



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

FSI기법을 이용한 수중 낙하 구조물의
충격력 추정에 관한 연구



부경대학교 대학원

조선해양시스템공학과

김지우

공 학 석 사 학 위 논 문

FSI기법을 이용한 수중 낙하 구조물의 충격력
추정에 관한 연구

지도교수 손 정 민

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2022년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

조 선 해 양 시 스템 공 학 과

김 지 우

김지우의 공학석사 학위논문을 인준함

2022년 8월 26일



위 원 장 공학박사 구 자 삼 (인)
위 원 공학박사 박 종 용 (인)
위 원 공학박사 손 정 민 (인)

목 차

그림 목차	iii
표 목 차	v
약어 설명	vi
기호 설명	vii
영문 초록	viii
I. 서 론	1
II. FSI 수치해석 기법 개발	3
1. Equation of State	3
2. Arbitrary Lagrangian Eulerian	5
3. Fluid-Structure Interaction 수치해석 기법 검증	7
가. 구형 구의 실린더형 시험관 수중 자유 낙하	7
1) 수치해석 모델	7
2) 비교 결과	9
나. 구형 구의 자유 표면 낙하	10
1) 수치해석 모델	11
2) 비교 결과	12
III. 구형 구 낙하 실험 및 수치해석	14
1. 공기 중 실험	14
2. 수중 실험	18

목 차

가. 실험 방법	18
나. 수치해석 모델링 및 수렴성 조사	20
1) 유체 요소 크기	23
2) 유체 영역 크기	25
다. 비교 결과	27
IV. 쇄암봉 모형 시험 및 수치해석	29
1. 모형 시험	29
가. 쇄암봉	29
나. 시험 조건	31
다. 시험 결과	33
2. 수치해석 모델링 및 수렴성 조사	35
가. 수치해석 모델	35
나. 유체 요소 크기	36
다. 유체 영역 크기	38
3. 수치해석 결과	41
4. 비교 결과	45
V. 결론 및 고찰	50
참고문헌	52

그림 목차

Fig. 1 Framework of the present study	2
Fig. 2 Characteristics of Lagrangian and Eulerian methods	5
Fig. 3 Finite element model for the water-dropping sphere	8
Fig. 4 Comparison between CFD and FSI models: Displacement, velocity in z direction	10
Fig. 5 Finite element model for the air-water-dropping sphere	11
Fig. 6 Comparison between test and FSI models	13
Fig. 7 Experiment tools : load cell and Indicator	14
Fig. 8 Experiment of a sphere falling in the air	15
Fig. 9 Comparison with experimental results and numerical analysis of the impact force on a sphere falling from the air	16
Fig. 10 Comparison with experimental results and numerical analysis of the displacement, velocity of a sphere falling from the air	17
Fig. 11 Water tank, structure drop device, structure, magnetic holder used in the experiment	19
Fig. 12 The first experiment of α -I and impact force-time history	20
Fig. 13 Finite element model of a sphere's numerical analysis and detailed information on boundary and load conditions	22
Fig. 14 The effect of fluid mesh size in sphere falling	25
Fig. 15 The effect of fluid domain size in sphere falling	27
Fig. 16 The result of numerical analysis and experiment	28
Fig. 17 Description of 15-times scaled-down crusher model	30
Fig. 18 Experimental environment: Water basin, load cell with sensor plate, crusher (RIMS, 2018)	31
Fig. 19 Actual and 1/15 scale-down experimental conditions (RIMS, 2018)	32
Fig. 20 Example of time-load history for B-4 case (RIMS, 2018)	33
Fig. 21 Analysis settings for numerical computation (B-2)	36
Fig. 22 The effect of fluid mesh size in crusher falling	37
Fig. 23 The effect of fluid domain size in crusher falling	40
Fig. 24 Underwater movement of the crusher (B-2)	41

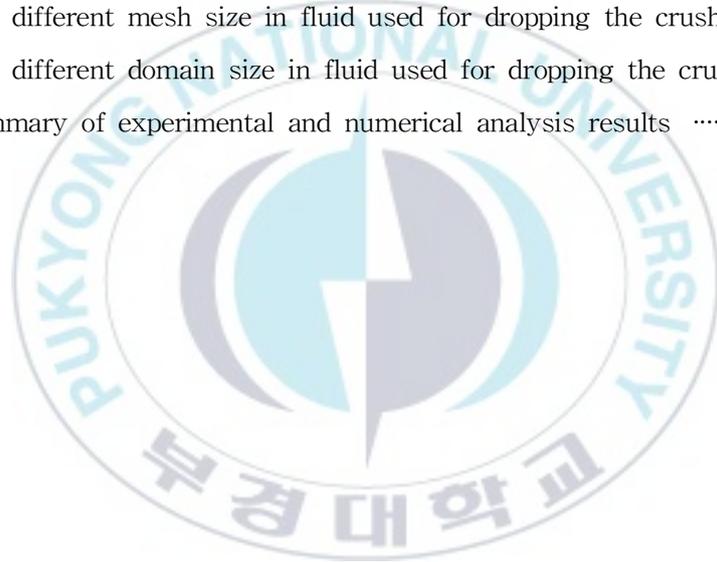
그림 목차

Fig. 25 The results of B-2 scenario: Displacement, velocity, acceleration, impact force	43
Fig. 26 Comparison between experimental and numerical impact force: Model A(water level), model A(air level), model B(water level), model B(air level) ...	48
Fig. 27 Numerical results according to vertical distance	49



표 목 차

Table 1 Coefficients of the Grüneisen EoS for water and air	4
Table 2 Sphere size	19
Table 3 Water depth	19
Table 4 The different mesh size in fluid used for dropping the sphere	24
Table 5 The different domain size in fluid used for dropping the sphere	26
Table 6 Comparison of numerical analysis and experiment	28
Table 7 Crusher model properties	30
Table 8 Dimensions of crusher models	30
Table 9 Experimental scenarios (RIMS, 2018)	32
Table 10 Experimental results (RIMS, 2018)	34
Table 11 The different mesh size in fluid used for dropping the crusher	38
Table 12 The different domain size in fluid used for dropping the crusher	39
Table 13 Summary of experimental and numerical analysis results	45



약어 설명

ALE	=	Arbitrary Lagrangian Eulerian
ALLW	=	Approximate Lowest Low Water
CFD	=	Computational Fluid Dynamics
CoV	=	Coefficient of Variation
DL	=	Datum Level
DoF	=	Degree of Freedom
EoS	=	Equation of State
FE	=	Finite Element
FRP	=	Fiber Reinforced Plastics
FSI	=	Fluid Structure Interaction
MSL	=	Mean Sea Level
RIMS	=	Research Institute of Medium & Small Shipbuilding
SPH	=	Smoothed Particle Hydrodynamics

기 호 설 명

A	=	Cross-sectional area of the crusher
B	=	Breadth
C	=	Crusher mesh size
C_0	=	Bulk sound speed
C_d	=	Drag coefficient
D	=	Depth
E	=	Internal energy
F	=	Fluid mesh size
L	=	Length
$P_c(\mu)$	=	Cold pressure hypothetically evaluated along a zero-Kelvin isotherm
$P_T(\mu, E)$	=	Thermal pressure component, which depends on both volumetric compression and thermal state of the material
S	=	Sphere mesh size
S_1, S_2, S_3	=	Coefficients of the slope of the $v_s - v_p$ curve
a	=	First order volume correction to γ_0
g	=	Gravitational acceleration
\bar{m}	=	Difference between the mass of the crusher and the mass of water
t	=	Time
v	=	Volume/mass
γ_0	=	Grüneisen gamma
ρ_w	=	Density of the water
ρ_0	=	Density at the nominal/reference state (usually a non-stress or non-deformed state)

A Study on Estimation for Impact Forces of Underwater Falling Object
using Fluid-Structure Interaction

Ji Woo Kim

Department of Naval Architecture and Marine System Engineering,
Pukyong National University

Abstract

There are many methods for crushing seabed rock such as using a free-falling crusher, blasting, and chemical liquid expansion. Blasting and chemical liquid expansion can lead to environmental destruction, noise pollution, and civil complaints. Therefore, a free-falling crusher is recommended for use for seabed breaking. Understanding the characteristics of a crusher in water and the impact force on the ground helps design a crusher and dredge work.

In this study, drop tests of 50 and 70-ton crusher models that were scaled down by 15 times were investigated. The tests were conducted in a water basin by the Research Institute of Medium and Small Shipbuilding (RIMS) in Korea. Four water depths were considered with different falling locations: water surface and air. Furthermore, a numerical study on Fluid-Structure Interaction (FSI) analysis for a free-falling crusher was conducted by employing the Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) element and the Grüneisen Equation of State (EoS) to fluid models. The crusher and ground were modeled as Lagrangian elements to estimate the impact force on the ground. For FSI approach, ANSYS/LS-DYNA was used to build the model of fluid and structure.

A sphere shaped object was dropped in numerical and experimental methods to compare impact force for validation.

To enhance numerical efficiency and accuracy, convergence test was carried out to determine appropriate fluid element size and fluid domain dimension.

Observed impact force on the ground is similar behavior between numerical and experimental results. It is shown that the angle between the crusher and the ground is a main factor to reduce the impact force during the crusher experiment.

I. 서론

준설이란 하천, 해안의 수심을 깊게 하기 위해 물 밑의 토사를 제거하는 공사로 주로 교량 기초 설치공사, 해양구조물 구축, 항만 공사 등을 위해 행해진다. 이러한 준설 공사가 진행 중인 현장에는 일반적인 준설로 제거하기 힘든 암반이 흔히 발견되며 이를 위해 파쇄 준설이 수행된다. 암반 파쇄는 대표적으로 쇄암봉을 이용하는 쇄암봉 파쇄, 발파력을 이용하는 수중 발파 파쇄, 자기를 이용하여 암반을 강제 팽창시키는 파쇄 등으로 구분된다. 그중 쇄암봉을 이용하는 파쇄는 쇄암봉을 자유 낙하시켜 발생하는 충격력을 이용하는 방식으로 사용된다. 쇄암봉이 발생시키는 충격력에 대한 연구는 활발히 진행되고 있다. 그중 Nikolov (2002)는 로터 반경, 각속도, 이송 속도 및 이송 크기 분포 함수에 의해 쇄암봉의 충격력 성능을 결정하고자 했으며 Cleary 외 (2017)는 콘(Cone) 형 쇄암봉의 재료 특성과 낙하 조건에 따른 충격력 성능을 조사한 바 있다. 하지만 두 연구를 포함한 대부분은 육지에서 사용되는 쇄암봉에 초점을 두고 있다. 본 연구는 수중에서 자유 낙하하는 쇄암봉의 충격력 성능을 추정하는 목표를 두고 있기에 선행연구와 차이점을 보인다.

쇄암봉의 성능을 확인하는 가장 최선의 방법은 목표한 쇄암봉을 직접 설계하여 실험하는 것이다. 그러나 실험에는 장소, 비용 및 시간과 같은 몇 가지 제약이 뒤따른다. 수치 해석을 통해 쇄암봉의 거동을 확인하는 방법은 실험의 대안이 된다. 그중 FSI(Fluid Structure Interaction) 해석은 유체와 구조 간의 상호 연성 효과를 포함하는 해석이다. 현재 FSI 해석을 이용한 해양 분야 연구는 활발히 진행되고 있다. Kim 외 (2021)는 일반적인 충돌과 관련된 선박의 동적 응답에 대한 FSI 해석의 효과를 연구했다. Lee 외 (2013)는 충돌 및 좌초 시 운송 선박 및 컨테이너의 손상 정도를 결정

하기 위해 FSI 해석을 수행하였다. 또한, Song 외 (2017)는 FSI 해석을 이용하여 충돌한 선박의 전진 속도, 질량 및 충돌 각도가 선박 충돌에 미치는 영향을 조사했다.

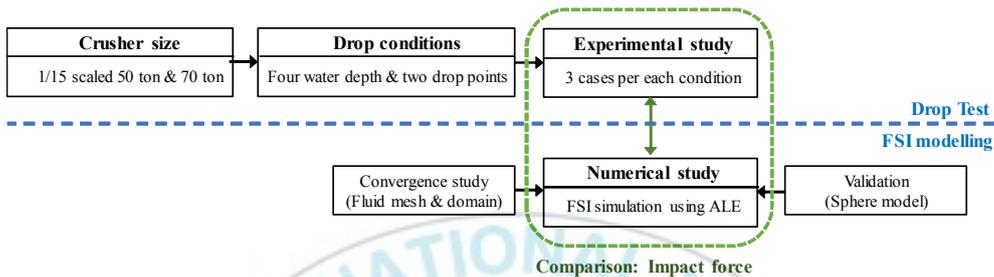


Fig. 1 Framework of the present study

Fig. 1은 본 연구의 두 가지 주요 단계를 보여준다. 우선, 쇄암봉 수중 낙하 충격력 측정 시험은 중소조선연구원(Research Institute of Medium&Small Shipbuilding, RIMS)에서 수행되었다. 시험의 경우 서로 다른 질량을 가지는 두 쇄암봉이 수면, 공기 중에서 총 4개의 수심에 낙하하였다. 이후 수치해석으로 충격력 측정을 수행한 뒤 시험 결과와 비교한다. 수치해석을 수행하기 전 로드셀을 이용한 충격력 측정을 검증하기 위해 구형 구 수중 낙하 충격력 실험 및 수치해석 비교를 먼저 수행하였다. 로드셀을 검증하는 실험이기에 구조물의 충돌 각에 따른 충격력 차이를 배제하고자 구형 구 구조물을 선택하였다. 또한 수치 기법 검증을 위해 공기-물을 통과하는 구형 구, 실린더 관을 통과하여 수중 자유 낙하하는 구형 구와 ANSYS/LS-DYNA (2020)를 사용한 FSI 해석 결과를 비교하여 두 가지 유형의 검증을 수행하였다. 또한 분석의 정확도를 높이기 위해 유체 영역 및 요소 크기의 수렴성 조사가 포함되어 있다.

II. FSI 수치해석 기법 개발

본 연구는 FSI 수치해석을 위해 ANSYS/LS-DYNA를 사용하였다. ANSYS/LS-DYNA의 FSI 해석은 유체의 거동을 상태 방정식(EoS, Equation of State)과 ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian) 기법으로 계산한다. 본 장에서는 수치해석 기법 개발을 위해 사용한 EoS와 함께 ALE 기법을 소개하고 실험, CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석 결과와 FSI 해석 결과를 비교하는 것으로 FSI 수치해석을 검증하였다.

1. Equation of State

유체의 정역학적인 거동은 밀도와 에너지의 함수로 압력을 계산하는 상태 방정식을 사용하였다. Olovsson & Souli (2021)는 기체가 아닌 물질에서의 상태 방정식은 일반적으로 식(1)의 기본형을 따름을 보여준다.

$$P = P_c(\mu) + P_T(\mu, E) \quad (1)$$

여기서, $P_c(\mu)$ 는 OK 등온선을 따라 가상으로 평가된 냉압이고 $P_T(\mu, E)$ 는 재료의 체적 압축 및 열 상태에 따라 달라지는 열압의 성분이다. 본 해석은 위의 일반형을 따르는 다양한 상태 방정식 타입 중 Grüneisen 타입을 사용하였다. Grüneisen 타입의 EoS는 식(2)와 같다.

$$P = \frac{\rho_0 C_0^2 \mu [1 + (1 - \frac{\gamma_0}{2})\mu - (\gamma_0 - a)\frac{\mu^2}{2}]}{[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2}]^2} + (\gamma_0 + a\mu)E \quad (2, a)$$

$$v_s = C_0 + S_1 v_p + S_2 \left(\frac{v_p}{v_s}\right) v_p + S_3 \left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2 v_p \quad (2, b)$$

$$\mu = \frac{v_0 - v}{v} = \frac{dv}{v} \quad (2, c)$$

E 는 내부 에너지, ρ_0 는 기준 상태(일반적으로 비 응력 또는 변형되지 않는 상태)에서의 밀도, S_{1-3} 은 $v_s - v_p$ 곡선의 기울기 계수들, γ_0 는 Grüneisen 감마, a 는 γ_0 에 대한 1차 부피 보정, C_0 는 벌크 음속, v 는 특정 부피로 $\frac{volume}{mass}$ 를 나타낸다. 이에 따른 상태 방정식의 계수는 Khazraiyani 외 (2015)와 Olovsson 외 (2021)에 따라 Table 1을 사용하였다.

