

---

 論 文
 

---

大韓造船學會論文集  
 第 33 卷 第 3 號 1996 年 8 月  
 Transactions of the Society of  
 Naval Architects of Korea  
 Vol. 33, No. 3, August 1996

## 판 및 보강판의 압축최종강도 실험식

백점기\* , 이제명\*\*

### An Empirical Formulation for Predicting the Ultimate Compressive Strength of Plates and Stiffened Plates

by

J. K. Paik\* and J. M. Lee\*\*

#### 요 약

본 연구의 목적은 1축압축을 받는 판 및 보강판의 최종강도추정을 위한 경험식의 도출에 있다. 이를 위해 다른 연구자에 의해 수행된 많은 실험결과를 정리 하였고, 식의 도출에 있어서 넓은 범위의 판의 치수에 대한 이들 실험결과와 유용성을 확인하였다. 또한, 필요한 치수범위에 있어서 편면보강재를 가진 보강판에 대한 압축 최종강도 실험을 추가적으로 수행하였다. 본실험과 기존의 실험결과를 바탕으로 최소자승법에 의해 보다 더 유용한 경험식을 도출하였다.

#### Abstract

The aim of this study is to derive an empirical formula for predicting ultimate strength of plates and stiffened plates subjected to uniaxial compression. The test data of ultimate compressive strength for unstiffened and stiffened plates previously obtained by others have been collected. Many test data are necessary so that the derived formula will be available in wide range of plate dimensions. Additional collapse tests for a plate specimen with one flat bar stiffener, varying dimensions of plate and stiffener were performed in this study. On the basis of the present and previous experimental data, a more useful empirical formula than the existing ones was derived by applying the least square method.

---

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

접수일자 : 1995년 11월 7일, 재접수일자: 1996년 6월 5일

\* 정회원, 부산대학교 조선해양공학과, 기계기술연구소 연구원

\*\* 학생회원, 일본동경대학 조선해양공학과 박사과정 (연구당시 부산대 조선해양공학과 석사과정)

**기호설명**

- a = 횡보강재간의 간격 (종보강재의 길이)
- a<sub>s</sub> = 판재를 포함한 종보강재 한개의 횡단면적
- a<sub>st</sub> = 종보강재 한개만의 횡단면적
- b = 전체 보강판의 폭
- b' = 종보강재간의 간격
- b<sub>s</sub> = 보강재 플랜지의 폭
- E = 재료의 탄성계수
- h<sub>s</sub> = 종보강재의 높이
- I<sub>s</sub> = 판재를 포함한 종보강재 한 개의 단면 2차 모멘트
- r = 판재를 포함한 종보강재의 곡률반경
- =  $\sqrt{\frac{I_s}{a_s}}$
- t = 판두께
- t<sub>1</sub> = 보강재 웨브의 두께
- t<sub>2</sub> = 보강재 플랜지의 두께
- w<sub>op</sub> = 판재의 최대 초기처짐량
- w<sub>os</sub> = 보강재의 최대 초기처짐량
- β = 보강재간의 판의 세장비
- =  $\frac{b'}{t} \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E}}$
- λ = 유효판을 포함하는 종보강재의 세장비
- =  $\frac{a}{\pi r} \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E}}$
- σ<sub>u</sub> = 판 또는 보강판의 압축최종강도
- σ<sub>Y</sub> = 판 또는 보강판의 등가 재료항복강도
- =  $\frac{b't \sigma_{Yp} + a_{st} \sigma_{Ys}}{b't + a_{st}}$
- σ<sub>Yp</sub> = 판재의 재료항복강도
- σ<sub>Ys</sub> = 보강재의 재료항복강도

**1. 서 언**

선체구조는 기본적으로 판 또는 보강판으로 구성된 전형적인 상자형 판구조물이며, 선체 구조설계에 구조강도 측면에서 가장 기본적으로 검토해야 할 사항은 선체자중 및 적재화물 중량분포, 파랑 외력분포 등에 의해 유발되는 종굽힘모멘트에 선각거더가 충분히 견딜 수 있는지의 여부를 확인

하는 것이다. 이 경우 가장 중요한 것은 갑판 및 선저외판의 압축최종강도이다. 특히 선체구조의 안전성 측면에서 압축최종강도의 검토가 필수적이다.

보강판이 면내압축하중의 증가와 함께 최종강도에 도달하기까지는 복잡한 비선형거동을 나타낸다. 이를테면 보강판의 판재와 보강재의 치수비에 따라 여러형태의 좌굴모드가 생길 가능성이 있다. 즉, 보강재의 치수가 비교적 작을 때에는 판재와 보강재가 함께 전체좌굴 (overall buckling)할 것이다. 보강재의 치수가 상대적으로 클 때에는 압축하중이 일정크기에 이르면 보강재는 직선을 그대로 유지하지만 보강재간의 판재만이 먼저 횡방향으로 변형하는 국부좌굴 (local buckling)이 생기게 된다. 한편, 판재의 치수가 크고 보강재 치수가 작은 경우에는 보강재가 먼저 좌굴하는 소위 보강재의 굽힘 / 비틀림좌굴 (flexural / torsional buckling)이 일어날 수 있다.

보강판의 압축 최종강도를 추정하기 위하여는 기본적으로 이같은 복잡한 좌굴현상을 모두 고려하여 검토할 필요가 있다. 이 문제에 대하여 각종 이론적, 수치적 방법들이 제시되어 있으며, 실제로 이 방법들을 적용하면 판 및 보강판의 압축최종강도를 매우 높은 정도로서 해석할 수 있다. 이 방법들은 대부분 수치해석 컴퓨터프로그램으로 정리되어 있거나 간이 계산기법 또는 수순의 형태를 취하고 있다. 선체 구조설계자가 초기 구조설계단계에서 간단히 판의 압축최종강도를 추정할 수 있게 하거나 최종강도를 기준으로한 선체 판구조의 신뢰성을 평가하기 위하여는 명시적인 형태로 표시되는 한개의 간이계산식을 제시하는 것이 가장 바람직스럽다. 이같은 측면에서 최근에 판 및 보강판의 압축최종강도 간이계산식의 개발에 관한 연구가 다수 수행되어져 왔다[1].

이들 연구에서는 대개 최종강도에 도달하기 위한 적절한 조건을 가정하여 해석적인 방법으로 간이 계산식을 도출하거나 판 및 보강판에 대해 판재 및 보강재의 치수를 변화시켜 가면서 시리즈 수치해석 또는 시리즈 붕괴실험을 수행하고, 이들 결과를 바탕으로 실험식을 도출하는 것 등이 있다. 이 가운데 Lin[2]이 도출한 실험식은 판 및 보강

판의 압축최종강도를 상당히 높은 정도로서 추정할 수 있고 간단한 형태로 표현되기 때문에 현재 널리 사용되고 있는 것 중의 하나이다. 그런데, 이 식은 보강재의 치수가 작을 때에는 압축최종강도를 실제보다 너무 낮게 평가하게 되어 이 같은 판에는 적용할 수 없는 결점이 있다. 고장력강도의 채용과 좌굴허용 설계개념의 등장과 함께 부재치수가 작은 경우에도 적용하기 위하여는 보다 넓은 범위에서 적용할 수 있는 간이식의 개발이 필요하다. 본 연구를 수행하게 된 동기는 Lin[2]이 제안한 식과 같은 간단한 형태를 취하면서도 넓은 범위에서 적용이 가능한 실험식을 도출하고자 하였다. 이를 위해 기존에 수행된 바 있는 판 및 보강판의 압축최종강도 실험결과를 활용하고 부족한 부분에 대하여는 압축최종강도 실험을 추가로 수행하여 이들 실험결과를 바탕으로 최소자승법에 의한 실험식을 도출하고자 하였다.

