

고속충돌 및 초고속충돌 강판구조물의 대변형 관통문제에 관한 연구

원석희*, 이경언*, 고재용**, 이계희**, 이재명***, 백점기****, 이성로*****

*부산대학교 조선해양공학과 대학원, **목포해양대학교 해양시스템공학부 부교수

부산대학교 조선해양공학과 조교수, *부산대학교 조선해양공학과 교수

*****목포대학교 건축조경토목공학부 교수

A Study on the Deformation and Perforation Problem for Steel Plates Subjected to High-Speed Collision and Superhigh-Speed Collision

Suk-Hee Won* · Kyung-Ern Lee* · Jae-Young Ko** · Jae-Myung Lee***
· Jeom-Kee Paik****

*Graduate school of Pusan National University

**Faculty of ocean system engineering, Mokpo National Maritime University

***Naval Architecture Ocean Engineering, Pusan National University

****Naval Architecture Ocean Engineering, Pusan National University

*****Division of Architecture, Landscape & Civil Engineering Mokpo National University

요 약 : 본 연구에서는 충돌문제에 있어서 비교적 높은 활용도를 지니고 있는 범용 유한요소해석코드 LS-DYNA3D를 사용해 판부재에 충돌체가 충돌하는 경우, 내충돌성을 평가하였다. 속도가 41.56m/s-118.9m/s로 비교적 고속인 충돌문제부터 속도가 544.05m/s-800m/s인 초고속 충돌문제까지 시리즈 해석을 하였다. 이를 통해 판부재에 다양한 속도의 충돌체가 충돌하는 경우에 있어 피충돌체의 관통 유무를 평가할 수 있는 경험식을 구하고자 한다.

핵심 용어 : 운동에너지, 흡수에너지, 관통, 정적관통에너지

ABSTRACT : This paper describe inner-collision-characteristics of the ship structural plates when the projectile collides with plate-material using LS-DYNA3D which is general and useful finite element analysis tool in collision problem fields. The series analyses were carried out from high speed(41.56m/s-118.9m/s) to ultrahigh speed(544.05m/s-800m/s). Through these analyses we can approach empirical formula to estimate penetration limit of the ship structural plates with which the projectile of various speed collides.

KEY WORDS : kinetic energy, absorbed energy, perforation, static perforation energy

1. 서론

일반적으로, 선박에서는 고속의 충돌체가 갑판, 선측외판 등에 충돌하여 피충돌체에 큰변형(large deformaion)이 발생하거나, 심각하게는 피충돌체가 관

통되는 경우도 존재한다. 크레인에 달려 있는 중량물의 낙하, 군함이 적함으로부터 발사된 포탄에 피격되는 사례, 모두 이 경우에 해당하고, 이러한 구조 손상이

* nawonski@pusan.ac.kr, 051)510-2750

* erni76@pusan.ac.kr, 051)510-2750

** 정희원, kojy@mmu.ac.kr, 061)240-7129

*** 정희원, jaemlee@pusan.ac.kr, 051)510-2342

**** 정희원, jeompaik@pusan.ac.kr,

원인이 되어 심각하게는 대상 선박이 침몰로 이를 수도 있을 것이다. 이와같은 고속으로비행하는 금속과 금속재료간의 충돌 및 파괴현상 연구방법은 크게 실험적 방법, 해석적 방법, 수치해석적 방법이 있다. 실험적 방법은 정밀한 실험 장치를 통하여 가장 믿을만한 정보를 얻을 수 있다. 그러나 실험대상이 극히 제한적이며 많은 인적, 물적, 공간적 자원이 필요하다 해석적 방법은 에너지나 힘의 평형을고려하여 1차원적으로 모델링하는 방법으로 비교 데이터가 존재하고 충돌 및 파괴 메커니즘을 비교적 잘 이해하고 있는 경우에 적용할 수 있는 방법으로 계산량이 적어 시스템의 개념설계 단계에서 잘 활용될 수 있는 방법이다. 그러나 해석적 방법은 주요 특성을 잘 알지 못하는 새로운 영역의 문제해석에 적용하기 곤란한 단점을 가지고 있다. 수치해석적 방법은 오차의 영향, 초기치, 경계치 문제, 컴퓨터 자원의 필요라는 단점에도 불구하고 실제 물리적 현상을 지배하는 지배방정식을 공간과 시간에 대하여 이산화하여 물리적 현상을 컴퓨터 상에서 재현 또는 모사하는 방법으로 충돌 및 파괴 메커니즘의 주요 특징을 미리 파악할 필요없이 새로운 형태의 문제를 비교적 신뢰성 있게 해석할 수 있다.[1]