Table 1 Coefficients of the Grüneisen EoS for water and air

Material	C_0 (m/s)	S_1	S_2	S_3	γ_0	a	E
Air	343.7	0	0	0	1.4	0	0
Water	1647	1.921	-0.096	0	0.35	0	0

2. Arbitrary Lagrangian Eulerian

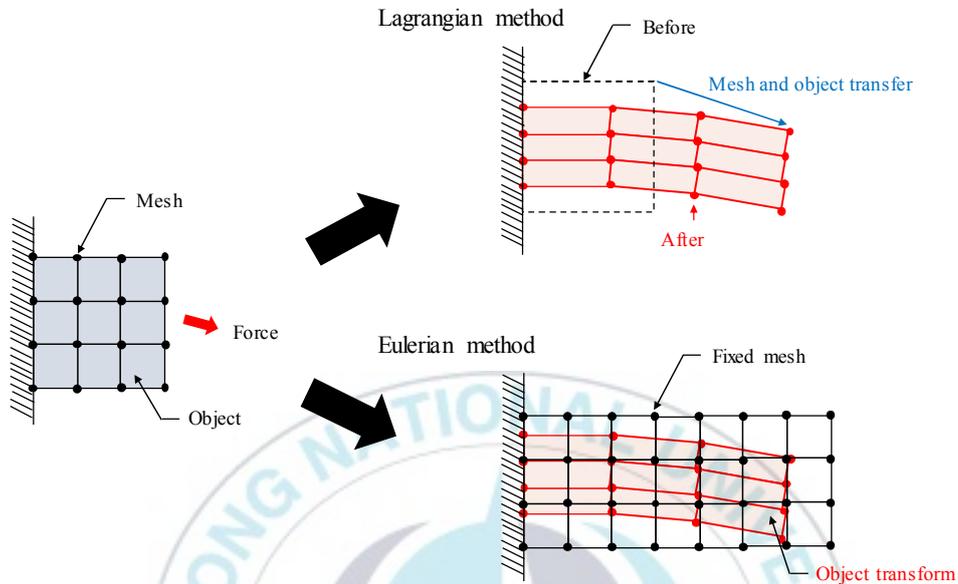
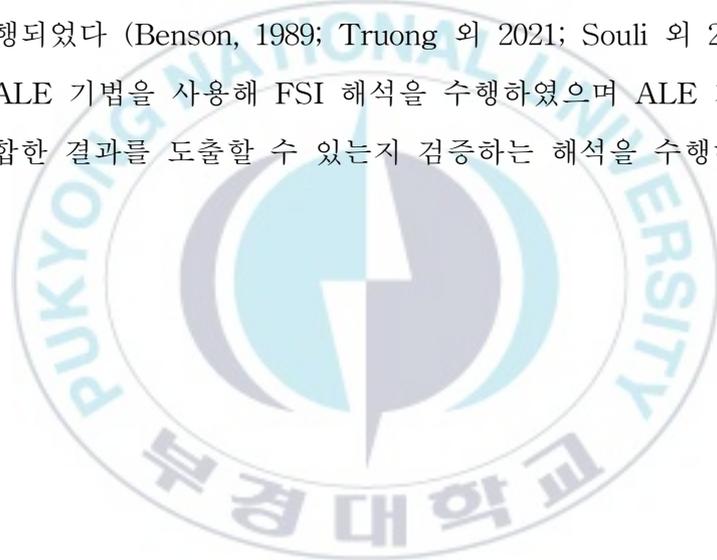


Fig. 2 Characteristics of Lagrangian and Eulerian methods

유체의 거동을 공간상에 나타내기 위한 운동학적 기술법은 크게 라그랑지안(Lagrangian), 오일러리안(Eulerian) 기법으로 나뉠 수 있으며 그 특징을 Fig. 2에서 확인할 수 있다. Jang (2007)은 유체 구조 연성 해석 기법을 설명하기 위해 두 기법의 특징 및 장·단점을 서술하였다. 라그랑지안 기법은 요소가 물체를 따라다니며 변화하는 물리량을 기술하는 방법으로 작은 변형이 일어나는 해석에서 빠른 결과를 얻을 수 있는 장점이 있으나 대변형이 발생하는 해석에서는 비틀림 계산을 위해 선행되는 요소 재생성 단계의 문제가 있어 적용하기 힘들다. 그에 반해 오일러리안 기법은 공간상에 고정된 요소를 통과하는 물체의 물리량을 기술하는 방법으로 대변형이 발생하는 문제는 유연하게 해석이 가능하지만 각각의 요소가 한 가지 재료만 인식할 수 있기 때문에 자유 표면이 존재하는 두 가지 이상의 유체를 사용

하는 해석에서 그 경계를 정의하는데 어려움이 있다. 위의 두 기법의 장점을 합친 기법을 ALE 기법이다. ALE 기법은 변형이 발생하게 되면 먼저 라그랑지안 기법과 마찬가지로 요소가 물체를 따라가게 된다. 이후 각 요소에서 오일러리안 기법과 마찬가지로 요소별로 변화한 재료의 물리량을 기술하게 된다. 따라서 대변형과 자유 표면의 계산이 요구되는 유체-구조 연성 해석에 적합한 장점을 가지나 각 해석 스텝마다 라그랑지안, 오일러리안 기법이 모두 적용돼야 하기 때문에 해석시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 위 특징으로 인해 FSI 해석에서 ALE 기법이 사용되며 다양한 선행 연구가 수행되었다 (Benson, 1989; Truong 외 2021; Souli 외 2000). 본 연구에서는 ALE 기법을 사용해 FSI 해석을 수행하였으며 ALE 기법이 해당 연구에 적합한 결과를 도출할 수 있는지 검증하는 해석을 수행하였다.



3. Fluid-Structure Interaction 수치해석 기법 검증

수치해석 기법 검증은 해석이 추구하는 결과를 정확히 계산해 낼 수 있는지 또는 결과 도출 시 발생하는 오류를 최소화하기 위해 선행된다. 본 연구의 목표는 구조물 간의 접촉 후에 발생하는 구조적 반응을 예측하는 것이기 때문에 구조물 접촉에 영향을 주는 유체의 형성이 검증되어야 한다. 그래서 실린더형 시험관을 수중 자유 낙하하는 구형 구와 공기-물을 동시에 통과하는 구형 구에 대한 선행연구 결과와 FSI 해석 결과를 비교해보았다.

가. 구형 구의 실린더형 시험관 수중 자유 낙하

먼저, Kim (2015)에서 연구된 강재 구형 구의 수중 낙하 CFD 해석 결과와 이와 동일하게 구현한 FSI 해석 결과를 비교하였다. 결과는 구형 구의 변위, 속도가 비교되며 본 검증을 통해 ANSYS/LS-DYNA에서 수행되는 FSI 해석이 생성하는 ALE 타입인 물의 타당성을 증명하였다.

1) 수치해석 모델

Fig. 3은 ANSYS/LS-DYNA에서 생성한 모델을 보여준다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 물로써 생성된 요소의 집합은 8-노드 요소로 구성된 ALE로 좁은 원기둥 모양의 실린더형이다. 직경은 56mm, 높이는 1,500mm이며 낙하 전 구형 구의 중심은 z 방향으로 +1,450mm에 위치한다. 구형 구는 직경 30mm, 질량 0.11kg, 밀도가 $7,795\text{kg}/\text{m}^3$ 인 강철로 구성되며 8-노드 솔리드(Solid) 요소로 구성된 강성 라그랑지안으로 모델링되었다. 구형 구

의 요소 크기는 3mm이며 유체의 요소 크기는 실린더형의 형태를 유지하기 위해 내부에서 외부까지 2mm-5mm로 구성된다. 구형 구와 물 각각의 요소 수는 8,000개, 138,000개이다. 시험관의 모든 외부 표면과 바닥은 고정하였으며 구형 구는 z 방향으로 중력 가속도를 가진다. 구형 구는 x, y 방향으로 구속하였기에 z 방향으로의 움직임만 허용된다. 구형 구의 라그랑지안 모델은 ALE인 물의 요소와 겹치기 때문에 이들의 교차점이 생기며 이들 상호작용은 움직이는 ALE 요소에서 다시 매핑(mapping)되는 라그랑지안 요소에 기인한다.

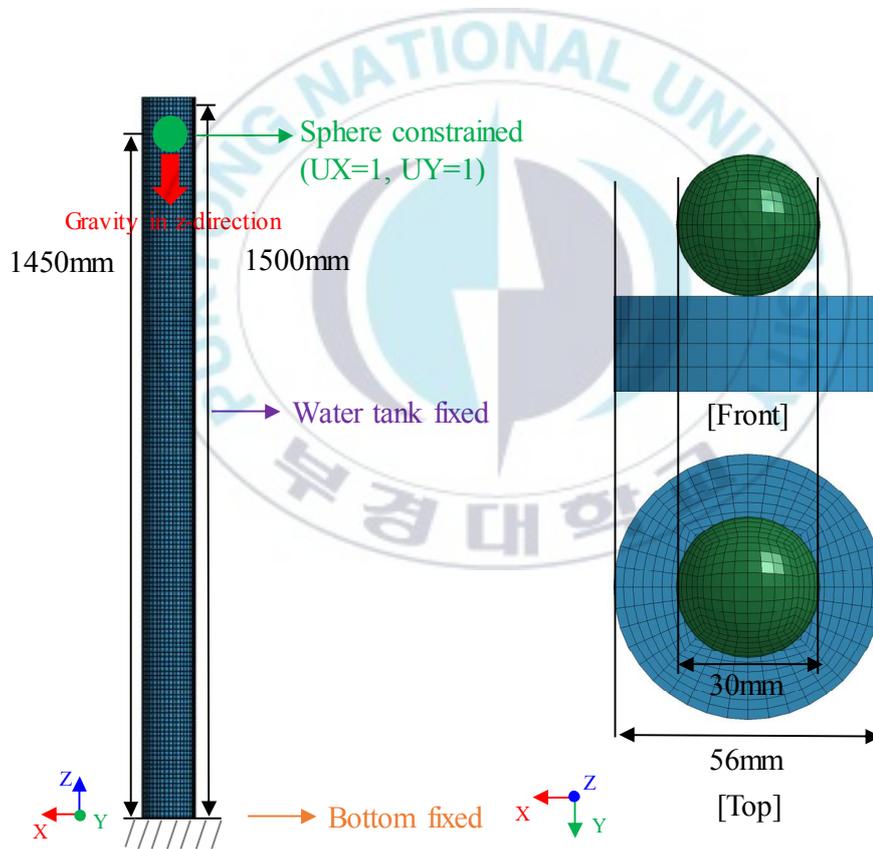
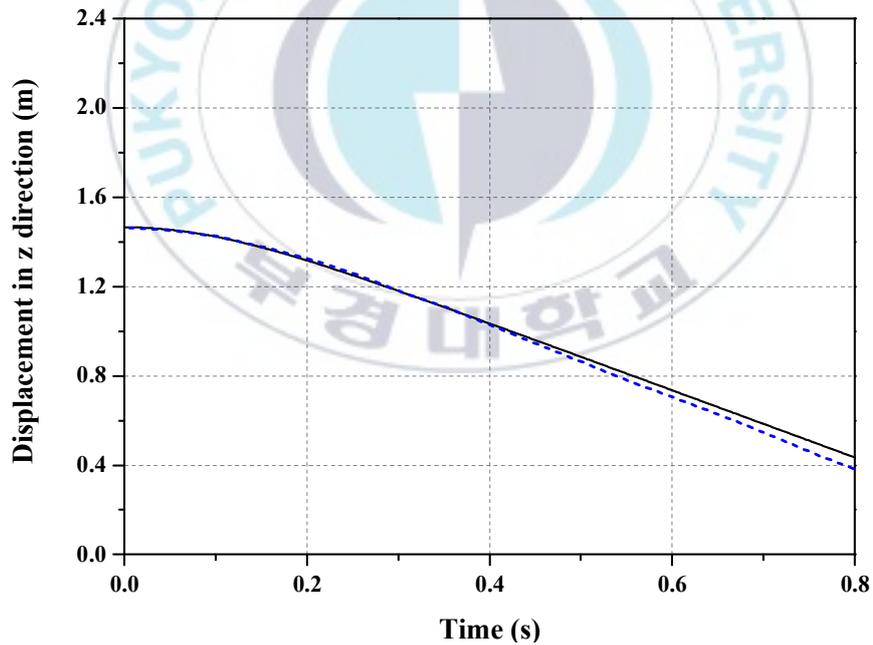


Fig. 3 Finite element model for the water-dropping sphere

2) 비교 결과

Kim (2015)의 CFD 해석 결과와 ANSYS/LS-DYNA FSI 해석 결과인 구형 구 z 방향 변위와 속도를 비교하였고 그 결과를 Fig. 4에서 보여준다. 우선, z 방향으로의 변위는 약 0.4초까지 동일한 결과를 보였으며 그 이후에 두 해석 간의 결과 차이가 증가하는 경향이 나타났고 0.8초에서는 차이가 약 9.75%까지 증가한다. z 방향의 속도는 수렴하는 구간에서의 차이가 약 9.05%를 보였으나 전체적으로 유사한 경향이 관찰된다. 결론적으로 본 연구를 위한 FSI 해석은 CFD 해석 결과와 유사한 경향을 보였고 두 해석 간 결과 차이는 해석 방법의 차이로 구분할 수 있다.



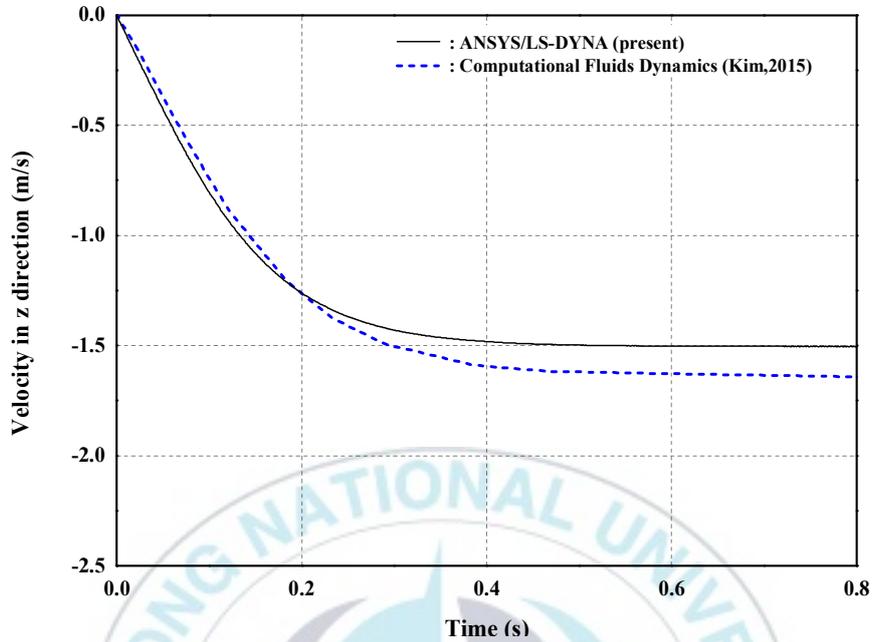


Fig. 4 Comparison between CFD and FSI models: Displacement, velocity in z direction

나. 구형 구의 자유 표면 낙하

두 번째 검증은 Troesch & Kang (1986)에서 연구된 구형 구가 공기-물을 동시에 통과 시 실험 결과와 FSI 해석 결과를 비교하였다. 구형 구가 두 유체를 만나는 순간에서의 가속도가 비교되며 본 검증으로 FSI 해석에서 두 유체를 동시에 접촉하는 구조물이 해석 가능성을 증명한다.

1) 수치해석 모델

Troesch & Kang (1986)의 구형 구 낙하 실험 결과는 선행된 연구에서 검증 절차로 활용되어왔다. Bisagni & Pigazzini (2018)은 라그랑지안, SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics) 및 하이브리드 라그랑지안-SPH 모델을 사용해 Troesch & Kang (1986)의 구형 구 낙하 가속도 실험 결과와 비교하였다. 때문에 본 검증 해석은 Bisagni & Pigazzini (2018)를 참조하여 모델링하였다. 또한 Toso (2009)는 요소 크기, 유체 영역 크기 등에 따른 구형 구 가속도 변화를 여러 수치 기법을 통해 조사하였다. Toso (2009)에 의하면 구형 구 낙하 해석은 전체 영역, 하프(Half) 영역 및 쿼터(Quarter) 영역에서의 가속도 측정 차이가 없기에 본 검증은 쿼터 해석을 수행하였다.

