

## ITTC RoRo-Passenger 손상부위 침수유동 특성에 관한 연구

조석규<sup>†\*</sup>, 홍사영<sup>\*</sup>, 김윤호<sup>\*\*</sup>

한국해양연구원 해양시스템안전연구소<sup>\*</sup>  
고려대학교 기계공학과<sup>\*\*</sup>

### Investigation of Dynamic Characteristics of the Flooding Water of the Damaged Compartment of an ITTC RoRo-Passenger

Seokkyu Cho<sup>†\*</sup>, Sayoung Hong<sup>\*</sup> and Yoonho Kim<sup>\*\*</sup>

Research Institute of Ships & Ocean Engineering, KORDI<sup>\*</sup>  
Department of Mechanical Engineering, Korea University<sup>\*\*</sup>

#### Abstract

When a ship is damaged and flooded, the motion of the damaged ship is significantly influenced by the flooding water dynamics. The flooding water in the damaged ship has been treated as a lumped mass under the quasi-static assumption in most of previous researches. To calculate the motion of damaged ship rigorously, it is necessary to analyze the coupled dynamics of flooding water. In this study, a series of numerical and experimental studies is conducted for the damaged part of ITTC RORO passenger. FLOW3D is used for investigating the feasibility of the state of the art CFD technique. An applicability of the coupled motion analysis of damaged ships can be confirmed by agreement between the numerical results and the model experiments. A CFD technique is considered for the numerical modeling of the dynamics of flooding water.

※Keywords: Stability(안정성), Damaged ship(손상 선박), Flooding water(침수), RoRo-Passenger, CFD

#### 1. 서언

손상 선박의 안정성은 Ro/Ro Passenger, 초대형 컨테이너선, 함정 등 고부가 선박의 설계에

필수적인 설계요소이다. 손상 선박의 운동을 결정하는 인자는 관성질량, 부가질량, 복원력, 포텐셜 및 점성감쇠력, 파랑기진력, 유입 과정, 유입류와 선박의 연성 운동 등이다. 이 중 가장 지배적인 자인 유입류에 대해서는 자유표면과 선박 운동과의 연성으로 인해 수치적으로 해석하기가 어렵다. 현재까지의 연구에서는 유입류를 집중질량으로 가

접수일: 2006년 2월 14일, 승인일: 2006년 6월 24일

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

정하여 준정적 상태에서 수치해석 하고 있다 (Palazzi and De kat 2004, Letizia et al. 2004, MA et al. 2000). 준정적 방법을 사용하면 다양한 조건에 대하여 모델링의 유연성과 해석의 용이함을 얻을 수 있으나(Papanikolaou and Spanos 2002) 손상부의 내부 구조가 복잡하고 유입류가 선박의 운동과 연성이 되면 해석의 정확성이 떨어진다. 유입류의 과도과정, 손상 유입구의 형상과 내부 구조에 따른 유입류의 특성을 해석하기 위해서는 CFD 기법이 권장된다(Woodburn et al. 2002, Papanikolaou and Spanos 2002). 그러나 CFD 기법은 강력한 컴퓨터가 필요하고 해석시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 최근에 컴퓨터 성능의 비약적 향상과 자유표면 해석의 정확성이 높아져 손상 시 유입류의 해석에 CFD 기법을 적용할 수 있는 가능성이 커졌다.

본 연구에서는 선박의 손상 시 유입류의 특성을 이해하기 위하여 로로 승객선의 손상부에 대한 모형 실험을 수행하였다. 다양한 조건에서의 유입류 특성을 확인하기 위해 내부구획과 구조물, 유입구의 형상, 위치, 면적을 실험 변수로 하여 손상부에 작용하는 힘과 모멘트를 측정하였다. CFD 기법의 성능과 적용 가능성을 확인하기 위해 사용프로그램인 FLOW3D를 사용하여 손상부로의 유입 과정을 해석하였다. 실험과 FLOW3D 해석 결과는 경향이 일치하였고 준정적 수리모형에서 예측하지 못하는 유동 특성이 힘과 모멘트에 주는 영향을 확인하였다.

