

알루미늄하니콤 샌드위치판의 거동에 관한 실험적 연구

이용욱*, 전민성**, 백점기***

An Experimental Study on the Behavior of Aluminum-Honeycomb Sandwich Panels

by

Yong W. Lee*, Min S. Chun** and Jeom K. Paik***

요 약

최근 초고속선을 비롯한 대형 경량구조물의 강도부재로 알루미늄하니콤 샌드위치판이 주목을 받고 있다. 이러한 새로운 구조를 설계에 도입하기 위해서는 이에 대한 각종 구조거동 특성을 알아야 한다. 본 연구에서는 알루미늄하니콤 샌드위치판에 대한 선형 탄성거동을 연구하기 위하여 정적 굽힘실험을 수행하였으며, 이 판의 좌굴 및 최종강도를 연구하기 위하여 1축 압축실험을 수행하였다. 또한, 하니콤 심재의 압괴 및 에너지흡수 특성을 분석하기 위하여 압괴실험도 수행하였다. 이러한 일련의 실험을 통하여 탄성학에 기초한 이론식과 각종 실험식들의 샌드위치 구조에의 유용성을 확인하고 나아가서 간단한 설계지침을 제시하였다.

Abstract

This paper experimentally investigates the characteristics of Al-honeycomb sandwich panels which are considered as a promising primary strength member of weight critical large structures. Some tests on the aluminum honeycomb panels subject to 3-point bending or uniaxial compression or crushing load are carried out. Based on the test results, linear elastic response, buckling/ultimate strength and crushing/energy absorption capacity are discussed. Some guidelines for design of aluminum honeycomb panels are given.

발 표 : 1995년도 대한조선학회 추계연구발표회('95. 11. 10.)

접수일자 : 1996년 2월 12일, 재접수일자 : 1996년 10월 4일

* 정회원, (주)세모 조선사업본부

** 학생회원, 부산대학교 조선해양공학과, 석사과정

*** 정회원, 부산대학교 조선해양공학과, 기계기술연구소 연구원

기호설명

A	하니콤 코어의 단위 요소에 대한 횡 단면적 ($= 4 b^2 \sin(\alpha/2)(1 + \cos(\alpha/2))$)
A_c	하니콤 코어의 단면적
b	단위 셀을 구성하는 코어벽 하나의 폭
D	하니콤 코어에서 단위 셀의 크기 ($= 2b \sin \alpha/2$)
E	재료 종탄성계수
E_{eq}	등가 탄성계수
E_j	면재의 종탄성계수
G	전단 탄성계수 ($= \frac{E}{2(1+\nu)}$)
G_c	코어의 전단 탄성계수
G_{eq}	등가 전단 탄성계수
H	압괴시 반과장
h	샌드위치판의 전체두께
h_c	코어의 높이
I_j	면재의 단면 2차모멘트
K	좌굴계수
L	보의 길이
M	굽힘모멘트
M_y	면재 표면에서 굽힘응력이 항복응력에 도달할 때의 굽힘모멘트
F	작용하중
P_y	면재 표면에서 굽힘응력이 항복응력에 도달할 때의 하중
P_u	알루미늄하니콤 샌드위치판의 압축 최종강도 (load)
P_{ys}	코어가 전단항복될 때의 하중
t	코어 알루미늄박 (foil)의 벽두께
t_a	코어의 알루미늄박간의 접착제 두께
t_{eq}	등가 판두께
t_j	면재의 두께

η	알루미늄하니콤 샌드위치판의 중량
W_c	하니콤 코어의 중량
W_j	양쪽 면재의 중량
α	하니콤 코어의 단위 셀에서 한 내각
β	판의 세장비 ($= \frac{b}{t_{eq}} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E_{eq}}}$)
γ	전단변형률
γ_c	코어의 전단변형률
δ	처짐량
δ_{bena}	굽힘변형에 의한 처짐량
δ_{sana}	샌드위치보의 중앙점에서의 처짐량
δ_{shear}	전단변형에 의한 처짐량
δ_{single}	단판보의 중앙점에서의 처짐량
δ_y	항복하중 ($p = p_y$)에서의 처짐량
δ_{ys}	전단 항복하중 ($p = p_{ys}$)에서의 처짐량
ϵ	변형률
ν	포아송 비
ρ_a	코어 접착제의 밀도
ρ_c	코어 전체의 밀도
ρ_j	면재의 밀도
ρ_{foil}	코어 알루미늄박의 밀도
σ_m	평균 압괴강도
σ_u	압축 최종강도 (stress)
σ_y	항복응력

1. 서론

현대의 수송수단은 갈수록 고속화 및 대형화를 요구하고 있으며, 이러한 요구를 만족시키기 위해서는 구조의 경량화가 필수적이다. 이러한 측면에서 최근 알루미늄합금구조가 주목을 받고 있으며, 항공기, 초고속 선박, 자동차, 고속전철을 비롯한 대형 경량 구조물의 구조부재로서 그 사용빈도가 급증하는 추세에 있다 [1]. 이는 기존의 강에 비해

알루미늄합금의 경우, 단위 중량당 강도가 월등히 우수하여 구조 경량화 측면에서 아주 유리함에 기인한다.

일본에서는 1990년초 이 구조방식을 사용하여 13미터급 해양조사선을 건조한 바 있으며 [2], 또한 1996년 현재 건조중인 전장 30미터이상, 선속 25노트 이상의 고속선의 경우 90%이상 알루미늄합금을 선각재료로 사용하고 있다 [3]. 이 밖에도 요트의 경우, 30미터급까지 하니콤 샌드위치구조를 적용하여 건조한 실적이 보고되어 있다.

그러나, 알루미늄합금은 강성이 강의 약 1/3에 불과하므로 대형구조물에 알루미늄합금재를 사용하기 위해서는 특별한 대책이 필요하다. 실제로 100미터를 넘는 초고속대형선에 알루미늄합금 단판 (single plate)을 사용할 경우 선각에 있어 과도한 처짐발생, 좌굴 등의 구조적 문제점이 있으며, 초고속화물선의 경우 선박의 크기가 200미터 이상까지 검토되고 있으나, 이러한 규모의 초고속대형선의 건조에 알루미늄 단판을 사용하여 선각을 건조하는 것은 아직까지 검증되지 않은 상태이다 [4].

Paik & Lee는 이러한 문제에 대한 대책을 검토하고, 초고속 대형선의 선각재료 및 구조방식으로서 알루미늄하니콤 샌드위치 구조의 유용성을 분석한 바 있다 [5].

그러나 지금까지 알루미늄하니콤 샌드위치판의 구조 거동에 대한 연구는 체계적으로 수행된 사례가 드문 실정이며, 실제 적용을 위한 설계지침이 미흡하여 설계자가 구조설계를 함에 있어 많은 어려움이 따르고 있다.

본 연구에서는 초고속 선박, 자동차, 고속 철도 차량, 항공기를 비롯한 대형 경량 구조물의 주요 부재로서 주목을 받고 있는 알루미늄하니콤 샌드위치판의 구조적 거동을 이론적 및 실험적으로 고찰하기 위하여 알루미늄하니콤 샌드위치판에 대하여 굽힘실험, 1축 압축실험 및 압괴실험을 수행하고, 탄성기초이론을 적용한 이론해석 결과와의 비교를 통하여 기존의 이론 또는 실험식의 알루미늄하니콤 샌드위치구조에의 유용성을 확인코져 한다.

2. 굽힘실험

본 연구에서는 알루미늄하니콤판 (Aluminum Honeycomb Panel, 이하 AHP)의 굽힘거동 특성을 분석하기 위해 3점 굽힘실험을 수행하였다.

