

EDISON CFD를 이용한 2차원 선박단면 형상의 입수 충격에 대한 연구

장 동 진¹, 최 영 민¹

¹서울대학교 조선해양공학과

최근 대형 컨테이너선의 개발이 지속적으로 이루어짐에 따라 슬래밍에 의한 선수 및 선미의 구조안전성 문제가 대두되고 있지만 설계 단계에서 슬래밍에 대해 고려하기에는 현상의 복잡성으로 인해 어려움이 많았다. 이를 위해 KRISO에서 시행된 WILS JIP의 선수 단면 형상 및 선미 단면인 썰기 형상으로 격자를 생성하여 EDISON CFD 다상유동 해석자를 통해 수치해석을 시도하였다. 기존 방식과 달리 계산 시간 절감을 위하여 격자 변형 기법을 적용하지 않고 모형 시험결과를 기반으로 한 유입류 조건을 설정하여 입수 충격 문제를 해석해보았다. 그 결과, 선미 형상의 경우 선행연구와 유사하게 실험 결과에 근접한 유체 충격력을 정량적으로 얻어낼 수 있었다. 선수 형상의 경우에는 구상 선수로 인해 파생되는 센서 위치별 충격력의 변화를 확인할 수 있었으며, 실제 유동에 가까운 유동 형상과 슬래밍에 의한 충격력을 개략적으로 구할 수 있었다.

Key Words : 전산유체역학(CFD), 입수 충격(Water Entry), 유한체적법(Finite Volume Method), 슬래밍(Slamming), 다상 유동(Multiphase flow), 선미 모형(Stern model), 선수 모형(Bow model)

1. 서 론

일반적으로, 조선 공학에서의 슬래밍(Slamming)은 선체 외부의 파도가 선체에 부딪히면서 큰 힘을 작용하는 경우를 뜻한다. 슬래밍이 발생할 경우 순간적으로 큰 하중이 선체에 작용하고 이는 기진력으로도 작용하게 되어 피로 강도에도 악영향을 줄 수 있을 뿐만 아니라 승선한 사람들의 편의성에도 문제가 될 수 있다. 실제로 1974년 노르웨이 탱커인 Wilstar 호 사고의 원인중 하나가 슬래밍으로 인한 충격력이었다.



Fig. 1 Norwegian tanker 'Wilstar' Incident

특히, 최근 대형 컨테이너 운반선의 개발이 지속적으로 이루어짐에 따라 슬래밍에 의한 선수 및 선미 구조 안전성 문제가 더욱 대두되었고, 이에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 하지만 슬래밍 현상으로 발생하는 입수 충격과 주위 유

동은 매우 복잡하여 설명할 수 있는 이론에도 한계가 있다. 이로 인해 설계단계에서 슬래밍, 즉 입수 충격(Water Entry)에 관한 고려가 적절하게 이루어지지 않는 것이 현실이다. 그러나 컴퓨터의 성능 향상으로 인해 수치 해석 기법이 급속히 발달됨에 따라 유체 충격력 연구를 CFD (Computational Fluid Dynamics)를 통해 수행하려는 시도가 많이 늘어나고 있다. 이러한 흐름에 따라 본 연구에서는 EDISON CFD를 이용하여 슬래밍 구조 안전성 문제에서 중요한 선미 및 선수 2차원 단면 형상의 입수 충격력에 대해 분석하고자 했다. 이를 위해, 한국 선박해양플랜트 연구소(Korean Research Institute of Ships & Ocean Engineering, KRISO)에서 이루어진 모형실험 (홍사영, 김경환, 2014)에 사용된 단면 형상을 이용하기로 하였다[1]. 또한, 고정된 격자계를 통해 자유낙하 운동을 해석하기 위해 기존 해석방법과는 달리 모형실험의 낙하속도를 기반으로 하여 유동의 유입조건을 설정해주었다. 낙하 높이, 압력 및 힘 센서의 위치들은 KRISO 모형실험 조건과 같게 하여 수치해석을 수행했으며 작용되는 힘과 압력을 도출해내었다. 이후, 실제 모형실험 결과 및 선행 연구로 같은 선미 및 선수 형상을 CFD로 수행한 수치해석 연구결과(Neil R.Southall et al., 2014, 2015)와 비교하여 유효성을 검증하고자 하였다[2,3].

