
 論 文

大韓造船學會論文集
 제 31 卷 1 號 1994 年 2 月
 Transactions of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 31. No. 1, February 1994

좌초시 선저보강판의 손상에 관한 연구 (제1보: 실험)

백점기*, 현명현**, 이탁기**

On the Grounding Damage of Ship Bottom Stiffened Platings (Part I: Experiment)

by

Jeom K. Paik, Myung H. Hyun and Tak K. Lee

요 약

본 연구에서는 선저보강판부재의 좌초시 손상거동특성을 규명하기 위하여 시리즈 실험을 수행하였다. 즉, 강체웨지가 선저보강판을 연직방향에서 준정적으로 진입할 때 여러가지 파라메타 즉 1) 판의 종횡비, 2) 웨지각도, 3) 판두께, 4) 웨지형상 및 5) 중·횡보강재의 변화에 따른 시리즈 실험을 수행하고, 좌초시 선저보강판의 좌초하중-진입량 관계와 흡수에너지-진입량 관계 등에 관한 파라메타들의 영향을 분석하였다.

Abstract

The aim of the present paper is to clarify the damage characteristics for ship bottom stiffened platings in grounding. For this purpose, a series of tests are performed. A rigid wedge is quasi-statically pushed into the high tensile steel plates with two stiffeners. The aspect ratio of plates(a/B) is in the range from 1.0 to 2.5 and the thickness of plates is in the range from 3.4 to 7.0mm. Also other parameters, namely the shape of wedge tip, wedge angle and property/direction of stiffeners are varied. The test is carried out using the 100ton universal test machine. During the loading, both applied force and length of cutting(penetration) resulting in the grounding force-penetration response are measured.

발 표 : 1993년도 대한조선학회 춘계연구발표회('93.4.17)

접수일자 : 1993년 5월 6일, 재접수일자: 1994년 1월 28일

* 정희원, 부산대학교 조선공학과, 기계기술연구소 연구원

** 학생회원, 부산대학교 조선공학과 대학원 석사과정

기호설명

a	판길이
B	판폭
b	보강재 간격
D	판의 굽힘강성(=Et ³ /12(1-ν))
ν	포와송비(=0.3)
E	탄성계수
h	보강재 높이
I	보강재의 단면2차모멘트
P	작용하중
R	등근 웨지의 선단반경
t	판두께
t _s	보강재의 두께
W ₀	실험장치에 설치하기전 판의 최대 초기처짐량 (설치후의 초기처짐량은 거의 없음)
δ	진입량
ε _{cr}	재료인장시험에서의 시험편이 두 부분으로 파괴될 때의 변형률 (연신률, elongation)
2θ	날카로운 웨지의 선단각도
σ _y	재료의 항복응력(0.2% 인장변형률에서 측정)
σ _u	재료의 최종인장응력

1. 서 언

좌초 및 충돌에 관한 연구는 30여년 전부터 수행되어져 왔고, 특히 근래들어 이들 사고로 인한 해상오염의 문제가 날로 심각해짐에 따라 각국의 관심이 집중되어 이에 대한 방대한 이론적·실험적 연구가 수행되어 왔다. Jones등 [1]은 1970년대 이전까지 수행되어 온 이 분야의 관련 연구성과를 상세히 조사하고 있으며, Lu등[2]은 그 이후의 연구성과 가운데 주로 좌초 문제에 대한 실험적 연구를 중심으로 조사한 바 있다.

좌초시 선저구조의 손상거동은 판부재의 찢어짐(Tearing, Cutting) 및 말림(Curling, Rolling-up)현상이 일어나는 등 매우 복잡하고, 이 문제를 단순히 이론적 수법으로만 해석하는 것은 극히 어렵다. 통상 먼저 좌초실험을 수행하여 좌초시 선체판부재에 대한 기본적인 손상거동특성을 규명하고, 이 실험결과를 바탕으로 간이 해석모델을 도출하여 실제 선박의 좌초손상 해석시에 적용하고 있다. 즉 현시점에서는 좌초시 실제 선박의 손상거동을 보다 정확하게 추정하기 위해서는 먼저 선체판부재에 대하여 보다 실제적인 좌초손상실험의 수행과 명확한 손상거동특성의 규명이 필수적이다.

지금까지 수행되어져 온 좌초에 관한 실험적 연구에

대하여 다음의 두가지 사항을 지적할 수 있다. 첫째, 거의 모든 좌초실험이 보강재가 붙지 않은 단순한 판부재만을 대상으로 하고 있다. 그러나 실제 선체판부재에는 보강재가 붙어 있으며, 보다 실제적인 좌초손상거동을 파악하기 위해서는 보강판부재에 대한 실험이 수행되어야 할 것이다. 둘째, Lu등[2] 및 Akita등[3]의 실험을 제외한 대부분의 실험적 연구가 drop-hammer에 의한 일종의 충격하중 조건하에서 수행되었기 때문에 최종적인 손상상태 밖에 알 수 없고, 손상진행도중의 거동특성은 파악할 수 없어서 명확한 손상거동특성의 규명이라는 본래의 목적을 달성하기 어려운 경우가 많다는 것이다. 물론, 좌초시 선저구조의 하중상태는 엄밀히는 동적충격상태로 다루어야 하지만 선박의 충돌사고시에 비해 좌초시의 하중속도는 극히 느리고 준정적으로 다를수 있다는 것이 알려져 있다 [1, 2].

이상의 관점에서 본 연구에서는 보강판 부재를 대상으로 강제웨지를 판의 횡단면에서 준정적으로 진입시키는 시리즈실험을 수행하여 좌초시 선체판부재의 손상거동특성을 보다 실제적이고 정확하게 규명하고자 하였다. 실험을 통하여 하중증분단계마다 작용하중 및 진입량의 크기를 측정하였으며, 이 결과를 바탕으로 하중-진입량곡선의 아래 면적을 수치적분하여 흡수에너지-진입량 응답도 계산하였다. 특히, 좌초손상거동에 관한 각종 인자의 영향을 파악하기 위하여, 판의 종횡비, 웨지각도, 판두께, 웨지선단의 형상 및 종/횡보강재 치수 등을 변화시킨 시리즈실험을 수행하였다.