2.1 시험편

실험에 사용한 AHP의 사양 및 형상은 각각 Table 1 및 Fig. 1과 같다. 시험편은 2개이며 코어의 벽두께 및 밀도를 변화시켰다.

Table 2 및 Table 3에서는 각각 알루미늄합금 A3003 하니콤 코어와 면재로 사용된 알루미늄합금 A5083H321의 물성치를 나타내고 있다.

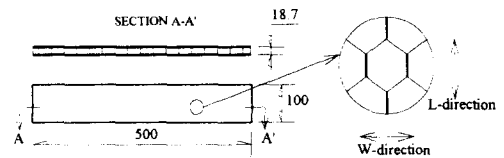


Fig. 1 Specification and profile for bending test specimen (unit:mm)

Table 1 Dimensions of 3-point bending test specimens

Items		3PB1	3PB2
Core	material	A3003H19	A3003H19
	cell size(mm)	6.35	6.35
	thickness(mm)	0.0381	0.0635
	height(mm)	12.7	12.7
	density(kg/m ³)	54.4	83.2
Facing	material	A5083H321	A5083H321
	thickness(mm)	3.0	3.0
Weight	grams	499.5	510.5

Table 2 Mechanical properties of A3003 honeycomb core at room temperature

Items	Core density(kg/m ³)	
	54.4	83.2
0.2% yield stress	19.4	19.4
Ultimate tensile strength	20.9	20.9
Elongation, %	4.0	4.0
Compressive strength	0.255	0.469
Compressive modulus	55.1	102.0
Shear strength, L	0.143	0.245
Shear strength, W	0.087	0.153
Shear modulus, L	26.5	44.9
Shear modulus, W	13.3	22.4
Modulus of elasticity	7,040	7,040

Note : unit of strength and modulus is kg/mm²

Table 3 Mechanical properties of facing material A5083H321

Young's mod. E(kg/mm ²)	Yield strength σ_y (kg/mm ²)	Tensile strength σ_t (kg/mm ²)	Elon. (%)
7,245	27.3	37.4	13

2.2 실험방법

본 실험은 부산대학교 조선해양공학과 구조실험실의 Linear Actuator Assembly System을 이용하여 수행하였다. 이 시험기는 컴퓨터에 의해 자동 제어되며, 하중과 진입량의 데이터가 자동으로 컴퓨터내의 파일에 기록된다.

Fig. 2에는 AHP의 3점 굽힘실험의 개념도를 보여주고 있다. 시험편은 접촉점 부위가 둥근(반경 20mm) 강체 지그로 3곳에서 지지되어 있으며, 실험시 하중속도는 약 0.05mm/sec를 유지시켰다.

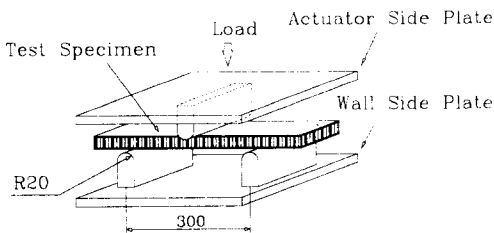


Fig. 2 Test setup for 3-point bending test

2.3 실험결과

하니콤코어의 밀도에 따라 차이가 있기는 하지만 작용하중이 약 600kgf 근처까지는 하중-변위 관계가 거의 직선적으로 변형하는 탄성거동을 보이며, 그 후에는 부하점 부근부터 소성변형이 생기기 시작하면서 강성이 저하되고, 소성변형이 진전하여 부하점 아래 있는 하니콤 셀이 소성붕괴한 후에 내력은 서서히 감소하기 시작하였다.

Fig. 3에는 이들 시험편에 대한 하중-처짐곡선을 나타내고 있다. 처짐이 약 2mm 근처에서 부하점 아래의 코어의 소성변형의 개시에 의해 강성이 저하함을 알 수 있으며, 다음으로 4mm 근처에서 부하점 부근의 코어가 완전히 소성붕괴되고 면재의 일부도 소성화 됨으로써 하중 증가가 급격히 감소함을 알 수 있다.

Fig. 3의 하중-처짐곡선으로부터, 하니콤 코어의 밀도가 클수록 소성변형을 시작하는 점이 지연되고 좌굴강도가 증가하여, 전반적으로 강도와 강성이 커짐을 알 수 있다. 즉, 코어의 밀도가 시험

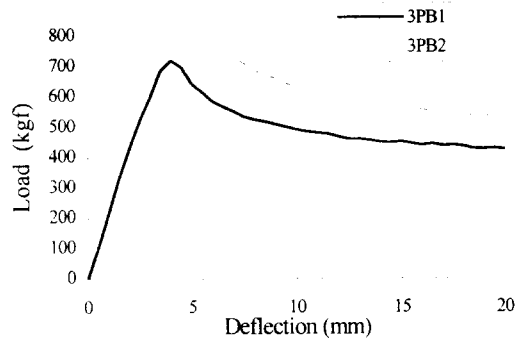


Fig. 3 Load-deflection curve for 3-point bending test



Photo 1 Deformed shape of aluminum honeycomb panel under 3 point bending

편 3PB1보다 53%증가할 때 (전체 중량은 2.2%증가), 초기 소성점은 하중이 약 500kgf에서 700kgf로 40%정도 커졌으며, 좌굴강도는 712kgf에서 804kgf로 약 13%가 증가하였다. 이로부터 하니콤 코어의 밀도를 증가시키는 것이 굽힘하중 작용시 AHP의 단위중량당 좌굴강도 및 처짐에 대한 저항력 (굽힘강성)을 향상시킬 수 있는 효과적인 방법중의 하나임을 알 수 있다. 또한, 소성 좌굴후 내력감소를 있어서도 하니콤 코어의 밀도가 큰 경우 (83.2 kg/m³)가 코어 밀도가 작은 경우 (54.4 kg/m³)에 비해 작음을 알 수 있다. 이것은 코어 밀도가 클수록 국부 구조의 붕괴가 구조 전체의 불안정성에 미치는 영향이 작음을 의미한다.

Photo 1은 실험후 시험편의 변형상태를 나타내고 있다. 이 사진에서 알 수 있듯이, 좌굴이 진전하면 중앙 하중 작용점 근처에서 코어의 압괴 (crushing)는 현저하며, 상대적으로 두꺼운 판두께를 지닌 면재는 부하부 바로 밑에서 꺾임이 발생할 뿐 국부적으로 움푹들어가는 현상은 발생하지 않았다.

2.4 실험결과와 이론적 분석

여기서는 이상의 실험결과에 대하여 탄성학에 기초한 이론해석을 수행한다.

해석을 단순화하기 위하여 굽힘모멘트 작용시 양쪽 면재는 면내력만을, 하니콤 코어는 수직전단력만을 견딘다고 가정한다. 따라서, 양 면재에서는 굽힘응력 (인장과 압축)만을 고려하며, 코어에서는 전단응력만을 고려한다. 이렇게 가정한 상태의 응

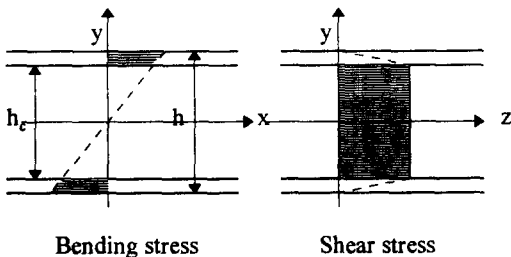


Fig. 4 Idealized bending and shear stress for aluminum sandwich beam

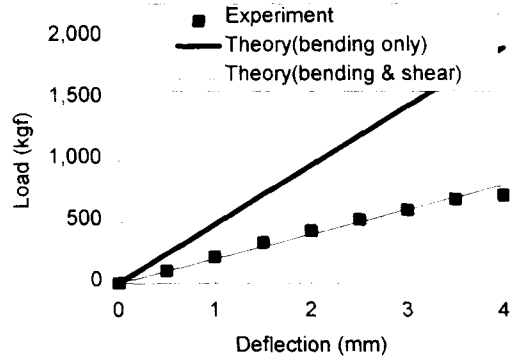


Fig. 5 Load-deflection relationship of specimen 3PB1 in the elastic zone

력분포를 Fig. 4에 나타내고 있다.

