

폭발에 의해 손상된 함정의 생존시간 간이계산법 연구

김재현^{1*} · 박명규²

¹현대중공업(주) 구조연구실
²한국해양대학교 해양시스템공학부

A Study on Simple Calculation Method of Survival Time for Damaged Naval Ship Due to the Explosion

Jae-Hyun Kim^{1*} and Myung-Kyu Park²

¹Hyundai Heavy Industry Co. Ltd., Ulsan, Korea
²Div. of Ocean System Engineering, Korea Maritime University, Busan, Korea

요 약

새로운 공격 무기들의 등장과 적과의 전투환경 변화로 현대의 함정설계에 있어 생존성의 향상은 가장 중요한 요소가 되었으며, 특히 적에게 쉽게 노출되는 수상함에 있어서는 생존성의 취약성에 대비한 감소대책이 보다 강조되고 있다. 생존성을 고려한 함정설계를 위하여 우선 적절한 공격 시나리오를 설정하고 이에 따라 폭발해석을 수행하여야 한다. 폭발은 함의 국부 손상 및 대변형 손상을 야기시키며 이 때 손상된 함정에 대한 적절한 생존성 평가가 중요하다. 본 연구에서는 구조-유체 연성기법 중 하나인 ALE기법을 적용하여 폭발해석을 수행하고 함정의 붕괴거동을 조사하였으며 이 손상된 함정에 대하여 정량적으로 생존 시간을 계산할 수 있는 간략계산법을 제시하였다.

Abstract-Due to advanced new weapons and changes in the combat environment, survivability improvement methods for naval ship design have continuously evolved. Surface naval ships are easily detected by the enemy and, moreover, there are many attack weapons that may be used against surface naval ships. Therefore, it is important for modern naval ships, especially combat naval ships, to ensure survivability. In order to design a naval ship considering survivability, the designers are required to establish reasonable attack scenarios. An explosion may induce local damage as well as global collapse of the ship. Therefore, possible damage conditions should be realistically estimated at the design stage. In this study, an ALE technique was used to simulate the explosion analysis, and the survival capability of damaged naval ships was investigated. Especially, the author have establish the simple method of estimation of survival time for damaged naval ships.

Keywords: Survivability(생존성), Naval ship(함정), Damage(손상), Explosion(폭발), ALE algorithm(ALE 기법), Survival time(생존 시간)

1. 서 론

함정은 적과의 전투 환경에서 충분한 전투력을 유지하기 위하여 우수한 공격 능력뿐 아니라 적의 위협무기에 대한 적절한 방어능력을 반드시 갖추어야 한다. 이러한 전투력을 유지할 수 있는 능력을 생존성(Survivability) 이라고 표현하고 있다. 즉 생존성은 “전투 환경에서 임무 수행을 계속 하기 위한 시스템의 능력” 또는 “적의 위협 무기를 회피하거나 견디는 능력”으로 정의된다(Said

[1995]). 현대의 함정 특히 수상함은 적으로부터 쉽게 노출되기 때문에 적의 공격을 받을 확률이 높으며 따라서 함정에서 생존성을 고려한 설계는 필수적이라 할 수 있다.

위협 무기의 공격에 의해 발생 될 수 있는 선체의 손상 메카니즘은 Fig. 1(Lloyd[1999])에 제시한 바와 같이 화재, 침수 및 구조 손상으로 분류 할 수 있다.

본 연구는 생존성의 피격성, 취약성 및 회복성으로 대표되는 (Fig. 1참조) 각각의 생존성 구성 요소 중에서 구조 취약성에 관련된 연구이며 특히 함정에 구조 손상이 발생되었을 때 생존성 여부를 판단할 수 있는 기초 연구이다.

*Corresponding author: jhkim2007@empal.com

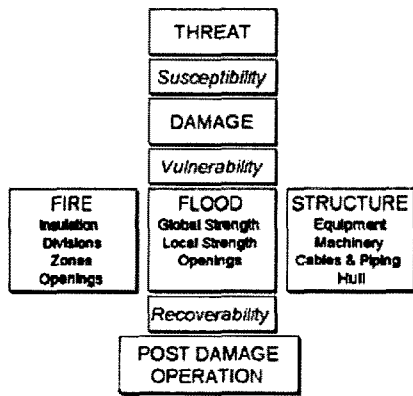


Fig. 1. Whole ship structural survivability.

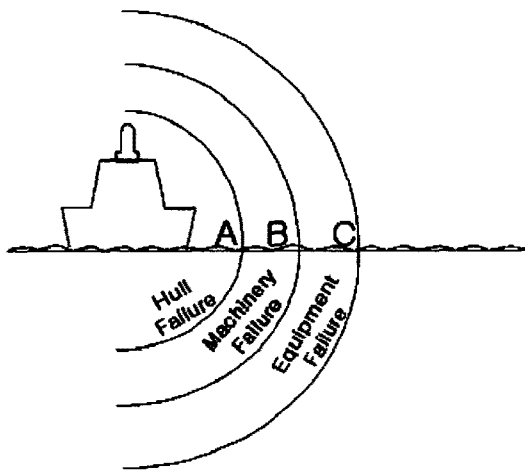


Fig. 2. Vulnerability contours for a given threat level.