2. 수치 해석 기법

2.1 2차원 선박단면 형상 해석

KRISO에서 시행된 입수 충격을 위한 모형실험인 WILS JIP (Wave Induced Loads on Ships Joint Industry Project)에서

사용된 2D 썰기 모형과 모형 III인 10,000 TEU 컨테이너선의 선박 단면 모형을 이용하고자 하였다. 선미의 트랜섬 부근의 단순한 단면 형상으로 기존 연구 결과에 의하면 썰기 모형이 자주 사용되었는데 이를 차용하여 Stern model로 썰기 모형을 사용하기로 하였다[4]. 윗면은 가로가 600 mm, 세로가 400 mm인 직사각형 모형이며 앞면 삼각형의 dead-rise 각도는 30도로 설정하였다. 기타 길이와 압력 및 힘 센서의 종류, 위치는 Fig 2를 참조하여 같게 설정하였다.

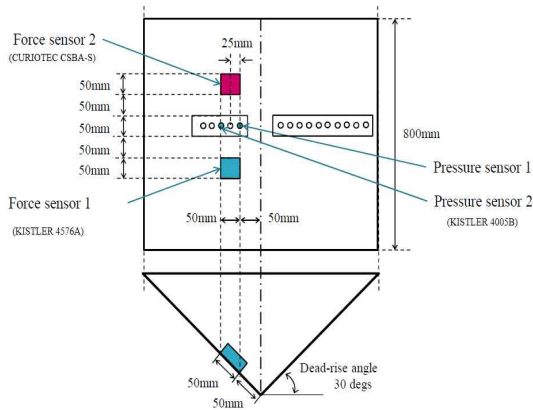


Fig. 2 Stern model & sensor arrangement

Bow model의 경우도 마찬가지로 KRISO에서 사용된 10,000 TEU 컨테이너선의 station 19 단면 형상을 이용하여 격자를 만들었다. Fig 3에서는 model III가 위 논문에서 해석한 선수 형상을 나타내며 높이는 541 mm, 폭은 718 mm이다. 힘, 압력 센서는 각각 3개로 그 중심은 단면 하단으로부터 339 mm, 379 mm, 423 mm에 위치하였으며 이를 참조하여 격자를 생성했다[5].

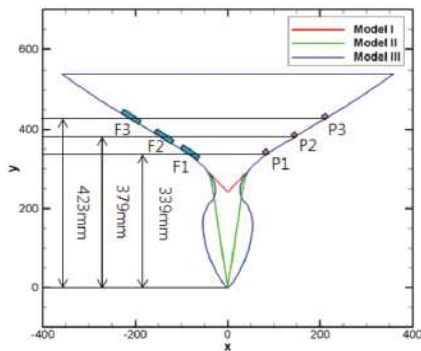


Fig. 3 Bow model & sensor arrangement

2.2 2차원 선박단면 격자 생성

2.2.1 Stern model의 격자 생성

KRISO에서 제공된 썰기 모형의 형상을 이용하여 격자를 생성하였으며 drop height를 500 mm로 설정하였다. 격자생성 프로그램인 Gridgen으로 형상을 읽어 들인 후 입수 충격을 충분히 계산할 수 있도록 선행 연구결과를 참고하여 폭이 5m 이상의 도메인을 생성하였고 Stern model 폭 길이를 L이라 할 때, 위와 좌우를 5L, 아래를 10L만큼 늘려 Fig 4와 같이 도메인을 생성하였고, 경계조건 또한, Fig 4에 도시하였다[6].

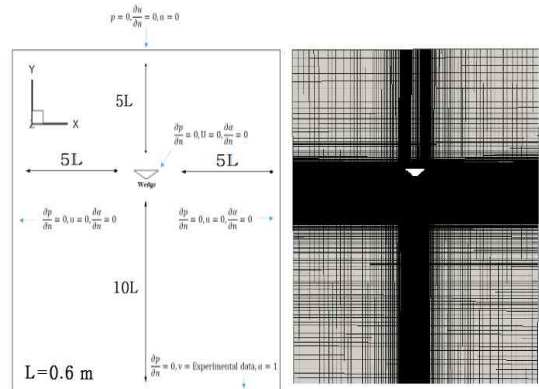


Fig. 4 Stern model & sensor arrangement

2.2.2 Bow model의 격자 생성

컨테이너선의 station 19의 단면 형상이 복잡하기 때문에 EDISON 자동격자 생성기를 사용해 2D mesh를 생성하였다. 모형실험과 동일하게 drop height는 300 mm로 정하였다. 또한, 선행연구에 따라 최적결과를 얻기 위해 형상 주위의 경계층을 삽입하지 않고 cell 크기 자체를 줄이는 방식으로 격자를 생성하여 해석 결과의 정확도를 높이고자 하였다. 경계조건은 Stern model과 동일하게 Fig 5와 같이 생성하였다[6].

