

## 알루미늄 보강판의 압축 최종강도 붕괴 해석

† 박주신\* · 고재용\*\* · 김윤영\*\*\*

\* 오사카대학원 선박해양공학과 박사과정, \*\*목포해양대학교 해양시스템공학부 교수  
\*\*\* 목포해양대학교 학술연구교수

### Collapse Analysis of Ultimate Strength for the Aluminium Stiffened Plate subjected to Compressive Load

† Joo-Shin Park\* · Jae-Yong Ko\*\* · Yun-Young Kim\*\*\*

\* Graduate school of Engineering, Osaka University, Suita, 565-0834, Japan  
\*\* Faculty of Ocean System Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea.  
\*\*\* MOEHRD-KRF Research Professor, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea.

**요 약 :** 일반적으로 선박 및 해양구조물에서 사용하고 있는 고강도 알루미늄 재료들은 일반 강재에 비해서 많은 이점들을 가지고 있다. 이러한 알루미늄 재료들은 여러 분야에 걸쳐서 폭넓게 사용되고 있으며, 특히, 초고속 선박의 선체와 갑판부에 많이 이용되어지고 있고, 교량구조물에 사용되는 박스 거더, 그리고 해양구조물의 갑판부와 선측구조에도 널리 이용되고 있다. 이러한 알루미늄 구조는 전체적인 구조부재의 중량을 감소하게 하면서 선속의 증가를 가져온다. 일반적인 강구조물의 응력-변형률 관계와 비교하여 보면, 용접가공에 의하여 발생하는 열영향부의 존재로 인하여 상당히 다르게 나타난다. 왜냐하면, 강구조물에 비해 열전도율이 높아서, 열영향부(heat affected zone, HAZ)의 영향이 크게 작용하기 때문이다. 본 논문에서는 종방향 압축하중을 받는 알루미늄 보강 판넬의 최종강도 특성에 대하여, 열영향부의 범위를 변화한 유한요소해석을 통하여, 열영향부의 범위와 좌굴 및 최종강도 거동의 관계에 대해서 고찰하였다.

**핵심용어 :** 알루미늄 보강판넬, 최종강도, 열영향부, 용접가공, 좌굴

**Abstract :** The use of high-strength aluminum alloys for ship and offshore structure generally has many benefits compared to the structural steels. These materials are used widely in a variety of fields, especially in the hull and deck of high speed craft, box-girder of bridges, deck and side plates of offshore structure. The structural weight can be reduced using these aluminum structure, which can enable high speed. The characteristics of stress-strain relationship of aluminum structure are fairly different from the steel one, because of the influence of Heat Affected Zone(HAZ) by the welding processing. The HAZ of aluminum is much wider than that of steel with its high heat conductivity. In this paper, the ultimate strength characteristics of aluminum stiffened panel subjected to axial loading, such as the relationship between extent of HAZ and the behavior of buckling/ultimate strength, are investigated through the Finite Element Analysis with varying its range.

**Key words :** Aluminium stiffened panels, Ultimate strength, Heat affected zone(HAZ), Welding processing, Buckling

### 1. 서 론

최근 선박 구조설계기술의 발전과 함께, 경량화 및 고속화를 주도하는 각종 선박들이 출현하고 있으며, 이러한 선박의 구조재료는 주로 알루미늄 합금 계열(T-5000, T-6000)을 사용하고 있으며, 일반 강재에 비해서 사용할 수 있는 재료의 종류는 적지만, 우수한 재료적인 특성을 지닌 합금재가 개발되어지고 있다. 알루미늄 합금 재료는 일반적으로 사용되고 있는 강재에 비해서, 많은 장점을 가지고 있으며, 이러한 장점을 이용하고, 단점을 보완하기 위해서는 재료적인 특성을 고려한 구조설계가 필수적이라고 할 수 있다. 선박에 주로 사

용 중인 강재(연강 및 고장력강)의 특성에 대한 각종 실험 및 유한요소법을 적용한 연구를 중심으로 다양하게 진행되어져 왔으나, 알루미늄 합금 재료에 대한 거동 특성 및 구조설계에 관한 적용성에 대해서는 향후 더 많은 연구가 필요 시 되고 있다. 일반적으로, 알루미늄 합금 재료는 구조용 강과 다르게 뚜렷한 항복점을 찾기가 힘들고, 탄성 비례한도를 넘어서 소성변형이 시작되는 초기 단계부터 큰 가공경화를 나타내는 재료적인 특성을 지니고 있다 (Paik et al., 2004). 특히, 가장 문제 시 되고 있는 점은 재료의 생산가공의 경우 용접작업으로 인하여 발생된 고온의 열전달로 인하여, 재료에 열영향부(heat affected zone, HAZ)가 일반적인 강재에 비하여 넓게

