

## BEM-CADMAS-SURF 결합해석법에 기초한 수치조파수조의 응용

김상호† · 야마시로마사루\* · 요시다아키노리\*\* · 신승호\*\*\* · 홍기용\*\*\*\*

† 한국해양연구원 해양시스템연구부, \*\* 큐슈대학 공학연구원 환경도시부문, \*\*\*,\*\*\*\* 한국해양연구원 해양시스템연구부

### Application based on the strictly combined method of BEM and CADMAS-SURF

Sang-Ho Kim† · Masaru Yamashiro\* · Akinori Yoshida\*\* · Seung-Ho Shin\*\*\* · Key-Yong Hong\*\*\*\*

†,\*\*\*,\*\*\*\* Ocean Engineering Research Department, KORDI, Daejeon, Korea

\*,\*\* Faculty of Engineering, Kyushu University, Fukuoka, Japan

**요 약** : 대수심의 유체운동을 포텐셜 운동으로 가정하여 자유수면의 거동을 신속히 해석하는 BEM 해석법과 구조물 근방에서 유체의 자유수면 변화를 계산하기 위하여 NS방정식의 해석으로 CADMAS-SURF 기법을 결합하여 하이브리드 수치기법을 개발하였다. 하이브리드 해석법에서는 반사파를 고려해야 할 넓은 영역에서, 대수심의 영역은 BEM이, 천수역은 CADMAS-SURF가 계산하게 된다. 특히, 하이브리드 모델은 장시간에 걸친 불규칙파의 운동에 대해서는 단독의 CADMAS-SURF을 이용한 계산에 비해 거의 동일한 정확도로 월등히 신속하게 계산할 수 있다. 본 연구에서는 완경사 해저면을 가진 넓은 해역에서, 호안구조물에 내습하는 파랑의 처오름과 월파와 같은 강비선형 파랑장 계산에 결합해석모델을 적용하였다. 계산결과는 각각 토요시마(豊島)의 규칙파 처오름 실험과 고다(高田)가 제안한 불규칙파의 월파량 산정도와 비교하였다.

**핵심용어** : BEM 해석법, CADMAS-SURF, 결합해석모델, 완경사, 처오름, 월파량

**Abstract** : The hybrid numerical model is developed by combining BEM that can calculate the wave motion rapidly under the potential theory and CADMAS-SURF that solves Navier-Stokes equations for the free surface variation near the structure. In the hybrid model the calculation of wave motion in a wide field of wave reflection for deep water area is conducted by BEM but for shallow water area by CADMAS-SURF. Especially the hybrid model can calculate random wave motions for long term period more rapidly with almost similar accuracy than the calculation of wave motion which was carried out by CADMAS-SURF only. In this study the coupling model was applied to the calculation of the strong nonlinear wave motion such as wave runup and overtopping at the coastal structure on the mild-slope bottom and the results of numerical model were compared with the Toyosima's experiments of regular wave runup and Goda's design diagram of random wave overtopping, respectively.

**Key words** : BEM(Boundary Element Method), CADMAS-SURF, Coupling model, Mild-slope, Wave runup, Overtopping

## 1. 서 론

최근의 해안, 해양공학 분야에서는 구조물이 있는 영역의 파동을 계산하기 위해 Navier-Stokes 방정식을 기초로 한 많은 기법들이 개발 및 발전되어 왔다. 이들 중, 파랑의 쇄파현상 등의 복잡한 자유표면을 재현하기 위한 수치해석 기법으로 Volume Of Fluid method (VOF법)가 주류를 이루고 있는 실정이다. 그 중, CADMAS-SURF(Super Roller Flume for Computer Aided Design of Maritime Structure)모델은 일본(재)연안개발기술센터(CDIT: Coastal Development Institute of Technology)가 개발한 파랑과 구조물과의 상호작용에 관한 해석 분야에 특화된 단면 2차원 수치조파수조로서, 일본뿐만 아니라 우리나라의 기업과 연구소에서도 활용되고 있다(磯部

등, 1999; 沿岸開發技術研究センター, 2001).

