

알루미늄합금 보강판의 압축 최종강도 설계식의 비교연구

A Benchmark study on ultimate strength formulations of the aluminium stiffened panels under axial compression

서 정 관* 백 점 기** 이 제 명** O. F. Hughes*** P. E. Hess****
Seo, Jung-Kwan Paik, Jeom-Kee Lee, Jae-Myung

ABSTRACT

The aim of a benchmark study is carried out nine methods are employed for ULS analysis which implicitly predict the ultimate strength of aluminium stiffened panels under axial compression. For this purpose, DNV PULS, experimental and numerical data on the ultimate strength of panels were collected. Comparison of these experimental / numerical, DNV PULS / numerical, results with theoretical solutions by the candidate methods is performed. Also it's compared that ALPS/ULSAP program is based on closed-form formula for the ULS of plates and grillages under axial compression. It is considered that ALPS/ULSAP methodology provides quite accurate and reasonable ULS calculations by a comparison with more refined FEA.

Comparison of these experimental data, numerical, computational software results with the simplified solutions obtained by the candidate methods is then performed. The model uncertainties associated with the candidate methods are studied in terms of mean bias and COV (i.e., coefficient of variation) against experiments and numerical solutions, and the relative performance of the various methods is discussed.

1. 서 론

선박의 경량화 고속화의 경향에 따라 알루미늄 합금의 장점이 부각되고 있으며, 알루미늄합금을 이용한 선박 설계에 많은 연구가 이루어지고 있다. 선박의 구조설계는 적절한 설계식개발이나 소성붕괴거동 및 면내의 하중 및 횡압력에 대한 다양한 하중 상태에서 안정성 검토가 필요하다. 알루미늄선박의 구조는 일반적인 강구조의 선박과 같이 보강판에 면내하중과 횡압력의 다양한 조합하중을 받는다. 하나의 간이화 된 최종강도 상관관계식으로는 조합하중을 받는 보강판의 최종한계상태 거동을 해석하기가 쉽지 않음은 이미 알려져 있는 사실이다.

* 부산대학교 조선해양공학과 대학원

** 부산대학교 조선해양공학과 교수

*** Virginia Polytechnic Institute and State University, USA

**** NSWCCD, USA

왜냐하면, 조합하중을 받는 보강판의 붕괴 형태는 여러 하중성분들 중에서 지배적인 하중성분의 유형과 상대적인 크기에 의존하기 때문이다. 즉, 어떤 하중성분이 지배적인가에 따라서 강도의 상관관계특성이 달라지는 것을 의미한다.

본 연구에서는 ALPS/ULSAP을 이용하여 판과 보강판의 강구조 설계식들의 비교에서의 적용성 검토후 알루미늄구조 보강판의 유한요소법을 이용한 최종강도 평가 및 선급의 최종강도 평가 프로그램중에 하나인 DNV PULS와 비교로 적용성을 검토 하였다.

- ABS - ABS Ship Rule⁽¹⁾
- DNV SR - DNV Ship Rule⁽²⁾
- DNV PULS - DNV PULS program⁽³⁾
- IACS - IACS buckling procedure, UR S11
- LR 10403 - LR direct calculation, 'LR Buckle'
- LR NSR - LR Special Service Craft Rule and Naval Ship Rule buckling procedure
- ALPS/ULSAP ULS calculation program developed by Paik⁽⁴⁾
- FEA nonlinear finite element analysis by ANSYS⁽⁶⁾

위와 같이 8개의 각각의 선급의 최종강도 평가식과 ALPS/ULSAP⁽⁸⁾ 과 개발된 설계식을 이용하여 강판의 최종강도를 비교해보았고, 다음으로 알루미늄 보강판의 최종강도 평가법에 대해서 ALPS/ULSAP과 DNV PULS와 비교해보았다.

2. ALPS/ULSAP의 적용성 검토

단순지지조건에서의 선급용강재인 $E = 205.8 \text{ GPa}$, $\nu = 0.3$, $\sigma_Y = 235\text{MPa}$ 인 재료로 이루어진 $b = 800 \text{ mm}$ 인 판에 대해서 비교하였다.

