Journal of the KIMST, Vol. 20, No. 4, pp. 467-473, 2017
ISSN 1598-9127
DOI http://dx.doi.org/10.9766/KIMST.2017.20.4.467

Technical Paper 구조 · 기기 부문

유한요소 해석을 통한 활공비행체의 입수충격해석

김찬규*,1) · 황영은1)

1) 국방과학연구소 제2항공체계개발단

Impact Analysis on Water Entry of Gliding Vehicle using Finite Element Method

Changyu Kim*,1) · Youngeun Hwang1)

1) *The 2nd Aircraft PMO, Agency for Defense Development, Korea*

(Received 11 October 2016 / Revised 15 February 2017 / Accepted 16 June 2017)

ABSTRACT

In this paper, impact characteristics of a water entry gliding vehicle were analyzed using a finite element method. To guarantee the validity of analysis results, a convergence test was performed for several ratios of Euler and Largrange mesh sizes. The impact coefficient was calculated with respect to entry angles and angle of attacks. It can be observed that the impact coefficient was large at a high cross-section gradient and was also affected by cavitation. This study could be useful in the preliminary design stage of a water entry bomb development.

Key Words : Gliding Vehicle(활공비행체), Fluid-Structure Interaction(유체-구조 연동해석), Finite Element Method(유한요소법), Cavitation(공동현상)

1. 서 론

무추력 자율 활공 유도무기는 저가의 재래식 폭탄에 유도제어장치를 장착한 무기체계로서 원거리에서 투하하여 은밀성과 투하 항공기의 생존성을 높일 수 있는 장점을 가지고 있다. 최근에는 수중무기체계에 자율 활공 무기의 유도제어장치를 장착하여 원거리에서 투하할 수 있는 무기체계 개발에 대한 관심이 높아지고 있다[1]. 이러한 수중무기체계가 항공기에 의해 원거리에서 투하되면 해수면 입수 과정을 거치고 이후 수중에서 무기로써 임무를 수행한다. 이때 해수면에 입수시 탄체와 내부 구성품 등이 입수충격에 의해 강건하도록 설계되어야 한다. 이를 위해서는 탄체의 입수속도, 입수자세에 따른 신뢰성 있는 충격력 획득이 필수적이다. 또한 최근에는 입수시 발생하는 충격력을 신관의 무장(Arming) 기준으로 적용하기 때문에 입수충격력 획득에 대한 관심이 높아지고 있다.

입수 충격력 획득을 위해서는 수중무기체계에 충격센서를 장착함으로써 입수충격시험을 통해 충격력을 계측하는 방법이 가장 타당하지만 시험설비를 구성하기 힘들고 고비용이 요구된다. 따라서 초기 설계단계

* Corresponding author, E-mail: cgkim@add.re.kr

에서 공학적 분석을 통한 효율적이고 신뢰성 있는 입수충격력 추정이 요구된다.

입수충격력 추정방법은 부가질량개념이 적용된 운동량 이론을 통해 충격력을 추정하는 방법이 Von Karman[2], Boef[3] 등을 통해 오래전부터 연구되어 왔다. 하지만 이러한 부가질량개념이 적용된 방법은 입수체의 부가질량 모델을 어떻게 정의하느냐에 따라 추정된 가속도 값이 매우 다르게 나타나며, 비행체의 속도, 자세, 형상 등 모든 요소를 이론적으로 고려하여 타당한 충격력을 추정하기에는 어려움이 있다. 특히 자율 활공무기는 탄체에 활공을 위한 유도키트가 장착된 비대칭 형상이기 때문에 기존 운동량 이론을 통한 충격력 추정은 정확도가 떨어진다. 또한 탄체가 입수시 발생하는 1차 충격과 유도키트가 입수할 때 발생하는 2차 충격이 있을 것으로 예상되며 이에 따른 충격 특성을 파악하기에는 어려움이 있다. 따라서 최근에는 비행체의 형상을 실제형상과 흡사하게 모델링하고 이에 대한 유체-구조 연성해석을 통해 입수충격력을 구하는 유한요소해석 방법이 시도되고 있다.