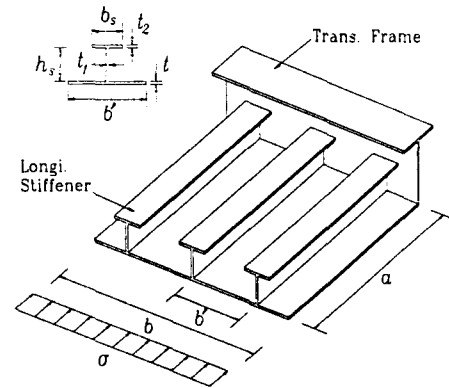


Fig. 1 A stiffened plate structure under uniaxial compression

Table 1 Test results of ultimate compressive strength for stiffened plates obtained by Faulkner(1977)

Specimen No.	a (mm)	b (mm)	b' (mm)	t (mm)	h <sub>s</sub> (mm)	t <sub>1</sub> (mm)	b <sub>s</sub> (mm)	t <sub>2</sub> (mm)	w <sub>op</sub> /t	w <sub>os</sub> /a (× 10 <sup>-3</sup> )	λ	β	σ <sub>y</sub> (MPa)	σ <sub>w</sub> /σ <sub>y</sub>
P1	244	88.4	88.4	3.07	17.4	4.88	12.7	6.17	-	0.20	0.323	1.04	262	0.976
P2	384	147	147	2.62	30.4	4.83	12.7	6.22	-	0.10	0.350	2.01	255	0.733
P3	638	221	221	2.54	54.1	4.9	12.7	6.1	-	0.33	0.381	3.15	253	0.713
P4	523	236	236	2.01	43.6	4.8	12.7	6.25	-	0.31	0.357	3.99	232	0.567
P5	488	88.4	88.4	3.07	17.4	4.88	12.7	6.17	0.03	2.46	0.616	0.99	238	0.824
P6	767	147	147	2.62	30.4	4.83	12.7	6.22	0.29	1.01	0.690	1.98	247	0.750
P7	1275	221	221	2.54	54.1	4.9	12.7	6.1	0.58	0.85	0.775	3.14	261	0.621
P8	1046	236	236	2.01	43.6	4.8	12.7	6.25	1.36	0.47	0.745	4.16	252	0.515
P9	732	88.4	88.4	3.07	17.4	4.88	12.7	6.17	-	2.43	0.947	1.02	250	0.716
P10	1151	147	147	2.62	30.4	4.83	12.7	6.22	-	1.33	1.033	1.97	246	0.660
P11	1913	221	221	2.54	54.1	4.9	12.7	6.1	-	1.76	1.124	3.03	244	0.494
P12	1570	236	236	2.01	43.6	4.8	12.7	6.25	-	0.72	1.124	4.19	255	0.448
P13	262	88.4	88.4	3.1	26.4	3.1	0.0	0.0	-	0.15	0.409	1.02	255	0.988
P14	244	177	177	3.05	17.5	4.85	12.7	6.15	-	0.29	0.372	2.04	249	0.764
P15	422	265	265	3.07	33.9	4.95	12.7	6.2	-	0.36	0.401	2.96	236	0.569
P16	384	295	295	2.57	30.5	4.9	12.7	6.12	-	0.18	0.416	4.05	250	0.506
P17	523	88.4	88.4	3.1	26.4	3.1	0.0	0.0	0.03	0.71	0.786	0.98	235	0.822
P18	488	177	177	3.05	17.5	4.85	12.7	6.15	0.20	0.39	0.719	1.98	233	0.656
P19	843	265	265	3.07	33.9	4.95	12.7	6.2	0.65	0.42	0.839	3.09	258	0.563
P20	767	295	295	2.57	30.5	4.9	12.7	6.12	0.83	0.31	0.845	4.12	258	0.455
P21	785	88.4	88.4	3.1	26.4	3.1	0.0	0.0	-	1.12	1.237	1.03	259	0.696
P22	732	177	177	3.05	17.5	4.85	12.7	6.15	-	0.55	1.115	2.04	249	0.515
P23	1265	265	265	3.07	33.9	4.95	12.7	6.2	-	0.64	1.236	3.04	249	0.491
P24	1151	295	295	2.57	30.5	4.9	12.7	6.12	-	0.45	1.238	4.02	246	0.384

본 연구에서 개발한 실험식은 실제적인 선체 판 부재의 평균적인 수준의 초기치짐을 가진 경우에 적용할 수 있도록 하였으며, Lin[2]식과 같이 하나의 식으로 판 뿐만 아니라 보강판의 압축 최종강도를 추정할 수 있는 특징이 있다.

### 2. 기존의 압축최종강도 실험결과

여기서는 지금까지 수행되어져 온 판 및 보강판에 대한 대표적인 압축최종강도 실험결과중에서 부재치수에 관하여 구체적인 데이터가 입수가 가능한 것을 중심으로 조사한다. Fig. 1에는 1축압

축력을 받는 보강판구조를 나타내고 있는데, 부재 치수가 큰 횡프레임간에 종방향으로 보강된 보강판이 배치되어 있다. 본 연구에서는 횡프레임간에서 종방향으로 보강된판의 압축최종강도를 검토한다. 판에는 편면 보강재가 등간격으로 배치되어 있으며, 실험은 4변 단순지지에 가까운 조건하에서 수행된 것 만을 대상으로 하였고, 고정조건하의 결과는 제외시켰다.

#### (1) Faulkner의 실험

Faulkner[3]는 Table 1에 나타내는 바와 같이 보강판에 대한 압축최종강도 시리즈 실험을 수행

Table 2 Test results of ultimate compressive strength for stiffened plates obtained by Horne et al (1976, 1977)