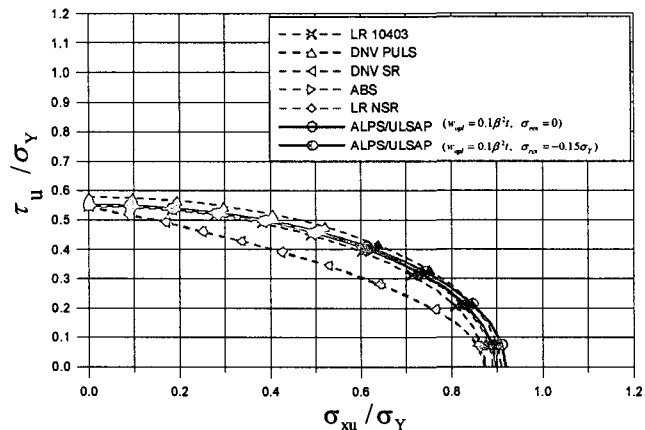


Fig.1 ULS interaction curves of a plate under combined longitudinal compression and edge shear. $b/t_p = 40$ and $a/b = 4.5$

Fig. 1은 전단사중하중과 종방향 압축응력이 작용했을때의 각각의 선급에 대한 비교를 하였다.

여기서 ALPS/ULSAP과 같이 조합하중이 작용시에는판의 최종강도의 값은 FEA 결과와 상당히 잘 일치하는 것을 볼 수 가있었고, 최종강도평가 프로그램인 DNV PULS의 경우에는 FEA결과와 다른 결과보다 과대하게 평가하는 것을 볼 수 있었다.

3. ALPS/ULSAP의 알루미늄 보강판 적용

Aluminum Stiffened Panels 5083-H116의 재료적인 물성치는 다음과 같이 $E = 70 \text{ GPa}$, $\nu = 0.33$, $\sigma_Y = 215 \text{ MPa}$, HAZ breadth = 25mm (1-in rule), Reduction factor HAZ = 0.67와 같다. 다음은 판의 초기처짐의 정도을 고려하기 위해 크게 3가지의 slight, average, severe로 가정하여 각각에 대해서 유한요소해석 및 ALPS/ULSAP 그리고 DNV PULS의 결과를 Table 1과 같이 비교해 보았다.

Fig. 2은 실제의 알루미늄 보강판에서 T-type의 형태의 보강재가 있고, 단순화하여 용접열에 의해 재료가 연화된 열영향부를 표현하였다. 열영향부의 폭(b_p , b_s)은 25mm로 고정하여 해석하였다⁽¹⁰⁾

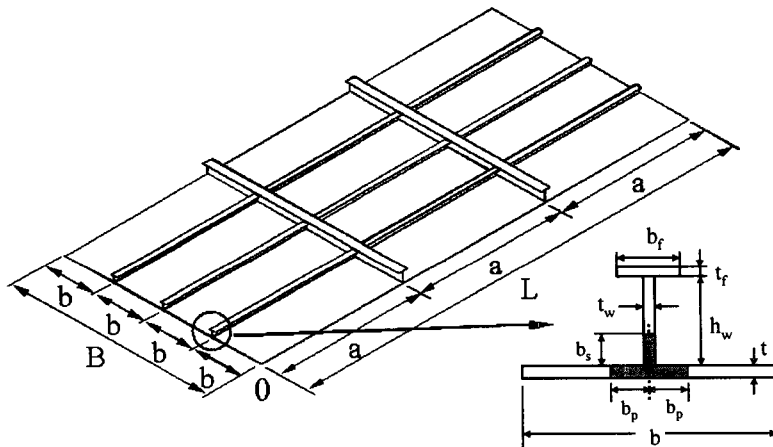


Fig.2 FEA model

- Slight level:
 - Initial deflection of plating between longitudinal stiffeners: $W_{opl} = 0.1t = 0.003b$
 - Initial deflection of stiffeners (column type): $W_{os} = 0.001a$
 - Initial deflection of stiffeners (sideways): $W_{ot} = 0.001a$
 - Residual stress: $\sigma_r = 0.0$
- Average level:
 - Initial deflection of plating between longitudinal stiffeners: $W_{opl} = 0.3t = 0.009b$
 - Initial deflection of stiffeners (column type): $W_{os} = 0.0025a$