2. 시리즈 실험

2.1 실험개요

좌초시 선체보강판부재의 손상거동특성을 규명하기 위하여 강제웨지를 준정적으로 진입시키는 실험을 수행하였다. Fig.1에는 이 실험을 위한 실험설비개요를 보여주고 있다. 실험은 부산대학교 조선공학과 구조공학실험실에 설치되어 있는 Shimadzu 100톤 만능시험기를 이용하여 수행하였다. 강제웨지를 만능시험기의 상부고정반에 고정시키고, 하부이동대에는 고정프레임으로 지지된 판부재를 수직으로 설치했다. 판부재는 양측면 및 하부에서 프레임에 볼트로 고정되어 있다. 프레임의 두께는 웨지가 판부재를 진입할 때 판부재의 굽힘이나 기타 여러가지 변형에 의해서도 프레임이 손상받지 않고 판부재를 고정시킬 수 있도록 충분히 두껍게 했다. 하부이동대에는 타원형의 나사홈을 만들어 판두께의 변화에 따라 마주보는 프레임사이를

조절할 수 있도록 하였고, 또한 나사홈을 적당한 간격마다 여러개 만들어 판의 종횡비의 변화에 따라 프레임 을 이동하면서 설치하여 판부재를 고정시킬 수 있도록 하였다. 여기서 하중을 가하는 방법은 Vaughan[6] 및 Jones[7]가 수행한 것처럼 강제웨지를 높은 곳에서

떨어뜨리는 동적실험(Dynamic Test)이 아니라 Shimadzu 100톤 만능시험기의 하중장치를 이용하여 천천히 가하는 준정적 실험방법(Quasi-Static Test)을 취하였으며, 이때 하중작용속도는 대략 0.05mm/sec를 유지시켰다. 한편, 강제웨지선단의 최초 진입 위치는 판의 말림현상이 좌우대칭이 되도록 하고, 웨지 측면이 양 보강재에 동시에 닿도록 하기 위하여 판부재의 중앙지점으로 하였다.

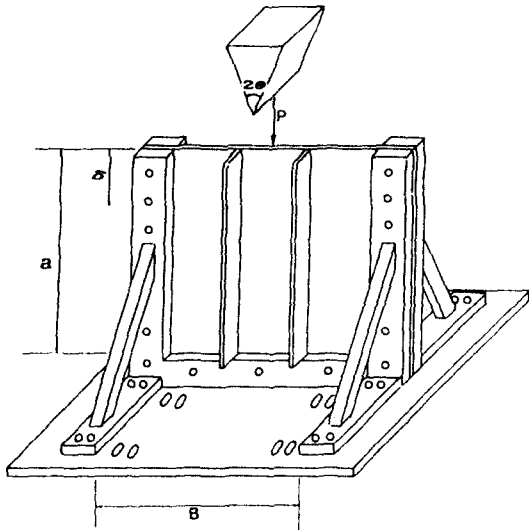
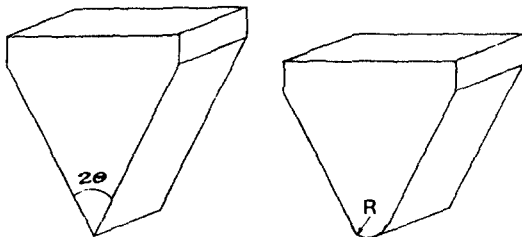


Fig.1 Schematic view of test set-up



(a) Sharp wedge (b) Round wedge

Fig.2 Shape of rigid wedge

Table 1 Parameters of wedge

Specimen No.	Wed. Angle (2θ) (°)	Radius(R) (mm)	Type
1	15	-	Sharp wedge
2	45	-	Sharp wedge
3	60	-	Sharp wedge
4	45	15	Round wedge
5	45	30	Round wedge

2.2 강제웨지

Fig.2에 나타낸 바와 같이 강제웨지는 웨지선단이 뾰족한 웨지 3종류 및 둥근 웨지 2종류가 있는데, Table 1에 그 기하학적 특징이 상세히 나타나 있다. 둥근 웨지를 제작한 목적은 날카로운 웨지와 비교하여 웨지선단의 형상에 따른 거동특성을 파악하기 위함이다. 웨지의 재료는 웨지가 판을 진입할 때 손상받지 않도록 하기 위해 판보다 강한재료를 사용했고, 열처리도 하여 충격강도가 크게 되도록 배려하였다.

2.3 시험편(판부재)

Fig.3에 실험대상 보강판 부재에 대한 모형도를 보여주고 있으며, Table 2에는 대상판부재의 치수 및 인장재료실험결과를 나타내고 있다. 사용재료는 두께가 3.4mm, 5mm 및 7mm인 3가지의 고장력강인 판부재를 대상으로 하였으며, 각각의 판두께에 대해 판의 종횡비(a/B)는 1에서 2.5까지 5종류를 설정하였다. 그리고 판부재의 양측 모서리부분과 밑부분은 프레임으로 맞대어 볼트로 고정시킬 수 있도록 구멍을 뚫었다.

보강재는 Fig.3.a에 나타내는 바와 같이 기본적으로 강제웨지가 진입하는 방향과 평행하게 등간격으로 용접에 의해 부착하였다(보강재 사이의 간격 $b=B/3$). 또한 종보강재가 붙은 시험편과 손상거동특성을 비교하기 위해 Fig.3.b에 나타내는 바와 같이 2개의 수평 보강재도 등간격으로 용접에 의해 부착하였다. 보강재의 형상은 모두 Flat-bar형이며, 필렛용접으로 판에 부착시켰다. 용접결과 판부재에는 다소간의 초기처짐이 발생하였으며, Table 2에 초기처짐 측정결과를 보여주고 있다. 여기서, 초기처짐 (W_0/t)은 웨지가 진입하는 판의 횡단면에서의 최대 초기처짐량을 나타낸다. 보강재의 두께는 모두 5mm로 하고 보강재의 높이(h)는 판두께(t)가 3.4mm, 5mm 및 7mm에 대해 각각 30mm, 50mm, 70mm를 취하여 h/t비가 일정하게 하였다. 종방향보강재가 붙은 시험편은 모두 47개이고, 횡방향보강재가 붙은 시험편은 2개이다.

