

Damage simulator를 이용한 선박의 손상강도에 관한 연구

한대석*, 조대승*, 김진형*, 이탁기**, 임채환**, 이제명†*

부산대학교 조선해양공학과*, 한국기계연구원**

A Study of Strength of Damaged Ship Structures Using Damage Simulator

Dae-suk Han*, Dae-Seung Cho*, Jin-hyung Kim*
Tak-kee Lee**, Chae-whan Rim** and Jae-myung Lee†*

Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National Univ.*
Korea Institute of Machinery and Materials**

Abstract

A damage analysis simulator, which is applicable for evaluating the residual strength of damaged ship, was developed in this paper. For this process, CDM (Continuum Damage Mechanics) approach has been implemented to the simulator by virtue of the numerical technique for evaluation of crack initiation and/or enlargement. A damage calculation program has been linked with a commercial finite element analysis code (NASTRAN) and a ultimate strength evaluation program (LSAP) in order to assess residual strength of damaged ship. As a results of series calculation for the frigate model, giving the quantitative structural damage to the ultimate strength evaluation, a residual strength with damage is predicted to be at least 70 percentage lower than the case of intact condition. It was found that the proposed technique can be used as a design support tool in the field of simulation based ship design.

※Keywords: Continuum damage mechanics(연속체손상역학), FEM(유한요소법), Ship residual strength(선박 잔존강도)

1. 개요

본 연구는 피로파괴, 좌굴, 좌초 또는 충돌에 의하여 선체 구조부재가 손상되었을 경우 손상 당시의 해상상태 등의 외부 하중의 변화에 따라

선체구조가 붕괴 될 것인지, 안전영역에 있을 것 인지를 시뮬레이션 할 수 있는 기술개발을 목표로 한다. 구조부재의 손상상태와 외부하중은 밀접한 관계에 놓이는데, 예를 들어 손상범위가 상대적으로 작다하더라도 해상상태가 지극히 양호하지 않아 외부하중이 상대적으로 클 경우 인접부재의 점진적인 파손을 유발하여 선각 거더 전체의 붕괴를 초래할 수도 있으며, 반대로 선체 중앙평행부에 비교적 큰 손상이 발생하였더라도 해상상태가 양

호하고 복원성이 확보되었을 경우 생존성능은 위협받지 않을 수도 있을 것이다.

일반적으로 손상선박에 대한 구조안전성 평가는 간이해석법과 직접해석법으로 분류된다. 간이해석법은 2차원적인 선체중양단면에 대하여 잔여 종강도 계산에 중점을 두고 개발되어져 왔다. 즉, 손상된 종강도 부재를 제외한 잔여 종강도 부재에 대하여 수직/수평 굽힘 모멘트가 작용할 경우 간이 점진적 붕괴해석법을 사용하여 선체가 보유한 최종 종강도를 계산하여 비교하는 방법이다. 최근에는 침수 및 경사 등을 고려하여 수압 등 횡압력이 반영되도록 발전되었으나 횡부재에 대한 영향, 비틀림 하중 및 구조부재의 상호 작용에 대한 정의가 미약하여 인접부재로의 손상범위 확대 등은 고려되지 못하고 있다.

직접해석법은 손상된 선체구조를 3차원 유한요소 모델링 한 후, 손상 선체에 대한 다양한 하중 상태를 모두 반영하여 비선형 유한요소해석을 수행하는 것이다. 이 방법은 정밀한 시뮬레이션이 가능하나 계산량 및 소요시간이 방대하여 비경제적임이 이미 알려진 사실이다. 또한 해석 시의 입력 파라미터에 따라 계산 결과가 상이하게 나올 수 있으므로 각 손상사례에 대하여 장기간의 해석 경험이 필요하다.

본 연구에서는, 손상선체에 대해서는 일반적인 유한요소해석을 수행하고, 손상 영역의 확대에 대해서는 손상역학 수법을 이용하는 이른바 하이브리드법을 이용하여 “손상영역의 확대 - 손상영역의 영향 고려”라는 순환구조를 가지는 해석기법을 사용한다.