Fig. 4의 응력분포로부터 탄성영역에서의 하중과 중앙점에서의 처짐간의 관계식은, 초기 항복이 일어나기까지는 그 관계가 선형적이라 가정하고, 전단력에 의한 영향을 고려하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta = \frac{PL^3}{48 E_f I_f} + \frac{PL}{4 A_c G_c} \tag{1}$$

Fig. 5는 시험편 3PB1을 대상으로 변형 초기단계의 하중-중앙점에서의 처짐량에 대한 실험결과와 식 (1)의 첫 항 (굽힘응력에 의한 처짐)만을 고려한 계산결과 및 굽힘 및 전단에 의한 영향을 모두 고려한 경우의 계산결과를 비교하고 있다.

이 그림으로부터 굽힘에 의한 처짐만을 고려할 경우는 실험결과보다 2배정도 과소 평가되나, 굽힘에 의한 처짐과 전단에 의한 처짐을 모두 고려한 경우는 실험결과와 잘 일치함을 확인할 수 있다. 즉, 단판보 (single plate beam)에서 전단항의 기여는 $L/h > 10$ 이면 충분히 작은 양이 되므로 무시할 수 있지만, 샌드위치보에서는 코어의 전단탄성계수 G_c 가 작기 때문에 무시할 수 없음을 알 수 있다.

2.5 알루미늄 단판과의 굽힘거동 비교

이상과 같은 알루미늄하니콤 샌드위치보의 굽힘

거동에 대한 연구결과를 동일한 중량을 갖는 알루미늄 단판보와의 비교를 통해 샌드위치 구조의 성능을 검토 한다.

기준하중으로 샌드위치보의 면재의 표면이 항복할 때의 하중인 $P=690.8\text{kgf}$ 을 기준으로 한다. 이때, 하니콤 코어는 이미 $P=363\text{kgf}$ 에서 항복되어 소성변형 상태에 있지만 여기서는 편의상 오차가 작으므로 탄성상태에 있다는 가정하에서 비교한다.

먼저, 시험편 3PB1 (CASE I)을 대상으로 식(1)을 적용하면, 샌드위치보의 중앙점에서 처짐량은

$$\delta_{sand} = \frac{PL^3}{48 E_f I_f} + \frac{PL}{4 A_c G_c} = 3.48(\text{mm})$$

이며, 이 값은 실험에서 얻어진 처짐량 3.54mm와도 잘 일치한다. 이 때 이 샌드위치보의 지점간 중량을 계산하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} W &= W_f + W_c \\ &= \rho_f(2b t_f L) + \rho_c(b h_c) L \\ &= 499.5(\text{g}) \end{aligned}$$

이와 동일한 중량의 알루미늄 단판의 두께를 계산하면 6.25mm이며, 샌드위치보에서와 동일한 하중조건에서 처짐량을 계산하면 26.39mm이다. 이 계산과정에서 전단변형에 의한 처짐은 굽힘에 의한 처짐량의 0.1%수준으로 무시될 수 있음을 알 수 있으며, 이 두 경우를 비교하면, 동일하중에서 AHP의 처짐량이 알루미늄 단판의 13%임을 알 수 있다.

마찬가지 방법으로, 코어 밀도가 높은 시험편 3PB2에 대해서도 동일하중에 대한 처짐량을 계산하여 비교해 보면, AHP의 처짐량이 알루미늄 단판의 9.5%임을 알 수 있다 (CASE II).

또한, 시험편 3PB2와 동일한 면재와 밀도의 하니콤 코어를 사용하고 코어의 높이만 2배로 증가시킨 즉, $h_c=25.4\text{mm}$ 인 경우에 대해서도 동일한 작업을 반복하면, AHP의 처짐량이 알루미늄 단판의 4.4%가 된다 (CASE III).

Table 4에는 AHP와 알루미늄 단판에서의 처짐

Table 4 Flexural behavior comparison of AHP and aluminum single beam

Items		CASE I	CASE II	CASE III
Sandwich beam	facing	A5083 3t	A5083 3t	A5083 3t
	core density	54.4	83.2	83.2
	core height	12.7	12.7	25.4
	weight(g)	499.5	510.5	542.2
	deflection	3.48	2.34	0.90
Single beam	eq. thickness	6.25	6.40	6.79
	deflection	26.38	24.52	20.61
$\delta_{single} / \delta_{sana}$		7.58	10.48	22.9

량을 비교한 이상의 계산결과를 나타내고 있다.

위의 세 경우를 종합해 보면, 코어의 밀도가 증가하면 전단변형에 대한 저항력이 커지기 때문에 처짐이 감소하며, 코어의 높이가 증가하면 단면 2차모멘트가 증가하여 강성이 커지므로 처짐량은 더욱 감소한다는 것을 알 수 있다. 즉, AHP의 경우 하니콤 코어의 밀도와 코어높이를 증가시키면 동일한 중량을 갖는 알루미늄 단판에 비해 굽힘강성이 크게 증가하여 굽힘에 대한 구조적 성능이 우수함을 알 수 있다.

3. 압괴실험

다음으로 면의 수직하중에 의한 AHP의 압괴거동 특성을 분석하기 위해 압괴실험을 수행하였다.

3.1 시험편

실험은 코어의 높이와 밀도를 변화시키면서 세 가지 시험편에 대하여 수행되었으며, Table 5에는 본 실험에 사용된 알루미늄하니콤판의 사양을 나타내고 있다.

3.2 실험방법

본 실험에 사용된 실험장비는 굽힘실험에서와 동일하며, 실험시 하중속도는 0.05mm/sec.를 유지

시켰다. 또한, 실험은 코어가 초기 코어 높이의 2/3까지 압괴될 때까지 수행하였다.

Fig. 6에서는 압괴시험의 개념도를 보여 주고 있으며, 시험편 전면에 걸쳐 균일한 하중을 가하기 위하여 Actuator 전면에는 두꺼운 플랜지를 부착하였다.

Table 5 Dimensions of specimen for crushing test

Item	LP1	LP2	LP3
Core			
material	A3003H19	A3003H19	A3003H19
cell size	6.35	6.35	6.35
thickness	0.0381	0.0635	0.0381
height	25.4	12.7	12.7
density	54.4	83.2	54.4
Facing			
material	A5083H321	A5083H321	A5083H321
thickness	3.0	3.0	3.0

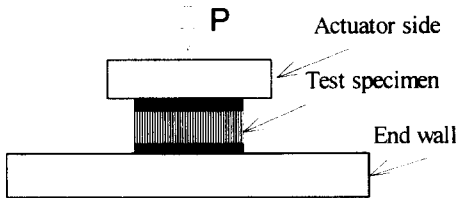


Fig. 6 Test setup for crushing test

3.3 실험결과

Fig. 7은 하니콤 코어의 정적 압축시험시 나타나는 전형적인 하중-변위곡선으로, 이 곡선하의 면적이 코어의 압괴에 의해 흡수된 에너지를 의미한다.