Table 2 Details of specimen and test result

Specimen No.	a (mm)	B (mm)	b (mm)	t (mm)	t _s (mm)	h/t	E (kg/mm ²)	EI/bD	ϵ_{cr} (%)	σ_y (kg/mm ²)	σ_u (kg/mm ²)	W ₀ /t
T3-1	500.0	200.5	67.4	3.4	5.0	8.82	19867	109.3	26.6	40.0	47.9	1.32
T3-2	501.0	200.0	67.5	3.4	5.0	8.82	19867	109.3	26.6	40.0	47.9	0.47
T3-3	500.0	200.0	66.5	3.4	5.0	8.82	19867	110.2	26.6	40.0	47.9	0.38
T3-4	501.5	199.0	63.0	3.4	5.0	8.82	19867	113.4	26.6	40.0	47.9	0.85
T3-5	500.0	249.5	83.5	3.4	5.0	8.82	19867	97.0	26.6	40.0	47.9	1.09
T3-6	500.0	250.0	83.0	3.4	5.0	8.82	19867	97.4	26.6	40.0	47.9	0.85
T3-7	500.0	299.5	100.0	3.5	5.0	8.57	19867	81.2	26.6	40.0	47.9	0.50
T3-8	501.0	299.5	100.0	3.4	5.0	8.57	19867	87.2	26.6	40.0	47.9	1.00
T3-9	497.5	299.5	99.0	3.4	5.0	8.53	19867	87.7	26.6	40.0	47.9	0.38
T3-10	499.0	300.5	100.0	3.4	5.0	8.82	19867	87.2	26.6	40.0	47.9	0.29
T3-11	501.0	401.0	134.0	3.4	5.0	8.82	19867	72.4	26.6	40.0	47.9	0.88
T3-12	500.5	400.0	133.0	3.4	5.0	8.82	19867	72.8	26.6	40.0	47.9	0.35
T3-13	500.0	400.5	133.0	3.4	5.0	8.82	19867	72.8	26.6	40.0	47.9	0.29
T3-14	500.5	400.0	133.0	3.4	5.0	8.82	19867	72.8	26.6	40.0	47.9	0.91
T3-15	501.5	500.5	167.5	3.4	5.0	8.82	19867	62.1	26.6	40.0	47.9	1.03
T3-16	501.5	501.5	167.5	3.4	5.0	9.09	19867	67.1	26.6	40.0	47.9	1.12
T3-17	502.0	500.5	168.4	3.4	5.1	8.57	19867	57.5	26.6	40.0	47.9	1.32
T3-18	501.0	500.0	167.8	3.4	5.1	8.82	19867	62.1	26.6	40.0	47.9	1.18
T3-19	499.5	500.5	170.0	3.4	5.0	8.82	19867	61.5	26.6	40.0	47.9	0.56
T3-20	500.5	499.5	167.0	3.4	5.0	8.82	19867	62.3	26.6	40.0	47.9	0.88
T5-1	501.0	199.5	67.5	5.0	5.0	10.0	19771	148.2	39.5	33.5	44.0	0.42
T5-2	499.0	200.5	67.5	5.0	5.0	10.2	19771	155.9	39.5	33.5	44.0	0.74
T5-3	501.0	199.0	68.5	5.0	5.0	10.0	19771	147.0	39.5	33.5	44.0	0.60
T5-4	501.5	199.5	67.5	5.0	5.0	10.0	19771	148.2	39.5	33.5	44.0	0.40
T5-5	500.0	251.0	84.0	5.0	5.0	10.0	19771	131.4	39.5	33.5	44.0	0.42
T5-6	501.0	248.0	84.0	5.0	5.0	10.0	19771	131.2	39.5	33.5	44.0	0.76
T5-7	500.0	300.5	99.5	5.0	5.0	10.0	19771	119.3	39.5	33.5	44.0	1.00
T5-8	502.0	300.0	100.5	5.0	5.0	10.0	19771	119.3	39.5	33.5	44.0	0.46
T5-9	498.0	300.0	100.0	5.0	5.0	10.0	19771	118.9	39.5	33.5	44.0	0.58
T5-10	498.0	301.0	99.0	5.0	5.0	10.0	19771	119.6	39.5	33.5	44.0	0.84
T5-11	503.5	401.5	133.5	5.0	5.0	10.0	19771	119.6	39.5	33.5	44.0	0.90
T5-12	502.5	399.5	133.5	5.0	5.0	10.0	19771	99.6	39.5	33.5	44.0	0.70
T5-13	501.0	399.5	133.5	5.0	5.0	9.8	19771	99.6	39.5	33.5	44.0	0.80
T5-14	500.0	499.5	167.5	5.0	5.0	10.0	19771	94.6	39.5	33.5	44.0	1.22
T5-15	500.0	500.0	167.5	5.0	5.0	10.0	19771	85.6	39.5	33.5	44.0	1.62
T5-16	500.5	500.0	167.0	5.0	5.0	10.2	19771	85.8	39.5	33.5	44.0	1.20
T5-17	500.0	499.0	167.0	5.0	5.0	10.0	19771	85.8	39.5	33.5	44.0	1.20
T5-18	499.5	500.5	167.5	5.0	5.0	10.0	19771	85.6	39.5	33.5	44.0	1.02
T5-19	499.5	499.5	167.5	5.0	5.0	10.0	19771	85.6	39.5	33.5	44.0	1.80
T5-20	500.0	500.0	-	5.0	5.0	10.0	19771	-	39.5	33.5	44.0	0.30
T5-21	500.0	500.0	-	5.0	5.0	10.0	19771	-	39.5	33.5	44.0	0.44
T5-22	500.0	500.0	-	5.0	-	-	19771	-	39.5	33.5	44.0	0.04
T7-1	501.0	202.5	66.9	7.8	5.1	8.85	19218	115.7	40.1	29.3	43.6	0.33
T7-2	501.0	251.0	83.5	7.0	5.0	10.0	19218	131.9	40.1	29.3	43.6	0.37
T7-3	499.0	300.5	99.0	7.0	5.0	10.0	19218	119.6	40.1	29.3	43.6	0.67
T7-4	499.0	301.0	100.0	7.0	5.1	10.1	19218	121.0	40.1	29.3	43.6	0.71
T7-5	500.5	401.5	133.5	7.4	5.0	9.46	19218	86.5	40.1	29.3	43.6	0.53
T7-6	501.0	402.0	133.0	7.4	5.0	9.59	19218	86.8	40.1	29.3	43.6	0.54
T7-7	599.5	500.0	168.0	7.0	5.0	9.86	19218	85.5	40.1	29.3	43.6	0.47
T7-8	501.5	501.5	168.5	7.8	5.0	8.97	19218	64.8	40.1	29.3	43.6	0.66

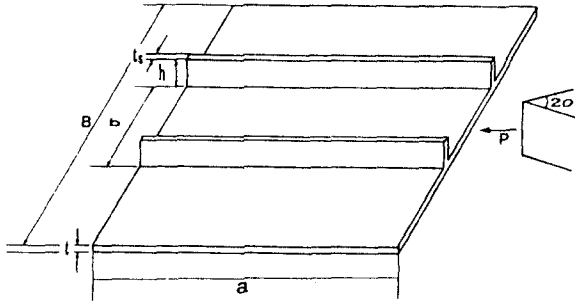


Fig.3.a Tested plate specimen with two longitudinal stiffeners

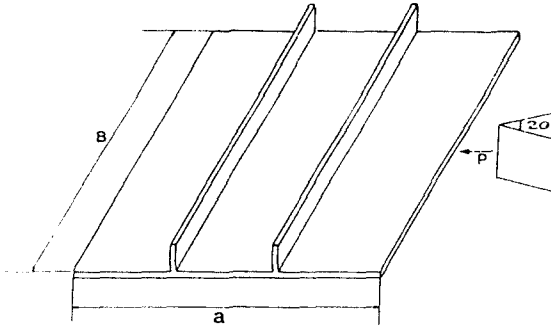


Fig.3.b Tested plate specimen with two transverse stiffeners

2.4 실험결과 측정

실험은 강체웨지가 보강재에 닿아서 보강재가 횡으로 넘어져 보강재의 강성이 저하되고 양쪽 프레임의 효과가 나타나기 전까지 하중과 진입량을 측정하였다. 실험도중에 특징적인 현상이 관찰될 때마다 부하를 멈추고 판의 변형 및 파괴상태등을 조사하였으며, 또한 현장감있는 기록보존을 위해 사진촬영도 병행하였다. 진입량은 판을 고정시킨 프레임의 상부로부터 진입된 웨지선단까지의 상대변위로 측정했고, 하중은 Shimadzu 100톤 만능시험기에 부착된 하중지시기에 의해 계측하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 손상거동의 일반특성

(1) 날카로운 웨지(Sharp Wedge)의 경우

Fig.4.a는 날카로운 웨지가 판을 진입하는 경우의 대표적인 하중-진입량 관계를 보여주고 있으며, Fig. 4. b는 실험종료후의 최종적인 손상형상을 보여주고 있다. 이 경우, 강체웨지의 진입에 따른 판부재의 손상거동은

다음의 6단계로 나누어 특징적으로 설명할 수 있다.