2. 연속체손상역학

연속체 손상역학(CDM: Continuum Damage Mechanics)은 연속체 역학의 기본개념과 이론을 바탕으로 손상을 내부 상태변수로 표시하여 연속체 내에서 발생, 성장하는 손상을 이론적으로 추정하는 이론이다(Kachanov 1958). 여기서의 손상은 재료 혹은 구조물의 강성이 저하되는 현상을 의미하며(노인식 등 1992), 피로파괴, 연성 및 취성 파괴 및 파단, 균열, 크립 등 구조 손상에 관한

대표성을 갖는 역학변수로 취급할 수 있다. 구조물의 안전성 평가 측면에서 연속체 손상역학을 이용한 수치해석기술은 과거 수행되어 오던 연구들을 살펴볼 때, 상당한 활용성을 가지고 있다. 금속 혹은 비금속 재료로 이루어진 구조물의 균열발생 및 (균열)손상의 진전 등을 정밀히 예측하고 실험 결과와의 비교를 통하여 수치해석 결과의 신뢰성을 검증하는 등 상당한 수준에 올라와 있는 상태이다.

3. 손상 모델을 이용한 손상계산

손상확대 계산 모듈의 개발을 위해서 우선적으로 고려되어야 할 사항은 손상모델의 선정 및 모델의 적용에 필요한 재료정수의 확보이다.

Lemaitre는 1984년에 연성재료의 점진적 손상에 의한 강성의 감소를 연구하면서 손상변수와 변형률의 관계를 연속체 역학의 정식화 과정 속에 포함시켜 구성방정식을 유도한 바 있다.(Lemaitre 1984) 본 연구에서 사용된 손상계산 모델은 Lemaitre의 등방성 손상모델이 사용되었다.

$$\dot{D} = \left(-\frac{Y}{S_1} \right)^{s_2} \dot{\rho} \quad (1)$$

$$\dot{D} = \left(\frac{1}{S_1} \cdot \frac{1}{2E(1-D)^2} \left\{ \frac{2}{3}(1+\nu) \cdot \alpha^2 + 3(1-2\nu)\alpha^2 \right\} \right)^{s_2} \dot{\rho} \quad (2)$$

식 (1) 과 (2)가 균열진전 시뮬레이터에 탑재된 손상계산 모듈에 사용된 손상발전 방정식으로써 D 가 손상변수이며, S_1 , S_2 는 각 재료의 재료정수, 또한 ρ 는 누적된 소성변형률을 나타내고 있다. Y 는 에너지 해방률이며, 식 (2) 와 같이 탄성계수(E), 포아송비(ν), 정수압응력(α_H) von-Mises 등가응력(σ_e)의 항으로 표현되고, 요소에서 손상이 발생함에 의한 에너지손실을 나타낸다.

손상계산을 위한 Lemaitre의 손상모델은 유한요소 정식화과정을 거치게 되며, 전술한 정식화과정은 3차원 문제에 적합하게 만들어져 있다. 즉, 상기 이론 및 구성방정식들을 이용하기 위해서는 해석모델 역시 3차원 문제로 이산화되어야 한다. 하지만 선박과 같은 대형 구조물의 경우에 3차원 작

업을 수행할 경우 모델링/계산상의 효율성을 고려해야만 한다. 따라서 현재의 Lemaitre의 등방성 손상모델을 그대로 반영한 3차원 구조해석-손상 해석을 수행할 경우 계산량이 방대해짐에 따른 프로그램의 비효율화가 문제시 된다. 그러므로 현실적으로 가장 효율적인 하이브리드 타입 손상계산 프로그램을 개발하기 위해서는 “구조해석-손상해석 연계구도”에 수정이 필요하다. 본 연구에서의 적용 구조인 선박에 대한 구조적 특성상, 구조해석은 2차원 Shell을 채용하고 손상해석은 3차원 모델을 동일하게 사용하는 방법을 사용한다. 과거 금속재료에 대한 동일 손상모델의 적용을 통해 손상계산용 재료정수의 상세는 획득된 바 있으나 (Lee and Toi 2002), 이들 재료정수는 3차원 모델인 경우에 유효한 것이므로 본 연구에서는 재료정수의 수정을 시도한다. 즉, 계산모델은 동일하게 유지하되 계산에 필요한 재료정수의 수정을 바탕으로 3차원, 2차원 어느 경우로 해석을 수행하더라도 동일한 수준의 결과를 획득할 수 있도록 재료정수를 조정한다.

