $k - \epsilon$ 모델을 적용하였으며, 연속방정식과 Navier-Stokes의 운동방정식을 기초로 자유수면의 변위 추적을 위해 VOF(volume of fluid) 기법을 적용한 CADMAS-SURF 프로그램을 활용하여 호안부의 2차원 파동장 해석을 실시하고 월파특성을 고찰하였다.

실험조건은 반파공의 설치수심 및 곡률변동 3개 단면(Fig. 2. ~ Fig. 3. 참조)에 대하여 파고를 4.0m로 고정된 상태에서 주기를 7.0 ~ 16.0초로 3초 간격으로 변화시키면서 실시하였다. 각 반파공 제원별 월파특성고찰을 위하여 동일한 파랑조건(동일한 주기 및 파고)에서 수치실험으로 재현된 월파현상을 비교검토하고, 월파량을 비교하였으며, 내습파랑의 파형경사에 따른 월파특성 분석을 위하여 동일한 단면에서 주기변화에 따른 월파현상과 월파량을 비교검토하였다.

2. 2차원 수치모형 이론

2.1 개요

최근, 자유수면을 갖는 비압축성 유체의 해석을 위해 Hirt와 Nichols(1981)가 제안한 VOF법이 자유수면을 취급하는 많은 학문분야에서 활발히 활용되고 있다. 특히, 일본에서는 잠재에 의한 쇄파 해석에 岩田 등(1994)이 처음으로 VOF법을 적용한 이래 많은 연구자에 의한 공동연구의 결과로

1 (주)대영엔지니어링 항만부 전부

2 한양대학교 토목공학과 석사과정

3 교신저자, 한양대학교 토목공학과 교수 (E-mail: ysc59@hanyang.ac.kr)

CADMAS-SURF(沿岸開發技術研究 Center, 2001)가 개발되었다. 이는 사용자가 직접 입·출력을 제어할 수 있는 효과적인 2차원 파동장의 해석프로그램으로 알려져 있다. 국내에서는 金 등(2001, 2002)이 최초로 VOF-SOLA법을 이용한 수치파동수로를 제안하고 잠재주변의 파동장 해석을 수행하고 있다.

CADMAS-SURF/VOF-SOLA는 Sommerfeld의 반사 경계조건과 에너지감쇠대를 적용하여 무반사조건을 실현하고 있다. 이에서 적용하고 있는 수치파동수로는 Fig. 1.1과 같이 2차원수치파동수로내에 파의 재반사를 방지하기 위한 경계처리 기법으로 해석영역 양쪽에 에너지감쇠영역(energy dissipation zone)을 두고 있고, 조파를 위해 line source를 적용하고 있다.

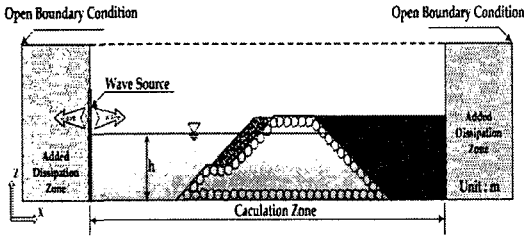


Fig. 1. 수치파동수로의 개요

2.2 지배방정식

유체를 2차원 비압축성의 점성유체로 가정하면 기초방정식은 연속방정식 (1)과 porous모델에 확장한 Navier-Stokes의 운동방정식 (2), (3)으로 구성된다.

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = S_p \quad (1)$$

$$\lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x uu}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z uw}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_\epsilon \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_\epsilon \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} - D_x u + S_u - R_x \quad (2)$$

$$\lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x uw}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z ww}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_\epsilon \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_\epsilon \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - D_z w + S_w - R_z - \gamma_v g \quad (3)$$

여기서, t 는 시간, x, z 는 각각 수평과 연직좌표, u, w 는 x, z 방향의 유체입자 속도, ρ 는 유체의 밀도, p 는 압력, ν_ϵ 는 분자동점성계수와 와동점성계수의 합, g 는 중력가속도, γ_v 는 유체의

공극률, γ_x, γ_z 는 각각 x, z 방향의 면적투과율을 나타낸다.