(a) OA단계: 최초 웨지가 판을 진입해 들어감에 따라 먼저 판은 찢어지며(Tearing, Cutting), 점 A에서 좌굴되면서 웨지끝과 접촉하는 부분이 말리기 시작한다(Fig.5.a)

(b) AB단계: 점 B까지는 진입은 거의 진행되지 않고 말림이 진행되면서 내력만 감소한다.

(c) BC단계: 웨지가 다시 판을 진입해 들어가면서 하중의 증가와 함께 판은 계속 찢어지면서 말린다. 여기서 말림현상은 웨지가 판을 진입하는 부분인 보강재 내의 판부분에서만 일어나고 보강재 바깥부분은 보강재가 판의 말림을 방해하기 때문에 보강재가 좌굴될 때까지 직선을 그대로 유지하고 있다. 또한, 이때 판이

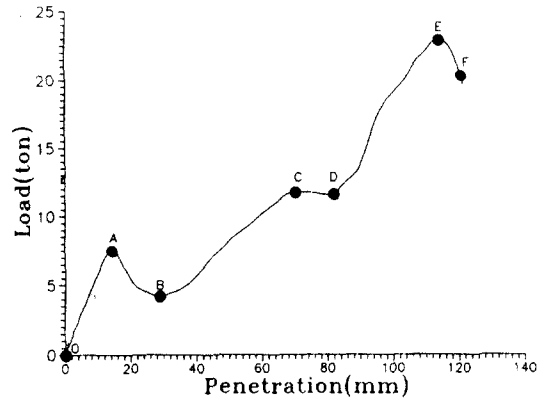


Fig.4.a General characteristics of damage behavior of stiffened plates by sharp wedge

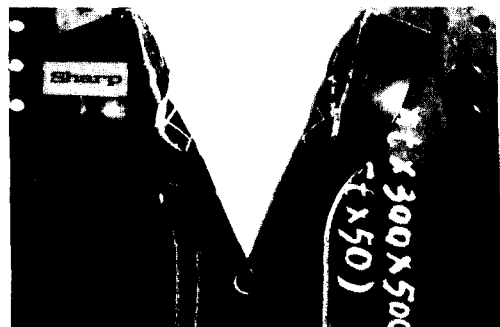


Fig.4.b Photo of a damaged plate by sharp wedge

밀리는 방향과 반대방향으로 판의 굽힘변형이 진행된다.

(d) CD단계: 진입이 진행되면서 판의 보강재 안쪽 부분이 계속 밀리다가 다시 점C에서 좌굴이 일어나면서 지금까지 말리던 방향과 반대방향으로 말림(Fig. 5. b)이 진행되고 굽힘변형도 반대방향으로 진행된다. 이처럼 점 C와 같은 하중정점의 위치는 판이 좌굴되면서 말림과 굽힘변형의 진행방향이 바뀌는 시점임을 알 수 있다. 여기서 웨지가 판을 진입하는 동안 처음 좌굴이 발생할 때보다 내력감소가 작거나 거의 일어나지 않고 있는데, 그 이유는 보강재의 영향때문이라고 생각된다. 그리고 보강재에 의해 판의 보강재 바깥부분은 직선을 유지하기 때문에 웨지에 의해 찢어지며 말리던 보강재 사이의 판은 더 이상 말리지 못하고 웨지에 눌러 접혀지면서 보강재 근처에서 약간의 파단(Crack)이 일어난다.

(e) DE단계: 진입량이 증가하다가 점 D에 이르면 보강재의 영향으로 인해 하중이 급격히 증가한다. 그런데 여기서 주목할만한 사실은 보강재의 영향에 의한 하중의 급격한 증가는 웨지가 보강재에 닿았을 때 나타나는 것이 아니고 그 보다 훨씬 이전인 판의 말린 부분이 원래의 판에 접촉하면서부터 나타나기 시작한다는 것이다. 그리고 정작 웨지가 보강재에 닿았을 정도의 진입량에서는 판의 밀린 부분이 웨지와 접촉하면서

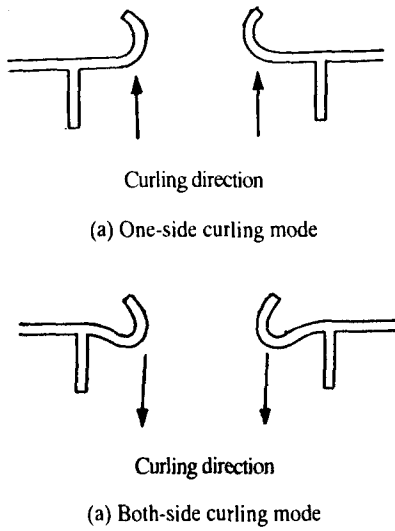


Fig.5 Typical curling mode

보강재에 압축력과 횡하중이 작용하는 효과를 나타내어 보강재는 거의 하중증가에 기여하지 못하는 정도에 이른다는 것이다.

(f) EF단계: 점 E에서 보강재가 웨지에 의한 압축력과 횡하중으로 인해 더 이상 견디지 못하고 좌굴 및 옆으로 넘어지기 시작하면 강성이 저하되어 보강재는 더 이상 견디지 못하게 된다.

(2) 둥근 웨지(Round Wedge)의 경우

Fig.6.a는 둥근 웨지가 판을 진입하는 경우의 하중-진입량과의 관계를 나타내고 있으며, Fig.6.b는 실험 종료후의 최종적인 손상형상을 보여주고 있다. 이 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 날카로운 웨지가 판을 진입하는 경우에 비하여 다른 경향을 보이며, 그 특징은 다음과 같이 요약할 수 있다.

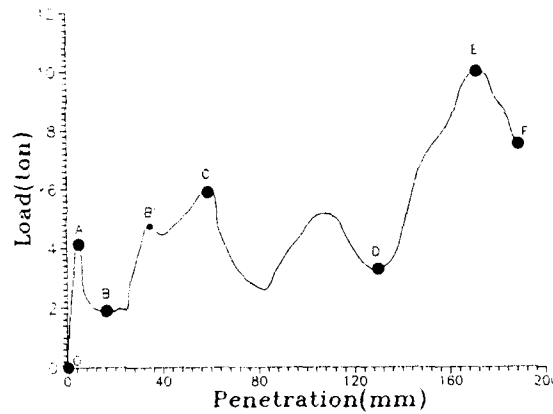


Fig.6.a General characteristics of damage behavior of stiffened plates by round wedge



Fig.6.b Photo of a damaged plate by round wedge

(a) OA단계: 둥근 웨지가 판을 누름으로 인해 웨지의 둥근 선단에 접한 판부분은 웨지선단 모양으로 둥그렇게 약간 눌리다가 하중에 견디지 못하고 좌굴되면서 옆으로 접혀 넘어진다. 그러나 날카로운 웨지가 판을 진입할 때처럼 판의 찢어짐(Tearing, Cutting) 및 말림(Curling, Rolling-up)현상은 일어나지 않는다.