본 연구에서는 이 수치해석적 방법을 사용하여 선체 판부재에 충돌체가 충돌하는 경우의 내충돌성을 평가하였다. 이를 이용해 판부재에 충돌체가 충돌하는 경우에 있어 피충돌체의 관통 유무를 평가할 수 있는 경험식을 구하고자 한다.

2. 정적 관통에너지와 동적 관통에너지의 관계

Zabel[2]은 1958년 정적인 관통 실험을 통해 아래 식(1)과 같은 무차원 정적 관통에너지를 구하는 경험식을 구하였다.

$$\frac{E_s}{\sigma_T d^3} = 2.075 \left(\frac{t}{d}\right)^2 + 0.0485 \left(\frac{t}{d}\right) \left(\frac{L}{d}\right) \quad (1)$$

여기서 E_s 는 정적 관통에너지, σ_T 는 인장강도, d 는 충돌체 지름, t 는 피충돌체 판두께, L 은 정사각형 피충돌체의 한변의 길이를 나타낸다.

Jones & Kim[3,4]은 Table 2와 같이 피충돌체의 속도, 질량 및 직경, 피충돌체의 두께, 직경을 변화시켜 가면서 피충돌체의 내충돌성을 실험적인 방법을 통하여 분석하였다. 그 결과와 식(1)을 이용하여 동적 관통에너지를 구하는 경험식을 아래와 같이 구하였다.

$$E_p = E_s (1 + 0.0095 V_p) \quad (2)$$

여기서 E_p 는 동적 관통에너지, V_p 는 관통에 대한 임계속도이다. 본 연구에서는 비교적 고속인 Jones & Kim[3,4]의 충돌실험과 대형수송함이 피탄되는 초고속 충돌문제를 수치 해석적 방법을 사용하여 각각 시리즈 해석을 수행 하였다.

3. 동적 비선형유한요소 모델링

3.1 고속 충돌 유한요소 모델링

Jones & Kim[3,4]은 gas gun을 사용하여 충돌체의 지름, 질량 그리고 피충돌체의 지름을 변화시키며 충돌 실험을 수행하였다. Fig. 1은 본 연구에서 고속 충돌해석 대상으로 하고 있는 충돌체 및 피충돌체의 개략도 및 경계조건을 나타내고 있다. Fig. 2는 유한요소 모델링으로 총요소수는 20700개이고 피충돌체 중심부의 요소크기는 0.4mm이다. 주변 지지부재 등으로 구속되어 있는 피충돌체의 특징을 고려하여, 면외충격 하중에 대한 처짐 거동 해석시의 경계조건을 완전구속으로 취하였다.

