

---

 論 文
 

---

大韓造船學會論文集  
 第 33 卷 第 1 號 1996年 2月  
 Transactions of the Society of  
 Naval Architects of Korea  
 Vol. 33, No. 1, February 1996

## 보강된 정사각형 단면 강관의 정적 압괴거동에 관한 연구

백점기\*, 정장영\*\*, 전민성\*\*\*

### On Quasi-Static Crushing of a Stiffened Square Tube

by

Jeom Kee Paik\*, Jang Young Chung\*\* and Min Sung Chun\*\*\*

#### 요 약

본 연구에서는 판 구조물의 정적 압괴거동을 규명하기 위하여 보강되지 않은 시험체를 포함하여 압축하중 작용방향 뿐 아니라 직각방향 및 양방향으로 보강재가 부착된 정사각형 단면 강관에 대한 정적 압괴 실험을 수행하였다. 실험결과를 바탕으로 시험편의 유효 압괴길이가와 평균 압괴강도를 조사하였고, 실용적인 압괴거동의 평가를 위해 등가 판두께의 개념을 제안하였다. 또한, 등가 판두께의 개념을 적용하여 보강된 정사각형 단면 강관의 평균 압괴강도의 계산을 위한 이론모델을 제시하고, 실험결과와의 비교를 통하여 그 정도와 유용성을 검증하였다.

#### Abstract

A series of quasi-static crushing tests were carried out on thin-walled square tube specimens with axial and/or circumferential stiffeners including unstiffened specimens. The effective crushing length and mean crushing strength of the test specimens were investigated. Using the equivalent plate thickness approach, a simplified analytical model for predicting the mean crushing strength of stiffened square tubes has been developed.

---

발 표 : 1995년도 대한조선학회 추계연구발표회('95. 11. 9)

접수일자 : 1995년 8월 16일 재접수일자 : 1995년 11월 17일

\* 정회원, 부산대학교 조선해양공학과, 기계기술연구소 연구원

\*\* 정회원, 부산대학교 조선해양공학과, 박사과정

\*\*\* 학생회원, 부산대학교 조선해양공학과, 석사과정

**기호설명**

- A 보강재를 포함한 정사각형 단면 강관의 횡단면적 ( $= 4(bt + A_s)$ )
- a 횡보강재간의 간격
- $A_s$  정사각형 단면 강관을 구성하는 한개 의 판부재의 보강재 횡단면적
- b 정사각형 단면 강관의 폭
- b' 종보강재간의 간격
- E 재료탄성계수
- $F(\delta)$  압축하중-변위곡선
- H 한개의 접힘모드에 대한 길이의 1/2
- $h_{sL}, h_{sT}$  각각 종 및 횡보강재의 높이
- I 정사각형 단면 강관의 단면 2차 모멘트
- k 보강재의 유효성을 나타내는 상수
- L 정사각형 단면 강관의 길이
- $N_L, N_T$  각각 종 및 횡보강재의 전체갯수
- P 압축하중
- $P_m$  평균 압괴강도 ( $= W/\delta_e$ )
- $P_o$  정사각형 단면 강관의 압축 소성강도 ( $= 4\sigma_o A$ )
- $P_u$  정사각형 단면 강관의 압축 최종강도
- $r_1, r_2$  각각 정사각형 단면 강관의 내외측 모서리 반경
- t 판의 두께
- $t_{eq}$  동가 판두께
- $t_{sL}, t_{sT}$  각각 종 및 횡보강재의 두께
- W 흡수에너지 ( $= \int_0^{\delta_e} F(\delta) d\delta$ )
- $\gamma$  관성반경 ( $= \sqrt{I/A}$ )
- $\delta$  압괴길이
- $\delta_e$  유효 압괴길이
- $\eta$  유효 압괴길이비 ( $= \frac{\delta_e}{L} = \frac{\lambda_e}{2H}$ )

- $\lambda$  정사각형 단면 강관의 세장비 ( $= \frac{L}{\pi r} \sqrt{\frac{\sigma_o}{E}}$ )
- $\lambda_e$  한개의 접힘모드에 대한 유효 압괴 길이
- $\sigma_m$  평균 압괴강도 (응력) ( $= P_m/A$ )
- $\sigma_o$  재료의 항복강도
- $\sigma_T$  재료의 최종 인장강도

**1. 서 론**

박판구조물이 충돌과 같은 사고하중을 받으면 구성부재의 판두께 보다 훨씬 큰 변형이 생길 가능성이 있으며, 부재간에 접힘 (folding)에 의한 접촉현상 (contact)이 발생한다. 이 경우 구조물의 안전성은 보통 에너지 흡수능력 (energy absorption capacity)을 기준으로 평가하게 된다. 즉, 구조손상에 의해 흡수되는 에너지량과 구조물의 운동 에너지가 서로 일치한다는 조건으로부터 사고하중 작용 시 구조손상량을 계산하거나 해석대상 구조물의 내압괴 성능을 평가한다.

Fig.1에는 압축하중이 지배적으로 작용하는 박판구조물의 일반적인 압괴거동을 나타내고 있다. 압괴 변위량이 작은 일상적인 하중작용 상태하에서는 구조물이 최종강도에 도달하게 되면 구조내력이 급격히 저하하는 현상이 일어나며, 이것을 붕괴상태 (collapse state)로 간주하여 일상적인 하중상태에서의 구조안전성 평가기준으로 삼고 있다.

압괴 변위량이 더욱 증가하면 구성부재에 접힘 현상이 일어나며, 접힘에 의해 일시적으로 구조내력이 저하한뒤 다시 인접면과 접촉하게 되면 재차 내력이 증가하게 된다. 이 같은 거동은 구성 부재에 더 이상 접힘현상이 일어나지 않을때 까지 반복적으로 발생한다. 접힘현상이 끝난후의 구조부재는 일종의 강체로서 거동하게 된다.

따라서, 박판구조물의 압괴거동을 평가하기 위하여는 기본적으로 접힘현상이 끝날때까지의 하중-변위관계를 상세히 계산할 필요가 있다. 그러나, 압괴거동을 나타내는 구조물의 하중-변위관계를 엄밀히 해석하는 것은 극히 어렵고, 실제로는 이것을 계산할 필요가 없는 경우도 있다. 왜냐하

면, Fig.1에 나타내는 바와 같이 복잡한 실제 압괴거동을 대표하는 평균 압괴강도 (mean crushing strength)  $P_m$ 을 알 수 있다면 운동 에너지와 동일한 크기의 구조 손상에 의한 흡수 에너지를 가질때의 압괴길이를 추정할 수 있기 때문이다.

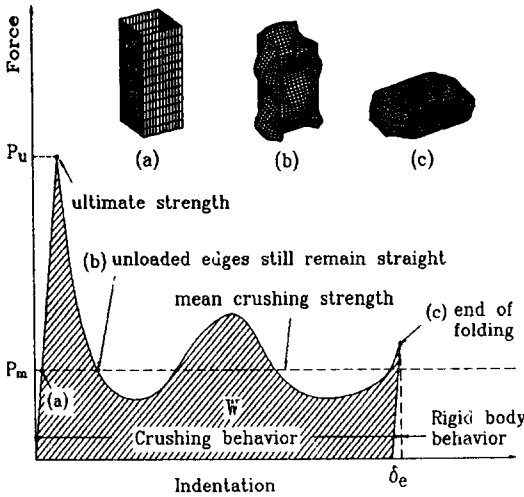


Fig. 1 Crushing response of a square tube under predominantly compressive loads

이 같은 측면에서 지금까지 구조물의 평균 압괴강도를 평가하기 위한 연구가 다수 수행되어져 왔다. 이들 연구는 압괴거동의 복잡성 때문에 실험적 방법을 채용하여 그 결과로부터 단위 구조부재에 대한 평균 압괴강도의 실험식을 도출하는 방법 [1]과 소성 압괴변형을 가정한 강소성 붕괴해석 이론을 적용하여 해석적으로 평균 압괴강도식을 도출하는 방법 [2-7]이 있다. 이들 중에서 실험적 연구는 정적 뿐만 아니라 동적하중 상태에서 수행되어졌으며, 이론적 연구는 대부분 정적하중 상태에서 이루어졌다. 정적하중 상태에서 얻어진 결과는 동적효과를 근사적으로 고려하여 수정되어졌다.