† 교신저자 : 박주신(정회원), Joo\_Shin\_Park@naoe.eng.osaka-u.ac.jp 090)1153-9326  
\*\* 정회원, kojy@mmu.ac.kr, 061)240-7129  
\*\*\* 정회원, yunyoungkim@gmail.com, 061)240-7316

분포하며, 열영향부가 존재함으로써 압축최종강도는 크게 감소하게 되는 특징을 나타낸다. 일반적으로 생산 현장에서 사용하고 있는 알루미늄 보강 판넬의 용접방법으로는 다음의 3 가지로 분류 할 수 있다. 첫 번째는, 가장 보편적인 방법으로, 보강재와 판의 교차지점에 필렛용접(fillet welding)하며, 두 번째 방법은 유효폭을 갖는 판과 보강재를 기준으로, 만나는 판에 맞대기용접 및 필렛용접을 하는 경우이다. 마지막으로, 일정한 크기의 보강 판넬을 횡방향으로 접합시키는 방법이다. 본 연구에서는 일반적으로 가장 보편적으로 사용되는 첫 번째 용접에 의해서 발생되게 되는 열영향부 조건을 고려하였으며, 열영향부의 면적을 주요변수로 설정하여 압축하중에 의한 좌굴 및 붕괴거동에 대해서 유한요소해석을 통하여 정량적으로 검토하였다.

1.1 연구의 연혁 및 동향

Hopperstad et al.(1998)은 면내압축하중이 작용하는 알루미늄 판에 대해서, 비선형유한요소법을 적용하여, 최종강도에 예측에 관한 설계식을 제안하였다. Paik et al.(2005, 2006)은 유한요소법을 적용하여, 알루미늄 판과 알루미늄 보강판에 대한 최종강도 설계식을 제안하고, 각 선급의 규정과 비교 평가하였다. 또한 압축강도실험을 통하여 실제의 용접에 의해서 파생된 초기치짐 형상과 잔류응력 분포특성을 분류하고, 실험의 결과를 바탕으로 붕괴패턴에 대해서 정의하였다. Moan et al.(2000, 2001)은 플랜지가 없는 일반 플랫폼 형태의 단면을 고려한 알루미늄 보강판에서 압축하중에 대한 비틀림 좌굴거동에 대해서 실험 및 유한요소법을 적용한 수치계산을 통하여 붕괴거동의 특성에 대해서 연구하였다. 최근, 전 세계적으로 알루미늄 보강판넬을 이용한 압축/전단 실험이 이루어지고 있으며, 유한요소법을 활용한 각종 시뮬레이션에 의한 평가방법도 많은 발전을 해오고 있다. 특히, 각 선급협회(DNV, LR, ABS)를 중심으로 알루미늄 합금재료의 선박구조에 대한 적용성 및 응용분야에 관한 폭넓은 연구가 진행되고 있으며, 관련 구조설계 규정들도 정립되어 가고 있다.

1.2 알루미늄 합금의 재료적인 특성

선박에서 사용 중인 알루미늄 합금재료는 용접이나 절단 등에 의한 열 가공에 의해서 필연적으로 초기결함이 발생하며, 이 중에서도 용접으로 인한 열영향부의 분포 범위가 일반 강재에 비해서 상대적으로 넓게 존재하게 된다. Fig. 1의 실험 결과는 알루미늄 합금 모재와 열영향부를 고려한 소재의 인장 실험 결과를 응력-변형률 관계로 나타내고 있으며, 열영향부를 고려할 경우, 고려하지 않는 경우에 비해서, 항복점을 명확하게 구분하기가 힘들며, 항복 이후 큰 가공경화가 발생하게 된다.

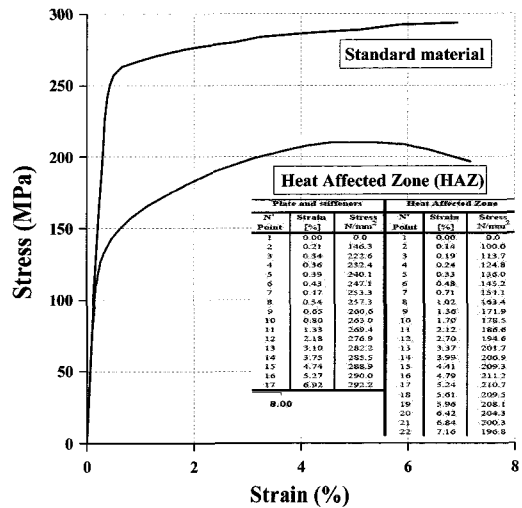


Fig. 1 Characteristics of stress and strain relationship for the aluminium alloys