구조 손상의 수준은 Fig. 2(Lloyd[1999])에서 제시한 바와 같이 수준 A, B, C로 분류할 수 있다. 여기서 A, B, C는 위협 무기의 폭발 위력을 선체와의 거리로써 나타낸 것으로써 수준 A는 선체 구조에 대 변형 또는 붕괴 손상이 일어나는 가장 큰 손상 수준이고, 수준 B는 수준 C 보다 좀 더 가까운 거리에서 폭발이 일어나는 경우로써 기기 및 장비에 손상이 일어날 수 있는 경우이다. 손상 수준 C는 선체로부터 어느 정도 떨어진 거리에서 폭발이 일어나는 경우로써 함정에 탑재된 전투 시스템에 가장 먼저 손상이 일어날 수도 있다. 이러한 손상으로 전투력의 상실을 가져올 수 있다.

본 논문에서는 함정이 적의 피격으로 선체의 심한 구조손상이 발생하는 수준 A를 기준으로 가정하고 이에 대한 적절한 시나리오를 설정하였으며 이 시나리오에 따라 폭발해석을 수행하였다.

본 논문에서는 함정에 발생하는 폭발해석을 폭약 등을 직접 모델링하여 해석하는 구조-유체 연성기법인 ALE(Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 기법을 적용하였고 상용프로그램인 LS-DYNA(Hallquist [2001])을 사용하여 해석을 수행하였다. 미사일 등의 공격으로 폭발이 발생하여 손상된 함정은 그 상태에 따라 회복이 어느 정도 가능한지에 대한 생존성 시간에 대하여 정량적인 평가가 필요하다. 본 논문은 손상된 함정의 생존성 평가 방법으로 생존시간을 간략히 계산할 수 있는 간이계산법을 제안하였고 이 방법으로 함

정의 초기 설계 단계에서 구조 취약성을 고려할 수 있는 설계가 가능할 것으로 사료된다.

2. 폭발해석의 구조-유체 연성 기법 적용

2.1 함정에서 폭발해석 기법의 적용

일반적으로 현재 함정에 적용하고 있는 폭발해석은 수중폭발과 공기중 폭발로 구분하고 있다. 수중폭발에 대한 수중충격 응답해석은 국내외적으로 활발하게 연구(이상갑 등[2001], 정정훈 등 [1997])가 진행되고 있다. 이 연구들은 충격파의 전파 시 발생하는 광역 캐비테이션(bulk cavitation) 현상이 고려되어야 하는 수상함 설계에 대한 내충격 설계에 적용하고 있다. 수중구조물에 대해서도 이러한 해석법으로 LS-DYNA/USA code 등을 활용한 해석의 연구(이상갑 등[2001])가 수행된 바 있다.

공기중 폭발에 대한 수치해석은 미 해군에서 함정에 사용하는 고장력강에 대한 폭발실험을 수행하고 이에 대하여 폭발해석을 적용하고 있다(Kenedy [2005], Weber [2005]). 폭발해석에서 구조-유체 연성 문제는 폭발물 및 공기는 유체요소(Eulerian element)로 구조물은 구조 요소(Lagrangian element)로 모델링하여 적용할 수 있으며, 본 연구에서는 이러한 구조-유체 연성 문제의 대표적인 해석 기법으로 ALE기법을 함정의 폭발해석에 적용하였다.

2.2 ALE기법 적용 사례

미해군은 함정에 사용되는 고장력강 폭발 실험에 대한 연구로 ALE기법을 통하여 폭발해석을 수행하고 있다(Weber[2005]). 본 절에서는 폭발실험 및 이에 대한 폭발실험 결과를 소개하고 본 연구에서 적용하고 있는 ALE기법을 통한 수치해석의 신뢰도를 확인하고자 한다.

Fig. 3은 현재 미 해군에서 수행하고 있는 고장력강 판에 대한 폭발실험의 모습이다(Kenedy [2005], Weber [2005]). 폭약은 T.N.T.

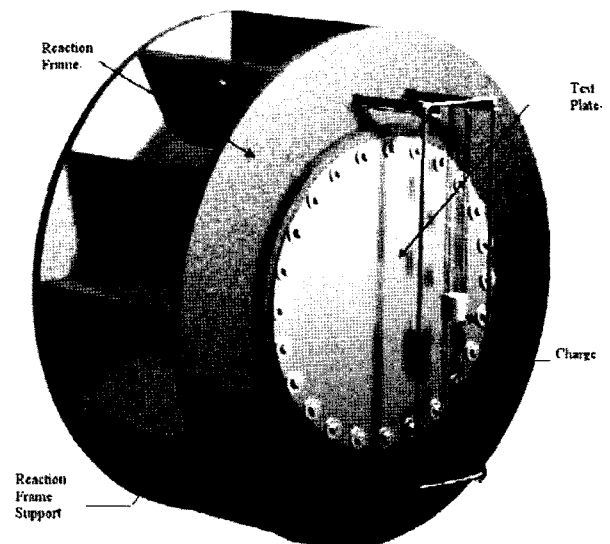


Fig. 3. Configuration of US Navy standard blast test.

