

불규칙파에 의한 월파량산정의 수치해석법

김도삼* · 김창훈** · 이민기** · 김지민**

*한국해양대학교 건설환경공학부

**한국해양대학교 대학원 토목환경공학과

Numerical analysis for Estimation of Overtopping Rate by using Irregular Wave

DO-SAM KIM*, CHANG-HOON KIM**, MIN-KI LEE** AND JI-MIN KIM**

*Division of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime university, Busan, Korea

**Department of Civil and Environmental Engineering, Graduate school, Korea Maritime university, Busan, Korea

KEY WORDS: Numerical wave tank 수치파동수로, Irregular wave 불규칙파, Mass transport velocity 질량수송속도, Mean water surface elevation 평균수위, Overtopping rate 월파량

ABSTRACT: In general, a method for generating irregular wave by combination of component waves obtained from linear wave theory is widely used. In these method, however, mean water surface elevation is rising from time to time because of nonlinear effect of wave. In this study, for the rising problem of mean water surface elevation and stabilization of calculation from time to time, mass transport velocity for horizontal velocity at wave source position is considered. The rising problem of mean water surface elevation is checked by comparing calculated wave profile from numerical technique proposed in this study with target wave profile at wave source position in numerical wave tank by using CADMAS-SURF code. And, by generating irregular wave, the validity of wave overtopping rate estimated from this numerical analysis is discussed by comparing computed results with measured results in hydraulic model experiments for vertical seawall located on a sloping sea bottom. As a results, the computations are validated against the previously experimental results by hydraulic model test and numerical results of this study and a good agreement is observed. Therefore, numerical technique of this study is a powerful tool for estimating wave overtopping rate over the crest of coastal structure.

1. 서 론

태풍 및 동계계절풍 등으로 인한 고파랑의 작용은 연안역과 접한 해안구조물에 많은 피해를 줄 뿐만 아니라, 고파랑이 호안을 월파하는 경우에는 재내지내에서는 많은 재산피해가 발생한다. 이와 같이 호안월파에 대한 방재대책의 수립이 활발히 이루어지고 있고, 그의 일환으로 수리모형실험 및 수치모형실험에 의한 검토방법이 다각도로 수행되고 있다(한국토지공사, 2005). 특히 월파현상에 대한 수치해석적인 검토방법에 있어 자유수면을 갖는 비압축성의 점성유체에 대한 수치모델링을 가능케 한 VOF(Volume of Fluid; Hirt and Nichols, 1981)법의 활용은 증가하고 있는 추세이다. 그의 대표적인 예로 일본의 연안개발기술연구센터(Port and Harbor Research Institute; 이하 PHRI)에서 개발된 수치파동수로 CADMAS-SURF (SUper Roller Flume for Computer Aided Design of MAritime Structure)는 비선형성의 파랑에 대해서도 고정도로 파랑 특성을 예측할 수 있는 수치모델로 규칙파뿐만 아니라, 불규칙파에 대해서도 검토가 가능하다. CADMAS-SURF를 이용하여 불규칙파에 대한 검토를 수행 할 경우 조파지점에 있어서 수위변동 및 몰입자

속도(수평, 연직)를 사용자가 독자적으로 입력데이터를 작성할 필요가 있다. 일반적으로 CADMAS-SURF에서는 선형이론으로부터 얻어진 선평파를 중첩하여 불규칙파를 조파하게 되며, 이 때 수치조파기로부터 발생하는 파는 파의 비선형성을 고려하고 있지 않기 때문에 해석시간의 증대와 함께 평균수위가 상승되는 문제가 지적되고 있다(PHRI, 2001). 따라서 해석시간이 증대됨에 따른 평균수위의 상승은 불규칙파로서 해석하기 위해 필요한 100파 정도의 파수를 얻기까지 다소 무리가 있을 수 있고, 대상으로 하는 불규칙파랑에 대한 검토를 과대평가할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 CADMAS-SURF를 이용하여 불규칙파를 검토할 경우 문제로 지적되는 평균수위상승에 대해 안정적으로 불규칙파가 조파될 수 있는 방법을 소개하며, 동시에 본 연구에서 발생된 불규칙파를 실험치와 비교·검토함으로써 해의 타당성을 논의한다. 또한 경사수심역에 설치된 직립호안 배후로 전달되는 월파량을 실험치와 비교하여 본 연구의 적용방법으로 산정된 월파량의 정도를 검토한다.