유한요소법을 통한 입수충격해석은 유체-구조 연성(FSI : Fluid-Structure Interaction) 해석 기법이 적용된다. FSI 기법에서 입수충격해석은 해석하고자 하는 형상과 경계조건에 따라 구조체 요소와 유체 요소의 다양한 커플링 방법이 있다. 여러 연구자들에 의해 입수충격 해석에 적용된 커플링 방법을 살펴보면, Wang Yonghu[4]는 LS-Dyna 해석 프로그램을 기반으로 ALE (Arbitrary Lagrange-Euler) Coupling 방법을 적용하여 항공기 투하용 AUV(Autonomous Underwater Vehicle)의 입수충격해석을 수행하였고, 입수자세에 따라서 비행체의 충격력에 미치는 영향을 확인하였다. 김 등[5]은 발사체가 연료탱크에 충돌할 때 발생하는 충격파 해석을 위해 Dytran 상용 해석 프로그램을 기반으로 General Coupling 방법을 적용하여 유효한 해석결과를 도출하였다.

본 연구에서는 고속으로 입수하는 활공비행체의 입수충격거동을 평가하기 위해 비행체, 공기, 해수를 유한요소로 모델링하고 MSC Software사의 Dytran 해석 상용툴을 사용하였다. 이때 해의 적절성을 확보하기 위해 요소크기에 따른 해의 수렴성을 검토하였으며 모델의 요소크기를 결정한 후 입수자세별 시간에 따른 입수충격 특성을 비교하고 분석하였다. 또한 입수각도, 입수 직전의 AOA(Angle of Attack) 자세에 따른 충격특성을 분석하였다.

2. 해석 방법

2.1 비행체 형상 모델링

Fig. 1에는 본 연구에서 고려한 비행체의 해석모델을 나타내었다. 좌측 그림은 유도제어장치와 탄체로 구성되어 있는 전장 2.5 m를 가지는 실제 비행체의 형상이고, 우측 그림은 유한요소 해석 모델이다. 여기에서 비행체의 주익 강도는 매우 약하기 때문에 입수시에 쉽게 파손이 되며 탄체의 충격력에 미치는 영향이 미미하다고 가정하여 해석모델에서 주익을 제외하였다.

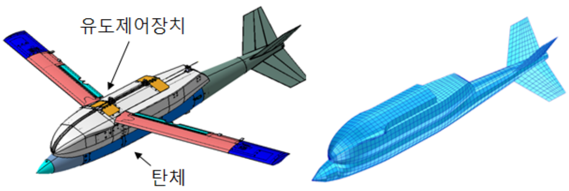


Fig. 1. Gliding vehicle model for finite element analysis (left : real model, right : analysis model)

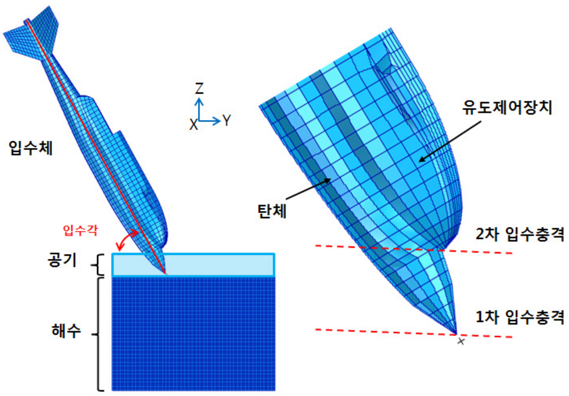


Fig. 2. Finite element model for impact behavior analysis

2.2 해석 조건

Fig. 2에는 활공입수탄, 공기층, 해수층에 대한 유한요소 모델이 나타나 있다. 비행체는 강체를 고려한 라그랑지 요소로 모델링하고, 공기층과 해수층은 오일러 요소로 모델링 하였다. 이때 공기층은 이상 압축가스로 가정하였으며 해수층은 비점성 압축유체로 가정하였다. 본 연구에서는 유체-구조 연성해석을 위해 General coupling 방법을 적용하였다[6]. General Coupling 방법은 고정된 오일러 요소 사이에 라그랑지 요소가

