

작은 충돌손상을 가진 보강판의 최종강도 해석

이탁기* · 임채환*

*한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부

Ultimate Strength Analysis of Stiffened Plate with Minor Collision Damage

TAK-KEE LEE* AND CHAE-WHAN RIM*

*System Engineering Research Division, KIMM (Korea Institute of Machinery & Materials), Daejeon, Korea

KEY WORDS: Stiffened plate 보강판, Minor collision damage 작은 충돌손상, Ultimate strength 최종강도

ABSTRACT: The safety of ships is one of the most important concerns in terms of the environment and human life. A ship in bad condition is likely to be subject to accidents, such as collision and grounding. When a ship has minor collision damages in the form of circle or ellipse, its ultimate strength will be reduced. It is important to evaluate the reduction ratio of a ship's ultimate strength that results from damages. The strength reduction of a plate with a cutout in the form of hole has been treated by many researchers. A closed-form formula for the reduction of ultimate strength of a plate, considering the effect of several forms of cutout, has been suggested. However, the structure of ships is composed of plates and stiffeners so-called stiffened plates and it is likely that plates and stiffeners will be damaged together in collisions. This paper investigates the effect of minor collision damages on the ultimate strength of a stiffened plate by using numerical analysis. For this study, the deformed shape of minor collision damages on a stiffened plate was made by using a contact algorithm and was used as the initial shape for ultimate stress analysis. Then, a series of nonlinear FE analyses was conducted to investigate the reduction effects on the ultimate strength of the stiffened plate. The boundary conditions were simply supported at all boundaries, and the tripping of stiffener was neglected. The results are presented in the form of reduction ratio between the ultimate strength of an original, intact stiffened plate and that of a damaged stiffened plate.

1. 서 론

선박은 판과 보강재로 이루어진 전형적인 박판 구조물이다. 이러한 형태의 구조물에 대한 강도 평가는 좌굴을 염두에 둔 강도 검토에 초점을 맞추고 있다. 이는 압축하중이 작용할 경우 박판이 항복점 이하에서도 쉽게 좌굴 붕괴할 수 있기 때문이다. 이러한 이유에서 좌굴강도는 안전하고 신뢰성 높은 선박을 건조하기 위한 핵심 요소라 할 수 있다.

한편, 압축하중을 받아 좌굴된 판 부재라 하더라도 좀 더 하중을 받을 수 있다는 사실이 알려져 있고, 이러한 최대 하중 내 가능성이 최종강도이다. 최근 국제해사기구(IMO)와 국제선급협회(IACS)는 선체구조설계 시에 최종강도를 고려해야 한다는 취지로 표준 및 강선 규칙을 작성 중에 있다. 목적 기반 표준(GBS)과 공통 구조 규칙(CSR)은 판부재의 최종강도를 기초로 선체 구조의 점진 붕괴 강도를 검토하도록 하고 있다.

선박 설계의 최근 경향은 선박의 전 생애 동안 안전해야 한다는 방향으로 가고 있다. 이것은 충돌 및 좌초와 같은 사고 이후 작은 손상을 가진 선박도 최소한 인접한 항구로 피항할 정도의 시간을 벌기 위해 최소한의 구조적 안전성을 유지해야 한다는

것 등으로 나타나고 있다. 특히, 유조선이나 화학제품 운반선과 같은 위험물 운반선의 구조적 붕괴는 심각한 환경오염을 유발할 수 있기 때문에 최종강도 측면의 구조적 안전성은 더욱 더 중요한 것으로 인식되고 있기도 하다. 이러한 배경에서 선박의 구조적 안전성을 평가할 수 있는 최종강도는 최근 주요 관심사 중의 하나로 대두되고 있다.

선체 구조가 손상을 입게 되면, 그 최종강도는 저하할 것이다. 선각 거더의 최종강도를 평가하는 방법으로는 간이식에 의한 방법, 점진 붕괴 해석법 및 비선형 유한요소법의 세 가지 방법이 이용될 수 있다. 앞서 언급한 GBS와 CSR에서는 후자의 두 방법을 채택하고 있다. 그러나 이 중에서 비선형 유한요소법은 컴퓨터 및 관련 기술이 급속히 발달하고 있는 최근에도 여전히 모델링 및 계산에 많은 시간이 소비되는 방법이다. 결국 점진 붕괴 해석법이 정도 및 효율 면에서 가장 유용하다고 판단된다.