2. 모형실험

24차 ITTC Benchmark Study(조석규 등 2005)에서 사용된 PRR02(RORO passenger)의 손상부를 실험 모형으로 선정하였다. 손상부로 침입하는 유입류를 관찰하기 위해 모형을 투명한 아크릴로 제작하였고 손상부의 형상과 제원은 Fig. 1 및 Table 1과 같다. 손상 시 유입과정, 손상 유입구의 형상과 내부 구조에 따른 유입류의 특성을 알아보기 위해 Fig. 2와 같이 내부에 구조물이 없는 단순모형과 내부구획과 엔진블록이 있는 상세모형을 선정하였다. 또한 손상 유입구의 형상과 위치

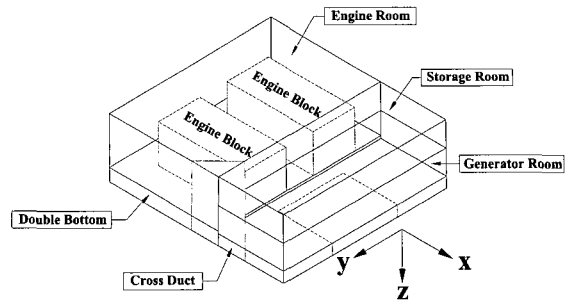


Fig. 1 Damaged compartment

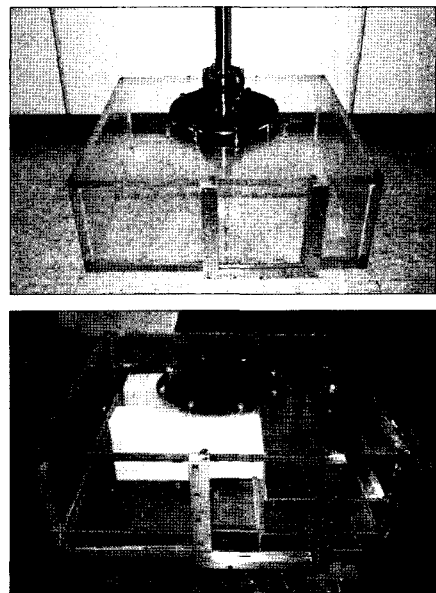


Fig. 2 Model(Upper: Simple model, Lower: Real model)

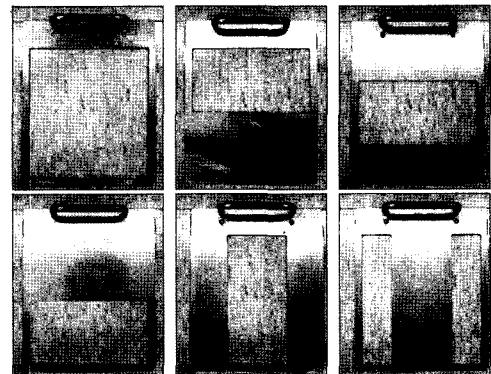


Fig. 3 Inlet geometry(Inlet1, Inlet2, Inlet3, Inlet4, Inlet5, Inlet6)

Table 1 Particulars of damaged part

Model scale	48.57
Damage side	Starboard
Damaged length (SOLAS guide)	8.244 m (0.03×L+3.0)
Length	26.714 m
Breadth	25.000 m
Height	9.025 m
Draft	6.400 m
Engine Blocks	13.18×6.4×5.73

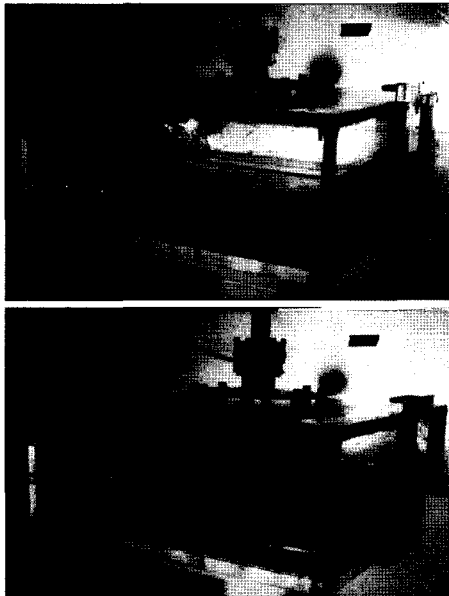


Fig. 4 Photos of model test(Upper: Simple model - Inlet 1, Lower: Real model- Inlet 1)

에 의한 특성을 알아보기 위해 Fig. 3과 같이 형상, 면적, 위치가 다른 손상 유입구 형상에 대한 실험을 수행하였다. 유입류에 의한 힘과 모멘트, 유동 현상의 영상을 계측하였다. 힘과 모멘트의 측정 위치는 x, y 방향으로 모형 중앙, z에서는 로 선박의 KG다. 모형 실험의 조건과 계측항목을 정리하면 다음과 같다.