그러나 CADMAS-SURF 모델은 VOF법에 근거한 자유수면의 계산을 수행하기 때문에, 방대한 계산시간과 기억용량이 요구되는 일반적인 VOF법의 단점을 가지고 있다. 특히, 장시간의 계산시간을 통한 해석이어야만 만족할 만한 결과가 나타나는 불규칙파랑을 대상으로 한 수치해석의 경우, 단순한 조건의 계산에도 불구하고 장시간의 계산시간뿐 아니라 수치해석모델의 안정성도 필요하게 된다. 게다가, 월파(overtopping) 및 처오름(runup) 등의 복잡한 현상의 계산을 실시할 경우, 조밀한 계산 격자와 난류모델을 적용하는 등, 계산조건의 특수성을 충분히 고려할 경우는 계산시간 자체가 문제가 되기도 한다. 이러한, 장시간의 계산이 필요할 경우, 보다 효율적인 계산을 수행할 수 있는 방안으로 전체 영역의 일부분을 계산 소요시간

† 종신회원, shkim@moeri.re.kr 032)868-7522

\* 정회원, yamashiro@civil.kyushu-u.ac.jp +81)92-802-3416

\*\* 정회원, yoshida@civil.kyushu-u.ac.jp +81)92-802-3416

\*\*\* 정회원, shshin@moeri.re.kr 032)868-7584

\*\*\*\* 정회원, kyhong@moeri.re.kr 032)868-7511

이 극히 작은 경계요소법 (BEM : Boundary Element Method) 으로 해석하여 계산의 부하를 줄여주는 결합해석법(Hybrid 해석법)이 제안되어 있다(Grilli et al., 2004; 鄒 등, 2003). 결합해석법의 연구 중, Grilli et al. (2004)의 연구그룹은 포텐셜유동 계산의 결과가 점성유동 계산의 입사 경계조건만으로 사용되어 점성유동 영역에서 전달되어 오는 반사파를 고려하지 않는 단일방향 결합 해석법이었으나(Guignard et. al., 1999; Lachaume et. al., 1999; Biausser et.al., 2003, 2004 ; Drevard et. al., 2005), 鄒 등(2003, 2004)은 포텐셜유동 계산과 점성유동의 계산이 서로의 경계조건이 되어 반사파를 고려할 수 있는 양방향 결합해석법을 제안하였다. 그러나 鄒 등(2003, 2004)의 연구에서는 계산정도가 입사파의 파장에 의존하는 문제점이 있어 불규칙파를 대상으로 할 경우에는 적용성이 저하되는 단점이 있었다. 이를 개선하기 위해, 김 등(2005)은 결합법을 수정하여 불규칙파에 대한 적용성을 높인 결합해석법을 제안하였다. 그러나 김 등(2005)의 연구에서 사용된 점성유동 해석 모델은 난류 계산이 되지 않는 단점이 있어 안벽에서의 월파 등을 계산할 경우 계산 정도가 떨어지는 단점이 있었다. 이러한 단점을 개선하기 위해서 김 등(2008)은 점성유동 해석에 난류계산이 가능하고, 계산의 정도가 검증된 CADMAS-SURF를 적용한 결합해석법을 제안하고, 일정 수심을 가진 계산영역에서의 파랑의 전파와 반사를 계산하여 결합해석법의 기초적인 검증을 수행하였다. 김 등(2008)의 연구 결과에 따르면, 결합해석법이 단일 CADMAS-SURF와 비교 하여 빠른 계산시간으로 거의 동일한 계산정도를 나타낸다. 그러나 김 등(2008)의 연구는 일정수심에서의 진행파와 반사파에 대한 수치적인 검증에 제한되어 있어, 가변수심 영역에 대한 적용성은 검토되지 않았다.

본 연구에서는 제안된 BEM과 CADMAS-SURF를 결합한 결합해석법의 실용성을 검토하고자, 완만한 해저경사를 가진 영역에서 설치된 구조물에 있어서의 규칙파의 처오름과 불규칙파에 의한 월파량의 계산에 적용하였다. 처오름의 계산은 豊島 등(1965)의 실험을 재현하여 실험치와 직접 비교하고, 월파의 계산은 畠田 등(1975)이 제안한 불규칙파 월파유량 추정치와 비교한다.

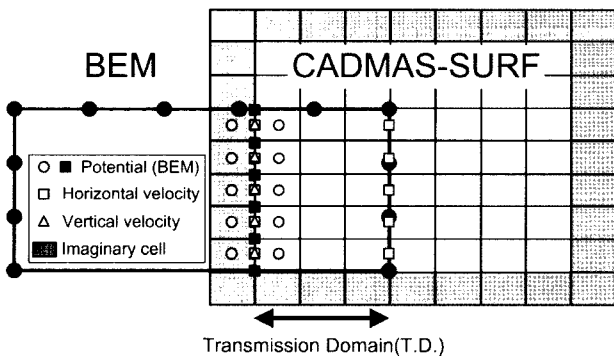


Fig. 1 Combination of BEM and CADMAS-SURF model with transmission domain

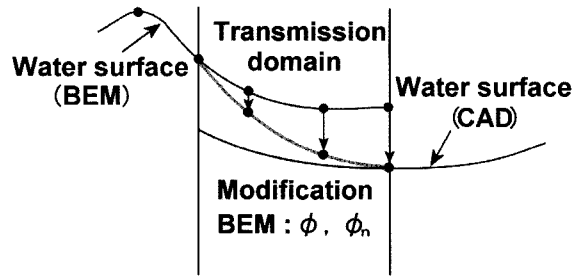


Fig. 2 Connection of water surfaces in the T.D.