(b) AB단계: 점 B에 이를 때까지 진입량은 거의 증가하지 않고 접힘이 진행되며 내력만 감소한다.

(c) BC단계: 다시 웨지가 판을 진입하면서 하중증가와 함께 양 보강재사이의 판부분에 국한되어 접힘이 진행된다. 이때 날카로운 웨지를 이용한 실험에서와 마찬가지로 접혀진 방향과 반대 방향으로 굽힘변형이 일어난다. 그리고 웨지가 판을 누름으로 인해 판내에 인장력이 작용하여 판에 약간의 파단(Creak)이 일어나고(점 B'), 그 결과 내력이 순간적으로 다소 저하한다.

(d) CD단계: 점 C에 이르러 판은 다시 좌굴이 되면서 파단이 진행된다. 여기서 파단되는 위치는 판의 종횡비가 클수록 보강재위치에 접근한다. 그러나 날카로운 웨지가 판을 진입할 때에는 앞서 언급한 것처럼 파단이 아주 작게 진행되며, 이 경우의 파단도 보강재가 판의 보강재 바깥부분이 말리는 것을 방해함으로 인해 약간 진행되는 것이다. 따라서, 보강재가 없는 판에 대한 날카로운 웨지를 이용한 실험에서는 파단이 거의 일어나지 않는다. 이런 좌굴현상은 웨지가 보강재에 접촉할 때까지 여러번 반복되며, 각 하중정점은 앞서 언급한 날카로운 웨지의 경우와 같은 특성을 갖는다.

(e) DE단계: 웨지가 보강재에 접촉하면서 하중은 급격히 증가한다. 그러다가 진입이 진행됨에 따라 보강재가 웨지에 의한 압축력과 횡하중에 의해 좌굴이 일어날 시점에 이른다

(f) EF단계: 보강재가 웨지에 의해 좌굴 및 옆으로 넘어지면서 휘어지면 보강재의 강성이 저하되어 보강재는 더 이상 견디지 못한다.

3.2 판의 종횡비(a/B)의 영향

Fig. 7은 판두께 및 웨지각도가 일정할 경우 판의 종횡비의 변화에 따른 하중과 진입량과의 관계를 나타낸다. 처음 강체웨지가 판을 찢으면서 진입하는 동안 하중증가의 기울기(강성)는 판의 종횡비에 관계없이 거의 같고 최초 좌굴이 발생하여 말리는 지점도 비슷하

다. 따라서, 이때는 판의 종횡비의 영향이 나타나지 않고 있음을 알 수 있다. 그러나 여기서 각 결과가 약간씩 다른 이유는 용접초기처짐등의 영향에 기인된 것으로 판단된다. 즉, 초기처짐이 클수록 최초 좌굴하중점이 낮다(약간의 예외적인 시험결과가 나타났으나 이것은 시험편 설치상의 오차 및 기타 재료상의 차이에 그 원인이 있다고 본다). 이는 Lu등[2]이 수행한 웨지가 판을 진입할 때 고정대에 수직인 경우를 기준으로 취한 판의 연직경사각 변화가 클수록 흡수에너지가 작아진다는 실험과 유사한 결과를 보여주고 있다. 따라서, 용접등으로 인한 초기결함이 없는 이상적인 경우에는 좌굴점의 위치가 거의 동등수준이 되리라 생각된다.

진입이 더욱 진행되어감에 따라 보강재가 판이 말리는 것을 방해하게 되며, 이 시점에서부터 보강재의 영향이 조금씩 나타난다. 이 현상은 판의 종횡비가 클수록 양 보강재사이의 간격이 좁으므로 하중증가의 기울기가 조금씩 크게 나타나고 있다. 그리고 두번째 좌굴이 일어나면서 내력감소가 일어나는 정도도 판의 종횡비가 클수록 점점 작아지며, 보강재의 영향으로 하중이 급격히 증가하는 현상도 일찍 발생한다. 또한, 판의 종횡비가 클수록 판과 보강재의 굽힘강성비(EI/bD)가 크므로 보강재의 영향으로 인한 하중 증가의 기울기와 최대하중의 크기도 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 판의 종횡비의 변화에 따른 흡수에너지와 진입량과의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 보이는 바와 같이 첫번째 좌굴이 일어난 뒤부터 웨지가 판을 진입하는데 요구되는 흡수에너지는 판의 종횡비가 클수록 점점 커지고 있으며, 이것은 진입량의 증가와 함께 점점 더 명확해진다.

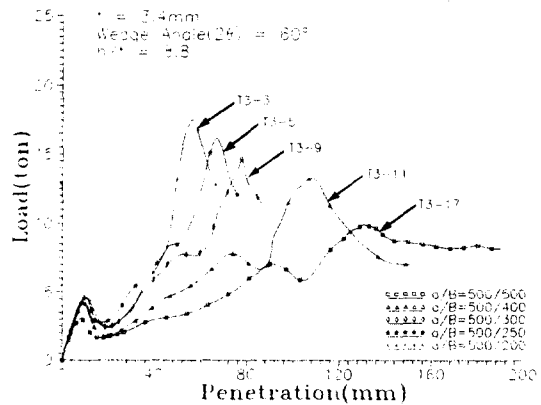


Fig. 7 Load-penetration curves with variation in the aspect ratio (a/B), t=3.4mm, 2θ=60°, h/t=8.8

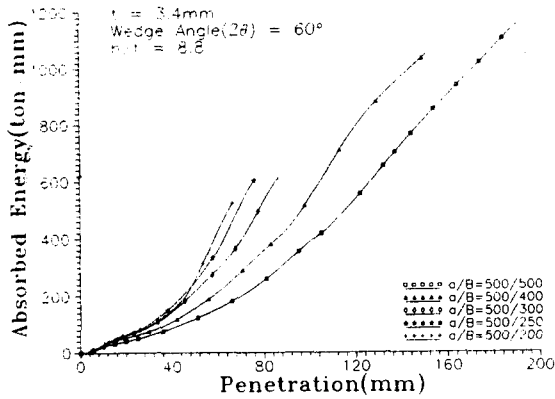


Fig.8 Absorbed energy-penetration curves with variation in the aspect ratio (a/B), t=3.4mm, 2θ=60°, h/t=8.8

3.3 웨지각도 (2θ)의 영향

Fig.9는 판의 종횡비, 판두께 및 굽힘강성비가 일정할 경우 웨지각도의 변화에 따른 하중과 진입량과의 관계를 나타내고 있다. 최초 강제웨지가 판을 찢으면서 진입할 때 웨지각도가 클수록 판을 진입해 들어가는 데 큰 하중이 요구되므로 하중증가의 기울기는 크나 그 차이는 아주 미소하다. 첫번째 좌굴 후 다시 강제웨지가 판을 진입해 들어감에 따라 보강재가 판이 말리는 것을 방해하는 효과가 나타나고, 이 현상은 웨지각도가 클수록 약간 더 민감해서 하중증가의 기울기가 약간 더 크다.