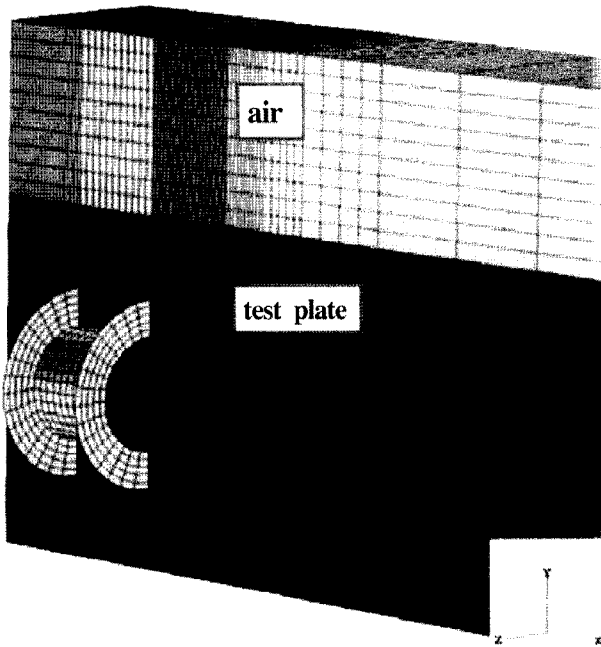
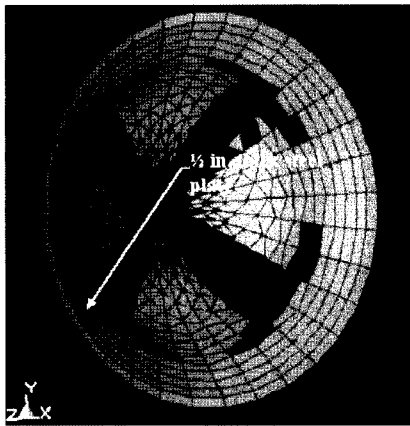
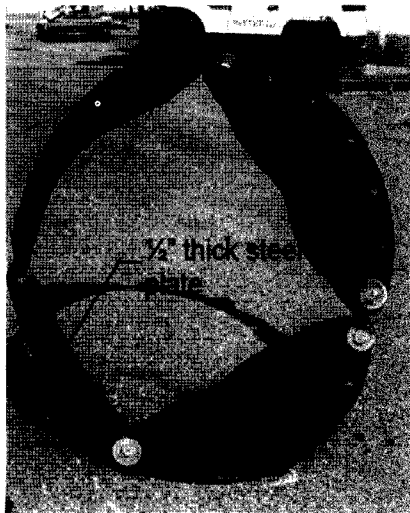


Fig. 4. Configuration of F.E. model for blast test.



(a) Result for analysis



(b) Result for test

Fig. 5. Comparison results between analysis and test.

1.36 kg이며 고장력강 판은 두께 12.7 mm, 항복응력 355 MPa이다. Fig. 4는 해석 모델의 모습을 보여주고 있다. 폭발해석은 ALE 기법을 적용하였으며 시험판 및 기타 구조물들은 구조요소로 모델링하고 이 구조물 주위의 공기 및 폭약은 유체요소로 모델링하였다. 특히 공기요소의 전체 범위는 구조물을 충분히 포함할 수 있도록 넓은 범위로 모델링하였다.

Fig. 5는 폭발시험 결과와 폭발해석을 수행한 결과의 모습을 비교하고 있다.

Fig. 5를 보면 폭발시험에 의해 붕괴된 시험판의 모습과 폭발해석의 결과에서 보여주는 판의 모습이 매우 흡사함을 알 수 있으며 ALE 기법에 의한 수치해석이 실제 폭발현상을 잘 묘사하고 있음을 알 수 있다. 이러한 실험 결과와 폭발 수치해석을 통하여 본 연구에서 적용하고 있는 ALE기법은 해의 정도가 매우 높음을 알 수 있으며 이를 근거로 본 논문에서는 함정에 대하여 폭발해석을 수행하였다.

3. 함정의 폭발 수치해석

3.1 해석 모델링

본 연구의 목적인 손상된 함정의 생존성 평가를 위하여 우선 임의의 함정에 대한 폭발해석을 수행하고 그 손상된 모델에 대하여 생존성 평가를 수행하였다.

ALE기법을 적용한 폭발 수치해석을 수행하기 위하여 함정을 모델링 하였다. 본 해석에 적용한 함정에 대한 주요 치수 및 모델의 모습을 Fig. 6 및 Table 1에 나타내었다.