## 2. 결합해석법의 개요

BEM과 CADMAS-SURF의 결합해석법은 Fig. 1과 같이 결합영역(T.D.: Transmission Domain)을 이용하여 BEM에서 계산된 수면의 위치와 포텐셜을 이용하여 산정된 수평 및 연직 유속을 CADMAS-SURF의 경계조건으로 부여한다. 한편, CADMAS-SURF에서 계산된 수면(water surface(CAD), 이하 그림에서 CADMAS-SURF의 결과를 CAD로 표기)의 위치와 수평유속은 BEM의 경계조건으로 부여된다. 이때, T.D.내에서는 BEM과 CADMAS-SURF에서 계산된 두 개의 수면이 존재하게 되는데, 두 수면을 매끄럽게 연결하기 위하여 Fig. 2와 같이 BEM의 수면을 수정하고, 수면의 수정에 따른 수면에서의 포텐셜과 포텐셜의 범선미분치를 수정한다.

## 3. 결합 해석법의 검증

Fig. 3과 같은 계산영역에서 파형경사가 다른 입사파( $H=0.1m, T=3.0s, H/L=0.016$  ;  $H=0.1m, T=2.0s, H/L=0.019, H=0.12m, T=2.0s, H/L=0.023$ )에 대해서 CADMAS-SURF 영역에서 완전반사가 발생하는 조건으로 50주기 계산을 수행하였다. 또한, 비교를 위해서 CADMAS-SURF만을 이용하여 동일한 계산을 수행하였다.

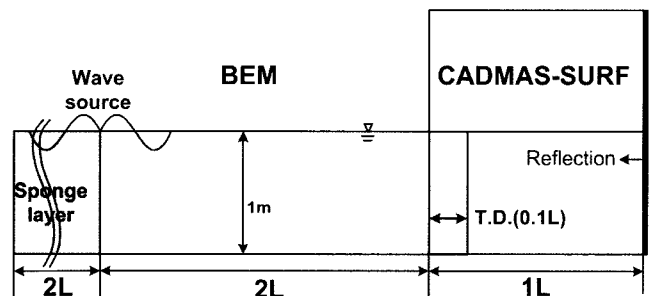


Fig. 3 Domain for the verification of model

Fig. 4는 0.1L의 T.D.를 가진 결합해석법을 적용하여  $H=0.1m, T=2.0s$ 의 입사파에 대한 계산종료시의 공간파형을 나타내고 있다. 계산된 수면은 이론수면과 거의 일치하고, 이는 T.D.내에서도 동일하게 일치하고 있다. 정량적인 평가를 위해

각각의 계산에서 이론과형에 대한 계산과형의 공간평균제곱오차를 구하여 Fig. 5에 나타내었다(B+C, 이하 그림에서 결합해석법의 결과를 B+C로 표기). 비교를 위하여 동일한 조건에서의 CADMAS-SURF의 계산결과를 병기했다. CADMAS-SURF의 경우,  $H/L$ 가 커짐에 따라 오차가 커지는 경향을 보였고,  $H/L=0.016$ 의 경우는 결합해석법과 CADMAS-SURF의 오차가 거의 동일하나,  $H/L=0.019, 0.023$ 의 결합해석법이 오차가 작다. 이는 계산영역이 커짐에 따라 일반적인 격자법에서 발생하는 수치점성에 의한 파고감쇠에 의한 영향으로, 결합해석법은 파고감쇠가 거의 없는 BEM이 전체 계산영역의 약 66%를 담당하고 있기 때문으로 사료된다.