침투되면서 라그랑지 요소의 경계가 오일러 요소의 유동 경계조건이 되며 경계면인 Coupling Surface를 통해 오일러 요소와 라그랑지 요소간의 상호작용을 계산하는 기법이다. 본 모델의 해를 구하기 위해 유한요소 상용 해석 툴인 Dytran 2013(MSC Software)을 사용하였다. Table 1에는 공기층과 해수층의 모델링 및 물성치가 나타나 있다.

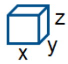
Table 1. Input data of air, sea water and gliding vehicle

Air	Element Type	Euler Element (8-node Hexagonal type)
	Density	1.184 kg/m^3
	Specific heat ratio	1.4
	Gas Constant	286 J/kg·°K
	Specific internal energy	213548 J/g
	Shape of boundary (x × y × z)	1.0 m × 1.5 m × 0.1 m
Sea Water	Element Type	Euler element (8-node Hexagonal type)
	Density	1,000 kg/m^3
	Bulk modulus	200.2 GPa
	Flow definition of boundary	FLOW OUT
	Shape of boundary (x × y × z)	1.0 m × 1.5 m × 1.0 m
Gliding vehicle	Element Type	Lagrange element (4-node shell type)
	Mass, CG, Moment of Inertial	Omitted

2.3 해의 수렴성 검토

유체-구조 연성해석에서 라그랑지 요소와 오일러 요소의 크기비율에 따라 해의 수렴성과 정확도가 다르게 나타난다. 일반적으로 오일러 요소의 크기가 작을수록 더 정확한 해를 나타내지만 해석시간이 길어지는 단점이 있다. 따라서 해석시간과 해의 수렴성을 고려하여 라그랑지 요소와 오일러 요소의 적합한 크기 비율을 선정해야 한다. 따라서 비행체의 라그랑지 요소는 4 cm로 고정하고 Table 2와 같이 Case에 따라 요소크기를 달리하여 해석을 수행하고 수렴도를 평가하여 요소크기를 결정하였다. 이때 해석의 시간간격의 초기값은 3×10^{-7} sec으로 설정하였으며, 수렴된 값은 4×10^{-6} sec 수준으로 나타났다.

Table 2. Element size and quantity for convergence test

Element type		Case	Element size (x × y × z)	Element quantity
Air/Sea water	 Hexagonal	(A)	4 cm × 4 cm × 4 cm	25,781
		(B)	3 cm × 3 cm × 3 cm	206,250
		(C)	2 cm × 2 cm × 2 cm	1,650,000
		(D)	1 cm × 1 cm × 1 cm	13,200,000
Gliding vehicle	Shell	-	4 cm × 4 cm	2,532

2.4 입수 조건에 따른 해석

비대칭 형상의 비행체는 입수자세에 따라 입수충격 특성이 다르게 나타난다. 따라서 입수자세의 경향성을 파악하기 입수자세에 따른 파라메틱 스터디를 통해 충격거동을 분석하였다. Table 3에는 입수조건 파라메타의 입력값이 나타나 있다.

Table 3. Input parameters for water entry

	Input parameter
Impact speed	170 m/s
Impact angle	30°, 50°, 70°, 90°
Angle of attack	-8°, -4°, 0°, 4°, 8°

3. 해석 결과

3.1 충격계수 산출

비행체의 충격특성을 분석하기 위해 무차원 충격계수를 구하였다. 탄체 축방향의 무차원 충격계수(Axial Impact Coefficient)는 식 (1)과 같이 정의된다[7].

$$C_{Axial} = \frac{F}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \tag{1}$$

이때 F는 충격력, ρ는 바닷물의 밀도, V는 탄체 축방향 입수속도, A는 탄체 축방향 최대 단면적 이다.