- Initial deflection of stiffeners (sideways): $W_{ot}=0.0025a$
- Residual stress: $\sigma_r=0.0$

○ Severe level:

- Initial deflection of plating between longitudinal stiffeners: $W_{opl}= 0.5t= 0.015b$
- Initial deflection of stiffeners (column type): $W_{os}=0.005a$
- Initial deflection of stiffeners (sideways): $W_{ot}=0.008a$
- Residual stress: $\sigma_r=0.0$

$$\beta = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_{Yp}}{E}}, \quad \beta' = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_{Yp'}}{E}} \quad (1)$$

$$P_p = (a - 2b_p')(b - 2b_p')\sigma_{Yp} + 2[ab_p' + (b - 2b_p')b_p']\sigma_{Y'}$$

$$\text{where } \sigma_{Yp'} = \frac{P_p}{ab}, \text{ and}$$

식(1), (2)와 같이 보강판의 최종강도 특성과 이를 바탕으로 한 설계식의 도출을 위해 열영향부가 고려된 보강판을 모델링하여, 이를 각각의 판의 세장비(β)와 기둥의 세장비(λ)에 대해 시리즈 해석을 수행하였다. 그리고, 비록 강재에 비해서는 적은 양의 초기 처짐이지만, 알루미늄 합금 구조물의 최종강도에 큰 영향을 끼치므로 이를 고려하여 각각의 초기처짐에 대한 해석을 수행하였다⁽¹¹⁾.

$$\lambda = \frac{a}{\pi r} \sqrt{\frac{\sigma_{Yp}}{E}}, \quad \lambda' = \frac{a}{\pi r} \sqrt{\frac{\sigma_{Yp'}}{E}} \quad (2)$$

$$\text{where, } \sigma_{Yseq} = \frac{\sigma_{Yp}bt + \sigma_{Ys}(h_w t_w + b_f t_f)}{bt + h_w t_w + b_f t_f}, \quad \sigma_{Yseq}' = \frac{P_s}{bt + h_w t_w + b_f t_f'}$$

$$P_s = (b - 2b_p')t\sigma_{Yp} + 2b_p'\sigma_{Yp}' + (h_w - b_s')t_w\sigma_{Ys} + b_s't_w\sigma_{Ys}' + b_f t_f \sigma_{Ys}$$

Table 1 Stiffened panels with a slight, average, and severe level of initial deflections

	a	b	t	hw	tw	bf	tf	β	λ	Slight level		Average level		Severe level		Average level	
										FEA	ULSAP	FEA	ULSAP	FEA	ULSAP	FEA	Puls
P1	1200	300	11.55	55	4	30	5	1.44	1.41	0.378	0.387	0.300	0.303	0.197	0.229	0.300	0.520
P2	1200	350	13.5	40	3	30	4	1.44	2.24	0.169	0.169	0.147	0.140	0.104	0.109	0.147	0.279
P3	1200	350	13.5	45	3	30	4	1.44	2.04	0.197	0.200	0.169	0.163	0.114	0.125	0.169	0.320
P4	1200	350	13.5	50	3	30	4	1.44	1.87	0.226	0.234	0.190	0.187	0.122	0.143	0.190	0.367
P5	1200	350	13.5	102	5	60	5	1.44	0.69	0.760	0.787	0.658	0.646	0.519	0.535	0.658	0.646
P6	1200	300	11.55	150	6	90	14	1.44	0.30	0.907	0.900	0.823	0.847	0.717	0.784	0.823	0.660
P7	1200	300	11.55	74	5	58	4	1.44	0.92	0.644	0.672	0.523	0.527	0.391	0.429	0.523	0.646
P8	1200	300	11.55	64	4	54	3	1.44	1.21	0.473	0.491	0.373	0.379	0.270	0.315	0.373	0.595
P9	1200	350	13.5	110	6	90	14	1.44	0.42	0.891	0.906	0.804	0.839	0.698	0.759	0.804	0.655
P10	1200	350	13.5	90	6	90	9	1.44	0.58	0.841	0.824	0.758	0.757	0.628	0.640	0.758	0.651