구조해석을 위해서는 상용유한요소 프로그램 NASTRAN을 이용하여 손상해석단계에서는 NASTRAN으로부터 추출된 응력-변형률을 이용하여 손상계산을 수행한다. 이는 유한요소해석 후처리를 통한 손상해석 기법으로 손상발생이 전체 구조에 비하여 광범위하지 않을 경우 유용한 것이 입증되어 있다.

4. 통합환경의 손상확대 가시화 프로그램 (DAMS)

손상계산에 의한 구조 혹은 재료의 손상발전 결과가 가시화되지 못한다면 실제로 프로그램을 이용하는 사용자에게는 큰 의미를 가지지 못한다. 따라서 본 연구에서는 선각 구조 중 임의 위치의 손상이 어느 정도 크기로 발전하고 그 결과로서 전체적인 선박의 강도가 얼마나 저하하는가에 대한 정보를 사용자가 쉽게 파악하고, 그 정보를 다시 이용하게 할 수 있도록 가시화기능을 갖춘 프로그램을 개발하였다.

Fig. 1은 전체 프로그램의 흐름을 나타낸다.

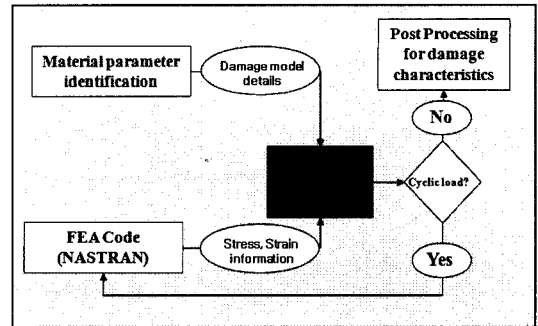


Fig. 1 A schematic process of DAMS

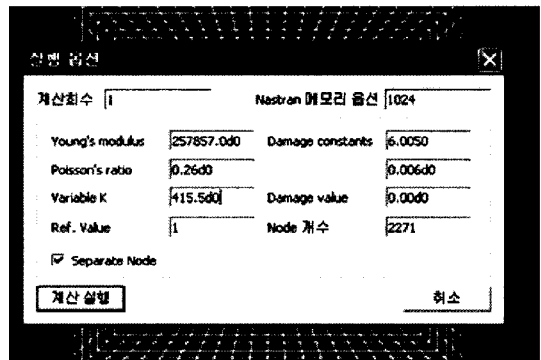


Fig. 2 Material constant inputting of DAMS

손상량을 계산하기 위해 재료내부의 응력상태가 입력으로 필요한데 이를 구하기 위해 상용유한요소 해석코드인 NASTRAN 해석을 수행하여 결과를 입력값으로 받아들이는 하이브리드 형식의 계산과정을 채용하였다. 해석대상 구조용 재료에 대한 재료정수가 손상계산을 위한 초기 자료로 입력되고, 이와 병행하여 손상계산을 위한 응력-변형률 결과를 얻기 위해 NASTRAN을 이용한 구조해석을 실행한다. 다음, 입력된 재료정수와 NASTRAN을 통해 얻어진 응력-변형률 이력이 손상계산코드에 동시에 이용되어 해당 구조의 손상정도를 계산하게 된다.