Specimen No.	a (mm)	b (mm)	b' (mm)	t (mm)	h <sub>s</sub> (mm)	t <sub>1</sub> (mm)	b <sub>s</sub> (mm)	t <sub>2</sub> (mm)	w <sub>op</sub> /t	w <sub>os</sub> /a (×10 <sup>-3</sup> )	λ	β	σ <sub>y</sub> (MPa)	σ <sub>w</sub> /σ <sub>y</sub>
3	915	1523	457	9.5	152.5	9.5	-	-	0.13	1.85	0.24	1.73	260.9	0.85
7	1830	1523	457	9.5	152.5	16.0	-	-	0.18	0.30	0.44	1.70	256.6	0.79
8	1830	1523	457	9.5	152.5	16.0	-	-	0.09	0.38	0.43	1.72	262.1	0.85
9	1830	1523	457	9.5	152.5	9.5	-	-	0.08	0.30	0.48	1.72	263.1	0.78
11	1830	1523	457	9.5	152.5	16.0	-	-	0.19	0.66	0.45	1.70	273.6	0.79
12	1830	1523	457	9.5	152.5	16.0	-	-	0.27	0.52	0.44	1.70	256.6	0.79
13	1830	1523	457	9.5	152.5	16.0	-	-	0.61	0.27	0.45	1.69	273.6	0.75
14	1830	1523	457	9.5	152.5	16.0	-	-	0.63	0.46	0.44	1.70	256.6	0.83
A11	1830	1523	457	6.5	152.5	9.5	-	-	0.89	0.44	0.53	2.84	363.2	0.55
A21	1830	1523	457	6.5	152.5	9.5	-	-	0.88	1.39	0.52	2.88	343.9	0.64
A12	1830	1523	457	6.5	152.5	9.5	-	-	0.23	0.66	0.53	2.86	349.9	0.56
A23	1830	1523	457	6.5	152.5	9.5	-	-	0.23	0.90	0.52	2.91	348.6	0.62
A22	1830	1513	457	6.5	152.5	9.5	-	-	0.22	0.66	0.51	2.83	332.7	0.56
AF2	3000	700	200	10.3	152	6.5	76	9.8	0.08	0.20	0.65	0.81	364.5	0.89
AS2	3000	700	200	10.35	152	6.6	38	12	0.10	0.43	0.66	0.82	373.8	0.81
D11	1830	1523	457	10.0	80.0	12.0	-	-	0.54	0.68	1.11	1.73	283.4	0.63
D21	1830	1523	457	10.0	80.0	12.0	-	-	0.57	0.38	1.04	1.62	243.8	0.57
D12	1830	1523	457	10.0	80.0	12.0	-	-	0.31	0.60	1.02	1.59	234.7	0.65
D22	1830	1523	457	10.0	80.0	12.0	-	-	0.12	0.44	1.07	1.67	246.8	0.60
E11	1830	1523	457	6.5	76.0	12.5	-	-	0.97	0.44	1.17	2.92	339.2	0.47
E21	1830	1523	457	6.5	76.0	12.5	-	-	0.86	0.98	1.15	2.87	337.2	0.44
E12	1830	1523	457	6.5	76.0	12.5	-	-	0.26	0.49	1.17	2.92	338.5	0.48
E23	1830	1523	457	6.5	76.0	12.5	-	-	0.38	0.93	1.16	2.90	333.3	0.45
FS4	3000	700	200	9.9	148.5	9.8	-	-	0.05	0.27	0.86	0.84	367.3	0.67
FS9	3000	700	200	9.9	148.5	9.8	-	-	0.09	0.57	0.84	0.83	357.6	0.75
PF2	2700	700	200	9.7	150.0	15.15	-	-	0.07	0.41	0.73	0.87	369.2	1.78
PF5	2700	1000	300	10.0	150.0	15.15	-	-	0.14	0.26	0.79	0.90	413.7	0.79
PF11	2700	1150	350	9.8	150.0	15.15	-	-	0.16	0.39	0.79	0.88	384.1	0.72
SW1	2700	1540	480	9.7	150.0	15.15	-	-	0.19	0.41	0.85	1.70	388.2	0.71
SW3	2700	1540	480	9.7	150.0	15.15	-	-	0.28	0.44	0.85	1.70	389.2	0.71
SW5	2700	1540	480	9.7	150.0	15.15	-	-	0.20	0.30	0.85	1.70	408.5	0.64
SW7	2700	1540	480	9.7	150.0	15.15	-	-	0.14	0.30	0.85	1.70	419.9	0.69

하였다. 시험체에는 2개의 편면 보강재를 등간격으로 용접하였으며, 보강재의 형상은 대부분 T형을 취하였다. 시험체의 판재부분의 최대 초기처짐량은 판두께의 3%~136%였고, 이 실험에서도 시험체의 보강재와 판재는 서로 다른 재질을 사용하였다. Table 1에 나타난 재료항복응력치는 항복응력이 서로 다른 판재와 보강재의 효과를 고려하여 계산한 등가치이다(기호설명 참조).

(2) Home등의 실험

Home & Narayanan[4], Home등[5]도 보강판의 압축최종강도 실험을 수행하였다. 이들은 판재 및 보강재의 치수를 변화시켜가면서 시리즈 붕괴강도 실험을 수행하였다. Table 2에는 이들이 대상으로 한 보강판의 부재치수와 최종강도 실험결과를 보여주고 있다. 시험체에는 2개의 편면 보강재를 등간격으로 용접으로 부착하였으며, 용접방법은 연속적으로 필렛용접한 경우와 부분적으로 필렛용접한 경우의 2종류를 취하였다.

Home & Narayanan[4]의 실험에서는 flat bar형 보강재가 붙은 경우만을 대상으로 하였으나, Home, Montague & Narayanan[5]의 실험에서는

flat bar형 보강재 뿐만 아니라 bulb형과 angle형의 보강재가 붙은 경우도 다루었다.

시험체의 판재부분의 최대 초기처짐량은 판두께의 5% ~ 97%에 이르렀으며, 압축잔류응력치도 항복응력의 약 6%~42%의 범위에 있었다.

이들은 주변이 단순지지된 경우와 고정된 경우의 2종류에 대해 실험을 수행하였으나, Table 2에는 단순지지된 경우만을 대상으로 조사하였다.

이들의 실험에서 시험체 보강재의 재료항복응력치가 판재의 재료항복응력치보다 다소 크며, Table 2의 재료항복응력치는 보강판 전체에 대한 등가 재료항복응력의 값을 나타내고 있다.

(3) Niho의 실험

Niho[6]는 판 및 보강판에 대한 압축최종강도 실험을 수행하였으며, Table 3에 이들 결과를 보여주고 있다. 보강되지 않은 판 시험체는 1번이 400 mm 인 정사각형 판이며, 판두께는 4.5 mm, 6 mm, 8 mm 의 3종류이다. 시험체의 초기처짐량은 실험결과 판두께의 10% 이하였으며, 판의 중앙부 압축 잔류응력치는 추정치가 재료 항복응력

Table 3 Test results of ultimate compressive strength for stiffened plates obtained by Niho (1978)

Specimen No.	a (mm)	b (mm)	b' (mm)	t (mm)	h <sub>s</sub> (mm)	t <sub>1</sub> (mm)	b <sub>s</sub> (mm)	t <sub>2</sub> (mm)	w <sub>op</sub> /t	w <sub>os</sub> /a (× 10 <sup>-3</sup> )	λ	β	σ <sub>y</sub> (MPa)	σ <sub>v</sub> /σ <sub>y</sub>
P4.5A	400	400	400	4.51	-	-	-	-	0.004	-	-	3.328	277.3	0.541
P4.5R	400	400	400	4.51	-	-	-	-	0.030	-	-	3.409	291.1	0.457
P6A(1)	400	400	400	5.95	-	-	-	-	0.003	-	-	2.425	253.8	0.681
P6A(2)	400	400	400	5.95	-	-	-	-	0.002	-	-	2.425	253.8	0.678
P6R(1)	400	400	400	5.95	-	-	-	-	0.142	-	-	2.597	291.1	0.489
P6R(2)	400	400	400	5.94	-	-	-	-	0.091	-	-	2.597	291.1	0.553
P8A(1)	400	400	400	7.93	-	-	-	-	0.005	-	-	1.838	261.7	0.795
P8A(2)	400	400	400	7.93	-	-	-	-	0.039	-	-	1.838	261.7	0.777
P8R(1)	400	400	400	7.93	-	-	-	-	0.019	-	-	1.814	254.8	0.777
P8R(2)	400	400	400	7.93	-	-	-	-	0.027	-	-	1.814	254.8	0.718
F20A	600	600	150	3.27	20	3.27	-	-	-	6.59	1.747	1.818	309.7	0.550
F20R	600	600	150	3.27	20	3.27	-	-	-	9.86	1.747	1.818	309.7	0.386
F30A(1)	600	600	150	3.27	30	3.27	-	-	-	0.95	1.053	1.818	309.7	0.644
F30R(1)	600	600	150	3.27	30	3.27	-	-	-	1.65	1.053	1.818	309.7	0.645
F30R(2)	600	600	150	3.27	30	3.27	-	-	-	2.74	1.053	1.818	309.7	0.595
F45R	600	600	150	3.27	45	3.27	-	-	-	1.09	0.633	1.818	309.7	0.633
T45R	600	600	150	3.27	25	3.27	20	3.27	-	0.70	0.786	1.818	309.7	0.612

의 약 20%정도였다.