2. 불규칙파의 조파방법

본 연구에서 검토하는 불규칙파는 Bretshmeider-Mitsuyasu (1970)의 스펙트럼을 적용하여 성분파 200파를 선형중첩하여 생

교신저자 김도삼: 부산광역시 영도구 동삼동 1번지

051-410-4941 kimds@hanara.kmaritime.ac.kr

성하였다. 불규칙파를 모의하기 위한 주파수 f 의 선택은 Bretshneider-Mitsuyasu의 스펙트럼에 대해 등에너지로 스펙트럼을 분할할 수 있는 Goda(2000)에 의해 제안된 방법을 이용하였다. 그리고 불규칙파의 각 성분파간의 위상각은 $[0, 1]$ 사이에서 분포하는 난수를 발생시킨 후 위상을 조정하기 위해 2π 를 곱하여 $[0, 2\pi]$ 사이에서 분포하는 값을 취하도록 하였다.

CADMAS-SURF를 이용하여 선형파의 중첩에 의한 불규칙파를 조파할 경우 해석시간의 증대와 함께 평균수위가 상승하는 문제가 발생하고, 이로 인해 불규칙파랑에 대한 검토에는 다소 무리가 있을 수 있다(PHRI, 2001). 본 연구에서는 수치조파기에서 수평물입자속도를 산출할 때 각 성분파에 대응하는 Stokes파의 질량수송속도를 빼주는 방법을 적용함으로써 평균수위상승을 억제하여 안정적인 수치조파를 수행하였다.

3. 해석결과

3.1 불규칙파의 조파검증

불규칙파의 조파성능을 검증하기 위하여 Fig. 1과 같은 구조물이 설치되지 않은 수심 $h=50\text{cm}$ 의 2차원수치파동수로(부가감쇠영역과 해석영역으로 구성)에서 파고 $H_0=3\text{cm}$, 주기 $T_0=1.0\text{sec}$ 를 목표로 하여 불규칙파를 조파시켰다.

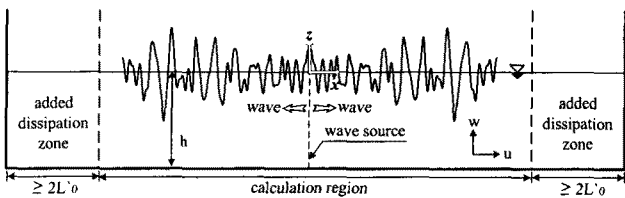


Fig. 1 Definition sketch of numerical wave tank

Fig. 2는 선형파의 중첩으로부터 발생된 조파지점에서의 계산파형을 목표한 파형과 비교한 그림이다(η 는 수위변동, t 는 계산시간을 각각 나타낸다). 그림으로부터 계산파형은 장시간의 해석이 요구됨에 따라 수위가 상승하는 경향을 나타낸다. 이러한 원인은 수치조파기로부터 선형파를 중첩하여 목표로 하는 불규칙파를 조파할 경우 발생파의 비선형성분에 기인하는 질량수송속도에 대한 영향이 충분히 고려되지 않은 결과로 판단되고, 그 결과 해석시간이 증대됨에 따른 평균수위의 상승은 대상으로 하는 불규칙파랑에 대한 검토를 과대평가할 수 있을 것으로 판단된다.