일반적으로, 사고하중의 특성상 압괴거동은 동적하중 상태하에서 해석할 필요가 있는데, 이같은 측면에서 Jones & Birch [1], Abramowicz &

Jones [8, 9]는 낙하체 (drop hammer)를 이용한 동적실험을 수행하였다. 낙하체를 이용한 동적실험의 경우, 특수한 정밀 계측장비를 사용하지 않는 구조의 변형이 끝난 상태만을 검토할 수 있는데 비해 정적실험을 수행하면 압괴거동 과정을 상세히 관찰할 수 있는 장점이 있다.

또한, 선박을 비롯한 실제 판구조물의 판부재는 보강재로 보강되어 있으며, 보강판 구조에 대한 압괴거동의 검토가 필요하다. 이 같은 측면에서 Jones & Birch [1]는 압축하중 작용방향으로 보강재가 부착된 판구조 시험체에 대한 정적 및 동적 실험을 수행한 바 있다. 그러나, 실제 판구조에는 압축하중 작용방향 뿐만 아니라 직각방향 또는 양방향으로도 보강재가 부착된 경우가 있으며, 이에 대한 검토가 필요하다. 그러나, 지금까지 이에 대한 연구성과는 저자들의 조사결과로는 발견하기 어려운 실정이다.

이상의 측면에서 본 연구에서는 보강되지 않은 시험체를 포함하여 압축하중 작용방향 뿐만 아니라 직각방향 및 양방향으로 보강재가 부착된 정사각형 단면 강관에 대한 정적 압괴실험을 판두께, 판폭 및 보강재의 치수등을 변화시켜 가면서 수행함으로써 보강판의 정적 압괴강도와 유효 압괴길이에 관한 실험데이터를 취득하고자 하였다. 또한, 보강판에 대한 등가 판두께개념을 제안하고, 이것을 강소성 붕괴해석 이론을 바탕으로 Paik & Pedersen [5]이 도출한바 있는 보강되지 않은 판구조물에 대한 평균 압괴강도식에 적용하여 보강판의 평균 압괴강도도 높은 정도로서 예측할 수 있는 방법을 제시하였으며, 이 방법의 정도는 본 연구에서 수행한 실험결과와 비교하여 검증하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험개요

본 연구의 목적은 기본적으로 연속판 구조물을 구성하는 한장의 보강판이 압괴변형을 일으킬 때의 거동을 실험적으로 고찰하고자 하는 것이다. 그런데, 한장의 보강판을 단독으로 압괴실험하는 것은 어렵고, 특히 비하중변의 경계조건을 합리적

으로 설정하는 것이 곤란하다. 따라서, 동일한 4장의 보강판으로 구성된 정사각형 단면 강관을 실험 대상으로 채용하였다.

이 경우, 기본적으로 각 구성 보강판 부재의 조건은 서로 동일하며, 특히 비하중변의 경계조건은 압피변형의 초기단계 뿐만 아니라 변형이 진행된 후에도 실제 구조물내의 경계상태를 비교적 양호하게 나타낸다고 판단된다. 따라서, 4장의 판 부재로 구성된 정사각형 단면 강관의 압피강도에 대한 평균치를 취하면 각 구성부재 한개의 평균적인 압피강도를 얻을 수 있게 된다.

또한, 전술한 바와 같이 압피변형 과정을 상세히 관찰하기 위하여 준정적 상태에서 실험을 수행하였으며, 압피강도에 대한 영향인자, 즉 판두께, 판폭 및 보강재 치수등의 영향을 고찰하기 위하여 이들을 변화시켜 가면서 압피 시리즈실험을 수행하였다.

2.2 시험체

Fig.2에는 본실험에서 대상으로한 시험체 종류별 형상과 부재치수를 정의하고 있다. 시험체의 수는 보강되지 않은 경우 6개를 포함하여, 정사각형 단면 강관의 종방향 (압축하중의 작용방향)으로 보강된 경우 7개, 정사각형 단면 강관의 횡방향으로 보강된 경우 8개, 종 및 횡방향으로 보강된 경우 14개의 합계 35개이다. 시험체는 시판되고 있는 정사각형 단면 강관을 사용하였으며, 1면의 중앙부에 이음매 (seam)가 있다.

Table 1에는 각 시험체의 재료 인장실험 결과를 보여 주고 있는데, 시험체 별로 2개씩의 재료 인장시험편을 채취한후 이들에 대해 수행한 인장실험 결과의 평균치를 나타내고 있다.

또한, Table 2에는 각 시험체의 주요치수를 나타내고 있다.

2.3 실험방법

실험은 부산대학교 조선해양공학과 구조역학 실험실의 100톤 만능시험기를 이용하여 수행하였다. Photo 1에는 시험체를 설치한 후의 시험기 전체모양을 보여주고 있다. 압축하중의 작용속도는 대략

Table 1 Tensile test results

Specimen No.	Elongation (%)	$E$ (GPa)	$\sigma_o$ (MPa) (0.2% proof stress)	$\sigma_T$ (MPa)
US-1	41.9	199.2	286.1	351.9
US-2, LS, OS, TS-1~6	35.4	205.8	310.8	363.3
US-3	35.6	207.8	299.3	351.2
US-4, TS-7,8	36.5	199.9	366.8	450.8
US-5	37.4	200.1	328.5	399.4
US-6	24.9	209.7	427.6	477.2

Note: US = Unstiffened Specimen,  
 LS = Longitudinally Stiffened Specimen,  
 TS = Transversely Stiffened Specimen,  
 OS = Orthogonally Stiffened Specimen

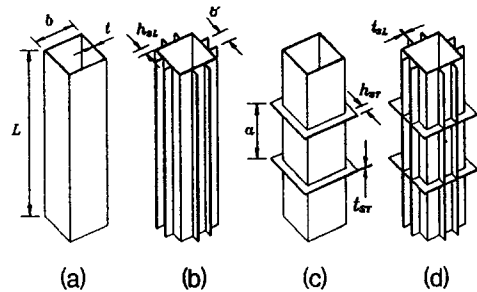


Fig. 2 Configuration of test specimens: (a) unstiffened (US), (b) longitudinally stiffened (LS), (c) transversely stiffened (TS), and (d) orthogonally stiffened (OS)specimens.