- ▷ 손상부 내의 내부구획 및 구조물의 유무
- ▷ 손상 유입구의 형상, 면적, 위치 변화(Inlet1, Inlet2, Inlet3, Inlet4, Inlet5, Inlet6)
- ▷ Load measurement: Force and moment
- ▷ (ATI 6 Axis Loadcell), 50 Hz

- ▷ Flow measurement: High speed
- ▷ camera(Relake), 250 frame/sec

고속카메라로 촬영한 장면을 Fig. 4에, Simple model - Inlet 1에 대한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 손상부 입구는 슬라이드로 만들어 위쪽으로 개방하도록 하였으며 이 때 개방되는 시간은 약 0.12 sec이다. 입구를 위로 열면 모형에 힘이 가해져 초기에 영향을 주게 되며 이로 인해 Fig. 5의 실선과 같이 힘과 모멘트가 진동하게 된다. 이러한 진동으로 인한 영향을 제거하기 위해 이동평균을 취하였다(점선). 모형실험의 결과는 본 논문의 해석 결과부에서 CFD 결과와 함께 기술하였다.

### 3. 수치해석

수치해석에 사용된 FLOW3D는 유한차분법, 유한체적법 그리고 VOF 방법을 기반으로 개발된 범용 CFD 코드이다. FLOW3D에서 사용하고 있는 지배방정식은 다음과 같다.

- ▷ 연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0$$

- ▷ 운동량 방정식

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla \vec{U} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \vec{G} + \nu \nabla^2 \vec{U} + \vec{F}$$

여기서  $\rho$ 는 밀도,  $\nu$ 는 동점성계수,  $\vec{G}$ 는 중력 가속도  $\vec{F}$ 는 중력을 제외한 체적력이다.

자유표면 유동을 해석하는 VOF 방정식(VOF advection equation)은 다음과 같다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \left\{ \frac{\partial}{\partial x}(Fu) + \frac{\partial}{\partial y}(Fv) + \frac{\partial}{\partial z}(Fw) \right\} = \text{FDIF} + \text{FSOR}$$

여기서  $F$ 는 VOF 함수, FDIF는 확산항, FSOR은 유체 싱크/소스를 나타낸다.  $F$ 는 Fig. 6과 같이 정의된다.

모형시험에서 정한 조건에 대하여 FLOW3D 해석을 위한 격자 및 경계조건을 Fig. 7, Fig. 8, Table 2 그리고 Table 3과 같이 구성하였다.

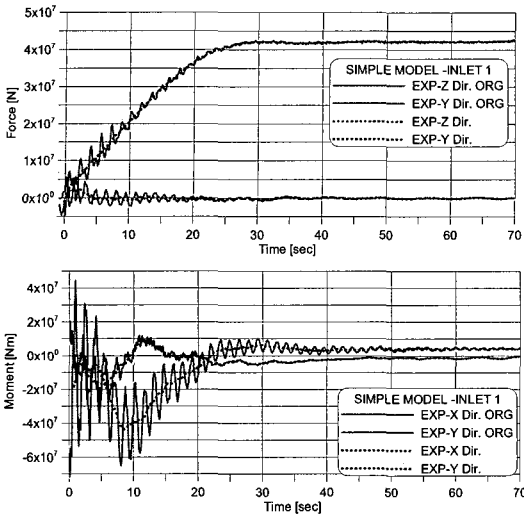


Fig. 5 Force and moment of Simple model-Inlet 1

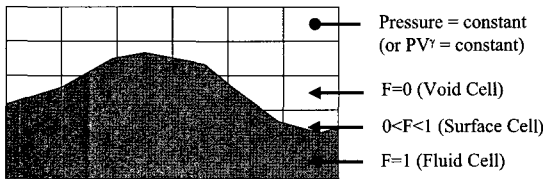


Fig. 6 Definition of VOF function(F)

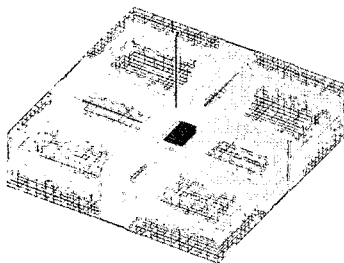


Fig. 7 Grid system

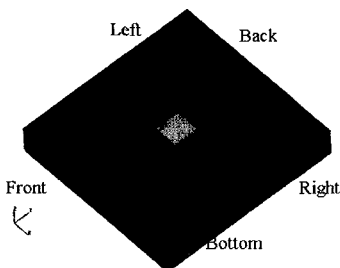


Fig. 8 Boundary set-up

Table 2 Grid generation

Grid	3D/Structured grid		
Mesh	X	120~130	Total : 900,000 ~1,300,000
	Y	120~130	
	Z	60~90	
Computation time : 144~220 hour / P4 2.8 GHz			