3.2 해의 수렴성 검토

Fig. 3에는 해의 수렴성 검토를 위해 수행된 해석결과가 나타나 있다. 여기에서 (A)와 (B)를 보면 오일러 요소가 클수록 해의 요동이 더 크고 최대 충격계수 값도 더 높게 나타나 불안정적으로 해가 수렴함을 알 수 있다.

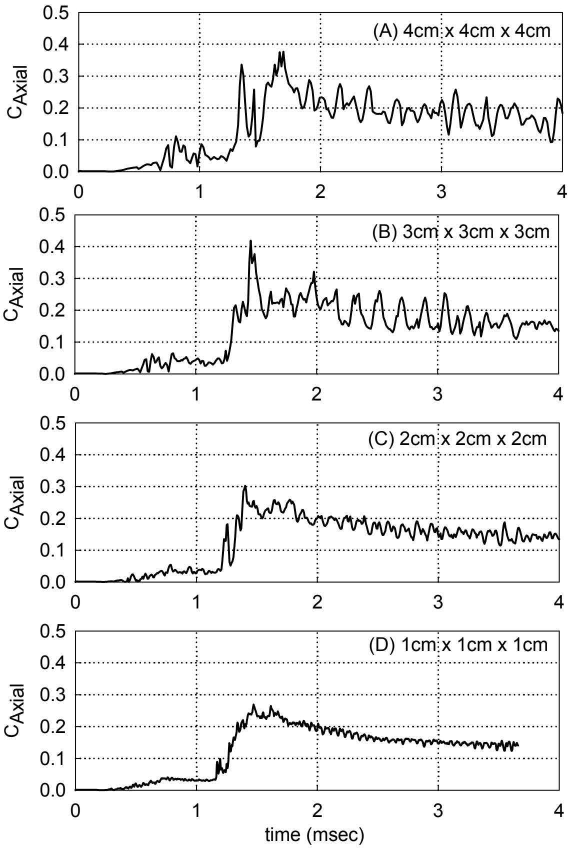


Fig. 3. Results of axial impact coefficient according to Euler element sizes

요소크기가 2 cm인 (C)의 시간-충격계수 선도를 보면 (A), (B)에 비해 해의 요동이 줄어들긴 했지만 전체적으로 불안정한 수렴을 보인다. (D)의 시간-충격계수 선도를 보면 (C)에 비해 해의 요동현상이 현저하게 줄어들면서 안정적인 해가 나타났다. 따라서 해석시간과 해의 안정성 측면에서 볼 때 (D)에서 고려한 1 cm의 요소크기가 적용된 경우 해가 안정적임을 알 수 있다. 이를 미루어 볼 때 본 비행체의 경우 오일러 요소와 라그랑지 요소의 크기비가 4:1이 타당하다고 판단된다.

본 해석과 같이 외연적 적분법(Explicit time integration)이 적용된 충격해석은 결과선도가 요동이 많이 발생하기 때문에 저역통과필터(Low-Pass Filter)를 통해 안정된 해를 얻는 방법이 있다[8]. Fig. 4에는 요소크기 4:1 비율에 대한 결과에서 100Hz 저역통과필터를 적용한 충격계수 선도가 나타나 있다. 여기에서 보면 필터에 의해 요동이 충분히 안정된 결과를 얻을 수 있다.