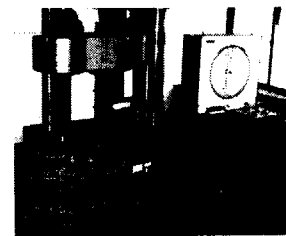


Photo 1 View of test machine after setting up a specimen

Table 2 Dimensions of test specimens

Specimen No.	$L$ (mm)	$b$ (mm)	$t$ (mm)	$t_{sL}$ (mm)	$t_{sT}$ (mm)	$h_{sL}$ (mm)	$h_{sT}$ (mm)	$b'$ (mm)	$a$ (mm)	$N_L$	$N_T$	$r_1$ (mm)	$r_2$ (mm)
US-1	450	100	2.2	-	-	-	-	-	-	-	-	2.5	4.7
US-2	450	100	2.8	-	-	-	-	-	-	-	-	4.2	7.0
US-3	450	100	3.0	-	-	-	-	-	-	-	-	5.0	8.0
US-4	450	100	4.2	-	-	-	-	-	-	-	-	5.0	9.2
US-5	450	75	2.1	-	-	-	-	-	-	-	-	1.5	3.6
US-6	450	75	3.2	-	-	-	-	-	-	-	-	2.7	5.9
LS-1	450	100	2.8	2.8	-	20.0	-	50.0	-	4	-	4.2	7.0
LS-2	450	100	2.8	2.8	-	30.0	-	50.0	-	4	-	4.2	7.0
LS-3	450	100	2.8	2.8	-	40.0	-	50.0	-	4	-	4.2	7.0
LS-4	450	100	2.8	2.8	-	20.0	-	33.3	-	8	-	4.2	7.0
LS-5	450	100	2.8	2.8	-	30.0	-	33.3	-	8	-	4.2	7.0
LS-7	450	100	2.8	2.8	-	15.0	-	50.0	-	4	-	4.2	7.0
LS-8	450	100	2.8	2.8	-	15.0	-	33.3	-	8	-	4.2	7.0
TS-1	450	100	2.8	-	2.8	-	20.0	-	225	-	4	4.2	7.0
TS-2	450	100	2.8	-	2.8	-	30.0	-	225	-	4	4.2	7.0
TS-3	450	100	2.8	-	2.8	-	40.0	-	225	-	4	4.2	7.0
TS-4	450	100	2.8	-	2.8	-	20.0	-	150	-	8	4.2	7.0
TS-5	450	100	2.8	-	2.8	-	30.0	-	150	-	8	4.2	7.0
TS-6	450	100	2.8	-	2.8	-	40.0	-	150	-	8	4.2	7.0
TS-7	450	100	4.2	-	4.2	-	20.0	-	225	-	4	5.0	9.2
TS-8	450	100	4.2	-	4.2	-	20.0	-	150	-	8	5.0	9.2
OS-1	450	100	2.8	2.8	2.8	20.0	20.0	50.0	225	4	4	4.2	7.0
OS-2	450	100	2.8	2.8	2.8	30.0	30.0	50.0	225	4	4	4.2	7.0
OS-3	450	100	2.8	2.8	2.8	40.0	40.0	50.0	225	4	4	4.2	7.0
OS-4	450	100	2.8	2.8	2.8	20.0	20.0	50.0	150	4	8	4.2	7.0
OS-5	450	100	2.8	2.8	2.8	30.0	30.0	50.0	150	4	8	4.2	7.0
OS-6	450	100	2.8	2.8	2.8	40.0	40.0	50.0	150	4	8	4.2	7.0
OS-7	450	100	2.8	2.8	2.8	20.0	20.0	33.3	225	8	4	4.2	7.0
OS-8	450	100	2.8	2.8	2.8	30.0	30.0	33.3	225	8	4	4.2	7.0
OS-10	450	100	2.8	2.8	2.8	20.0	20.0	33.3	150	8	8	4.2	7.0
OS-11	450	100	2.8	2.8	2.8	30.0	30.0	33.3	150	8	8	4.2	7.0
OS-13	450	100	2.8	2.8	2.8	15.0	15.0	50.0	225	4	4	4.2	7.0
OS-14	450	100	2.8	2.8	2.8	15.0	15.0	50.0	150	4	8	4.2	7.0
OS-15	450	100	2.8	2.8	2.8	15.0	15.0	33.3	225	8	4	4.2	7.0
OS-16	450	100	2.8	2.8	2.8	15.0	15.0	33.3	150	8	8	4.2	7.0

0.05 mm/sec. 이하를 유지시켰으며, 시험체가 완전압괴할 때까지 (즉, 접힘이 더이상 일어나지 않을 때까지) 실험을 계속하였다. 실험중에 압축하중과 압괴 변형량을 측정하였고, 실험도중에 특징적인 변형현상이 관찰될 때 마다 부하를 멈추고 상세한 변형 상태를 조사하였으며, 사진촬영도 병행하였다.

압괴 변형량은 시험기의 상부 고정대로 부터의 상대변위를 변위계를 이용하여 측정하였고, 하중은 하중지시기로부터 읽었다.

2.4 실험결과 및 고찰

Table 3에는 실험결과를 나타내고 있다. 실험중

에 시험체의 치수에 따라서는 순수한 압괴거동을 보이지 않고 정사각형 단면 강관이 기둥형태의 전체적인 붕괴 (overall column collapse)가 일어난 경우도 10건이 발생하였으며 이 경우에는 평균 압괴강도치를 얻을 수 없었다.

Fig.3에는 정사각형 단면 강관의 세장비  $\lambda$ 의 변화에 따른 압축 최종강도 실험치를 보여주고 있다. 이 그림으로부터 정사각형 단면 강관의 세장비가 약 0.135를 기준으로 다른 모드가 발생하며, 순수 압괴모드를 가지기 위하여는 세장비가 약 0.135보다 크게 되도록 시험체를 설계해야 할 필요가 있다는 것을 알 수 있다.

또한, Table 3에 나타난 유효 압괴길이비는정사

Table 3 Test results of specimens

Specimen No.	$t_{eq}$ (mm)	$t_{eq}/b$	$\sigma_o$ (MPa)	$P_o$ (kN)	$\lambda$	$P_u$ (kN)	$P_m$ (kN)	$P_u / P_o$	$P_m / P_o$	$\eta$
US-1	2.20	0.0220	286.1	251.74	0.1370	231.28	60.64	0.919	0.241	0.764
US-2	2.80	0.0280	310.8	348.05	0.1422	337.12	100.98	0.969	0.290	0.760
US-3	3.00	0.0300	299.3	359.15	0.1393	361.62	106.18	1.007	0.296	0.767
US-4	4.20	0.0420	366.8	616.25	0.1601	686.00	271.60	1.113	0.441	0.727
US-5 <sup>1)</sup>	2.10	0.0280	328.5	206.95	0.1973	193.06	59.00	0.933	0.285	0.758
US-6 <sup>1)</sup>	3.20	0.0430	427.6	410.47	0.2253	404.74	148.40	0.986	0.362	0.724
LS-1	3.36	0.0336	310.8	417.66	0.1401	481.18	161.66	1.152	0.387	0.633
LS-2	3.64	0.0364	310.8	452.46	0.1360	522.34	201.08	1.154	0.444	0.687
LS-3 <sup>2)</sup>	3.92	0.0392	310.8	487.27	0.1307	554.68	-	1.138	-	-
LS-4	3.92	0.0392	310.8	487.27	0.1369	595.84	229.74	1.223	0.471	0.658
LS-5 <sup>2)</sup>	4.48	0.0448	310.8	556.88	0.1306	668.36	-	1.200	-	-
LS-7	3.22	0.0322	310.8	400.27	0.1414	447.86	133.87	1.119	0.334	0.664
LS-8	3.64	0.0364	310.8	452.65	0.1393	533.12	206.16	1.178	0.455	0.662
TS-1	2.80	0.0280	310.8	348.05	0.1422	337.12	105.56	0.969	0.303	0.747
TS-2	2.80	0.0280	310.8	348.05	0.1422	331.24	118.83	0.952	0.341	0.709
TS-3	2.80	0.0280	310.8	348.05	0.1422	346.92	110.39	0.997	0.317	0.738
TS-4	2.80	0.0280	310.8	348.05	0.1422	329.28	116.77	0.946	0.335	0.724
TS-5	2.80	0.0280	310.8	348.05	0.1422	338.59	132.50	0.973	0.381	0.704
TS-6	2.80	0.0280	310.8	348.05	0.1422	340.55	127.98	0.978	0.368	0.713
TS-7	4.20	0.0420	310.8	616.25	0.1452	661.50	268.42	1.073	0.436	0.698
TS-8	4.20	0.0420	310.8	616.25	0.1452	685.02	294.42	1.112	0.478	0.667
OS-1	3.36	0.0336	310.8	417.66	0.1401	476.77	185.73	1.142	0.445	0.660
OS-2 <sup>2)</sup>	3.64	0.0364	310.8	452.46	0.1360	519.40	-	1.148	-	-
OS-3 <sup>2)</sup>	3.92	0.0392	310.8	487.27	0.1307	533.12	-	1.094	-	-
OS-4 <sup>2)</sup>	3.36	0.0336	310.8	417.66	0.1401	495.39	-	1.186	-	-
OS-5 <sup>2)</sup>	3.64	0.0364	310.8	452.46	0.1360	526.26	-	1.163	-	-
OS-6 <sup>2)</sup>	3.92	0.0392	310.8	487.27	0.1307	543.90	-	1.116	-	-
OS-7 <sup>2)</sup>	3.92	0.0392	310.8	487.27	0.1369	610.54	-	1.253	-	-
OS-8 <sup>2)</sup>	4.48	0.0448	310.8	556.88	0.1306	671.30	-	1.205	-	-
OS-10	3.92	0.0392	310.8	487.27	0.1369	618.87	364.14	1.270	0.747	-
OS-11 <sup>2)</sup>	4.48	0.0448	310.8	556.88	0.1306	681.59	-	1.224	-	-
OS-13	3.22	0.0332	310.8	400.26	0.1414	454.23	150.23	1.135	0.375	0.702
OS-14	3.22	0.0322	310.8	400.26	0.1414	454.72	195.32	1.136	0.488	0.696
OS-15	3.64	0.0364	310.8	452.65	0.1394	527.24	201.55	1.167	0.443	0.664
OS-16	3.64	0.0364	310.8	452.65	0.1394	535.57	220.62	1.183	0.487	0.673