Table 3 Boundary conditions

Top	Pressure	1 atm
Bottom	Wall	
Left/Right	Outflow	Water level : 6.4 m
Front/Back	Outflow	Water level : 6.4 m

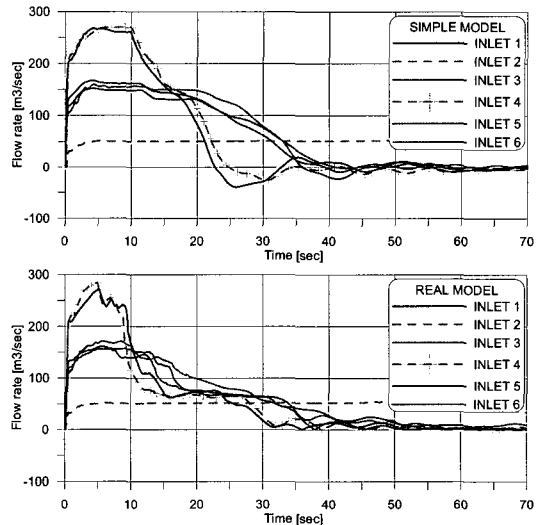


Fig. 9 Results of flow rates

손상 유입구에서 유량에 대한 해석결과를 Fig. 9에 나타내었다. Inlet2를 제외하고 모든 경우에 대해서 40초 부근에서 유입이 종료되며 단순모형의 경우 역류현상이 발생하기도 한다. Inlet1, Inlet4의 결과와 Inlet3, Inlet5, Inlet6의 결과를 비교하면 자유수면 아래쪽의 면적에 의해 유입량의 특성이 결정되는 것을 알 수 있으며 유입구 형상과 내부구획 및 구조물의 영향은 미미하다. Fig.

10에 단순모형 - Inlet 1과 상세모형 - Inlet 1의 시간별 시뮬레이션 결과를 도시하였다. 단순모형의 경우 3초에 유입구 반대편에 유동이 도달하여 유동이 축적되어 되고 10초에 다시 유입구 쪽으로 회전류가 도달한다. 상세모형의 경우 Generator room과 Storage room에서는 단순모형과 양상이 비슷하나 Engine room에서는 Engine block으로 인해 유입구부터 유동이 축적되어 흘러들어간다.

#### 4. 해석결과

Fig. 11~Fig. 14에 모형 실험 결과와 FLOW3D 해석 결과를 각 경우에 대해 비교하여 나타내었다.

##### ▷ 단순모형에 관한 결과(Fig. 11, Fig. 13)

###### - 힘

Z 방향의 힘은 유량을 간접적으로 나타내며 실험보다 FLOW3D에서 유량이 더 빨리 유입되는 것을 확인할 수 있다. 이는 수치 해석에서 고려하지 못한 공기 저항에 의한 효과로 추정된다. Inlet4의 경우 손상 유입구가 자유수면 아래에 있으며 실험에서 손상 내부의 공기 압축으로 유입 유량이 다른 경우보다 작는데 비해, 수치 해석에서는 공기 저항이 없는 조건에서 해석되어 유입 유량의 차이가 나타났다. 손상 유입구가 공기와 접해있는 경우 이러한 공기 압축 효과는 무시할 수 있지만, 손상 유입구가 자유수면 아래에 있는 경우는 내부의 공기 압축 효과를 고려해야한다.

###### - 모멘트

모멘트의 경우 경향이 일치하고 있으나 정량적으로 정확하지는 않다. X 방향의 횡동요 모멘트 (Red line)는 유입과정의 특성에 따라 초기에 양의 값을 나타내다 손상부 반대편에 유동이 축적되면서 음의 값을 가지고 정상상태에 도달하였다. Y 방향의 종동요 모멘트(Blue line)는 손상부 내에서 발생하는 회전류에 의해서 나타나고 있다. Fig. 13에서 Inlet1, Inlet4, Inlet5, Inlet6의 횡동요 모멘트는 비슷하고 Inlet3의 모멘트가 중간, Inlet2의 모멘트가 최소이다. 이로부터 횡동요 모멘트는 자유수면 아래쪽의 면적과 공기의 압축 효과에 영향

을 받는 것을 알 수 있다.