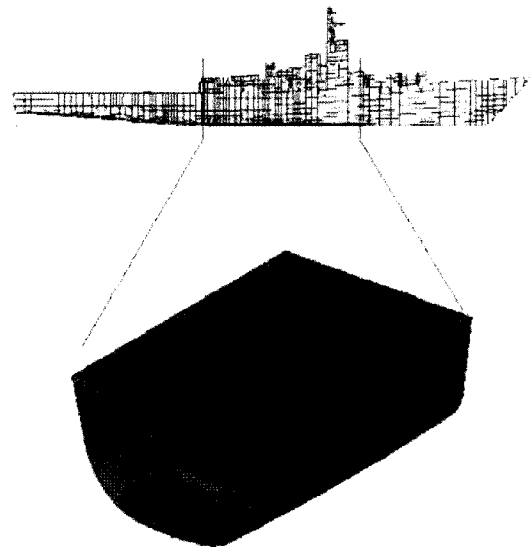


Fig. 6. Finite Element model for analysis.

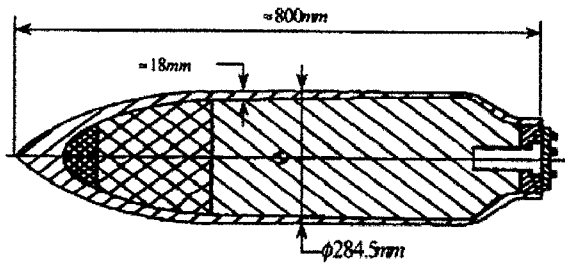
Table 1. Principal dimension of the model

Displacement	7,000 ton
Length of the ship (L_{bp})	120 m
Breadth of the ship (B)	18 m
Depth of the ship (D)	12 m
Draft of the ship (d)	6 m

3.2 해석 시나리오

폭파 해석을 위하여 현실 가능한 시나리오를 설정하는 것은 해석 결과를 통한 설계 변수들을 결정하는데 매우 중요하다. 본 해석에서는 일반적으로 함정의 공격 무기로 널리 사용되는 공대함 엑소세 미사일(Fig. 7참조)을 대상으로 설정하였다.

이 미사일은 지연 신표관을 사용하며 함정에 피격 시 내부까지 관통한 후 함의 내부에서 폭발하도록 되어 있다. 따라서 실제 발생할 수 있는 이 상황을 모사하기 위하여 본 해석 대상 함정의 좌현 및 우현에 각각 미사일이 피격되는 시나리오로 설정하였다(JJMA



<EXOCET MK39, designed by France>
- equivalent T.N.T. weight = 100 kg

Fig. 7. Configuration of attack missile.

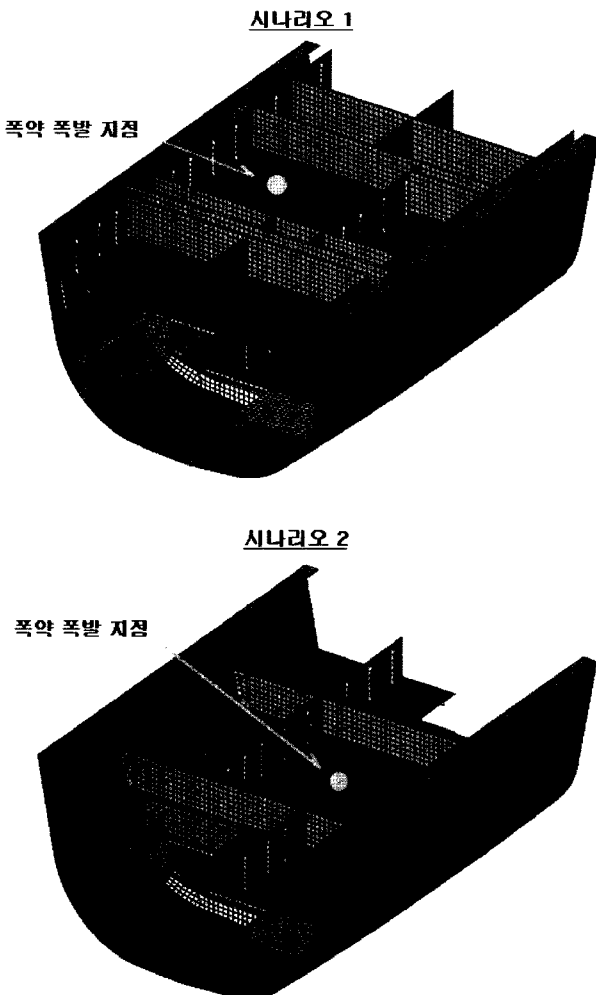


Fig. 8. Configuration of analysis scenarios.

[2005]).

