

초기결함을 갖는 平板의 壓縮最終強度 解析에 관한 연구

李 柱 成

造船 및 海洋工學科

(1985. 9. 30. 접수)

〈요 약〉

甲板을 구성하는 板部材는 船舶의 縱強度에 중요한 역할을 하므로, 最適設計를 위해서는 이들 板部材의 壓縮最終強度를 결정해야 한다.

本 論文에서는 準解析的 方法을 이용하여 실제 판의 彈塑性 大變形 거동을 살펴서 그에 증가되는 판의 해석결과로부터 壓縮最終強度를 추정할 수 있는 公式을 제안하였다.

On the Study of the Compressive Ultimate Strength of Plates with Initial Imperfections

Lee, Joo-Sung

Dept. of Naval Architecture, Shipbuilding and Ocean Engineering

(Received September 30, 1985)

〈Abstract〉

Since plate members of deck play an important role in longitudinal strength of ship, it is necessary to determine their compressive ultimate strength for optimal design.

In this paper, using the semi-analytical method, elasto-plastic large deformation behavior of real plates and those of equivalent plates to them are considered and from those results, design formula for prediction of ultimate strength is suggested.

I. 緒 言

船舶의 甲板은 縱強度에 기여하는 중요한 부재이며, 이는 중횡방향으로 늘린 많은 補剛材에 의해 보강되어 있고, 갑판의 중강도를 생각할 때, 보강재들로 나뉘어진 板部材가 갑판의 引張과 壓縮強度에 대단히 중요한 역할을 한다.

최근 경제성을 위해 高張力剛의 사용이 널리 확대됨에 따라 판의 두께가 얇아지고, 따라서 판부재는 引張 보다는 壓縮에 의해 파괴되기가 쉽기 때문에 壓縮荷重 下의 판부재의 강도가 중요한 의미를 갖게 된다. 문헌(7,8,9)에서 언급하고 있는 바와 같이 이 판부재들은 선박의 전조과결과 운항을 거듭하면서 初期缺陷을 필연적으로 갖기 때문에, 갑판

의 판부재의 最適設計를 위해서는 초기결함을 고려한 압축강도의 추정이 요구되며, 이를 위해서는 비선형 구조해석, 즉 彈塑性 大變形 解析을 수행해야 한다.

本 論文에서는 문헌(7)에서 해석방법의 정당성과 계산상의 경제성이 입증된 準解析的 方法을 이용하여 초기결함으로써 초기처짐을 갖는 평판의 탄소성 대변형 해석을 통하여, 실제 판부재의 최적설계를 위한 압축최종강도의 추정과 계산결과들로부터 압축최종강도의 公式을 제안하였다.

II. 板의 彈塑性 大變形 舉動

압축 판의 해석모델로서는 길이가 긴 평판이 압축하중 하에 있고(Fig 2,3 참고) 면외변형의 경제조

건은 4변이 단순지지 되어 있으며, 면내변형에 대한 경계조건은 하중을 받는 변은 하중방향(x 방향)으로 단일변위를 갖고 하중을 받지 않는 변은 변형중 직선을 유지한다. 또한 최종상태는 하중을 받지 않는 변에서 x방향의 변형응력, σ_x 가 항복응력이 되는 상태로 하였다. 應力은 수치적분 시의 Gauss 점들에서 계산하였고, 판의 두께방향으로 塑性이 진행되는 것을 고려해 주기 위해 4층으로 나누어서 층요소 접근법을 도입하였다. Fig. 1은 판의 두께 방향으로 층으로 나눈 모습과 소성의 진행을 나타내는 표기법을 보이고 있다.

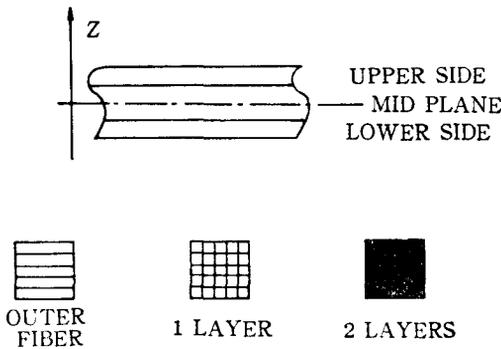


Fig. 1. Layered plate and notation of plastic zone through thickness.