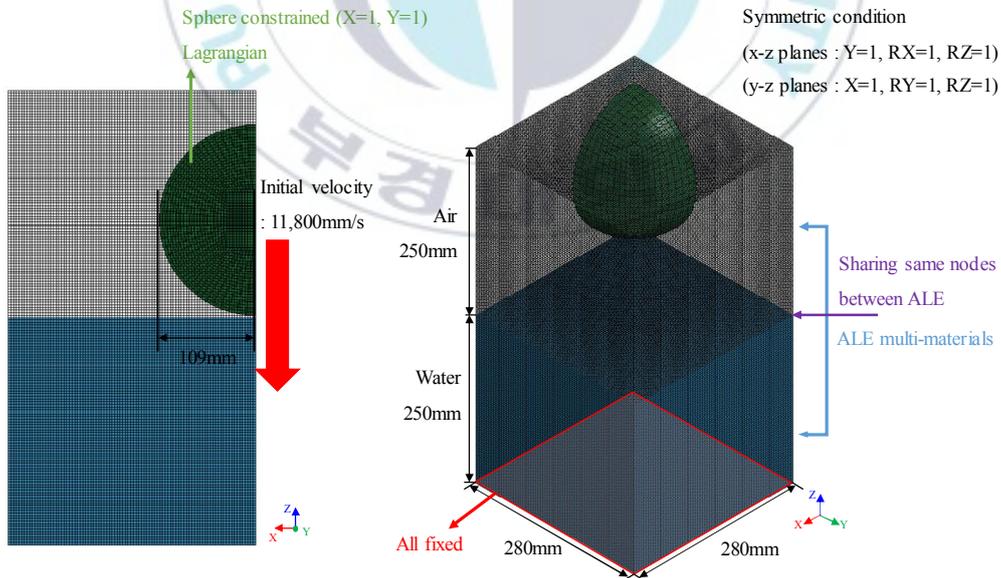


Fig. 5 Finite element model for the air-water-dropping sphere

Fig. 5는 두 유체를 통과하는 구형 구의 모델링을 보여준다. 솔리드 구형 구의 반지름은 109mm, 질량은 3.76kg이고 요소 크기는 10mm인 라그랑지안 모델이며 초기 속도 $-11,800$ m/s로 z방향으로 낙하한다. 유체의 요소는 크기 3mm인 8 노드 솔리드 ALE 모델을 사용하여 모델링 되었다. 물의 바닥은 구속되었고 대칭 조건은 x-z 및 y-z 평면에 적용된다. 떨어지는 구체는 물과 공기 영역을 동시에 접촉한다. 두 유체는 ANSYS/LS-DYNA에서 ALE multi-material을 적용하며 경계면에서 공기-물로써 겹치는 노드는 서로 공유하게 된다. 공기와 물의 요소 수는 752,643개, 구형 구의 요소 수는 14,000개로 구성된다.

2) 비교 결과

Fig. 6은 시계열에 따른 가속도 변화 실험 및 수치해석 결과를 보여준다. 우선, 해석이 약 0.01초 진행되기에 구형 구가 두 유체를 만나는 찰나의 순간에서 기록되는 가속도를 비교한다. Fig. 6에서 해석 시간 동안의 두 방법 간 값 차이를 관찰할 수 있다. 두 결과 모두 2개의 첨두 값이 나타났으며 2차 첨두가 1차 첨두보다 높은 수치를 보인다. 그리고 두 번의 첨두 이후 가속도가 감소하는 경향이 관찰되었다. 두 결과 간 정확한 첨두 값의 차이는 1차 첨두와 2차 첨두에서 각각 5.08%, 7.72%였다. 본 검증을 통해 솔리드 물체가 두 유체를 통과하는 순간이 실험과 해석 간 차가 크지 않다는 것을 보여줌으로써 해석의 정확성을 확인했다.

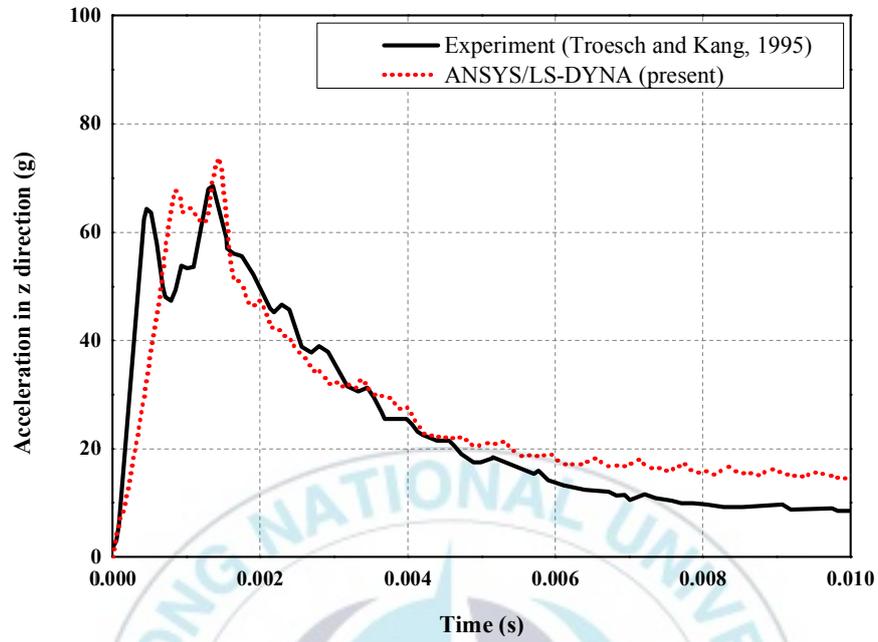


Fig. 6 Comparison between test and FSI models

Ⅲ. 구형 구 낙하 실험 및 수치해석

로드셀을 이용한 구조물 수중 낙하 충격력 검증을 위해 2가지 실험을 수행하였고 유사한 환경을 수치해석으로 구현하여 두 결과를 비교하였다. 본 장은 실험과 해석을 비교해 로드셀에서 얻는 충격력을 검증하고자 하기에 충돌 각에 의한 충격력 변동을 배제하기 위해 구형 구를 낙하 구조물로 사용한다.

1. 공기 중 실험

구형 구 수중 낙하 실험에 앞서 공기 중 낙하 변위, 속도, 충격력을 측정해보고 식, 수치해석과 비교하였다. 낙하하는 구형 구의 변위, 속도를 측정하기 위해 고 프레임 카메라로 낙하 장면을 촬영하였고 각 프레임 별 구형 구 변위를 측정하였다. 낙하하는 구형 구는 연강(Mild steel)으로 반지름 0.025m, 질량은 0.51kg이고 공기 중을 0.5m 낙하한다. 충격력 측정에 사용된 로드셀과 인디케이터는 Fig. 7에서 확인할 수 있다. 카메라 렌즈 굴절 현상으로 인한 오차를 줄이고자 렌즈 중심으로 위 아래 5cm, 총 10cm의 데이터만 사용하였다. Fig. 8은 10cm씩 5번 촬영된 구형 구 공기 중 낙하 실험 장면을 보여준다.



Fig. 7 Experiment tools : load cell and Indicator

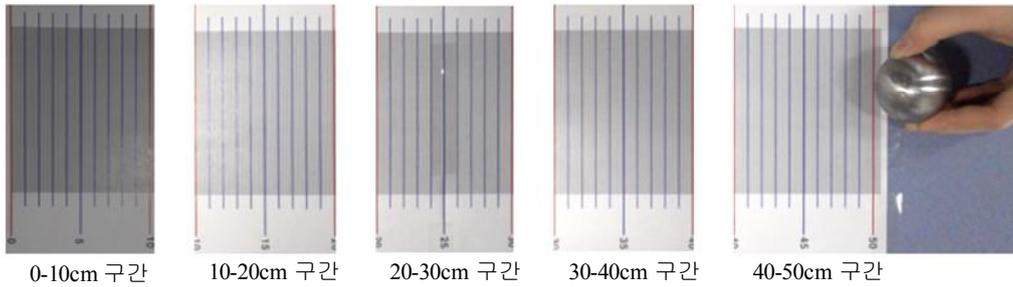


Fig. 8 Experiment of a sphere falling in the air

구형 구 낙하 변위, 속도는 실험, 수치해석 결과와 함께 항력 계수를 고려하는 공기 중 자유 낙하 방정식과 비교되고 식(3)은 다음과 같다.

$$d = \frac{\bar{m}}{k} \ln(\cosh(t\sqrt{\frac{kg}{\bar{m}}})) \quad (3, a)$$

$$k = \frac{1}{2} C_d \rho_w A \quad (3, b)$$

$$v = \sqrt{\frac{\bar{m}g}{k}} \tanh\left(t\sqrt{\frac{kg}{\bar{m}}}\right) \quad (3, c)$$

여기서 \bar{m} 은 쇄암봉의 질량과 물의 질량 차, g 는 중력 가속도, ρ_w 는 물의 밀도, A 는 쇄암봉의 단면적, t 는 시간이다. 항력 계수의 C_d 는 구형의 항력 계수인 0.47을 사용했다.

Fig. 9는 충격력 결과, Fig. 10은 최종적으로 비교된 변위, 속도를 보여준다. 전체적인 변위 측정 실험 결과는 수치해석 및 식(3) 결과와 미세한 차이를 보였으며 이 원인은 구형 구의 변위를 관찰하는 과정에서 있었던 오류로 보인다. 각 프레임 별로 구형 구의 위치를 확인해 변위점을 기록하였으나 픽셀 단위로 위치를 파악함에 있어 오차가 발생하였다. 이에 따라 속

도 역시 초반에 오차가 발생하지만 구형 구가 약 30-50cm를 통과하는 부분에서는 방정식과 수치해석의 결과를 따라가는 모습을 확인할 수 있다. 오차의 여부를 떠나 전체적인 경향성은 비슷함을 보인다. 충격력은 20회 측정하였으며 수치해석 결과는 실험의 평균과 비교하였을 때 약 5%의 오차를 보였다.

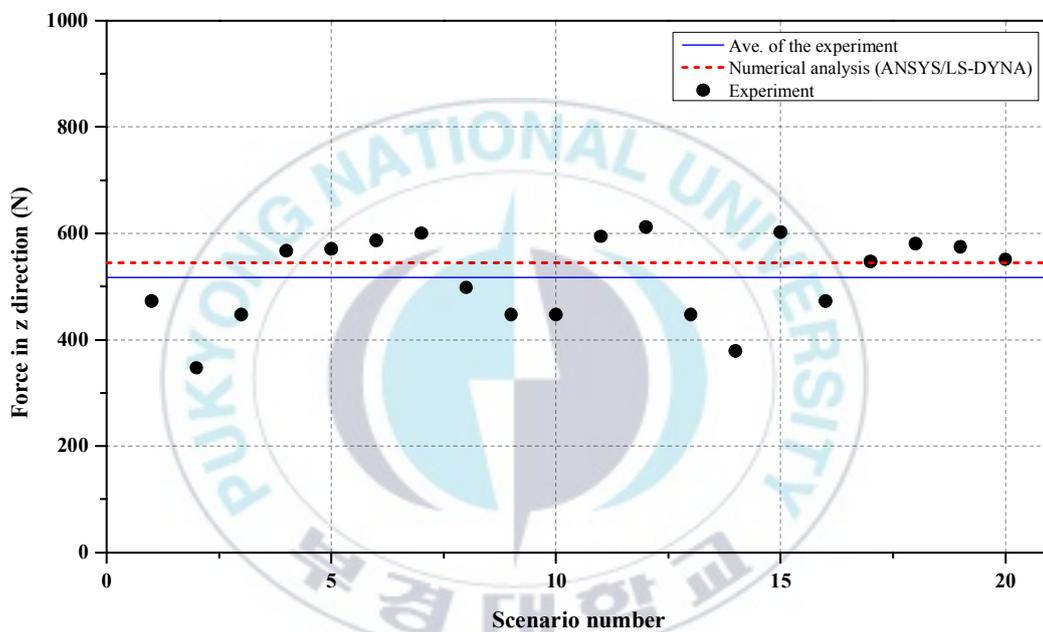


Fig. 9 Comparison with experimental results and numerical analysis of the impact force on a sphere falling from the air

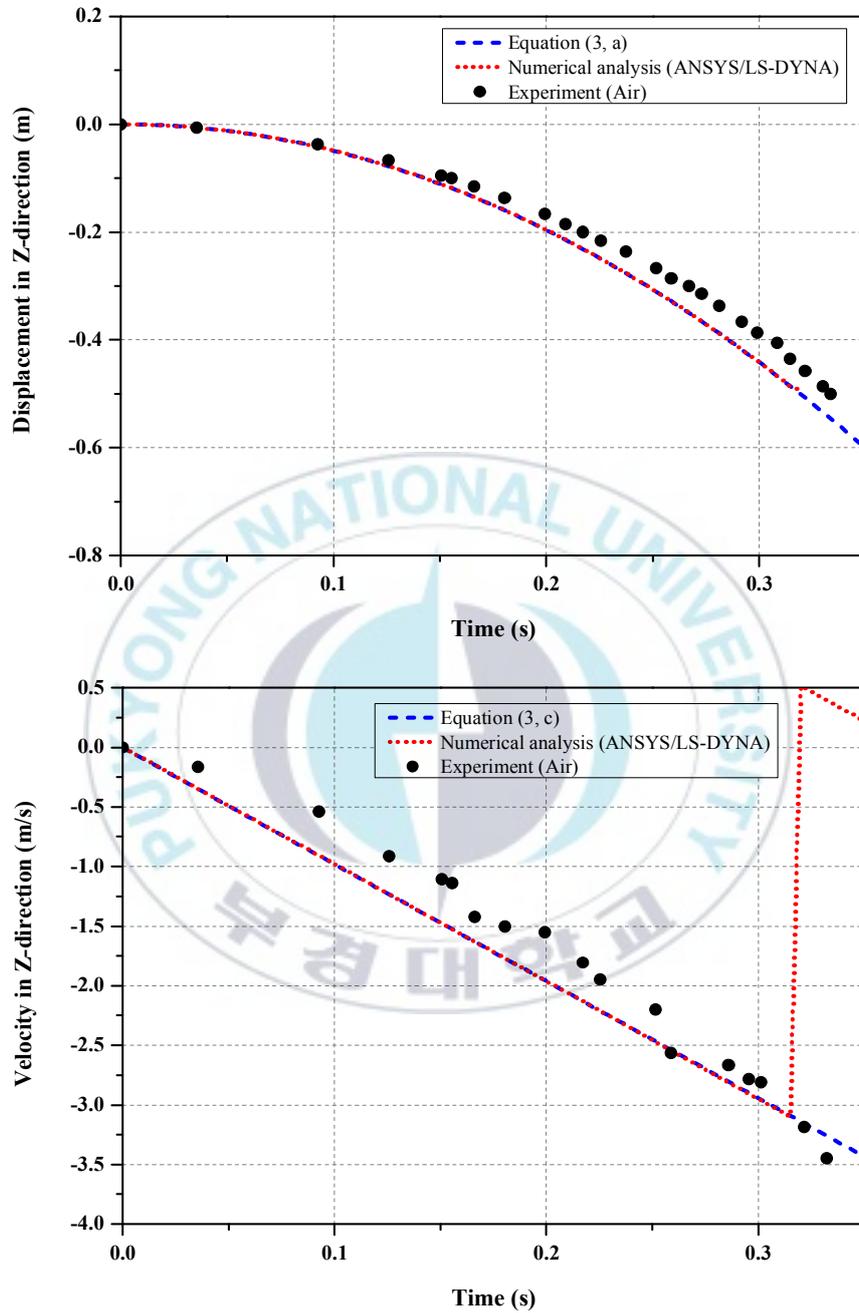


Fig. 10 Comparison with experimental results and numerical analysis of the displacement, velocity of a sphere falling from the air

2. 수중 실험

공기 중 낙하하는 구형 구 실험을 통해 로드셀을 이용한 충격력 측정 가능 여부를 검증하였으며 동일한 측정 방법으로 수중 낙하 충격력 측정을 수행하였다. 또한 정확한 해석 결과와 합리적인 해석 시간을 위해 유체 요소 및 영역 수렴성 조사를 수행하였다.