P11	1200	300	11.2	50	5	40	5	1.48	1.38	0.414	0.410	0.329	0.325	0.235	0.249	0.329	0.539
P12	1200	350	13.1	42	5	46	3	1.48	1.97	0.216	0.217	0.188	0.178	0.119	0.144	0.188	0.306
P13	1200	350	13.1	86	6	82	6	1.48	0.69	0.789	0.806	0.687	0.674	0.547	0.542	0.687	0.646
P14	1200	300	11.2	140	6	140	12	1.48	0.31	0.905	0.903	0.835	0.850	0.745	0.767	0.835	0.660
P15	1200	160	6	55	5	50	4	1.48	0.92	0.697	0.708	0.582	0.581	0.398	0.463	0.582	0.637
P16	1200	160	6	50	4	32	3	1.48	1.20	0.526	0.520	0.409	0.415	0.265	0.354	0.409	0.632
P17	1200	300	11.2	90	6	90	9	1.48	0.53	0.848	0.877	0.756	0.790	0.642	0.682	0.756	0.655
P18	1200	350	13.1	120	5	78	12	1.48	0.42	0.876	0.898	0.794	0.828	0.678	0.732	0.794	0.651
P19	1200	300	7.7	50	3	30	5	2.16	1.42	0.371	0.388	0.292	0.309	0.188	0.238	0.292	0.469
P20	1200	350	9	35	4	60	3	2.16	2.04	0.203	0.207	0.179	0.175	0.129	0.137	0.179	0.283
P21	1200	300	7.7	153	9	100	12	2.16	0.30	0.826	0.795	0.741	0.743	0.693	0.707	0.741	0.651
P22	1200	300	7.7	94	5	80	8	2.16	0.51	0.784	0.807	0.683	0.735	0.585	0.686	0.683	0.641
P23	1200	160	4.1	60	5	48	5	2.16	0.78	0.711	0.781	0.599	0.671	0.480	0.555	0.599	0.623
P24	1200	300	7.7	60	5	34	5	2.16	1.10	0.556	0.565	0.431	0.441	0.309	0.339	0.431	0.604
P25	1200	350	9	80	5	50	5	2.16	0.82	0.656	0.734	0.556	0.588	0.431	0.458	0.556	0.609
P26	1200	350	9	73	5	68	6	2.16	0.78	0.680	0.774	0.589	0.635	0.476	0.506	0.589	0.613
P27	1200	300	6	18	6	100	9	2.77	1.76	0.262	0.269	0.228	0.238	0.189	0.204	0.228	0.451
P28	1200	300	6	24	6	100	9	2.77	1.44	0.377	0.391	0.320	0.337	0.278	0.283	0.320	0.525
P29	1200	300	6	30	6	100	9	2.77	1.22	0.447	0.521	0.377	0.439	0.341	0.362	0.377	0.572
P30	1200	300	6	60	6	100	9	2.77	0.69	0.683	0.739	0.625	0.700	0.526	0.637	0.625	0.618
P31	1200	300	6	72	6	100	9	2.77	0.59	0.702	0.739	0.656	0.700	0.562	0.669	0.656	0.623
P32	1200	300	6	90	6	100	9	2.77	0.48	0.717	0.739	0.684	0.700	0.599	0.669	0.684	0.623
P33	1200	300	6	120	6	100	9	2.77	0.38	0.730	0.723	0.707	0.687	0.630	0.661	0.707	0.627
P34	1200	300	6	150	6	100	9	2.77	0.31	0.736	0.695*	0.713	0.694*	0.631	0.613	0.713	0.632
P35	1200	300	6	180	6	100	9	2.77	0.26	0.733	0.614*	0.703	0.613*	0.613	0.612*	0.703	0.632
P36	1200	300	6	210	6	100	9	2.77	0.23	0.718	0.505*	0.682	0.503*	0.584	0.503*	0.682	0.632
P37	1200	300	4.87	38	5	30	5	3.41	1.57	0.325	0.325	0.283	0.271	0.211	0.218	0.283	0.400
P38	1200	160	2.6	40	4	22	4	3.41	1.28	0.424	0.450	0.351	0.373	0.234	0.302	0.351	0.525
P39	1200	300	4.87	60	5	34	5	3.41	0.98	0.528	0.611	0.453	0.514	0.351	0.403	0.453	0.530
P40	1200	300	4.87	66.4	5	70	5	3.41	0.75	0.599	0.641	0.548	0.612	0.453	0.555	0.548	0.567
P41	1200	350	5.68	94	6	70	11	3.41	0.48	0.662	0.703	0.615	0.680	0.544	0.662	0.615	0.609
P42	1200	350	5.68	160	6	90	11	3.41	0.29	0.686	0.657	0.685	0.637	0.583	0.621	0.685	0.627
P43	1200	350	5.68	40	3	20	4	3.41	2.08	0.195	0.193	0.169	0.162	0.110	0.129	0.169	0.251
P44	1200	300	7.45	80	6	60	4	2.23	0.749	0.703	0.769	0.601	0.647	0.464	0.538	0.601	0.613
P45	1200	300	7.45	40	4	30	3	2.23	1.991	0.219	0.213	0.142	0.146	0.113	0.119	0.142	0.246
P46	1200	300	7.5	155	8	100	10	2.23	0.30	-	-	0.760	0.707	0.673	0.672	0.760	0.646
P47	1200	350	8.7	108	8	60	8	2.23	0.50	-	-	0.701	0.739	0.606	0.676	0.701	0.632
P48	1200	300	7.5	58	6	40	7	2.23	0.97	-	-	0.499	0.505	0.390	0.411	0.499	0.618
P49	1200	160	4.0	42	3	38	4	2.23	1.17	-	-	0.400	0.400	0.293	0.358	0.400	0.590
P50	1200	300	7.5	40	3	40	4.5	2.23	1.63	-	-	0.259	0.251	0.174	0.201	0.259	0.404
P51	1200	300	11.6	34.1	2	20	3	1.44	3.00	-	-	-	-	0.057	0.065		
P52	1200	300	11.2	34	2	20	3	1.48	3.00	-	-	-	-	0.056	0.065		
P53	1200	300	7.7	32.1	2	20	3	2.16	3.00	-	-	-	-	0.055	0.068		
P54	1200	300	7.5	31.8	2	20	3	2.23	3.00	-	-	-	-	0.055	0.068		
P55	1200	300	6.0	30	2	20	3	2.77	3.00	-	-	-	-	0.056	0.069		
P56	1200	300	4.9	28.1	2	20	3	3.41	3.00	-	-	-	-	0.058	0.071		