감판의 판부재는 긴 평판이고 초기치짐은 x, y 방향으로 일의의 형태를 갖지만, 다음과 같이 조합화수의 선형조합으로 표현할 수 있다.

$$w_0(x, y) = \sum_m \sum_n W_{0mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (1)$$

여기에서 W_{0mn} 은 초기치짐계수(initial deflection parameter)이다. 그런데 폭장비(aspect ratio; a/b)가 비교적 큰 평판에서는 초기치짐이 y 방향으로 대체로 1반파의 형태를 갖는다. 따라서 초기치짐을

$$w_0(x, y) = \left(\sum_m W_{0m} \sin \frac{m\pi x}{a} \right) \sin \frac{\pi y}{b} \quad (2)$$

로 표현한다.

실제 선박의 초기치짐에 대한 자료로서, Pure Car Carrier와 Bulk Carrier(이후 P. C. C와 B. C.로 표기함)의 갑판 판부재의 中心線에서 측정한 초기치짐을 식(2)로 근사하고, 最小自乘法을 이용 계수 W_{0m} 을 구한 결과를 정리하면 表 1과 같다.⁽⁹⁾ 또한 치짐변위 $w(x, y)$ 는 초기치짐과 같은 형태의 식으로서 다음과 같이 표현한다.

$$w(x, y) = \left(\sum_m W_m \sin \frac{m\pi x}{a} \right) \sin \frac{\pi y}{b} \quad (3)$$

여기에서는 우선 실선에서 측정한 초기치짐계수를 갖는 실제 평판에 대한 彈塑性 大變形 解析을 수행한 細長比 (slenderness ratio: $\eta = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}$)가 각각 3.560, 1.948인 P. C. C. 11과 B. C. 1의 결과를 Fig. 2와 3에 나타내었다. 이들은 각각 하중비(평균압축응력/항복응력: σ_{av}/σ_y)와 치짐계수비(치짐계수/두께: W_m/t) (Fig. 2(a), Fig. 3(a)), 초기항복, 최종상태 및 그 중간상태에서의 소성이 진행된 상태 (Fig. 2(b), Fig. 3(b)), 그리고 11

Table. 1. Initial deflection coefficient.

[Pure Car Carrier]

No.	$a \times b \times t$	W_{01}	W_{02}	W_{03}	W_{04}	W_{05}	W_{06}	W_{07}	W_{08}	W_{09}	W_{10}	$W_{0,11}$
1	3440×780×11	-0.5949E 01	-0.2229E 00	-0.1939E 01	-0.6987E -01	-0.5975E 00	-0.1481E 00	-0.4548E 00	0.3133E -01	0.3026E -01	0.2184E -01	0.8135E -02
2	3440×780×11	-0.5811E 01	0.7350E 00	-0.1948E 01	-0.7193E -01	-0.7926E 00	0.7489E -01	-0.5474E 00	0.1158E 00	-0.2970E -01	0.1276E -01	-0.3043E -01
3	3440×780×11	-0.4643E 01	0.7018E 00	-0.1456E 01	-0.1474E 00	-0.1055E 01	-0.7347E -01	-0.3623E 00	0.1160E 00	0.1278E 00	0.5657E -01	0.8307E -01
4	3440×780×11	-0.3425E 01	-0.1500E 01	-0.2965E 01	0.5245E 00	-0.9859E 00	-0.3769E 00	-0.3316E 00	0.1237E 00	-0.1249E 00	-0.2595E -01	0.5109E -02
5	3440×780×11	0.5125E 01	0.5857E 00	-0.1832E 01	0.3175E 00	-0.9451E 00	0.1073E 00	0.6287E 00	-0.1273E -01	-0.8170E -01	-0.6380E -01	-0.5689E -01
6	3440×780×11	-0.5647E 01	0.1325E 00	-0.2167E 01	0.1465E 00	-0.1201E 01	0.2085E 00	-0.2698E 00	0.1137E 00	-0.5883E -02	0.5074E -01	-0.3123E -02
7	3440×780×11	-0.2635E 01	0.1455E 01	-0.8709E 00	0.3279E 00	0.3494E 00	0.1940E 00	0.1542E 00	0.2722E -01	0.1143E 00	0.7385E -01	0.1084E 00
8	3440×780×8	0.6047E 00	-0.5076E 00	0.3720E -01	-0.3086E 00	-0.3458E 00	0.8124E -01	0.5821E -01	-0.5768E -01	-0.1068E 00	0.2037E -02	0.1438E -01
9	3440×780×8	0.2692E 00	-0.1981E 00	-0.1105E 01	0.6213E 00	0.1437E 00	-0.3490E 00	-0.8496E -01	0.2872E -01	-0.6556E -01	0.5908E -02	-0.8046E -01
10	3440×780×8	-0.1417E 00	0.7201E 00	0.4821E 00	0.1239E -01	0.2807E 00	0.7285E -01	0.1584E 00	0.8815E -01	0.1202E 00	0.5991E -02	-0.1383E -01
11	3440×780×8	-0.4969E 00	-0.3383E 00	0.3391E 00	-0.1538E 00	0.1997E 00	-0.2517E 00	0.1544E 00	-0.3240E -01	0.3142E -01	-0.1195E 00	0.1659E -01
12	3440×780×8	0.4604E 00	0.1023E 01	-0.9813E 00	0.2991E 00	-0.8622E 00	0.9981E -01	-0.1564E 00	0.9668E -01	0.3196E -01	0.2331E -01	0.7578E -01