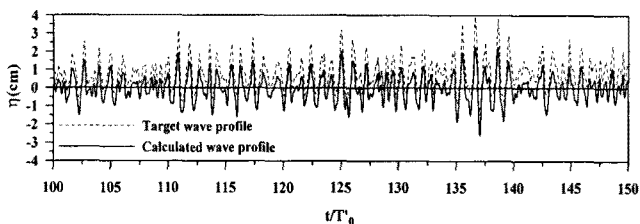


Fig. 2 Comparison of target wave profile and calculated wave profile at source position (original CADMAS-SURF)

본 연구에서는 Fig. 2에서 검토된 계산파형의 평균수위상승 문제에 대하여 Fig. 3에 제시된 바와 같이 수치조파기에서 수평물입자속도 u 를 산출할 때 각 성분파에 대응하는 Stokes파의 질량수송속도를 빼주는 방법을 적용한다.

Fig. 4는 Stokes파의 질량수송속도를 고려하여 얻어진 계산파형을 목표한 파형과 비교한 그림이다.

Fig. 4에서 본 연구의 적용방법으로부터 얻어진 계산파형은 Fig. 2와 비교하여 장시간의 해석에도 평균수위상승은 크게 관찰되지 않으며, 목표한 파형과 비교하여 전체적으로 파형과 위상이 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

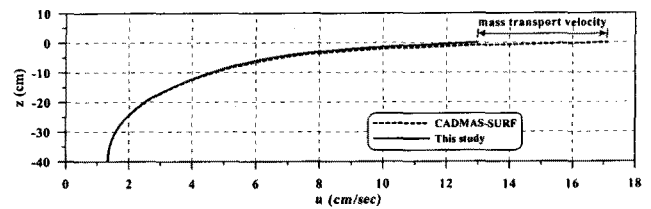


Fig. 3 Example of comparison for horizontal velocity according to vertical direction

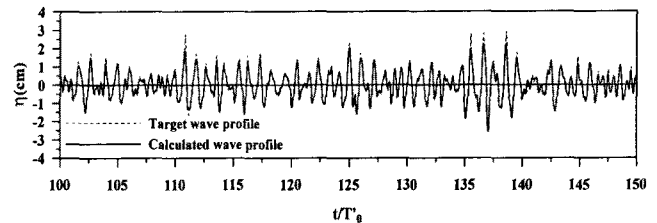


Fig. 4 Comparison of target wave profile and calculated wave profile at source position (considering mass transport velocity)

Fig. 4에서 검토된 계산파형에 대한 평균수위변동 $\bar{\eta}$ 를 좀 더 면밀히 살펴보기 위하여 불규칙파동장의 파에너지가 충분히 도달한 조파개시후 무차원시간 $t/T_0=50\sim 400$ 사이의 파를 대상으로 zero-up-cross법으로부터 평균수위변동을 검토한다.

Fig. 5는 평균수위변동 $\bar{\eta}$ 의 공간분포를 목표로 하는 파고 H_0 로 무차원화하여 나타낸 그림이다(L_0 는 목표로 하는 파의 파장). 그림으로부터 계산파형은 약 2%정도의 평균수위상승을 나타내고 있으나, 이의 값은 전수량에 비해 매우 미소한 값으로 불규칙파랑의 검토에 큰 영향은 미치지 않을 것으로 판단된다.

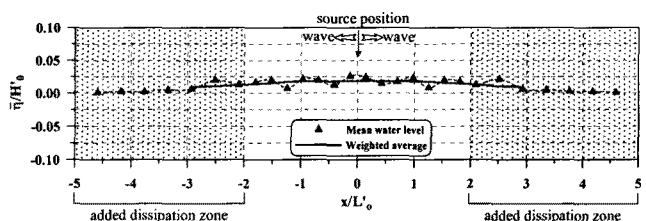


Fig. 5 Spatial distribution of mean water surface elevation

본 연구의 적용방법을 이용하여 계산된 계산파형의 조파성능을 검토하기 위하여 Fig. 4에서 검토된 계산파형을 대상으로 주파수 스펙트럼을 계산하고, 이 결과를 목표스펙트럼(Bretshmeider-Mitsuyasu 스펙트럼)과 함께 비교한 결과를 Fig. 6에 제시한다. 결과를 살펴보면 본 계산에서 적용한 수치파동수로내에서의 계산스펙트럼은 목표스펙트럼의 밴드폭과 피크치를 잘 재현하고 있으므로 기대한 불규칙파를 만족스럽게 조파시키는 것으로 판단된다. 따라서 장시간의 해석시간이 요구되는 불규칙파랑의 검토에 있어서 본 연구의 적용방법은 타당한 결과를 도출할 수 있는 매우 효율적인 방법으로 판단된다.

