

수중 자율운동체의 입수 충돌에 관한 수치 해석적 연구

A Numerical Analysis of the Water Entry Impact of an Autonomous Underwater Vehicle

이 석 규[†] · 이 재 범^{*} · 강 영 식^{*} · 전 관 수^{*} · 김 인 학^{**}

Sockkyu Lee[†], Jaebeom Lee^{*}, Yeong-Shik Kang^{*}, Kwansoo Jeon^{*} and In-Hack Kim^{**}

(Received April 24, 2026 ; Revised July 6, 2026 ; Accepted July 7, 2026)

Key Words : Water-entry(입수), Impact Force(충격력), Fluid-structural Interaction(유체-구조 상호작용)

ABSTRACT

This study numerically analyzed the impact load characteristics generated during the water-entry process of an air-launched autonomous underwater vehicle (AUV), focusing on the effects of the entry angle. Since previous experimental studies have reported internal component damage caused by water-entry impact, the Arbitrary Lagrangian-Eulerian Fluid-Structure Interaction (ALE-FSI) method in LS-DYNA was applied to quantitatively reproduce these phenomena. A comparison between the present numerical results and those reported in previous literature showed that the maximum impact force increased with the entry angle, which is consistent with the trends observed in earlier studies. Therefore, this study demonstrates that LS-DYNA-based ALE-FSI analysis can reliably predict the impact characteristics of water-entry phenomena, providing a fundamental reference for future impact mitigation design.

1. 서 론

물체가 수중에 입수할 때, 원래의 운동에너지는 물체와 그 주위의 물에 부가질량 형태로 분배된다. 이러한 에너지 혹은 운동량의 전달에 기인하여 물체는 유체동력학적 충격력과 가속도를 받는다. 이러한 충돌거동은 수중 자율운동체(AUV, torpedo 등)의 공중 발사에 중요한 고려 요인이 된다. 항공기나 헬기에서 투하되어 수면으로 입수하는 수중 자율운동체에 작용하는 충격력은 구성부의 손상을 유발시킬 수 있으므로 투하 속도 및 투하 고도를 제한하는 조건이 된다.

특히, 발사체에 탑재되어 수면으로 입수하는 경우, 입수 충격으로 인한 내부 부품 손상 사례 보고도 있어, 투하 조건에 따라 입수 충격을 신뢰성 있게 추정할 필요가 있다.

입수충격력 추정방법은 보트의 형상으로 부가질량개념이 적용된 운동량 이론을 통해 충격력을 추정하는 방법이 von Karman et al., Boef et al., Arai et al.을 통해 오래전부터 연구되어 왔다⁽¹⁻³⁾. 그리고 국내에서도 어뢰의 형상으로 부가질량개념이 적용된 운동량 이론의 입수 충격력 추정방법이 Kim et al., Dokko et al.을 통해 연구되어 왔다^(4,5).

기존 연구에서의 해석모델은 2D 형태의 3자유도를

[†] Corresponding Author ; Member, LIG DnA(co.), Research Engineer
E-mail : sockkyu.lee@ligdna.com

^{*} LIG DnA(co.), Researcher

^{**} Agency for Defense Development, Senior Researcher

A part of this paper was presented at the KSNVE 2025 Annual Spring Conference

[‡] Recommended by Editor Heon Jun Yoon

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

고려한 해석모델로 입수각도에 따른 충격 영향 분석을 진행하여, 실제 3D 환경의 모든 요소를 고려하여 타당한 충격력을 추정하기에는 어려움이 있었다.

Kim과 Wang은 3D 환경에서 입수충격 영향성을 확인한 바 있다^(6,7). 다만, Kim의 경우 활공비행체의 형상이 기존 어뢰와는 다른 뾰족한 앞부분으로 인해 입수 충격특성을 비교하기 어려우며, Wang은 LS-DYNA ALE 기법으로 입수속도 150 m/s에서 입수각도 변화에 따른 해석으로 각도가 상승할수록 충격가속도가 증가하는 경향을 확인한 연구 사례도 있었다^(6,7).

이 연구에서는 상용해석 툴인 Ansys Workbench의 LS-DYNA를 활용하여, 고속의 fluid-structural interaction 문제를 계산하는 방법 중 하나인 ALE (arbitrary lagrange eulerian) 기법의 향상된 버전인 S-ALE 방법을 적용하여 해석 모델을 구축하였다. 과거 2D 연구 결과와 비교하기 위해서, 초기속도 50 m/s에서 다양한 입수각도별 해석을 진행하였고, 구축된 3D 모델과 기존 문헌의 2D 모델을 비교하는데 제한은 있으나, 입수 각도가 수직에 가까워질수록 충격력이 증가하는 경향성과 수치적인 값의 유사성을 확인하였다. 또한, 충격 가속도의 time data를 SRS data로 변환하여, 고주파수 성분의 충격 특성을 확인하고, 구성품 단위에서의 충격시험규격을 고찰하였다.

추후 구축된 해석 모델을 활용한다면 다양한 입수속도와 입수 각도에 따른 입수 충격을 신뢰성 있게 추정하며, 구성품 단위의 내충격 설계에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

이 연구의 2장에는 이론적 배경 및 해석 기법을, 3장에서는 입수 충격 수치해석을, 4장에서는 수치해석 결과의 타당성 검증을, 5장에서는 구성품 단위의 기존 시험규격과의 비교를 고찰하였다.

2. 이론적 배경 및 해석 기법

2.1 수중운동체 입수 충격 하중의 특성

(1) 투하 조건 제한 사례

항공기나 헬기에서 투하되어 수면으로 입수하는 수중 자율 운동체에 작용하는 충격력은 구성부의 손상을 유발시킬 수 있으므로 투하 속도 및 투하 고도를 제한하는 조건이 된다. Fig. 1은 수중 운동체 투하 기준으로 제한 조건을 도시한 그래프이다(보안상 수치는 생략).

x축 수평속도와 y축 고도는 투하시점의 조건이 되며, 녹색의 수평이동거리, 청색의 입수각, 빨간색의 입수속도는 투하시점의 조건에 따라 입수시점의 계산된 물리량이 되며, 입수각도와 속도를 제한하기 위해 launching envelope 범위에서의 투하조건으로 적용하게 된다. 높은 고도에서 투하 수평 속도가 낮을 수록 입수 각도가 수직에 가까워지며, 이는 launching envelope 범위에서 멀어지므로 충격력 상승을 예상할 수 있겠다.

(2) 이론적 배경 및 입수 충격력 계산식

입수 충격 문제는 최초 von Karman의 모멘텀 이론에 따라, 썰기 형상 물체가 입수할 때 그 모멘텀의 일부가 주위의 물에 분배되어 그 전달율에 의하여 충격력을 산정하였으며, 이후 Boef et al., Arai et al.은 구멍정의 자유낙하 진수시에 선체가 받는 충격 거동을 입수 과정에 대한 수학적 모델을 만들고 모멘텀 이론을 근거로 충격력을 계산하였다⁽¹⁻³⁾.