[Bulk Carrier]

2800×800×15	-0.2668E 01	0.2861E 00	-0.6864E 00	0.9671E -01	-0.5336E 00	-0.7607E -02	-0.2338E 00	0.5835E -01	-0.1050E 00	0.4440E -01	-0.7302E -01
2800×800×15	-0.4535E 01	-0.1825E 00	-0.1419E 01	0.3868E 00	-0.6556E 00	0.1380E 00	-0.3410E 00	0.4289E -01	-0.1547E 00	0.9191E -01	-0.1334E 00
2800×800×15	-0.3955E 01	-0.2182E 00	-0.1204E 01	-0.9499E -01	-0.6582E 00	-0.2477E -01	0.2278E -01	-0.8027E -01	0.1374E 00	0.1630E -01	0.1527E -01

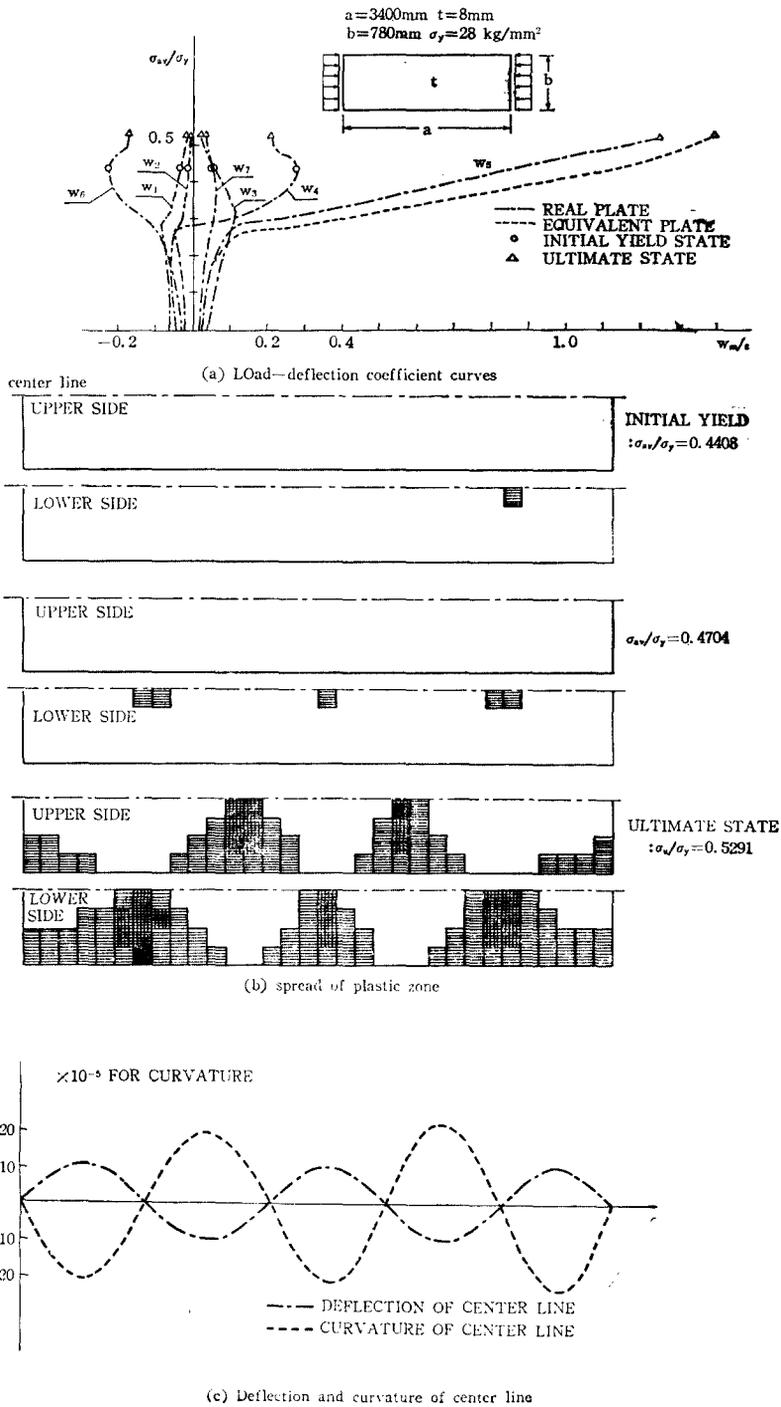


Fig.2 Elasto-plastic large deformation behavior of thin plate. ($\eta=3.560$)