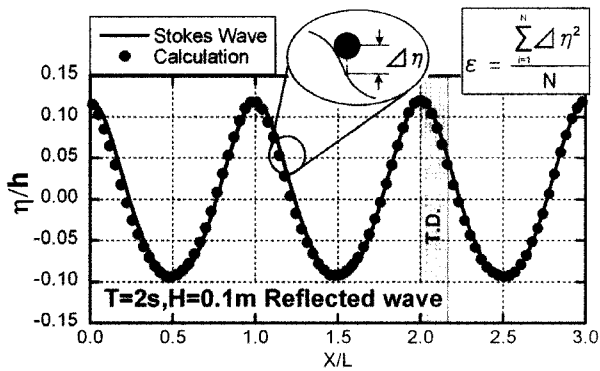


Fig. 4 Wave profile of model and theoretical Stokes' 5th order wave

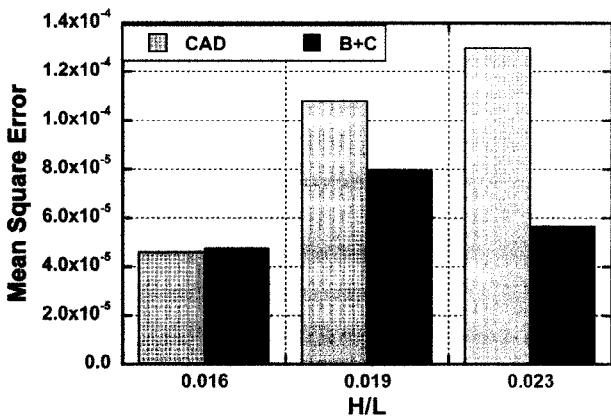


Fig. 5 Mean square error of CADMAS-SURF and coupling model according to  $H/L$

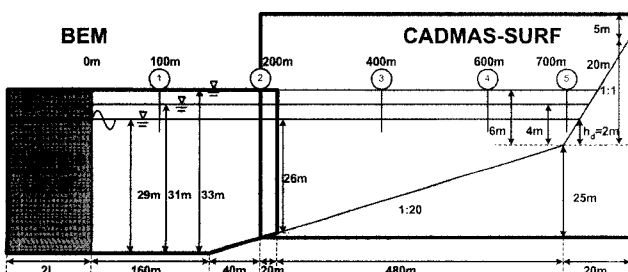


Fig. 6 Domain for the calculation of runup

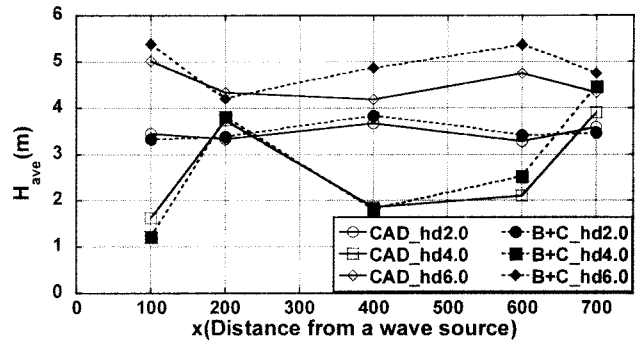


Fig. 7 The spatial wave height of CADMAS-SURF and coupling model

## 4. 결합해석법의 적용

### 4.1 경사호안에서의 처오름 계산

豊島 등(1965)은, 1/20과 1/30의 해저면 구배를 가지는 완만한 해저면에 다양한 사면경사를 가지는 제방을 설치한 실험을 실시하여, 실험에 근거한 처오름 산정도를 작성하였다. 그 중에서 본 연구에서는, 해저면 구배가 1/20, 사면경사가 1:1인 제방에 대한 실험을 계산의 대상조건으로 한다. 계산은 실제 스케일로 실시하고, Fig. 6과 같이 BEM과 CADMAS-SURF를 결합한 결합해석법을 적용한다. 입사파는 파고  $H=2.75m$ , 주기  $T=11.33s$  ( $H_0/L_0=0.015$ ,  $H_0$ : 환산심해파고)의 제5차 스토크스파로서, 호안의 설치수심  $h_d$ 이 2, 4, 6m의 3경우에 대해서 각각  $50T$ 간 계산하였다. 비교를 위해 동일한 계산 조건에서 전체영역에 CADMAS-SURF만을 적용시킨 계산도 병행하였다. 계산 설정에 대해서는, BEM영역의 양단에 위치한 가상경계에서의 요소의 개수는 10개, 수면 및 사면에서의 요소의 개수는 1과장당 30개의 요소를 배치시키고, CADMAS-SURF의 격자크기를  $\Delta x=1m$ ,  $\Delta z=0.25m$ 로 설정하여, 사전에 충분한 검토를 수행한 결과를 이용하였다.

Fig. 7에 계산개시 후  $40T \sim 50T$ 의 평균파고의 분포를 나타내었다. 수심의 변화에 따라 파랑의 천수변형과 호안에서의 반사에 의해 파고분포는 크게 변화하고 있다. CADMAS-SURF와 결합해석법을 비교하면,  $h_d=6m$ 의 경우는 사면상에서 약간 차가 있지만,  $h_d=2, 4m$ 의 경우는 거의 동일한 계산을 하고 있어, 결합해석법이 CADMAS-SURF와 거의 동일한 계산 정도를 가지고 있음을 알 수 있다. Fig. 8은 각 설치수심에 따른 처오름의 시계열로, 결합해석법의 처오름이 CADMAS-SURF의 처오름보다 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 7의 평균파고분포에서 나타나고 있는 결합해석법의 평균파고가 약간 더 높게 계산되어지는 것에 기인한 것으로 사료된다. 다만,  $h_d=2m$ 의 경우,  $49T$ 부근에서 CADMAS-SURF의 처오름보다 결합해석법의 처오름이 폭발적으로 과대히 계산되어지고 있는데, 이는 CADMAS-SURF만의 계산에서도 발생하는 것( $28T$ 부근에서 처오름  $R_u$ 가 약 19m)으로 설치수심이 낮아 복잡한 쇄파의 수면을 계산할 경우 발생하는 현상으로