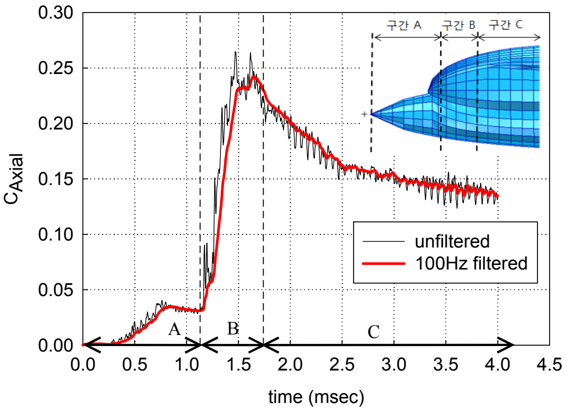


Fig. 4. Results of low-pass filter for time vs. impact coefficient curves

결과를 분석 해 보면 구간 A에서는 낮은 충격 계수가 나타나다가 구간 A에서 구간 B로 바뀌는 지점에서 유도제어장치 부분이 입수하면서 충격계수가 0.25 수준으로 크게 나타났다. 이러한 이유는 입수단면의 변화율이 크면 충격계수값이 크게 나타나기 때문이다[2]. 구간 B 이후에는 단면의 크기가 일정하게 나타나면서 충격계수값이 점차 감소하는 경향이 나타났다.

3.3 입수조건에 따른 해석 결과

Fig. 5에는 170 m/s로 입수하는 활공비행체의 입수각도에 따른 시간-충격계수 선도가 나타나 있다. 선도를 보면 비행체의 탄체가 충격하는 1차 충격과 유도제어장치가 충격할 때 발생하는 2차 충격이 나타남을 알 수 있다. 여기에서 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 1차 충격시 발생하는 충격계수 선도를 확대해서 보면 입수각도가 가장 작은 30 deg인 경우 충격계수가 0.046

으로 가장 크게 나타났으며 입수각도가 클수록 충격계수값이 점차 낮게 나타났다. 입수 충격력은 입수단면(Frontal Area)의 변화율에 따라 충격계수값이 크게 나타난다. 따라서 입수각도가 작을수록 입수단면의 변화율이 크고 이에 따라 충격계수값도 큰 경향을 나타낸다. 2차 충격을 보면 입수각도가 클수록 1차 충격과는 반대로 입수각도가 클수록 충격계수가 높게 나타났다. 이러한 이유는 Fig. 4에 나타낸 유도키트 형상에서 유도키트 부분이 90 deg 입수할 경우 입수단면의 변화율이 가장 크기 때문에 입수충격력이 크게 나타났다고 판단된다. 따라서 입수각도가 작을수록 2차 충격은 낮게 나타남을 알 수 있다.

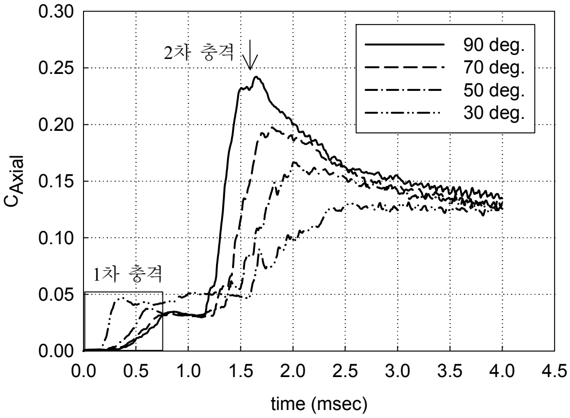


Fig. 5. Time vs. impact coefficient curves for various impact angle

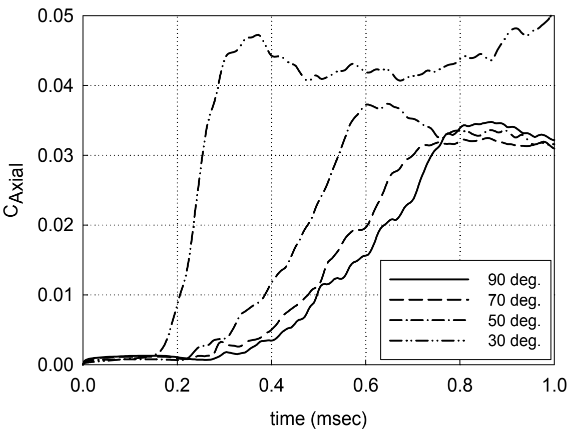


Fig. 6. Time vs. impact coefficient curves for various impact angle(1st impact)

Fig. 7에는 입수속도 170 m/s, 입수각도 60 deg의 자세를 가지는 비행체의 AOA(Angle of Attack)에 따른 시간-충격계수 선도를 나타내었다. 입수시 1차 충격에서는 AOA가 클수록(비행체 Pitch UP) 충격력이 크게 나타나고, AOA가 작을수록(비행체 Pitch Down) 충격력이 낮은 경향이 나타났다. 그리고 2차 충격에서는 반대로 AOA가 작을수록(비행체 Pitch Down) 충격력이 크고 AOA가 클수록(비행체 Pitch UP) 충격력이 작게 나타났다. 이러한 경향은 입수단면과 연관성이 있으며, 단면의 변화율이 클수록 충격력이 크게 나타남을 알 수 있다.