국내에서도 어뢰의 형상으로 부가질량 개념이 적용된 운동량 이론의 입수 충격력 추정방법이 Kim과 Dokko et al.을 통해 연구되어 왔다^(4,5).

운동량 보존에 기초하여, 입수 전의 속도 v_0 인 질량 M 의 물체가 입수 후 속도 $v(t)$, 혹은 $v(z)$ 가 된다면 식(1)이 성립한다.

$$Mv_0 = [M+m(t)]v(t) = [M+m(z)]v(z) \quad (1)$$

여기서, $m(t)$ 와 $m(z)$ 는 어뢰의 입수 충돌 과정에서 발생하는 유체역학적 관성 부하인 부가질량(added mass 또는 부가수질량)을 의미한다. $m(t)$ 는 입수 순

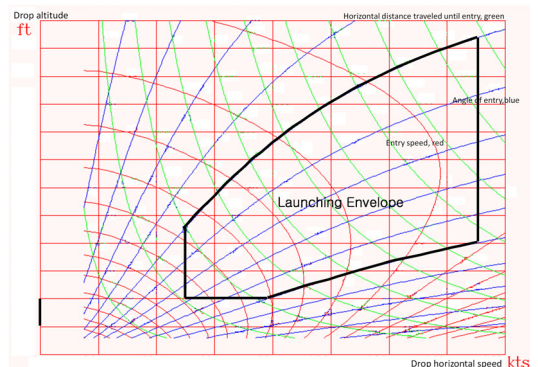


Fig. 1 Drop altitude and velocity limits

간부터 시간(t)의 흐름에 따라 실시간으로 변화하는 시간 변동 부가질량이며, $m(z)$ 는 어뢰의 수면 하강 깊이(z)에 의존하는 침수 깊이별 부가질량으로, 시간의 경과에 따른 흘수(draft) 변화에 의해 결정되므로 $m(t) = m(z(t))$ 의 관계를 갖는다.

입수 초기 충격력(slamming force)의 피크치는 유체의 관성 저항으로 인해 급격히 증가하는 부가질량의 시간 변화율(dm/dt)에 지배적인 영향을 받는다.

물체의 운동량 감소율은 주변 유체로 전달되는 충격력과 동일하므로, 이 물리적 관계를 물체의 전체 운동량에 대한 시간 변화율로 나타내면 식 (2)와 같다.

$$F_{\text{impact}}(t) = \frac{d}{dt}[Mv(t)] = -\frac{d}{dt}[m(t)v(t)] \quad (2)$$

Fig. 2와 같은 원통형 실린더의 입수시 평면(2D) 3자유도 운동방정식은 식 (3)~식 (5)와 같다.

$$Mx'' = F_{mn}\sin\theta - F_{ma}\cos\theta + F_{dn}\sin\theta - F_{da}\cos\theta \quad (3)$$

$$Mz'' = F_{mn}\cos\theta - F_{ma}\sin\theta + F_{dn}\cos\theta + F_{da}\sin\theta - Mg + F_b \quad (4)$$

$$I\theta'' = M_{mn} - M_{dn} - M_b \quad (5)$$

국부좌표계를 Fig. 3과 같이 원통의 무게중심에서 축방향 축 ξ 와 축에 수직인 방향 축 ζ 로 가정하면 부가질량에 의한 모멘텀 전달로 인한 축의 수직방향힘 F_{mn} , 축의 수직방향 모멘트 M_{mn} , 축방향 힘 F_{ma} 는 식 (6)~식 (8)로 표현된다.

$$\begin{aligned} F_{mn} &= (-x'\sin\theta - z'\cos\theta) \int (dm_n/dt)d\xi \\ &+ \theta' \int (dm_n/dt)\xi d\xi \\ &+ \theta'' \int m_n \xi d\xi - (x''\sin\theta + z''\cos\theta + 2\theta' V_{ax}) \int m_n d\xi \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} M_{mn} &= (-x'\sin\theta - z'\cos\theta) \int (dm_n/dt)\xi d\xi \\ &+ \theta' \int (dm_n/dt)\xi^2 d\xi \\ &+ \theta'' \int m_n \xi^2 d\xi - (x''\sin\theta + z''\cos\theta + 2\theta' V_{ax}) \int m_n \xi d\xi \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} F_{ma} &= (x''\cos\theta - z''\sin\theta + (1/2)L_f\theta'^2)m_a(l) \\ &+ (dm_a/dl)(dl/dt)V_{ax} \end{aligned} \quad (8)$$

또한, 부력에 의한 힘 F_b 와 모멘트 M_b 는 식 (9)와 식 (10)으로 표현된다.

$$F_b = \rho g \int A_i(\xi) d\xi \quad (9)$$

$$M_b = \rho g \cos\theta \int A_i(\xi) d\xi \quad (10)$$

또한, 원통 입수시 항력에 의한 축의 수직방향 힘 F_{dn} 과 축의 수직방향 모멘트 M_{dn} 과 축 방향 힘 F_{da} 는 식 (11)~식 (13)으로 표현된다.

$$F_{dn} = (1/2)\rho C_{dn} \int (2C_m) V_{nr} |V_{nr}| d\xi \quad (11)$$

$$M_{dn} = (1/2)\rho C_{dn} \int (2C_m) V_{nr} |V_{nr}| \xi d\xi \quad (12)$$

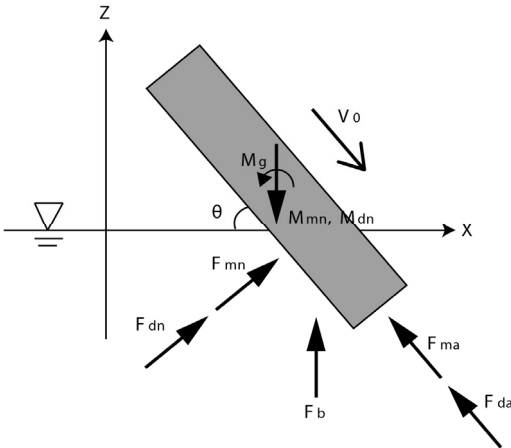


Fig. 2 Cylindrical body

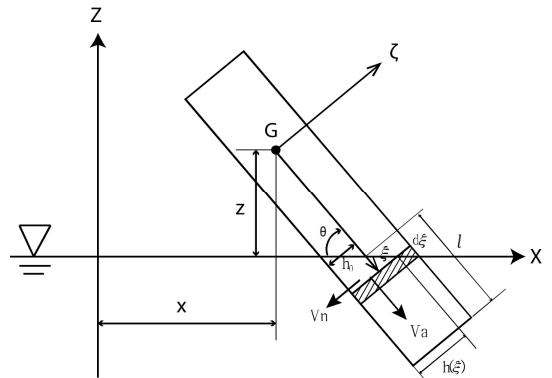


Fig. 3 Body-fixed coordinate system

$$F_{da} = (1/2)\rho C_{da} A_{cm} V_{ax} |V_{ax}| \quad (13)$$

식 (6)~식 (13)은 식 (3)~식 (5)에 대입할 수 있으며, 연성된 비선형 미분방정식으로 Runge-Kutta 4차 방법과 같은 수치적분으로 입수 각도에 따른 충격력의 해를 풀 수 있다.