사고로 인한 손상을 가진 판구조물에 대한 최종강도 계산 시에 손상된 요소를 구조 모델로부터 제거하는 것이 보통이다. 이러한 단순화 과정을 거쳐 계산된 결과는 실제보다 작을 것이며, 이는 강도 측면에서 안전 측의 결과이기 때문에 대개의 경우 합리적인 것으로 받아들여진다. 그러나 최종강도에 대한 손상의 영향을 알 수 있다면, 보다 정확한 결과를 얻을 수 있을 것임은 분명한 사실이다. 여기서 중요한 것은 손상된 요소를 고려하는

교신저자 이탁기: 대전광역시 유성구 신성로 104

042-868-7473 tklee@kimm.re.kr

복잡한 계산을 매번 실행할 수는 없으므로 손상의 정도나 크기에 따른 최종강도 감소비를 사전에 확인해 둔다면 이를 근거로 손상을 가진 구조물의 최종강도를 보다 정확히 계산할 수 있을 것이다.

이와 관련하여, 컷아웃을 가진 판이 압축하중을 받는 경우의 강도 저하 문제는 많은 연구자들이 수행한 바 있다 (김을년 등, 1998; Harada and Fujikobo, 2002; Paik and Thayamballi, 2003). 그 결과, 몇 가지 형태의 컷아웃을 가진 판의 최종강도 감소에 대한 간이식이 제안되어 있기도 하다 (Paik and Thayamballi, 2003). 그러나 이 식은 판에 인위적으로 만들어진 컷아웃이 존재하는 경우에 대한 것이므로 충돌손상과 같이 사고하중의 작용에 의해 면외방향의 변형을 수반하는 손상이 생기는 경우와는 다를 것이다. 또한, 선체 구조의 주요 부재인 보강재의 영향을 포함하고 있지는 않다. 선체 구조는 판과 보강재로 이루어지며, 보강재는 판과 함께 손상을 입을 가능성이 높기 때문에 이를 고려해야 할 것이다.

본 연구는 수치해석 기법을 이용하여 작은 충돌손상이 보강판의 최종강도를 얼마나 저하시키는지를 조사하기 위한 것이다. 이를 위하여 접촉 알고리즘을 이용하여 보강판에 작은 충돌손상을 수치적으로 만들고, 이를 초기 형상으로 하여 최종강도를 계산하기 위한 탄소성 대변형 해석을 수행하였다. 이때, 충돌손상의 크기를 변수로 취하여 이에 따른 최종강도 저하 효과를 검토하자 한다.

2. 모델링 및 비선형 해석

2.1 경계 및 하중조건 검토

수치해석을 위한 모델링 작업에서 경계조건과 하중조건을 어떻게 부여하는가는 그 결과에 중요한 영향을 미친다. 본 연구에서는 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 비선형 유한요소해석을 수행하였는데(ANSYS, 2000), 경계조건 및 하중조건을 부여하는 방법은 Narayanan과 Chow가 수행한 유공판의 최종강도 시리즈 실험에 대한 해석을 통하여 검토하였다 (Narayanan and Chow, 1984).

해석에서 부여한 경계조건은 실험시 구현한 것과 같이 유공판의 네 변 모두를 단순지지로 하였으며, 동일한 변에 위치한 절점들의 면내방향 변위를 연성시켜 변형 과정 동안 그 변이 직선을 유지하도록 하였다. 하중은 절점력의 형태로 단방향 압축을 부여하였다. Fig. 1은 본 해석에서 이용한 대표적인 유한요소 모델을 보여주고 있다. 원형의 컷아웃을 가진 시험편의 주요 치수는 가로 125mm, 세로 125mm, 두께 1.615mm이며, 재료의 항복응력은 323.3MPa이다.

Table 1은 검토 결과를 정리한 것이다. 여기서 d 는 유공의 지름, B 는 정사각형 평판의 길이, w_{max} 는 판의 면외 초기 처짐의 최대값이며 이 값은 시험시편에서 측정된 값이다. 표에서 알 수 있듯이 본 해석에 의해 얻어진 최종강도는 실험값에 비해 최대 7% 정도의 오차를 주고 있다. 이로써 본 절에서 적용한 경계조건과 하중조건은 적절한 것으로 판단된다.

2.2 작은 충돌손상의 생성

보강판에 작은 충돌손상을 생성시키기 위해 LS-DYNA의 접촉 알고리즘을 이용하였다 (LS-DYNA, 2005). 대상 보강판의 주요 치수는 $900 \times 900 \times 10$ (mm)이며, 보강재는 Flat-bar type으로 그 높이는 60mm, 두께는 10mm이다.