* Hungry horse's back type initial deflection shape

Table 2 Stiffened panels with an average level of initial deflections (Experiment vs. ALPS/ULSAP)

	a	b	t	hw	tw	bf	tf	β	λ	Average level		
										Experiment	ALPS/ULSAP	ULSAP/FEA
Ex.1	1000	200	8.5	100	6	0	0	1.44	0.69	0.539	0.624	1.157
Ex.2	1000	200	8	100	5	0	0	1.48	0.70	0.724	0.640	0.883
Ex.3	1000	200	6	100	6	0	0	2.16	0.69	0.507	0.636	1.191
Ex.4	1000	200	6	100	6	0	0	2.16	0.69	0.534	0.636	1.016
Ex.5	1000	200	6	75	6	0	0	2.16	0.97	0.577	0.520	1.152
Ex.6	1000	200	6	75	6	0	0	2.16	0.97	0.494	0.520	1.048
Ex.7	1000	200	5	100	5	0	0	2.23	0.59	0.544	0.629	1.151
Ex.8	1000	200	5	80	5	0	0	2.23	0.78	0.565	0.589	0.944
Ex.9	1000	200	5	60	5	0	0	2.23	1.10	0.364	0.419	1.157
Ex.10	1000	200	5	60	6	0	0	2.30	0.08	0.465	0.432	0.883

Table. 2는 Y. Zha & T. Moan⁽¹¹⁾의 실험결과와 ALPS/ULSAP과 결과를 비교하였다. Fig. 3은 초기처짐의 정도가 slight level에서의 ALPS/ULSAP과 FEA의 결과 비교, Fig. 4는 average level의 ALPS/ULSAP과 FEA 결과 및 실험, Fig. 5은 severe level에서의 ALPS/ULSAP과 FEA의 결과 비교하였다. Fig. 6는 average level에서의 DNV PULS와 FEA 결과를 비교하였다.