추정되나 현재로서는 원인이 명확하지 않다.

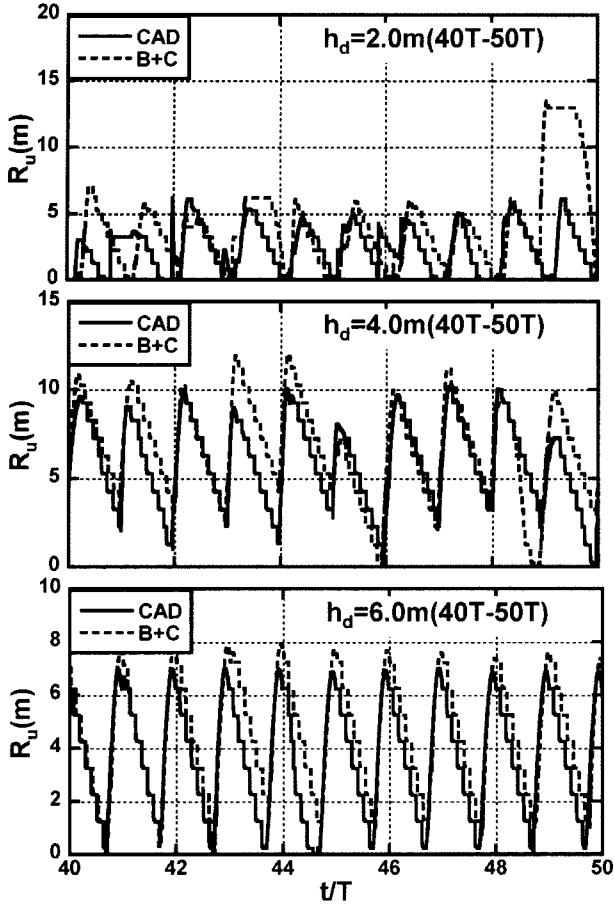


Fig. 8 The runup profiles of CADMAS-SURF and coupling model

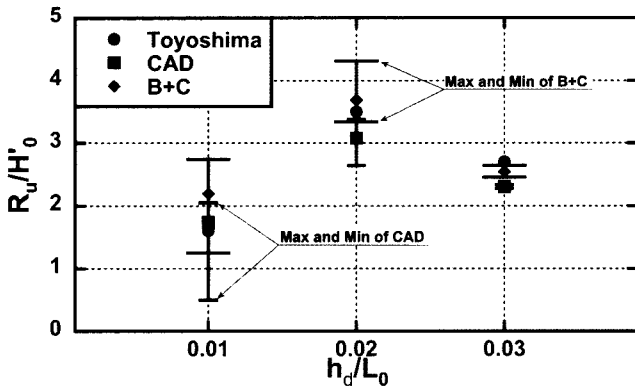


Fig. 9 Comparison of runup between the Toyoshima's experiment and numerical model

한편, Fig. 9는 10T 평균 초오름고를 豊島 등(1965)에 의한 초오름고 산정도와 비교한 것이다. 실험치는 豊島 등(1965)에서 실시한 다수의 이산화 된 실험결과를 대표하는 곡선으로 나타낸 그래프에서 추출한 값이고, 그림의 오차바(error bar)는 계산의 결과로 대상 10T내의 최대 및 최소 초오름고를 나타낸

것이다. 본 계산에서의 결합해석법에 의한 초오름고가 CADMAS-SURF보다 약간 높게 나타나는 경향을 가지고 있고, 실험치 및 계산된 초오름고의 오차를 고려하면 결합해석법 뿐 아니라 CADMAS-SURF에 의한 초오름계산도 실험치와 비교적 잘 일치하고 있다. 다만, 설치수심이 낮을수록 복잡한 수면변동으로 인해 불규칙적인 초오름의 출현빈도가 증가하여, 오차의 범위가 확대됨을 알 수 있다.