가. 실험 방법

실험은 FRP(Fiber Reinforced Plastics) 소재로 제작된 수조의 바닥에 로드셀을 설치하고 낙하 장치를 이용해 구형 구를 낙하시켜 인디케이터에 기록되는 로드셀이 받은 충격력을 기록하는 방법으로 수행되었다. Fig. 11은 수조, 낙하 장치, 마그네틱 홀더(Magnetic holder), 낙하 구조물을 보여준다. 수조는 1m×1m×1.3m 규격을 가지며 수조 옆 면에서 낙하하는 구조물을 관찰할 수 있도록 제작되었다. 구조물 낙하 장치는 실험 케이스에 따라 다양하게 높이를 조절할 수 있도록 지그(Jig)를 부착하였으며 구조물을 정확하게 낙하시키기 위해 마그네틱 홀더를 부착하였다. 낙하하는 구조물은 총 3개로 서로 다른 크기의 구형 구이다. 각 구형 구의 규격과 낙하 높이, 즉 실험 케이스에 대한 상세 정보는 Tables 2-3에서 확인할 수 있다. 실험 구조물은 3가지이고 낙하 높이는 2가지, 총 6개의 케이스에서 실험이 수행되었다. 실험 케이스는 α -I, β -II 와 같이 구조물과 실험 높이를 의미하는 문자가 조합되어 구분된다. Fig. 12는 α -I 첫 번째 실험 결과가 인디케이터에 입력되는 모습을 보여주고 좌측에 시계 별 충격력 변화 그래프를 나타내었다. Fig. 12의 인디케이터에 나타나는 결과 값은 kg 단위이고 좌측 그래프는 인디케이터 결과 값에 중력가속도 값을 곱한 결과이다.

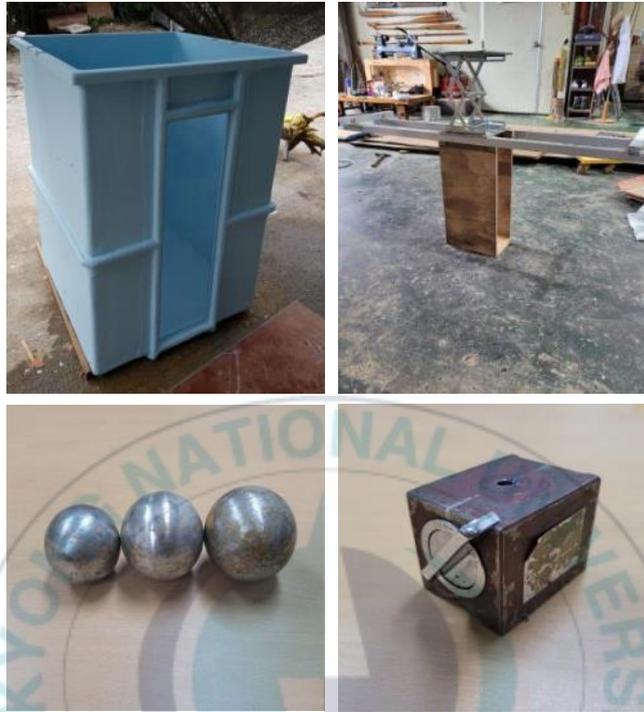


Fig. 11 Water tank, structure drop device, structures, magnetic holder used in the experiment

Table 2 Sphere size

Model	Mass(kg)	Radius(mm)
α	0.51	0.025
β	0.71	0.028
γ	0.90	0.030

Table 3 Water depth

Case	Water depth(m)
I	0.5
II	1.0

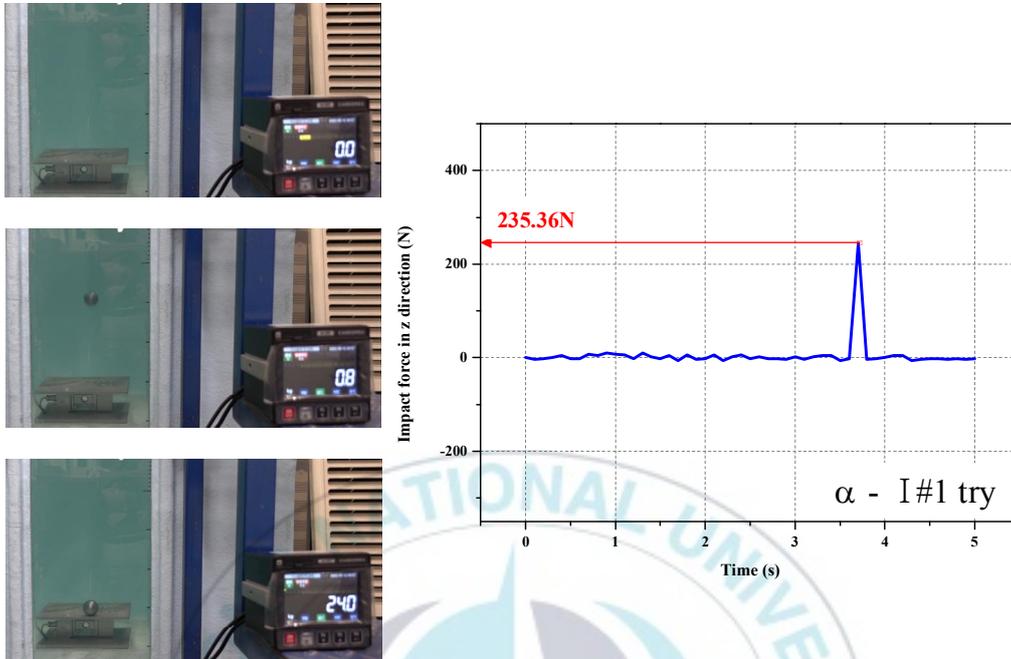


Fig. 12 The first experiment of α -I and impact force-time history

나. 수치 해석 모델링 및 수렴성 조사

Fig. 13은 수치해석을 위해 구현된 구형구 FE 모델과 경계 및 하중 조건에 대한 세부 정보를 보여준다. 유체 영역은 너비, 길이 및 깊이가 각각 B , L 및 D 로 표시된다. 구형 구와 로드셀은 강재, 라그랑지안 모델로서 생성되었으며 유체는 앞 절에서 설명한 바와 같이 Grüneisen EoS가 물과 공기를 생성하기 위해 사용되었고 계수도 동일하게 사용하였다. 또한 공기-물은 원-포인트(One-point) ALE multi-material, 즉, 앞서 검증 시 사용된 요소로 생성되었다. 공기와 물은 각각의 ALE 모델로써 생성되고 실제 환경의 공기와 물 경계를 요소로써 구분하지 않기에 유체 경계의 공통 노드는 병합해야 한다. FSI에 대한 결합 메커니즘은 ALE 구조에 라그랑지안 구조

를 연성하기 위해 사용되었다(Olovsson 외 2002). 이를 위해 쇄암봉은 슬레이브(slave)로 설정되고 ALE material는 마스터(Master)로 설정되어 연성 효과를 구현하였다. 수치해석에서 구형 구는 자유 낙하를 위해 중력 가속도가 부가되면서 다른 자유도(DoF, Degree of Freedom)는 제한하고 z 방향만 허용된다. 유체의 모델링은 해석 시간이 무한해지는 여건상 크기가 제한되긴 하지만 무한한 유체장이 구현되어야 한다. 이를 위해 두 유체의 x-z 및 y-z 평면은 대칭 경계 조건을 사용하였다. 바닥 평판의 모든 하단 노드는 6자유도 방향으로 구속되었다. 구형 구와 로드셀은 surface-to-surface 접촉 조건으로 정의하였다. 또한 ALE 요소를 사용할 때 필요한 Control_ALE 명령어(Command)가 사용되었으며 이는 ALE에 대한 글로벌(Global) 제어 매개변수를 설정하는 데 사용된다. 대표적으로 기본 이류(Advection) 논리 사용, 이류 주기 수(Number of advection cycles), 이류 기법(Advection technique) 및 ALE 스무딩 가중치 계수(Smoothing weight factor)가 Control_ALE에서 설정된다.

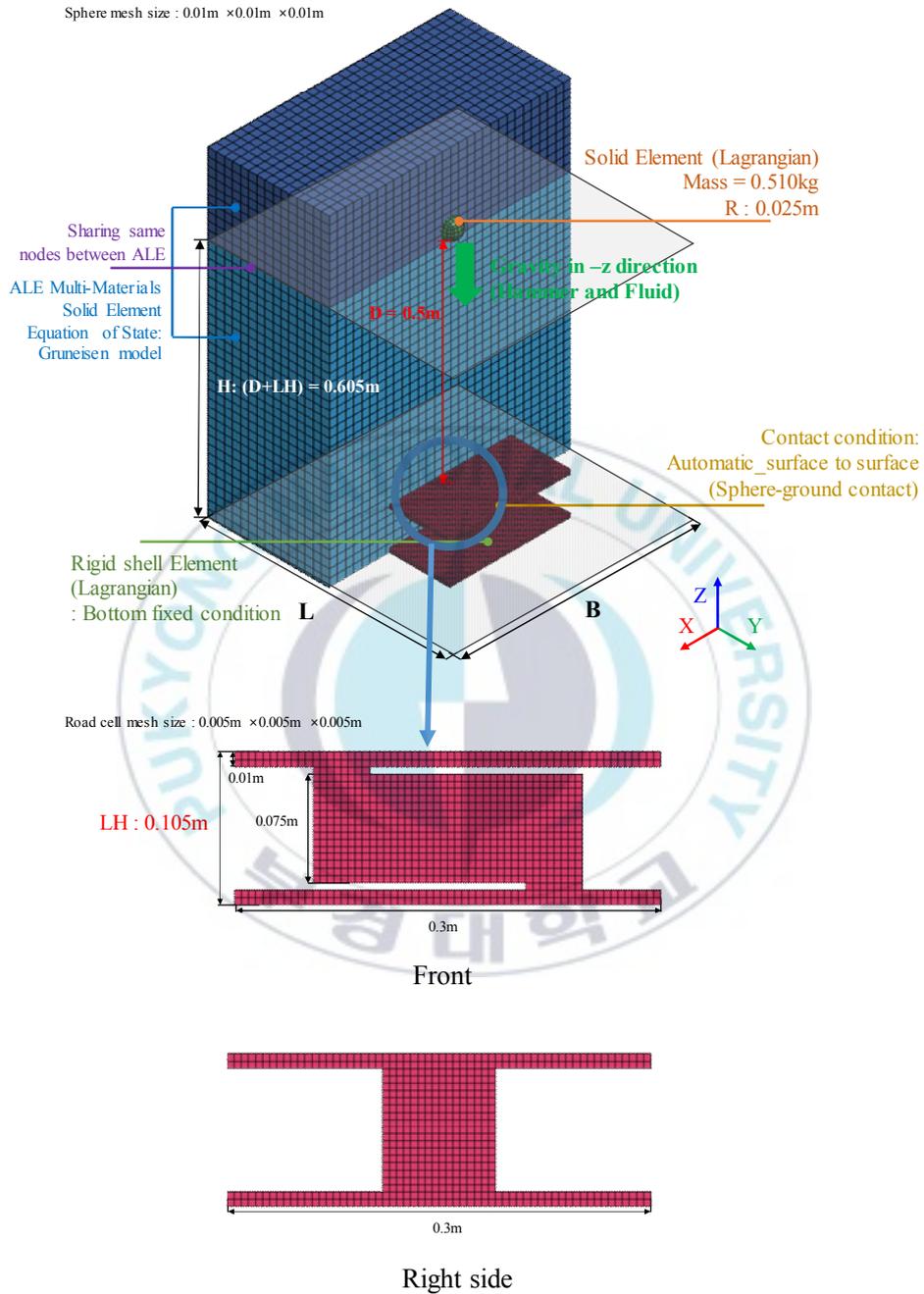


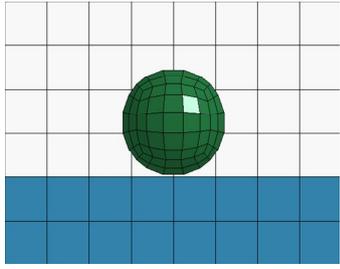
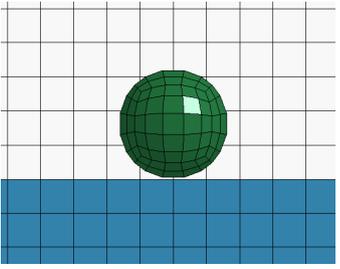
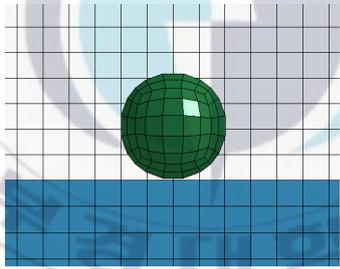
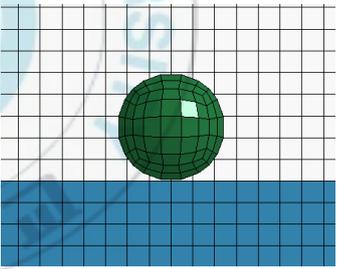
Fig. 13 Finite element model of a sphere's numerical analysis and detailed information on boundary and load conditions

1) 유체 요소 크기

기본적으로 ALE 모델은 수치 오류를 줄이기 위해 작은 요소 크기로 해석되는 것이 원칙이다. 그러나 요소 크기가 줄어들수록 요소의 수가 기하급수적으로 늘어나게 되고 해석 시간이 늘어나는 결과를 초래한다. 따라서 요소 크기는 해석의 결과에 영향을 미치지 않는 선에서 적절하게 결정되어야 하며 이를 위해 유체 요소 크기에 따른 수렴성 조사가 요구된다.

보다 정확한 조사를 위해 유체 요소 크기 외의 다른 변수는 고정되고 구형 구의 로드셀과 접촉하게 되는 요소는 0.010m로 고정, 수렴성 조사에 사용될 유체 영역 크기인 B (또는 L)는 0.6m로 유체의 수심은 0.5m로 결정되었다. 유체의 요소가 0.010-0.020m 범위 안에서 총 4개의 해석을 수행하였다. Table 4는 각 해석의 모델링과 유체 요소 크기, 요소의 수, 해석 시간을 보여준다(S/F 는 구형 구(S)의 요소 크기와 유체 요소 크기(F)의 비율). Table 4에서 나타나듯 해석 시간은 S/F 증가에 따라 선형적으로 증가하지 않았다. Fig. 14는 유체 요소 크기에 따른 수렴성 조사 결과를 보여주며 해석 결과로 구형 구의 충돌 속도 및 충격력이 비교되었다. 구형 구 충돌 속도 및 충격력은 S/F 가 0.67부터 수렴하기 시작하였다. 이에 따라 유체 요소 크기는 0.015m로 결정되었다.

Table 4 The different mesh size in fluid used for dropping the sphere.