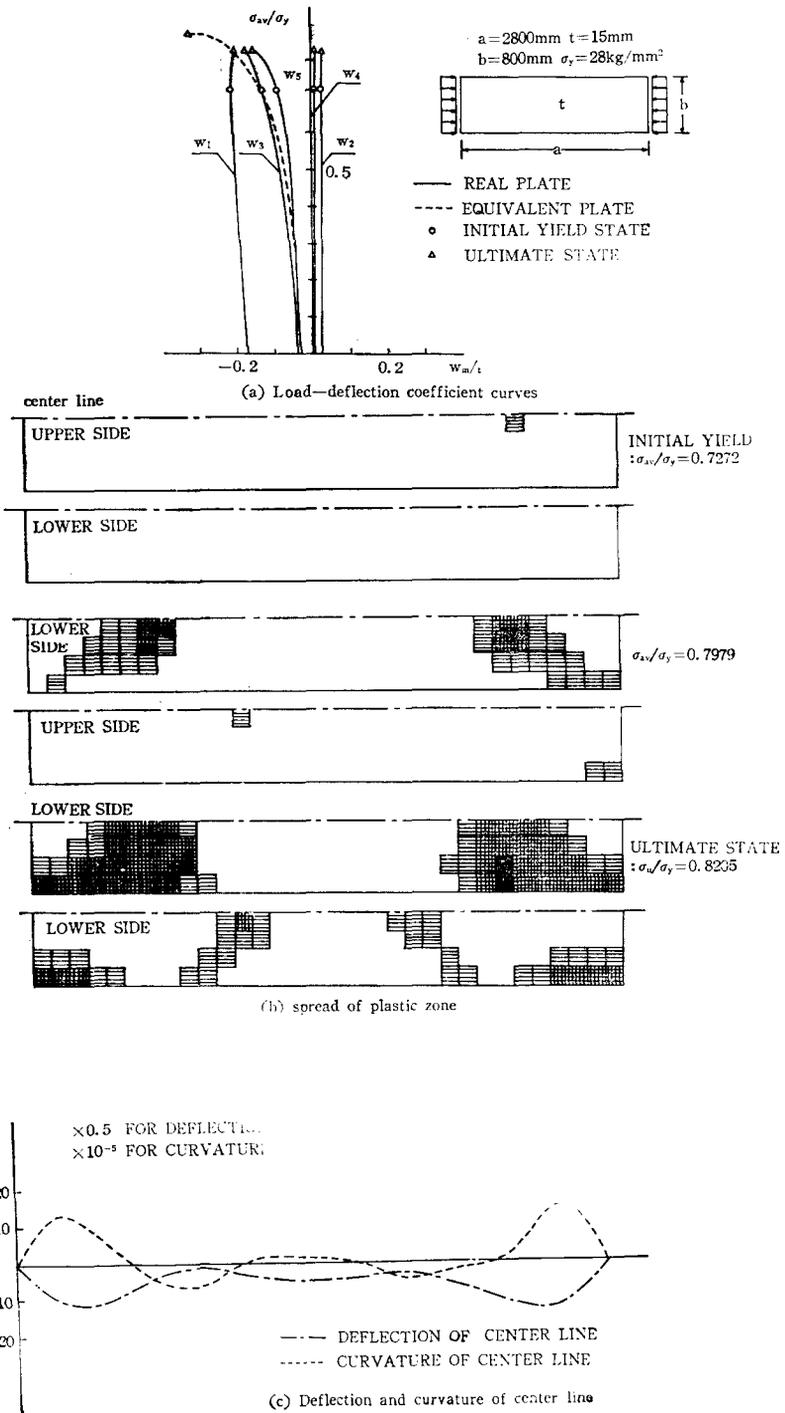


Fig. 3 Elasto-plastic large deformation behavior of thick plate. ($\gamma=1.948$)

중상대에서 中心線의 처짐과 곡률(Fig. 2(c), Fig. 3(b))을 나타낸다. 각 경우 $m=5$ 때 즉 제 5과형 성분이 지배적이고 최종상태에 이르는 안정적 변형형상임을 알 수 있다. Fig. 2(b)와 Fig. 3(b)를 비교해 보면 최종상태에 이르는 변형의 양상에 차이를 발견할 수 있는데, 비교적 얇은 판인 Fig. 2(b)에서는 최종상태에서 처짐변위는 크지만 소성영역은 그리 길게 퍼져 있지 않다. 그리고 Fig. 3(b)에서는 최종상태에서 처짐변위는 그리 크지 않지만, 소성영역이 국부적으로 판의 두께 방향으로 길게 퍼져있다. 이로 보아, 얇은 판에서는 최종상태에 이르는 양상이 처짐변위가 증가함에 따라 中立面에서 面内剛性의 감소에 기인하는 즉, 大變形의 효과에 기인하고, 두꺼운 판의 경우엔 대변형의 효과에 의하기 보다는 굴뚝變形에 의한 局部的인 塑性에 기인함을 알 수 있다. 이는 Fig. 3(b)와 (c)를 보면 塑性의 대부분이 곡률이 큰 구역에 밀집되어 있다는 사실로 설명된다.

이렇듯 최종상태에 이르는 변형양상에는 차이를 보이지만 Fig. 2(c)와 Fig. 3(c)에서 보는 바와 같이 두 경우 모두 $m=5$ 가 안정적 변형형상임을 보이고 있다. 이들의 폭장비는 각각 4.41(P. C. C. 11), 3.5(B. C. 1)로써 좌굴형상은 두 경우 모두 $m=4$ 때인데 이로보아 좌굴형상과 최종상태에 이르는 안정적 형상 사이에는 차이를 보인다. 좌굴해석에 의하던 폭장비가 클때의 좌굴하중이 폭장비가 1.0 또는 이에 가까울 때의 좌굴하중과 거의 같다.⁽⁴⁾는 점을 고려하여, 초기처짐으로서 최종상태에 이르는 좌형성분인 $m=5$ 일 때의 초기처짐계수를 갖는 1반파로 하고, 길이와 폭이 실제판의 폭과 같은 정 4 각형 평판의 거동을 살펴보았다. 즉 초기처짐과 처짐변위를

