

선박 운동과 내부 유동의 연성 운동에 관한 수치해석 연구

조석규^{†*}, 홍사영*, 김진*, 박일룡*

한국해양연구원 해양시스템안전연구소*

A Numerical Study on the Coupled Dynamics of Ship and Flooding Water

Seokkyu Cho^{†*}, Sayoung Hong*, Jin Kim* and Il-Ryong Park*

Maritime and Ocean Engineering Research Institute, KORDI*

Abstract

This paper presents a numerical method to solve the ship motion coupled with internal fluid flow. Physically the internal fluid motion is coupled with the ship motion. Hitherto the previous numerical results of the coupled motion predict only the general tendency with experiments. The main reason of inaccuracy is that the coupled dynamics of ship motion and internal water motion is not accurately accounted. In this study CFD technique based on VOF is employed for the accurate analysis of flooding water motion. Some cases of the 24th ITTC stability committee's benchmark study for tanker with internal fluid are analyzed by coupling the ship motion and sloshing dynamics. The calculated ship motion is compared with the experimental result to validate the coupled scheme and is in agreement with the experimental result.

※Keywords: Damaged stability(손상 안정성), Coupled dynamics(연성 운동), Flooding water(침수), CFD(전산유체역학), Sloshing(슬로싱)

1. 서언

선박이 손상되었을 때 안전과 이와 관련된 규정 수정에 대한 연구와 활동이 최근 활발하게 이루어지고 있다. 손상된 선박의 안정성은 로로 승객선(Ro/Ro Passenger ship), 초대형 컨테이너선, 함

정 등 선원과 승객의 안전이 중요한 고부가 선박의 설계에 필수적인 설계요소이다. ITTC는 선박의 안정성에 관한 특별 위원회를 조직하여 현재까지 국제 공동 벤치마크 연구를 수행하고 있다. 지금까지의 손상 선박의 운동 수치해석 결과는 모형시험 결과를 정성적으로만 예측하고 있다(Papanikolaou and Spanos 2005). 현재까지의 연구는 내부 유동을 집중질량으로 가정하여 준정적 상태에서 수리모형을 사용하고 있다(Palazzi

접수일: 2006년 6월 12일, 승인일: 2006년 10월 31일

† 교신저자: skcho@moeri.re.kr, 042-868-7501

and De Kat 2004, Letizia et al. 2004). 준정적 방법을 사용하면 다양한 조건에 대하여 모델링의 유연성과 해석의 용이함을 얻을 수 있다 (Papanikolaou and Spanos 2002). 그러나 이러한 방법은 내부 유동이 선박의 운동과 연성되면 부정확한 결과를 나타낸다. 오차의 주요한 원인은 준정적 방법이 자유 수면을 항상 수평하게 가정하여 내부 유동의 동역학 특성을 고려하지 못하기 때문이다. 내부 유동과 선박 운동의 연성 효과를 고려할 수 있는 방법은 CFD를 사용하여 내부 자유 수면을 직접 해석하는 것이다. CFD는 준정적 모델링보다 해석 시간이 길다는 단점이 있지만, 최근 컴퓨터 하드웨어와 자유 수면 해석법의 발전으로 해석 시간이 단축되었다. CFD를 사용한 내부 유동 해석과 선박 운동의 연성 문제 연구는 최근 Kim(2002), Kim et al.(2005), Rognebakke and Faltinsen(2004) 등에 의해 이루어졌다.

본 연구에서는 VOF(Volume Of Fluid)에 기반한 CFD 방법을 내부 자유 수면 유동 해석에 사용하였고 슬로싱 실험 결과와의 비교를 통해 CFD 결과를 검증하였다. 선박 운동과 내부 유동을 연성하여 ITTC 벤치마크 연구의 조건(내부에 물을 포함하고 있는 탱크)을 해석하였다. 선박의 운동 해석은 이력 효과(Memory effect)를 고려하여 시간 영역에서 해석을 하였다.

2. 수치해석 기법

2.1 선박 운동 해석

유체장을 해석하기 위해 속도 포텐셜(ϕ)을 도입하여 파랑 방사산란문제를 경계적분방정식으로 구성하였다. Green 제2정리에 의해 속도 포텐셜은 경계적분방정식의 해가 된다. 경계치 문제를 풀기 위해 고차경계요소법을 적용하였다. Choi et al.(2000)는 본 연구에 사용된 고차경계요소법 결과의 정확성과 수렴성을 확인하였다. 특이함수로 파 Green 함수를 사용하였으며 경계적분방정식은 9점 2차 사각형 요소와 6점 2차 삼각형 요소를 사용하여 이산화하였다. 자세한 내용은 Choi et al.(2000)의 논문에서 찾을 수 있다.