	0.5	0.67
<i>S/F</i>		
Fluid mesh size (m)	0.020	0.015
No. of element	60,651	109,451
Computational time	16h	68h
	0.83	1.00
<i>S/F</i>		
Fluid mesh size (m)	0.012	0.010
No. of element	192,151	316,251
Computational time	114h	228h

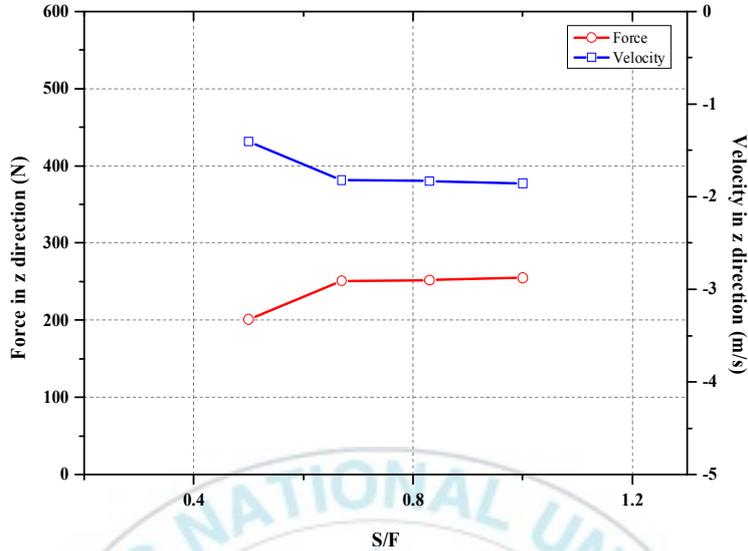
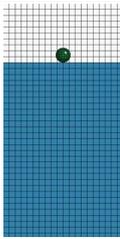
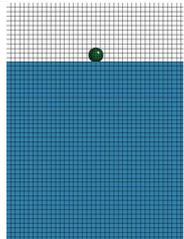
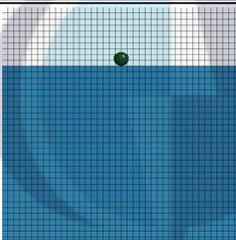
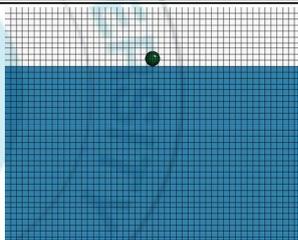


Fig. 14 The effect of fluid mesh size in sphere falling

2) 유체 영역 크기

유체 영역의 크기는 낙하 구조물의 크기에 영향을 받을 수 있다. 즉, 낙하하는 구조물의 크기에 따른 유체 영역 크기가 해석 결과에 영향을 줄 수 있다. Toso (2009)에 의하면 유체의 폭은 낙하하는 구조물 지름의 2배 이상이어야 한다. 본 연구도 유체 영역 결정하기 위해 수심 0.5m에서 B (또는 L)/ D (0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2.0)에 따라 총 5개의 유체 영역 크기에 따른 조사를 수행하였다. 유체 요소 크기 수렴성 조사와 마찬가지로 유체 영역 수렴성 조사 역시 유체 영역 크기 외의 다른 변수들은 특정되어야 한다. 때문에 유체의 요소 크기는 앞서 결정된 0.015m로 사용되었다. Table 5은 총 5가지 해석에 대한 모델링, 요소 수, 영역 크기, 해석 시간을 보여준다. Fig. 15는 수렴성 조사 결과로 구형 구의 충격력 및 최종 속도를 보여준다. 충격력과 속도는 B (또는 L)/ D 가 0.8이 될 때부터 수렴하는 경향을 보였다. 이를 바탕으로 유체 영역 크기(B, L)는 0.6m로 결정되었다.

Table 5 The different domain size in fluid used for dropping the sphere.

	0.4	0.8	1.2
$B(\text{or } L)/D$			
B, L (m)	0.2	0.4	0.6
No. of element	28,651	40,651	60,651
Computational time	4h	9h	16h
	1.6	2.0	
$B(\text{or } L)/D$			
B, L (m)	0.8	1.0	
No. of element	88,651	124,651	
Computational time	29h 30min	44h	

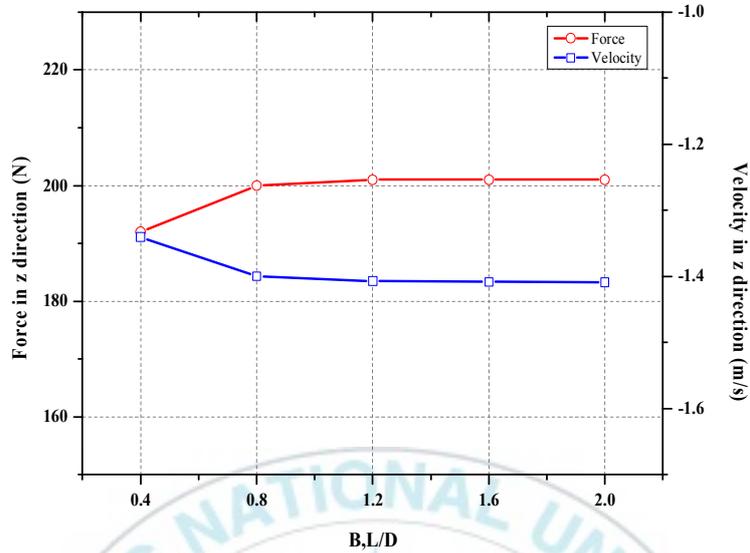


Fig. 15 The effect of fluid domain size in sphere falling

다. 비교 결과

Table 6은 각 케이스별 수치해석 결과, 실험 결과의 평균, 두 결과의 오차율, 실험값의 공분산을 보여주며 Fig. 16는 각 케이스당 20회씩 수행된 충격력 결과, 충격력 평균, 수치해석 결과를 나타낸다. γ - I 케이스에서 가장 큰 오차인 5.416%를 보이나 전체적으로 낮은 오차가 기록되었다. 실험값의 CoV(Coefficient of Variation) 결과는 β - I 에서 최대 값인 11.293를 보이지만 이 외의 케이스에서 낮은 수치를 보였다. 본 구형 구 수중 낙하 충격력 실험 및 수치해석 비교를 통해 로드셀로 측정된 충격력을 증명하였고 충돌 각으로부터 자유로운 구조물의 낙하 충격력은 수치해석과 적은 차이를 보임을 확인할 수 있다.

Table 6 Comparison of numerical analysis and experiment

Case	Numerical analysis result (N)	Average of experiment (N)	Error (%)	CoV
α - I	251	245.166	2.324	7.756
β - I	357	343.233	3.921	11.293
γ - I	444	468.366	5.416	7.977
α - II	271	271.938	0.278	10.189
β - II	392	403.838	2.950	8.296
γ - II	491	515.438	4.905	6.979

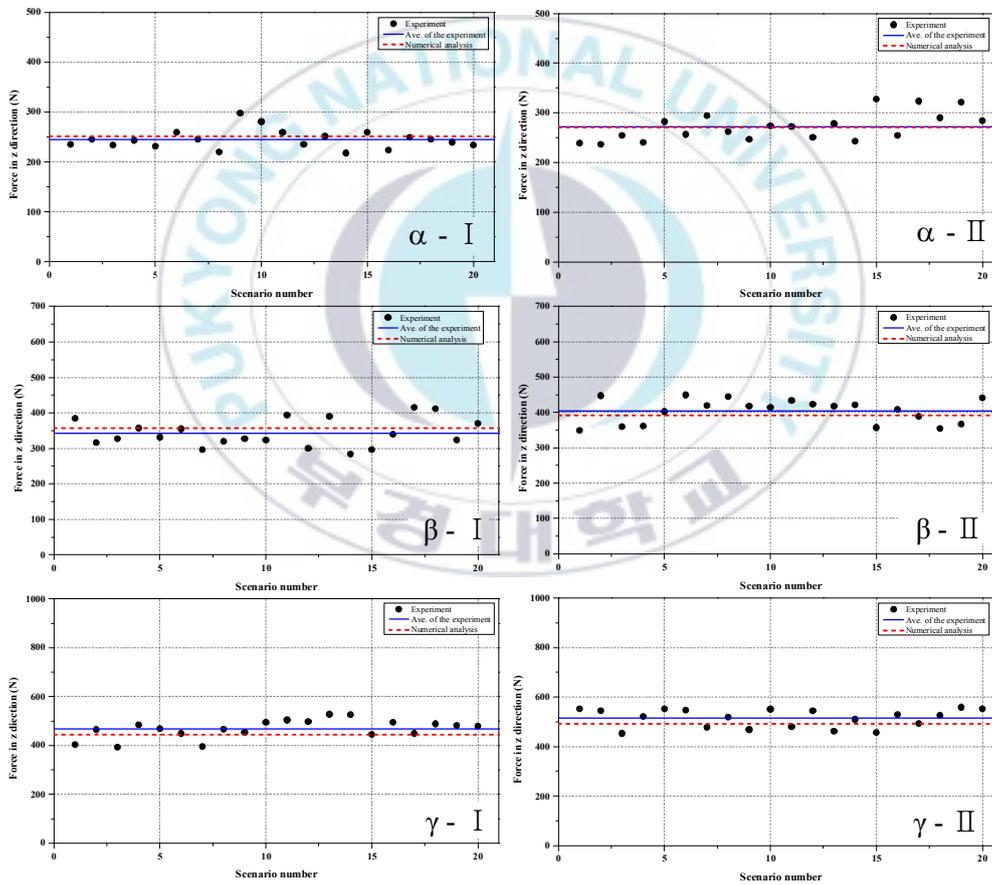


Fig. 16 The result of numerical analysis and experiment

IV. 쇄암봉 모형 시험 및 수치해석

두 검증 절차를 통해 수치해석으로 구현되는 유체를 증명하였으며 구형 구 수중 낙하 충격력 측정 실험과 수치해석 비교를 통해 로드셀로 측정되는 충격력이 타당함을 증명하였다. 이를 바탕으로 본 장은 성능 확인을 위해 제작된 쇄암봉 모형의 충격력 측정 시험과 시험 환경과 유사하게 구현된 수치해석을 통해 두 결과를 비교, 분석하였다. 해당 시험은 중소조선연구원에서 수행하였으며 쇄암봉 수중 낙하 시 충격력 계측 시험 보고서 내용을 바탕으로 진행하였다(RIMS, 2018).

1. 모형 시험

가. 쇄암봉

충격력이 충돌하는 물체의 질량 증가에 따라 선형적으로 증가함을 확인하기 위해 두 개의 다른 질량을 갖는 쇄암봉 모형을 사용하였다. Table 7은 시험에 사용되는 각 쇄암봉의 질량과 부피를 나타냈고 Fig. 17과 Table 8은 15배 축소된 쇄암봉의 상세 모델을 제시하였다. 14.81kg 질량을 가지는 모델은 50톤 쇄암봉이 축소된 모형이고 20.74kg는 70톤 쇄암봉의 모형이다. 70톤 쇄암봉 모델은 50톤 쇄암봉의 모델과 동일한 형상을 가진다. 쇄암봉의 구분을 쉽게 하기 위해 14.81kg, 20.74kg 쇄암봉 모형을 각각 A, B로 지칭한다.

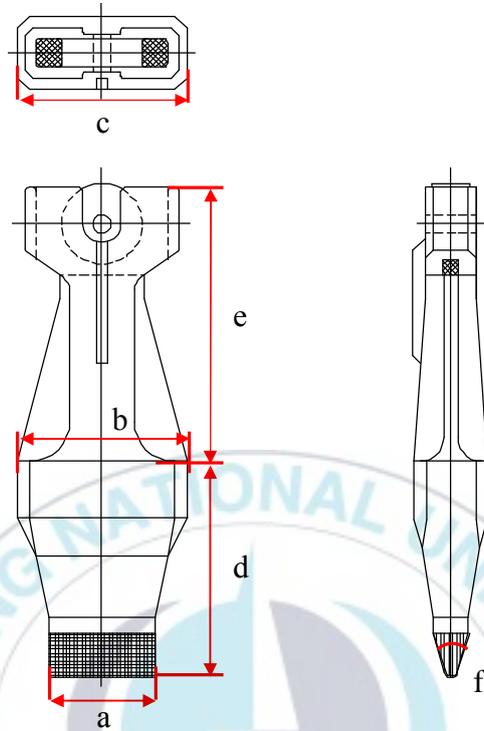


Fig. 17 Description of 15-times scaled-down crusher model

Table 7 Crusher model properties

Model	Mass (kg)	Volume (m ³)	Remark
A	14.81	0.001628	1/15 scale down of 50 ton
B	20.74	0.002876	1/15 scale down of 70 ton

Table 8 Dimensions of crusher models

Model	Dimension (mm)					
	a	b	c	d	e	f
A	1330	2100	2100	2670	3405	R75.00
B	1609	2541	2541	3230	4120	R90.75

나. 시험 조건

시험은 중소조선연구원의 해양공학 수조($28 \times 22 \times 3 \text{ m}^3$)에서 수행되었으며 Fig. 18에서 확인할 수 있다. 시험 환경은 온도 $24 \text{ }^\circ\text{C}$, 상대 습도 74.6%이다. 2개의 쇄암봉이 2개의 낙하지점 수면(0.0m), 공기 중(0.2m)에서 4개의 수심(0.779, 1.112, 1.445 및 1.579m)으로 낙하하는 총 16개의 케이스에서 시험이 수행되었다. 시험의 기준 수심면(DL)은 대한민국의 정의를 따라 약 최저 저조면(ALLW)으로 사용되었고 전체적인 시험 정보는 Table 9 및 Fig. 19에 요약하였다. 각 케이스당 총 3회 낙하가 수행되었고 충격력은 Fig. 18와 같이 내장형 로드셀(최대 용량 50,000N 및 출력 500Hz, $\pm 5\text{V}$)에 있는 센서 플레이트를 사용하여 측정되었다. 센서는 변위를 통해 스트레인 게이지를 이용하여 값을 출력하고, 충격력은 스트레인 게이지의 탄성에 의해 생성된다. Fig. 18에서 수조에 설치된 로드셀과 쇄암봉의 모습을 보여준다.

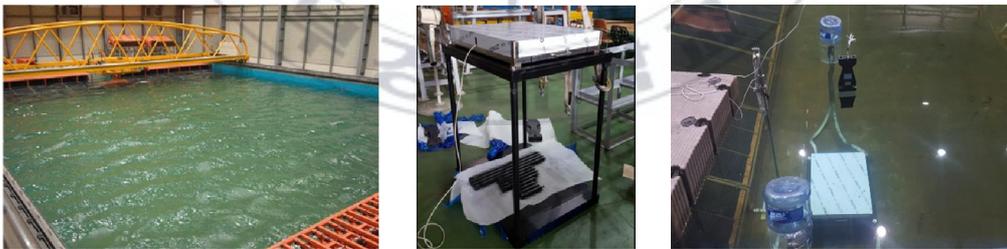


Fig. 18 Experimental environment: Water basin, load cell with sensor plate, crusher (RIMS, 2018)

Table 9 Experimental scenarios (RIMS, 2018)

Drop Level	Case	Actual Sea		Model Test	
		Drop Point	Water Depth	Drop Point	Water Depth
Water	1	M.S.L (DL(+))1.678 m	DL(-) 10 m	0.0 m	0.779 m
	2		DL(-) 15 m		1.112 m
	3		DL(-) 20 m		1.445 m
	4		DL(-) 22 m		1.579 m
Air	5	On the surface 3 m (DL(+))4.678 m	DL(-) 10 m	0.2 m	0.779 m
	6		DL(-) 15 m		1.112 m
	7		DL(-) 20 m		1.445 m
	8		DL(-) 22 m		1.579 m

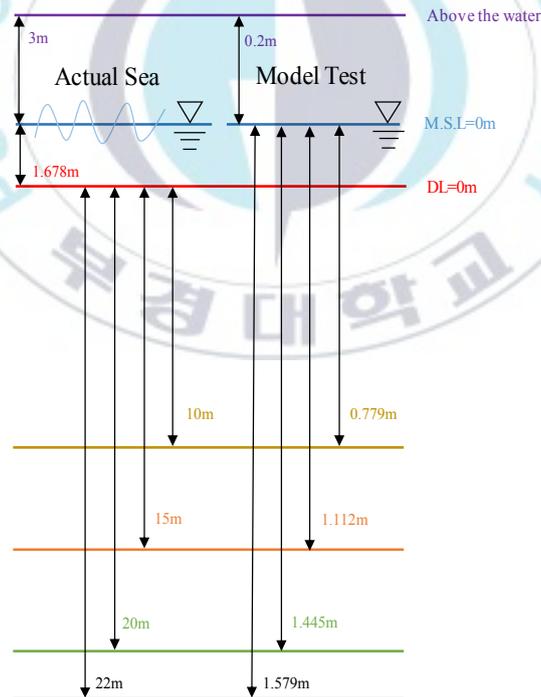


Fig. 19 Actual and 1/15 scale-down experimental conditions (RIMS, 2018)

다. 시험 결과

Fig. 20은 로드셀에서 측정된 B-4의 세 번째 시험 결과를 보여준다. Fig. 20을 살펴보면, 쇄암봉이 로드셀에 충돌할 때 충격력이 급격히 증가하고 충돌 후 부하 변동이 일어나는 것이 관찰된다. Table 10은 충격력의 최대 값을 각 케이스 별로 정리하여 나타낸 결과이다. 결과는 대체적으로 쇄암봉의 낙하 수심 깊어지고 질량이 커짐에 따라 충격력이 증가하는 경향이 있음을 보여줬다. 그러나 같은 케이스에서 측정된 충격력 중 상당 수가 서로 간의 큰 차이를 보임이 확인되었고 이는 쇄암봉이 로드셀에 충돌할 때 서로 상이한 접촉각을 보였기 때문으로 사료된다. 데이터 변동성이 큰 케이스는 CoV를 사용하여 쉽게 구별할 수 있다. 수치해석은 각 케이스에 대한 시험값의 평균과 비교하였다.