2. 유한요소해석 기법

비선형좌굴 유한요소 해석은 범용유한요소해석 프로그램인 ANSYS Multiphysics V10.0을 사용하였으며, 기하학적 비선형과 재료의 비선형을 동시에 고려한 Shell 181번 요소를 적용하였다. 이 요소는 4절점이 절점마다 6자유도(변위  $u, v, w$ : 회전  $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ )를 가지고 있으며, 대변형, 대회전, 대변형률을 포함한 비선형 해석에 적합하다(Ansys, 2000). 해석모델의 재료의 특성은 실제 실험에서 도출된 데이터를 이용하였으며, 비선형구조거동 응답이 가능하도록 다중등방성경화(multi-linear isotropic hardening)거동을 고려하였다. 즉, 실험결과에서 도출된 계측된 스텝에서의 경화 및 탄성기울기에 대한 정보를 수치해석에서도 동일하게 적용하였다. 구조요소의 항복여부는 등가응력인 식(1)의 본 미세스 응력(von-Mises stress)으로서 평가하였다. 주로 연성재료(ductile material)재료 같은 경우, 이 이론을 사용하여, 요소의 항복여부를 판단하고 있다.

$$\sigma_e = \left[ \frac{1}{2} \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \right] + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

비선형 수치해석 기법으로서 특이점에서 나타나는 불완전한 천이거동(snap-through or snap-back)을 수치적으로 정확하게 계산하기 위하여 비선형 수치해석 기법 중 한가지인 아크렌스방법(arc-length method)을 사용하였다. 이 해석방법은 증분변수로서 하중과 처짐곡선의 호의 반지름을 적용하며, 수렴계산의 전단계의 호의 반지름 방향과 직각방향에 해를 탐색하며, (박, 2007) 탐색된 해는 미리 설정된 하중과 모멘트 수렴기준에 의하여, 만족한 결과만을 취득하게 된다.

2.1 알루미늄 합금 보강판 모델 및 물성치

알루미늄 합금 재료를 이용한 보강판넬 구조는 해양구조물

의 갑판부나, 고속선의 갑판 및 선체구조에 주로 사용되는 부재이다. Fig. 2에서는 이러한 전형적인 알루미늄 보강판 구조에 대해서 나타내고 있으며, 일반적인 강재로 구성된 구조와 배치가 유사하지만, 상대적으로 일정한 횡프레임 사이에 종보강재의 수가 많은 특징을 지니고 있다.

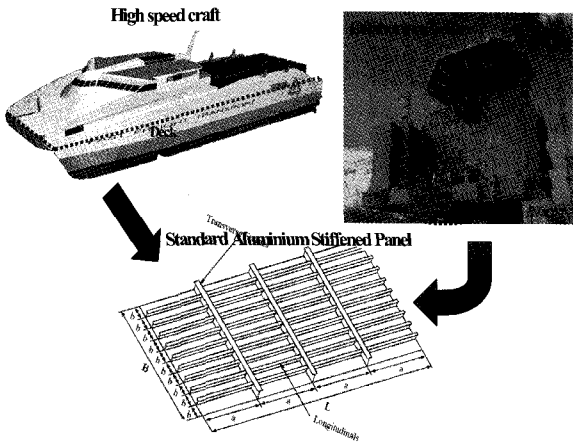


Fig. 2 Typical configuration of the aluminium stiffened panel

본 연구논문에서는 ISSC 2003 Committee “Ultimate Strength”에서 벤치마킹(Rigo et al.(2004)에 사용된 표준해석 모델을 이용하여, 열영향부의 영향을 고려한 모델과 고려하지 않은 모델에 대해서 비교하였으며, 초기결함은 다음과 같이 판의 길이와 폭의 비율로 표현하였다.

- 보강재와 보강재 사이의 판의 처짐 :  $0.002 \times b$
- 보강재의 횡처짐 및 국부좌굴 처짐 :  $0.001 \times a$

여기에서,  $a$ 는 횡프레임과 횡프레임 사이의 판의 길이,  $b$ 는 보강재와 보강재 사이의 폭을 나타낸다.

용접조건은 보강재와 판의 교차지점에 필렛 용접 상태를 고려하였으며, 구체적인 물성치는 아래의 Table 1과 같다.