(3) 입수충격력으로 인한 내부구성품 손상 사례

Lee는 입수충격력으로 인한 내부구성품 손상에 대해 발사체 탑재 내부 구성품이 받는 주파수 대역별 충격하중 특성에 따른 구조건전성 확보 방안에 대한 연구를 진행하였으나, 입수 충격력을 특정하기 어려워 versed-sine, arbitrary acceleration, random vibration으로 내부 구성품의 해석을 Fig. 4와 같이 진행하였다 (보안상 흐리게 처리)⁽⁸⁾.

2.2 S-ALE 기반 유체-구조 연성(FSI) 해석

이 연구에서는 수면 입수 시 발생하는 유체-구조 상호작용을 모사하기 위해 LS-DYNA의 S-ALE (structured arbitrary Lagrangian-Eulerian) 기법을 적용하였다. 기존의 ALE 기법은 입력 파일(input deck)에 격자의 모든 요소(element)와 절점(node)을 직접 나열해야 했다. 반면, S-ALE 기법은 ALE_STRUCTURED_MESH 및 ALE_STRUCTURED_MESH_CONTROL_POINTS 키워드를 통해 격자를 자동으로 생성한다. 이를 통해 입력 파일의 크기를 획기적으로 줄이고 모델링 및 해석 수행 시간을 최소화할 수 있으며, 메모리 사용량이 적고 수치적 안정성이 뛰어나다는 장점이 있다.

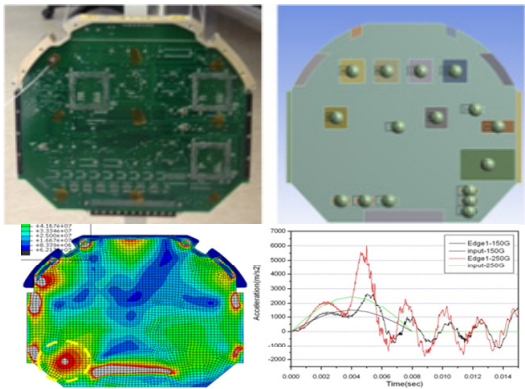


Fig. 4 Component-level analysis

해석 모델에서 해수와 공기와 같은 유체는 오일러 (Euler) 영역으로, 수중운동체와 같은 고체 구조물은 라그랑주(Lagrange) 영역으로 모델링하였다.

유체와 구조물 간의 상호작용(FSI)은 페널티 커플링(penalty coupling) 알고리즘을 적용하여 모사하였다. 이는 Fig. 5와 같이 일반적인 구조 해석의 페널티 접촉(penalty contact) 모델과 유사한 원리로, 오일러 유체가 라그랑주 구조물 표면을 침투(penetration)할 때 발생하는 침투량에 비례하여 가상의 반발력을 계산하고, 이를 양 도메인에 가함으로써 물리적인 관통 오류 없이 유체동역학적 하중을 구조물에 정확히 전달하는 방식이다.

2.3 해석 모델 구성 및 경계 조건

이 연구의 해석 대상은 전면에 음향 센서가 탑재된 어뢰의 형상을 Fig. 6과 같이 단순화한 3차원 모델이다.

수치해석의 효율성을 고려하여 대상 물체는 강체 (rigid body)로 가정하였다. 주변 유체(해수)의 경우, 고속 입수 순간에 발생하는 유체의 압축성(compressibility)

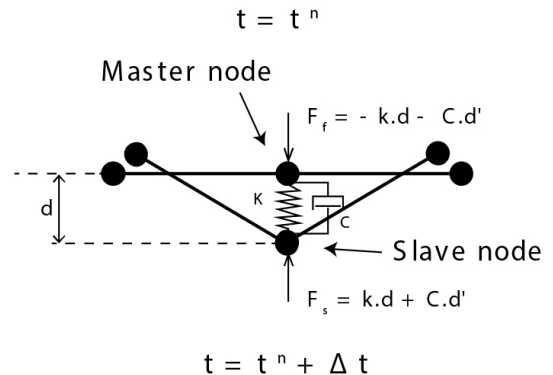
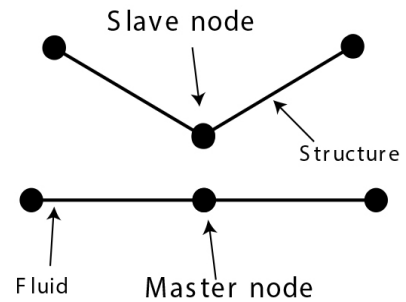


Fig. 5 Penalty contact method

및 충격과 거동을 정확히 모사하기 위해 Los Alamos 국립연구소의 실험 데이터(LA-4167-MS, selected hugoniot)를 기반으로 한 Gruneisen 상태방정식(equation of state)을 적용하였다⁹⁾. 또한, 유동 도메인의 외곽 경계면에는 비반사 경계 조건(non-reflecting boundary condition)을 부여하여 반사파에 의한 계산 오류를 방지하였다.

해수와 공기의 경계면인 자유 수면(free surface)의 역동적인 거동을 모사하기 위해 다물질(multi-material) S-ALE 기반의 체적 분율(VOF, volume of fluid) 표면 포착(surface-capturing) 기법을 적용하였다. 오일러 도메인 내에서 격자는 고정되어 있으므로, 슬버는 각 유한요소(element) 내에 존재하는 특정 유체의 체적을 나타내는 유체 충전 비율(fluid fill ratio, 또는 volume fraction)을 계산한다. 이 해석에서는 물의 충전 비율이 1, 공기가 0인 상태를 기준으로, 0과 1 사이의 부분적인 비율 값을 가지는 격자들을 수학적으로 연결함으로써 입수 충격 시 발생하는 물기둥(splash) 및 공기 공동(cavity) 등 복잡한 자유 수면의 형상 변화를 끊김 없이 정밀하게 추적(tracking)하도록 구성하였다.

이와 함께 수치해석의 안정성과 결합 신뢰성을 확

보하기 위해 설정한 주요 S-ALE 파라미터 및 수치 조건은 Table 1과 같다.