이 과정은 사용자의 판단에 따라 반복계산으로도 수행되어지며, 이 경우에 앞 단계의 계산에서 획득된 응력, 변형률과 손상의 크기는 해석 대상 구조에 누적된다. 재료의 손상 D는 0 에서 1사이의 값으로 나타나며, 누적된 손상(재료 내부 에

발생하는 미세균열 혹은 공동)에 의해 해석모델의 절점 혹은 요소에서 손상의 크기가 1에 도달하면 균열 등으로 정의되며, 이 값에 도달한 요소는 요소제거 및 경계조건 자동 갱신의 알고리즘을 따르게 된다. Fig. 3~6은 선박의 선측부 높이 12.3m부근의 보강판을 DAMS를 이용하여 해석한 결과이다. 보강판의 좌측 끝단은 고정단이며 우측 끝단에는 균일한 인장력이 가해지고 있다. Fig. 4에서 부재의 해석옵션과 경계조건을 정해주고 있으며, 이후 손상확대해석을 1회에서 3회까지 시행하였다(Fig. 4~6). 계산결과 보강판에 발생하고 있는 손상, 즉 미세 균열의 분포는 하중이 반복될수록 증가됨을 확인할 수 있다.

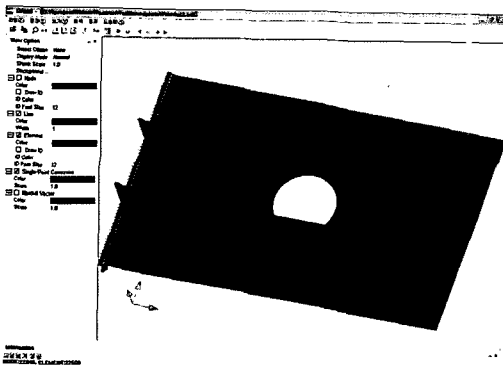


Fig. 3 Selected stiffened panel with a hole

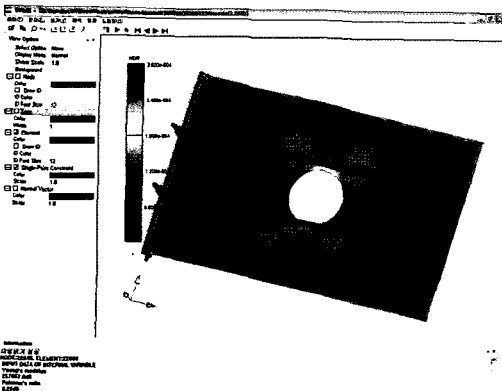


Fig. 4 Damage analysis result for first load

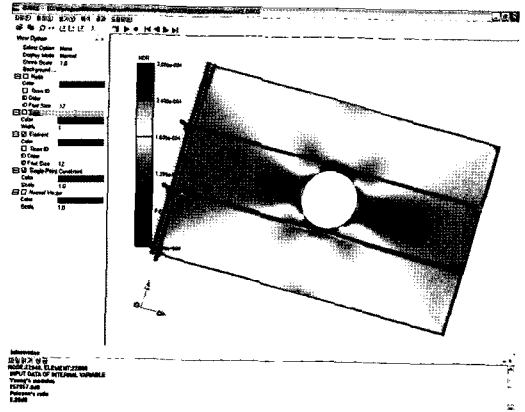


Fig. 5 Damage analysis result for second load

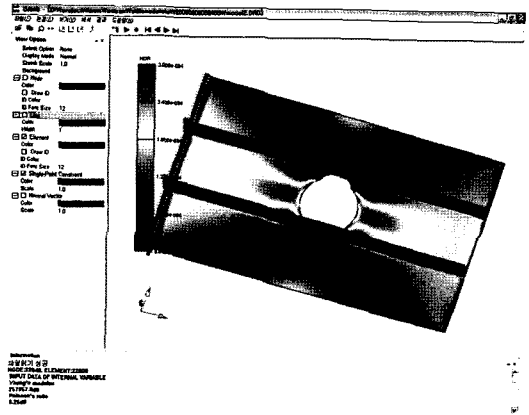


Fig. 6 Damage analysis result for third load

5. 최종강도계산 프로그램(LSAP)과의 연계

5.1 손상확대 추정 및 최종강도 평가 반복수행
 최종강도 평가의 반복수행과정을 살펴보면 다음과 같다. PATRAN에서 초기 손상이 있는 해당 부재의 모델링을 완성하여 DAMS 해석으로 손상영역의 확대를 예측하게 된다. 손상부가 확대되면 그 손상값이 부재에 따라 다르며 이 손상값은 결과적으로 LSAP 계산 시 부재에 손상값을 각각 설정함으로써 LSAP 강도평가가 이루어진다. Fig. 7는 통합 환경하의 LSAP-DAMS 계산 반복 과정을 나타낸다.