- 시나리오 1: 미사일이 수면 상부 선측 외판을 관통한 후 상갑판 하부 좌현의 선실부에서 폭발
- 시나리오 2: 미사일이 수면 상부 선측 외판을 관통한 후 2번 갑판 하부 우현의 선실부에서 폭발

3.3 폭파 해석 결과

본 해석 시나리오에서는 미사일이 선측 외판을 관통하는 것으로 가정하였으나 이때의 선측 외판의 손상은 국부 손상으로 예상되며 전체 붕괴 거동에 대한 영향은 크지 않은 것으로 생각된다. 따라서 해석 과정에서 관통에 대한 부분은 제외시켰으며 관통 후 선체 내부에서 폭발하는 과정만을 모사 하였다. Fig. 9와 10은 폭파 해석을 수행한 결과를 보여주고 있다.

Fig. 9는 시나리오 1에서의 해석 결과이며, 폭약이 위치한 좌현 부위의 상, 하부 갑판에서 먼저 붕괴가 일어나고 측면 선실 벽 등의 붕괴가 일어나지만, 외판은 약간의 손상을, 그리고 상자형 거더는 아직 손상이 발생하고 있지 않다. 또한 Fig. 10의 시나리

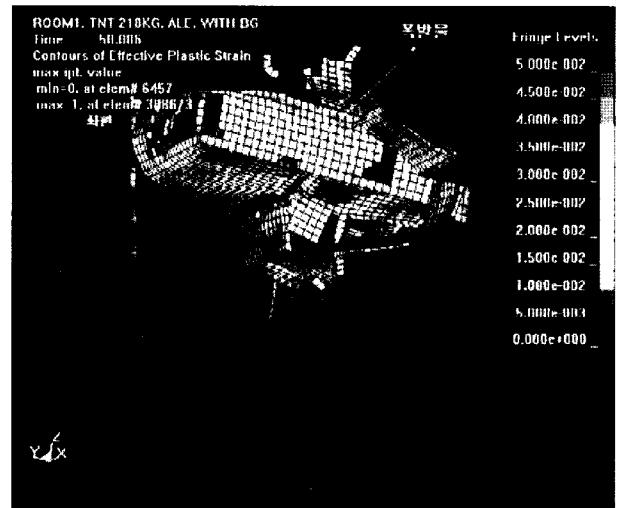


Fig. 9. Effective plastic strain contour (scenario 1).

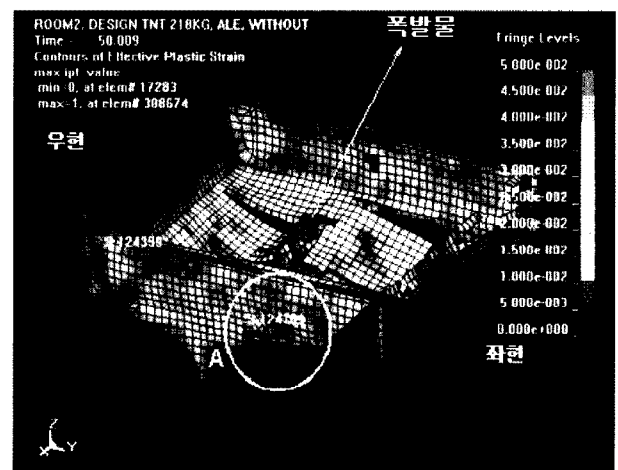


Fig. 10. Effective plastic strain contour (scenario 2).

오 2에서의 해석 결과를 보면 폭약이 위치한 상, 하부 갑판에서 먼저 붕괴가 일어나고 측면 선실 벽 등이 붕괴가 일어나지만, 외판은 약간의 손상이 발생하고 있다.

이와 같이 적절한 시나리오를 통해서 ALE 기법을 이용한 수치 해석은 현실성 있는 결과를 도출할 수 있으며 이 결과를 토대로 선박 설계에 적용할 수 있다. 즉 폭약이 좌현 위치에서 폭발했을 때 적어도 우현 부분은 손상이 일어나지 않도록 설계를 하면 될 것이다.

4. 피격 후 생존시간 간이계산법

ALE기법을 이용한 수치해석으로 폭발 후 선체에서 일어나는 붕괴 거동을 알 수 있었고 이를 토대로 함정 설계에 반영할 수 있다. 그러나 해석 결과만을 살펴보는 것은 폭발 후 발생하는 현상만을 파악하는 수준이며 이는 설계에 반영하는 기준 자체가 될 수는 없을 것이다. 따라서 수치 해석을 통하여 설계에 반영하기 위해서는 명확한 수치적 기준이 있어야 할 것이다. 따라서 피격 후 함정의 생존성 여부를 파악하기 위하여 폭발 후 함정의 생존시간 계산이 필요하며 이를 기준으로 하여 해석 결과를 설계에 반영할 수 있을 것이다.

4.1 해상상태에 의한 생존시간

다양한 해상상태에서 함정의 피격 후 생존시간을 계산하는 방법으로 직접 하중 계산법(Direct load analysis)과 정적 접근 방법(Static approximation method)(JJMA[2003])이 있다.