$$w_0(x, y) = W_0 \sin \frac{\pi x}{b} \sin \frac{\pi y}{b} \quad (4. a)$$

$$w(x, y) = W_1 \sin \frac{\pi x}{b} \sin \frac{\pi y}{b} \quad (4. b)$$

로 표현한다. P. C. C. 11과 B. C. 1에 대응되는 이러한 정 4 각형 평판에 대해 탄소성 대변형 해석을 수행하여, 하중비와 처짐계수비의 관계를 Fig. 2(a)와 Fig. 3(a)에 점선으로 나타내었다. 보는 바와 같이 최종상태에 이르는 처짐변위의 차이는 있지만 변형거동이 유사하고 실제판의 경우와 거의 같은 최종강도를 구할 수 있었다. 이들을 실제판에 대한 等價板(equivalent plate)이라 하면, 실제판을 해석하며 최종강도를 구하기 보다는 등가판의 해석을

통해서도 좋은 精度의 최종하중을 구할 수 있다.

III. 最終強度 公式

§ II의 결과로부터 안정적 변형형상의 초기처짐 계수를 성분으로 갖는 등가판의 최종강도를 구하는 것은 곧 실제판의 해석으로부터 최종강도를 구하는 것과 등가의 의미를 갖는다. 여기에서는 이점에 착안하여 초기처짐으로써 식(4. a)의 형태를 갖고 세장비가 다른 여러 평판에 대해 초기처짐의 크기를 변화시켜가면서 최종강도를 구하고, 그 결과를 이용 최소자승법^{(2), (3)}에 의해 다음과 같이 압축하중을 받는 평판의 최종강도를 계산하는 근사공식을 제안한다.

$$\begin{aligned} \sigma_x/\sigma_y = & \{0.7096 - 0.0690(W_0/t)\} \cdot e^{-0.0987} \\ & + \{-0.2777 - 0.2335(W_0/t) \\ & + 3.9527e^{-1.97(w_0/t)}\} \cdot e^{-1.2647} \end{aligned} \quad (6)$$

$$0.01 \leq W_0/t \leq 2.0, \quad 1.8 \leq \eta \leq 4.4$$

여기에서 η 는 세장비 $\left(\frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}\right)$ 이다.

Fig. 4와 5는 最終強度比(σ_x/σ_y)와 세장비, 最終強度比와 초기처짐비의 관계를 직접 해석에 의한 결과와 식(6)으로 계산한 결과를 비교해 놓은 것인데, 보는 바와 같이 식(6)의 결과가 직접 해석에 의한 결과와 잘 맞고 있음을 알 수 있다. 식(6)은 초기처짐비가 $0.01 \leq W_0/t \leq 2.0$ 인 평판에 대해 상당히 정확한 값을 주는 데, 건조 당시 초기처짐의 크기가 판의 두께 이하로 제한하더라도 운항을 거듭하면서 초기처짐이 증가하므로, 이 公式는 초기처짐

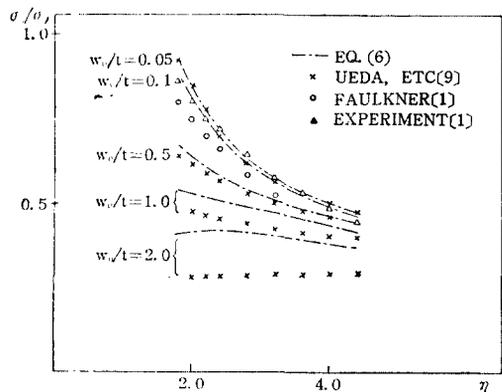


Fig. 4 Ultimate strength curves I: σ_x/σ_y vs η .

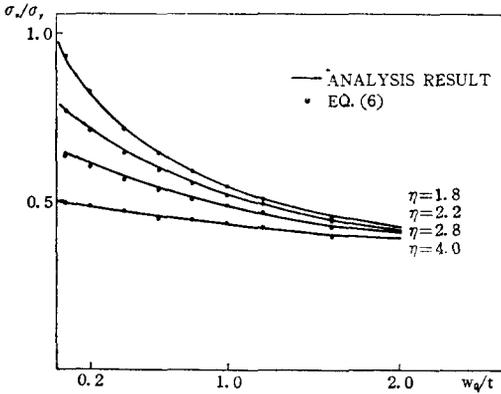


Fig. 5 Ultimate strength curves II: σ_u/σ_y , vs W_o/t .