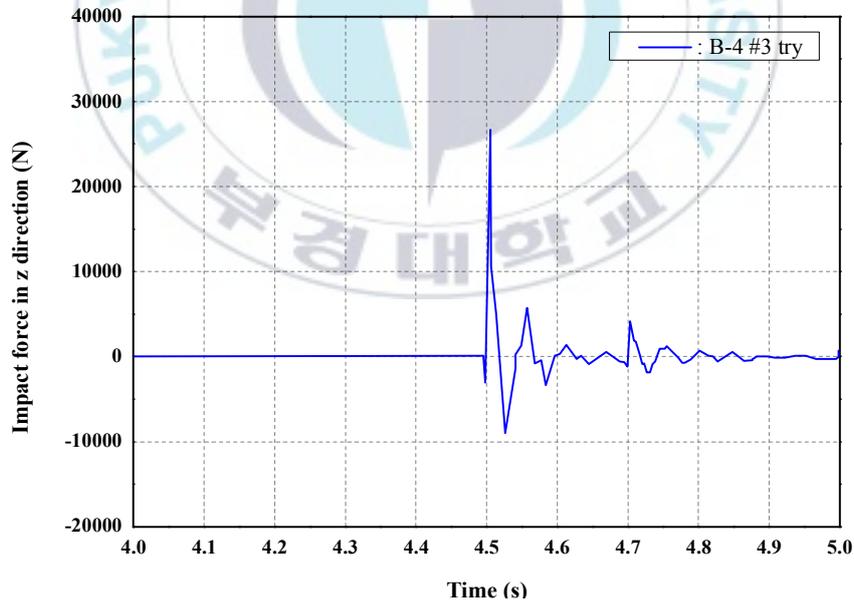


Fig. 20 Example of time-load history for B-4 case (RIMS, 2018)

Table 10 Experimental results (RIMS, 2018)

Mo del	Scenario No.	Water Level				Air Level			
		1	2	3	4	5	6	7	8
A (N)	S1	21,315	18,956	21,792	20,558	20,898	19,849	23,023	22,552
	S2	14,655	22,146	19,515	24,104	24,069	23,804	21,890	21,174
	S3	16,859	21,788	22,106	23,430	19,020	21,786	16,749	21,429
	Min.	14,655	18,956	19,515	20,558	19,020	19,849	16,749	21,174
	Max.	21,315	22,146	22,106	24,104	24,069	23,804	23,023	22,552
	Ave.	17,613	20,964	21,138	22,697	21,329	21,813	20,554	21,718
	CoV	15.7	6.8	5.5	6.8	9.8	7.4	13.3	2.8
B (N)	S1	27,244	22,605	23,780	27,617	29,017	26,558	21,548	28,435
	S2	26,498	25,900	32,430	25,378	26,380	26,467	30,980	31,506
	S3	23,690	26,468	27,362	26,384	25,079	27,753	25,744	30,256
	Min.	23,690	22,605	23,780	22,927	25,079	26,467	21,548	28,435
	Max.	27,244	26,468	32,430	27,617	29,017	27,753	30,980	31,506
	Ave.	25,811	24,991	27,858	26,460	26,825	26,926	26,091	30,066
	CoV	5.9	6.8	12.7	3.5	6.1	2.2	14.8	4.2

2. 수치해석 모델링 및 수렴성 조사

시험과 유사한 환경을 수치해석으로 구현하기 위해서는 쇄암봉과 공기-물의 모델링이 요구된다. 쇄암봉은 제작된 설계도를 바탕으로 모델링 하면 되기에 비교적 명료하다. 하지만 유체의 경우 시험이 진행된 수조의 크기를 그대로 수치해석으로 구현한다면 해석 해를 구하기까지 걸리는 시간이 비효율적으로 증가하게 된다. 이에 본격적인 수치 해석을 하기 앞서 유체 영역 및 요소 크기에 대한 수렴성 조사를 수행하여 보다 정확하고 효율적인 해석을 수행하고자 한다.

가. 수치해석 모델

Fig. 21은 쇄암봉 수치해석을 위해 구현된 FE 모델과 경계 및 하중 조건에 대한 세부 정보를 보여준다. 유체 영역은 앞 장의 수치 해석과 마찬가지로 너비, 길이 및 깊이가 각각 B , L 및 D 로 표시된다. 쇄암봉 모델은 Hypermesh (Hypermesh, 2020)로 생성하였고 FE 모델은 모든 기하학적 정보를 ANSYS/LS-DYNA로 전송한 후 생성되었다. 유체 영역은 ANSYS/LS-DYNA에서 솔리드로 모델링 되었다. 또한 쇄암봉과 충돌하게 되는 충돌면을 표현하기 위해 유체 바닥에 평판을 부착하였다.

쇄암봉과 바닥 평판은 강체로 생성되었으며 라그랑지안 모델이고 특히 쇄암봉은 일정한 응력을 받게 되는 솔리드 요소, 바닥 평판은 4-노드 셸 (Shell) 요소를 사용하였다.

수치해석에서의 쇄암봉은 자유 낙하를 위해 중력 가속도가 부가되면서 다른 자유도(DoF)는 제한하고 z 방향 운동만 허용된다. 쇄암봉은 바닥 평판에 수직으로 떨어지며 쇄암봉의 접촉각은 지면과 수직을 유지하게 된다.

유체의 모델링은 해석 시간이 무한해지는 여건상 크기가 제한되지만 무한한 유체장이 구현되어야만 한다. 이를 위해 두 유체의 x-z 및 y-z 평면은 대칭 경계 조건을 사용하게 된다. 바닥 평판의 모든 하단 노드는 6개의 DoF로 고정되었다. 이 외의 모델링 정보는 앞 장에서 구현한 구형 구 낙하 수치해석 모델링과 동일하다.

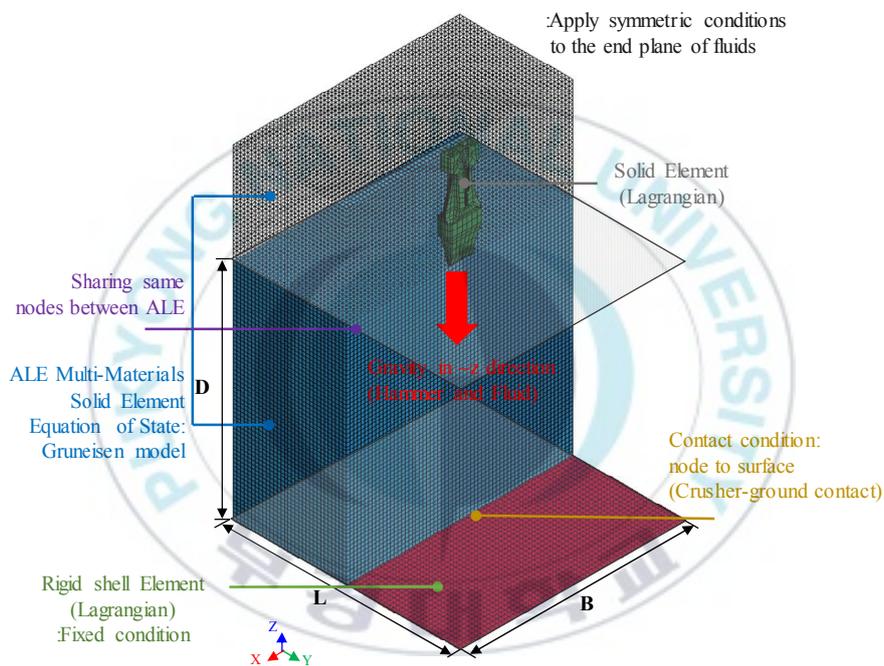


Fig. 21 Analysis settings for numerical computation (B-2)

나. 유체 요소 크기

유체 요소 크기 외 다른 변수는 고정되었으며 쇄암봉의 바닥 평판과 접촉하게 되는 모서리 요소 크기는 0.015m로 고정, 수렴성 조사에 사용될 유체 영역 크기인 B(또는 L)는 0.8m로 유체의 수심은 0.779m로 결정되었다. 유

체의 요소가 0.01-0.03m 범위 안에서 총 6개의 해석을 수행했다. Table 11은 각 해석의 모델링과 유체 요소 크기, 요소의 수, 해석 시간을 보여준다 (C/F 는 크러셔(C)의 요소 크기와 유체 요소 크기(F)의 비율). Fig. 22는 유체 요소 크기에 따른 수렴성 조사 결과를 보여주며 해석 결과는 쇄암봉의 충돌 속도가 비교되었다. Fig. 22를 보면 쇄암봉 충돌 속도는 C/F 가 0.75가 될 때까지 감소하다가 1.00이 되면서 수렴하기 시작한다. 이에 따라 유체 요소 크기는 쇄암봉 요소 크기와 동일하게 모델링된다.

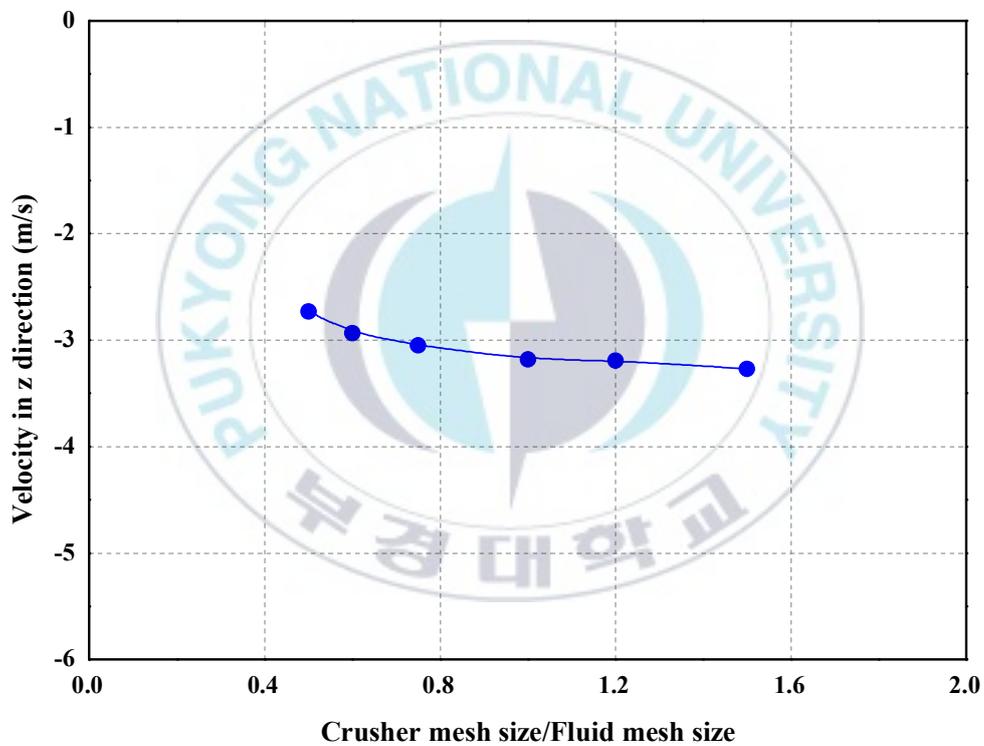
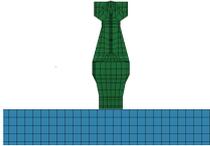
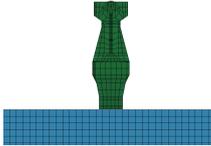
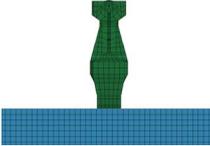
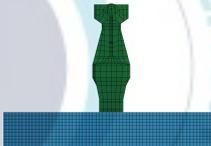
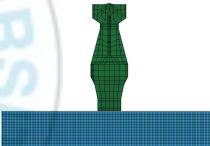


Fig. 22 The effect of fluid mesh size in crusher falling

Table 11 The different mesh size in fluid used for dropping the crusher

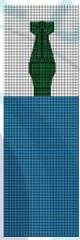
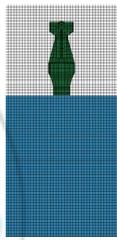
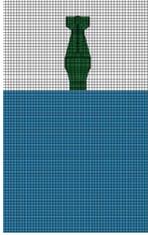
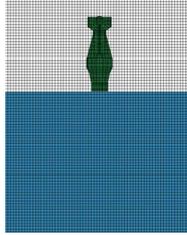
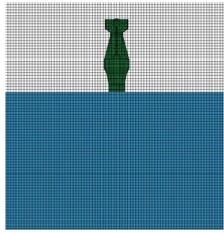
	0.5	0.6	0.75
<i>C/F</i>			
Fluid mesh size (m)	0.0300	0.0250	0.0200
No. of element	36,894	65,280	128,000
Computational time	1h 30min	2h 30min	6h
	1.0	1.2	1.5
<i>C/F</i>			
Fluid mesh size (m)	0.0150	0.01250	0.0100
No. of element	246,612	522,240	1,024,000
Computational time	13h 30min	40h	91h 30min

다. 유체 영역 크기

본 해석의 경우 고려되는 물의 수심이 총 4가지 이기 때문에 각각의 수심에 적용될 유체의 크기가 정의되어야 한다. 이를 결정하기 위해 수심 0.779m에서 B (또는 L)/ D (0.27, 0.53, 0.76, 1.03, 1.03, 1.29, 1.56)에 따라 총 6개의 유체 영역 크기에서의 수렴성 조사를 수행하였다. 유체의 요소 크기

는 앞서 결정된 0.015m로 사용되었다. Table 12은 총 6가지 해석에 대한 모델링, 요소 수, 영역 크기, 해석 시간을 보여준다. Fig. 23은 수렴성 조사 결과로 쇄암봉의 충격력 및 최종 속도이다. 충격력과 속도는 B (또는 L)/ D 가 0.76이 될 때까지 증가하다가 1.03에서부터 수렴하는 경향을 보였다. 이를 바탕으로 유체 영역 크기(B, L)는 유체의 높이(D)와 동일하게 모델링되었다.