직접 하중계산법은 해상상태(Sea state), 조우각도(Heading angle) 등 여러 가지 조건을 동시에 고려하여 비교적 정확하게 해석을 할 수 있다. 그러나 해석 과정이 복잡하고 특히 손상 후 함정의 속도, 조우 각도 등을 가정하여야 하는 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 비교적 손쉽게 계산할 수 있는 정적 접근 방법을 적용하였으며, 이 방법을 적용하기 위하여 다음과 같이 가정하였다.

- 손상 후 함정에 가장 손상이 심한 단면에 대한 강도가 함정 전체 구조 강도를 대표
- 국부 손상이나, 파랑 조우에 의한 횡강도 및 비틀 강도가 종강도 보다는 함정의 생존 측면에서 지배적이지 않다고 가정
- 손상 후 함정의 조우각도는 중 급힘 하중만 받는 정면파(Head sea)라고 가정
- 구조 붕괴 파고(Lethal wave height)는 손상 후 전체 중앙 중급힘 모멘트를 대표하고 이 파고가 함정에 도착하면 침몰된다고 가정
- 손상 후 함정의 속도는 고려치 않음

4.2 생존시간 간이계산법

본 논문에서는 폭발에 의한 피격 후 손상된 함정의 생존 여부를 판단할 수 있는 생존시간 간이계산법을 정립하였다. 이를 위하여 해상상태는 랜덤파(Random wave)이며 일정한 시점 동안 관측한 파고 자료 중 가장 높은 파고로부터 전체의 1/3이내에 있는 파

도에 대해 구한 평균 파고를 유의 파고(Significant wave height)로 정의한다.

본 논문에서 적용하는 정적 접근 방법은 파고가 좁은 구간(Narrow band)의 각속도 영역에 분포하는 레일리 분포(Rayleigh distribution)라고 가정하였으며, 표준편차(σ)를 가지고 주어진 수준(Level) Z 를 초과할 확률(F)은 식 (1)과 같이 정의된다.

$$F = e^{-\frac{Z^2}{2\sigma^2}} \tag{1}$$

여기서 표준편차 $\sigma = \frac{H_{sig}}{4}$, H_{sig} = 유의파고

그리고 수선면의 높이 $Z = 0.5H_{lethal}$ (여기서 H_{lethal} = 구조 붕괴 파고)로 정의하면 식 (1)은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$F = e^{-\frac{[0.5H_{lethal}]^2}{2(0.25H_{sig})^2}} = e^{-\frac{(2H_{lethal})^2}{H_{sig}^2}} \tag{2}$$

시간당 예상되는 파의 수(N)는 스펙트럼 평균 zero-crossing 주기(T_z)로부터 직접 평가한다. 그러나 대부분의 해상상태 정의는 시각적으로 평가되는 시각적 주기(visual period: T_v)를 기반으로 계산해야 한다. 해상 스펙트럼의 넓은 범위를 고려한 경우 T_z 와 T_v 의 관계식과 시간당 예상되는 파의 수는 아래와 같다.

$$T_z = 0.82 T_v^{0.96} \tag{3}$$

$$N = \frac{3600}{T_z} = \frac{4390}{T_v^{0.96}} \tag{4}$$

그리고 시간당 예상되는 구조 붕괴 파고의 발현 확률(R_{lethal})은 식 (5) 및 (6)과 같다.

$$R_{lethal} = F \times N \tag{5}$$

$$R_{lethal} = 4390 e^{-\left[\frac{2(H_{lethal})^2}{H_{sig}^2}\right]} / T_v^{0.96} \tag{6}$$

손상된 함정에 대한 생존성 여부는 생존시간을 계산함으로써 판단할 수 있으며 특정한 해상상태에서 예상되는 생존시간 E_s 는 식 (6)의 역수이며 식 (7)과 같다.

$$E_s = T_v^{0.96} / 4390 e^{-\left[\frac{2(H_{lethal})^2}{H_{sig}^2}\right]} \tag{7}$$

또한 식 (7)은 주어진 임의의 시간(X) 동안에 구조 붕괴 파고의 파를 만나지 않을 확률(P_0)로 계산할 수 있다.

$$P_0 = e^{-(R_{lethal} \times X)} \tag{8}$$

이상의 과정으로 손상된 함정에 대한 생존시간 간이계산법을 정립하였으며, 수치 해석의 결과로부터 붕괴 거동을 파악한 후 손상된 함정의 생존시간을 계산함으로써 손상된 함정에 대한 생존성의 평가를 정량적으로 평가할 수 있을 것이다.

4.3 생존시간 계산 예

본 논문에서 설정한 함정 모델을 폭발시나리오에 따라 ALE기법을 이용한 수치해석을 수행하였고, 본 절에서는 해석 결과 손상된 함정에 대하여 4.2절에서 정립한 간이계산법에 따라 직접 생존시간을 계산해 보았다.