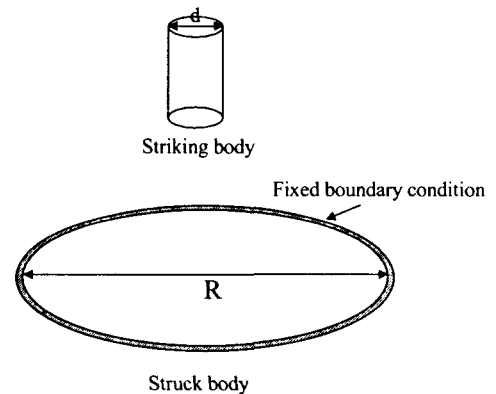


Fig.1 A fixed supported circular plate under collision loads

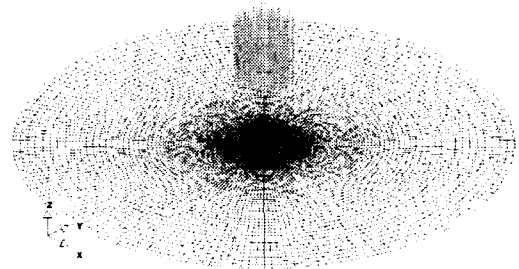


Fig.2 Finite element mesh details of the plate and the projectile

3.2 초고속 충돌 유한요소 모델링

초고속 충돌해석에 있어서는 포탄은 5in 포탄을 강판은 대형 수송함 선체외판 중 web frame과 종방향 보강재 사이를 취하여 모델링 하였다. 보강재 사이는 600mm, web frame사이는 2400mm, 그리고 강판의 두께는 11mm이다. Fig. 3은 초고속 충돌해석 대상으로 하고 있는 충돌체의 개략도이다. Fig. 4는 유한요소 모델링으로 총 요소수는 90672개이고 강판의 요소 크기는 1mm이다. 경계조건은 고속충돌과 같이 완전 구속을 취하였다.

본 연구에서는 충돌문제에 있어서 비교적 높은 활용도를 지니고 있는 범용 유한요소해석코드 LS-DYNA3D[5,6]를 이용하였고, 충돌체의 운동에너지 (충돌 속도 및 충돌체의 질량)의 변화에 따른 시리즈 해석을 통하여 피충돌체의 처짐량 및 피충돌체의 관통 유무, 충격흡수능력 등과 같은 내부 역학 메카니즘 확인에 주안점을 두었다.

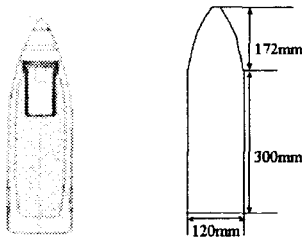


Fig.3 Projectile

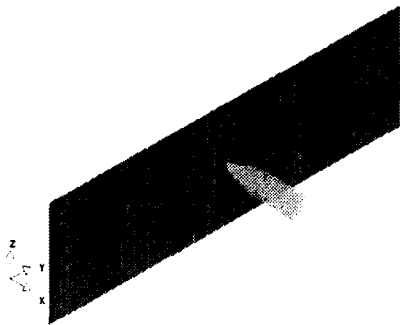


Fig.4 Finite element mesh details of the plate and the projectile

3.3 시리즈 해석

충돌체의 크기, 질량 및 속도의 변화에 따른 피충돌체의 내충돌성을 알아보기 위해 고속 충돌의 경우는 충돌속도 및 충돌체의 지름을 변화시켰고, 초고속 충

돌의 경우는 충돌 속도를 바꾸는 등 다양한 충돌조건을 대상으로 시리즈 해석을 수행하였다. 시리즈 해석에 사용된 시험체의 주요치수 및 하중조건은 Table 1,2와 같다. Fig 5,6은 충돌, 대변형, 관통 등으로 진행되는 충돌문제의 시뮬레이션 과정을 보여주고 있다.

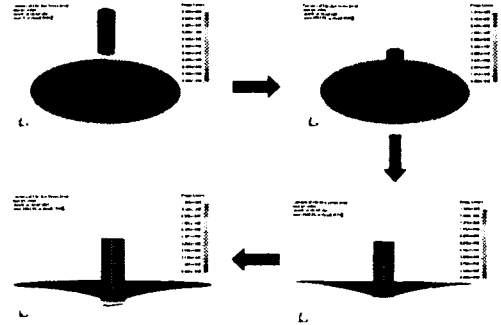


Fig.5 Samples of the present numerical simulation for high-speed collision

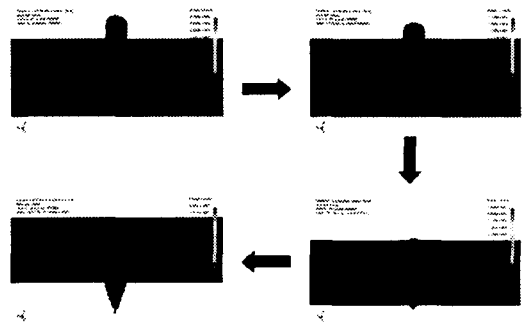


Fig.6 Samples of the present numerical simulation for superhigh-speed collision

Table 1 A case1 study for dynamic perforation model

t(mm)	d(mm)	m(kg)	v(m/s)
11	32	12	800.0
11	32	12	746.4
11	32	12	692.8
11	32	12	643.05
11	32	12	593.3