Table 1 Mechanical properties of AA6082 (Aalberg, 1998)

Aluminium alloy-AA6082	
Young's Modulus(E)	70,475 MPa
Poisson's Ratio( $\nu$ )	0.3
Yield Stress( $\sigma_y$ )	260 MPa

논문에서 고려한 해석모델은 3개의 스패를 가진 모델(three span model)로서 1개의 스패간격은 각각 2,050mm이고, 같은 간격으로 구성되어 있으며, 4개의 횡프레임(F1~F4)과 5개의 종방향 보강재를 가진 보강판 구조이다. Fig. 3에서 나타내듯이, 횡프레임 F1과 F4는 두께( $t_{tf}$ ) 10mm, F2와 F3는 두께

( $t_{tf}$ ) 3mm이며 횡프레임의 웹 높이( $h_w$ )는 동일하게 71.8mm이다. 보강재의 단면형태는 플랜지가 있는 앵글바(angle-bar)이며, 보강재와 보강재 사이의 폭( $b$ )은 252.5mm, 웹높이( $h_w$ )는 67.1mm, 웹두께( $t_w$ )는 3mm, 플랜지 폭( $b_f$ )은 15mm, 플랜지 두께( $t_f$ )는 4.4mm, 판의 두께( $t_p$ )는 5mm이다.

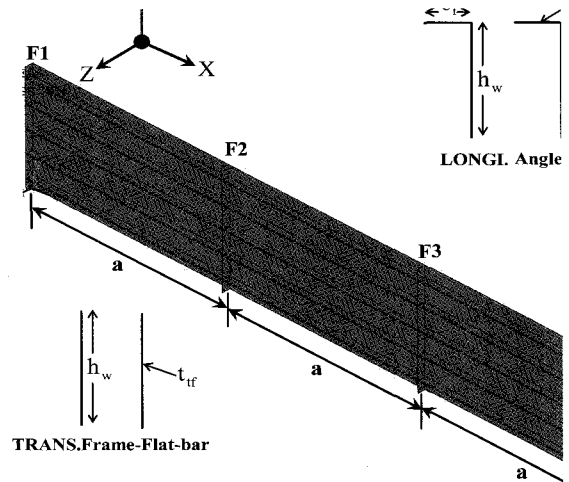


Fig. 3 Model for analysis

## 2.2 해석에 사용된 하중조건 및 경계조건

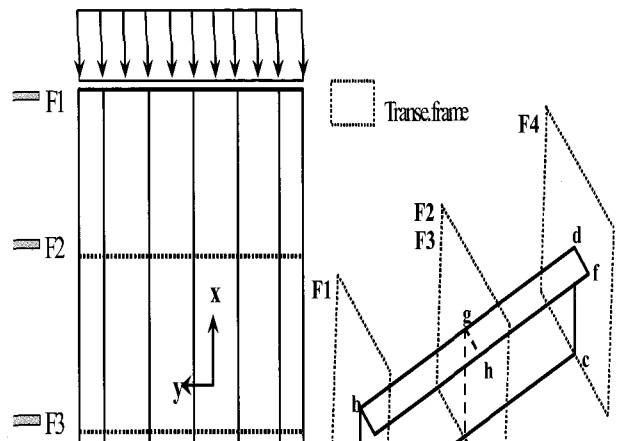


Fig. 4 Boundary conditions

해석에 적용된 하중조건 및 경계조건에 대해서, Fig. 4에서 나타내고 있다. 하중은 순수 압축하중을 F1 횡프레임에서 길이방향으로 작용하고 있으며, F4 횡프레임은 하중작용 방향에 대해서 면내변위구속을 하였다. 하중변은 면내 Z방향으로 지지되어있으며, X방향 회전구속 되어있다. 또한, 종방향 보강재와 횡프레임(F1, F4)과 만나는 지점에는 웹의 높이방향으로 Y방향 변위구속을 적용하여, 종방향 보강재에 비해서 단면계수가 큰 횡방향 프레임 부재에 대한 효과를 고려하였다. 횡프레임 F2, F3에서는 보강재의 두께비와 같은 조건이므로, Z방향 지지조건만을 적용하였다. 전체모델의 경계조건은 실제 종/횡방향의 구조부재의 조합으로 구성된 보강판 조건인 단순지지를 이상화 하였으며, 네 변 모두 최종강도에 이르기 까지 직

선을 유지하도록 고려하였다.

### 2.3 열영향부 효과

알루미늄 재료에서는 용접 가공 시 발생하게 되는 열영향부의 범위가 일반 강재에 비해서 넓게 분포하며, 이러한 열영향부의 범위에 따라서 최종강도 분포는 상이하게 나타난다. 특히, Aalberg et al.(1998)의 실험에서 사용된 알루미늄 판넬 부재의 조립 시 사용된 MIG용접과정 중에 발생된 용접잔류응력은 일반적인 강재부재에 비해서 작기 때문에, 본 연구에서는 잔류응력에 대한 고려를 하지 않았다. 열 영향부의 영향을 고려하기 위하여 영향부 범위를 15, 25, 35mm로 변화를 주어서 적용하였으며, 네 개의 웹 프레임(F1-F4)에서는 열영향부의 영향을 고려하지 않았다.