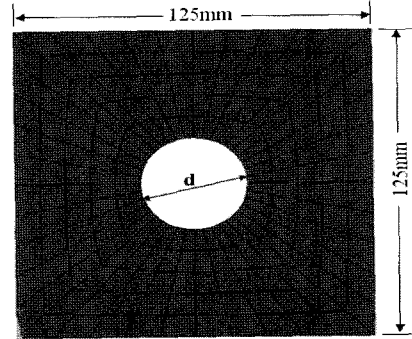


Fig. 1 Typical mesh of a perforated plate

Table 1 Comparison of ultimate strength

Specimen No.	d (mm)	d/B	w_{max} (mm)	P_{ANSYS} (kN)	P_{EXP} (kN)	P_{ANSYS}/P_{EXP}
PL 1	0.0	0.0	0.229	39.52	39.32	1.01
CIR 2a	25.0	0.2	0.229	37.90	37.46	1.01
CIR 3a	37.5	0.3	0.136	35.39	33.94	1.04
CIR 4a	50.0	0.4	0.304	31.76	29.57	1.07
CIR 5a	62.5	0.5	0.279	28.65	27.35	1.05

Table 2 Material properties for a stiffened plate

Density	7850 kg/m ³	Strain-stress relationship	
Young modulus	206 GPa	relationship	
Poisson's ratio	0.3	Plastic strain	Stress (MPa)
Yield stress	315 MPa	0.00000	315
Ultimate stress	490 MPa	0.01583	328
Dynamic yield stress	$D=40.4(1/s), p=5$	0.19786	490
Failure plastic strain	0.2	0.20000	490

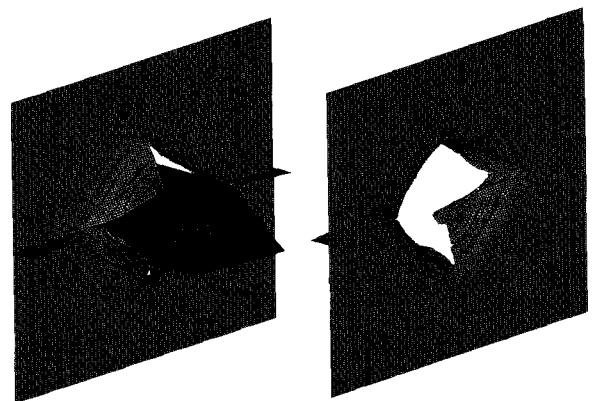


Fig. 2 Generated minor collision damage ($d/B=0.3$)

충돌체는 편의상 원추를 가진 실린더의 강체로 가정하였으며, 실린더의 직경은 다른 손상 크기에 대응시켜 90, 180, 270, 450 mm로 하였다. 충돌체의 이동속도는 0.5m/sec로 고정시켰다. 사용된 재료는 완전 탄소성체로 가정하였으며, 구체적인 재료 특성치는 Table 2에 나타낸 바와 같다. Fig. 2에는 손상 폭의 비가 0.3인 경우에 대하여 생성시킨 손상을 보여주고 있다. 이때, 보강판의 모든 변은 고정시켰다. 생성된 손상을 살펴보면, 판은 보강재가 붙은 방향 및 이에 수직인 방향으로 찢어졌으며, 보강재도 찢기고 구부러졌음을 알 수 있다.

2.3 최종강도 해석

작은 충돌손상을 가진 보강판의 최종강도를 평가하기 위해 ANSYS를 이용하여 해석을 수행하였다. 이를 위하여 우선 LS-DYNA에서 생성시킨 손상된 보강판 모델에 대한 모든 절점 위치와 요소 구성 정보는 ANSYS의 형태로 변환하였다. 해석상의 수치적 에러를 없애기 위하여 찢겨진 손상부의 끝단에 주로 생기는 종횡비가 매우 좋지 않은 일부 요소들은 강도상 거의 기여가 없을 것으로 가정하여 전체 모델로부터 제거하였고, 손상부의 나머지 요소들 중에서 종횡비가 불량한 사각형 요소들은 삼각형 요소를 도입하여 종횡비를 개선시키는 작업을 수행하였다.

해석 시 앞서 2.1절에서 유공판에 적용한 것과 동일한 경계조건과 하중조건을 부여하였다. 또한, 손상되지 않은 판의 경우도 비교의 기준으로 삼기 위하여 최종강도 해석을 수행하였다. 해석의 과정상 먼저 고유치 해석을 통하여 탄성 좌굴 해석을 수행하고 호장법 (Arc length method)에 의한 탄소성 대변형 해석을 수행하였다. 이때, 보강재의 경우 충돌손상에 의해 중간이 끊어진 상태로 판에만 접합되어 있어 압축하중에 의하여 보강재에 트리핑은 발생하지 않을 것이므로 붕괴모드 중 보강재의 트리핑은 무시하였다. 또한, 해석의 정도를 고려하여 요소의 크기는 판 두께의 절반 정도를 유지하였다.