손상되기 전 함정에 적용되는 설계 표준파고(H)는 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$H = 0.607\sqrt{L} \tag{9}$$

여기서 L은 대상 함정의 길이이다. L의 값을 Table 1에 있는 값을 적용하면 설계 표준파고 H의 값은 약 6.65 m가 된다. 표준파고는 선체의 중량분포와 정수압 및 파랑하중과의 차이에서 발생하는 선체 거어터 중급힘 모멘트가 허용응력에 도달하는 값이며, 손상 후 정수 중 중급힘 모멘트가 변하고 중앙 단면 계수가 감소할 것이다. 폭발 후 손상된 함정의 단면계수는 “NAUTICUS hull” (DNV[1997]) 등의 프로그램으로 계산할 수 있으며, 이 때 정적 균형을 이루는 파고 값 또한 감소할 것이며 이의 값은 손상 후 감소된 단면계수값 만큼 비례하여 감소하는 것으로 가정하여 구한다.

Fig. 11과 Table 2는 시나리오 1에서 손상 전과 손상 후 단면의 모습, 단면 계수값 및 파고 값들을 보여 주고 있다.

한편 피격된 함정은 표준 해상상태 4에서 손상을 입었다고 가정하면 이때의 유의파고 및 주기는 다음과 같다.

$$H_{sig} = 1.88 \text{ m}, T_v = 8.8 \text{ sec}$$

이 값들을 식 (6)에 대입하면 다음과 같다.

$$R_{lethal} = 4390e^{-\left[\frac{4.68}{1.88}\right]^2} / 8.8^{0.96} = 0.0148 \text{ per hour}$$

이 값에서 피격 후 손상된 함정의 생존시간 E_s 는 식 (7)에 의하여 다음과 같이 계산된다.

$$E_s = \frac{1}{R_{lethal}} \approx 67.57 \text{ hour}$$

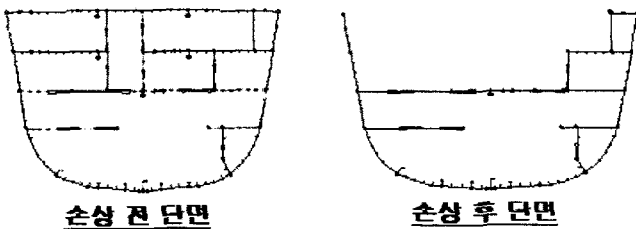


Fig. 11. Section of undamaged and damaged models.

Table 2. Section modulus and wave height of undamaged and damaged model (scenario 1)

Section	Undamaged Section	Damaged Section
Section modulus (at deck)	5.90 m ³	3.48 m ³
Section modulus (at keel)	5.37 m ³	4.68 m ³
Wave height	6.65 m	4.68 m

Table 3. Calculated survival time of various sea state

Sea state number	2	3	4	5
Significant wave height (H_{sig})[m]	0.3	0.88	1.88	3.25
Visual period (T_v)[sec.]	6.4	7.5	8.8	9.7
Expected survival time [hours]	5.95e206	1.079e18	67.57	0.068
Probability of survival for 24 hours	1.0	1.0	0.701	0

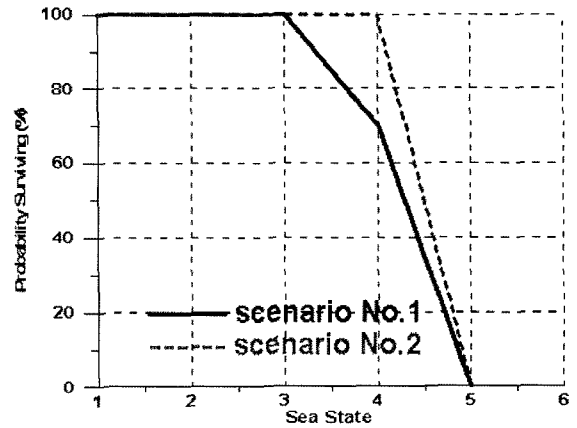


Fig. 12. Probability surviving under various sea state.

또한 피격된 함정에서 승무원이 대피할 수 있는 시간을 24시간으로 가정하고(JJMA [2006]) 이 값을 식 (8)에 대입을 하면, 즉 24시간 이내에 구조 붕괴 파를 만나지 않을 확률(P_0)은 다음과 같다.

이와 같이 계산된 확률값은 함정이 손상된 후 24시간 이내에 승무원이 구조 될 확률이 70.1%라는 의미로 해석될 수 있다. 위와 같은 계산과정으로 피격 후 손상된 함정에 대하여 생존시간을 여러 해상상태에 대하여도 구할 수 있다.

Table 3은 시나리오 1을 기준으로 여러 해상상태에서 계산한 생존시간들을, Fig. 12은 시나리오 1 및 2에서 계산된 여러 해상상태에 따른 생존 확률값들을 각각 보여주고 있다.