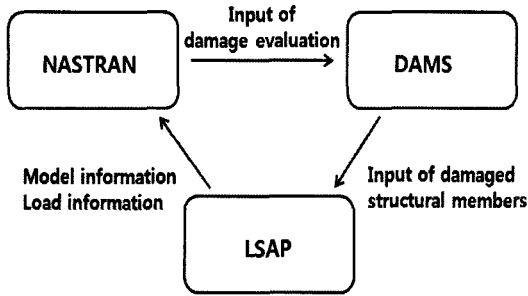


Fig. 7 Calculation process of LSAP-DAMS

5.2 손상 발생 및 확장과 부재의 강도 저하 간의 관계

DAMS를 통하여 계산되어진 손상값은 선박을 구성하는 부재, 즉 평판 혹은 보강판의 총면적에서 손상부를 제외한 영역의 비와 각각의 손상형상 (K_g) 및 손상부의 위치(K_p)를 고려한 계수의 곱으로 나타낼수 있다.

$$D_a = K_g K_p \frac{A_d}{A} \quad (3)$$

이 손상값 D_a 는 초기상태의 보강판 강도에 곱하여져 최종적으로 손상상태의 강도를 구한다. 여기에는 해당하는 손상값들을 계산하기 위한 K_p , K_g 들은 실험적, 수치적 방법으로 구한다는 전제가 필요하다.

Fig. 8 에서부터 11까지 계산과정을 보여주고 있다. 손상값과 손상의 기하학적 특성을 통해 정밀하게 강도를 평가하는 설계식은 구조실험 및 FEM 해석을 통하여 개발하는 과정에 있으나 전체적인 손상강도 저하의 흐름을 보이기 위해 각각의 손상값과 강도의 반비례 관계를 선형으로 가정하여 손상효과를 나타내었다.

6. 결론 및 향후연구

본 연구를 통해 얻은 결과를 아래에 정리한다. 사고 후 선박의 손상영역이 하중 하에서 확대 및 진전되어 가는 특성 평가를 수행하였다.

- 범용적으로 대응할 수 있는 전용코드가 구축되

었으므로 사용자 선택에 따라 해석 목적에 부합하는 특정 하중의 고려가 가능하다. 단, 성능 검증을 위한 각종 실험적 연구의 추가수행을 통해 각 특정 하중별 해석결과의 신뢰성 확보가 필수적으로 수행되어야 한다.