여기서 용접영향에 대한 효과의 고려는 알루미늄 합금 구조물의 조립시 가장 일반적으로 반자동 MIG용접을 사용하게 되는데, 이런 용접법은 알루미늄 합금 구조물의 잔류응력값은 강구조물에 비해 아주 작은 양을 가지게 되므로 본 해석에 있어서 그 영향은 고려되지 않았다⁽¹²⁾.

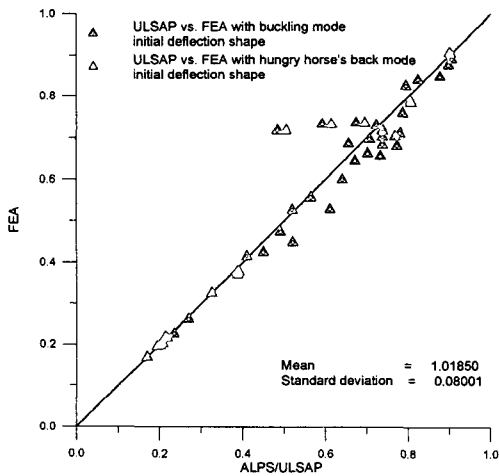


Fig. 3 Comparison of ultimate compressive strength between FEA and ALPS/ULSAP for aluminum 5083 stiffened panels with a slight level of initial deflection

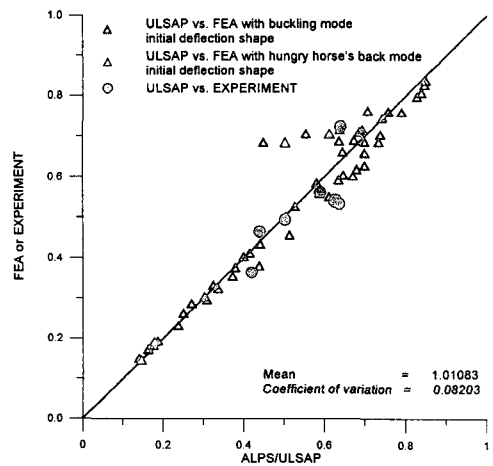


Fig. 4 Comparison of ultimate compressive strength with FEA and ALPS/ULSAP for aluminum 5083 stiffened panels with an average level of initial deflection

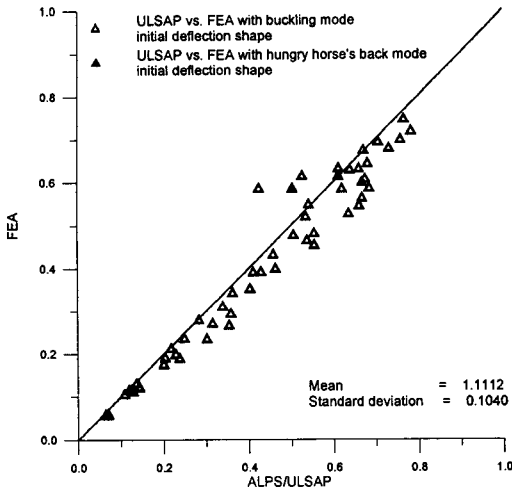


Fig. 5 Comparison of ultimate compressive strength with FEA and ALPS/ULSAP for aluminum 5083 stiffened panels with a severe level of initial deflection