3. 해석 결과 검토

Table 3은 손상이 없는 보강판 및 손상을 생성시킨 보강판에 대한 단방향 압축 하에서의 최종강도에 대한 해석결과이며, 해석으로부터 얻어진 축하중과 변위와의 관계는 Fig. 3에 나타낸 바와 같다. 이 그림으로부터 손상부의 크기가 클수록 최종강도가 감소하고 탄성영역의 기울기도 완만해지는 것을 알 수 있다.

한편, Paik and Thayamballi (2003)에 의해 유도된 단축 압축 시 초기 면외변형이 없는 유공 평판의 최종강도 감소 계수는 다음 식과 같다.

$$R_{xu} = \frac{\sigma_{xu}}{\sigma_{xu0}} = -0.7 \left(\frac{d}{B} \right)^2 - 0.365 \left(\frac{d}{B} \right) + 1.0 \quad (1)$$

여기서, σ_{xu} , σ_{xu0} 는 각각 유공이 있는 경우와 없는 경우에 대한 최종강도이다. 그들은 유공의 크기와 형태 (원형, 타원 및

Table 3 Ultimate axial forces and stresses of stiffened plates

Specimen No.	d/B	Ultimate axial force (MN)	Ultimate stress (MPa)
PL	0.0	3.02	314.88
SP 1	0.1	2.33	242.51
SP 2	0.2	1.77	184.28
SP 3	0.3	1.39	145.18
SP 5	0.5	0.57	59.28

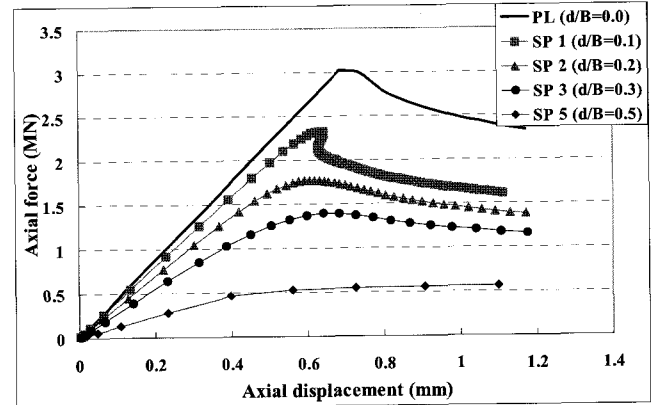


Fig. 3 Relationship between axial force and displacement

사각형) 및 판의 종횡비를 변수로 설정하여 시리즈 유한요소 해석을 수행하고 그 결과를 바탕으로 위의 식을 제안하였는데, 최종강도 감소는 유공의 크기에만 연관되며, 유공의 형태와 판의 종횡비 또는 판 두께와는 거의 관계가 없는 것으로 보고하였다.

Fig. 4는 판의 폭에 대한 손상부의 크기 변화에 따른 최종강도 감소 경향을 보여주고 있는데, 식 (1)에 따라 계산된 감소비도 같이 나타내었다. 그림으로부터 손상비가 증가함에 따라 손상된 보강판의 최종강도는 거의 선형적으로 감소되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4를 살펴보면, 식 (1)에 의해 계산된 최종강도 감소량은 본 해석을 통해 얻어진 값보다 상당히 작으며, 손상의 크기에 따른 최종강도 감소비의 기울기도 완만함을 알 수 있다. 여기서 식 (1)은 선체 구조에서 Access hole과 같이 평판에 인위적으로 가공된 Opening을 가진 유공판에 대한 것이며, 초기 면외변형 또한 고려하지 않은 것이다. 한편, 본 연구의 결과는 하나의 보강재가 부착된 보강판을 대상으로 하여 수치적으로 충돌손상을 생성시켰기 때문에 이로 인한 영구 면외변형이 최종강도 해석 모델에 포함되어 있다. 그림에서 알 수 있듯이 손상된 보강판의 최종강도 감소량은 판 폭에 대한 손상부의 크기 비 (d/B)에 따라 달라지며, d/B 가 0.1일 경우 유공판의 경우에 비해 약 19% 정도 최종강도를 더 감소시키고 있으며, d/B 가 0.5일 때는 약 71%까지 최종강도를 더 감소시키고 있는 것으로 조사되었다.