페널티 기반 커플링 강성을 결정하는 계수(pfac, penalty scale factor)는 유체의 구조물 내부 침투를 방지하면서 고속 충돌시 발생하는 고주파 수치 진동(numerical oscillation)을 최소화하기 위해 최적의 튜닝 값인 0.1을 적용하였다.

또한, 이 모델은 충분히 조밀한 유체 격자 해상도를 확보하여 유체 누수 현상이 발생하지 않으므로 누수 제어(ileak, coupling leakage control flag)는 기본 값(0)을 채택하였다.

그리고 고속 슬래밍 충격 시 발생할 수 있는 수치적 불안정성 및 발산을 억제하고자 시간 적분 스케일 계수(tssfac, time step scale factor)를 0.9로 적용하였다. 이를 통해 임계 시간 간격 대비 10%의 구조적 안전 여유를 확보하여 해석의 신뢰성을 극대화하였다.

또한, 자유수면 및 공기공동의 역동적인 경계면 포착을 위해, 키워드 파일(input.k) 내 *CONTROL_ALE 카드의 DCT(flag to invoke alternate advection logic for ALE) 파라미터를 -1로 지정하였다. 이를 통해 Navier-Stokes 방정식 기반의 S-ALE 다물질 슬버를 활성화하고, VOF 기법을 통해 물과 공기의 체적 분율을 매 타임스텝마다 정밀하게 추적하도록 구성하였다.

유동장과 구조물의 공간적 이산화(spatial discretization)를 위한 격자(mesh)는 해석의 정밀도와 연산 효율성을 결정하는 핵심 요소이다. 이 연구에서는 구조물 주변 유동장의 연속성과 급격한 압력과 변화를 정확히 포착하기 위해 오일러 유동 도메인의 기본 격자(base mesh) 해상도를 40 mm로 설정하였다. 또한, 수치해의 공간적 수렴성(spatial convergence)을 검토하기 위하여 80 mm(coarse) 및 20 mm(fine) 격자계를 추가로 구성하여 총 3단계의 해상도를 갖는 해석 모델을 준비하였다. 강체로 모델링된 구조물(라

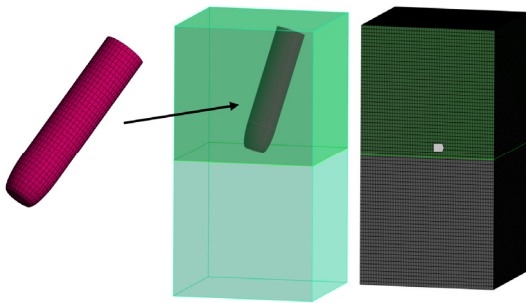


Fig. 6 Simplified model

Table 1 Key parameter for S-ALE FSI analysis

Card/tool	Parameter	Value	Unit	Rationale
Constrained	pfac	0.1	-	Prevention of fluid leakage and numerical noise
Constrained	ileak	0	-	Default value based on fluid mesh resolution
Control_Timestep	tssfac	0.9	-	Time step scale factor for numerical stability
Control_ALE	DCT	-1	-	Activation of Navier-Stokes-based ALE solver
Ansys mesh tool	Mesh sizing	80/40/20	mm	3-level mesh sizing for convergence study

그랑주) 격자 역시 유체 격자와의 커플링 시 수치적 누수와 침투 현상을 방지할 수 있도록 유체 격자 크기에 상응하는 조밀도를 갖도록 구성하였다.

3. 입수 충격 수치해석

3.1 초기 해석 조건 및 유동 도메인 최적화

이 연구에서는 공중에서 투하되는 수중운동체의 고속 입수 환경을 모사하기 위해, 수면 접촉 순간의 초기 수직 강하 속도를 50 m/s로 고정하여 해석을 수행하였다. 수면과 이루는 입수각(entry angle)은 35°부터 90°까지(35°, 40°, 50°, 60°, 65°, 70°, 80°, 90°) 총 8가지 조건으로 세분화하였으며, 각 조건에 따른 전체 해석 모델의 구성은 Fig. 7에 나타내었다.

한편, 고해상도 S-ALE 유동 해석에 소요되는 막대한 계산 비용(computational cost)을 최소화하고 해석의 효율성을 극대화하기 위해, 오일러 유동 도메인의 크기를 수중 운동체의 주된 입수 거동을 포괄할 수 있는 최적화된 영역으로 제한하였다. 도메인 축소로 인해 발생할 수 있는 외곽 경계면에서의 충격과 반사(shock wave reflection) 문제는 2.3절에서 명시한 바와 같이 도메인 외곽 경계에 비반사 조건(non-reflecting boundary condition)을 부과하였다. 이를 통해 불필요한 파동 반사를 차단함으로써, 유한한 도메인 내에서도 물리적인 왜곡 없이 무한 유동장(infinite fluid domain)의 특성을 모사하여, 계산 효율성을 극대화한 최적의 유동 도메인 크기를 확정하였다.

3.2 수치적 안정성과 Time step 및 격자조건

이 해석에서는 수중운동체가 수면에 충돌하여 발생하는 극초단기(ultra-short duration) 충격과 및 거시

적 유동 현상을 정밀하게 포착하기 위해 전체 해석 시간(termination time)을 0.01초로 설정하였다.

LS-DYNA와 같은 양해법(explicit method) 기반 솔버에서는 응력파의 전파 속도와 격자 크기에 따른 수치적 안정성을 보장하는 것이 필수적이다. 이를 위해 courant-friedrichs-lewy(CFL) 조건을 엄격하게 만족하도록 시간 적분 간격(time step)을 1×10^{-6} 초(1 μ s)의 미소 구간으로 제한하여 해석의 발산을 방지하였다.

대규모 병렬 처리가 아닌 단일 노드 연산 환경임에도 불구하고, 앞서 3.1절에서 언급한 도메인 최적화 및 비반사 경계조건 적용, 그리고 이처럼 보수적인 시간 간격 제어를 통해 시간적 민감도를 유효 수준 미만으로 통제하고 수치적 안정성을 확보하였다.

유체와 구조물의 거동을 모사하는 격자 크기는 유동의 해상도와 해석 시간을 종합적으로 고려하여 구조물(Lagrangian) 격자는 40 mm, 유체(Euler) 격자는 평면 20 mm, 깊이 40 mm를 기본 사양(case 2)으로 설정하였다.

나아가 이 연구에서 채택한 기본 격자 사양의 적절성과 공간 수렴성을 객관적으로 증명하기 위해, 입수 각도 3조건(60°, 70°, 90°)에 대하여 격자 해상도를 80 mm(case 1, coarse), 40 mm(case 2, base), 20 mm(case 3, fine)의 3단계로 변화시키며 정량적인 수렴성 검토를 수행하였다. 그 결과는 Table 2와 같다.