보강재의 형상은 flat bar형과 T형의 2종류이다.

또한, 보강판 시험체는 3개의 편면 보강재가 붙은 정사각형판 (600 × 600 × 3.27 mm)이다.

시험체의 최대 초기처짐량은 실험결과 판두께의 0.2 % ~ 14.2%의 범위에 있었다.

Table 4 Test results of ultimate compressive strength for unstiffened and stiffened plates obtained by Yao (1980)

Specimen No.	a (mm)	b (mm)	b' (mm)	t (mm)	h <sub>s</sub> (mm)	t <sub>1</sub> (mm)	b <sub>s</sub> (mm)	t <sub>2</sub> (mm)	w <sub>0p</sub> /t	w <sub>0s</sub> /a (× 10 <sup>-3</sup> )	λ	β	σ <sub>Y</sub> (MPa)	σ <sub>w</sub> /σ <sub>Y</sub>
C-4.5-0.00-1	500	500	500	4.5	-	-	-	-	0.0	-	-	4.093	279.20	0.390
C-4.5-0.00-2	500	500	500	4.5	-	-	-	-	0.0	-	-	3.954	260.58	0.450
C-4.5-0.09-1	500	500	500	4.5	-	-	-	-	0.09	-	-	3.959	261.27	0.410
C-4.5-0.09-2	500	500	500	4.5	-	-	-	-	0.09	-	-	3.910	254.80	0.460
C-4.5-0.09-3	500	500	500	4.5	-	-	-	-	0.09	-	-	3.900	253.53	0.450
C-4.5-0.24	500	500	500	4.5	-	-	-	-	0.24	-	-	3.930	257.44	0.440
C-4.5-0.27	500	500	500	4.5	-	-	-	-	0.27	-	-	4.062	275.09	0.410
C-4.5-0.31	500	500	500	4.5	-	-	-	-	0.31	-	-	3.943	259.21	0.420
C-4.5-0.36	500	500	500	4.5	-	-	-	-	0.36	-	-	3.975	263.42	0.420
C-4.5-0.38	500	500	500	4.34	-	-	-	-	0.38	-	-	3.959	261.27	0.410
C-4.5-0.89	500	500	500	4.34	-	-	-	-	0.89	-	-	4.050	274.69	0.390
C-4.5-1.02	500	500	500	4.34	-	-	-	-	1.02	-	-	3.846	246.57	0.38
C-4.5-0.33RS	500	500	500	4.34	-	-	-	-	0.33	-	-	3.730	215.70	0.317
C-4.5-0.52RS	500	500	500	4.34	-	-	-	-	0.52	-	-	3.730	215.70	0.323
C-4.5-1.07RS	500	500	500	4.34	-	-	-	-	1.07	-	-	3.847	229.52	0.301
C-4.5-1.28RS	500	500	500	4.34	-	-	-	-	1.28	-	-	3.819	226.18	0.338
C-4.5-1.31RS	500	500	500	4.34	-	-	-	-	1.31	-	-	3.648	206.29	0.346
C-4.5-1.74RS	500	500	500	4.34	-	-	-	-	1.74	-	-	3.802	224.13	0.335
C-9.0-0.00-1	500	500	500	8.8	-	-	-	-	0.00	-	-	2.184	304.09	0.870
C-9.0-0.00-2	500	500	500	8.8	-	-	-	-	0.00	-	-	2.190	305.76	0.850
C-9.0-0.00-3	500	500	500	8.8	-	-	-	-	0.00	-	-	2.185	304.39	0.930
C-9.0-0.00-4	500	500	500	9.0	-	-	-	-	0.00	-	-	2.054	281.36	0.850
C-9.0-0.26	500	500	500	8.8	-	-	-	-	0.26	-	-	2.217	313.21	0.680
C-9.0-0.31-1	500	500	500	8.8	-	-	-	-	0.31	-	-	2.193	306.45	0.740
C-9.0-0.31-2	500	500	500	8.8	-	-	-	-	0.31	-	-	2.180	302.92	0.750
C-9.0-0.38	500	500	500	8.8	-	-	-	-	0.38	-	-	2.155	296.06	0.730
C-9.0-0.02RS	500	500	500	8.85	-	-	-	-	0.02	-	-	1.973	250.88	0.704
C-9.0-0.06RS	500	500	500	8.95	-	-	-	-	0.05	-	-	1.996	262.74	0.705
C-12.7-0.00-1	500	500	500	12.80	-	-	-	-	0.00	-	-	1.353	246.96	0.960
C-12.7-0.00-2	500	500	500	12.80	-	-	-	-	0.00	-	-	1.350	245.88	0.990
C-12.7-0.00-3	500	500	500	12.80	-	-	-	-	0.00	-	-	1.350	245.88	0.980
C-12.7-0.00-4	500	500	500	12.80	-	-	-	-	0.00	-	-	1.349	245.29	1.000
C-12.7-0.00-5	500	500	500	12.90	-	-	-	-	0.00	-	-	1.469	295.57	0.990
C-12.7-0.20	500	500	500	13.30	-	-	-	-	0.20	-	-	1.410	289.30	0.810
C-12.7-0.25	500	500	500	13.30	-	-	-	-	0.25	-	-	1.409	289.20	0.830
C-12.7-0.26-1	500	500	500	12.90	-	-	-	-	0.26	-	-	1.476	298.51	0.810
C-12.7-0.26-2	500	500	500	13.30	-	-	-	-	0.26	-	-	1.405	287.53	0.820
C-12.7-0.36	500	500	500	12.91	-	-	-	-	0.36	-	-	1.472	297.14	0.809
STY-1	500	500	250	3.13	18.50	3.13	-	-	-	0.44	2.021	3.243	339.38	0.305
STY-2	500	500	250	3.13	20.45	3.13	-	-	-	0.56	1.785	3.243	339.38	0.337
STY-3	500	500	250	3.13	22.40	3.13	-	-	-	0.38	1.592	3.243	339.38	0.336
STY-4	500	500	250	3.13	23.50	3.13	-	-	-	0.31	1.498	3.243	339.38	0.370
STY-5	500	500	250	3.13	25.0	3.13	-	-	-	0.63	1.383	3.243	339.38	0.382
STY-6	500	500	250	3.13	27.80	3.13	-	-	-	0.13	1.206	3.243	339.38	0.446
STY-7	500	500	250	3.13	38.34	3.13	-	-	-	0.94	0.792	3.243	339.38	0.449

(4) Yao의 실험

Yao[7]도 판 및 보강판의 압축최종강도 실험을 수행하였으며, Table 4에 그 결과를 나타내고 있다. 보강되지 않은 판 시험체는  $500 \times 500 \text{ mm}$ 의 정사각형 판이다. 판두께는  $4.5 \text{ mm}$ ,  $9 \text{ mm}$  및  $12.7 \text{ mm}$ 의 3종류이다. 이들 시험체 중에서 일부는 초기처짐만을, 나머지는 초기처짐과 잔류응력이 모두 존재하도록 인위적으로 초기결함을 생성시켰다. 판의 초기처짐은 프레스로 눌러 생성시켰으며, 잔류응력은 판의 주변에 사전에 설정된 용접조건하에서 용접비드를 두어 생성시켰다. 실측한 초기처짐량은  $4.5 \text{ mm}$  판의 경우 판두께의  $0.0\% \sim 174\%$ 에 이르렀으며,  $12.7 \text{ mm}$  시험판의 경우는 판두께의  $0\% \sim 53\%$  정도였다. 또한, 판의 중앙부 압축잔류응력의 실측치는 재료항복응력의  $33\%$  정도였다.