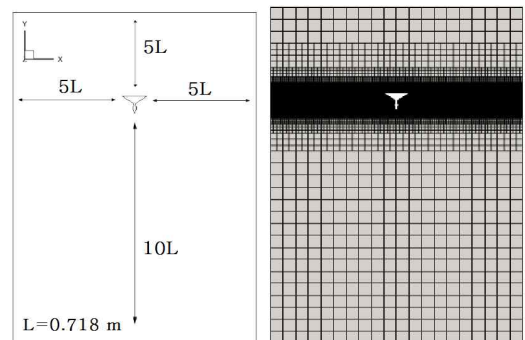


Fig. 5 Bow model grid & computational domain

2.3 해석자의 사용

EDISON CFD 다상유동 해석자를 이용하여 0부터 0.55초까지 계산을 수행하였으며, CFL number가 1 이하로 유지될 수 있도록 time step은 Stern model은 10^{-5} 초, Bow model은 10^{-4} 초로 설정하였다. 모형실험의 낙하 속도를 기반으로 유동의 유입속도를 설정하였으며 모형실험에서 낙하가 아닌 상승 속력을 가지는 구간인 0.535초 이상의 경우 속도를 0으로 주었다. Stern, Bow model의 유입 속도 그래프는 각각 Fig 6의 좌측과 우측이 나타난다. 위와 같이 격자계는 고정시키고 유동의 움직임으로 해석하여 선행 연구결과에 비해 계산시간이 크게 절감됨을 확인하였다.

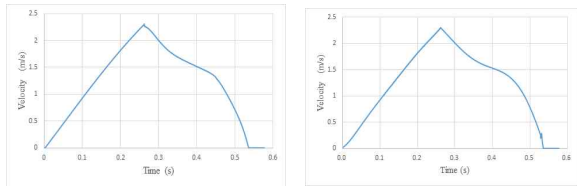


Fig. 6 Stern & bow model inlet velocity

3. 해석 결과

3.1 격자 시험

구체적인 해석에 앞서 격자 조밀도에 따른 시험을 진행하였다. 형상을 둘러싼 격자를 순차적으로 adaption 하는 방법으로 격자 밀도를 다르게 하였으며 세 단계의 mesh level로 coarse, medium, fine 격자를 생성하였다[7]. Stern model의 경우 Table 1, Bow model의 경우에는 Table 2에서 격자수와 레벨에 따른 양상을 확인할 수 있으며, 선미에 비해 선수의 형상이 복잡하므로 이를 고려하여 Bow model의 격자수를 Stern model에 비해 증가시켜 형성하였다.

Table 1 Stern model mesh level

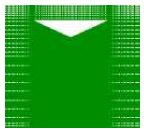



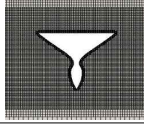
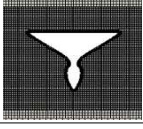
Coarse	Medium	Fine
		
25,000 cells	50,000 cells	100,000 cells

Table 2 Bow model mesh level

Coarse	Medium	Fine
		
57,600 cells	114,222 cells	227,460 cells

Stern model을 해석해본 결과 가장 조밀한 격자인 fine 격자의 결과 값이 실험결과와도 가장 근사한 수치를 나타냄을 Fig 7을 통해 확인할 수 있었다.