수렴성 검토 결과, 격자 사양이 가장 성긴 case 1 (80 mm)에서는 수치적 강성의 과대평가 및 유체-구조 경계면의 해상도 부족으로 인해 피크 가속도가 비현실적으로 오버슈트(overshoot)되는 현상이 경사 입수 조건에서 뚜렷하게 나타났다. 반면, 격자 해상도를 case 2(40 mm)를 거쳐 case 3(20 mm)으로 점차 조밀화함에 따라, 슬래밍 충격 에너지가 공간적으로 세분화된 격자에 의해 정상적으로 분산 및 완화된 뒤 60° 및 70° 조건에서는 피크 가속도가 점차 하향 안정화되는 전형적인 단조 수렴(monotonic convergence)

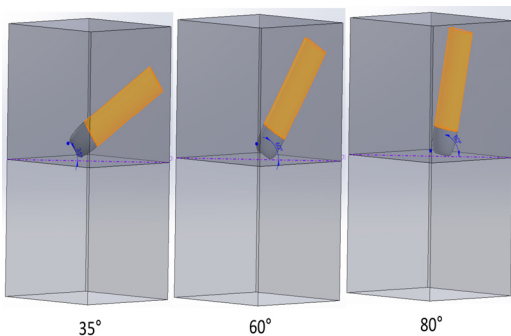


Fig. 7 Model setup by entry angle

Table 2 Grid-size angular peak-accel convergence

Impact angle	Case 1 (80 mm)	Case 2 (40 mm)	Case 3 (20 mm)
60°	109.0 g	50.0 g	38.0 g
70°	99.0 g	71.0 g	53.0 g
90°	416.0 g	562.0 g	504.0 g

경향성을 확인하였다. 또한, 충격 하중이 가장 극심한 90° 수직 입수 조건에서는 가속도가 상승한 후 다시 감소하며 500 g 대역을 중심으로 수렴해가 안정화되는 진동 수렴(oscillatory convergence) 특성을 나타내었다.

가장 조밀한 case 3 조건에서는 극도로 세분화된 유체 계면에서 발생하는 찰나의 고주파수 유체 동압 노이즈(hydrodynamic noise)가 순간 최대 가속도에 민감하게 반영되어 case 2와 국부적인 피크 값을 유발한다. 그러나 구조물에 전달되는 거시적인 전체 충격량(impulse)과 파형의 경향성은 격자 크기에 관계없이 일정하게 수렴하는 양상을 보였다.

무엇보다 격자 크기를 전체적으로 절반 수준으로 세분화(case 3)할 경우, 3차원 유동 도메인의 기하급수적인 격자 수 증가와 양해법 솔버의 시간 적분 간격(Δt) 감소 특성이 결합되어 전체 연산 비용이 약 8배 이상 폭발적으로 증가하게 된다.

단일 노드 연산 환경 하에서 입수 각도별 다량의 케이스 해석을 수행해야 하는 현실적인 전산 자원의 제약을 고려할 때, 이 연구에서 확인된 하향 수렴성 및 에너지 보존 특성을 근거로 계산 효율성과 공학적 하중 정밀도를 동시에 충족하는 case 2 사양을 최종 해석 스케일로 채택하는 것이 타당함을 확인하였다.

3.3 입수 조건별 수면 충격 및 유동 거동

(1) 초기 가속도 응답 및 충격 하중 특성

입수 각도 변화에 따른 수중운동체 선단부(음향 센서부)의 시간-가속도 응답 이력을 Fig. 8에 나타내었다. 해석 결과, 모든 입수 조건에서 수면 접촉 직후인 0.5 ms ~ 1.0 ms 구간에서 최대 충격 피크(peak impact)가 발생하였으며, 이후 급격히 감쇠(rapid decay)하는 전형적인 수면 충격(slamming) 거동을 보였다.

입수각에 따른 최대 충격 하중을 정량적으로 비교한 결과, 수직 입수(90°) 조건에서 최대 가속도가 약 562 g로 가장 높게 도출된 반면, 입수각이 가장 작은 35° 조건에서는 약 38 g 수준으로 급격히 감소하는 경향이 확인되었다. 이러한 현상은 수직 입수 시 평탄한 전면부 형상으로 인해 수면과의 접촉 면적이 순간적으로 극대화되면서 막대한 국부 충격 압력(local slamming pressure)이 집중되기 때문이다. 반면, 저각(사선) 입수의 경우 구조물과 자유 수면의 접촉 면적이 점진적으로 증가함에 따라 충격 에너지가 시간적·공간적으로 분산(dispersion)되어 최대 피크 값이 크게 저감되는 물리적 타당성을 보여준다.

또한, Fig. 8의 80°와 90°는 입수 각도 차이가 미세함에도 불구하고 피크치와 진폭 변화(oscillation)에서 큰 차이를 보인다. 이는 80° 경사 입수 시에는 하부

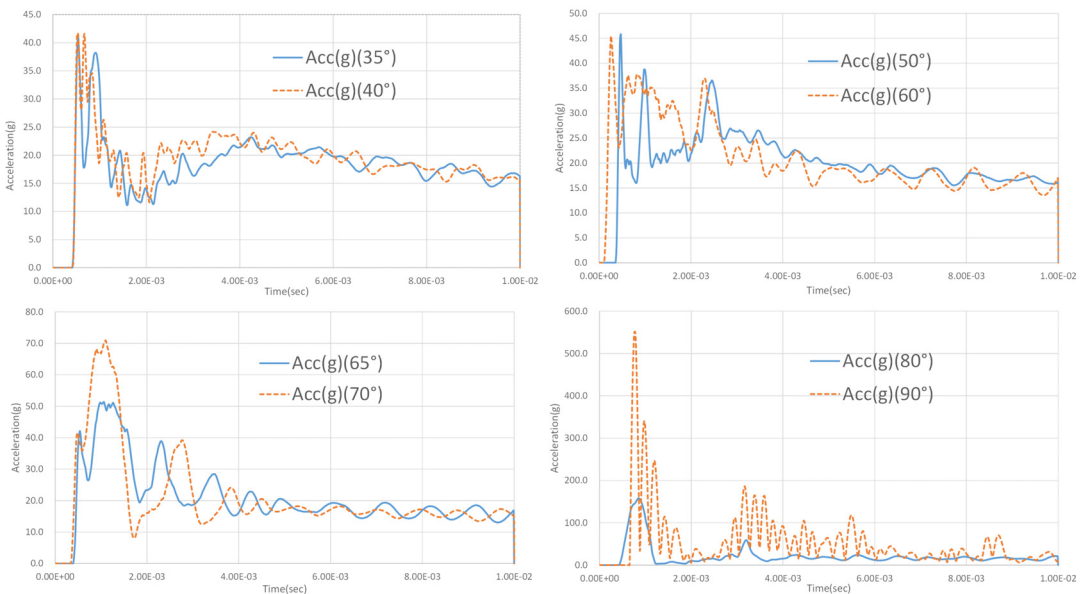


Fig. 8 Nose acceleration-time histories by entry angle

공기가 측면으로 원활히 배출되는 반면, 90° 수직 입수 시에는 하부 단면 전체가 수면에 동시 충돌하면서 미처 빠져나가지 못한 공기가 하부에 갇히는 공기 가둠 현상(air trapping)이 발생하기 때문이다. 이로 인한 공기 쿠션 효과(air cushioning effect)와 급격한 부가질량 변화율(dm/dt)이 복합적으로 작용하여 90° 결과에서 더 높은 피크치와 강한 고주파 진폭 변화가 나타나는 것으로 사료된다.