보강판의 시험체는 flat bar형의 보강재가 한개 붙어 있으며, 판두께는 모두  $3.13 \text{ mm}$ 이다. 초기처짐량은 판두께의  $5\% \sim 15\%$  범위에 있었다.

하면서 단순지지 조건이 되도록 하기 위하여 하중면에는 플랜지를 부착하였고, 비하중면에는 강체 지그를 설치하였다. 시험체에는 1개의 flat bar형 편면 보강재가 붙어 있는데, 보강재에도 작용하중이 걸리도록 하중면의 상하플랜지에 보강재의 단부를 용접하였다.

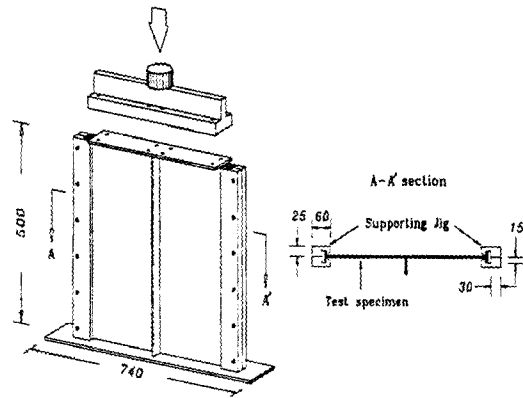


Fig.2 Schematic view of test setup(in mm)

3. 압축 최종강도 실험 및 결과

앞절에서 조사한바와 같이 지금까지 수행된 압축최종강도 실험은 아주 유용한 결과를 주고 있는 것을 확인할 수 있다. 그러나, 보다 유용한 압축최종강도의 실험식을 도출하기 위하여는 넓은 범위에 걸친 판재 및 보강재의 치수비를 가진 시험체에 대한 붕괴실험 결과가 필요하다. 이 같은 측면에서 본 연구에서는 추가적으로 판재 및 보강재의 치수를 변화시켜가면서 보강판에 대한 압축 붕괴 시리즈실험을 수행하였다.

3.1 실험방법 및 시험체

Fig. 2는 본 연구에서 수행한 실험의 개략도를 나타내고 있다. 실험은 부산대학교 조선해양공학과 구조실험실에 있는 100톤 만능시험기를 이용하여 수행하였다. Fig. 3에는 시험체와 지그의 형상을 나타내고 있다. 시험체는 주변이 직선을 유지

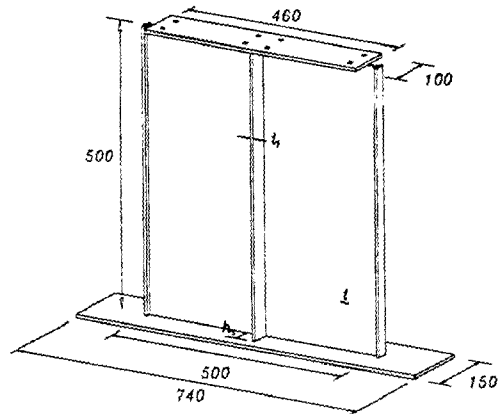


Fig.3 Details of test specimen(in mm)

Table 5에는 시험체의 치수와 실험결과를 나타내고 있다. 4종류의 보강재 세장비와 3종류의 판두께를 가진 합계 12개의 시험체에 대한 압축최종강도 실험을 수행하였다. 본 시험체의 판재와 보강재의 재료는 동일하며, 각 시험체별로 2개씩의 시험편을 채취하여 재료인장 시험을 수행하였고, Table 5에 나타난 재료특성치들은 이들의 평균치를 취한 것이다.

보강재는 필렛 가스용접에 의해 판에 부착시켰으며, 실험지그에 설치한 뒤에 모든 시험체의 초기처짐분포와 그 크기를 측정하였다. Fig. 4에 측정된 대표적인 시험체의 초기처짐 분포를 나타내고 있다. 최대 초기처짐량은 판두께의 11% ~ 53% 정도의 범위에 있었다. 용접에 의해 시험편을 제작하였으므로 용접잔류응력도 다소 존재하고 있으리라 예상되며, 용접잔류응력을 제거하기 위한 열처리는 수행하지 않았다.

하중은 1 mm/min. 정도의 속도를 유지하면서 준정적으로 가하였으며, 실험중에 변위계로 측면 위량과 판내부의 9점에서 처짐량을 측정하였다.

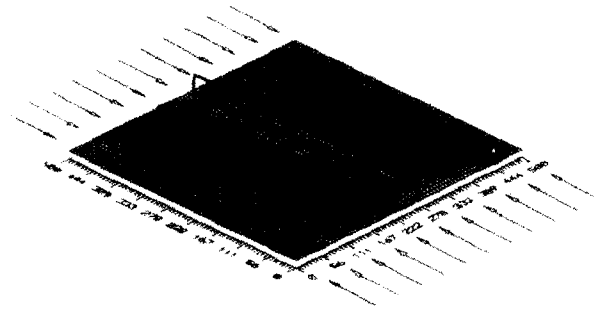


Fig.4 Distribution of a typical initial deflection

3.2 실험결과

Table 5에는 각 시험체별로 실험에 의해 얻어진 압축 최종강도치를 나타내고 있다. 시험체 SP3-3과 SP4-2의 2개는 실험중에 보강재의 단부와 시험체 상부플랜지의 용접부에서 균열이 발생하였으며, 그 결과 압축 최종강도치는 극히 작은 값을 주고 있다. 따라서, 후술하는 바와 같이 실험식의 도출시에 이들 2개의 실험결과는 제외시켰다.

Table 5 Test results of ultimate compressive strength for unstiffened and stiffened plates obtained by the present experiment