Table 3을 보면 각 해상상태에 따라 구한 생존시간은 해상상태에 따라 값이 급격하게 변하고 있으며 이는 가장 손상이 심한 단면에 대하여만 계산을 하고 이것이 손상된 함정의 전체를 대표한다고 가정했기 때문에 계산 변동폭이 심하게 나타나고 있다. 보다 정확히 계산을 하려면 손상이 이루어진 모든 단면에 대하여 손상 전의 단면값들과 각각 비교하고 각 단면을 기준으로 생존시간을 모두 계산하여야 하며 이렇게 구한 생존시간에 대하여 평균을 구한다든가 하는 방법으로 평가하여야 보다 합리적인 평가가 이루어질 것이다. 그러나 본 연구에서는 설계자가 초기 설계 단계에서 적용하기 위하여 가장 심한 조건을 기준으로 전체 하기 때문에 본 논문과 같은 방법으로 접근 하였다. 그러나 앞으로 생존시간을 구하여 평가하는 방법에 대한 보다 합리적인 연구가 필요하리라 사료된다.

위의 예제 결과들을 살펴보면 본 논문에서 적용한 시나리오 중 시나리오 2에서는 폭발 후 해상 상태 4에서 24시간 이내에 구조

될 확률이 100%이나 시나리오 1은 구조될 확률이 70%로 시나리오 1이 좀 더 심한 조건임을 알 수 있다. 즉 실제 설계단계에서는 예상되는 여러 시나리오를 설정하여 각각 폭발해석을 수행하고 각 시나리오에 따라 생존시간을 구하여 비교하면 가장 심한 시나리오를 결정할 수 있으며, 또한 설계 기준을 해상상태 4 등으로 정하면 그 해상상태에서 구한 생존확률이 100% 만족하는지의 여부를 정량적으로 평가함으로써 구조 보강 방안을 쉽게 결정할 수 있을 것이며 본 연구에서 제시하는 방법은 보다 합리적인 설계 방법이 될 것으로 기대한다.

5. 결 론

본 논문에서는 함정의 생존성을 고려한 함정의 설계 과정에서 적의 피격으로 발생한 폭발현상을 모사할 수 있는 수치해석 기법인 ALE기법을 적용하여 폭발해석을 수행하였으며, 특히 폭발 후 손상된 함정이 생존할 수 있는 생존시간을 계산할 수 있는 간이계산법에 대하여 연구하였고 이로부터 다음의 결론을 얻을 수 있다.

(1) 적의 피격에 의한 폭발 현상은 구조-유체 연성 기법인 ALE 기법을 적용하여 비교적 정확한 폭발현상을 구현할 수 있으며 이 결과를 통하여 실제 함정 설계에 반영할 수 있다.

(2) 폭발 후 손상된 함정에 대한 생존시간 간이계산법을 정립하였으며 이를 통하여 손상된 함정의 생존시간을 정량적으로 계산할 수 있다.

후 기

본 논문은 미국 방산업체인 JJMA와 현대중공업(주) 특수선 선체설계부의 지원으로 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 업무 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 이상갑, 권정일, 정정훈, 2001, “수중구조물의 수중폭발 충격 응답해석 기법”, *Proceeding of SNAK*, Koje, pp. 289-293.
- [2] 이상갑, 권정일, 정정훈, 2001, “Effect of Fluid Mesh Modeling on Surface Ship Shock Response Under Underwater Explosion”, 대한조선학회 춘계논문 발표집.
- [3] 정정훈, 허영철, 김병현, 1997, “수중폭발 휘핑 응답해석을 통한 선체 거어더 종강도 평가”, 대한조선학회 춘계논문 발표집.
- [4] DNV, 1997, “NAUTICUS Hull”, User manual.
- [5] Hallquist, J.O., 1999, “*LS-DYNA Theoretical Manual*”, Livermore Software Technology Co.
- [6] JJMA, 2005, “KDX-III Structural Vulnerability Analysis Methodology”, Technical Report, Hyundai Heavy Industries Co. Ltd.
- [7] Kenedy, S.J., 2005, “Input Data for Virginia Tech US Navy Blast Test Study”, Proprietary and Confidential US Navy Blast Test study Report, Intelligent Engineering (Canada) Ltd.
- [8] Lloyd’s Register, 1999, “Provision Rules for the classifications of Naval Ships”.
- [9] McNeal Shwendler, 1993, “MSC/DYTRAN User Manual”, ver.2.1, U.S.A.
- [10] Said, M.O., 1995, “Theory and Practice of Total Ship Survivability for Ship Design”, *Naval Engineers Journal*, pp 191-203.
- [11] Scavuzzo R.J. and Pusey H.C., 2000, “*Naval Shock Analysis and Design*”, SAVIAC.
- [12] Weber, K., 2005, “Investigation of Close-in/Proximity Underwater Explosion Effects on Ship Like Plates Using the Multi-Material Arbitrary Lagrangian-Eulerian Finite Element Method”, *Master of Science Thesis in Naval Architecture and Ocean Engineering*, Virginia Tech, Blacksburg, VA.

2007년 8월 28일 원고접수

2007년 11월 18일 수정본 채택