Fig. 8의 60°와 90° 결과 그래프의 초기값 증가 시점이 타 입수각과 다소 차이를 보이는 것은, 각도별 격자 생성(meshing) 과정에서 구조물 하부 단면과 수면(water surface) 간의 초기 이격 거리(initial clearance)가 미세하게 다르게 설정되었기 때문이다. 이는 물리적 거동의 차이가 아닌 수치해석 모델링상의 초기 시간 오프셋(time offset)에 기인한 것으로, 입수 순간의 피크치 및 이후의 동적 진폭 변화 경향성을 비교 분석하는 데에는 영향을 미치지 않는다.

(2) 입수각별 유동 변형 및 충격 지속시간

입수 시 발생하는 자유 수면의 변형 양상을 Fig. 9에 나타내었다. 자유수면 변형양상은 입수각에 따라 뚜렷한 차이를 보였다. 수직 입수(90°) 시에는 선단부

를 중심으로 완벽한 축대칭(axisymmetric)의 공기 공동(cavity)이 발달하며 초기 고압이 순간적으로 집중되었다. 그러나 35°의 저각 입수 시에는 궤적을 따라 수면이 비대칭적으로 찢어지며 유동이 한쪽으로 쏠리는 현상이 발생하였다.

이러한 수중운동체와 자유 수면 간의 비대칭적 슬라이딩(sliding) 거동은 앞서 3.3절 (1)에서 분석한 바와 같이 초기 충격 피크를 저감시키는 주된 원인으로 작용한다. 다만, 입수각이 작아질수록 충격 하중이 구조물에 가해지는 총 작용 시간(duration time)은 수직 입수 대비 뚜렷하게 연장되는 경향이 관찰되었으며, 이는 내부 구성품의 누적 피로 및 저주파수 응답 측면에서 중요한 설계 고려사항이 됨을 시사한다.

(3) 선단부 형상 효과 및 내부 충격 전달 경로

수치해석 결과, 입수 충격의 지속시간은 입수각이 작아질수록 증가하여 전체 충격 에너지가 시간축을 따라 분산되는 경향을 보였다. 90° 수직 입수의 경우, 평평한 음향 센서 전면부의 형상적 특성(blunt body effect)이 충격 증폭기 역할을 하여 극단적으로 짧은 시간 내에 막대한 하중을 발생시키며, 이는 센서 주변부의 심각한 집중 응력을 유발할 것으로 사료된다.

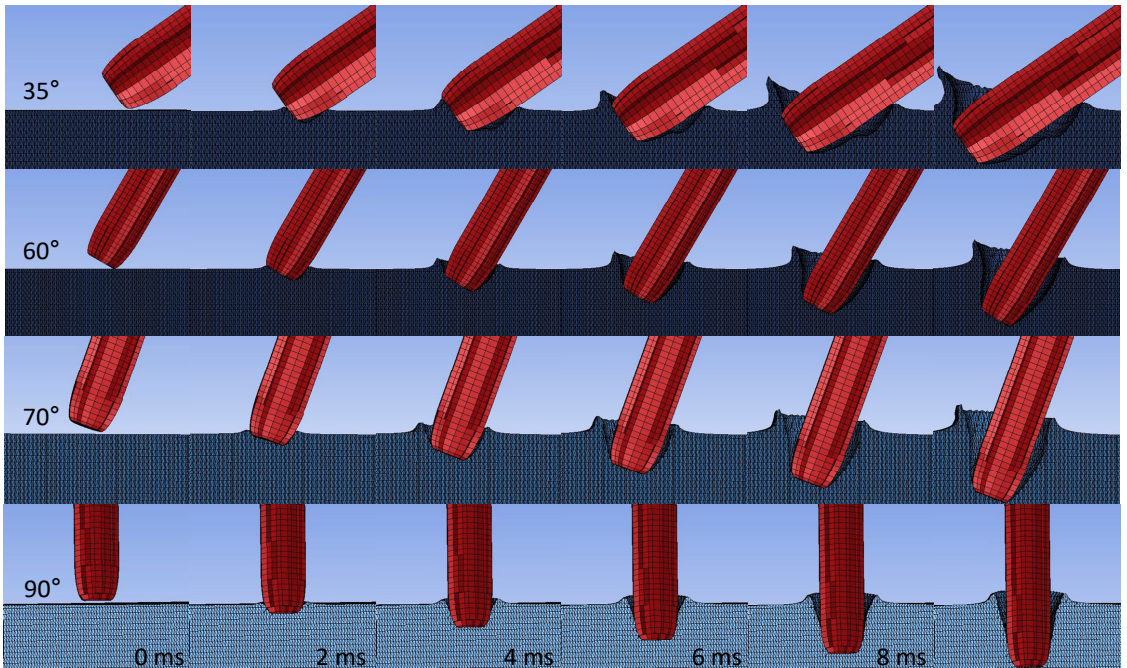


Fig. 9 Sequential snapshots of free-surface flow deformation for various entry angles

또한, 입수 각도의 변화는 외부 충격이 내부로 전달되는 하중 전달 경로(load path)의 변화를 수반한다. 입수 자세에 따라 내부 전자 장비 및 보드의 배치 각도 대비 하중 작용 방향이 달라지므로, 피크 하중의 감소가 반드시 내부 부품의 구조적 안전성 확보로 직결되지는 않는다. 이는 충격의 크기뿐만 아니라 지속시간과 전달 경로를 복합적으로 고려한 내부 부품 손상 평가가 필수적임을 시사한다.

4. 수치해석 결과의 타당성 검증

4.1 이론식 및 선행 연구와의 비교 고찰

이 수치해석 모델의 신뢰성을 검증하기 위해, 입수 각도별 최대 가속도 응답(maximum acceleration)을 기존 이론식 및 선행 연구 결과와 비교 분석하였다. Fig. 10은 von Kármán 모델과 Wagner 근사식에 기반한 Kim과 Dokko의 선행 연구의 계산 결과와 이 연구의 LS-DYNA S-ALE 해석 결과를 입수 각도별로 대조한 그래프이다^(4,5).