##### ▷ 상세모형에 관한 결과(Fig. 12, Fig. 14)

###### - 힘

Inlet4의 경우 내부 공기의 압축 효과를 고려하여 해석한 결과는 실험과 정확하게 일치하고 있다. 이 때 내부 공기는  $PV^\gamma = C$ 의 Gas law를 사용했으며  $\gamma$ 는 1.4로 하였다. Z 방향의 힘의 결과는 단순모형의 경향과 같다.

###### - 모멘트

X 방향의 횡동요 모멘트는 양의 값을 나타내다 정상상태에 도달하였다. 이는 단순모형은 초기에 손상 유입구 반대편에 유동이 축적되었지만, 상세모형의 경우 내부구획과 Engine block으로 인해 손상 유입구부터 유동이 축적되어 유입되기 때문이다. Y 방향의 종동요 모멘트는 음의 값을 나타내고 있다. 이는 Engine room에서 Engine block으로 인해 유입이 작고 Storage room과 Generator room으로 더 많은 유량이 유입되고 있기 때문이다. Inlet3에서 Y 방향 모멘트 실험 값이 작게 나오는 이유는 손상 유입구와 내부구획 사이의 간격으로 인해 수치 해석과는 다르게 나타나고 있다. Fig. 14를 보면 모멘트는 단순모형과는 달리 자유수면 아래쪽의 면적만이 아니라 손상 유입구 형상에 따라 특성이 다르다. 이로부터 내부구획과 구조물이 있는 경우 손상 유입구의 형상과의 관계에 의해 횡동요 모멘트가 결정됨을 알 수 있다.

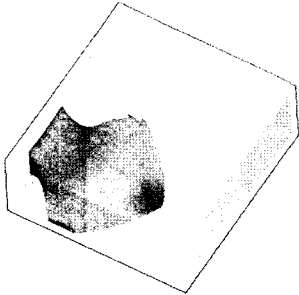
#### 5. 결론

RORO passenger ship의 손상부 침수유동에 대한 모형실험과 FLOW3D 해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

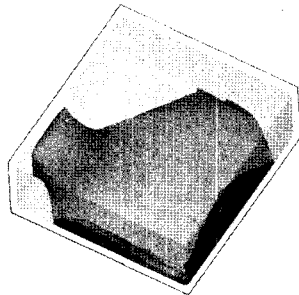
- FLOW3D 해석 결과와 모형 실험 결과의 비교를 통하여 손상 선박의 유입류를 해석하기 위한 CFD 기법의 가능성과 정도를 확인하였다.

- 손상부의 내부 구조와 유입구의 형상에 따라 유입 과정이 달라지며 유입 유량, 힘, 모멘트의 특성 변화를 확인하였다.