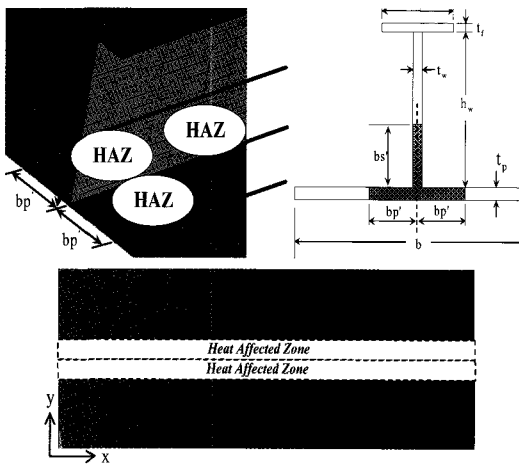


Fig. 5 Standard HAZ model( $bp' = bs' = 25mm$ )

Fig. 5에서 나타낸 바와 같이 유한요소해석 시 열영향부를 고려하기 위하여, 지정된 영역만큼을 별도로 세분화 하여 요소를 나누고, 그 영역은 원래의 항복응력의 40%(150MPa)만큼 재료적인 손상을 주어서 열영향부의 효과를 고려하였다. 이러한 수치는 실제의 실험데이터를 이용한 유한요소해석 시 열영향부 존재로 인한 재료의 손상이 위의 값이 되었을 경우에 실험결과의 거동과의 비교에서 오차가 가장 적게 나타나는 수치를 경험적으로 유추하였다.

## 3. 열영향부의 범위에 따른 최종강도 거동

### 3.1 열영향부를 고려하지 않는 경우

열영향부를 고려하지 않은 해석모델의 압축최종강도에서의 변형(deformation)과 등가응력(equivalent stress) 분포에 대한 해석 결과를 Fig. 5에 나타내고 있다. 횡프레임 F2와 F3 사이의 보강판넬 모델에서는 판재에서 전체좌굴 후 전체 붕괴하는 형태를 나타내며, F1과 F2 그리고 F3와 F4 사이의 판넬 모델에서는 보강재의 끝단에서 발생한 큰 횡처짐으로 인하여 좌굴 붕괴 하고 있으며, 이러한 붕괴거동 형태를 트리핑(tripping)

이라고 한다.

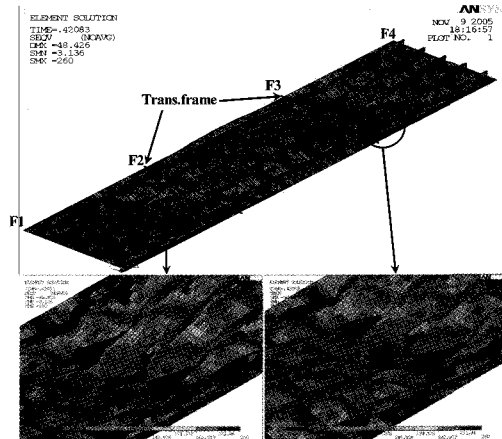


Fig. 6 Deformed shape on the ultimate strength of the aluminium stiffened panel ignored effect of HAZ under axial compression

### 3.2 열영향부( $bp' = bs' = 15mm$ )를 고려

Fig. 6의 결과는 용접 열에 의해서 파생된 열영향부의 폭을 각각 15mm로 고려한 상태에서, 압축최종강도 거동을 시뮬레이션 한 결과를 나타내고 있다. 열영향부를 고려하지 않는 Fig. 6의 조건에 비해 최종강도에서의 변형과 응력분포는 큰 차이를 나타내고 있다. 횡프레임 F1과 F4의 끝단 보강재에서는 트리핑 붕괴현상이 나타나며, F2와 F3사이의 판넬에서는 보강재의 웹에서 발생한 좌굴에 의한 붕괴를 나타내고 있다. 이와 동시에 보강재의 웹에서는 전단면적에 항복(yielding)이 급작스럽게 진행된다. 각 횡프레임을 기준으로 붕괴형태는 전체 좌굴 후 전체 붕괴하고 있으며, 국부적으로 좌굴도 나타나고 있다. 등가응력 평가의 경우 항복응력 분포는 웹 좌굴에 의한 붕괴가 나타나는 F2와 F3사이의 판넬에서는 보강재에서 주로 항복이 발생되며, F1과 F4의 끝단 판넬에서는 국부적인 트리핑이 나타나는 부분을 제외하고는 전체적인 요소들이 하중분담을 하고 있다.