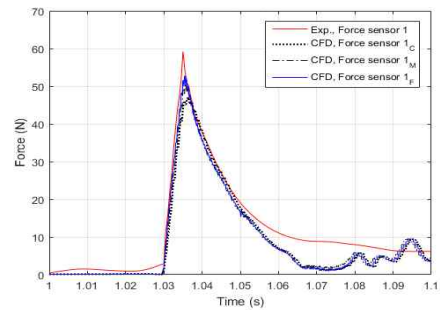


Fig. 7 Stern model mesh test

위와 같이 실험값에 가장 수렴하면서 그 경향을 잘 따르는 그래프는 fine 격자의 힘 센서 값을 확인 할 수 있다. 마찬가지로 선수 형상의 경우에도 2.1 절에서 가운데 위치한 힘 센서 2 그래프인 Fig 8을 통해 격자 밀도가 가장 높은 fine 격자의 정확도가 가장 높다는 사실을 확인했다.

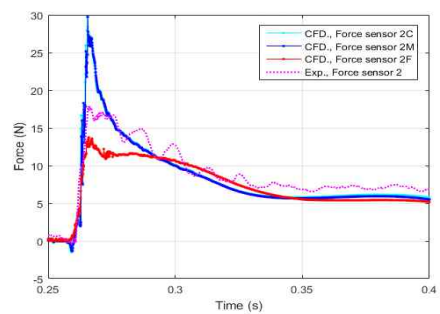


Fig. 8 Bow model mesh test

전체적으로 실험값과 그 경향을 달리 하며 값이 급격히 증가했다 감소하는 medium, coarse 격자와는 달리 fine 격자는 실험값의 양상을 거의 유사하게 따라가며 정확도가 높아짐을 알 수 있었다. 특히, 힘의 최댓값이 다른 두 격자에 비해 매우 유사하다는 것을 알 수 있었다. 이를 통해, 격자의 수가

많아질수록 수치해석의 정확도가 높아진다는 것을 재확인 할 수 있었으며 이는 자유 수면을 더욱 굴곡 없이 날카롭게 잡아냈기 때문이라고 사료되었다. 또한 충돌 시 급격하게 변하는 수면에 대한 정보를 격자가 조밀할 경우 더 많은 격자에서 담을 수 있으므로 fine 격자에서 더욱 정확한 값을 얻어낼 수 있었다고 생각된다. 따라서 이후의 수치 해석 결과는 fine 격자를 기준으로 수행하였다.

3.2 Stern model의 입수 충격 분석

3.2.1 Stern model 입수 형상

2.1 절에서 언급했듯이 힘 센서와 압력센서를 배치하였으며 2.3 절에서 언급한 조건으로 해석자를 통해 계산을 수행하였다. 계산 후, 후처리 프로그램인 ParaView를 통해 time step에 따른 형상을 확인하였고 0.34s의 자유수면 형상은 Fig 9와 같았다.

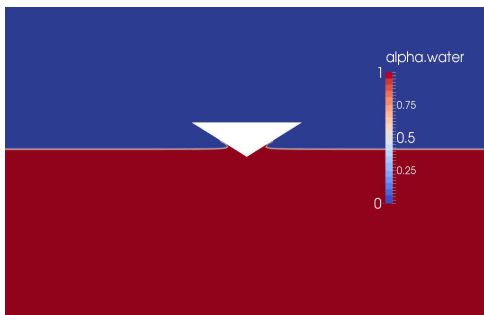


Fig. 9 Stern model t = 0.35

3.2.2 Stern model 힘 센서 값 검증

힘 센서의 경우 선행 연구결과 및 KRISO 모형실험 결과와 비교하여 검증을 수행하였다. 선행 연구의 경우, 격자변형 기법을 사용하여 쇄기의 자유낙하를 모사하여 계산하였다. 실험 조건인 drop height는 500 mm로 같다.

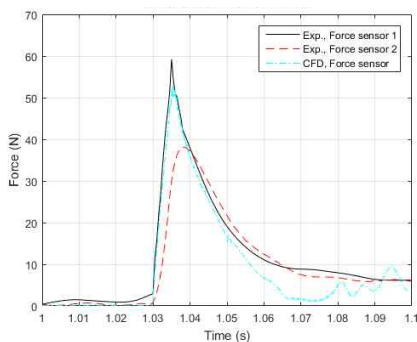


Fig. 10 Stern model force sensor results

Fig 10은 EDISON 해석자를 이용하여 해석한 Stern model의 힘 센서 값이다. 특히 사항으로는 힘 센서 1의 값과 유사하며 센서 2와는 다른 결과를 보인다는 점이었고, 이는 선행 연구 결과와 유사하다. 이를 통해 CFD 해석 결과가 힘 센서 2 (Curiotec CSBA-S) 보다 힘 센서 1 (Kistler 4576A)의 계측 방식에 더 잘 맞는다는 결론을 내릴 수 있었다. 또한, Fig 12에서 보이듯 힘 센서 1에 국한해서 보면 실험결과와 수치해석 결과가 굉장히 비슷한 경향을 보이고 유사한 값을 가짐을 알 수 있었다. 선행연구와 비교해 보았을 때 힘 센서의 최대값과 응답특성, 충격력 혹은 충격량 관점에서도 선행 연구와 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