두번째 좌굴 후 보강재의 영향으로 하중의 급격한 증가가 나타나는 시점에서 웨지각도가 클수록 하중증가의 기울기가 크게 나타난다. 이러한 현상은 웨지에 의한 작용하중을 보강재 측면에서 압축력 성분과 휨하중 성분으로 구분하면, 비록 굽힘강성비가 일정하더라도 웨지각도가 작을수록 휨하중 성분이 상대적으로 압축력보다 커서 보강재를 압축하기 보다는 옆으로 밀어내 버리는 것으로써 설명될 수 있을 것이다.

Fig.10의 흡수에너지-진입량 곡선을 보면 진입량이 작을 때는 웨지각도의 영향이 미소하고, 보강재 영향도 작기 때문에 웨지각도에 관계없이 웨지가 판을 진입하는데 요구되는 흡수에너지는 큰 차이가 없으며, 진입량이 증가하면 보강재의 영향으로 약간씩 커지고 있음을 알 수 있다.

3.4 판두께의 영향

웨지각도와 판의 종횡비가 일정한 경우 판두께의 변

화에 따른 하중과 진입량과의 관계를 Fig.11에 나타내고 있다. 최초 웨지가 판을 진입할 때 판두께가 두꺼울수록 판을 찢는데 더 큰 하중이 요구되므로 하중증가의 기울기가 크며, 처음 좌굴이 일어나는 하중점도 더 높다. 두번째 좌굴이 일어날 때도 이러한 현상이 나타난다. 그런데 그림에서 판두께가 7mm인 경우 두번째 좌굴점이 거의 나타나지 않고 있는데, 이것은 두번째 좌굴이 일어날 정도의 진입량에서 보강재의 영향이 나타나 하중증가의 시점에 이르렀기 때문이고, 또한 보강재의 영향으로 인한 하중의 급격한 증가도 두께가 3.4mm와 5mm인 판에 비해 크지 않은 이유는 보강재 두께(5mm)보다 판두께가 커서 웨지가 판을 진입

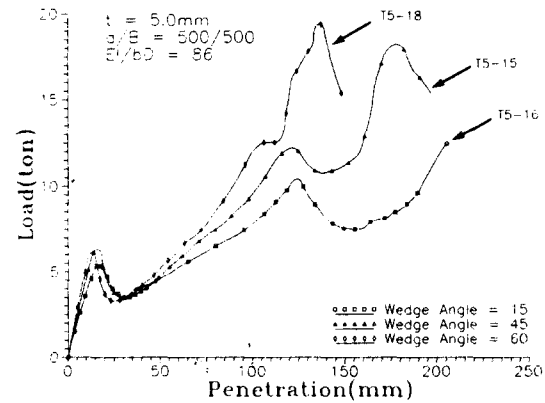


Fig.9 Load-penetration curves with variation in the wedge angle (2θ), t=5.0mm, a/B=500/500, EI/bD=86

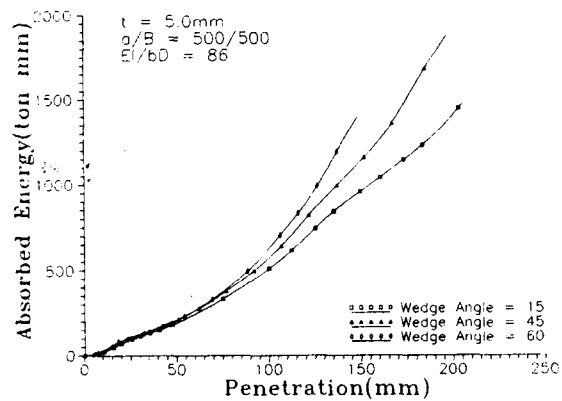


Fig.10 Absorbed energy-penetration curves with variation in the wedge angle (2θ), t=5.0mm, a/B= 500/500, EI/bD=86

할 때 판두께가 3.4mm인 판과 5mm인 판과는 달리 보강재 바깥부분까지 말림이 진행되기 때문이다. 따라서, 보강재의 두께에 비해 판두께가 클수록 보강재의 효과는 상대적으로 작아진다는 것을 알 수 있다.

Fig.12에 나타난 흡수에너지와 진입량과의 관계 곡선을 보면 다른 어떤 파라메타들의 영향보다도 판두께의 영향이 큼을 알 수 있다. 이것은 기존의 논문들[6, 7]에서도 보강재가 붙지 않은 판을 웨지가 진입할 때 진입량이 작을 때는 판두께에 비례한다는 것을 보여주고 있으며, 진입이 더욱 진행되면 보강재의 영향이 크게 나타나기 시작한다.

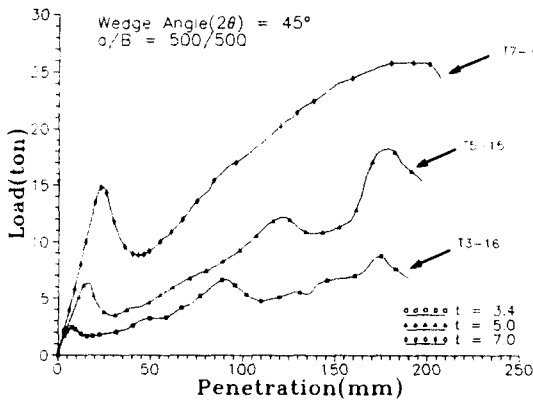


Fig.11 Load-penetration curves with variation in the plate thickness (t), $2\theta = 45^\circ$ $a/B=500/500$

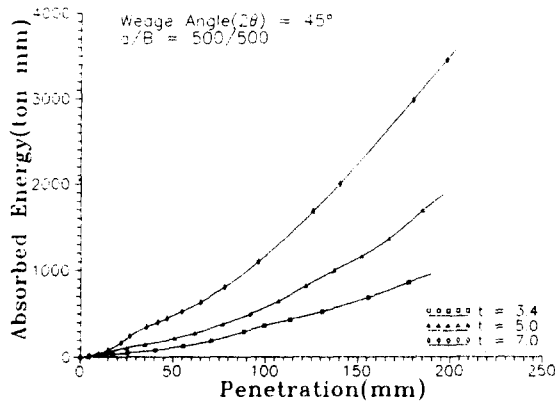


Fig.12 Absorbed energy-penetration curves with variation in the plate thickness (t), $2\theta = 45^\circ$, $a/B=500/500$