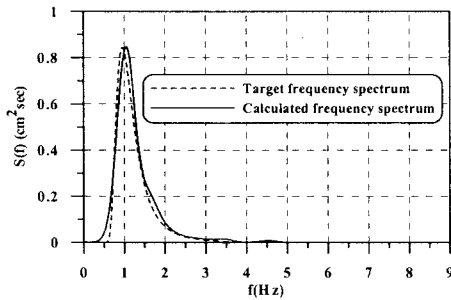


Fig. 6 Comparison of frequency spectrum

3.2 무반사모델

불규칙파의 경우는 물론이고, 규칙파에 있어서도 정상상태의 파동장을 얻기 위해서는 장시간의 해석이 필요하게 된다. 이때 해석영역의 양단으로부터 반사파를 제거하기 위하여 무반사모델이 적용되어야 한다.

Fig. 7은 Fig. 1의 조파개시후 $t/T_0=100$ 과 $t/T_0=130$ 의 경우에 대한 수면파형의 공간분포를 나타낸 그림이다. 그림으로부터 해석영역($-2 < x/L_0 < 2$)의 불규칙파랑은 부가감쇠영역($-5 \leq x/L_0 \leq -2$, $2 \leq x/L_0 \leq 5$)에서 기대한 파랑의 감쇠가 발생하고 있다. 또한 개경계에서 발생하는 반사파는 부가감쇠영역에서 충분한 소파효과를 기대할 수 있으므로 계산영역의 파동장에 영향을 미치지 않으며, 따라서 CADMAS-SURF에서 적용하는 개경계처리방법은 장시간의 불규칙파랑의 조파에 대해서도 무반사모델을 만족하고 있는 것을 확인할 수 있다.

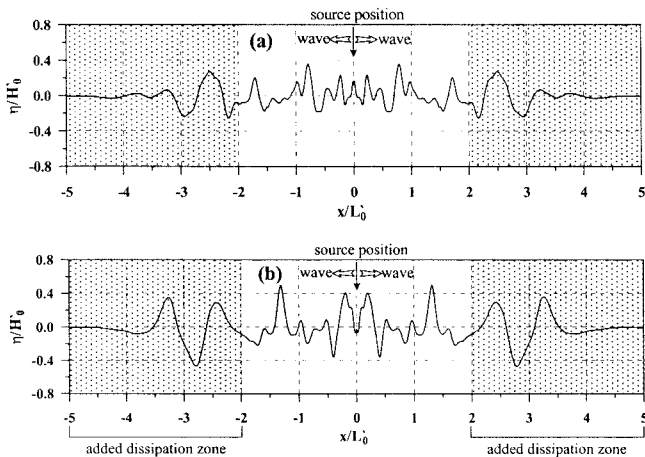


Fig. 7 Effectiveness of added dissipation zone for irregular wave ; (a) $t/T_0=100$, (b) $t/T_0=130$

3.3 유의파고의 변화

경사수심역에 있어 본 연구에서 계산된 유의파고 $H_{1/3}$ 의 변화를 Fujiwara(2005)의 실험치와 비교·검토한다.

Fig. 8은 비교에 사용된 수치파동수로의 제원 및 수위변동의 비교위치를 나타낸다. 그리고 Fig. 9는 Fig. 8의 비교위치에서 유의파고 $H_{1/3}$ 의 변화를 실험치와 비교한 결과로, 유의파고 $H_{1/3}$ 의 산정은 zero-up-cross법 이용하였다. 또한 계산된 유의파고 $H_{1/3}$ 및 수심 h 는 목표로 하는 파고 H_0 로 무차원화하였다. 그림을 살펴보면 본 연구의 결과는 수심변동에 따른 유의파고 $H_{1/3}$ 의 변화특성을 포함하여 친해역에서 천수변형 및 쇄파로 인한 유의파고 $H_{1/3}$ 의 변화값을 실험치와 비교하여 잘 재현하고 있는 것을 확인할 수 있다.