▷ 시간영역 해석

시간영역 해석은 Cummins(1962)의 방법을 사용하였고 사용된 운동방정식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} M_{11} + m_{11} & \dots & m_{16} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ m_{61} & \dots & M_{66} + m_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_6 \end{Bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} \int_0^t R_{11}(t-\tau)d\tau & \dots & \int_0^t R_{16}(t-\tau)d\tau \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \int_0^t R_{61}(t-\tau)d\tau & \dots & \int_0^t R_{66}(t-\tau)d\tau \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_6 \end{Bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} C_{11} & \dots & C_{16} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ C_{61} & \dots & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_6 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_6 \end{Bmatrix} \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, M 은 질량을, m 은 부가질량을, R 은 기억함수를, C 는 유체정역학적 복원력계수를, x 는 운동 벡터를 나타낸다. F 는 파랑기진력, 파랑 표류력, 조류력, 풍력, 슬로싱 힘 등의 외력을 포함한다. 시간적분은 predictor-corrector 방법의 하나인 Hamming 방법을 사용하였다.

2.2 내부 유동 해석

내부 유동을 계산하기 위해 VOF를 사용한 CFD 방법을 적용하였다. 본 연구에 사용된 VOF 방법은 선체 주위의 유동장을 해석하기 위해 개발되었고(박일룡 등 2005) 슬로싱 문제를 해석하기 위해 수정되었으며, 슬로싱 실험 결과와 비교하여 검증하였다. 지배방정식은 식 (2), 식 (3)와 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + f_i \tag{3}$$

u_i 는 속도 벡터를, p 는 압력을, τ_{ij} 는 점성응력 텐서를 f_i 는 체적력을 나타낸다.

지배방정식은 셀 중심의 유한체적법으로 이산화

하였고 시간항에 대한 적분은 Euler implicit 방법을 적용하였다. 운동방정식의 대류항은 3차 정도의 MUSCL(Monotonic Upstream Centered Scheme for Conservation Laws)로, 확산항은 중앙차분법을 이용하여 각각 이산화하였다. 속도-압력의 연성을 위해서 SIMPLEC 방법을 사용하였으며, 이산화된 선형연립방정식의 해는 SIP(Strongly Implicit Procedure) 기법을 사용하여 구하였다. 자세한 수치해석 설명은 김우전 등(2000)의 문헌에서 찾을 수 있다.

2.3 연성 문제

연성의 자세한 방법은 Fig. 1의 순서도에 나와 있다. 선박의 운동은 내부 유동에, 슬로싱 힘과 모멘트는 외력으로 선박에 작용한다. 이러한 상호작용을 고려하여 반복해석을 통해 연성하였다.

3. ITTC 수치 연구

ITTC는 2003년부터 선박 안정성에 대한 특별 위원회를 조직하여 국제 벤치마크 연구를 수행하고 있다. 벤치마크 연구는 4가지 Test로 구성되어 있으며, 이 중 Test C가 선박의 내부에 물이 포함되어 있어 슬로싱 효과를 확인하는 자유감쇠에 대한 테스트이다(조석규 등 2005). 대상 선박은 200 KDWT 탱커이고 모형 실험은 네덜란드의 MARIN에서 수행되었다. 주요목을 Table 1에, 선도는

Table 1 Main particulars of tanker

Length Lpp (m)	310.20
Beam, B (m)	47.20
Draft, T (m)	16.00
Depth, D (m)	26.07
Displaced weight (m3)	197658.5
KG (m)	10.00
GM (m)	9.50
Natural roll period intact (s)	10
Model scale	1:82.5

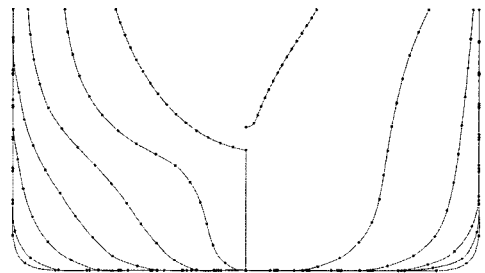


Fig. 2 Lines of tanker

Fig. 2에 나타내었다. 탱커에 물을 담고 있는 구획이 있고, 구획의 길이는 82.5 m, 폭은 31.76 m이다. Test C의 자유감쇠 시험 조건은 다음과 같다.