Table 6은 본 실험으로부터 얻은 실험결과를 나타내고 있으며, Fig. 8에서는 시험편 LP1, LP2 및 LP3에 대한 압축시험으로부터 얻어진 하중-변위곡선을 보여주고 있다. 이 그림으로부터 코어 밀도가 가장 큰 LP2의 경우에 압축강도 및 평균 압괴강도가 모두 가장 큼을 알 수 있으며, 굽힘시

험에서와는 달리 코어의 높이는 압축강도 및 압괴 강도에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있다.

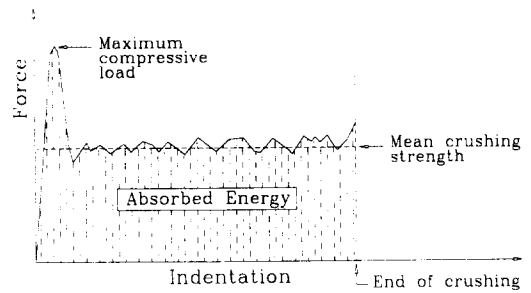


Fig. 7 A typical force-indentation curve on crushing for AHP core

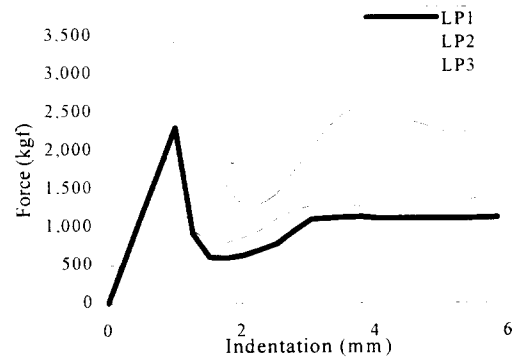


Fig. 8 Force-indentation curves of crushing test specimens

Table 6 Static crushing strength of AHP

Items Specimen	LP1	LP2	LP3
Core			
designation	3.4-1/4-15	5.2-1/4-25	3.4-1/4-15
height,mm	25.4	12.7	12.7
Full crush			
displacement,mm	12.27	8.02	5.49
percent crushing	58.9	63.1	59.5
crushing strength	11.0	22.9	13.3

1) Full crushing represents the condition where the load displacement curve rises denoting densification.

3.4 실험결과의 이론적 분석

Table 7에는 본 실험에 사용된 알루미늄하니콤 코어 A3003과 동일한 재원에 대하여, 시바가이거사에서 수행된 하니콤 코어의 정적 압괴 실험결과 [6]와 Wierzbicki에 의해 제안된 다음의 간이식 [7]으로 부터 계산된 결과를 나타내고있다.

$$\sigma_m = 16.56 \sigma_o (t/D)^{5/3} \quad (2)$$

여기서, σ_o 는 재료의 항복강도를 사용하였으며, Wierzbicki의 간이식을 사용한 계산 결과는 밀도가 작은 경우 (54.4kg/m³)에서는 19%가량 실험치보다 작게 추정되었으나, 밀도가 큰 경우 (83.2 kg/m³)에서는 실험치와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

본 실험에서 수행된 코어의 양쪽에 면재가 접착되어 있는 AHP 시험편에 대한 정적 압괴실험 결과 (Table 6)를 양쪽 면재가 없는 하니콤 코어 자체만의 정적 압괴실험 결과 (Table 7)와 비교하면, AHP에 있어서의 압괴강도가 큼을 볼 수 있는데, 이는 접착에 의해 조립된 양쪽 면재의 영향인 것으로 판단된다.

이로부터, AHP내의 코어가 면재없이 단독으로 존재할 때의 코어보다 더 많은 에너지를 흡수할 수 있음을 예상할 수 있으며, 그 차이는 코어의

Table 7 Static crushing strength of aluminum honeycomb core A3003

Items	Core designation ¹⁾	5.2-1/4-25	3.4-1/4-15
Core density		83.2	54.4
Crushing strength, experiment		16.3	8.2
Crushing strength, calculated		16.1	6.9

- 1)Honeycomb designation of aluminum is defined as cell size and wall thickness, both in inches. It is designated by: density-cell size-gage (web thickness in mils).
- 2)The unit of strength is kg/cm² and the unit of density is kg/m³.

특성에 따라 달라진다고 볼 수 있다. 이러한 경향은 Goldsmith & Sackman [8]의 실험결과에서도 확인된 바 있으며, 실제로 면재의 두께 및 하니콤 코어의 밀도에 따라 샌드위치판의 압괴강도가 코어 자체만의 압괴강도의 1.1배에서 4배까지 나타났다.

3.5 하니콤 코어의 압축 및 압괴강도

AHP 구조를 완충재로서 사용할 경우, 에너지 흡수에 기여하는 것은 이 구조요소중의 하니콤 코어이므로, AHP의 완충메카니즘을 파악하기 위해서는 이 요소의 특성을 잘 알 필요가 있다.

3.5.1 하니콤 코어의 밀도

Fig. 9는 하니콤 구조의 단위요소를 나타낸 그림으로, 이 때 코어의 밀도는 다음과 같다.

$$\rho_c = \frac{4bt\rho_{foil} + b(t_a/2)\rho_a}{2b(1 + \cos\pi/3)(t + t_a/2 + b\sin(\pi/3))} \quad (3)$$

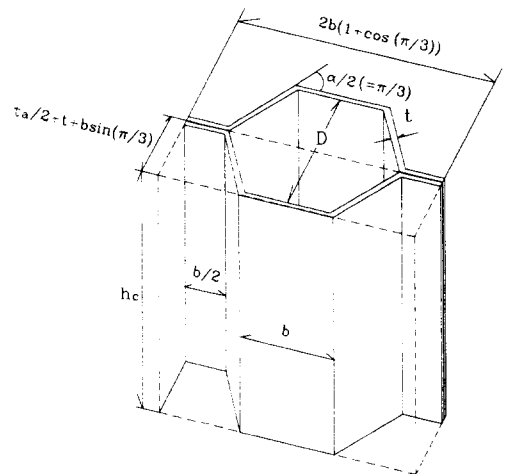


Fig. 9 Nomenclature: Geometry of the honeycomb core

Kunimoto & Mori [9]는 접착제를 고려하지 않고 코어의 밀도를 계산한 반면, Ogawa & Okazaki [10]는 접착제를 고려하여 계산하였다. 식

(3)은 후자와 같이 접착제를 고려하였으며 그 결과 하니콤 코어의 밀도를 훨씬 정도 높게 예측할 수 있었다.

식 (3)를 사용하여 본 연구에서 시험편으로 사용하고 있는 하니콤 코어에 대한 밀도를 계산한 결과를 Table 8에 나타내었으며, 접착제의 영향을 고려하기 전에 30%정도까지 과소평가되던 것이 이를 고려한 결과 계산치와의 오차를 ±2% 이내로 줄일 수 있었다.

Table 8 Density of Honeycob core

Items Specimen	3.4-1/4-15	5.2-1/4-25
Cell size	6.35	6.35
Length of adhered surface	3.67	3.67
Density, measured	54.4	83.2
Density, calculated	55.46	81.82
Error of density(%) ¹⁾	1.95	-1.65

1)Error of density = $(\rho_{\text{measured}} - \rho_{\text{calculated}}) / \rho_{\text{measured}} \times 100$

3.5.2 하니콤 코어의 압축 최종강도

각 코어 벽면이 재료의 항복응력이하에서 좌굴한 후, 유효폭상의 응력이 항복응력에 도달할 때 최대 압축력 (P_u)에 도달한다고 가정하고, Marguerre의 유효폭 식을 적용하면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$P_u = 8bt^3 \sqrt{\frac{K \pi^2 E \sigma_y^2}{12(1 - \nu^2)}} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (4)$$

또한, Fig. 9에 나타난 바와 같이 하니콤 코어의 단위 요소에 대한 횡단면적은 아래와 같다.

$$A = 4b^2 \sin(a/2)(1 + \cos(a/2)) \quad (5)$$

따라서, 코어의 최대 압축강도는 식 (4)와 식 (5)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_u = \frac{8bt}{A} \sqrt{\frac{K \pi^2 E \sigma_y^2}{12(1 - \nu^2)}} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (6)$$

Fig. 10은 AHP 및 하니콤 코어의 코어 밀도와 의 상관관계를 나타내는 그림으로 ●표시된 데이터는 AHP의 실험데이터이며 (LP2 & LP3), 실선으로 표시된 하니콤의 압축 최종강도는 식 (6)을 사용해서 얻어진 결과이다.