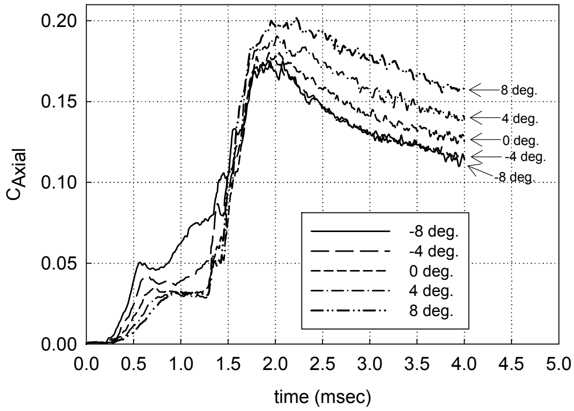


Fig. 7. Time vs. impact coefficient curves for various angle of attack(impact angle : 60°)

4. 해석 결과 고찰

입수충격에 대한 이론적 접근을 통한 연구결과에 따르면 입수단면에 따라 충격력에 영향이 있을 것으로 예상된다[9]. 따라서 본 연구에서 고려한 비행체 형상을 입수각도에 따른 입수단면의 변화율을 구하여 결과를 비교 분석하였다.

Fig. 8에는 입수각도에 따른 탄체 길이(X/L)에 대한 단면변화율(dA/dX) 선도를 나타내었다. X/L이 0 – 0.5 구간에서 첫 번째 변화율 피크가 나타난다. 이때 입수각도가 클수록 단면변화율의 크기와 기울기가 크게 나타나는 경향을 가진다. 따라서 충격계수값도 1차 충격에서 입수각도가 클수록 충격력이 크게 나타나는 경향을 가진다. 하지만 두 번째 피크에서는 90 deg – 60 deg 까지는 입수단면 변화율과 충격계수값이 경향

을 가짐을 알 수 있다. 하지만 50 deg – 30 deg 범위에서는 두 번째 피크에서 경향과는 다르게 단면 변화율이 크게 나타남을 알 수 있다. 이러한 경향은 단순히 비행체 형상에 대한 단면변화율은 입수시 발생하는 공동현상(Cavitation Effect) 등을 고려하지 못하기 때문으로 추측된다. Fig. 9에는 비행체와 해수요소의 압력분포가 나타나 있다. 여기에서 보면 입수속도에 의해 해수의 압력이 낮아져서 비행체 주변에 일정 영역에 공동현상이 발생함을 알 수 있다. 탄체 전방에는 공동현상이 거의 없지만 유도제어장치 부분에서 공동