- ▷ Intact ship(6 deg)
- ▷ Fluid level: h=1 m-sub-resonant(3 deg)
- ▷ Fluid level: h=4 m-resonant(5 deg)
- ▷ Fluid level: h=16 m-no sloshing(6 deg)

4. 수치 해석 결과

4.1 슬로싱 문제 해석 결과

VOF 방법은 6자유도의 슬로싱 문제를 해석할 수 있으며 검증은 하기위해 일본 SRI에서 수행한 실험결과와 비교하였다(Hadzic et al. 2001). Fig. 3은 좌우동요 슬로싱에 대한 결과를, Fig. 4는 횡운동 슬로싱에 대한 결과를 보여주고 있다. 수치 해석 결과는 실험 결과와 일치하였다. 이를 통해 VOF 기법을 연성해석에 적용할 수 있는 가능성과 정확성을 확인하였다.

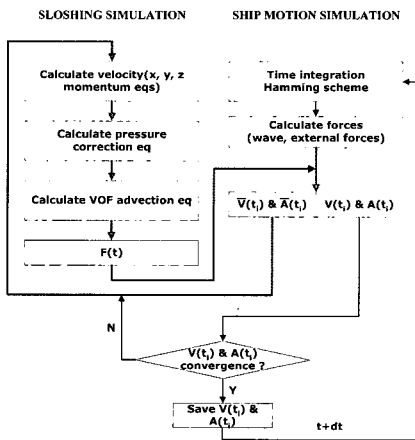


Fig. 1 Flow chart of coupling analysis

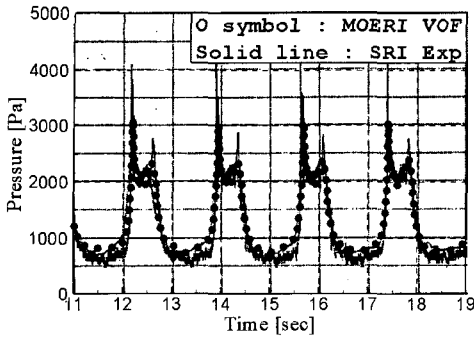


Fig. 3 Pressure comparison of sway sloshing motion

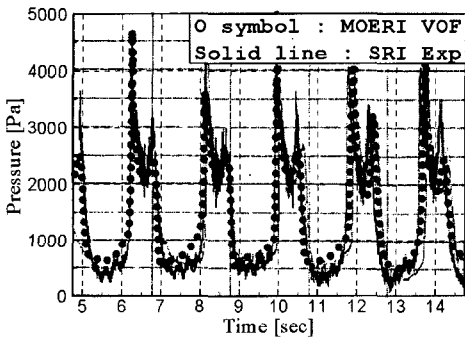


Fig. 4 Pressure comparison of roll sloshing motion

4.2 연성 해석 결과

Test C의 4가지 조건에 대해서 시뮬레이션을 수행하였고 각각의 결과를 Fig. 7 ~ Fig. 10에 나타내었다. 해석 시간을 줄이기 위해 슬로싱 문제 해석 시 2D 격자를 사용하였고, 시간 간격과 격자 크기의 수렴성을 확인하기위해 2개의 격자(폭×높이 격자수: 130×70, 100×50)와 시간 간격(dt=0.005, 0.001 sec)에 대해서 시뮬레이션을 수행하였다. 선박의 운동 해석에 사용된 격자를 Fig. 5에 슬로싱 유동 해석의 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

선박의 6자유도 운동과 슬로싱의 6축 힘이 모두 해석되었다. 물리적으로 6자유도 운동과 6축 힘이 모두 상호 작용한다. 그러나 횡운동이 중요한 자유강쇠에서는 횡운동과 좌우동요, 횡모멘트와 좌우동요 힘이 지배적이다. 본 연구에서는 슬로싱의 횡동요 모멘트와 좌우동요 힘이 선박의 운동과 연성되었다.

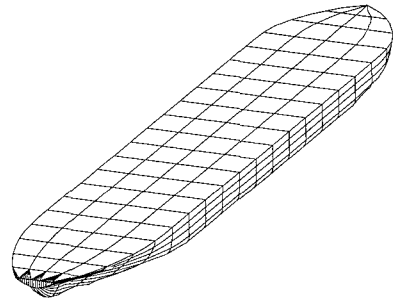


Fig. 5 Panel for ship motion analysis

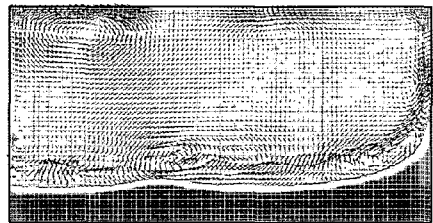


Fig. 6 Instantaneous flow for h= 4m condition(t=22.5 sec)

▷ 비손상 조건(Fig. 7)

시뮬레이션 결과는 실험과 정확하게 일치한다.