코어자체만의 압축강도에 있어서는 코어 밀도가 83.2kg/m³인 경우를 제외하고는 전반적으로 계산치와 잘 일치함을 알 수 있으며, 또한, 코어의 밀도가 증가하면 압축 최종강도는 크게 증가함을 알 수 있다.

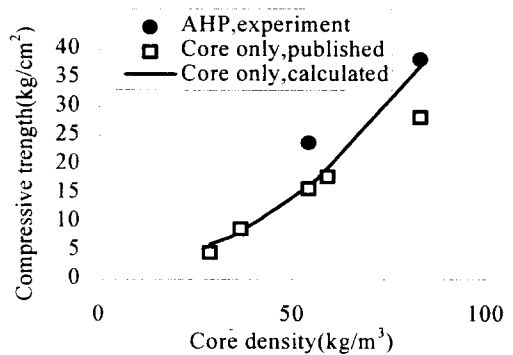


Fig. 10 Density dependence of compressive strength

3.5.3 하니콤 코어의 평균 압괴강도

구조물의 에너지 흡수능력은 평균 압괴강도에 의해 대표될 수 있으며, 이는 코어 자체의 항복응력과 기하학적 치수 (셀의 크기, 벽두께 등)에 직접적으로 의존한다. 물론, 이러한 항복응력과 기하학적 치수에 의해서 하니콤 코어의 밀도가 결정되기 때문에 결국, 평균 압괴강도는 코어 밀도에 의존하게 되며, 이러한 관계를 Fig. 11에 나타내었다.

Fig. 11의 하니콤코어의 압괴강도에 대한 계산치는 Wierzbicki가 제안한 공식에 따라 하니콤 제조업체인 시바가이기사사의 하니콤 코어 A3003의 물성치와 제원을 기초로 계산한 결과이다.

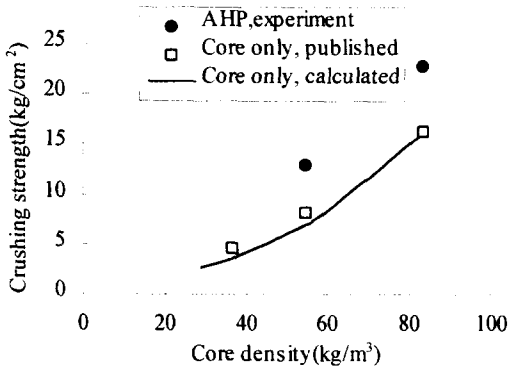


Fig. 11 Density dependence of crushing strength

3.5.4 하니콤 코어의 에너지 흡수성

도입 초기에는 주로 항공산업에서 전단하중을 감당하는 역할만을 수행해오던 하니콤 코어가 열차, 선박, 고성능 자동차 및 건축자재로서 그 사용범위가 확대되고 있으며, 최근에는 이 하니콤 코어의 에너지 흡수능력이 손상허용 설계와 관련된 여러 새로운 분야에 이용되기 시작하였다. 그 결과, 하니콤 코어에 대한 에너지 흡수특성에 대해서 동적 및 정적으로 다수의 연구가 수행되어 왔다 [7- 9].

Table 9 Absorbed energy of AHP

Items Specimen	LP1	LP2	LP3
Core			
designation	3.4-1/4-15	5.2-1/4-25	3.4-1/4-15
height, mm	25.4	12.7	12.7
Full crush			
displacement, mm	14.96	8.02	5.49
percent crush, %	58.9	63.1	59.5
mean crush streng.	11.0	22.9	13.3
energy, absorbed	16,040	17,180	9,412
relative energy, %	170	183	100

Note : units of strength and energy are kg/cm² and kg. mm

본 연구에서는 알루미늄하니콤 샌드위치판에 대하여 정적 압괴실험을 수행하였으며, 그 결과는 Table 9와 같다. 동일한 코어 높이를 갖는 시험편 LP2와 LP3를 비교해 보면 코어 밀도가 약 53%증

가할 때 이 구조가 흡수한 에너지는 약 83% 증가함을 알 수 있다.

한편 동일한 코어 밀도에서 코어 높이만을 2배로 증가시킨 경우, 즉 시험편 LP1와 LP3를 비교하면 흡수 에너지는 70%증가하였으므로 전자에서와 마찬가지로 LP3에 대해서 53%만큼만 중량을 증가시킬 경우는 약 54%정도 흡수 에너지가 증가함을 알 수 있다.

따라서, 고려대상 구조의 목적상 에너지 흡수특성이 중요한 시스템인 경우, 하니콤 샌드위치 구조에서는 동일한 중량조건이라면, 코어 높이보다는 코어의 벽두께를 증가시키거나 셀크기를 작게 하여 코어 밀도를 증가시키는 것이 유리함을 알 수 있다.

4. 1축 압축실험

선체구조는 기본적으로 판 또는 보강판으로 구성된 전형적인 상자형 판구조물이며, 선체 구조설계시에 구조강도 측면에서 가장 기본적으로 검토해야할 사항은 선체자중, 적재화물, 중량분포 및 파랑 외력분포 등에 의해 유발되는 중굽힘모멘트에 선각거더가 충분히 견딜 수 있는지의 여부를 확인하는 것이다. 이 경우 가장 중요한 것은 갑판

Table 10 Dimensions of uniaxial compression test specimens (unit:mm)

	UDC11C12	UDC11C21	UDC11C22	UDC12C11
Dimension				
a	500	500	500	500
b	500	500	500	250
h	31.4	18.7	18.7	31.4
Skin				
material	5083H321	5083H321	5083H321	5083H321
thickness	3.0	3.0	3.0	3.0
Core				
material	A3003H19	A3003H19	A3003H19	A3003H19
thickness	0.0381	0.0635	0.0381	0.0381
height	25.4	12.7	12.7	12.7
density	54.4	83.2	54.4	54.4
cell size	6.35	6.35	6.35	6.35

및 선저외판의 압축강도이다.

선체의 재질이 강일 경우, 판 또는 보강판에 대한 압축 최종강도에 대해서는 이론적, 수치적 방법들이 다수 제시되어 있으며, 실제로 이 방법들을 적용하면 판 및 보강판의 압축 최종강도를 매우 높은 정도로 해석할 수 있고 이러한 판이 면내 압축하중의 증가와 함께 최종강도에 도달하기까지의 복잡한 비선형거동에 대해서도 잘 규명되어 있다 [11-15].

AHP와 같은 샌드위치구조의 경우, 구조자체가 I형재와 같은 구조적 거동을 보이기 때문에 보강판 구조가 아닌 단순 샌드위치판 구조를 채택한다.

따라서, 본 연구에서는 보강재가 없는 AHP에 대해서 1축 압축실험을 수행하였다.

4.1 시험편

본 실험에 사용될 AHP의 사양은 Table 10과 같으며, 이 판의 면재는 초고속선의 선각재료로 주로 사용되고 있는 알루미늄합금 5083H321을 공통으로 사용하였고, AHP의 크기도 500×500(mm)와 500×250(mm)의 두 가지에 대해서 실험을 수행하였다.