Specimen No.	a (mm)	b (mm)	b' (mm)	t (mm)	h <sub>s</sub> (mm)	t <sub>1</sub> (mm)	b <sub>s</sub> (mm)	t <sub>2</sub> (mm)	w <sub>02</sub> /t	w <sub>02</sub> /a (× 10 <sup>-3</sup> )	λ	β	σ <sub>y</sub> (MPa)	σ <sub>w</sub> /σ <sub>y</sub>	Failure Mode
SP3-1	500	500	250	3.5	17.5	3.5	-	-	0.47	3.12	2.014	2.766	300.47	0.399	O-O <sup>1)</sup>
SP3-2	500	500	250	3.5	19.5	3.5	-	-	0.44	2.94	1.771	2.766	300.47	0.447	O-O
SP3-3	500	500	250	3.5	22.5	3.5	-	-	0.20	0.96	1.485	2.766	300.47	0.323	F <sup>3)</sup>
SP3-4	500	500	250	3.5	37.0	3.5	-	-	0.53	1.49	0.785	2.766	300.47	0.522	L-O <sup>2)</sup>
SP4-1	500	500	250	4.3	15.0	4.3	-	-	0.19	0.68	1.997	1.996	227.56	0.442	O-O
SP4-2	500	500	250	4.3	17.0	4.3	-	-	0.20	1.42	1.751	1.996	227.56	0.337	F <sup>3)</sup>
SP4-3	500	500	250	4.3	19.5	4.3	-	-	0.24	1.64	1.503	1.996	227.56	0.497	L-O
SP4-4	500	500	250	4.3	33.0	4.3	-	-	0.32	1.70	0.791	1.996	227.56	0.593	L-O
SP6-1	500	500	250	5.8	14.0	5.8	-	-	0.11	0.98	2.049	1.613	277.73	0.498	O-O
SP6-2	500	500	250	5.8	16.5	5.8	-	-	0.29	3.04	1.775	1.613	277.73	0.498	O-O
SP6-3	500	500	250	5.8	19.5	5.8	-	-	0.33	1.96	1.506	1.613	277.73	0.533	L-O
SP6-4	500	500	250	5.8	34.0	5.8	-	-	0.13	1.44	0.798	1.613	277.73	0.646	L-O

Note:

- 1) O-O: Overall collapse mode following overall buckling
- 2) L-O: Overall collapse mode following local buckling
- 3) F: Fracture occurred at the juncture of the stiffener end and the upper flange of the test specimen



Table 5의 파손모드 판에는 최종강도에 도달하기까지의 모드를 나타내고 있다. 여기서 전체모드(overall mode)는 판재와 보강재가 함께 치진 경우를 나타내고, 국부모드(local mode)는 판재만이 국부적으로 치진 경우를 나타내며, 좌굴모드-붕괴모드의 순으로 표현하였다. 예컨대 O-O는 전체적으로 좌굴한 후에 전체적으로 붕괴한 경우를 의미하며, L-O는 국부적으로 좌굴한 후에 전체적으로 붕괴한 경우를 나타낸다. 시험체의 전체적인 치짐은 시험체 SP4-4를 제외하고는 모두 보강재 쪽으로 일어났다.

4. 실험식의 도출

기존의 실험결과와 본 연구에서 수행한 실험결과를 바탕으로 보강되지 않은 판뿐만 아니라 종보강재를 가진 보강판의 압축최종강도를 추정하기 위한 실험식을 도출한다.

Chapman등[8]은 실험결과를 바탕으로 하여 보강되지 않은 판의 압축최종강도 실험식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\sigma_u/\sigma_Y = \begin{cases} 1.0 & \dots\dots\dots \text{for } \beta < 1.0 \\ 0.23 + \frac{1.16}{\beta} - \frac{0.48}{\beta^2} + \frac{0.09}{\beta^3} \dots & \text{for } \beta \geq 1.0 \end{cases} \quad (1)$$

그러나, 판구조물의 최종강도 평가시에 한개의 식으로 보강되지 않은 판 뿐만 아니라 보강재를 가진 판의 압축최종강도를 평가할 수 있다면 훨씬 편리할 것이다. 이같은 측면에서 Lin[2]은 판 또는 보강판의 압축최종강도식을 판재와 보강재의 치수 파라미터  $\beta$ 와  $\lambda$ 의 함수로서 다음과 같이 나타내었다. 즉,

$$\sigma_u/\sigma_Y = [c_1 + c_2\lambda^2 + c_3\beta^2 + c_4\lambda^2\beta^2 + c_5\lambda^4]^{-0.5} \quad (2)$$

여기서,  $c_1 \sim c_5$ 는 실험상수이며, 윗 식을 비보강판에 적용하고자 하는 경우에는  $\lambda$ 를 포함하는 항을 소거시킨다. 즉,  $\lambda = 0$ 를 대입한다. 또한,  $\beta$ 는 종보강재판의 판재에 대하여 계산하며,

$\lambda$ 는 판재가 100% 유효하다고 가정하여 한 개의 보강재와 종보강재간의 판재에 대하여 계산한다는 점에 주의를 요한다.

Lin[2]은 실험 및 수치해석 결과를 바탕으로 윗 식의 상수를 다음과 같이 결정하였다. 즉,

$$c_1 = 0.960, c_2 = 0.765, c_3 = 0.176, \\ c_4 = 0.131, c_5 = 1.046 \quad (3)$$

또한, Lee[9]는 횡압력의 영향을 고려하여 Faulkner[3]의 실험결과등을 바탕으로 보강판의 압축최종강도 계산을 위한 경험식을  $\beta$ 와  $\lambda$ 의 함수로서 제안하였는데, 본 연구에서 대상으로 하고 있는 압축하중이 단독으로 작용하는 경우의 식은 다음과 같이 된다. 즉,

$$\sigma_u/\sigma_Y = \frac{1}{f} [1 + 0.15\beta^2]^{-0.5} \quad (4)$$

여기서,

$$f = \begin{cases} 1 + 0.209\lambda^2 + 0.156\lambda^4 \dots & \text{for } 0 \leq \lambda < 1.59 \\ \lambda^2 & \dots\dots\dots \text{for } \lambda \geq 1.59 \end{cases}$$

전술한 바와 같이 식(3)을 사용하여 식(2)로부터 보강판의 압축 최종강도를 계산할 때 비교적 큰 보강재를 가진 보강판의 경우는 비교적 높은 정도의 결과를 주지만 작은 치수의 보강재를 가진 보강판의 경우에는 압축 최종강도를 과소평가하는 경향이 있다.

이같은 측면에서, 본 연구에서는 기존의 실험결

과와 본 연구에서 직접 수행한 실험결과를 바탕으로 최소자승법을 적용하여 식(2)의 실험상수를 새로 결정하였으며, 그 결과는 다음과 같다. 즉,

$$c_1 = 0.995, c_2 = 0.936, c_3 = 0.170,$$

$$c_4 = 0.188, c_5 = -0.067 \quad (5)$$

본 실험식의 정도를 확인하기 위하여 실험결과와 실험식에 의한 추정결과를 비교하면 Fig. 5에서 11과 같이 된다. 여기서는 보강되지 않은 판에 대한 Chapman등[8]의 식과 판 및 보강판에 대한 Lin[2]의 식 및 Lee[9]의 식에 의해 추정된 결과도 비교하고 있다.

먼저, Fig. 5는 보강되지 않은 판에 대한 기존의 압축 최종강도 실험결과와 Chapman등의 식, Lin 식, Lee 식 및 본 연구에서의 도출식에 의한 추정결과를 비교하고 있다. Yao의 실험의 경우 시험체의 일부는 초기처짐이 거의 없거나 반대로 과도하게 존재하고 있으며, 그 결과 압축최종강도치도 아주 크거나 또는 작은 결과를 주고 있다. 또한, Niho의 시험체의 경우, 비교적 큰 잔류응력이 존재하고 있으며, 그 결과 압축최종강도치도 낮은 값을 주고 있다. Smith등[10]의 조사에 의하면 선체 판부재에 존재하는 평균적인 최대 초기 처짐량은  $w_o/t = 0.1\beta^2$  정도이고, 압축 잔류응력치는 재료 항복응력의 약 15% 정도임이 알려져 있다. 따라서, Chapman등의 식, Lin 식, Lee 식과 본 제안식은 모두 전반적으로 평균적인 수준의 초기결함을 가진 판의 최종강도치를 주고 있다고 판단된다.