3.5 웨지선단 형상의 영향

Fig.13 및 14는 선단이 뾰족한 웨지와 둥근 웨지 (선단반경 $R=15\text{mm}$ 및 30mm)가 판을 진입할 때 하중-진입량 및 흡수에너지-진입량 관계를 나타내고 있다. 3.1절에서 설명한 바와 같이 두 웨지에 대한 일반적인 파괴경향은 상이하게 나타난다. 이 비교는 Jones[7]등에 의한 초기해석이 있으나, 본 연구에서 좀 더 많은 실험을 통해 검증하였다. 그 결과는 Jones 등이 수행한 실험결과와 거의 일치하고 있다. 즉, 진입량이 작을때 둥근 웨지가 판을 진입하기 위해 요구되는 흡수에너지는 뾰족한 웨지보다 크나 진입량이 증가함에 따라 거의 같아지고 있다. 그러나 판의 종횡비가 크면 진입이 진행되면서 흡수에너지가 비슷해지기 전에 보강재의 영향으로 흡수에너지가 급격히 증가하고 있다(Fig.14.b). 하지만, 보강재가 없다면 같은 결과를 얻을 수 있다는 것은 쉽게 예측할 수 있다. 여기서 선단반경이 큰 웨지가 작은 웨지보다 보강재의 영향이 일찍 나타나는 이유는 동일한 웨지각도에 대해 웨지선단의 반경만 다르기 때문에 일정 보강재 간격을 가진 판에 대한 실험에서 선단반경이 클수록 웨지가 판을 덜 진입했을 때 보강재에 닿기 때문이다. 예를 들어 종횡비가 500/500인 판에 대한 실험에서 웨지측면이 보강재에 닿는 시점의 진입량을 조사해 보면, 선단반경이 15mm인 경우 170mm 정도인데 반하여 선단반경이 30mm인 경우에는 148mm정도이다.

3.6 종·횡보강재의 영향

Fig.15 및 16에 보강재의 영향을 보기 위해 웨지가 판을 진입하는 방향과 평행한 방향으로 보강재가 붙어 있는 판(종보강판)과 직각방향으로 보강재가 붙어 있는 판(횡보강판) 및 보강재가 붙지 않은 판에 대한 실험 결과를 각각 나타내고 있다. 종보강판은 앞서 설명한 것처럼 웨지가 보강재에 닿기 이전에 판의 말리는 부분때문에 보강재의 영향이 일찍 나타나는데, 횡보강판은 말리는 부분이 횡보강재에 어떠한 영향도 미치지 못하고 웨지가 횡보강재에 닿았을 때 보강재의 영향이 나타나므로 종보강판에 비해 그 영향이 늦게 나타난다. 따라서, 종보강판의 경우 진입초기에는 웨지가 판을 진입하는데 요구되는 흡수에너지가 횡보강판보다 더 크나, 진입량이 증가함에 따라 거의 비슷하다는 것을 알 수 있다. 물론 종·횡보강판 모두 보강재가 붙지 않은 판보다 웨지가 판을 진입하는데 요구되는 에너지가 훨씬 크다는 것은 명백하다. 그리고 Fig.15에서 횡보강판이 종보강판보다 보강재의 영향이 좀 더 지속되고 그 후 진입량의 증가에 따른 내력

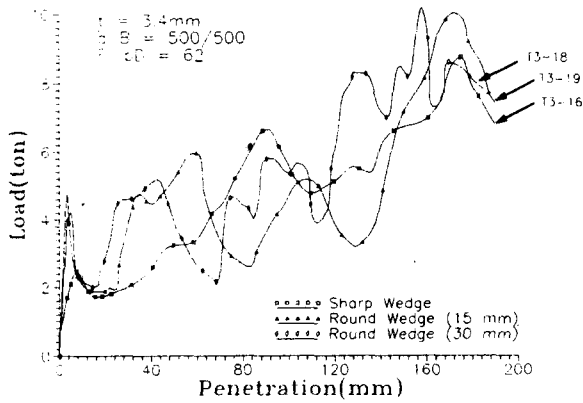


Fig.13.a Load-penetration curves with variation in the shape of wedge tip, $Ht=3.4\text{mm}$, $a/B=500/500$, $EI/bD=62$

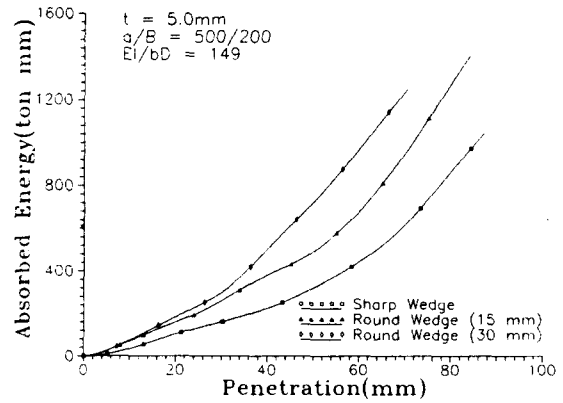


Fig.14.b Absorbed energy-penetration curves with variation in the shape of wedge tip, $t=5.0\text{mm}$, $a/B=500/200$, $EI/bD=149$

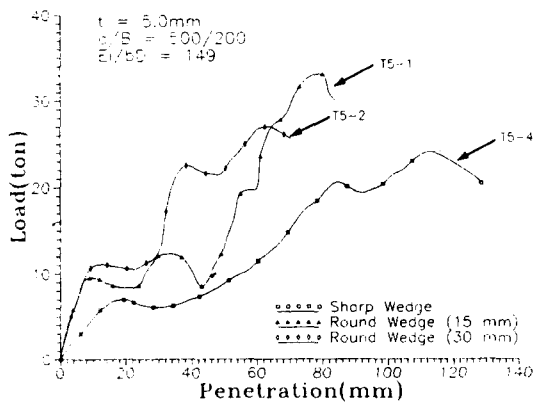


Fig.13.b Load-penetration curves with variation in the shape of wedge tip, $t=5.0\text{mm}$, $a/B=500/200$, $EI/bD=149$

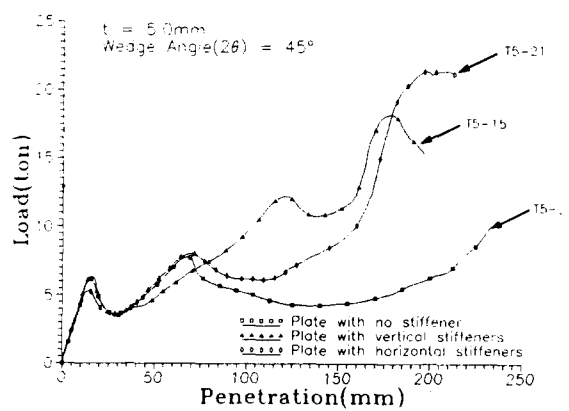


Fig.15 Load-penetration curves for plates with no stiffener, with vertical stiffeners and with horizontal stiffeners