본 실험에 사용한 코어의 기계적 물성치는 Table 2와 같으며, 면재의 기계적 물성치는 Table 3과 같다.

시험편은 단순지지 조건이 되도록 하기 위해 하중면에 플랜지를 부착하였고, 비하중면에는 강체 지그를 설치하였다.

4.2 실험방법

본 실험은 부산대학교 조선해양공학과 구조실험실의 100톤 만능시험기를 이용하여 수행하였다.

Fig. 12에는 AHP의 1축 압축실험의 개념도를 보여주고 있다. 하중은 약 1mm/min.의 속도를 유지하면서 준정적으로 가하였으며, 실험이 진행되는 동안 height gauge와 dial gauge를 사용하여 측면위량과 판의 처짐량을 9개소에서 측정하였다.

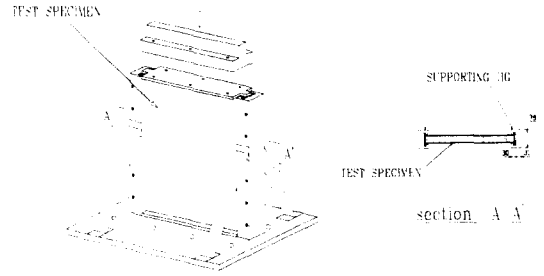


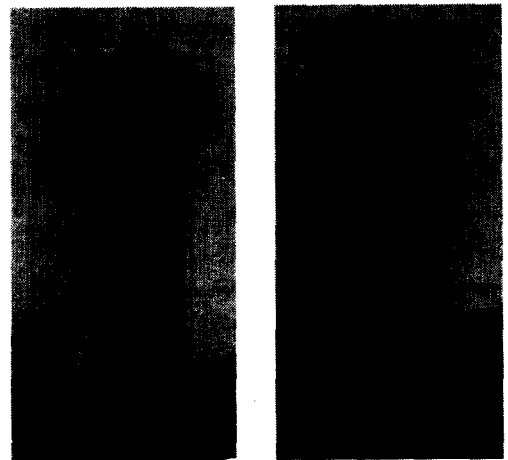
Fig.12 Test setup for uniaxial compression

4.3 실험결과

Photo 2는 최종강도에 도달한 후의 대표적인 시험체의 변형상태를 보여주고 있다.

시험편 UDC11C11은 실험중에 시험편의 비하중면의 끝단에 평철을 스폿 용접한 결과, 하중면에서 가해지는 압축력에 견디지 못하고 용접부에 균열이 발생하여 압축 최종강도치가 매우 작은 값을 나타내었다. 따라서 이 시험편은 실험결과분석에서 제외시켰다.

Photo 2의 (a)는 시험편 UDC11C12를 종방향으로 압축하였을 때 붕괴후 파손상태를 보여주는 사진으로서, 압축력에 의해 발생하는 횡방향의 분력이 면재와 코어와의 접착력보다 커지게 되면, 두



(a)UDC11C12 (hc=25.4) (b)UDC11C21 (hc=12.7)

Photo 2 View of specimens after collapse

접착부중 접착력이 작은 쪽에서부터 박리현상 (delamination)이 발생하며, 중앙의 하니콤 코어는 전단계수가 면재에 비해 아주 작기 때문에 압축력에 의해 반대쪽 면재쪽으로 휘게된다. 양 면재는 붕괴 후에도 변형전의 코어 중심선에 거의 대칭을 유지하면서 변형한다.

Photo 2의 (b)는 시험편 UDC11C21에 대한 압축실험결과를 보여주는 사진으로 이는 Photo 2의 (a)와는 다른 양상으로 파괴됨을 볼 수 있다. 즉, 코어 중심선에 대해서 양 면재가 면재에 수직방향으로 밖으로 향하는 처짐이 발생하는 것이 아니고, 양 면재가 코어와 같이 일체로 변형을 일으키는 모드, 즉 일반적으로 박판에서 흔히 볼 수 있는 변형패턴을 보여 주고 있다.

Fig. 13은 압축강도에 미치는 코어 높이의 영향을 보기 위한 그림으로, 시험편 UDC11C12와 UDC11C22는 코어 높이를 제외한 모든 제원이 동일하다. 즉, 전자의 경우가 후자에 비해 코어 높이가 2배이다.

실험결과 UDC11C12는 약 74톤의 하중에서 붕괴하였으며 UDC11C22는 전자의 절반미만인 약 34톤에서 붕괴하였다.

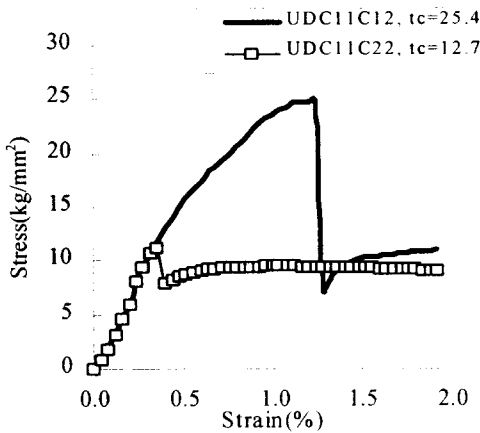


Fig. 13 Stress-strain relation showing the influence of core thickness

Fig. 14는 하니콤 코어의 밀도가 압축강도에 미치는 영향을 분석하기 위해 수행된 실험의 결과이

며, 실험결과 코어 밀도가 높은 경우 (UDC11C21)가 낮은 경우(UDC11C22)에 비해 최종강도가 약 12% 증가함을 알 수 있다.

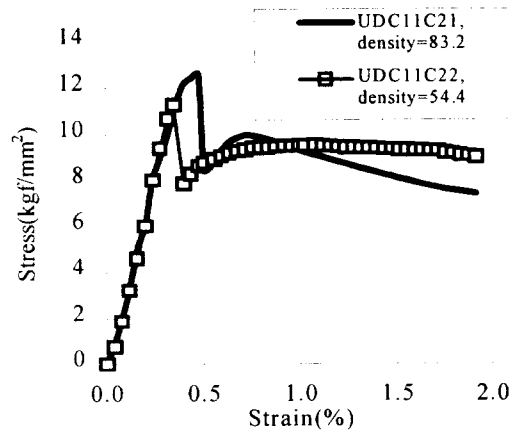


Fig. 14 Stress-strain relation showing the influence of core density

또한, AHP의 종횡비가 압축강도에 미치는 영향을 분석하기 위해 시험편 UDC11C12 (a/b=1)와 UDC12C11 (a/b=2)에 대한 실험결과를 Fig. 15에 나타내었다.

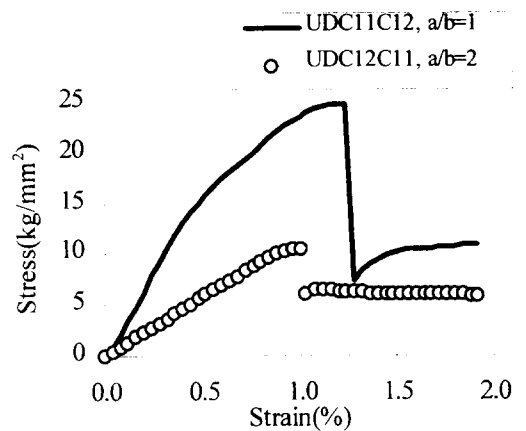


Fig. 15 Stress-strain relation showing the influence of aspect ratio

4.4 실험결과의 이론적 분석

4.4.1 1축 압축력을 받는 AHP의 거동

Fig. 16의 실선은 1축 압축력을 받는 이상화된 박판의 하중-변위 곡선을 나타낸다. 하중이 증가하면 판요소는 좌굴 (elastic bifurcation)하게 되고, 이 후 면내강성은 저하하는 좌굴후 거동을 보이게 된다. 계속하여 하중을 증가시키면 판요소는 최종 강도에 도달한 후 붕괴되어 변위의 증가에 따라 하중이 급격히 감소하는 붕괴후 거동을 보인다. 그러나, 앞서의 그림에서 나타난 바와 같이 1축 압축력을 받는 AHP는 박판과는 달리 명확한 좌굴점이 존재하지 않음을 볼 수 있다.