▷ 2차 공진 조건(Fig. 8)

시뮬레이션 결과는 공진 특성을 보여주고 있다. 그러나 연성 해석 결과는 횡동요 진폭을 실험보다 크게 추정하고 있다. 비손상 상태의 실험 조건만 주어졌으며 내부에 물이 포함되었을 때 변화된 실험 조건(배수량, 흘수, 부상, 무게중심, 메타센터 등)은 주어지지 않았다. 실험에서의 변화된 조건이 주어지지 않아 내부에 포함된 물의 양으로 변화된 실험 조건을 추정하여 해석하였다. 오차의 원인은 실험 조건과 추정된 해석 조건의 차이와 내부 유동 하중 계산의 부정확으로 추측된다.

▷ 공진 조건(Fig. 9)

시뮬레이션 결과는 실험 결과와 비교하여 주기는 비슷하게 추정하고 있으며 진폭은 작게 평가하고 있다. 연성 해석 결과는 ITTC 벤치마크 결과의 준정적 모델링보다 정확한 결과를 보여주고 있다.

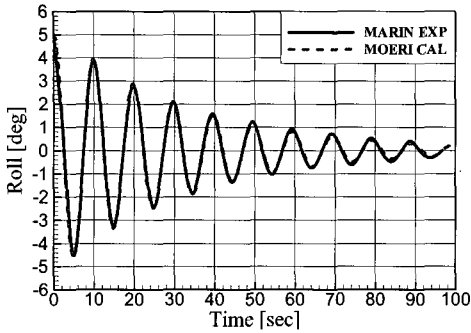


Fig. 7 Free decay of intact case

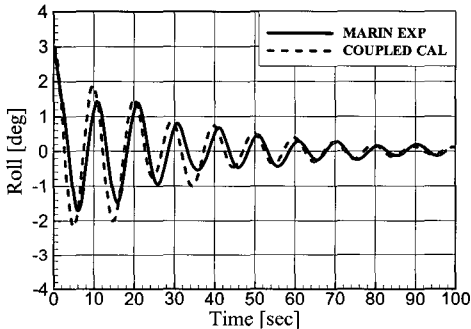


Fig. 8 Free decay of sub-resonant sloshing

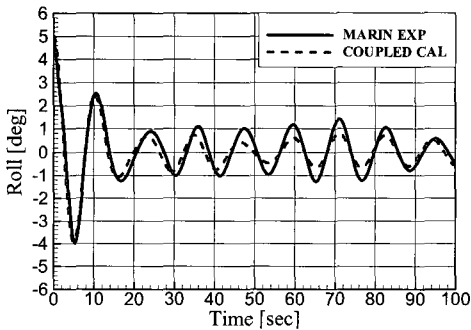


Fig. 9 Free decay of resonant sloshing

Table 2 Computing times

Code	CPU Time/Simulation Time
CAPSIM	0.33
NTUA-CFD	3440
MOERI-CFD	71

Table 3 CPU type

Code	CPU
NTUA-CFD	Alpha 64 bits 500 Mhz
MOERI-CFD	Intel Pentium 4 4.09 Ghz

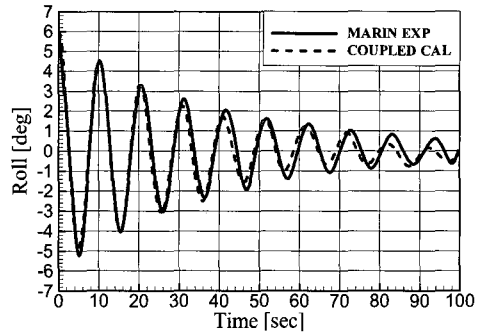


Fig. 10 Free decay of non-resonant sloshing

공진 조건에서는 슬로싱의 영향이 선박의 운동에 크게 작용하여 슬로싱의 정확한 예측이 필요하며 본 연구에서 개발된 수치 기법은 연성 효과를 비교적 정확하게 해석하였다.

▷ 비-공진 조건(Fig. 10)

공진이 일어나지 않는 경우는 선박과 내부 유동의 연성 특성이 없으며 이러한 경우 운동은 비선형 조건과 비슷하다. 수치해석 결과는 비-공진 조건의 실험 결과를 잘 예측하고 있다.