이 작은 경우로부터 판 두께의 2배정도로 큰 경우
에까지 폭넓게 적용될 수 있다.

Fig. 4와 5를 보면 초기치짐이 최종강도에 주는
영향은 두꺼운 판에서 얇은 판에서 보다 크며, 대
체로 초기치짐이 클 때 보다 작을 때, 그 변화가
최종강도의 감소에 주는 영향이 크다. 例로써 Fig. 5
에서 W_o/t 가 0.05일 때에 비해 0.1배의 최종강도가
 $\eta=1.8, 2.2, 2.8, 4.0$ 에 대해 각각 12.9%, 7%,
4.5%, 1.7%정도 감소한다.

Ueda 등⁽⁹⁾, Faulkner⁽¹¹⁾가 다음과 같이 최종강
도의 추정공식을 제안하였는데, Fig. 6은 식(7)과
(8) 및 실험공식인 식(9)의 계산결과와 본 논문에서
제안하는 식(6)의 계산결과를 비교해 놓은 것이다.

Ueda 등의 공식⁽⁹⁾;

(a) $0.8 \leq \eta \leq 2.0$ 의 경우

$$\begin{aligned} \sigma_u/\sigma_y = & \{-2.431(W_o/t)^2 + 1.6826(W_o/t) \\ & - 0.2976\}(\eta^2 - 4.0) \\ & + \{7.2745(W_o/t)^2 - 4.7431(W_o/t) \\ & + 0.6709\}(\eta - 2.0) + z_1 \end{aligned} \quad (7.a)$$

$$\begin{aligned} z_1 = & \{0.3597(W_o/t)^2 + 0.1748(W_o/t) \\ & + 0.8598\} / \{2.2432(W_o/t) + 1.3322\} \\ & + 0.0373(W_o/t) + 0.2481 \end{aligned}$$

(b) $2.0 \leq \eta \leq 3.5$ 의 경우

$$\begin{aligned} \sigma_u/\sigma_y = & \{-0.3597(W_o/t)^2 + 0.1748(W_o/t) \\ & + 0.8598\} / \{\eta + 2.2432(W_o/t) - 0.6678\} \\ & + 0.0373(W_o/t) + 0.2481 \end{aligned} \quad (7.b)$$

Faulkner의 공식⁽¹¹⁾;

$$\sigma_u/\sigma_y = 2/\eta - 1/\eta^2 \quad (8)$$

실험공식⁽¹¹⁾;

$$\sigma_u/\sigma_y = 2.25/\eta - 1.25/\eta^2 \quad (9)$$

식(8)과 (9)는 W_o/t 의 크기에 따른 최종강도의
변화를 나타내지 못하므로 대략 W_o/t 가 0.2이하인
경우에만 적용될 수 있다. 식(7)과 본 논문에서 제
안한 식(6)의 결과를 비교해 보면 W_o/t 가 0.5이하
인 초기치짐이 작은 범위에서 좋은 일치율을 보이
지만, 0.5이상에서는 큰 차이를 보이고 있다. 이는
식(7)이 초기치짐이 작은 경우의 결과물 토대로 구
한 공식이기 때문이다. 이에 반해서 본 논문에서 제
안한 식(6)은 초기치짐이 비교적 큰 경우에도 적용
될 수 있는 잇점이 있다.

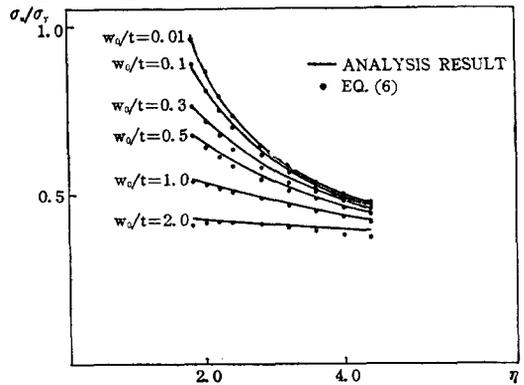


Fig. 6 Comparison of ultimate strength formula.