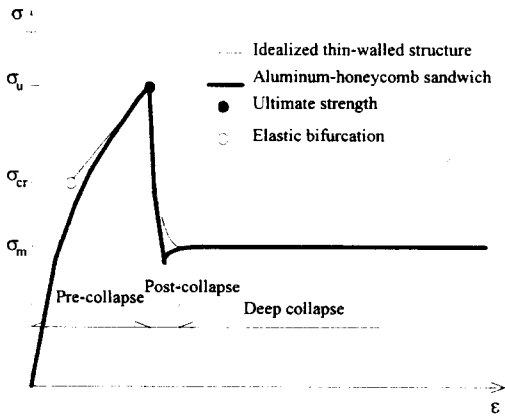


Fig. 16 Typical stress-strain curve for AHP

4.4.2 AHP의 최종강도

주변 단순지지된 사각형판의 최종강도 계산법은 크게 해석적 방법, 수치적 방법 및 근사적 방법으로 분류할 수 있다.

강에 대해서는 해석적 방법을 통한 최종강도 계산이 가능하나, AHP에 대해서는 아직까지 이 방법을 통한 최종강도 계산법이 개발되어 있지 않고, 또한 FEM과 같은 수치적 방법을 사용하면 AHP의 거동을 계산할 수 있으나, 이 하니콤은 수많은 셀로 구성되어 있으며, 이러한 구조의 거동을 수치적으로 파악하기 위해서는 한 개의 셀을 구성하는 6개의 판 각각을 미소요소로 분할하여 계산을 수행하여야 함으로, AHP의 거동을 기존의 범용

FEM을 사용하여 수치적으로 해석하기 위해서는 많은 계산시간이 많이 소요되어 실용적이지 못하다고 판단된다.

본 연구에서는 샌드위치 구조에서 흔히 사용되고 있는 등가강성이론을 사용하여 [1, 2] 등가 판 두께와 등가 탄성계수를 재평가하고, 이렇게 얻어진 데이터를 이용하여 기존의 판의 압축 최종강도 평가에 있어서 높은 정도를 보여준 간이 실험식 [16]을 적용하여 최종강도를 계산한다.

(1) 등가강성이론

샌드위치 구조의 강도계산 및 설계를 간편하게 수행하기 위하여 이 샌드위치 구조와 등가의 강성을 갖는 가상의 단판구조를 생성하고, 이 단판구조에 대한 구조적 평가를 수행하면, 인장에 대해서는

$$2 t_f E_f = t_{eq} E_{eq} \tag{7}$$

굽힘에 대해서는

$$\frac{1}{12} [(h_c + 2t_f)^3 - h_c^3] E_f = \frac{1}{12} t_{eq}^3 E_{eq} \tag{8}$$

전단에 대해서는

$$2 t_f G_f = t_{eq} G_{eq} \tag{9}$$

가 성립한다.

이상의 세 식을 연립하여 풀면, 다음과 같은 등가의 t_{eq} , E_{eq} 와 G_{eq} 가 얻어진다.

$$\begin{aligned} t_{eq} &= \sqrt{3 h_c^2 + 6 h_c t_f + 4 t_f^2} \\ E_{eq} &= 2 t_f E_f / t_{eq} \\ G_{eq} &= 2 t_f G_f / t_{eq} \end{aligned} \tag{10}$$

(2) 간이식을 이용한 압축 최종강도 평가

1축 압축력을 받는 주변 단순지지 AHP의 압축 최종강도를 추정하기 위하여, 위에서 구한 등가

판두께와 등가 탄성계수를 적용하여 보강재가 없는 경우에 대한 아래의 간이 실험식 [16]에 대입하여 구한다.

$$\sigma_u / \sigma_o = (0.995 + 0.170 \beta^2)^{-0.5} \quad (11)$$

여기서, $\beta = \frac{b}{t_{eq}} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E_{eq}}}$ 이다.

그런데 Fig. 17에서 보는 바와 같이 시험편 UDC11C12 ($a/b=1, h_c=25.4mm$)인 경우를 제외하고는 등가강성이론을 적용하여 간이 실험식에 의해 평가한 결과가 실제보다 최대 70%이상까지도 과대평가 함을 알 수 있다. 이는 등가강성이론을 적용하는 과정에서 최종강도에 영향을 미칠 수 있는 샌드위치판의 박리와 같은 현상을 고려할 수 없기 때문이다.

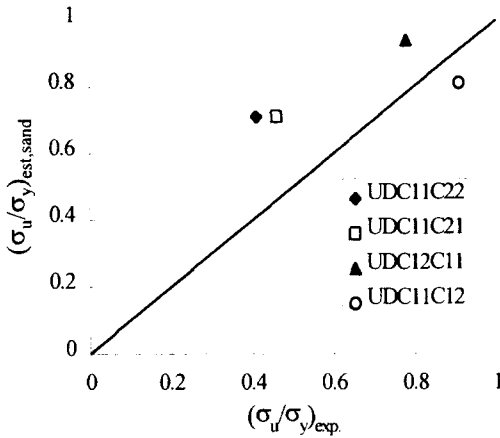


Fig. 17 Comparison of ultimate strengths obtained by experiments and empirical formula using equivalent rigidity theory

Fig. 18은 샌드위치 시험편과 동일한 중량을 갖는 등가의 알루미늄 단판구조에 대해서 간이 실험식을 적용하여 최종강도를 계산한 결과와 실험치를 비교한 그림이다. 여기서 알 수 있는 바와 같이 동일한 중량비에서 코어 높이가 작을 경우 (UDC11C21, UDC11C22)의 계산결과는 실험치와 상당히 근접한 결과를 얻을 수 있으며, 코어 높이가 증가하여 강성이 증가할 경우 (UDC11C12)에

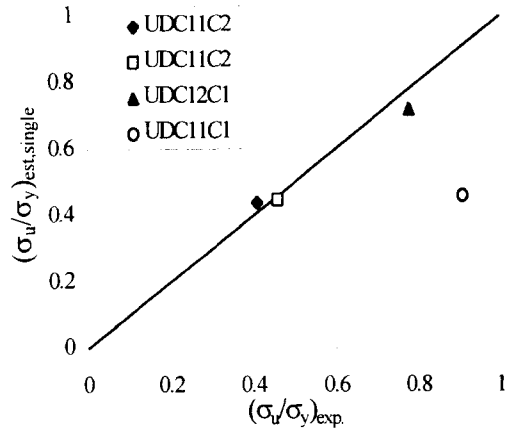


Fig. 18 Comparison of ultimate strengths obtained by experiments and empirical formula for equal weight of single plate

는 등가중량에 의한 단판구조의 최종강도 계산치가 실제에 비해 50%이상 과소 평가함을 알 수 있다.

Table 11은 Fig. 17과 Fig. 18의 결과를 동시에 비교한 데이터로서, 이 비교표로부터, 코어 높이가 25.4mm에서는 등가강성을 이용한 계산치가 실험치에 근접한 결과를 얻을 수 있고, 코어 높이가 12.7mm에서는 등가중량에 의한 계산치가 실험치에 근접한 결과를 나타냄을 확인할 수 있다.