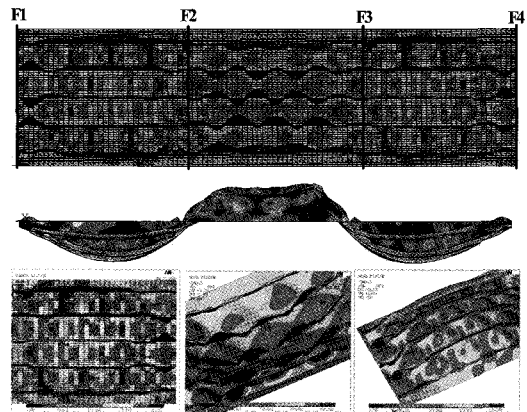


Fig. 7 Deformed shape on the ultimate strength of the aluminium stiffened panel considered effect of HAZ( $bp' = bs' = 15mm$ ) under axial compression

### 3.3 열영향부( $bp' = bs' = 25mm$ )를 고려

열영향부를 각각 25mm씩 고려한 조건에서의 응력-변형률 거동에 대한 결과를 아래의 Fig. 8에서 나타내고 있다. 초기좌굴 발생에 의한 좌굴응력은 약 70MPa이며, 좌굴 이후 보강재의 끝단에서 항복이 발생하여, 하중이 점진적으로 증가하게 되면, 면내강성은 급격하게 감소하게 된다. 또한, 최종강도 이후의 거동 또한 강성 감소가 크게 나타나는 거동의 특징을 나타내고 있다.

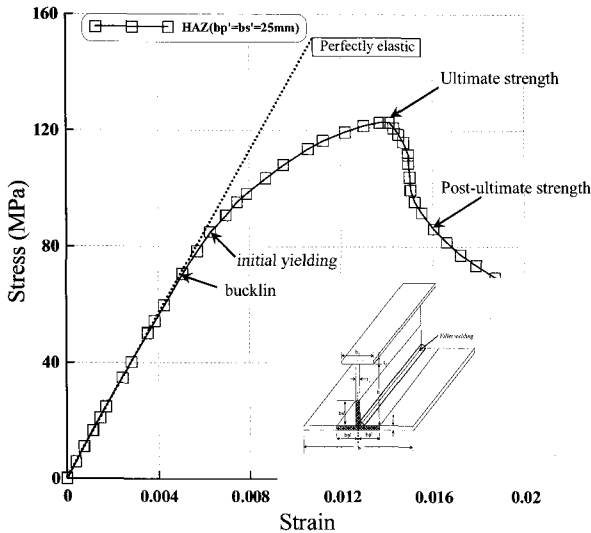


Fig. 8 Comparison of stress and strain curves of the aluminium stiffened plate considered effect of HAZ( $bp' = bs' = 25mm$ ) under axial compression

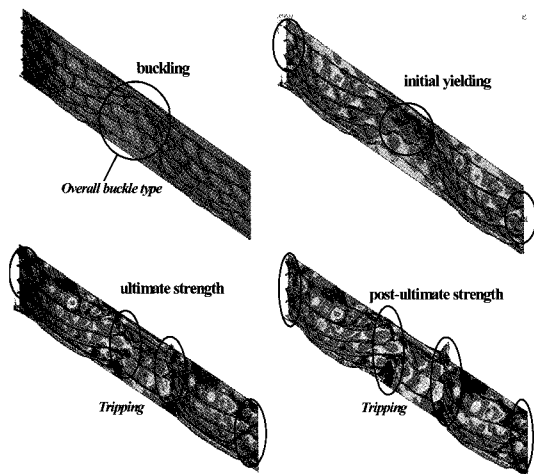


Fig. 9 Change of deformed shape according to increase the axial loading

Fig. 8 그래프의 응력-변형률 선도에서 압축하중 증가에 따른 각 스텝에서의 처짐 변화를 Fig. 9에서 나타내고 있다. 최초 좌굴지점에서는 횡프레임 F2와 F3사이의 판넬에서 전체 좌굴이 발생하고 있으며, 초기항복은 보강재의 끝단과 중앙부에 위치한 보강재의 웹에서 국부적으로 발생하고 있다. 압축

하중이 점진적으로 증가하게 되면, 면내강성의 감소와 더불어, 항복영역이 점진적으로 진행되게 되어 전체적인 하중분담 능력이 감소하게 된다. 또한, 최종강도 상태에서의 붕괴 특성은, F2와 F3 사이의 보강재에서 트리핑 붕괴가 발생하고, 이로 인하여 보강재에서 큰 처짐 및 응력이 집중되고 있다. 최종강도 이후의 거동은 이러한 트리핑 발생으로 인하여 면내강성이 급격하게 감소하며, 이와 더불어 처짐도 크게 증가한다.