Table 2. Comparison of Ultimate Strength

Panel No.	η	Equivalent Plates		Real Plates		
		W_o/t	Analysis Result Eq. (6)			
P.C.C.	1	2.589	0.543	0.6768	0.6712	—
	2	"	0.0712	0.6726	0.6658	—
	3	"	0.0968	0.6667	0.6578	—
	4	"	0.0878	0.6680	0.6606	—
	5	"	0.0859	0.6687	0.6612	—
	6	"	0.1092	0.6631	0.6540	—
	7	3.560	0.0437	0.5283	0.5355	—
	8	"	0.0436	0.5287	0.5356	—
	9	"	0.0180	0.5305	0.5390	—
	10	"	0.0326	0.5297	0.5370	—
	11	"	0.0250	0.5313	0.5380	0.5291
	12	"	0.1078	0.5266	0.5275	—
B.C.	1	1.948	0.0356	0.8673	0.8742	0.8205
	2	"	0.0437	0.8600	0.8686	—
	3	"	0.0239	0.8951	0.8824	—

表 2에는 表 1의 자료를 이용하여 실제판으로써 P.C.C. 11과 B.C. 1의 최종강도와 P.C.C. 1~12, B.C. 1~3의 등가판의 탄소성대변형 해석에 의해 구한 최종강도와 식(6)으로 계산한 것을 정리해 놓았다.

Ⅳ. 結 言

本 論文에서는 初期처짐을 갖는 긴 평판의 壓縮 最終強度에 관한 연구를 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 얇은 판과 두꺼운 판에서 최종상태에 이르는 변형양상에 차이를 보이고 있는데, 얇은 판은 大變形에 의한 面内剛性의 감소에 기인하고, 두꺼운 판에서는 굽힘 變形으로 인한 局部的 塑性에 기인한다.

(2) 실제판의 해석결과와 이에 대응되는 등가판의 해석결과로부터 거의 같은 最終強度를 구할 수 있었고, 여러 平板의 해석결과를 통해 구한 최종강도들을 기초로 平板의 壓縮最終強度를 추정할 수 있는 公式를 식(6)과 같이 제안하였다.

(3) 本 論文에서 제안한 공식은 초기처짐이 비교적 큰 경우에 까지 폭넓게 적용할 수 있으며, 구조적 안전성을 위해 그리고 최적설계를 위해서는 彈塑性 大變形 解析을 통해 구한 공식(6)을 이용, 최종강도를 계산하여 설계해야 할 것이다.

後 記

本 研究는 현대장학연구비의 뒷받침으로 이루어진 것임을 밝히는 바이다.

參 考 文 獻

1. J.H. Evans, "Ship Structural Design Concepts," Cornell Maritime Press, Inc., 1975.
2. Shans Kuo, "Computer Applications of Numerical Methods," Addison-Wesley Pub. Co., Inc., 1972.
3. IBM, "System/365 Scientific Subroutine Package-version III programmer's manual," IBM, 1970.
4. Alexander Chajes, "Principles of Structural Stability Theory," Prentice-Hall, Inc., 1974.
5. 任尚鍊, 郭柄晚, 李柱成, "有限要素法入門," 東明社, 1985.
6. 李柱成, 具鍾道, "船體構造物에 관한 非線形 解析 研究," 大韓造船學會誌, 제20권, 제1호, 1983.
7. 李柱成, "壓縮平板의 最終強度解析," 울산공과대학 연구논문집, 제15권, 제2호, 1984.
8. T. Sørreide and J. Czujko, "Load Carrying Capacities of Plates Under Combined Lateral Load and Axial/Biaxial Compression," The 2nd Internl. Sympo. on Practical Design in Shipbuilding, 1983, Tokyo & Seoul
9. Y. Ueda, T. Yao, K. Nakacho, Y. Tanaka and K. Handa, "Compressive Ultimate Strength of Rectangular Plates with Initial Imperfections due to Welding (3rd report)," J. of Society of Naval Architects of Japan, vol. 154, 1983.