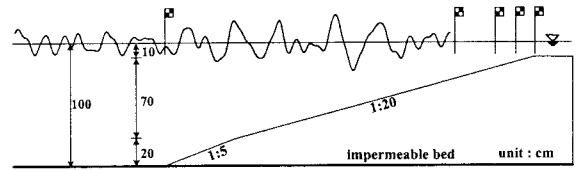


Fig. 8 Numerical setup for comparison of significant wave height

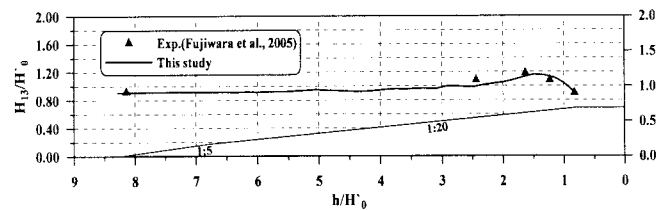


Fig. 9 Comparison between experimental and numerical results for spatial variation of significant wave height

3.4 월파랑의 검토

본 절에서는 3.1~3.3절에서 검토된 본 연구의 타당성을 바탕으로 해안구조물 배후로 전달되는 파랑의 월파랑을 검토한다.

Fig. 10은 월파랑산정을 위하여 고려된 수치파동수로이다.

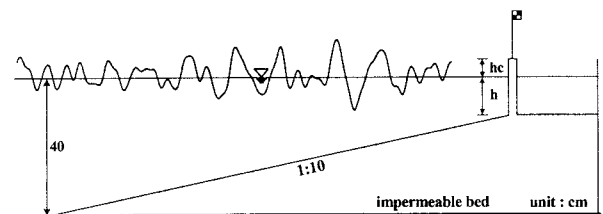


Fig. 10 Numerical setup for wave overtopping of vertical seawall on a sea bottom slope of 1/10

Fig. 11은 Fig. 10의 수치파동수로에서 직립호안의 전면수심 h , 천단고 hc 의 변화를 파라미터로 하여 파고 $H'_0=4\text{cm}$, 주기 $T'_0=1.2\text{sec}$ 에 대해 산정된 월파량을 Goda(2000)의 실험치와 비교한 결과이다.

본 연구의 월파량은 불규칙파가 안정한 것으로 판단되는 조파개시후 50sec에서부터 300sec 사이의 파를 대상으로 직립호안 상부에 설치된 각 수평유속계로부터 얻어진 월파량을 합하여 이를 시간평균하여 산정하였다.

Fig. 11의 결과를 살펴보면 직립호안 전면수심 h , 천단고 hc 의 변화에 따른 월파량의 변화특성을 본 연구의 계산치는 실험치를 잘 재현하고 있을 뿐만 아니라, 산정된 월파량의 정도는 실험치와 비교하여 상당히 높은 것으로 판단된다.

따라서 불규칙파에 대한 월파량검토에 있어 본 연구에서 적용하는 방법은 합리적인 월파량산정에 유용한 수법으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

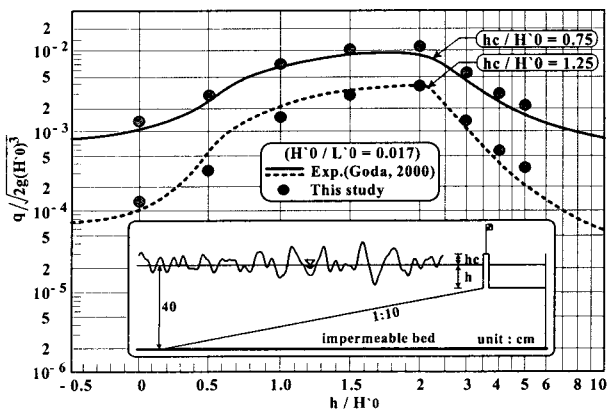


Fig. 11 Comparison between experimental and numerical results for wave overtopping rate of vertical seawall on a sea bottom slope of 1/10 ($hc/H'_0=0.75$, $hc/H'_0=1.25$)