2.3 VOF함수의 이류방정식

CADMAS-SURF에서는 자유수면을 추적하기 위해 VOF-SOLA법(Hirt와 Nichols, 1981)을 이용하고 있다. VOF함수 F 는 일정 물리량인 유체의 체적율로서 $0 \leq F \leq 1$ 의 범위를 가진다. 여기서, $F=1$ 일 경우는 유체셀로, $F=0$ 일 경우는 기체셀로, $0 < F < 1$ 일 경우는 표면셀로 각각 판단하여 자유수면을 추적하게 되며, 다음의 이류방정식 (4)에 의해 VOF함수가 이류된다.

$$\gamma_v \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u F}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w F}{\partial z} = S_F \quad (4)$$

여기서, $S_F = Fq(z, t)$ 는 조파소스를 위한 소스항이다.

3. 수치해석

3.1 실험단면 및 실험파랑 제원 설정

수치실험대상 단면의 형상은 Fig. 2. ~ Fig. 3.에 주어진 바와 같이 3종류(3단면)이며, 전면의 비탈면을 SEALOCK으로 피복하고 이중곡면 반파공을 설치하여 월파랑의 감소를 도모한 경사식의 단면형상을 갖는 호안이다. 3종류 모두 대상지역의 전면수심은 DL(-) 8.5m, 마루높이는 DL(+) 7.5m., 실험조위는 DL(+) 3.4m로 동일조건에서 반파공의 설치수심 및 곡률에 따른 월파 및 반사특성을 분석하기 위하여 곡면 하단수심 및 곡률을 Table 1과 같이 달리하여 실험하였다.

Table 1. 실험 단면별 반파공 제원

단면 형상	곡면 하단 수심	상대 수심	상부 곡률 반경	하부 곡률 반경	비고
Fig. 2.	DL(+) 3.5m	0.0H	3.3m	1.0m	실험조위 : DL(+) 3.4m 대상파고 : 4.0m
Fig. 3.	DL(+) 1.5m	0.5H	5.5m	1.7m	
Fig. 4.	DL(-) 0.5m	1.0H	7.7m	2.3m	

천단 높이는 실험조위 3.4m에서 파고(H=4.0m)의 약 1.0H에 해당하는 DL(+) 7.5m로 설정하여 월파랑을 비교토록 하였으며, 전면수심은 DL(-) 8.5m로 파고의 약 3배로 하는 비쇄파 조건으로 정하였다.

표면의 피복재는 4.0m의 파고에 안정을 유지하

도록 SEALOCK 6톤급을 배치하였다.

각 실험안별 반파공 제원은 천단이 고정된 상태에서 반파공의 곡면 하단이 수면과 일치할 때와 파고의 0.5H일 경우 및 1.0H일 경우를 대상으로 하여 이에 해당하는 이중곡면 반파공의 곡률반경을 정하였다.

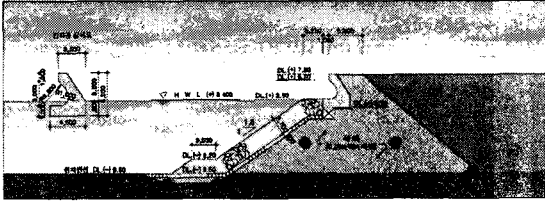


Fig. 2. 수치실험 대상단면 A

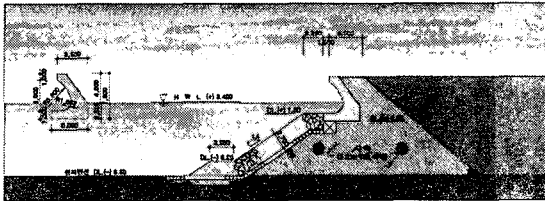


Fig. 3. 수치실험 대상단면 B

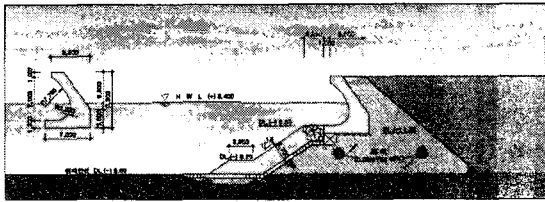


Fig. 4. 수치실험 대상단면 C

실험파랑은 각 단면별로 파형경사에 따른 월파 및 반사특성을 고찰하기 위하여 파고는 일정한 값 $H=4.0m$ 를 적용하였으며, 주기는 일반적 풍파에서 예상되는 주기 7 ~ 16초를 대상으로 3초 간격으로 실시하였다.