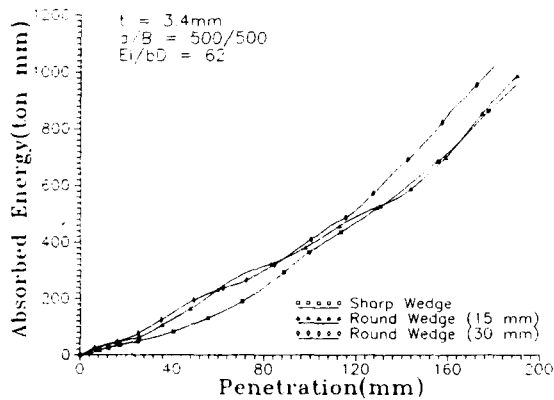


Fig.14.a Absorbed energy-penetration curves with variation in the shape of wedge tip, $t=3.4\text{mm}$, $a/B=500/500$, $EI/bD=62$

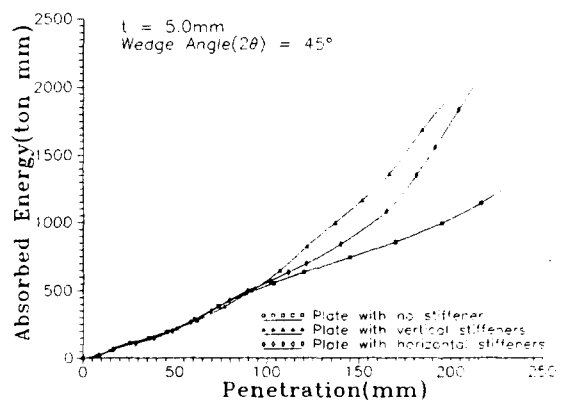


Fig.16 Absorbed energy-penetration curves for plates with no stiffener, with vertical stiffeners and with horizontal stiffeners

의 감소가 작은 이유는 웨지가 횡보강재에 접촉한 후 횡보강재를 누름으로 인해 횡보강재내에 인장마력이 생겨 견디다가 횡보강재가 절단된 후에도 웨지의 측면에 횡보강재가 계속 접촉하면서 웨지의 진입에 대해 견디기 때문이다.

4. 결 언

본 연구에서는 강제웨지가 준정적으로 보강판을 연속적으로 진입할 때 여러가지 파라메타 즉 판의 종횡비, 웨지각도, 판두께, 웨지선단의 형상 및 종·횡보강재의 변화에 따른 시리즈 실험을 수행하여 판의 손상거동특성에 대한 이들 파라메타의 영향을 규명하였다. 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 판의 종횡비(a/B)의 영향 : 첫번째 좌굴 후 강제웨지가 판을 진입해 들어갈 때 판의 종횡비가 클수록 보다 이른 시점에서부터 보강재가 판의 말림 현상을 방해하게 되므로 판의 종횡비가 작은 것에 비하여 강제웨지가 판을 진입하는데 요구되는 흡수에너지는 다소 커진다. 그리고 두번째 좌굴 후 진입이 계속 진행될 때도 판의 종횡비가 클수록 보강재의 영향이 빨리 나타나므로 흡수에너지가 훨씬 크게 나타난다.

2) 웨지 각도(2θ)의 영향 : 강제웨지가 보강판을 진입할 경우 진입초기에는 웨지각도가 클수록 흡수에너지가 크나 그 차이가 미소하여 진입량이 작을 때는 웨지각도에 거의 무관하다. 하지만 진입이 진행됨에 따라 보강재의 영향이 나타나는데 이 현상은 웨지각도가 클수록 일찍 일어난다. 따라서, 강제웨지가 판을 진입하는데 요구되는 흡수에너지는 웨지각도가 클수록 크다.

3) 판두께(t)의 영향 : 다른 어떤 파라메타보다도 판두께의 변화에 따른 흡수에너지의 차이는 크고, 진입량이 증가함에 따라 보강재의 영향으로 인해 판두께에 대한 의존도는 훨씬 더 커진다.

4) 웨지선단 형상의 영향 : 강제웨지가 판을 진입할 때 판의 종횡비가 작아서 보강재의 영향이 늦게 나타나는 경우에는 등근웨지가 판을 진입하기 위해 요구되는 초기의 흡수에너지는 날카로운 웨지보다 크다. 하지만 진입량이 증가함에 따라 흡수에너지는 거의 비슷하게 되고 있다. 그리고 판의 종횡비가 클수록 진입의 진전에 따라 날카로운 웨지와 등근웨지 사이의 흡수에너지가 비슷해지기 전에 보강재의 영향으로 인해 흡수

에너지가 급격히 증가한다.

5) 종·횡 보강재의 영향 : 종보강판의 경우 웨지가 판을 진입할 때 말린 부분이 종보강재에 영향을 미쳐 횡보강판보다 보강재의 영향이 먼저 나타나기 때문에 초기에 강제웨지가 판을 진입하는데 요구되는 흡수에너지는 더 크나 진입이 진행됨에 따라 거의 비슷해진다. 그리고 종·횡보강판 모두 보강재가 붙지 않은 판보다는 흡수에너지가 훨씬 크다.

후 기

본 실험을 수행함에 있어 부산대학교 조선공학과 구조공학연구소 연구실 제공들의 협조를 받았다. 특히, 박사과정의 정장영씨, 석사과정의 김도현 및 정윤석군, 학부과정의 소수현 및 이제명군에게는 이 기회를 통하여 심심한 사의를 표하는 바입니다.

참 고 문 헌

- [1] Jones, N., "A Literature Survey on the Collision and Grounding Protection of Ships", *Ship Structure Committee*, Report No. SSC-283, 1979.
- [2] Lu, G., and Calladine, C. R., "On the Cutting of a Plate by a Wedge", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 32, No.4, pp.293-313, 1990.
- [3] Akita, Y., and Kitamura, K., "A Study on Collision by an Elastic Stem to a Side Structure of Ship", *J. of the Society of Naval Architects of Japan* Vol.131, pp.307-317, 1972.
- [4] Kitamura, K., Okumoto, Y., and Shibue, T., "On the Model Tests of Double Bottom Strength for Stranding", *J. of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol.143, pp.346-356, 1978.
- [5] Vaughan, H., "Bending and Tearing of Plate with Application to Ship-Bottom Damage", *The Naval Architect*, pp.97-99, May 1978.
- [6] Vaughan, H., "The Tearing of Mild Steel Plate", *J. of ship Research*, Vol.24, No.2, pp. 96-100, 1980.
- [7] Jones, N., and Jouri, W. S., "A Study of Plate Tearing for of Ship Collision and Grounding Damage", *J. of Ship Research*, Vol.31, No.4,

- pp. 253-268, 1987.
- [8] Thomas, P. F., and Wierzbicki, T., "Grounding damage to Double Hull Tank Vessels," *Proc. of*

ISOPE'92, San Francisco, U.S.A., Vol.2, pp. 108-116, 1992.