Note: 1)  $b = 75\text{ mm}$ , 2) Overall collapse mode

각형 단면 강관이 더이상 접하지 않을 때까지 압괴가 진행된 후의 압괴 변형량을 정사각형 단면 강관의 전체길이를 나눈값을 취하였으며, 평균 압괴강도는 실험에 의해 얻어진 하중과 압괴 변형량의 관계로부터 유효 압괴길이에 이르기까지의 에너지 흡수량을 수치적으로 계산한 뒤 이것을 유효 압괴길이를 나누어 계산한 것이다.

#### 2.4.1 압괴거동의 일반특성

Photo 2에는 실험도중 및 실험 종료후의 각 시

험체별 대표적인 압괴형상을 보여주고 있다. 실험 결과 얻어진 시험체 종류별 일반적인 압괴거동 특성은 다음과 같다.

##### (1) 보강되지 않은 시험체 (US)

Fig.4에는 보강되지 않은 시험체의 대표적인 압괴거동을 나타내고 있으며, 각 변형단계별 특징을 요약하면 다음과 같다.

① OA 단계: A점에서 압축 붕괴하기까지의 하중단계를 나타내며, A점에 도달하기 전에 구성부재는 좌굴하여 최종강도에 달하는 A점에서는

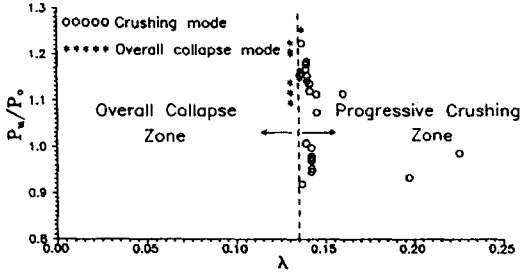
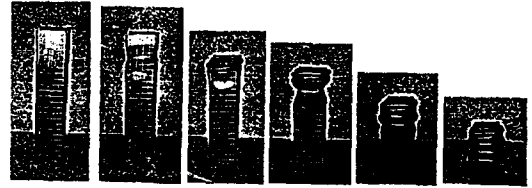
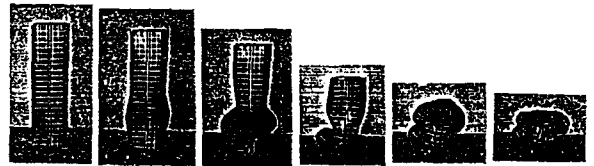


Fig. 3 Critical slenderness ratio of a test specimen classifying into crushing and overall collapse



(a)



(b)

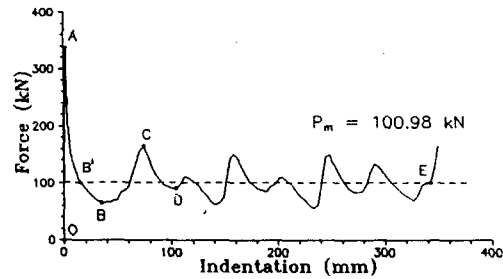


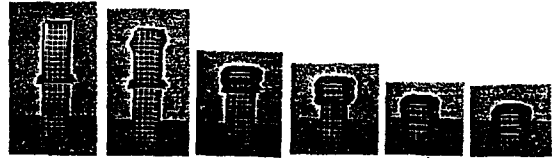
Fig. 4 A typical crushing response for the unstiffened specimen (US-2)

처짐이 명확하게 나타나기 시작한다. 이때 처짐은 마주보는 판 부재끼리 서로 대칭적인 형상을 나타낸다. 즉, 마주보는 두 판은 내측으로 처짐이 발생하며, 나머지 마주보는 두 판은 외측으로 처짐이 일어난다.

② AB 단계: 최종강도 점 A에 도달한 후 압괴 변형이 더욱 증가하면 AB를 따라 내력이 감소하며, 점 B'부근에서 최초의 접힘현상이 발생하여 내력의 저하가 다소 둔화된다. 접힘현상은 한쪽 단부에서 발생하고, 그 형상은 OA단계에서의 처짐형상과 같이 대칭적으로 일어나고, 점 B에서 이 접힘변형이 종료된다.

③ BC 단계: 첫번째 접힘이 종료된후 인접부분과의 접촉에 의해 내력이 급격히 상승하며, 이것은 점 C에서 두번째 접힘이 발생할 때까지 지속된다. 두번째 접힘의 방향은 첫번째 접힘과는 반대방향으로 생긴다.

④ CD 단계: 점 C에서 두번째 접힘이 일어나



(c)



(d)

Photo 2 Axially crushed specimens during tests: (a) unstiffened (US), (b) longitudinally stiffened (LS), (c) transversely stiffened (TS), and (d) orthogonally stiffened (OS) specimens

면, 이 접힘이 완료되는 점 D에 도달하기까지 내력이 저하한다.

⑤ DE 단계: 이상의 거동은 더 이상 압괴되지 않을 때까지 반복적으로 일어난다.

⑥ E 점: 점 E에 도달하면 접힘이 더이상 일어나지 않으며, 시험체는 일종의 강체로서 거동하게 되고, 그 결과 내력이 급격하게 증가한다.

**(2) 종방향으로 보강된 시험체 (LS)**

Fig.5에는 종방향으로 보강된 시험체의 대표적인 압괴거동을 나타내고 있으며, 각 변형단계별 특징을 요약하면 다음과 같다

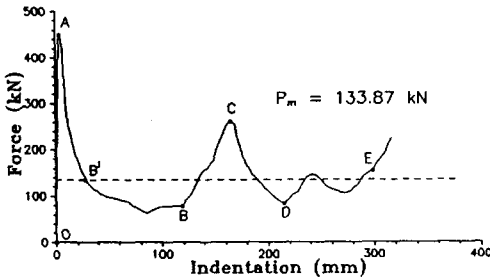


Fig. 5 A typical crushing response for the longitudinally stiffened specimen (LS-7)

① OA 단계: 보강재의 영향으로 압축 최종강도치는 증가하지만, 전반적으로 보강되지 않은 시험체 (US)와 유사한 거동을 나타낸다.