하지만 1.06초 이후 힘이 급격히 감소하는 형상을 보이는 데 이는 본 연구에서 자유낙하의 모사를 수면이 상승하는 것으로 대체하였기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 본 연구는 선행연구와 같이 dynamic mesh를 사용하지 않고 수면을 상승시켜 계산 시간의 감소를 꾀했음에도 불구하고 위와 같이 충격력의 최대값과 충돌 전후의 경향을 실험과 같이 유사하게 계산하였는데 의외와 비중을 두었다. 결과적으로 Stern model에 작용되는 유체 충격력을 실험과 유사하게 오차 10% 미만으로 정량적으로 얻어낼 수 있었다.

3.2.3 Stern model 압력 센서 값 검증

선행 연구된 CFD 결과와 모형실험 압력센서 값을 비교하여 검증을 수행하였으며 2.1 절에서 제시한 압력센서 1,2의 값을 모두 비교한 그래프가 Fig 11이다.

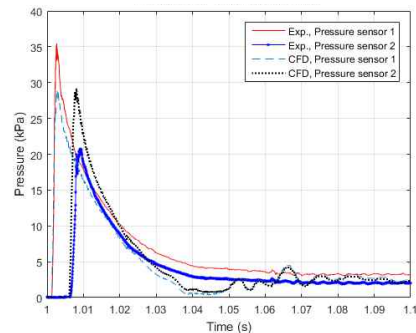


Fig. 11 Stern model pressure sensor results

압력 센서 1의 경우는 CFD 해석결과가 더 낮은 값들을 보이며 압력 센서 2의 경우는 더 높은 값들을 보이는 경향이 있었고, 이는 선행연구 결과와 유사하였다. 압력 센서 1,2 경우 모두 최대값의 차이가 존재했지만 최대값까지 상승하는 곡선의 개형과 시간이 매우 유사했으며 감소하는 구간의 개형이 일치하였기에 유효한 결과라 생각되었다.

3.3 Bow model의 입수 충격 분석

3.3.1 Bow model 입수 형상

실제 10,000 TEU 컨테이너선의 station 19 형상인 선수 단면을 통해 격자를 생성하였다. 힘과 압력 센서 모두 3 개씩 존재했기 때문에 2.1 절에서 제시된 중심위치에 맞춰 센서를 배치하였다. 계산 후, 후처리 프로그램인 ParaView를 통해 time step에 따른 형상을 확인하였고, 0.2s의 자유수면 형상은 Fig 12와 같다.

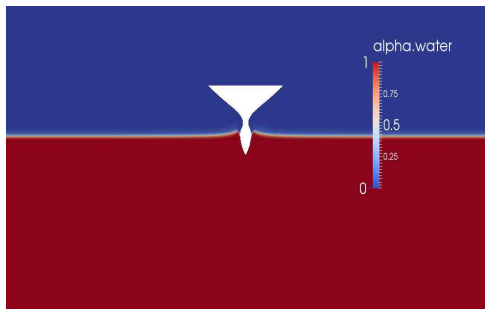


Fig. 12 Bow model t = 0.2s

실험과 마찬가지로 수치해석에서도 선수부의 구상 선수로 인하여 형상이 급격히 변하는 중앙의 굴곡진 부분에서 기포가 발생하였다. 이러한 자유수면 유동을 Fig 13에서 볼 수 있다. 이를 통해, EDISON CFD를 통한 수치해석이 실제 유동과 유사한 형상을 보임을 확인할 수 있었다.