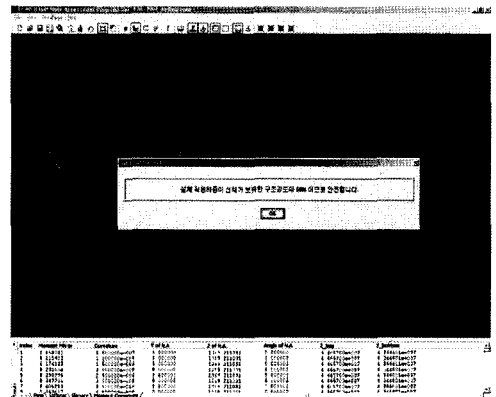


Fig. 8 LSAP result for frigate section with non-damaged member

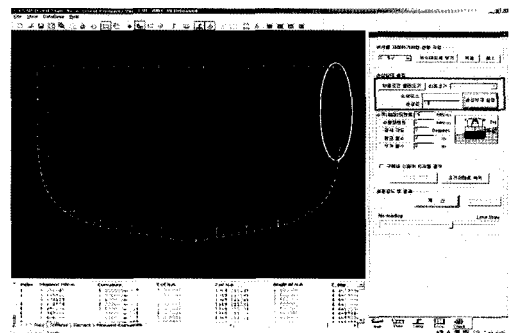


Fig. 9 Selection of damaged section

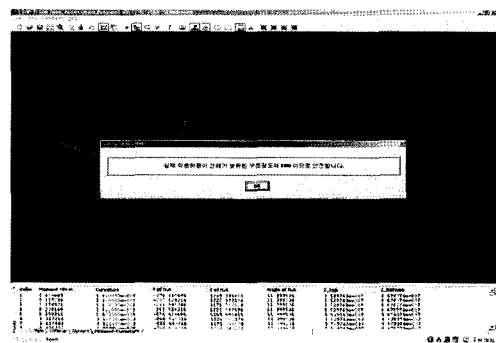


Fig. 10 LSAP result for frigate section with damaged member

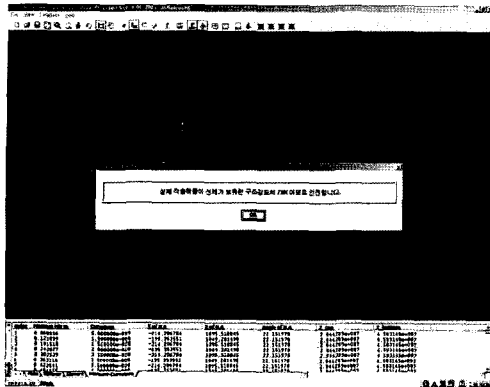


Fig. 11 Decreasing of hull strength by damaged section enlargement

- 범용해석코드(NASTRAN)와 결합된 손상 시뮬레이터 프로그램을 개발하였다.
- 손상평가용 시뮬레이션 기술에 대하여 문헌조사, 벤치마킹 등을 통한 기술 분석을 수행하였고, 활용상의 유용성을 감안한 최적의 모델 제시 및 이를 이용한 알고리즘 구축/프로그램화를 수행하였다.
- 해석용 이론 및 알고리즘과는 별개로, 일반적인 해석도구가 보유하는 가시화 기능 및 기능을 갖춘 프로그램을 개발하였다.
- 손상영역 확대해석과 선박강도저하평가를 연계하여 해석하기 위한 DAMS-LSAP 루프의 통합 환경 마련하였다.

기존 간이 계산에 의한 결과 및 안전율을 고려한 선박의 안전성 평가개념으로부터 벗어나, 선박의 손상상태를 고려할 수 있는 선박의 안전성 평가기법을 개발함으로써 손상선박의 정밀 강도 평가, 손상영역의 확대 및 안전성에 미치는 영향 등의 파악이 가능한 체계적인 설계개념 확립과 함께 상기 문제들에 적용할 수 있는 기초 이론 및 기술 개발, 개발 기술을 탑재한 프로그램 Prototype을 구축하였다. 실제 산업현장에서 활용 가능하도록 하기 위해서는 활용 편의성 제고 및 설계지원용 코드로서의 신뢰성 향상을 위한 연구가 향후 필수적으로 수행되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 산업자원부 후원으로 수행된 “선박 안전성 평가 및 방음/방진 기술 개발” 과제로 수행된 것이며, 첨단조선공학연구센터(ASERC) 및 국가지정 연구실 (No. R0A-2006-000-10239-0)의 연구지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 노인식, 임상전, 신중계, 1992, "연성재료의 소성손상 구성방정식에 관한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 29권, 제 4호, pp. 179-192.
- Kachanov, L.M., 1958, "Time of the Rupture Process under Creep Conditions," Izv. AN SSSR., Otd. Tekh. Nauk., No. 8, pp. 26-31.
- Lee, J.M. and Toi, Y., 2002, "Elasto-Plastic Damage Analysis of Functionally Graded Materials Subjected to Thermal Shock and Thermal Cycle," JSME International Journal Series A-Soild Mechanics and Material Engineering, Vol. 45, No. 3, pp. 331-338.
- Lemaitre J., 1984, "How to use Damage Mechanics," Nuclear Engineering and Design, Vol. 80, pp. 223-245.



< 한 대 석 >



< 조 대 승 >



< 김 진 형 >



< 이 탁 기 >



< 임 채 환 >



< 이 제 명 >