② AB 단계: 전반적으로 보강되지 않은 시험체와 유사한 거동을 보이지만, 종보강재의 영향으로 접힘길이가 보강되지 않은 시험체보다 최초의 접힘의 시작과 종료가 늦어지며, 결과적으로 내력의 저하가 완만한 영역도 증가한다. 접힘과정에서 보강재가 먼저 접촉한 뒤 판 부분이 접촉하게 되어 접힘이 종료되는 점 B 직전에서는 내력의 변화가 거의 없다.

③ B~E 단계 및 점 E: 전반적으로 보강되지 않은 시험체와 유사한 거동을 나타낸다. 그러나, 종 보강재의 영향으로 접힘모드의 길이가 길어지고 유효 압괴길이는 짧아지며, 그 결과 접힘모드의 갯수는 보강되지 않은 시험체보다 적다.

**(3) 횡방향으로 보강된 시험체 (TS)**

Fig.6에는 횡방향으로 보강된 시험체의 대표적인 압괴거동을 나타내며, 각 변형단계별 특징을 요약하면 다음과 같다.

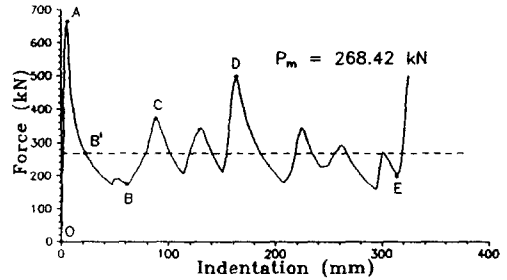


Fig. 6 A typical crushing response for the transversely stiffened specimen (TS-7)

① OA 단계: 전반적으로 보강되지 않은 시험체 (US)의 거동과 유사하다.

② AB 단계: 전반적으로 보강되지 않은 시험체와 유사한 거동을 나타내며, 횡방향 보강재는 접힘 길이에 그다지 영향을 미치지 않는다고 판단된다.

③ D 점: 보강되지 않은 경우 (US)와는 달리 내력이 크게 증가하는 접힘모드가 생기며, 이것은 횡보강재와 인접 판 및 인접 횡보강재와의 접촉에 의한 것이다. 그러나, 전체적인 에너지 흡수능력에 대한 횡보강재의 영향은 매우 적다.

④ B~E 단계 및 점 E: 보강되지 않은 시험체와 유사한 거동을 나타낸다.

**(4) 종 및 횡방향으로 보강된 시험체 (OS)**

Fig.7에는 종 및 횡방향으로 보강된 시험체의 대표적인 압괴거동을 나타내며, 각 변형단계별 특징을 요약하면 다음과 같다.

① OA 단계: 전반적으로 보강되지 않은 시험체 (US)와 유사한 거동을 하지만, 압축 최종강도는 종보강재의 영향으로 증가한다.

② AB 단계: 종보강재의 영향으로 접힘길이가 증가하며, 전반적으로 종방향으로 보강된 시험체 (LS)와 유사한 거동을 나타낸다.

③ D 점: 횡방향으로 보강된 경우 (TS)에서와 같이 내력이 크게 증가하는 접힘모드가 생기지만



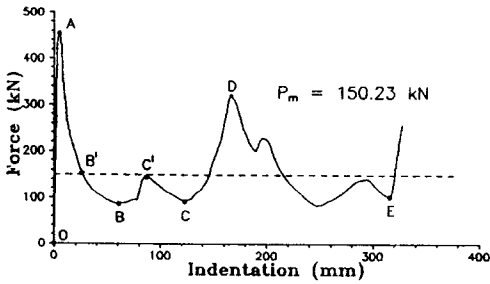


Fig. 7 A typical crushing response for the orthogonally stiffened specimen (OS-13)

그 영향은 적다.

④ B~E 단계 및 점 E: 종방향으로 보강된 시험체 (LS)와 유사한 거동을 나타내며, 접힘길어도 종방향으로 보강된 시험체와 유사한 경향을 나타낸다.

### 2.4.2 각 인자의 영향

여기서는 본 시리즈실험을 통하여 얻은 결과를 바탕으로 각 영향인자가 압괴거동에 어떠한 영향을 미치는지 고찰한다.

#### (1) 판폭의 영향

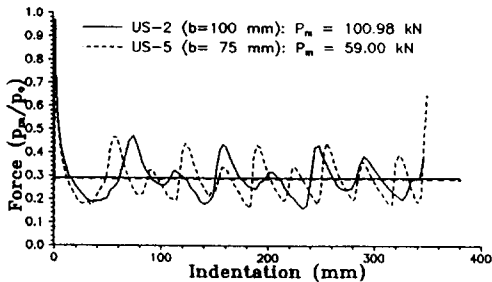


Fig. 8 Effect of plate breadth on crushing behavior of unstiffened specimens

Fig.8에는 보강되지 않은 시험체의 압괴거동에 대한 판폭의 영향을 비교하고 있다. 종축에는 압축 소성강도로 무차원화시킨 하중치를 나타내고 있다. 시험체 US-2와 US-5는 각각 판폭이 100 mm 및 75 mm 이지만 모두  $t/b = 0.028$ 로서

동일하다. 이 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 판폭의 차이에도 불구하고 무차원화시킨 평균 압괴강도는 거의 일치하고 있다. 즉, 판폭에 관계없이  $t/b$ 가 일정하면 무차원화시킨 평균 압괴강도는 큰 변화가 없으므로 이후의 보강판구조 실험에서는 판폭이 100 mm인 시험체만을 대상으로 하였다.

#### (2) 판두께의 영향

Fig.9.a 및 9.b에는 각각 압괴하중 및 흡수에너지에 대한 보강되지 않은 시험체의 판두께 영향을 나타내고 있다. 이들 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 판두께의 증가와 함께 압축 최종강도 뿐만 아니라 압괴강도와 압괴에너지 흡수능력도 크게 증가한다. 이것으로부터 판두께는 압괴거동에 대해 매우 중요한 영향인자임을 알 수 있다.

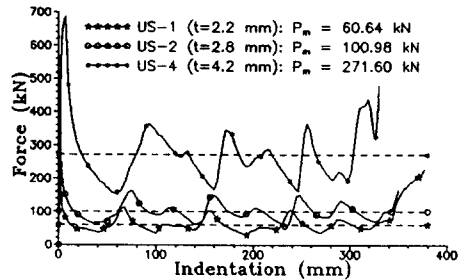


Fig. 9.a Effect of plate thickness on crushing behavior of unstiffened specimens

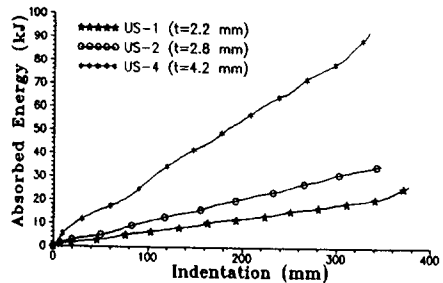


Fig. 9.b Effect of plate thickness on absorbed crushing energy of unstiffened specimens

(3) 보강재의 영향

(a) 종방향 보강재

Fig.10에는 압괴거동에 대한 종보강재의 영향을 나타내고 있다. 이 그림에서는 보강되지 않은 시험체와 각 구성판재에 종보강재가 1개 또는 2개가 부착된 시험체에 대한 결과를 비교하고 있다. 이 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 종보강재가 부착되어 있는 경우 보강되지 않은 시험체 보다 유효 압괴길이가 짧아지므로 평균 압괴강도는 증가함을 알 수 있다. 또한, 보강재의 갯수가 증가하면 횡단면적이 증가하기 때문에 유효 압괴길이는 더욱 짧아지고, 평균 압괴강도는 더욱 증가한다.