Fig. 6은 Horne등[4,5]에 의해 수행된 보강판의 압축최종강도 실험결과와 Lin 식, Lee 식 및 본 제안식에 의한 추정결과를 비교하고 있다.  $\lambda$ 의 값이 작을 때, 즉 보강재의 치수가 상대적으로 클 때 Lin 식은 실험결과와 비교하여 다소간의 안전측에서 양호한 결과를 주고 있으나, 보강재의 치수가 상대적으로 작고  $\lambda$ 의 값이 큰 경우는 최종강도를 전반적으로 낮게 평가하고 있다.

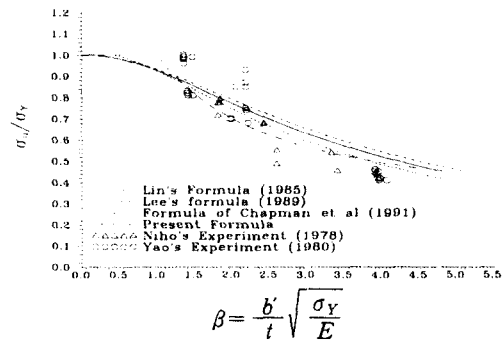


Fig.5 Comparison of ultimate strengths obtained by experiments and empirical formulas for unstiffened plates

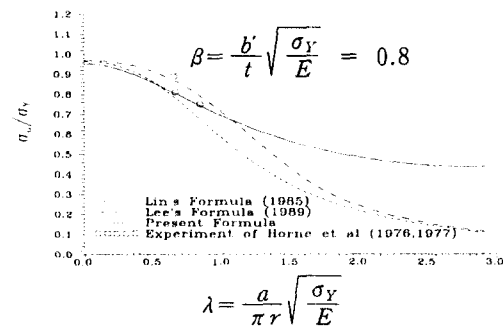


Fig.6.a Comparison of ultimate strengths obtained by empirical formulas and experiment of Horne et al for stiffened plates with  $\beta = 0.8$

또한, Lee 식은 보강재의 치수가 클 때는 최종강도를 과대평가하고 있으며, 보강재의 치수가 작을 때에는 과소평가하는 경향이 있다. 이에 비해 본 제안식은  $\lambda$ 의 넓은 범위에 걸쳐 양호한 결과를 주고 있다

또한, Fig. 7, 8 및 9는 각각 보강판에 대한 Faulkner, Yao 및 저자들의 실험결과와 실험식을 비교하고 있는데, 여기서도 유사한 경향을 보여주고 있다. 특히, 기본적으로 Faulkner[3]의 실험결과를 바탕으로 도출된 Lee 식은 Faulkner의 실험결과와는 잘 일치하고 있으나, 다른 실험결과와는 차이를 보이고 있다.

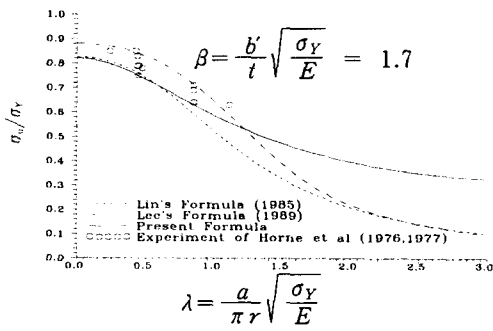


Fig.6.b Comparison of ultimate strengths obtained by empirical formulas and experiment of Horne et al for stiffened plates with  $\beta = 1.7$

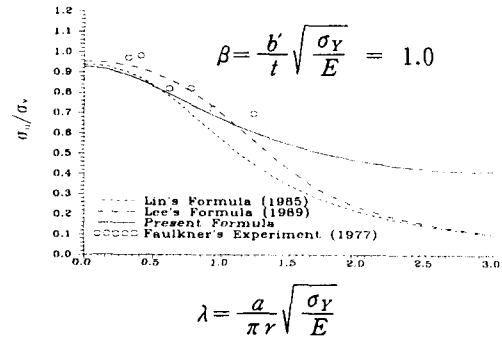


Fig.7.a Comparison of ultimate strengths obtained by empirical formulas and Faulkner's experiment for stiffened plates with  $\beta = 1.0$

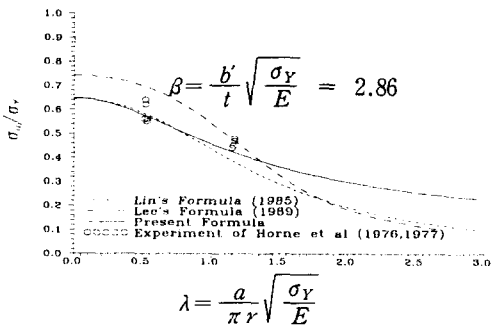


Fig.6.c Comparison of ultimate strengths obtained by empirical formulas and experiment of Horne et al for stiffened plates with  $\beta = 2.86$

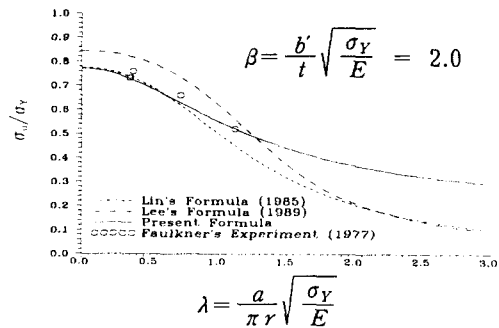


Fig.7.b Comparison of ultimate strengths obtained by empirical formulas and Faulkner's experiment for stiffened plates with  $\beta = 3.0$

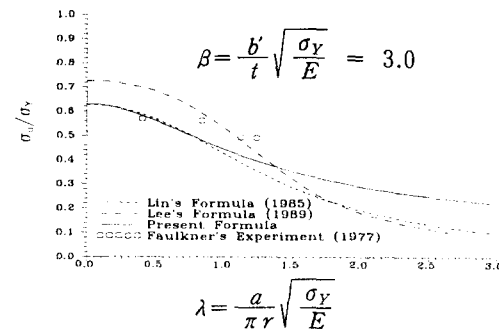


Fig.7.c Comparison of ultimate strengths obtained by empirical formulas and Faulkner's experiment for stiffened plates with  $\beta = 3.0$

Table 6은 모든 판 및 보강판에 대한 붕괴강도 실험결과간의 오차를 나타내고 있으며, Fig. 10, 및 11은 각각 모든 실험결과와 Lin 식 및 본 제안식에 의한 추정결과를 비교하고 있다.

이 결과로 부터 알 수 있는 바와 같이 본 연구에서 도출한 실험식은 판재 및 보강재 강성비의 넓은 범위에 걸쳐 압축최종강도를 높은 정도로서 추정할 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

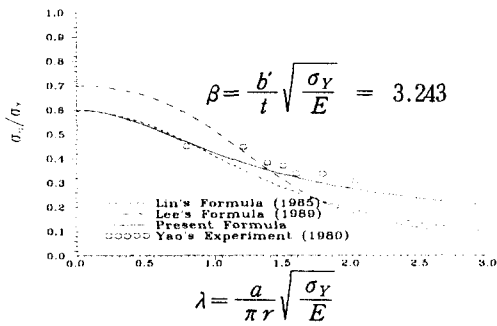


Fig.8. Comparison of ultimate strengths obtained by empirical formulas and Yao's experiment for stiffened plates with  $\beta = 3.243$ .