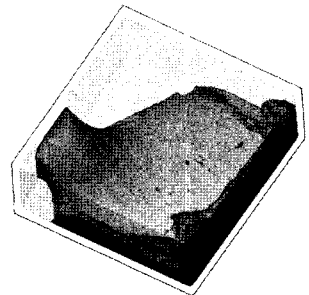
□ Simple model - Inlet 1



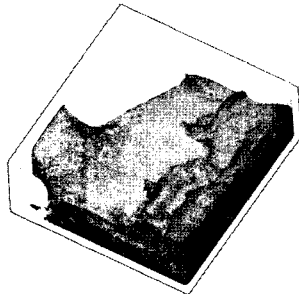
t=1.5 sec



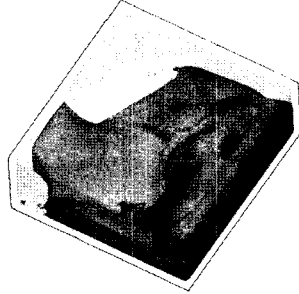
t=3.0 sec



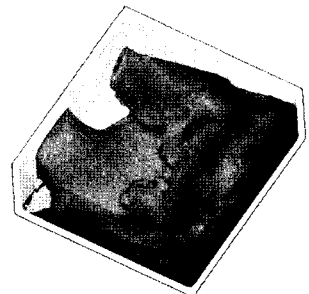
t=4.5 sec



t=6.0 sec

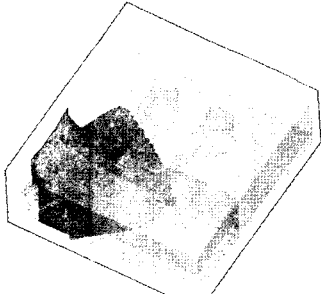


t=7.5 sec

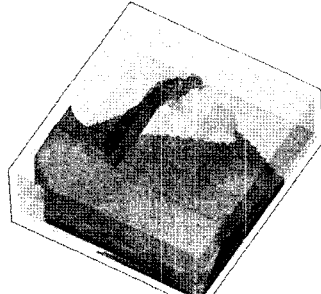


t=9.0 sec

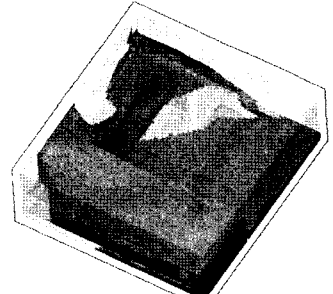
□ Real model - Inlet 1



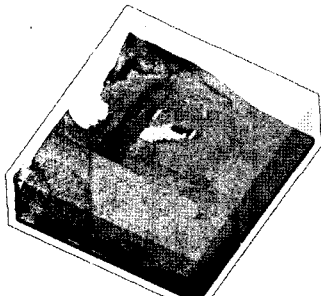
t=1.5 sec



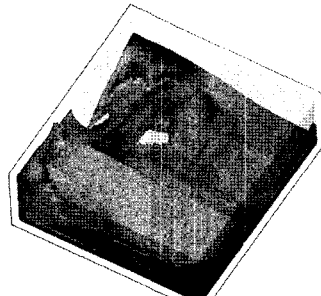
t=3.0 sec



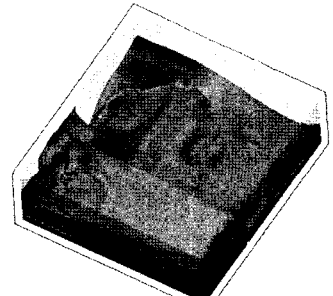
t=4.5 sec



t=6.0 sec



t=7.5 sec



t=9.0 sec

Fig. 10 Snapshot of flow3D analysis model

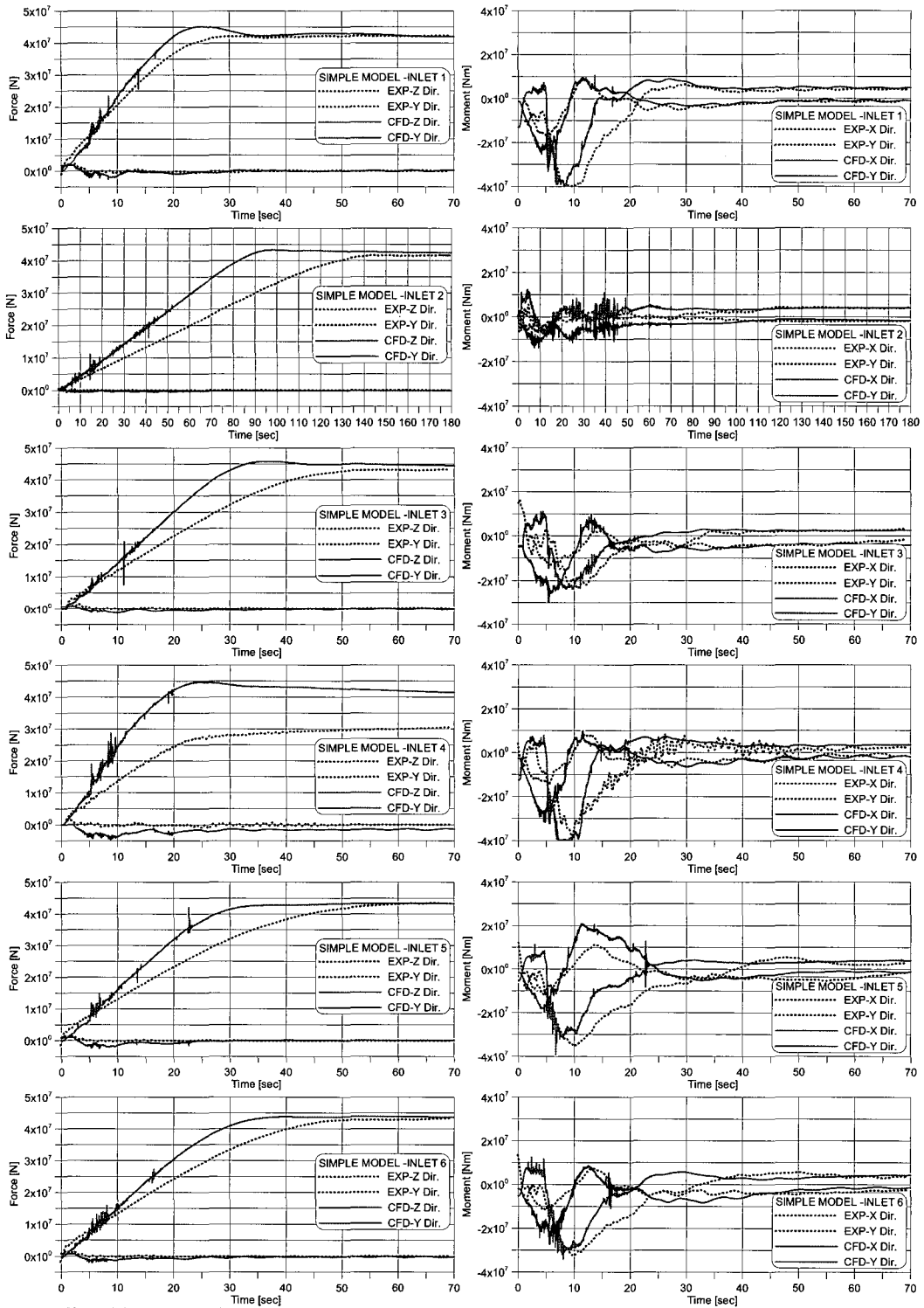