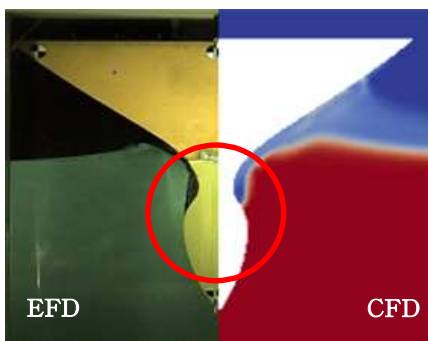


Fig. 13 Comparison between EFD & CFD

3.3.2 Bow model 힘 센서 값 검증

OpenFOAM 및 STAR-CCM+을 통해 계산한 선행 연구결과와 모형실험 힘 센서의 값을 비교하여 검증 수행하였다. 선행 연구결과도 KRISO의 실험을 참조하여 계산을 수행하였으며 drop height도 500 mm로 설정하여 진행하였다. Fig 14는

본 연구의 bow model의 힘 센서 1,2,3의 값을 실험 결과와 비교한 것이다.

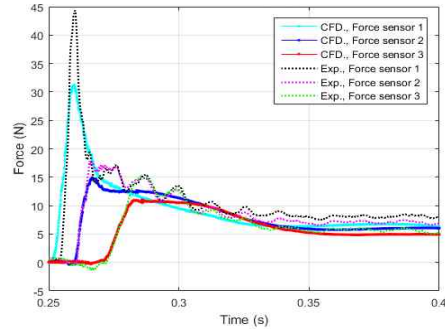


Fig. 14 Bow model force sensor results

본 연구의 수치해석 결과와 실험결과를 비교해보면 상당히 비슷한 양상을 가짐을 알 수 있다. 특히 실험결과, 선행 연구결과, 본 연구 결과 모두 힘 센서 1의 충격력 최댓값이 굉장히 크며 센서 2, 센서 3로 갈수록 점차 감소하는 경향을 보이는데 이는 선수부의 구상 선수로 인해 생기는 것이라 사료된다. 구상 선수로 인한 자유수면의 초기 변형이 Fig 12, 13과 같이 생기면서 가장 하단에 있는 힘 센서 1이 강한 충격력이 작용하게 되고, 2,3은 급격히 감소한 힘을 받게 된다.

또한, 힘 센서 1의 경우, 실험값보다 작은 충격력 분포를 보이지만 이는 선행연구와도 유사한 결과였다. 힘 센서 2, 3의 경우, 선행 연구 결과는 충격력 최댓값이 더욱 크고 충격력이 감소하는 구간의 폭이 실험결과에 비해 커서 충격량이 더욱 큰 것으로 확인되었지만 본 연구의 경우 실험의 충격력 최댓값과 큰 차이가 나지 않았으며 그 개형 또한 매우 유사했다. 실험값과의 오차를 확인해 본 결과 30% 미만으로 나타났으며 유효한 수치 해석결과라 사료된다.

3.3.3 Bow model 압력 센서 값 검증

본 연구의 bow model 압력 센서 1,2,3의 값을 실험 결과와 비교한 그래프가 Fig 15이다. 압력 센서의 중심 위치는 힘 센서와 형상의 중심축을 기준으로 대칭인 형태이므로 힘 센서 1의 결과와 마찬가지로 압력 센서 1의 값이 가장 큰 값을 가지는 형상이 예측되었고 실제 수치해석 및 실험결과에도 이와 같은 경향이 나타났다.

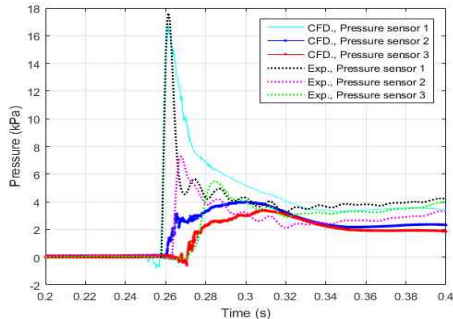


Fig. 15 Bow model pressure sensor results

주목해야할 점은 3.2.3 절과 같이 실험값과 해석 결과의 충격압력의 최대값 간의 차이가 존재했으나 압력이 감소하는 구간의 경향이 비슷했던 3.2.3 절과 달리 모형실험 결과와 개형의 차이를 보였다. 이는 썰기와 같이 단순화 했던 *Stern model*과는 달리 구상 선수 등의 복잡한 형상을 가진 선수 형상을 2차원 격자로 다루어 실제 실험에서의 3차원적인 공기와 수면의 유동을 고려하지 않아 생긴 문제임을 선행 연구에서 제시했다[7]. 이에 따라 중심에서 먼 압력센서가 3차원적 효과가 더욱 커짐을 파악할 수 있었고 이로 인해 압력 센서가 1에서 3으로 갈수록 더 큰 차이를 보임을 알 수 있었다. 즉, 복잡한 형상의 충격 압력을 구하기 위해서는 보다 정밀한 계산을 수행할 수 있는 3차원 격자가 요구된다.