Fig. 12는 월파상황의 일례를 나타낸 그림이다. 그림으로부터 직립호안의 천단상에서는 빠른 수평유속으로 직립호안 배후로 전달되는 월파가 관찰되며, 직립호안 배후의 물입자속도는 월파로 인해 수면부근에서 큰 값으로 나타난다.

5. 맺 음 말

본 연구에서는 VOF법에 기초하여 자유표면의 추적을 수행하는 수치파동수로 CADMAS-SURF를 이용하여 불규칙파량을 검토할 경우 해석시간의 증대와 함께 평균수위가 상승되는 문제에 대해 안정적으로 불규칙파가 조파될 수 있는 방법을 소개하였으며, 동시에 본 연구에서 발생된 불규칙파를 실험치와 비교·검토함으로써 해의

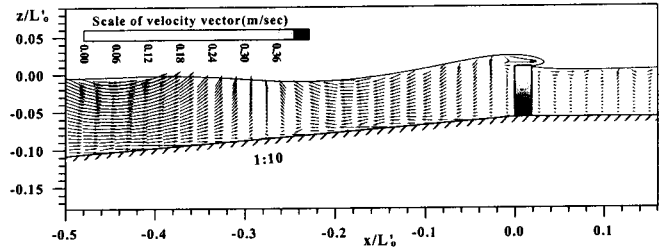


Fig. 12 Snapshot of wave overtopping over the crest of a vertical seawall on a sea bottom slope of 1/10 ($hc/H'_0=0.75$, $h/H'_0=3.0$, $t=150\text{sec}$)

타당성을 검증하였다. 그리고 경사수심역에 설치된 직립호안을 대상으로 배후로 전달되는 월파량을 실험치와 비교하여 본 연구에서 산정된 월파량의 정도를 검토하였다. 이로부터 얻어진 사항을 아래에 기술한다.

1. CADMAS-SURF를 이용하여 불규칙파량을 검토할 경우 해석시간이 증대하여도 안정적으로 불규칙파가 조파될 수 있는 방법을 소개하였다.
2. 불규칙파량에 대한 검토에 있어 본 연구의 조파방법은 실험치와 비교·검토한 결과 타당하였으며, 또한 본 연구의 적용방법은 불규칙파량의 검토에 정도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.
3. 경사수심역에 설치된 직립호안을 대상으로 배후로 전달되는 월파량을 실험치와 비교한 결과, 본 연구에서 산정된 월파량은 상당히 높은 정도를 나타내었다.

참 고 문 헌

한국토지공사 (2005). 녹산산단 태풍 「매미」 피해원인 분석용역 최종보고서.

Goda, Y. (2000). "Random seas and design of maritime structures", World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, pp 25-187.

Fujiwara, R. (2005). "A method for generating irregular waves using CADMAS-SURF and applicability for wave transformation and overtopping", Coastal Engineering, JSCE, Vol 52, pp 41-45. (in Japanese)

Hirt, C.W. and Nichols, B.D. (1981). "Volume of Fluid(VOF) method for the Dynamics of free boundaries", J. Comp. Phys., Vol 39, pp 201-225.

Mitsuyasu, H. (1970). "On the growth of spectrum of wind-generated waves(2)-spectral shape of wind waves at finite fetch", Proc. Japanese Conf. on Coastal Engineering, JSCE, pp 1-7. (in Japanese)

PHRI, Coastal Development Institute of Technology. (2001). "Research and development of numerical wave channel(CADMAS-SURF)", CDIT Library, pp 1-296. (in Japanese)