3.2 월파현상의 재현

수치실험에서 재현된 반파호안부에서 월파현상을 관찰하기 위하여 내습한 파랑의 1주기 동안 호안 전면에서의 파동장 변화를 고찰하였다. 월파상태의 재현은 반파공의 설치 제원별, 파랑 주기별로 같은 위상에서의 월파상태를 도시하였다. 본 실험의 주요관심사는 파정고가 호안전면에 있을 때의 월파고 및 월파량이므로 여러 위상 중 월파시의 수리현상을 중심으로 나타내었다.

3.3 단면특성에 따른 월파현상 고찰

각 단면별 월파특성을 비교분석하기 위하여 4개 주기(7초, 10초, 13초, 16초) 실험안중 대표적으로

13초 주기의 4m파랑 내습시에 3개의 반파공제원에 대하여 파동장 형상과 월파상황을 비교하였다. A 단면은 반파공 설치수심(DL.(+)3.5m)이 실험조위(DL.(+)3.4m)와 거의 같은 상태로 반파공의 곡률반경은 3.3m이다. B단면의 반파공 설치수심은 수면으로부터 파고의 약 0.5배에 해당하는 1.9m(DL.(+)1.5m)이며 반파공의 곡률반경 역시 A 단면보다 큰 5.5m를 대상으로 하였다. C단면의 반파공 설치수심은 파고의 약 1.0배에 해당하는 3.9m(DL.(-)0.5m)로 반파공의 곡률반경은 가장 큰 7.7m로 실험하였다. 고찰대상 실험결과는 1주기(13초) 동안의 각 단면별 제체 전면의 수류현상을 11단계로 나타냈으며, 그중 월파사항에 초점을 맞추어 6단계($t/T_1=1/11, 4/11, 5/11, 6/11, 7/11, 10/11$)로 나누어 살펴보았다.

그 결과 파랑의 파정부가 제체전면의 경사 마운드에 있을 때($t/T_1=1/11 \sim 3/11, 8/11 \sim 11/11$)는 A, B, C단면모두가 비슷한 양상을 보였다. 하지만 파정이 반파공을 내습할 때($t/T_1=4/11 \sim 7/11$)는 상이한 월파특성을 나타내며, B, C단면은 비슷한 양상이 나타나지만 A는 매우 다른 양상을 나타내었다. 월파량 산정결과(3.5항 참조)로 상기 현상과 유사한 A단면은 $0.58m^3/sec/m$, B단면은 $0.20m^3/sec/m$, C단면은 $0.21m^3/sec/m$ 를 나타냈다. 상기내용을 살펴볼 때 동일조건의 파랑내습시 반파공 설치수심과 규모가 클수록 월파에 유리하지만 그 비율은 줄어들어 수심이 파고의 0.5배 이상에서는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

3.4 파형특성에 따른 월파현상 고찰

반파공에서의 파형경사에 따른 월파특성을 고찰하기 위하여 동일단면에서 파고 4m로 일정한 상태에서 주기를 3초간격으로 변화하면서($T=7$ 초, 10초, 13초, 16초) 제체전면에서의 월파시 수치실험에서 도출된 파동장을 고찰하였다. 주기별 동일한 반파공 및 수심조건에서의 월파현상을 비교하고자 각 단면별로 월파직전, 월파공, 월파직후의 파동장을 나타내었다.

월파현상을 고찰한 결과 제원이 동일한 반파공에 파고가 동일한 4m의 파랑이 내습하더라도 주기에 따라 월파특성이 현격한 차이가 발생하였다. 주기 7초일 때는 모든 단면에서 월파가 발생하지 않았고, 주기가 길어질수록 월파는 커지는 현상을 보였으나 그 커지는 정도는 점차 줄어드는 양상을 나타내었다. 월파량 산정결과(3.5항 참조)도 동일 조건에서 주기 증대에 따른 월파량은 증가하지만 그 증가율은 점차 감소하는 것으로 나타났다.