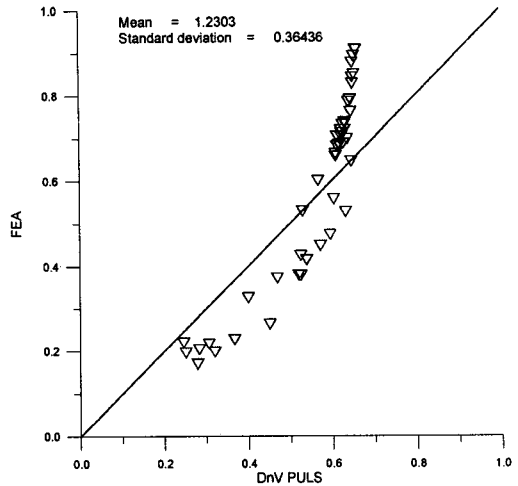


Fig. 6 Comparison of ultimate compressive strength with FEA and DNV PULS for aluminum 5083 stiffened panels with an average level of initial deflection

4. 결론

선박의 강구조물 및 알루미늄의 경우에 최종한계상태에 대한 정확한 평가법이 요구되는 사항에 적절한 설계적인 관점에서의 ALPS/ULSAP과 유한요소법 그리고 각 선급기준을 이용하여 비교결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 강구조물의 여러 가지 복합적인 하중에서의 강판의 최종강도 평가는 선급에서 제시하는 식보다 ALPS/ULSAP의 경우에 복합적인 하중상태에서 고려 가능하고 유한요소해석 결과 또한 신뢰할 수 있었다.
- 2) 선박의 경량화 추세에 알루미늄합금 보강판에 대하여 강제용으로 만들어진 압축최종강도의 설계식을 사용하기에는 불확실성이 있고, 이는 두 재료의 stress-strain curve의 특성과 한계상태이후의 거동특성이 서로 현저하게 틀리기 때문이다. 또한 열영향부의 영향이 강제에 비해 더 중요한 특성으로서 작용함을 알 수 있다.
- 3) 알루미늄 구조물의 평가에서의 각각의 초기처짐의 정도에 따라서도 ALPS/ULSAP이 각각의 초기처짐의 크기에 대해서 FEA 결과와 상당히 잘 일치하는 것을 알 수 있다.
- 4) 알루미늄선박의 최종강도 설계에서 ALPS/ULSAP은 기초적인 설계의 척도로 사용될 수 있을 것이라고 사료된다.

참고 문헌

1. ABS, "Rules for building and classing steel vessels, American Bureau of Shipping, Houston, 2003.
2. DNV, "Buckling strength analysis, Classification Notes No. 30.1, Det Norske Veritas, Oslo, July.,

1995.

3. DNV, PULS 1.5 - User's manual, Technical Report No. 2001-0420, Revision No.07, Det Norske Veritas, Oslo., 2003.
4. Paik, J.K., "ALPS/ULSAP program", Pusan National University, Busan, Korea, 2003.
5. Paik, J.K., Thayamballi, A.K. and Lee, J.M. "Effect of initial deflection shape on the ultimate strength behavior of welded steel plates under biaxial compressive loads", Journal of Ship Research, Vol.48, No.1, pp.45-60, 2004.
6. ANSYS, "User's manual (version 6.0)", Swanson Analysis Systems Inc., Houston.
7. Paik, J.K. and Thayamballi, A.K., "Ultimate limit state design of steel-plated structures", John Wiley & Sons, U.K., 2003.
8. ALPS/ULSAP User's manual (Version 2003), Proteus Engineering, Stevensille, Maryland, USA, 2004.
9. Paik, J.K., Thayamballi, A.K., Wang, G. and Kim, B.J., "On advanced buckling and ultimate strength design of ship plating", Trans. SNAME, Vol.108, pp.249-290, 2000.
10. A. Aalberg, M. Langseth and P.K. Larsen, "Stiffened aluminium panels subjected to axial compression". Thin-walled Structures, Vol.39, pp.861-885, 2001.
11. Y. Zha and T. Moan, 2001, "Ultimate Strength of Stiffened Aluminum Panels with Predominantly Torsional Failure Modes", Thin-Walled Structures, Vol.39, pp.631-648.
12. 박철민, 이제명, 백점기, 고재용, 이동훈, "열영향부를 고려한 알루미늄 보강판의 압축 최종강도 설계식 개발" 대한조선학회춘계학술대회, pp 367-372, 2004.