Table 12 The different domain size in fluid used for dropping the crusher

	0.27	0.53	0.76
B (or L)/ D			
B, L (m)	0.2	0.4	0.6
No. of element	18,502	68,782	138,642
Computational time	2h	4h 30min	7h
	1.03	1.29	1.56
B (or L)/ D			
B, L (m)	0.8	1.0	1.2
No. of element	246,612	391,502	569,908
Computational time	13h 30min	18h 30min	27h

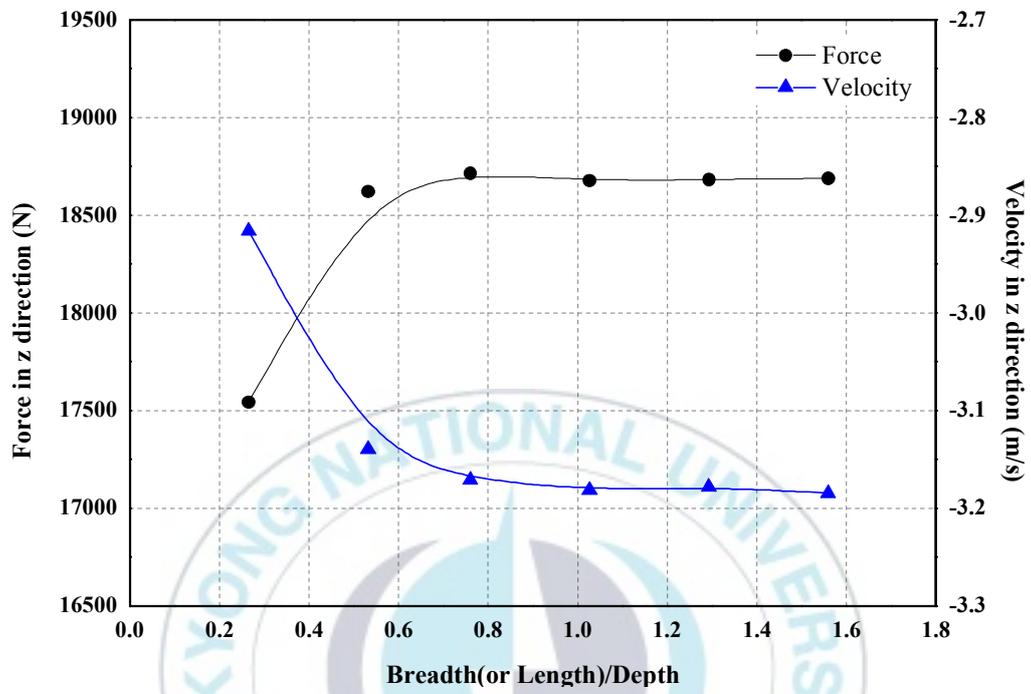


Fig. 23 The effect of fluid domain size in crusher falling

3. 수치해석 결과

Fig. 24는 B-2 조건에서 시간에 따른 쇄암봉의 수직방향 이동과 유체의 흐름 변화를 보여준다. 쇄암봉은 대략 0.52초 때 바닥 평판에 도달한다. B-2 조건에서의 z방향 변위, 속도, 가속도, 충격력에 대한 해석 결과를 Fig. 25에서 확인할 수 있다. 그중 변위, 속도 그래프는 다음과 같이 항력 계수를 고려한 공기 중 자유 낙하식(3)과 비교된다. 방정식에서 사용되는 항력 계수는 White (2020)에서 제시한 바와 같이 모형 B의 길이 × 높이를 기준으로 결정했으며 0.668의 수치를 사용하였다.

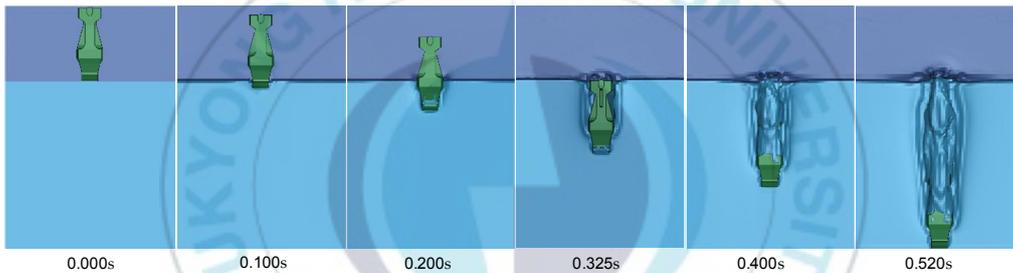
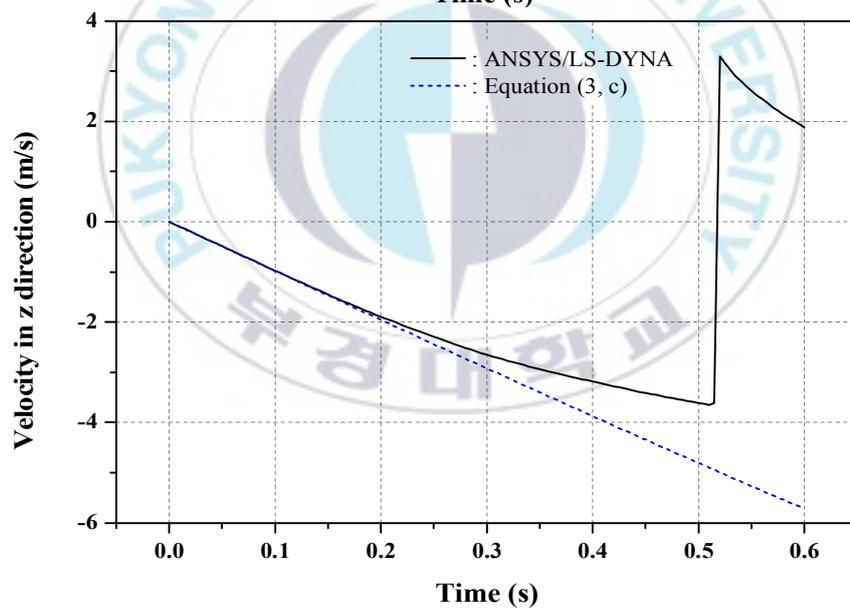
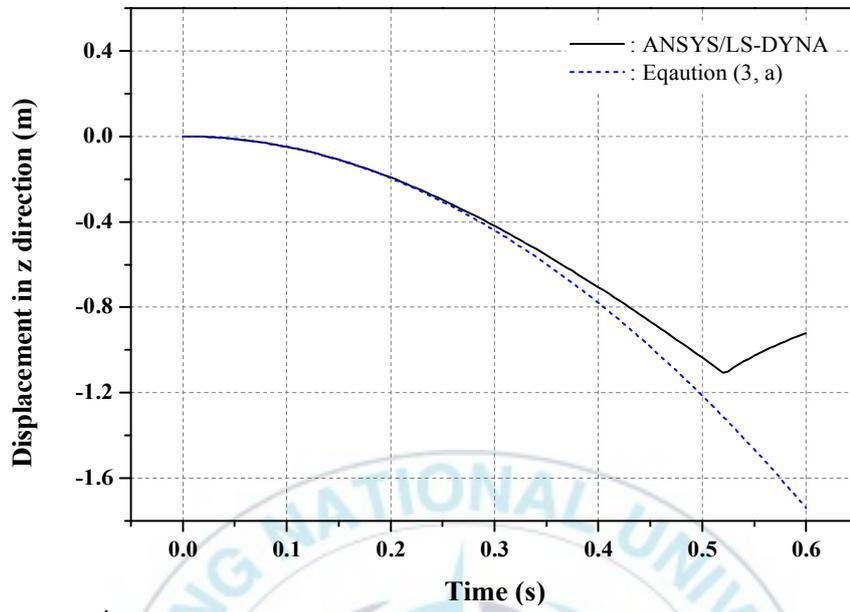


Fig. 24 Underwater movement of the crusher (B-2)



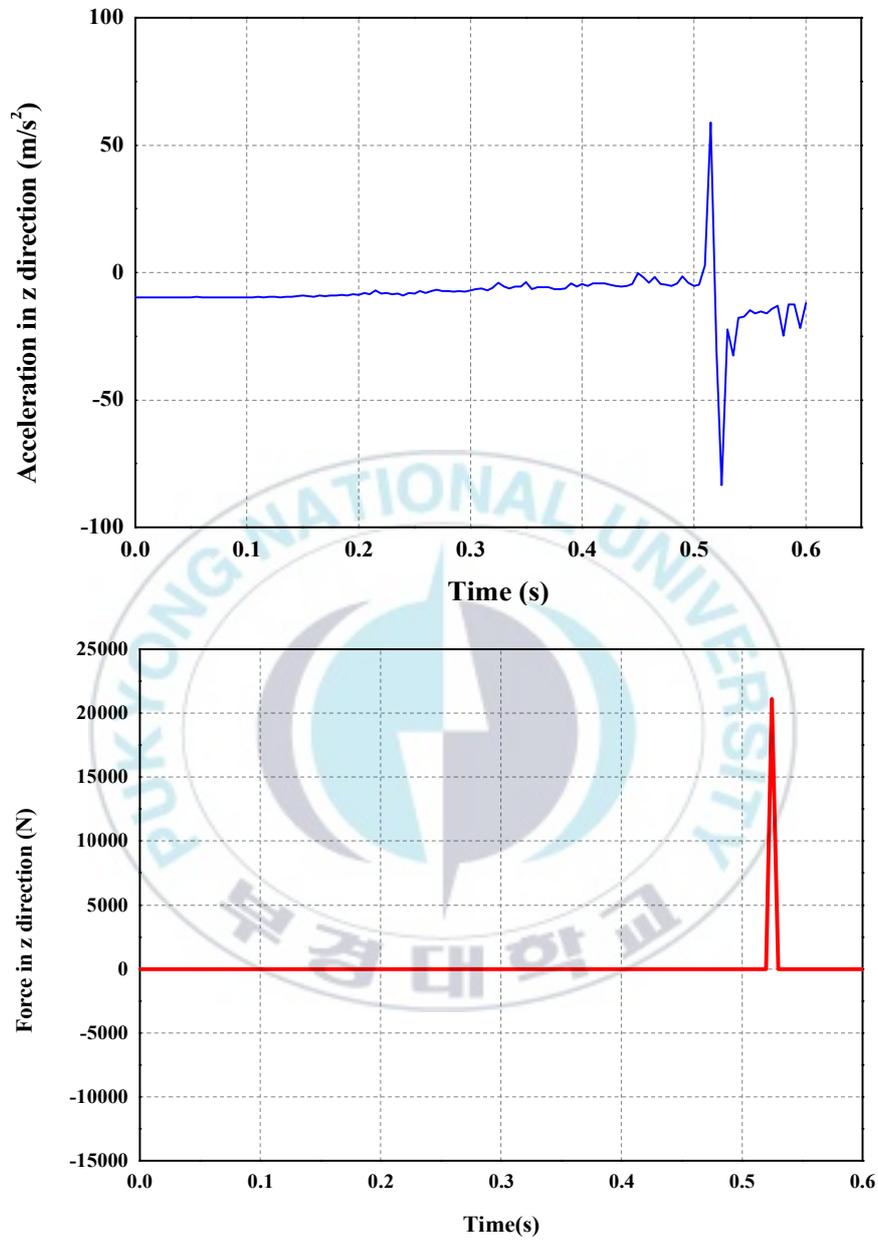
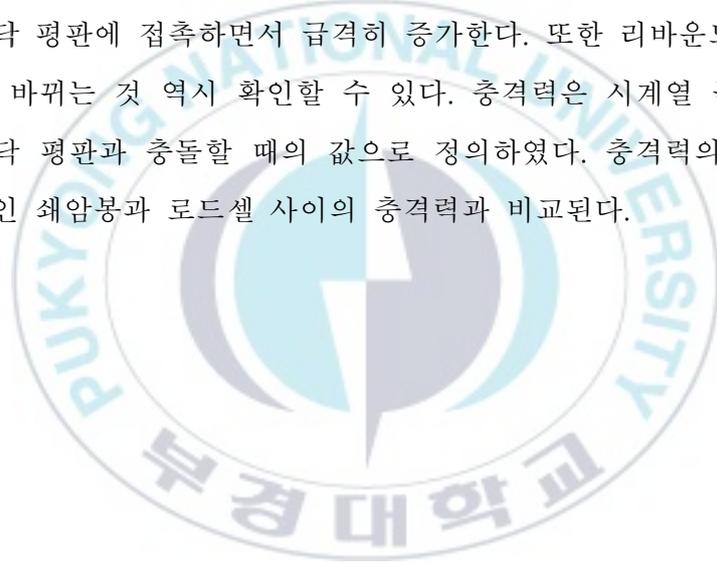


Fig. 25 The results of B-2 scenario: Displacement, velocity, acceleration, impact force

Fig. 25에서 비교된 자유 낙하 방정식 계산 결과는 공기 중 낙하이기 때문에 둘 사이 결과는 큰 차이를 보인다. 특히, 쇄암봉의 대부분이 물속에 잠기는 시간인 0.3초 전후부터 간격이 크게 벌어진다. 또한 수중 낙하 시 0.52초 때 바닥 평판과 접촉함에 비해 공기 중 결과는 0.476초 때 바닥 평판과 접촉하게 된다. 속도의 경우, 0.52s에서의 FSI 해석 속도 -3.65m/s 은 식에서 구한 -4.84m/s 에 비해 느리다. 이는 식이 물의 내수성을 고려하지 않았기 때문으로 보인다. Fig. 25는 쇄암봉의 가속도와 충격력 변화를 보여 준다. 쇄암봉의 가속도는 초기에 중력가속도와 비슷한 수치를 보이다가 쇄암봉이 바닥 평판에 접촉하면서 급격히 증가한다. 또한 리바운드(Rebound) 시 방향이 바뀌는 것 역시 확인할 수 있다. 충격력은 시계열 곡선에서 쇄암봉이 바닥 평판과 충돌할 때의 값으로 정의하였다. 충격력의 최대 값은 시험 결과인 쇄암봉과 로드셀 사이의 충격력과 비교된다.



4. 비교 결과

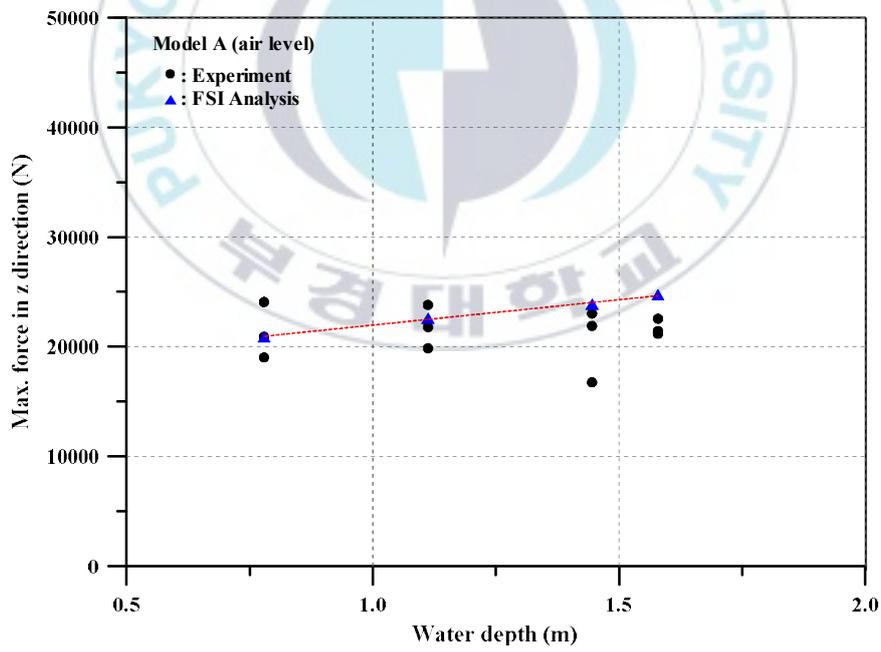
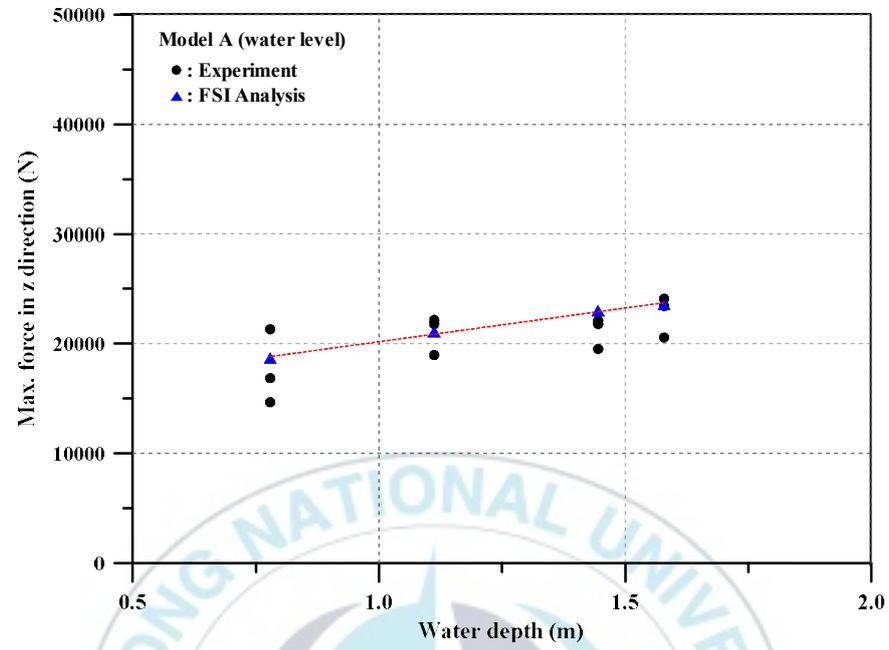
Table 13는 총 16가지 케이스의 수치 해석 및 시험으로 구한 충격력의 평균 결과를 보여준다. 우선, 수치해석의 경우 수심 증가 및 쇄암봉 질량 증가에 따라 충격력이 점진적으로 증가하였다. 공기 중에서 낙하한 쇄암봉의 충격력은 수면에서 낙하한 쇄암봉보다 더 큰 충격력을 보였다. 같은 시험 조건에서 모형 A와 B의 충격력은 평균적으로 약 ~38% 차이를 보였으며 이는 40% 정도 차이 나는 모형 A와 B의 질량 차보다 낮은 수치였다. 따라서 원본 모형의 충격력이 15배 축소 모형의 충격력의 15배가 되지 않는 점을 시사한다. 모형의 충격력 비율로써 실제 쇄암봉의 충격력을 추정하는 것은 힘들 것으로 판단된다.