4.2 직립호안의 월파랑 계산

畠田 등(1975)은 해저구배가 1/10과 1/30, 직립호안과 소파호안, 유의파의 환산심해파 파형구배가 0.012, 0.017 및 0.036의 불규칙파의 각각에 대해서 월파유량 추정도를 작성하였다. 그 중에서 본 연구는, Fig. 10과 같이 해저구배가 1/10, 파형구배 ( $H_0/L_0$ )가 0.017의 직립호안의 경우를 계산의 대상 조건으로 했다. 입사파는 유의파고  $H_{1/3}=2.75m$ , 유의파 주기  $T_{1/3}=10.64s$ 의 Bretshneider-Mitsuyasu형 스펙트럼을 가지는 불규칙파로 0.06Hz~0.21Hz의 주파수를 100 등분해서 얻어진 100개의 선형파의 합성으로 입력파를 조파한다. 직립호안의 천단고  $h_c$ 는 3.0, 3.75 및 4.5m이고, 계산은 유의파 주기의 100주기를 실시하였다. BEM영역에서의 요소 개수 및 CADMAS-SURF의 격자 크기는 초오름 계산과 동일하다. 또한 결합해석법과의 비교를 위해서 초오름 계산과 동일하게 전체영역에 CADMAS-SURF만을 적용시킨 계산도 수행하였다.

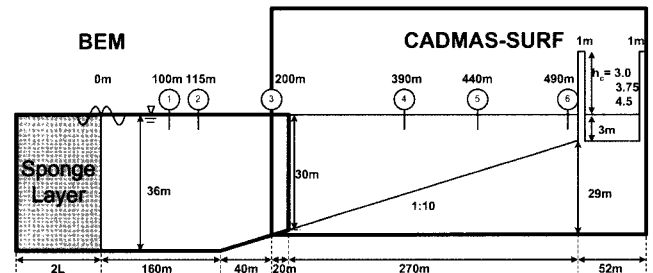


Fig. 10 Domain for the calculation of overtopping

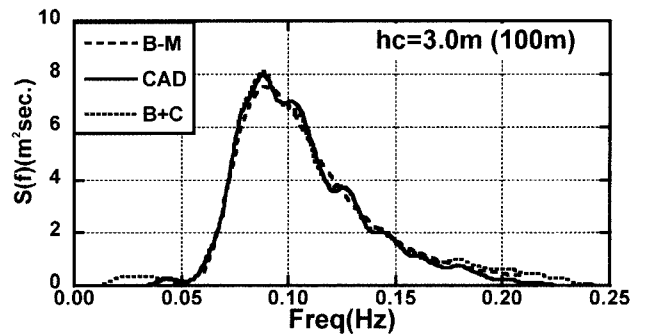


Fig. 11 The incident wave spectrum from the separation of incident and reflected waves on superposed waves

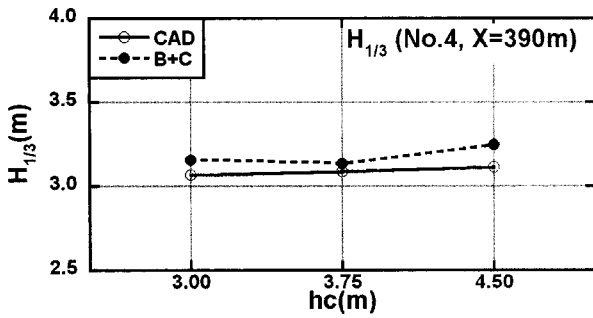


Fig. 12 Significant wave height at the point of 390m off from the wave source

먼저, 입사파의 비교를 위해서 조파소스에서 100m 떨어진 위치에서 입사파와 반사파를 분리해 입사파 성분만을 Fig. 11에 나타내었다. 결합해석법의 입사파와 CADMAS-SURF의 입사파가 거의 일치하고, 이들은 목표한 B-M 스펙트럼과 거의 일치하고 있다. Fig. 12는 호안에서 110m 떨어진 위치에서의 유의파를 나타낸 것이다. 입사파는 결합해석법과 CADMAS-SURF가 거의 동일하지만, 조파소스에서 떨어진 위치에서의 파고는 결합해석법이 더 큰 것을 알 수 있다. 이는 VOF법을 기반으로 한 수치해석 모델을 이용하여 넓은 영역을 계산할 경우 발생하는 파고감쇠 현상이 결합해석법에서는 BEM 영역만큼 발생하지 않은 것에서 기인한 것으로 사료된다.

또한, Fig. 13에 나타난 총월파량 (월파한 유량의 누적량)의 시간변화를 보면, 결합모델의 총월파량이 CADMAS-SURF와 비교하여 약간 높게 나타나고 있는데, 이 현상 역시, 앞서 설명한 파고감쇠의 차이에서 기인한 유의파고 증가 현상으로 판단된다.