▷ 계산 시간(Table 2와 3)

CFD 방법을 사용한 계산 시간은 준정적 모델링보다 길다. Papanikolaou and Spanos(2002)는 준정적 모델링(CAPSIM)과 CFD의 해석 시간에 대한 비교를 하여 준정적 모델링이 상대적으로 효율적이라고 보고하였다. 최근의 컴퓨터 하드웨어 발전으로 CFD 해석 시간이 많이 단축되었으며 Table 2와 3에는 이러한 해석 시간의 변화와 사용된 CPU 기종을 각각 표시하였다. Papanikolaou의 결과보다 48배 정도 해석 시간이 단축되었다.

5. 결론

선박 운동과 내부 유동을 연성하여 24차 ITTC 벤치마크 연구의 연성 효과를 분석하였다. 본 연구에서 개발된 연성 해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

● 선박의 운동을 해석하는 시간영역 기법과 내부 유동을 해석하는 CFD 기법을 운동과 하중을 매개변수로 하여 연성하였다. ITTC 벤치마크 연구의 Test C의 각 조건을 개발된 연성 기법을 사용하여 해석하였다.

● 2차공진과($h=1$ m) 공진의 경우($h=4$ m), 슬로싱으로 인한 운동의 변조가 일어나고 연성 기법은 횡운동의 진폭을 정확하게 계산하지 못했지만 주기에 대해서는 만족스러운 결과를 보여주고 있다.

● 비손상 상태와($h=0$ m) 공진이 일어나지 않는 경우($h=16$ m), 연성 기법의 결과는 실험과 일치된 결과를 보여주고 있다.

● 컴퓨터 하드웨어의 발전으로 CFD 해석 시간이 단축되어 정확성과 효율성을 고려한 연성 해석의 가능성을 확인하였다.

후 기

본 논문은 산업자원부가 지원하는 국가연구개발 과제인 '선박의 동적 안정성 시뮬레이션 기술 개발'의 일부로 수행되었음을 밝혀 둔다.

참 고 문 헌

- 김우전, 김도현, 반석호, 2000, "유한체적법을 이용한 상선주위의 난류유동 계산에 관한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 37권, 제 4호, pp. 19-31.
- 박일룡, 김우전, 김진, 반석호, 2005, "VOF법의 자유수면 포착정도 향상을 위한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 42권, 제 2호, pp. 88-97.
- 조석규, 홍사영, 이경중, 경조현, 김영식, 2005, "24th ITTC 손상선박 안정성 수치해석 연구," 대한조선학회 논문집, 제 42권, 제 5호, pp. 435-447.
- Choi, Y.R., Hong, S.Y. and Choi, H.S., 2000, "A Analysis of Second-order Wave Forces on Floating Bodies by using a Higher-order Boundary Element Method," Ocean Engineering, Vol. 28, pp. 117-138.
- Cummins, W.E., 1962, "The Impulse Response Function and Ship Motions," Schiffstechnik, Vol. 47, No. 9, pp. 101-109.
- Hadzic, I, Mallon, F. and Peric, M., 2001, "Numerical Simulation of Sloshing," Proc. of SRI-TUHH mini-Workshop on Numerical Simulation of Two-Phase Flows, SRI.
- Kim, J.W., Kim, K., Kim, P.S. and Shin, Y.S., 2005, "Sloshing-Ship Motion Coupling Effect for the Sloshing Impact Load on the LNG Containment System," Proc. of 15th ISOPE, Seoul, pp. 282-291.
- Kim, Y., 2002, "A Numerical Study on Sloshing Flows Coupled with Ship Motion-The Anti-Rolling Tank Problem," Journal of Ship Research, Vol. 46, No. 1, pp. 52-62.
- Letizia, L., Vassalos, D. and Jasionowski, A., 2004, "New Insights into Ship-Floodwater-Sea Dynamics," International Shipbuilding Progress, Vol. 51, No. 2/3, pp. 273-291.
- Palazzi L. and De Kat J., 2004, "Model Experiments and Simulations of a Damaged Ship with Air Flow Taken into Account," Marine Technology, Vol. 41, No. 1, pp. 38-44.
- Papanikolaou, A. and Spanos, D., 2002, "On the Modelling of Floodwater Dynamics and its Effects on Ship Motions," Proc. 6th International Ship Stability Workshop, Webb Institute, New York.
- Papanikolaou, A. and Spanos, D., 2005, "24th ITTC Benchmark Study on Numerical Prediction of Damage Ship Stability in

Waves Analysis of Final Results,” Proc. 8th International Ship Stability Workshop, Turkey.

- Rognebakke, O.F. and Faltinsen, O.M., 2003, “Coupling of Sloshing and Ship Motions,” Journal of Ship Research, Vol. 47, No. 3, pp. 208-221.



< 조 석 규 >



< 홍 사 영 >



< 김 진 >



< 박 일 룡 >