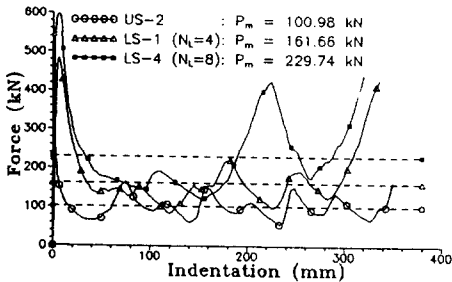


Fig. 10 Effect of longitudinal stiffeners on crushing behavior

(b) 횡방향 보강재

Fig.11에는 압괴거동에 대한 횡보강재의 영향을 보여주고 있다. 이 그림에서는 보강되지 않은 시험체와 각 구성 판재에  $h_{sr}/t = 10.7$ 인 횡보강재가 1개 또는 2개가 부착된 시험체에 대한 결과를 비교하고 있다. 이 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 횡보강재의 갯수가 많을수록 평균 압괴강도치는 전반적으로 증가하지만, 그 영향은 비교적 적다. 이것은 횡보강재의 크기나 갯수가 압괴 길이에 그다지 영향을 미치지 못하기 때문이며, 평균 압괴강도는 횡보강재간의 판을 대상으로 하면 근사적으로 계산할 수 있으리라 판단된다.

(c) 종 및 횡 보강재

Fig.12에는 압괴거동에 대한 종 및 횡 보강재의 영향을 나타내고 있다. 이 그림에는 보강되지 않

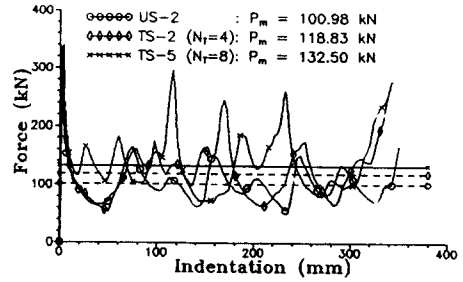


Fig. 11 Effect of transverse stiffeners on crushing behavior

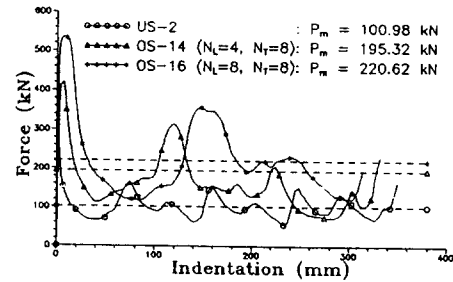


Fig. 12.a Effect of orthogonal stiffeners on crushing behavior ( $N_T = 8$ )

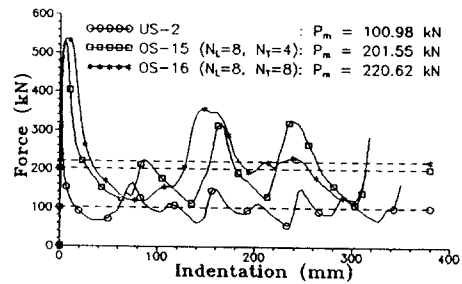


Fig. 12.b Effect of orthogonal stiffeners on crushing behavior ( $N_L = 8$ )

은 시험체와 각 구성판재에  $h_{sr}/t = 5.36$ 인 횡보강재를 2개 부착하고 동일한 크기의 종보강재를 1개 또는 2개를 부착한 시험체에 대한 결과를 비교하고 있다. 이들 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 종 및 횡방향으로 보강된 시험체의 압괴거동은 종보강재가 지배적으로 영향을 미치며, 종 및 횡보강판의 압괴강도는 횡보강재간의 종보강판을 기

준으로 평가할 수 있으리라 판단된다.

$$\eta = \frac{\delta_e}{L} = \frac{\lambda_e}{2H} \quad (2)$$

### 3. 평균 압괴강도 간이 계산식의 도출

전술한 바와 같이 본 연구에서는 연속판 구조를 구성하는 단위 판부재의 평균 압괴강도 간이 계산 모델을 개발하고자 한다. 여기서는 앞의 실험결과를 바탕으로 보강되지 않은 판부재에 대해 Paik & Pedersen [5]이 도출한 바 있는 평균 압괴강도의 간이 계산식을 보강판 부재에도 적용하기 위한 방법을 제시한다.

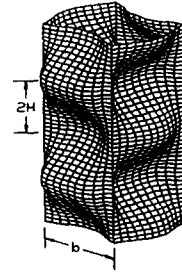


Fig. 13 Theoretical length of a folding on a square tube

#### 3.1 등가 판두께 개념

앞 절에서 나타난 실험결과로부터 고찰한 바와 같이 판구조의 압괴거동은 압축하중을 받는 방향의 부재 판두께에 지배적인 영향을 받는다. 판두께는 판재의 자체적인 두께뿐만 아니라 종보강재에 의해 변화하게 된다. 또한, 압축하중과 직각방향으로 배치된 횡보강재는 압괴거동에 그다지 영향을 미치지 않는다.

이같은 측면에서 본 연구에서는 일반적인 종 및 횡 보강판 구조의 압괴강도를 횡보강재간의 판 또는 종보강판만을 대상으로 추정하는 방법을 제시한다. 이때 압축하중의 작용방향으로 배치된 종보강재의 영향은 다음과 같이 정의되는 등가 판두께로서 고려할 수 있다. 즉,

$$t_w = t + k \cdot \frac{A_s}{b} \quad (1)$$

여기서,  $k$ 는 압괴거동에 대한 보강재의 유효성을 나타내는 상수로서 보강재의 형상이나 용접상태등에 의존하며, 일반적으로  $k=1.0$ 을 취한다.

#### 3.2 유효 압괴길이비

압괴거동시 판재의 두께나 보강재에 의해 이론적인 접힘모드와 실제적인 모드와는 차이를 나타낸다. 이 효과는 일반적으로 유효 압괴길이의 개념을 도입하여 고려할 수 있다 [10]. 평균 압괴강도를 이론적으로 평가하기 위하여는 먼저 유효 압괴길이를 알아야 하며, 유효 압괴길이비는 일반적으로 다음식으로 나타낼 수 있다. 즉,

여기서,  $2H$ 는 Fig.13에 나타내는 바와 같이 이론적인 하나의 접힘모드에 대한 접힘길이를 나타내며,  $\lambda_e$ 는 하나의 접힘모드에 대한 유효(실제) 압괴 변형량을 의미한다. 식(2)는 결국 한개의 접힘모드에 대한 유효 압괴길이비가 시험체 전체길이에 대한 전체 유효 압괴길이의 비와 동일하다는 것을 의미한다. Table 3에는 본 실험으로부터 얻은 유효 압괴길이의 비를 나타내고 있다.

전술한 바와같이 유효 압괴길이비는 종보강재의 영향을 크게 받으며, 본 연구에서는 실험데이터를 바탕으로 종보강재의 존재여부에 따라 유효 압괴길이비를 다음과 같이 정식화하였다.