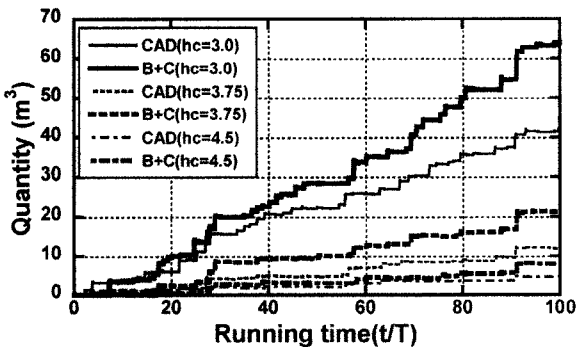


Fig. 13 The total quantity profiles of wave overtopping by numerical models

Fig. 14는 습田 등(1975)의 월파유량산정도에서 실시한 계산의 계산조건에 대응하는 월파유량을 읽어 계산결과와 비교한 그림이다. 계산에서의 월파유량은  $20 T_{1/3} \sim 100 T_{1/3}$ 의 월파량에서 산정했으며, 그림에 나타난 오차바는 습田 등(1975)에 의해 제시된 추정오차의 범위를 나타낸 것이다. 결합해석법과 CADMAS-SURF에 의한 계산결과는 추정오차의 하한치 부근에 존재함을 알 수 있고, 추정오차의 범위를 고려하면 두 수법의 차이는 거의 동일한 것으로 판단된다.

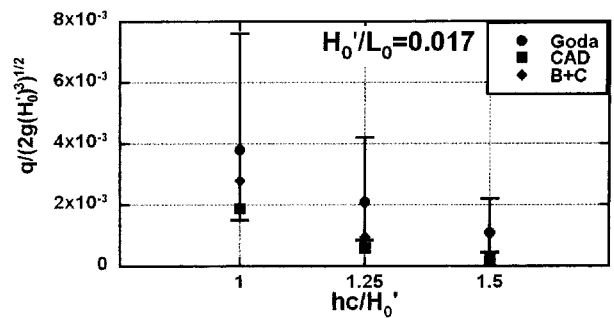


Fig. 14 Comparison of wave overtopping rate between Goda's design diagram and numerical models

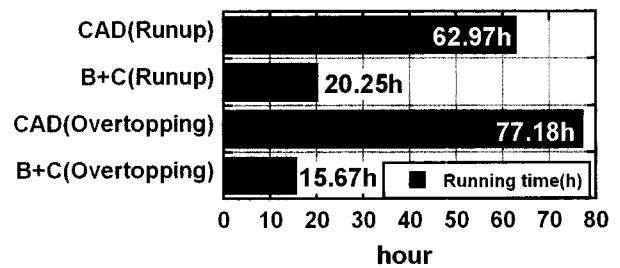


Fig. 15 Comparison of running time between CADMAS-SURF and coupling model

본 연구에서 사용된 계산기 성능은 동일(CPU: Pentium 4 dual core 3.2GHz; 램:2G)하고, 소요계산시간은 Fig. 15와 같다. 본 연구의 계산영역에 결합해석법을 적용할 경우, 전술한 바와 같이 결합해석법의 계산결과가 CADMAS-SURF의 계산결과와 거의 동일하지만, 계산소요시간은 1/4 정도로 대단히 신속하게 계산하였다. 따라서, 단축된 시간을 보다 정밀한 계산을 위해 사용하거나, 보다 많은 사례를 계산할 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결론

넓은 해역을 대상으로 하고, 장시간의 계산이 필요한 불규칙파와 구조물간의 상호간섭에 관한 수치계산을 CADMAS-SURF로 수행할 경우, 계산의 효율성을 위해 BEM과 결합하여 계산하는 결합해석법이 이미 발표되어 있다. 본 연구에서는 이 결합해석법을 이용하여 보다 현실적인 문제에 적용해 보고자, 완만한 해저사면을 가진 해역에 설치된 구조물에서의 규칙파 처오름과 불규칙파 월파량을 산정해 보았다. 이에 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 완만한 사면에 설치된 구조물에서의 처오름을 계산할 경우, 결합해석법이 CADMAS-SURF와 거의 동일한 계산정도로 계산을 수행할 수 있음을 확인 했다.
- 2) 결합해석법과 CADMAS-SURF 단독 모델을 이용하여 산정한 처오름고는 豊島 등이 제시한 추정치와 비교한 결과

거의 동일한 정도를 가지고 있음을 확인했다.

3) 불규칙파를 대상으로 한 월파량의 계산에서는 결합해석법이 CADMAS-SURF보다 약간 높은 파고 분포를 보인다.