Table 2 A case2 study for dynamic perforation model

t(mm)	d(mm)	m(kg)	v(m/s)
4	11.90	0.380	41.56
4	11.90	0.380	42.33
4	11.90	0.240	52.80
4	11.90	0.240	54.60
4	11.90	0.204	61.59
4	11.90	0.204	66.20
4	11.90	0.120	86.19
4	11.90	0.120	87.64
6	17.85	0.810	49.76
6	17.85	0.810	53.35
6	17.85	0.405	85.80
6	17.85	0.405	89.25
6	17.85	0.270	101.7
6	17.85	0.270	114.3
8	23.8	1.920	56.45
8	23.8	1.920	63.35
8	23.8	0.960	93.64
8	23.8	0.960	94.60
8	23.8	0.640	118.4
8	23.8	0.640	118.9

4. 동적 비선형유한요소해석 결과

4.1 고속충돌해석

충돌체의 운동에너지를 변화시켜 즉 각 질량 별로 속도를 변화시켜 그에 따른 피충돌체의 흡수에너지를 살펴 보았다. Fig. 7은 충돌체 운동에너지별로 얻어진 피충돌체의 흡수에너지를 나타내고 있다. 보는 바와 같이 충돌체의 운동에너지가 증가할수록 피충돌체의 흡수에너지도 증가함을 알 수 있다.

4.2 초고속 충돌 해석

충돌체의 운동에너지를 변화시켜 그에 따른 피충돌체의 흡수에너지를 살펴 보았다. Fig. 8은 충돌체의 운동에너지별로 얻어진 피충돌체의 흡수에너지를 나타내고 있다. 보는 바와 같이 충돌체의 운동에너지가 증가할수록 피충돌체의 흡수에너지도 증가함을 알 수 있다.

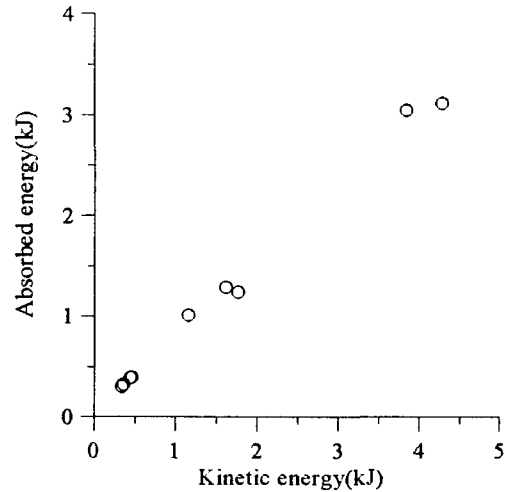


Fig.7 Absorbed energy-kinetic energy at center of the all edged clamped plate subject to different speeds of striking body

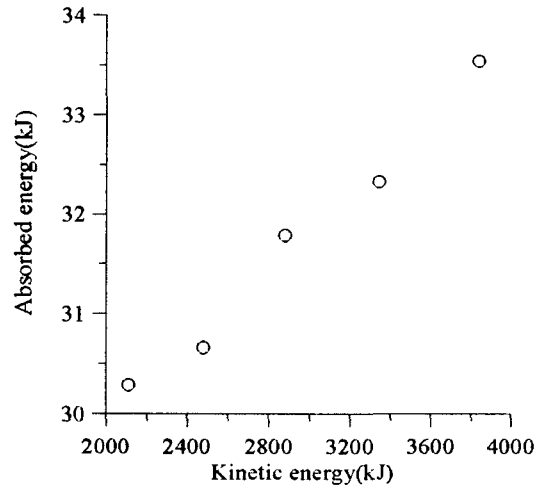


Fig.8 Absorbed energy-kinetic energy at center of the all edged clamped plate subject to different speeds of striking body

4.3 경험식

Fig. 9는 피충돌체의 흡수에너지를 정적 관통에너지로 무차원화 시킨 값을 종축으로 속도를 횡축으로 하여 나타내었다. 여기서 정적 관통에너지는 식(1)을 이용하였다.