4. 결 론

본 연구에서는 KRISO에서 시행한 모형실험에서 사용된 단순화된 선미 모형인 썰기 형상과 모형 III인 10,000 TEU 컨테이너선의 station 19 선수 단면 형상을 이용하여 2차원 격자를 생성하고 입수 충격 문제에 관해 분석하였다. 그 결과, *Stern model*의 경우 충격력의 경우 오차 10% 미만의 경향을 얻어낼 수 있었고 이에 따라 최대 충격력, 충격량을 실험과 매우 근접하게 정량적으로 얻어낼 수 있음을 보였다. 충격 압력의 경우 최대값의 차이를 조금 보였으나 증감의 양상 즉, 곡선의 개형은 무척 유사하였다. *Bow model* 입수 충격력의 경우 최대값이 차이가 *Stern model*에 비해 증가하였으나 그 경향이 유사하였고 오차 30% 미만의 충격력 곡선을 얻어낼 수 있었다. 특히, 센서 1의 최대 충격력 값이 다른 두 센서에 비해 상당히 큰 것을 고려해 선수부의 구상 선수로 인해 변형된 수면에 의한 충격력 변화에 대해 파악할 수 있었다.

하지만 본 연구는 격자 변형 기법을 적용하는 선행연구의 방법과는 달리 모형실험 결과를 기반으로 유입류 조건을 설정하여 수치해석을 진행했다. 이를 통해 기존의 방법보다 경제적인 계산을 수행할 수 있었으며 선행연구와 유사한 유효

한 결과를 얻을 수 있었다. 이외에도 *Bow model*에 의해 순간적으로 발생하는 기포 또한 수치적으로 재현해낼 수 있었다. 이러한 과정을 통해 슬래밍을 수치해석 기법으로 풀어낼 수 있다는 가능성을 본 연구를 통해 시사했다.

하지만 복잡한 선수 형상의 충격 압력 결과가 오차가 크다는 한계점이 존재했고, 이를 해결하기 위해 물체와 수면 사이에 갇힌 공기의 3차원적인 거동에 대한 수치해석이 요구되었다. 곧, 3차원 단면 형상을 이용한 수치해석을 통해 입수충격 문제 예측에 있어 개선된 결과를 얻을 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 첨단 사이언스·교육 허브 개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2011-0020557)

References

- [1] 2014, KRISO, "Wave Induced Loads on Ships - Joint Industry Project III - Final Report", KRISO Technical Report No. BSPIS7230-10572-6.
- [2] 2014, Neil R. Southall, Yongwon Lee, Michael C. Johnson, Spyros E. Hirdaris and Nigel J. White, "Towards a Pragmatic Method for Prediction of Whipping: Wedge Impact Simulations using OpenFOAM", Structural Analysis and Hydrodynamics, Global Technology Centre, Lloyd's Register, UK.
- [3] 2015, Neil Southall, Sangkyu Choi, Yongwon Lee, Chunbeom Hong, Spyros Hirdaris and Nigel White, "Impact Analysis using CFD - A Comparative Study", Structural Analysis and Hydrodynamics, Global Technology Centre, Lloyd's Register, UK.
- [4] 2013, H. H. Lee, "An Experimental Study on the Prediction of Stern Slamming Loads on Containerships", Seoul National University, Korea.
- [5] 2008, T. H. Park, J. H. Choi, H. H. Lee, Y. W. Lee, "Numerical investigations on the water entry of two-dimensional bodies", Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.
- [6] 2015, ISOPE, "Comparative Study on Water Impact Problem for Ship Section & Wedge Drops", International Ocean and Polar Engineering Conference.
- [7] 2013, Kim, KH, Hong, SY, Kim, YS, Kim, BW and Nam, BW, "Experimental Investigation on the Measurement of Impact Force acting on Two-dimensional Wedge", Proceedings of the Eighth International Workshop on Ship Hydrodynamics, Seoul, Korea.