선행 연구들의 가속도 시계열 데이터는 수학적 수식으로 도출된 해석해(analytical solution)에 기반하고 있어, 수면 충돌 시 발생하는 유체동역학적 고주파수 진동 성분(hydrodynamic noise)이 배제된 이상화된 곡선 형태를 띤다. 또한, 각 연구마다 대상 모델의 제원(무게, 입수 속도, 3차원 형상 등)이 상이하므로, 이 명시적(explicit) 수치해석 결과와 매 시간 단계

(time step)마다 1:1로 대조하여 평균 제곱근 오차(RMSE) 등 시계열 오차를 산출하는 것은 수학적·물리적 타당성이 결여된다.

이에 따라 이 연구에서는 고속 슬래밍 충격 문제에서 구조적 건전성 평가의 가장 지배적인 공학적 지표인 ‘입수 각도별 최대 충격 가속도(peak acceleration)’ 및 그 경향성을 기준으로 정량적 타당성 검증을 수행하였다.

분석 결과, 전반적인 입수 각도 변화에 따른 최대 충격 하중의 비선형적 증감 경향성이 수치해석과 기존 이론식에서 매우 유사하게 도출됨을 확인하였다.

세부적인 정량적 수치를 살펴보면, 입수 각도 65° 부근에서는 이 해석 결과가 선행 연구의 예측치보다 근소하게 낮은 반면, 고각(수직에 근접) 및 저각(수평에 근접) 입수 조건에서는 해석상의 최대 가속도가 상대적으로 5 g ~ 10 g 높게 산출되는 경향이 관찰되었다.

이러한 국부적인 하중 편차는 주로 기존 이론식이 2D 기반의 비압축성 유동을 가정하는 데 반해, 이 연구의 S-ALE 해석은 3D 유동 발달과 매질의 압축성(compressibility)을 직접적으로 모사하기 때문인 것으로 분석된다. 저각 입수 시에는 비대칭 유동을 타고 오르는 젖음 면적(wetted area)의 급격한 증가가, 고각 입수 시에는 수면 타격 순간의 초단기 압축과 효과가 충격량을 상승시킨 원인으로 작용하였다. 반면 65° 부근에서는 선단부를 통한 유동 박리(flow separation)가 원활히 구현되어 부가 질량 효과가 이

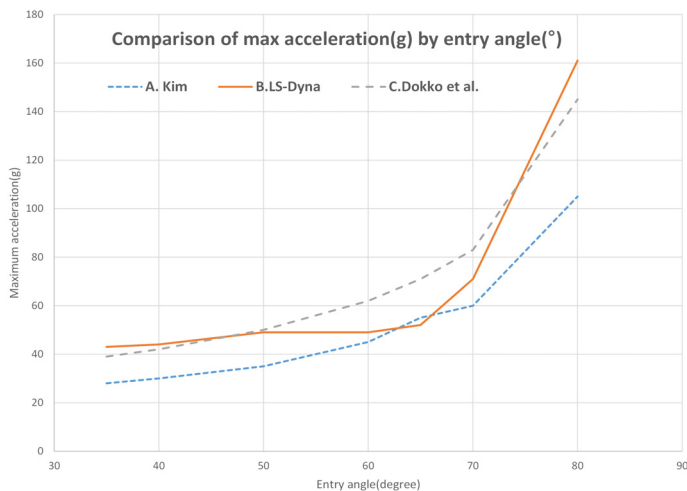


Fig. 10 Comparison with previous studies

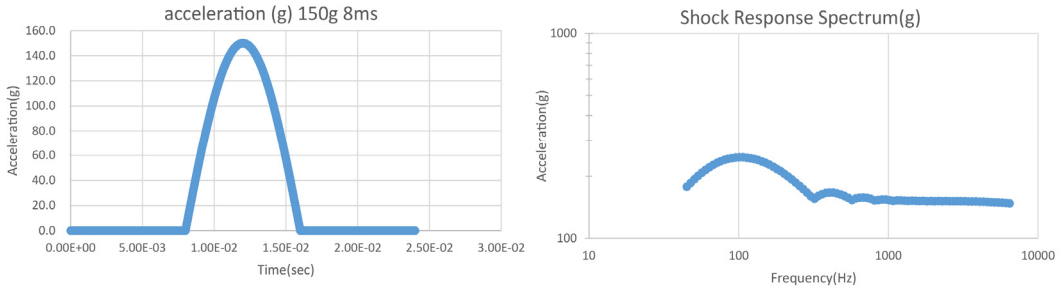


Fig. 11 Torpedo time-shock history and SRS

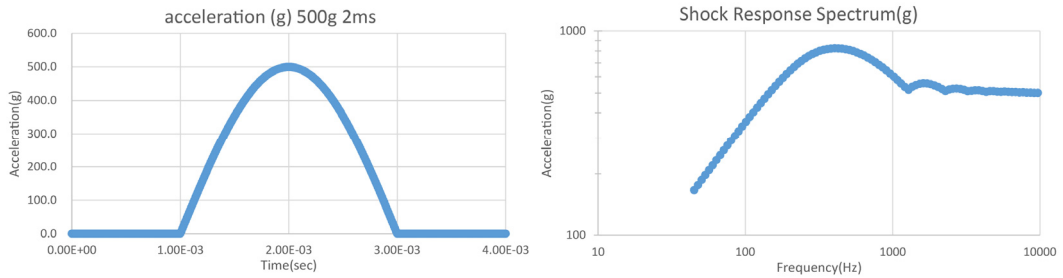


Fig. 12 MIL-S-901 time-shock history and SRS

론식 대비 현실적으로 완화된 것으로 판단된다.

전반적인 편차가 ± 10 g 이내의 미미한 수준임을 고려할 때, 결과적으로 이 해석 모델은 기존 이론식의 한계를 보완하여 복잡한 3D 입수 물리 현상을 매우 타당하게 재현하고 있음을 입증한다.

5. 구성품 단위의 기존 시험 규격과의 비교

5.1 구성품 단위의 충격 응답 고찰

(1) 기존 구성품 내충격 시험 규격 검토

수중운동체 내부 탑재 장비의 충격 생존성을 평가하기 위해 일반적으로 적용되는 대표적인 군사 규격으로는 Fig. 11의 어뢰 충격 규격(MIL-T-18404)과 Fig. 12의 함정 탑재 장비 내충격 규격(MIL-S-901)이 있다. 어뢰 규격의 경우, 취급 및 일반적인 운용 환경을 주로 모사하므로 SRS(shock response spectrum) 분석 시 상대적으로 고주파수(high-frequency) 대역의 응답이 낮게 나타나는 특성이 있다. 반면, 수중 폭발 등에 의한 가혹한 충격을 모사하는 MIL-S-901 규격은 속도 충격(velocity shock) 현상을 기반으로 하므로, 실제 타격 현상 자체에는 상당한 고주파 충격

성분이 내재되어 있다. 그러나 실제 시험 및 평가 과정에서 주로 구조물의 전역적인 거동(global response)과 저·중주파수 대역의 파손을 핵심 평가 대상으로 삼기 때문에, 데이터 처리 시 고주파수 대역의 신호를 필터링(low-pass filtering)하여 제거하는 것이 일반적이다. 이로 인해 도출된 표준 충격 프로파일이나 SRS 상에서는 고주파 대역의 충격 가혹도가 배제되거나 실제보다 현저히 낮게 표현되는 한계가 존재한다.