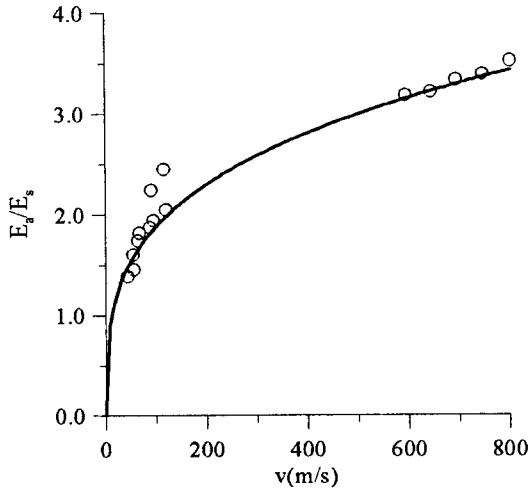


Fig.9 Dimensionless absorbed energy-velocity of the all edged clamped plate subject to different speeds of striking body

피충돌체를 관통시키는데 필요한 에너지를 피충돌체가 흡수하는 에너지로 가정하여 피충돌체의 흡수 에너지를 구하는 아래의 식을 도출하였다.

$$E_a = 0.5 E_s (v^{0.288}) \quad (3)$$

여기서 E_a 는 피충돌체의 흡수에너지, v 는 충돌체의 초기 속도를 나타낸다. Fig. 10은 본 연구에서 도출한 경험식과 Jones & Kim[3,4]실험결과 및 유한요소해석 결과를 비교하고 있다. 보는 바와 같이 높은 精度를 보여주고 있음을 알 수 있다.

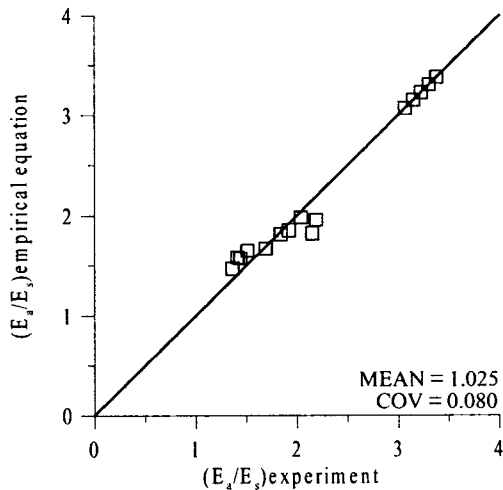


Fig.10 Comparison of the experimental results with empirical equation

5. 결론

고속충돌과 초고속 충돌 모두 충돌체의 운동에너지가 증가할수록 피충돌체의 흡수에너지도 증가함을 알 수 있다.

식(3)을 통해 충돌체의 속도, 지름, 피충돌체의 재료 물성치 및 기하학적 형상을 알게 되면 피충돌체의 관통 유무를 예상할 수 있다. 추후 추가해석을 통해 식(3)의 적용 범위를 넓히고자 한다. 그리하여 선략에 있어서 존재할 수 있는 각종 충돌문제 예를 들면, 크레인에 달려 있는 중량물의 낙하와 같은 고속 충돌문제 뿐 아니라 군함의 피탄 문제와 같은 초고속 충돌문제 등, 기존의 실험 혹은 해석방법을 통해서 평가하기 어려운 다양한 문제에 대해 손쉽게 활용할 수 있는 내충돌 성능평가용 기준을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgement

본 연구는 부산대학교 첨단조선공학연구센터의 연구비지원에 의해 수행되었으며 이에 감사를 표합니다.

참고 문헌

- [1] J.K. Paik and A.K. Thayamballi, "Ultimate limit state design of steel-plated structures", John Wiley & Sons, 2003
- [2] N. R. Zabel, "Containment of Fragments from a Runaway Reactor". Stanford Research laboratory Technical Report No. 1, SRIA-1, CA.
- [3] N. Jones and S.B. Kim, "A study on the large ductile deformations and perforation of mild steel plates struck by a mass - part 1: experimental results", Trans. ASME, pp. 178-184, 1997
- [4] N. Jones and S.B. Kim, "A study on the large ductile deformations and perforation of mild steel plates struck by a mass - part 2: discussion", Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.119, pp.185-191, 1997
- [5] LSTC, LS-DYNA user manual, version 960, Livermore Software Technology Corporation, CA, USA, 2001
- [6] LSTC, LS-DYNA theoretical manual, Livermore Software Technology Corporation, CA, USA, 1998