Table 13 Summary of experimental and numerical analysis results

Model	Case	Water Level				Air Level			
		1	2	3	4	5	6	7	8
A (N)	Experiment	17,613	20,964	21,138	22,697	21,329	21,813	20,554	21,718
	ANSYS/ LS-DYNA	18,683	21,093	22,990	23,590	20,911	22,605	23,885	24,724
	Error(%)	6.08	0.62	8.76	3.93	1.96	3.63	16.21	13.84
B (N)	Experiment	25,811	24,991	27,858	26,460	26,825	26,926	26,091	30,066
	ANSYS/ LS-DYNA	25,735	28,999	31,634	32,576	29,286	31,010	33,227	33,986
	Error(%)	0.29	16.04	13.55	23.11	9.17	15.17	27.35	13.04

Fig. 26은 시험을 통해 얻은 모형 A, B 각각의 충격력 값과 수치해석을 통해 얻은 충격력을 그래프로 나타낸 그림이다. 전체적으로 모형 A가 B에 비해 시험값과 수치해석 값이 일치하는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞서 수행된 수렴성 조사가 모형 A 조건을 기준으로 결정되었기 때문으로 보인다. 전체적으로 10% 이하의 오차율을 보였으나 A-7, B-3 및 B-7 케이스는 다른 케이스에 비해 큰 오차를 보였다. 위 케이스는 Fig. 26에 나타나듯 시험 결과의 편차가 다른 케이스에 비해 비교적 큰 것을 확인할 수 있다.

또한 수심이 깊어지면 쇄암봉이 바닥 평판에 닿았을 때 충돌각이 변할 확률이 높아져 각 테스트 간 변동성이 커지고 수치 데이터와 시험 데이터의 차이가 커졌다. 그러나 수치해석 결과와 시험 결과의 최댓값을 비교하게 되면 오차를 크게 줄일 수 있다. 예를 들어 B-7의 경우 시험의 평균 충격력과 비교할 경우 27.35%의 오차를 보이지만 시험의 최대 충격력과 비교할 경우 7.25%, 즉 약 20%가량 오차가 줄어든다. 따라서 수치해석과 시험의 정확한 비교를 위해 쇄암봉이 바닥 평판을 타격할 때의 충돌 각도를 확인하여 비교하는 것이 필요하다.



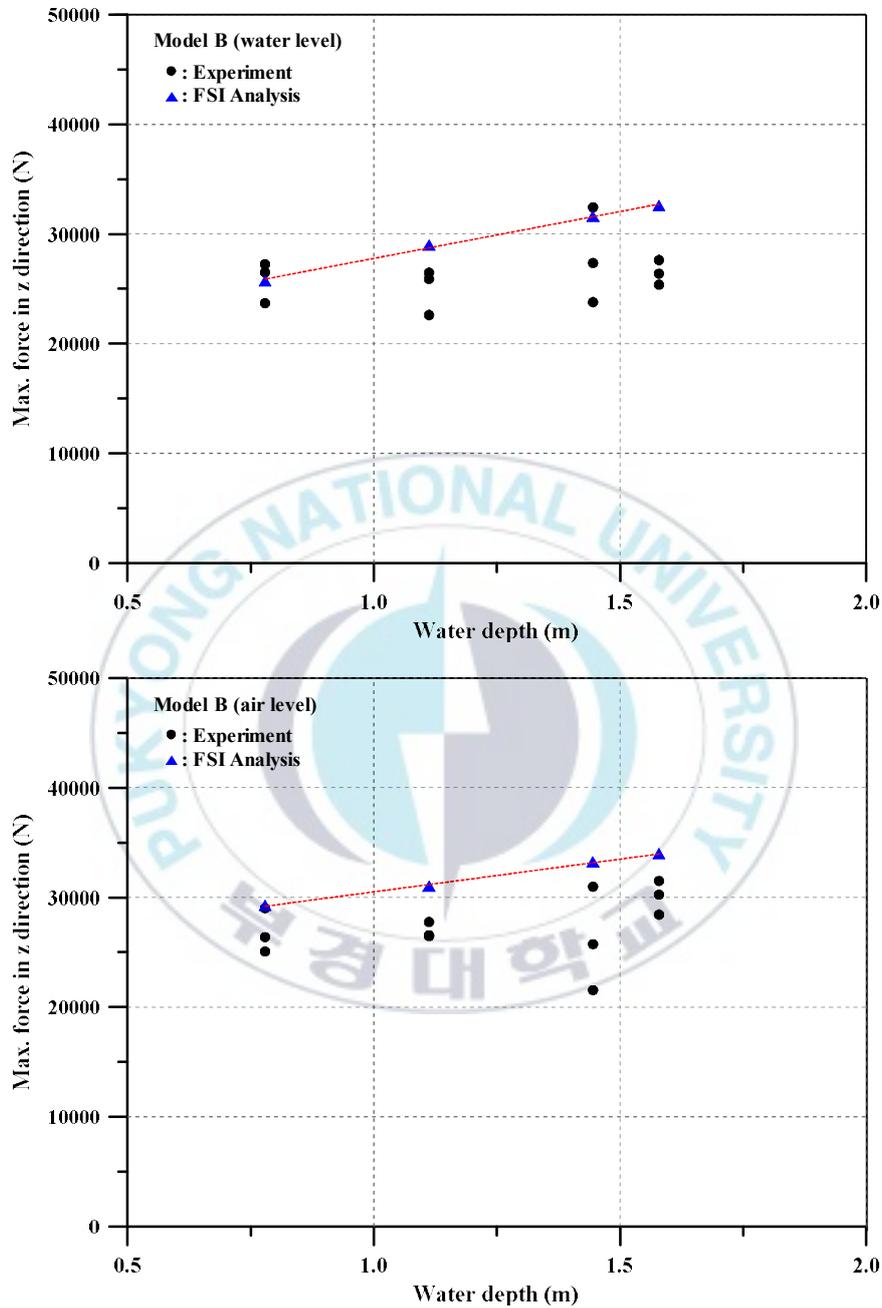


Fig. 26 Comparison between experimental and numerical impact force: Model A(water level), model A(air level), model B(water level), model B(air level)

Fig. 27은 수치해석으로 구한 쇄암봉 충격력의 선형적 증가를 확인하기 위한 추가 그래프이다. X 축은 수심에 관계없이 바닥 평판으로부터의 수직 거리를 나타낸다. 따라서 공기 중에서 낙하하는 케이스는 수면 낙하보다 0.2m 더 먼 거리에서 낙하하는 것을 확인할 수 있다. 낙하 모델의 경우 수심 증가에 따른 충격력 증가가 선형 관계를 보이며 추정식은 해당 그림에 나타내었다. 이는 동일한 모델 한정으로 특정 얇은 수심에 대한 충격력을 예측은 가능하다는 것을 시사한다. 그러나 내수성이 높아지는 깊은 수심에는 적합하지 않으며 선형에서 비선형 경향으로 천이하는 임계 깊이를 찾는 것이 요구된다.

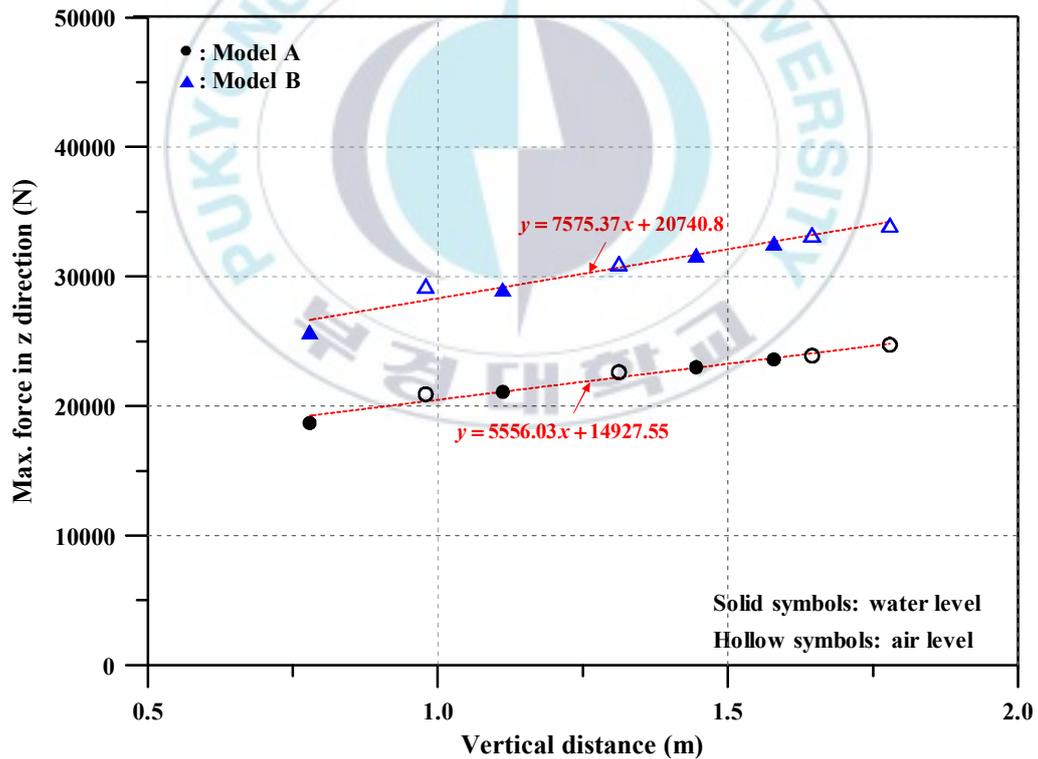


Fig. 27 Numerical results according to vertical distance

v. 결론 및 고찰

본 연구는 수중 낙하하는 쇄암봉의 특성을 이해하고 실험적, 수치적 방법을 이용하여 지면에 미치는 충격력을 예측하는 것을 목적으로 한다. 연구를 바탕으로 종합한 결론은 다음과 같다.

1. 수치해석 검증을 위해 수중 자유 낙하하는 구형 구의 변위, 속도 변화를 CFD, FSI 해석으로 비교하였으며 전반적으로 10% 미만의 오차와 함께 유사한 선형을 보임을 확인하였다. 또한 두 유체를 통과하는 구형 구의 가속도 측정 실험을 FSI 해석과 비교하였으며 가속도 변화가 유사한 경향을 보이는 것을 확인하였다. 마지막으로, 구형 구의 수중 낙하 충격력 측정 실험을 수행하고 수치해석 결과와 비교하였으며 평균적으로 약 3%의 오차(최대 약 5%)를 보였다.
2. 구형 구 및 쇄암봉 수치해석에 사용한 유체의 요소 및 영역 수렴성 조사를 수행하였다. 수렴성 조사 결과 유체 요소 크기(F)는 쇄암봉 요소 크기(C)와, 유체 영역 크기(B or L)는 유체의 깊이(D)와 동일할 때부터 쇄암봉의 낙하 최종 속도 및 충격력이 수렴하기 시작하였다.
3. 쇄암봉의 충격력은 수심이 깊어질수록 증가하였다. 또한, 공기 중에서 낙하한 쇄암봉이 수면에서 낙하한 쇄암봉보다 비교적 큰 충격력을 보였다. 그러나 질량과 충격력이 비율을 이루며 측정되지 않았다. 이는 모형 쇄암봉과 실제 쇄암봉 간에 충격력의 동적 유사성이 없다는 것을 의미한다.

결론적으로 쇄암봉 충격력 측정 시험 결과는 일정한 규칙성 없이 다양하게 측정되어 일부의 경우, 수치해석 결과와 유사했던 반면 반대 경우는 20% 이상의 오차를 보였다. 이는 쇄암봉이 바닥 평판과 부딪힐 때 쇄암봉과 지면 사이의 각 회전이 발생하였고, 때문에 일정한 결과를 내지 못한 것으로 보인다. 따라서, 향후 충돌 각을 관찰할 수 있는 구조물의 자유 낙하 실험 및 수치해석 연구가 필요할 것으로 사료된다.



참고문헌

- ANSYS/LS-DYNA. (2020). *ANSYS/LS-DYNA 2020 R1*. Pennsylvania : ANSYS Inc.
- Benson, D. J. (1989). An efficient, accurate, simple ALE method for nonlinear finite element programs. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 72(3), 305-350.
- Bisagni, C., & Pigazzini, M. S. (2018). Modelling strategies for numerical simulation of aircraft ditching. *International journal of crashworthiness*, 23(4), 377-394.
- Cleary, P. W., Sinnott, M. D., Morrison, R. D., Cummins, S., & Delaney, G. W. (2017). Analysis of cone crusher performance with changes in material properties and operating conditions using DEM. *Mineral Engineering*. 100, 49 - 70.
- Hypermesh. (2020). *HyperWorks14.0 User's Guide*. Michigan : Altair.
- Khazraiyani, N., Dashtian Gerami, N., & Damircheli, M. (2015). Numerical Simulation of Fluid-Structure Interaction and its Application in Impact of Low-Velocity Projectiles with Water Surface. *ADMT Journal*, 8(2), 81-90.

- Kim, S. J., Korgersaar, M., Ahmadi, N., Taimuri, G., Kujala, P., & Hirdaris, S. (2021). The influence of fluid structure interaction modelling on the dynamic response of ships subject to collision and grounding. *Marine Structures*, 75, 102875.
- Lee, S., Zhao, T., & Nam, J. (2013, March). Structural safety assessment of ship collision and grounding using FSI analysis technique. In *6th International Conference on Collision and Grounding of Ships and Offshore Structures, ICCGS*, pp. 197-204.
- LS-DYNA. (2020). *LS-DYNA Keywords User's Manual, 12th ed.* California : Livermore Software Technology Corporation.
- Nikolov, S.A. (2002). A performance model for impact crushers. *Mineal. Engineering*, 15, 715 - 721.
- Olovsson, L., Souli, M., & Do, I. (accessed on 8 November 2021) LS-DYNA-ALE capabilities (Arbitrary-Lagrangian-Eulerian) Fluid-Structure Interaction Modeling. Available online, <https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/aletutorial-278p.pdf>
- Song, M., Ma, J., & Huang, Y. (2017). Fluid-structure interaction analysis of ship-ship collisions. *Marine Structures*, 55, 121-136.
- Souli, M., Ouahsine, A., & Lewin, L. (2000). ALE formulation for fluid - structure interaction problems. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 190(5-7), 659-675.

- Toso, N.R.S. (2009). *Contribution to the Modelling and Simulation of Aircraft Structures Impacting on Water*. Doctoral Dissertation, University Stuttgart, Stuttgart. Germany.
- Troesch, A. W., & Kang, C. (1986, July). Hydrodynamic impact loads on three-dimensional bodies. In *Symposium on Naval Hydrodynamics, 16th*.
- Truong, D. D., Jang, B. S., Ju, H. B., & Han, S. W. (2021). Prediction of slamming pressure considering fluid-structure interaction. Part II: Derivation of empirical formulations. *Marine Structures, 75*, 102700.
- White, F. M. (2009). *Fluid Mechanics, 7th ed.* New York : Mcgraw-Hill College.
- 김재용 (2015). 자유낙하하는 수중 구조물의 비정상상태 항력계수에 관한 연구. 충남대학교 박사학위논문.
- 장인호 (2007). LS-DYNA3D의 유체-구조 연성 해석기법을 이용한 LNG선 탱크의 슬로싱 응답해석. 한국해양대학교 석사학위논문.
- RIMS (2018). 쇄암봉 수중 낙하 시 충격력 계측 (RIMS-18-0041). 9월 5일. 부산 : 중소조선연구원(Research Institute of Medium&Small Shipbuilding)