(2) 입수충격의 SRS 응답 특성 및 파손 메커니즘

이 연구에서 수행한 LS-DYNA 수면 입수 해석 결과의 시간-충격 하중 이력을 SRS로 변환하여 분석한 결과(Fig. 13), 기존 시험 규격들의 SRS 양상과는 확연히 대비되는 주파수 응답 특성이 확인되었다. 고속 입수 시 발생하는 슬래밍(slamming) 충격은 1000 Hz 이상의 고주파수 대역에서 두드러지게 높은 SRS 응답을 유발하며, 이는 입수 각도가 90°(수직 입수)에 가까울수록 더욱 증폭되는 경향을 보였다. 이러한 해석 결과는 내부 구성품의 파손 메커니즘에 있어 매우 중요한 시사점을 제공한다. 평가 목적상 고주파 성분



Fig. 13 Nose shock-response-spectrums by entry angle

을 인위적으로 필터링하는 MIL-S-901 방식이나 애초에 고주파 응답이 낮은 MIL-T-18404 규격만으로는 수면 입수 시 발생하는 초단기의 강력한 고주파 충격 에너지를 온전히 대변하기 어렵다. 수면 타격으로 발생한 이 고주파 진동 에너지는 필터링 없이 외피(hull)를 거쳐 내부의 정밀 전자 장비나 센서류 등 단위 구성품으로 여과 없이 전달된다. 결과적으로 이는 내부 소형 구조물들의 고유진동수를 자극하여 국부적인 공진을 유발하거나, 예상치 못한 피로 파괴 및 취성 파손(brittle failure)을 초래하는 주된 원인이 될 수 있다.

6. 결 론

이 연구에서는 다물질 오일러리안(multi-material Eulerian) 기반의 LS-DYNA S-ALE 기법을 활용하여 수중자율운동체의 수면 고속 입수 시 발생하는 유체동역학적 충격 거동을 수치 해석적으로 분석하고, 이를 바탕으로 내부 구성품의 충격 응답 특성과 파손 메커니즘을 고찰하였다. 이 연구를 통해 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

(1) S-ALE 기반 입수충격 해석기법의 타당성 검증
입수 각도 변화에 따른 수중자율운동체 선단부의 최대 가속도 응답을 선행 연구의 이론적 예측치와 비교한 결과, 전반적인 하중 증감 경향이 높은 일치도를 보였다. 특히, 비압축성 유체를 가정하는 기존 2D 기반 이론식과 달리, 이 해석 기법은 저각 입수 시의 3D 비대칭 유동 발달과 고각 입수 시의 유체 압축성(compressibility) 효과를 성공적으로 모사하였다. 이를 통해 실제 수면 타격 시 발생하는 복잡한 유체-구조 상호작용을 보다 현실적이고 정밀하게 반영할 수 있음을 확인하였다.

(2) 기존 내충격 시험 규격의 한계성 규명
산출된 입수 충격 하중을 주파수 영역(SRS)으로 변환하여 기존 군사 규격과 대조한 결과, 수면 입수 충격은 1000 Hz 이상의 고주파수 대역에서 두드러지게 높은 가속도를 나타냈다. 취급 환경을 주로 모사하는 어뢰 규격(MIL-T-18404)이나, 속도 충격을 가하지만 평가 과정에서 구조물의 전역적 거동에 집중하여 고주파 대역을 필터링하는 함정 규격(MIL-S-901)만으로는 이러한 초단기 고주파 충격의 특성을 온전히 대

변하기 어렵다는 점을 규명하였다.

(3) 내부 구성품 단위의 파손 메커니즘 고찰

수면 입수 시 발생하는 강력한 고주파 충격 에너지는 외피를 거쳐 내부 구성품으로 여과 없이 전달된다. 이는 기존 규격 시험에서는 간과되기 쉬운 소형 전자 장비 및 정밀 센서류의 국부적인 고유진동수를 자극하여 공진 및 예상치 못한 취성 파손을 유발하는 핵심 원인으로 작용한다.

(4) 향후 내충격 설계 방향 제시

결과적으로, 고속으로 수면에 입수하는 수중자율운동체 및 수중 무기체계의 신뢰성을 확보하기 위해서는 기존 표준 규격에만 의존하는 보수적인 접근에서 벗어나야 한다. 향후 운용 플랫폼의 내충격 설계 시에는 전체 구조물 단위의 안전성 뿐만 아니라, 입수 충격 고유의 고주파 응답 특성을 반영한 단위 구성품 수준(component-level)의 세밀한 생존성 평가가 반드시 병행되어야 할 것이다.

이 해석 방법론은 향후 다변화되는 해양 환경에서의 입수 충격력 예측, 내부 부품 생존성 향상을 위한 보호 설계, 그리고 충격 저감형 선형 최적화 분야에 실용적인 엔지니어링 도구로 널리 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

References

(1) von Karman, T., 1929, The Impact on Seaplane Floats during Landing, National Advisory Committee for Aeronautics, NACA-TN-321, DC, United States.

(2) Boef, W. J. C., 1992, Launch and Impact of Free-fall Lifeboats, Part I. Impact Theory, Ocean Engineering, Vol. 19, No. 2, pp. 119~138.

(3) Arai, M., Khondoker, R. and Inoue, Y., 1995, Water Entry Simulation of Free-fall Lifeboat, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 178, pp. 193~201.

(4) Kim, C. K., 2000, Approximation Method to Estimate Water Entry Impact Forces Acting on Light Weight Torpedo, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 37, No. 2, pp. 77~87.

(5) Dokko, W. and Kim, I. H., 2002, The Impact Analysis for Water-entry of Cylindrical Body, Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 15, No. 1, pp. 1~8.

(6) Kim, C. and Hwang, Y., 2017, Impact Analysis on Water Entry of Gliding Vehicle using Finite Element Method, Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 20, No. 4, pp. 467~473.

(7) Wang, Y., 2012, Numerical Modeling Approach of an Air-launched AUV Initially Impacting on Water, Proceedings of the National Conference on Information Technology and Computer Science, pp. 336~340.

(8) Lee, J. H., Kang, D. S., Choi, J. H., Kang, Y. S. and Lee, C. M., 2015, Designing Electronics for High Frequency Shock, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 25, No. 10, pp. 700~706.

(9) Marsh, S. P., 1980, LASL Shock Hugoniot Data, University of California Press, Berkeley, CA, United States.