Fig. 4에서 두 경우에 대한 최종강도 감소비의 차이를 유발하는 원인으로서는 수치적으로 손상을 생성시키면서 생긴 면외변형된 부분의 최종강도에 대한 기여분과 손상에 따른 보강재의 내

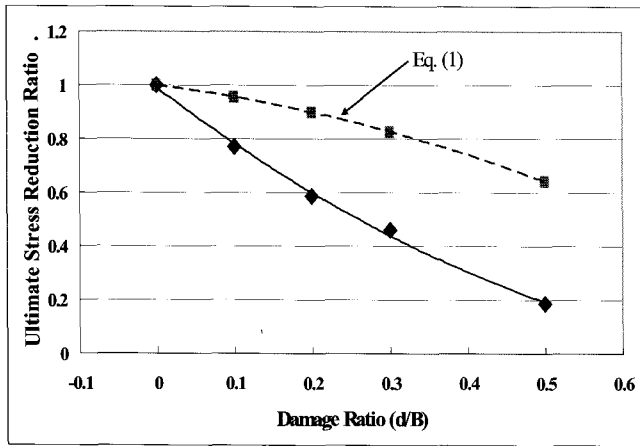


Fig. 4 Variation of the ultimate strength of damaged stiffened plates

하중 능력 차이를 고려할 수 있다. 최종강도 해석 모델을 조사한 결과, 손상이 생성된 이후 판에 남은 영구 면외변형은 판 두께의 8-10배 정도로 나타났다. 그리고 손상된 보강재는 중간이 끊어진 상태여서 면내 압축하중에 견딜 수 있는 연속부재로서의 작용은 할 수 없으므로 손상판에서 보강재의 최종강도 기여분은 작을 것으로 생각된다.

따라서 충돌손상을 고려한 정도 높은 최종강도 해석을 위해서는 손상생성 시에 구조에 남은 영구 면외변형과 보강재의 손상 정도를 고려하여야 함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 작은 충돌손상을 가진 보강판의 최종강도가 얼마나 감소하는지를 조사하기 위하여 수치적으로 손상을 생성시킨 후 시리즈 최종강도 해석을 수행하였다. 해석 시에 사용한 경계조건과 하중조건은 최종강도 실험 결과에 대한 비교를 통하여 검토하였는데, 모든 변은 단순지지이며 직선을 유지하는 조건으로 하였다.

시리즈 해석 결과를 통하여 얻어진 비교적 큰 면외변형을 수반하는 작은 충돌손상을 가진 보강판의 최종강도 감소량은 유공판의 그것과 비교할 때 상당한 크다는 것을 알 수 있었는데, 최

종강도 감소량은 손상부의 크기가 판 폭의 10%인 경우 유공판의 경우에 비해 약 19% 정도 크며, 손상부 크기가 판 폭의 50%일 때는 약 71% 정도 커지는 것으로 조사되었다. 이로부터 충돌손상을 고려한 보강판의 정도 높은 최종강도 해석을 위해서는 손상시 발생 가능한 영구 면외변형과 보강재의 손상 정도를 고려해야 함을 알 수 있었다.

보다 실제에 가까운 경우에 이러한 과정을 적용하기 위해서는 2개 이상의 보강재를 포함한 보강판을 대상으로 충돌 부위가 보강재 사이인 경우까지를 포함하는 광범위한 노력이 필요할 것으로 사료된다. 또한, 손상부를 모델링하는 방법에 대한 검토도 수행되어야 할 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지원으로 수행된 '선박 구조 안전성 평가 및 방음/방진 기술 개발' 과제에의 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

김을년, 김외현, 김관영 (1998). "유공판의 좌굴강도에 대한 연구", 대한조선학회 춘계학술발표회 논문집, pp 271-274.
 ANSYS (2000). version 9.0
 Harada, M. and Fujikubo, M., (2002). "Estimation of buckling and ultimate strength of rectangular plate with cutout", Proc. of the Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference, Japan, pp 630-635.
 LS-DYNA (2005). version 970.
 Narayanan, R. and Chow, F.Y. (1984). "Ultimate capacity of uniaxially compressed perforated plates", Thin-Walled Structures, Vol 2, pp 241-264.
 Paik, J.K. and Thayamballi, A.K. (2003). Ultimate Limit State Design of Steel-Plated Structures, John Wiley & Sons, Ltd.

2007년 3월 14일 원고 접수

2007년 6월 22일 최종 수정본 채택