4) 습田 등(1975)이 제시한 월파량 추정치와 두 수법을 이용한 계산결과를 비교하면, 계산에서 얻은 월파량은 추정치의 하한오차 부근에 존재하고 있음을 확인했다.

5) 초오름 계산에서는 결합해석법뿐만 아니라 CADMAS-SURF의 결과가 실험치와 비교적 잘 일치하고 있으나, 월파 계산에서는 계산의 결과치가 추정치의 정성적인 경향은 동일하나, 정량적으로는 추정치보다 다소 적게 산정된다.

6) 본 수치계산에서의 결합해석법은 CADMAS-SURF와 동일한 영역을 거의 동일한 계산정도로 수행하고 있으나 계산소요시간은 CADMAS-SURF의 25%정도로 상당히 신속한 계산이 가능함을 확인하였고, 장시간의 계산이 필요할 경우, 결합해석법은 상당히 효율적인 수법이 될 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구의 일부는 한국해양연구원의 기본연구사업(PES130A), 국토해양부의 연구개발사업(PMS1780)의 지원을 받아 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

[1] 김상호, 야마시로, 요시다, 하시모토, 이중우(2005), "BEM과 VOF법을 결합한 수치모델의 개발과 그 타당성 검토", 한국항해항만학회지, 제29권, 제10호, pp 853~858.

[2] 김상호, 야마시로마사루, 요시다아키노리, 신승호, 홍기용(2008), "BEM과 CADMAS-SURF의 양방향결합법에 관한 연구", 해양환경공학회 추계학술대회 논문집, pp 44~47.

[3] 磯部雅彦, 余錫平, 梅村幸一郎, 高橋重雄(1999), "數値波動水路の開発に關する研究", 海岸工學講演會論文集, 第46卷, pp.36~40.

[4] (財)沿岸開發技術研究センター(2001), "數値波動水路の研究・開發", No. 12

[5] 鄺曙光, 山城 賢, 吉田明德, 鮎川慶一郎, 入江 功(2003), "BEMとVOFを結合した波動場解析法の開発", 海洋開發論文集, 第19卷, pp.83~88.

[6] 鄺曙光, 山城 賢, 吉田明德, 井ノ口洋平, 入江 功(2004), "BEM-VOF結合解析法の構造物近傍波動場への適用", 海洋開發論文集, 第20卷, pp.689~694.

[7] 合田良實, 岸良安治, 神山豊(1975), "不規則波による防波護岸の越波流量に關する實驗的研究", 港湾技術研究所報告, 第14卷, 第4号, pp.3~44.

[8] 豊島修, 首藤伸夫, 橋本宏(1965), "海岸堤防への波のうちあげ高", 海岸工學論文集, 第12卷, pp.108~185.

[9] Biaisser, B., Grilli, S. T., and Fraunié, P. (2003), "Numerical simulations of three-dimensional wave breaking by coupling of a VOF method and a Boundary Element method", Proc. of the 13rd Int. Offshore and Polar Eng. Conf., ISOPE, pp.333~339.

[10] Biaisser, B., Grilli, S. T., and Fraunié, P. (2004), "Numerical analysis of the internal kinematics and dynamics of three-dimensional breaking waves on slopes", Proc. of the 14th Int. Offshore and Polar Eng. Conf., ISOPE, pp.247~256.

[11] Drevard, D., Marcer, R., Grilli, S.T., Fraunié, P., and Rey, V. (2005), "Experimental Validation of a coupled BEM- Navier-stokes model for solitary wave shoaling and breaking", Proc. of the 5th Int. Ocean Wave Measurement and Analysis, -.

[12] Grilli, S. T., Gilbert, R. W., Lubin, P., Vincent, S., Astruc, D., Legendre, D., Duval, M., Kimmoun, O., Branger, H., and Devrard, D. (2004), "Numerical Modeling and experiments for Solitary wave shoaling and breaking over a sloping beach", Proc. of the 5th Int. Ocean Wave Measurement and Analysis, pp.306~312.

[13] Guignard, S., Grilli, S.T., Marcer, R., and Rey, V. (1999), "Computation of shoaling and breaking waves in nearshore areas by the coupling of BEM and VOF methods", Proc. of the 9th Int. Offshore and Polar Eng. Conf., ISOPE, pp.304~309.

[14] Lachaume, C., Biaisser, B., Grilli, S.T., Fraunié, P., and Guignard, S. (1999), "Modeling of Breaking and Post-breaking Waves on Slopes by Coupling of BEM and VOF Methods", Proc. of the 13rd Int. Offshore and Polar Eng. Conf., ISOPE, pp.353~359.

원고접수일 : 2009년 1월 28일  
 심사완료일 : 2009년 2월 21일  
 원고채택일 : 2009년 2월 23일