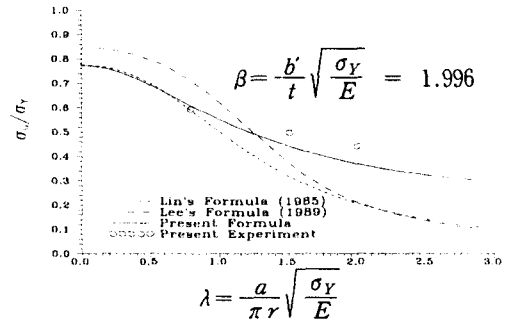


Fig.9.b Comparison of ultimate strengths obtained by empirical formulas and present experiment for stiffened plates with  $\beta = 1.996$

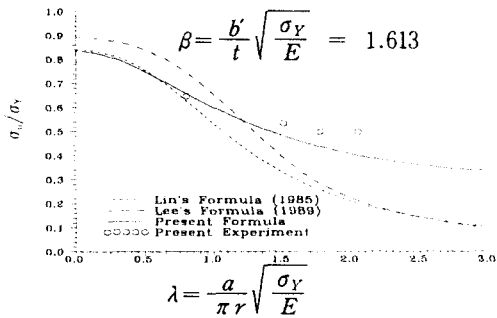


Fig.9.a Comparison of ultimate strengths obtained by empirical formulas and present experiment for stiffened plates with  $\beta = 1.613$

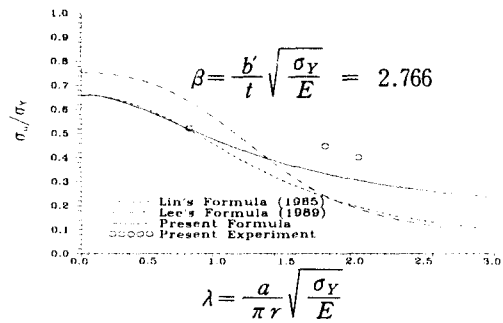


Fig.9.c Comparison of ultimate strengths obtained by empirical formulas and present experiment for stiffened plates with  $\beta = 2.766$

Table 6 Summary of comparison results between experiments and empirical formulas

Exp. Formula	Horne et al		Faulkner		Niho		Yao		Present	
	bias	cov	bias	cov	bias	cov	Fig.9.c bias	cov	bias	cov
Lin	0.913	0.086	0.907	0.111	0.795	0.234	0.776	0.167	0.661	0.336
Lee	1.004	0.071	0.929	0.096	0.888	0.247	0.772	0.257	0.702	0.401
Present	0.951	0.060	0.919	0.094	0.947	0.119	0.920	0.062	0.884	0.109

Note:

- 1) bias = mean value of  $(\sigma_u)_{estimated} / (\sigma_u)_{experiment}$
- 2) cov = coefficient of variation of the bias

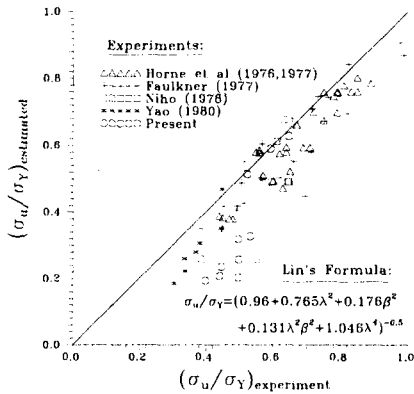


Fig.10 Comparison of ultimate strengths obtained by experiments and Lin's empirical formula

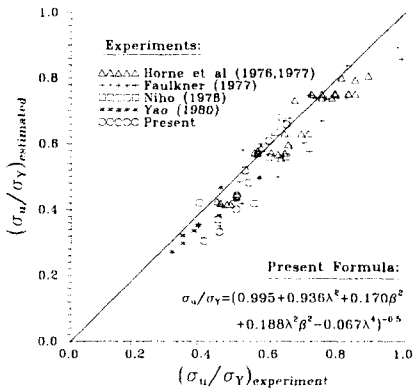


Fig.11 Comparison of ultimate strengths obtained by experiments and present empirical formula

5. 결 언

본 연구에서는 판 및 보강판의 압축 최종강도를 부재치수가 비교적 넓은 범위에 걸쳐 높은 정도로 간단하게 추정할 수 있는 실험식을 도출하였다. 본 연구를 통하여 다음의 결론을 얻었다.

1) 선체 판부재의 압축최종강도를 효율적으로 평가하기 위하여는 명시적인 형태로 표현되는 한

개의 식으로 보장되지 않은 판 뿐만 아니라 보강판도 다룰 수 있도록 하는 것이 바람직 하며, 이 같은 측면에서 Lin이 도출한 식은 선체 판부재의 압축최종강도를 효율적으로 계산할 수 있는 유용한 식으로서 평가 받고 있다.

2) Lin이 도출한 바 있는 판 및 보강판의 압축 최종강도 실험식은 보강재의 치수가 비교적 큰 경우에는 높은 정도를 주지만 보강재의 치수가 작은 경우에는 최종강도를 과소평가하는 경향이 있다.

3) 본 연구에서 도출한 실험식은 판재 및 보강재 강성비의 넓은 범위에서 높은 정도로서 판 및 보강판의 압축최종강도를 추정할 수 있다.

4) 본 실험식은 선체 판부재의 압축최종강도 추정시 뿐만 아니라 최종강도를 기준으로 한 구조신뢰성 평가시에 파손함수로서 적용할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Moan, T. et al, Report of ISSC'94 Committee V.1 on "Applied design-strength limit states formulations", Proc. of the 12th International Ship and Offshore Structures Congress, Vol. 2, St. John's, Canada, Sept. 1994, pp. 1-58.
- [2] Lin, Y. T., "Ship longitudinal strength modelling", PhD. Thesis, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Glasgow, UK, March 1985.
- [3] Faulkner, D., "Compression tests on welded eccentrically stiffened plate panels", Steel Plated Structures, P.J. Dowling et al (Eds.), Crosby Lockwood Staples, London, UK, 1977, pp.581-617.
- [4] Home, M.R. and Narayanan, R., "Ultimate capacity of stiffened plates used in girders", Proc. Inst. of Civil Engrs., Vol. 61, Part 2, 1976, pp.253-280.
- [5] Home, M.R., Montague, P. and Narayanan, R., "Influence on strength of compression panels of stiffener section, spacing and welded connection", Proc. Inst. of Civil Engrs., Vol. 63, Part 2, 1977, pp.1-20.
- [6] Niho, O., "Ultimate strength of plated struct-

- ures", PhD. Thesis, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Tokyo, Japan, Dec. 1978 (in Japanese).
- [7] Yao, T., "Ultimate compressive strength of ship platings", PhD. Thesis, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Osaka University, Japan, May 1980 (in Japanese).
- [8] Chapman, J.C., Smith, C.S., Davidson, P.C. and Dowling, P.J., "Recent developments in the design of stiffened plate structures", Proc. of Int. Conf. on Advances in Marine Structures-2, Edited by C.S.Smith and R.S. Dow, ARE, Dunfermline, UK, May 1991, pp. 529-548.
- [9] Lee, J.S., "Reliability analysis of continuous structural systems", PhD. Thesis, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Glasgow, UK, 1989.
- [10] Smith, C.S., Davidson, P.C., Chapman, J.C., and Dowling, P.J., "Strength and stiffness of ship's plating under in-plane compression and tension", Trans. RINA, Vol. 130, 1987, pp.277-296.