##### (1) 종보강재가 없는 경우

종보강재가 없는 경우, 즉 보강재가 없거나 횡보강재만이 부착된 시험체에 대한 유효 압괴길이비를 판두께비의 변화에 따라 나타내면 Fig.14와 같이 된다. 이 그림으로부터 알수 있는 바와 같이 판두께의 변화에 관계없이 유효 압괴길이비는 거의 일정하며, 그 평균치는 72.8%이다. 이 값은 Abramowicz [11]가 얻은 73%와 일치하는 것이며, 본 연구에서도 이 경우의 유효 압괴길이비를 다음과 같이 정의한다. 즉,

$$\eta = 0.728 \quad (3)$$

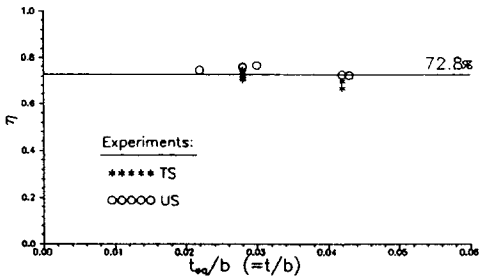


Fig. 14 Normalized effective crushing length of unstiffened or transversely stiffened plates (without longitudinal stiffeners)

(2) 종보강재를 가진 경우

압축하중의 작용방향으로 종보강재를 가진 판구조의 경우는 전술한 바와 같이 등가 판두께 개념을 적용하여 유효 압괴길이비를 검토할 수 있다.

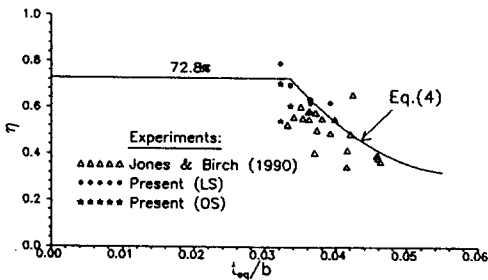


Fig. 15 Normalized effective crushing length of longitudinally or orthogonally stiffened plates

Fig.15에는 식(1)로부터 계산한 등가 판두께의 변화에 따른 종방향보강 시험체 및 종 및 횡방향보강 시험체에 대한 유효 압괴길이비를 나타내고 있다. 이 그림에는 Jones & Birch [1]가 수행한 종방향보강 시험체에 대한 정적 압괴실험으로부터 얻은 결과도 포함시키고 있다. 실제로 Jones & Birch는 각 시험체의 평균 압괴강도의 실험치는 제공하고 있으나, 유효 압괴길이비에 관한 데이터는 제시하지 않았다. 따라서, 본 연구에서는 부록에서 설명하고 있는 방법을 이용하여 Jones & Birch의 시험체에 대한 유효 압괴길이비를 근사적

으로 추정하였다 [12].

이 그림으로부터 알수 있는 바와 같이 등가 판두께가 작은 경우는 보강되지 않은 경우와 유사한 결과를 주며, 비교적 큰 등가 판두께를 가진 경우는 등가 판두께의 증가와 함께 유효 압괴길이비가 크게 저하함을 알 수 있다. 본 연구에서는 이 결과로부터 종보강판의 유효 압괴길이비를 다음과 같은 근사식으로 정식화하였다. 즉,

$$\begin{aligned} \eta &= 0.728 \quad \dots \text{for } t_{eq}/b \leq 0.0336 \\ &= 704.49 \left(\frac{t_{eq}}{b}\right)^2 - 81.22 \left(\frac{t_{eq}}{b}\right) + 2.66 \\ &\dots \quad \text{for } t_{eq}/b > 0.0336 \end{aligned} \quad (4)$$

3.3 평균 압괴강도

Paik & Pedersen [5]은 강소성 붕괴이론을 적용하여 보강되지 않은 연속 판구조에 대한 평균 압괴강도식을 도출한 바 있다. 이들은 연속 판구조를 구성하는 임의 판요소의 비하중변은 인접요소와 연결되어 직선을 유지한다고 가정하였다. 이 가정은 엄밀하게는 압괴 진입량이 비교적 작을 때에만 유효하며, 압괴 진입량이 커지면 비하중변에도 접힘현상이 일어나서 더이상 직선을 유지하지 않는다. 그러나, 우리가 주목하고 있는 것은 평균 압괴강도이므로 Fig.1에 나타내는 바와 같이 압괴 진입량이 적고 직선을 유지하는 동안의 평균 압괴강도치를 계산하면 되는 것이다.

실제로 이 가정은 실용적으로 높은 정도를 준다는 것이 검증된 바 있다. Paik & Pedersen이 도출한 식은 다음과 같다. 즉,

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_o} = \frac{1}{\eta} \left\{ 1.4245 \left(\frac{t}{b}\right)^{0.5} + 0.2673 \left(\frac{t}{b}\right) \right\} \quad (5)$$

보강되지 않은 판구조와 횡방향만으로 보강된 판구조는 서로 동일한 유효 압괴길이비를 가진다고 가정하고 있으므로 윗 식은 횡방향 보강판에도 그대로 적용할 수 있다.

그러나, 전술한 바와 같이 종방향 또는 종 및 횡방향으로 보강재가 부착된 경우는 등가 판두께의 개념을 적용하여 다루게 되므로, 식(5)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_o} = \frac{1}{\eta} \left\{ 1.4245 \left( \frac{t_{eq}}{b} \right)^{0.5} + 0.2673 \left( \frac{t_{eq}}{b} \right) \right\} \quad (6)$$

여기서,  $\sigma_m/\sigma_o$ 는 항상 1.0보다 작은 값을 취한다.

따라서, 종보강재의 존재여부에 따라 식(3) 또는 식(4)로부터 유효 압괴길이비를 계산하여 식(6)에 대입하면 평균 압괴강도를 추정할 수 있다.

Jones & Birch [1, 13]도 종보강재를 가진 정사각형 단면 강관의 평균 압괴강도식을 도출한 바 있으며, 본 연구에서 제안한 등가 판두께 개념을 적용하여 이들의 식을 수정하면 다음과 같이 된다 [12].

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_o} = 3.2758 \left( \frac{t_{eq}}{b} \right)^{2/3} \quad (7)$$

윗 식은 유효 압괴길이의 영향을 고려하지 않은 것으로서 평균 압괴강도를 과소평가하고 있다. 따라서, 본 연구에서 도출한 유효 압괴길이의 경험식(4)를 적용하면 식(7)은 다음과 같이된다.

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_o} = \frac{3.2758}{\eta} \left( \frac{t_{eq}}{b} \right)^{2/3} \quad (8)$$

여기서,  $\eta$ 는 유효 압괴길이비이며, 식(4)를 적용한다.

Fig.16 및 17에는 각각 종보강재가 없는 경우 (횡방향에만 보강재가 있는 경우를 포함) 및 종 또는 종 및 횡보강재를 가진 판구조에 대한 평균 압괴강도 실험치와 식(5) 및 (6)으로부터 추정된 결과를 비교하고 있다. 이들 비교에서는 본 연구에서 얻은 실험결과 뿐만 아니라 기존의 실험결과 [1, 2, 8, 14-16], 식(7) 및 (8)로부터 추정된 결과도 비교하고 있다.

Fig.16으로부터 알 수 있는 바와 같이 보강재가 없는 정사각형 단면 강관의 경우 구성 판부재의 두께가 커짐에 따라 평균 압괴강도도 점차적으로 증가하고 있으며, Paik & Pedersen [5]의 제안식(5)는 실험결과와 잘 일치하고 있다.