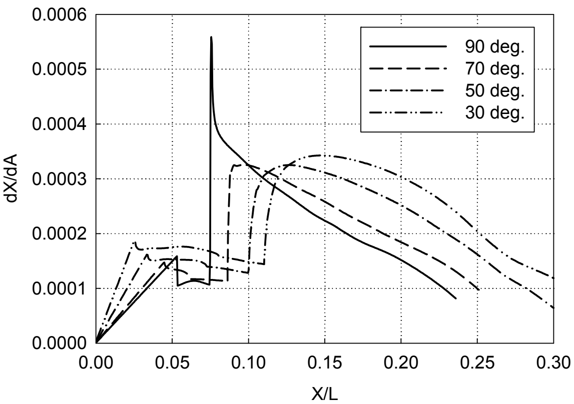


Fig. 8. Change rate of cross-section area for various impact angle

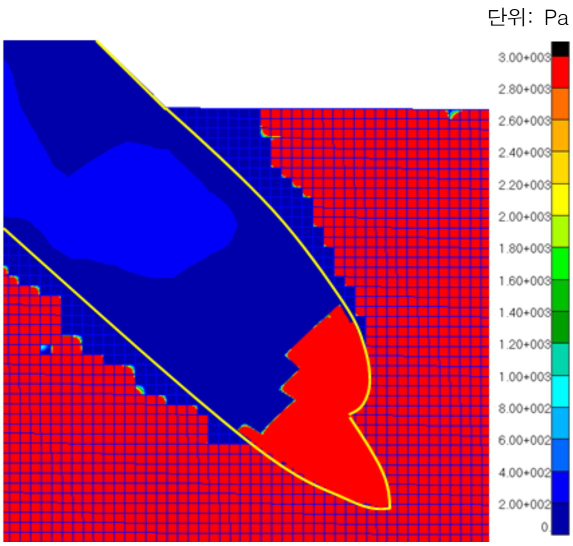


Fig. 9. Pressure distribution of lagrange(gliding vehicle) and euler(sea water) element

현상이 발생하며 입수각도가 작을수록 공동크기가 더 크게 나타난다. 따라서 2차 충격에서는 단면의 변화율과 입수충격과의 관계의 경향이 명확히 나타나지 않은 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 유한요소해석을 통해 고속으로 입수하는 활공비행체의 입수자세(입수각도, AOA)에 따른 충격계수값을 산출함으로써 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 본 연구에서 적용한 형상은 입수각도가 높을수록 충격력이 크게 나타났으며 8deg – -8deg 수준의 AOA는 입수충격력에 크게 영향을 미치지 않음을 확인하였다.
(2) 입수 단면적의 변화율 높은 시점에서 입수충격력이 크게 나타나는 경향을 확인하였으며 공동현상이 입수충격력에 영향을 미침을 알 수 있었다.

본 연구를 통해 활공비행체의 초기 설계단계에서 필요한 입수충격특성 예측하였으며 추후 충격계측장치를 장착한 계측탄을 활용하여 비행시험을 통해 실제 충격력을 계측하여 유한요소 해석결과를 검증할 예정이다. 이를 통해 활공비행체 개발을 위한 내충격 설계 자료로 활용하고자 한다.

References

[1] D. Kim, H. Lee, D. Lee, and Y. Park, “A Study On Design Development of Korea Precision Flying Sea Mine System,” KIMST Annual Spring Conference Proceedings, pp. 1605-1606, June, 2015.
[2] K. Von, “The Impact on Seaplane Floats during Landing,” National Advisory Committee for Aeronautics, Technical Note No. 321, 1929.
[3] W. J. C. Boef, “Launch and Impact of Free-Fall Lifeboats. Part Ⅰ. Impact Theory,” Ocean Engng. Vol. 19, No. 2, 1992.
[4] W. Yonghu, “Numerical Modeling Approach of an Air-launched AUV Initially Impacting on Water,”

CITCS 2012.
[5] J. Kim, S. Kim, “Battle Damage Analysis of Aircraft Wing Fuel Tanks by Hydrodynamic Ram Effect,” The Korean Society for Aeronautical Space and Sciences, Vol. 34, No. 4, pp. 17-24, 2006.
[6] MSC Software “Dytran Theory Manual Chapter 2 Principles of the Eulerian and Lagrangian Solvers,” pp. 13-20, 2007.
[7] Y. Kim, W. Park and C. Kim, “Numerical Analysis of Impact Forces and Entry Behaviors of the High Speed Water Entry Bodies,” Journal of Computational Fluids Engineering, Vol. 4, No. 1, pp. 1-7, 1999.
[8] J. T. Wang and K. H. Lyle, “Simulating Space Capsule Water Landing with Explicit Finite Element Method,” 48th AIAA Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, pp. 23-26, 2007.
[9] C. Kim, “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. 77-78, 2000.