Fig. 11 Comparisons of experiment and numerical simulation for Simple model

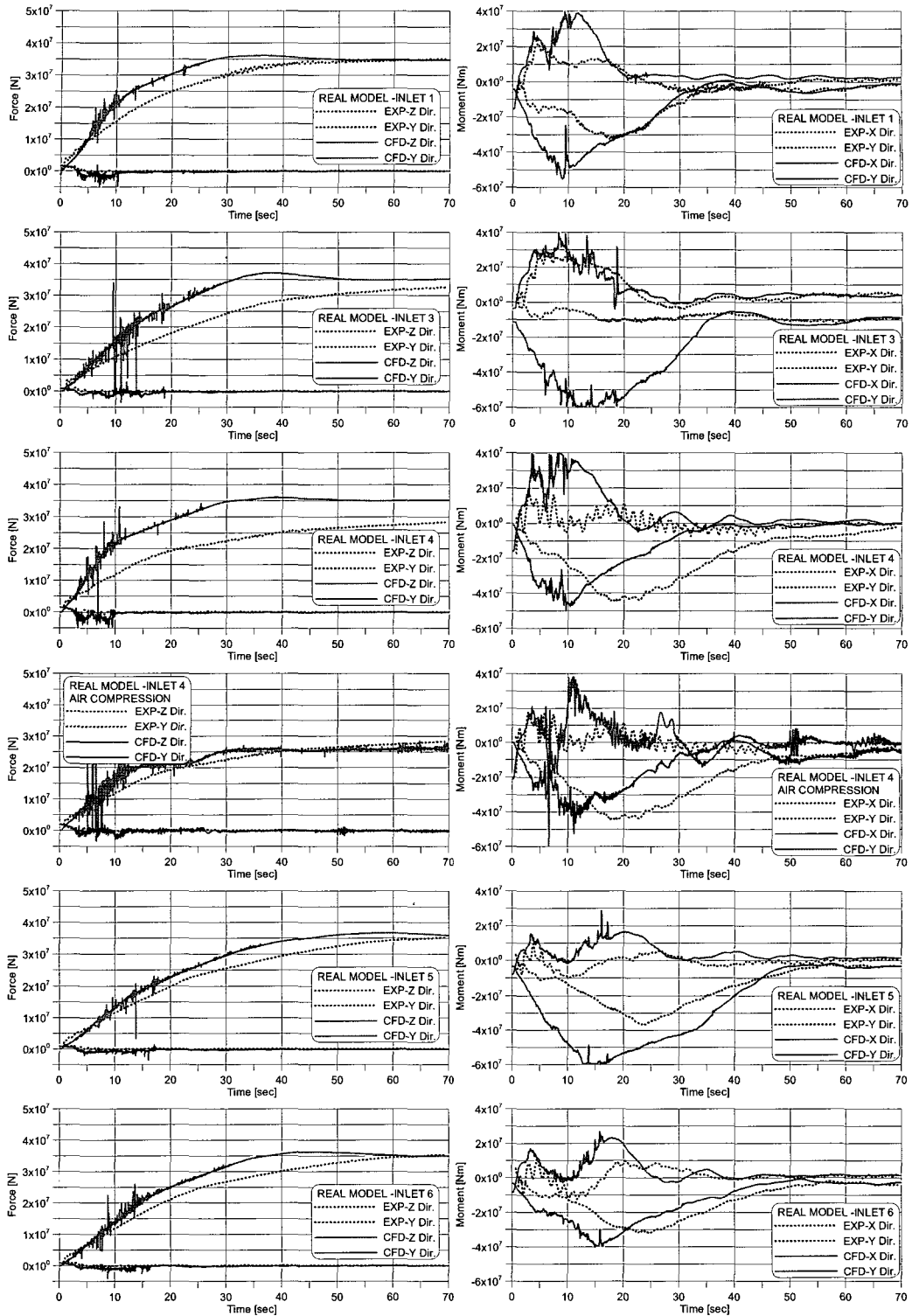


Fig. 12 Comparisons of experiment and numerical simulation for Real model



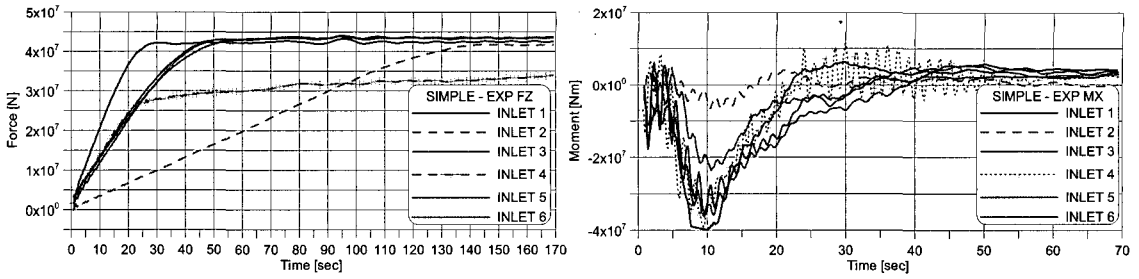


Fig. 13 Experimental results of simple model

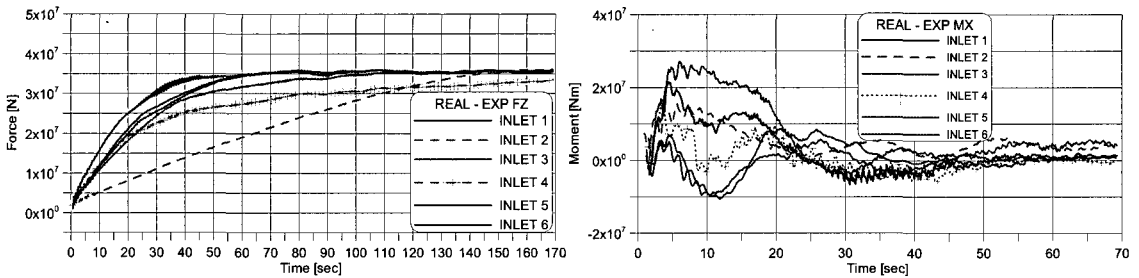


Fig. 14 Experimental results of real model

- 유입량: FLOW3D의 결과로부터 유입량은 자유수면 아래쪽의 면적에 의해 결정됨을 확인하였다.
- 힘: FLOW3D는 실험 결과를 예측하고 있으며, 해석을 정확하게 하기 위해서는 점성과 공기 압축의 영향을 고려해야한다.
- 모멘트: FLOW3D는 실험 결과와 유사한 경향의 계산값을 주고 있으며, 단순모형의 경우 정량적으로 근사하나 상세모형의 경우 부정확하다. 이는 FLOW3D에서 내부구조가 복잡한 경우 모멘트를 계산하는 적분에 문제가 있는 것으로 판단된다. 모멘트는 유입 과정에서 유동의 분포에 의해 결정되며, 유동의 특성은 손상부의 내부구조와 유입구의 형상과 위치, 면적에 의해 결정됨을 확인하였다.

후 기

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

참 고 문 헌

- 조석규, 홍사영, 이경중, 경조현, 김영식, 2005,

- “24th ITTC 손상선박 안정성 수치해석 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 42권, 제 5호, pp. 435-447
- Letizia, L., Vassalos, D. and Jasionowski, A., 2004, "New Insights into Ship-Floodwater-Sea Dynamics," International Shipbuilding Progrss, Vol. 51, No. 2/3, pp. 273-291.
- Ma Y., Katayama T. and Ikeda Y., 2000, "A Study on Stability of Damaged in Intermediate Stage of Flooding," J. Kansai Soc. N.A., No. 234, pp. 179-186.
- 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 Motion," Proc. 6th International Ship Stability Workshop, Glen Cove
- Woodburn, P., Gallagher, P. and Letizia, L., 2002, "Fundamentals of Damaged Ship Survivability," RINA Transactions, pp. 143-163.