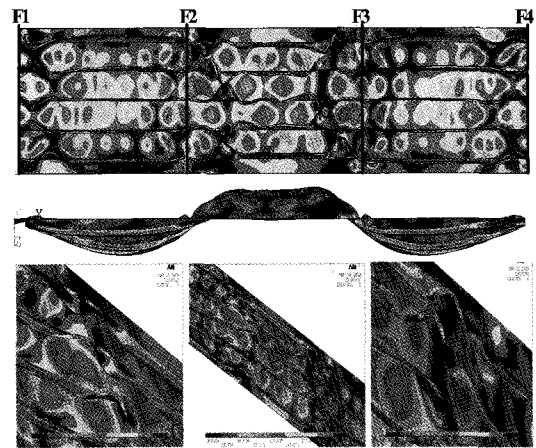


Fig. 10 Deformed shape on the ultimate strength of the aluminium stiffened panel considered effect of HAZ( $bp' = bs' = 25mm$ ) under axial compression

Fig. 10에서는 최종강도에서의 변형형상과 응력분포를 나타내고 있으며, 보강재에서 발생한 트리핑거동으로 인하여, 처짐과 항복이 동시에 크게 나타나고 있음을 알 수가 있다.

### 3.4 열영향부( $bp' = bs' = 35mm$ )를 고려

Fig. 11에서는 열영향부를 판의 폭 방향으로는 70mm, 보강재 웹 높이 방향으로는 35mm를 고려한 경우의 압축최종강도 상태에서의 결과를 나타내고 있으며, 25mm를 고려한 경우와 유사한 붕괴특성을 나타내고 있다.

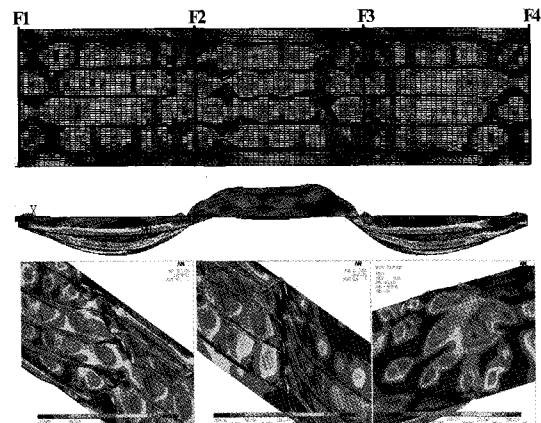


Fig. 11 Deformed shape on the ultimate strength of the aluminium stiffened panel considered effect of HAZ( $bp' = bs' = 35mm$ ) under axial compression

아래의 Table 2에서는 4가지 해석조건에 대해서 붕괴형태와 변형량에 대해서 정리하여 나타내고 있다.

Table 2 Results of finite element analysis

	Max.δ	Max.σ	Position	C_P
Model-1	27.41	260	F1-F2	Tripping
	without effect of HAZ			
Model-2	48.43	260	F2-F3	Tripping Web buckling
	$bp' = bs' = 15mm$			
Model-3	63.44	260	F2-F3	Tripping
	$bp' = bs' = 25mm$			
Model-4	65.74	260	F2-F3	Tripping
	$bp' = bs' = 35mm$			

where,

C\_P : Collapse pattern

Position : position of taking place maximum deflection and stress

Max.δ : Maximum deflection (mm)

Max.σ : Maximum equivalent stress (MPa)

각 해석조건에 따른 압축최종강도 상태에서의 최대변형량 (Max.δ)을 비교하면, 열영향부의 영역이 클수록 최대치짐은 증가하고 있으며, 특히 열영향부를 고려하지 않는 조건과 열영향부를 각각 15mm씩 고려한 경우에서 큰 차이를 보이고 있다. 최종강도 상태에서의 붕괴패턴은 보강재에서 발생한 트리핑거동이 주를 이루고 있으며, Model-2에서는 트리핑발생 구간(F1-F2, F3-F4)과 웹 좌굴(F2-F3)구간이 나타나고 있다.

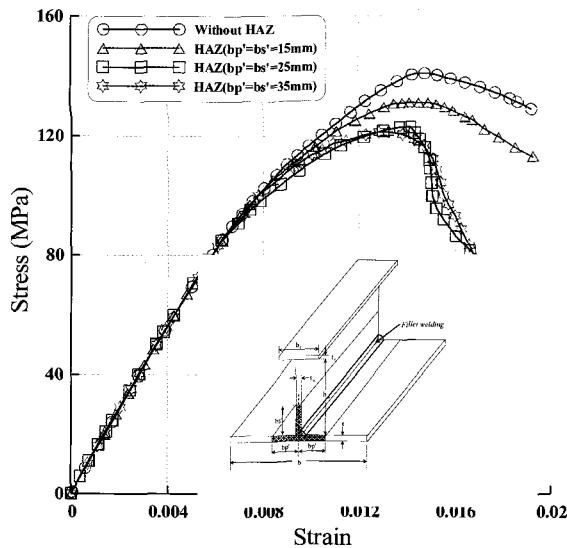


Fig. 12 Comparison of stress and strain curves varying the area of heat affected zone for aluminium stiffened plate under axial compression