3.5 월파유량의 산정 및 결과

소파블록 피복경사제 상단에 이중곡면 반파공을 설치했을 경우 반파공 저면부가 수면상일 때와 파고의 0.5H 및 1.0H에 있는 경우에 대하여 일정한 파고(H=4.0m)에서 주기를 달리하여($T_{1/3} = 7.0$ 초, 10.0초, 13.0초, 16.0초) 실험하였다. 그 결과 수심이 파고의 0.5배 정도까지는 반파공 설치수심이 낮고 곡률반경이 클수록 월파량이 적은 것으로 나타났다. 그러나 그 이하의 수심 및 반파공 곡률에서는 영향이 거의 없는 것으로 나타났다.

또한, 동일한 반파공 제원이라도 내습파랑의 주기가 길수록 월파량은 증가되지만 그 증가율은 점차 작아지는 것으로 나타났다. 수치실험조건과 이에 따른 월파량 결과를 종합정리하면 다음과 같다.

Table. 2. 수치실험 조건별 월파량 실험결과

- 천 단 고 : DL.(+)7.50m,
- 제체전면수심 : DL.(-)8.50m,
- 제체전면피복 : SEALOCK 6톤급
- 실험 조 위 : DL.(+)3.40m
- 대 상 파 고 : H = 4.0m

반파공조건			유의주기별 월파량($T_{1/3}$)			
전면수심	R ₁	R ₂	7sec	10sec	13sec	16sec
DL.(+) 3.50m	3.3m	1.0m	0.00	0.19	0.28	0.32
DL.(+) 1.50m	5.5m	1.7m	0.00	0.16	0.20	0.26
DL.(-) 0.50m	7.7m	2.3m	0.00	0.15	0.21	0.28

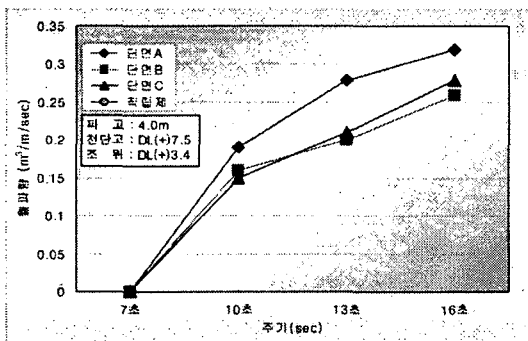


Fig. 5. 단면별/주기별 월파유량

4. 결 론

본 연구의 궁극적 목표는 최근 해외에서 많이 적용되고 있으며 국내에서도 도입단계에 있는 이중곡면 방파호안의 수리적 최적단면을 설정하기 위한 자료제공에 있다. 전술한 내용에서는 일정파고에 대한 주기변동과 반파공의 설치수심 및 규모변화에 대하여 규칙파 수치실험으로 월파특성을 검토하였다. 그러나, 실제 내습하는 파랑은 다양한 파고와 주기분포를 가지며 규칙파도 아니다. 현재 개발된 프로그램에 의한 수치실험은 규칙파를 대상으로 하고 있으므로 불규칙파에 대한 보정과 실험값의 검증은 위해서는 동일조건외의 여러 경우에 대한 수치실험을 실시하여 상호보완이 필요하다.

향후 연구에서는 파랑조건에 대하여 더 많은 반파공 제원별 월파실험을 실시하여 경사제 및 직립제에서와 같은 정밀도 높은 월파특성 매뉴얼을 작성하여 실제 설계에 적용할 수 있도록 하여야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 중소기업청의 산학연 공동기술개발 컨소시엄 과제로부터 재정적 지원을 받았습니다.

참고문헌

- 김도삼, 이광호, 허동수, 김정수(2001) VOF 법에 기초한 불투과잠재 주변파동장의 해석, 대한토목학회논문집, 제21권 제5-B호, pp. 551-560.
- 김도삼, 이광호(2002). 월파를 허용하는 투과성 방파제의 파랑변형에 관한 수치해석, 한국해양공학회지 제16권 제2호, pp. 1-5.
- 해양수산부 (2005). 항만 및 어항 설계기준.
- CADMAS-SURF(2001). 沿岸開發技術研究中心.
- Hirt, C.W. and Nichols, B.D.(1981). "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries," Journal of Computational Physics 39, 201.
- 岩田好一朗, 川崎浩司, 金度三 (1994). 水中構造物による碎波の數値解析, 海岸工學論文集, 第42卷, pp.781-785.