또한, 종 또는 종 및 횡 보강재를 가진 정사각형 단면 강관의 경우 (Fig.17), 등가 판두께가 일정 크기 이상으로 커지면 평균 압괴강도가 급격히 증가함을 알 수 있다. 이것은 압괴의 진행과 함께

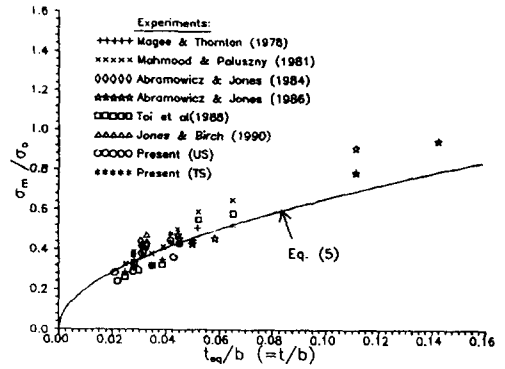


Fig. 16 Comparison of mean crushing strength for unstiffened or transversely stiffened plates obtained by experiments and approximate formula

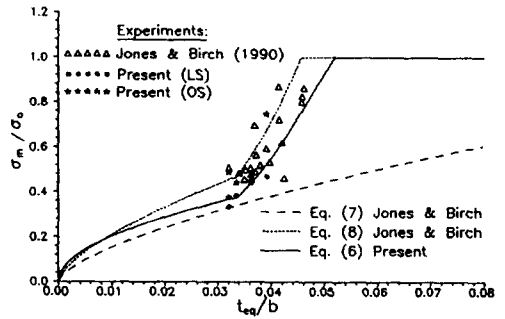


Fig. 17 Comparison of mean crushing strength for longitudinally or orthogonally stiffened plates obtained by experiments and approximate formulas

종보강재가 서로 접촉하여 접힘 현상을 방해함으로써 유효 압괴길이가 짧아지기 때문이다. 전술한 바와 같이 Jones & Birch의 평균 압괴강도식(7)은 유효 압괴길이의 영향을 고려하고 있지 않기 때문에 Fig.17로부터 알 수 있는 바와 같이 평균 압괴강도를 과소 평가하고 있다. 그러나, 식(7)을 본 연구에서 도출한 유효 압괴길이비에 관한 경험식(4)를 적용하여 수정한 식(8)과 실험결과를 비교하면 서로 잘 일치하고 있다. 또한, Paik & Pedersen [5]의 식을 수정한 식(6)도 평균 압괴강도를 높은 정도로서 추정하고 있다는 것을 확인할

수 있다.

#### 4. 결 언

본 연구에서는 보강되지 않은 경우를 포함하여 종, 횡 및 종 및 횡방향으로 보강재를 가진 정사각형 단면 강관에 대한 정적압괴 시리즈실험을 수행하여 압괴거동의 특성을 분석하였으며, 평균 압괴강도 간이 계산식을 도출하였다.

이상의 연구결과 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 정사각형 단면 강관의 단면 세장비에 따라서는 기동 형태의 전체적인 붕괴 또는 순수 압괴 모드가 일어날 수 있으며, 정사각형 단면 강관의 세장비가 약 0.135보다 큰 경우에 순수 압괴모드가 발생한다는 것을 알았다.
- 2) 보강되지 않은 정사각형 단면 강관에 대한 정적 압괴실험 결과는 기존의 실험결과와 유사한 결과를 주었으며, 특히 유효 압괴길이비는 지금까지 알려진 73%와 일치하는 결과를 주었다.
- 3) 판부재의 판두께/판폭의 비가 일정할때 유효 압괴길이비 및 평균 압괴강도 (응력)는 판폭의 영향을 거의 받지 않는다.
- 4) 판부재의 판두께는 평균 압괴강도에 가장 큰 영향을 미치는 인자이다.
- 5) 종보강재를 가진 판의 경우 보강되지 않은 경우보다 접힘길이가 길어지고 유효 압괴길이가 짧아지며, 평균 압괴강도는 증가한다. 종보강재의 갯수가 증가하면 횡단면적이 증가하기 때문에 유효 압괴길이는 더욱 짧아지며, 평균 압괴강도는 더욱 증가한다.
- 6) 횡보강재는 전반적으로 평균 압괴강도를 증가시키는 역할을 하지만 그 영향은 비교적 적다. 횡보강판의 경우 평균 압괴강도치는 횡보강재간의 보강되지 않은 판을 대상으로 추정할 수 있다.

7) 종 및 횡방향으로 보강된 경우 횡보강재의 영향은 적으며, 평균 압괴강도치는 횡보강재간의 종보강판을 대상으로 추정할 수 있다.

8) 종보강재의 영향은 등가 판두께의 개념을 적용하여 고려할 수 있다. 즉, 종보강판을 등가 판두께를 가진 보강되지 않은 판으로 치환하여 다루면 실용적으로 충분한 정도의 평균 압괴강도치를 얻을 수 있다.

9) 본 연구에서는 판구조물의 정적 압괴거동을 분석하였으나, 실제적인 압괴하중은 일반적으로 동적으로 작용하는 경우가 많으며, 동적효과를 고려하기 위한 이론적 및 실험적인 연구가 필요하다고 사료된다.

#### 후 기

본 연구를 수행함에 있어 영국 Liverpool 대학교 기계공학과 N. Jones 교수로부터 많은 유익한 조언을 받았으며, 이에 감사를 드리는 바이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Jones, N. and Birch, R. S., "Dynamic and static axial crushing of axially stiffened square tubes", Proc. Inst. Mech. Engrs., Vol. 204, pp. 293-310, 1990.
- [2] Wierzbicki, T. and Abramowicz, W., "On the crushing mechanics of thin-walled structures", J. of Applied Mechanics, Vol. 50, pp. 727-734, 1983.
- [3] Amdahl, J., "Energy absorption in ship-platform impacts", Division of Marine Structures, University of Trondheim, Report No. UR-83-34, Trondheim, Norway, September 1983.
- [4] Meng, Q., Al-Hassani, S. T. S. and Soden, P. D., "Axial crushing of square tubes", Int. J. of Mech. Sci., Vol. 25, No. 9-10, pp. 747-773, 1983.

- [5] Paik, J. K. and Pedersen, P. T., "Ultimate and crushing strength of plated structures", *J. of Ship Research*, Vol. 39, No. 3, pp. 250-261, 1995.
- [6] Pedersen, P. T., Valsgard, S., Olsen, D. and Spangenberg, S., "Ship impacts: bow collisions", *Int. J. Impact Engng.*, Vol. 13, No. 1, pp. 1-12, 1992.
- [7] Paik, J. K., "Ultimate strength of thin walled structures under axial compression", *Thin Walled Structures*, Vol. 20, pp. 1-12, 1992.
- [8] Paik, J. K., "Ultimate strength of thin walled structures under axial compression", *Thin Walled Structures*, Vol. 20, pp. 1-12, 1992.
- [9] Paik, J. K., "Ultimate strength of thin walled structures under axial compression", *Thin Walled Structures*, Vol. 20, pp. 1-12, 1992.
- [10] Paik, J. K., "Ultimate strength of thin walled structures under axial compression", *Thin Walled Structures*, Vol. 20, pp. 1-12, 1992.
- [11] Paik, J. K., "Ultimate strength of thin walled structures under axial compression", *Thin Walled Structures*, Vol. 20, pp. 1-12, 1992.
- [12] Paik, J. K., "Ultimate strength of thin walled structures under axial compression", *Thin Walled Structures*, Vol. 20, pp. 1-12, 1992.
- [13] Paik, J. K., "Ultimate strength of thin walled structures under axial compression", *Thin Walled Structures*, Vol. 20, pp. 1-12, 1992.
- [14] Paik, J. K., "Ultimate strength of thin walled structures under axial compression", *Thin Walled Structures*, Vol. 20, pp. 1-12, 1992.
- [15] Mahmood, H. F. and Paluszny, A. P., "Design of thin walled column for crash energy management -their strength and mode of collapse", *S. A. E. paper*, No. 811302, 1981.
- [16] Magee, C. L. and Thornton, P. H., "Design considerations in energy absorption by structural collapse", *S. A. E. paper*, No. 811302, 1981.