본 논문에서 고려한 4가지의 해석모델의 응력-변형률 곡선을 Fig. 12에서 비교하여 나타내고 있다. 열영향부를 고려한 모델에서는 최종강도가 낮게 평가되고 있으며, 열영향부의 범위가 15mm 이상인 경우에는 초기항복 이후 면내강성 감소가 크게 나타나며, 25mm 이상의 열영향부를 고려한 경우라도, 구조거동은 큰 차이를 보이지 않고 있다. 따라서, 열영향부의 존재는 초기좌굴 시점 및 초기항복에 밀접한 영향을 가져오며, 압축최종강도 붕괴특성에 밀접한 관계를 갖고 있음을 알 수가 있다.

#### 4. 결론

최근 선박의 경량화, 대형화, 초 고속화를 실현하기 위하여, 알루미늄 합금재료가 폭넓게 사용되어 지고 있다. 특히, 초고속선(high speed craft)같은 경우에는 선체뿐만 아니라 선루까지도 알루미늄 합금재료를 사용하고 있다. 이러한 재료의 효율성과 장점의 적용성을 확대하기 위해서 재료의 구조 거동 특성 및 좌굴 및 붕괴거동에 대한 검토가 필수적이라고 하겠다. 본 연구에서는 알루미늄 보강 판넬 구조의 열영향부의 영역을 변화한 압축최종강도 비선형해석을 통하여, 좌굴거동 및 압축최종강도 특성에 대한 기초적인 연구를 수행하여, 다음과 같은 몇 가지 결론을 도출하였다.

- (1) 열영향부 Model-2에서는 압축최종강도에서 두 가지 붕괴 패턴을 나타내며, 열영향부를 고려하지 않은 경우와 아주 상이한 구조거동 결과를 나타낸다.
- (2) 열영향부의 범위가 클수록 낮은 응력수준에서 초기좌굴 및 초기항복이 발생하며, 초기항복 이후 면내강성 감소가 크게 발생한다.
- (3) 열영향부의 범위가 25mm 이상에서는 열영향부 범위가 늘어나더라도, 압축최종강도 거동은 크게 영향을 받지 않는다.
- (4) 열영향부의 범위가 크면(25mm 이상) 초기항복 이후 붕괴 형태가 역전되는 현상이 발생한다.

#### 후 기

이 논문은 2007년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임을 밝히며, 위 기관에 감사를 포함합니다. (과제번호 KRF-2007-359)

#### 참 고 문 헌

[1] 박주신, 고재용(2007), "횡하중을 고려한 선체보강판넬의 압축 붕괴거동에 관한 연구", 한국항해항만학회지, 제31권, 제3호, pp.234-245.  
 [2] Aalberg, A., Langseth, M., and Malo, K. A., (2001) "Ultimate strength of aluminium plates", Norwegian

- University of Science and Technology, Department of Structural Engineering.
- [3] ANSYS Inc(2000), "ANSYS theory manual - "Nonlinear buckling problem", Chapter 3, Part4, pp. 120-132.
- [4] Hopperstad, O. S, Langseth, M., Hanssen, L.,(1998), "Ultimate compressive strength of plate elements in aluminium", correlation of finite element analyses and tests, Thin-walled structure, 29, pp.31-46.
- [5] Paik, J. K. and Duran, A. (2004), "Ultimate strength of aluminium plates and stiffened panels for marine applications", Marine technology, Vol.41, No.3, pp.108-121.
- [6] Paik, J. K. et al.(2005), "Ultimate limit state design technology for aluminium multi-hull ship structures", Transactions SNAME, Vol.113, pp.1-36.
- [7] Paik, J. K. et al.(2006), "Mechanical buckling collapse testing on aluminium stiffened plate structures for marine applications, World maritime technology conference, 6-10 March, London, pp.1-15.
- [8] Rigo, P., Sarghiuta, R., and Estefen, S. et al.(2004), "Sensitivity analysis on the ultimate strength of aluminium stiffened panels", Marine structures, Vol.16, pp.437-468.
- [9] Zha, Y., Moan, T. (2001), "Ultimate strength of stiffened aluminium panels with predominantly torsional failure modes", Thin-Walled Structures, Volume 39, Issue 8, pp. 631-648.
- [10] Zha, Y., Moan, T., Hanken, E.(2000), "Experimental and numerical study of torsional buckling of stiffeners in aluminium panels", Proc. of 5th International Conference ISOPE, Seattle, May, pp. 249-255.

---

원고접수일 : 2007년 4월 6일

원고채택일 : 2007년 12월 28일