Table 11 Comparison of ultimate strength of AHP

Specimen	UDC11C12	UDC11C21	UDC11C22	UDC12C11
Items	$a/b=1$ $h_c=25.4$	$a/b=1$ $h_c=12.7$	$a/b=1$ $h_c=12.7$	$a/b=2$ $h_c=25.4$
$(\sigma_u / \sigma_y)_{est, sand}$	0.81	0.71	0.71	0.94
$(\sigma_u / \sigma_y)_{est, singl}$	0.46	0.45	0.44	0.72
$(\sigma_u / \sigma_y)_{exp}$	0.91	0.46	0.41	0.78

이를 종합하여 볼 때 샌드위치 구조를 단판구조로 대체하여 최종강도를 평가함에 있어 등가강성이론 및 등가 중량하의 계산 결과에 대한 적용상의 한계점을 찾기 위해서는 더 많은 실험을 수행

하여야 하며, 샌드위치판의 전 영역에 대해서 신뢰성 있게 적용할 수 있는 평가식의 개발이 요구된다.

4.4.3 샌드위치구조의 파괴모드

Fig. 19는 AHP와 같은 샌드위치구조의 파괴모드를 나타내고 있다 [17].

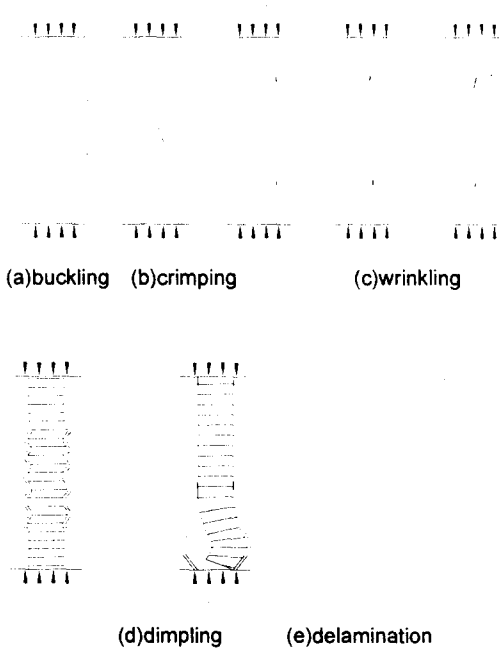


Fig. 19 Failure mode of a sandwich structure

본 연구에서의 실험결과, 코어의 높이가 작은 경우에는 Fig. 19의 (a)와 같은 일반적인 좌굴패턴을 보여 주었으며, 코어의 높이가 큰 경우에는 면재가 판 중심에 대해서 대칭적으로 박리되는 Fig. 19의 (e)와 같은 파괴모드를 나타내었다.

이러한 두 가지 파괴모드를 나타낸 대표적인 시험편 UDC11C12와 UDC11C21 각각에 대하여, 압축하중의 증가에 따른 처짐 패턴의 변화를 살펴보기로 한다.

그림 (Fig. 20~ Fig. 25)상의 x1, x2 및 x3는

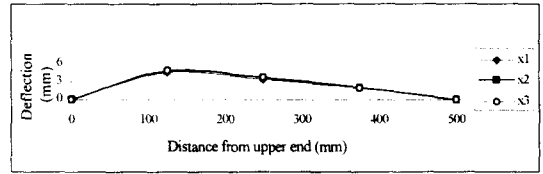


Fig. 20 Deflection profile of UDC11C12 before collapse

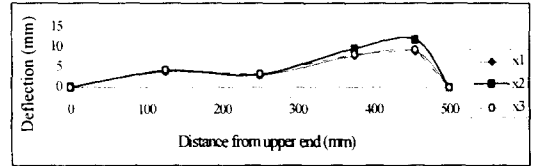


Fig. 21 Deflection profile of UDC11C12 at collapse

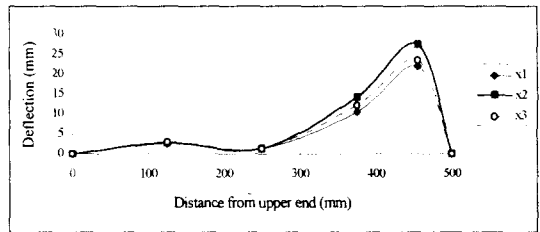


Fig. 22 Deflection profile of UDC11C12 after collapse

시험편 좌측 끝으로부터 125, 250 및 375mm 떨어진 위치를 의미한다. 즉, x2는 판의 종방향의 중심선을 의미하며, x1과 x3는 판의 중심으로부터 좌우측으로 1/4되는 위치를 말한다. 또한, 그림상의 횡축은 판의 상단으로부터의 거리를 말하며, 종축의 처짐량은 판에 대해서 수직방향으로의 처짐량을 의미한다.

(1) UDC11C12 ($h_c=25.4\text{mm}$, $a/b=1$)

이 경우는 코어 높이가 큰 시험편에 해당하는 것으로 중횡비가 1인 경우이다.

Fig. 20~22에서는 이 시험편에 대한 하중 증가에 따른 처짐량의 변화를 보여주고 있다. 이 그림들을 살펴보면, 붕괴전에는 박판에서와 유사한 파손형태를 보이다가 (Fig. 20), 하중이 증가하면 상단으로부터 450mm 근처에서 처짐량이 급격히 증가하고 (Fig. 21), 붕괴후에는 내력이 급격히감

소하여, 처짐량이 증가하여도 내력은 증가하지 않는다 (Fig. 13/ Fig. 22).

이 시험편에서는 박판에서와는 달리 판의 중심에 대해서 대칭적으로 면재가 박리되면서 파손이 발생하였다 (Photo 2).

(2) UDC11C21 ($h_c = 12.7\text{mm}$, $a/b = 1$)

Fig. 23~25는 이 시험편에 대한 하중증가에 따른 처짐량의 변화를 보여주고 있다.

이 시험편의 경우에는 전체적으로 박리현상이 발생하지 않았으며, 코어가 양쪽 면재와 일체로 거동하였다.

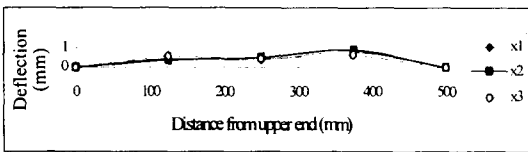


Fig. 23 Deflection profile of UDC11C21 before collapse

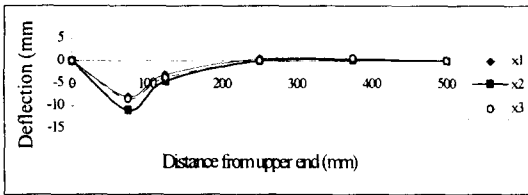


Fig. 24 Deflection profile of UDC11C21 at collapse

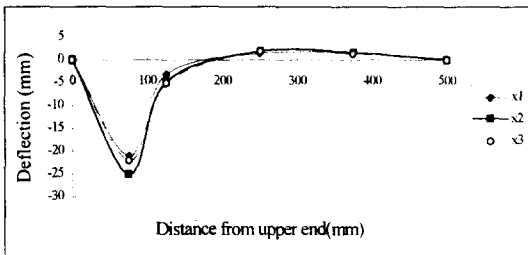


Fig. 25 Deflection profile of UDC11C21 after collapse

5. 결론

본 연구에서는 초고속선의 선각에서와 같이 경

량화가 요구되는 구조의 강도부재로서 최근 주목을 받고있는 알루미늄하니콤 샌드위치구조에 대한 기본적인 실험을 수행하였다. 이와 같은 실험에 기초한 연구를 통하여 다음의 결론을 얻었다.

1. 알루미늄하니콤 샌드위치판에 대한 굽힘실험결과, 박판에서의 탄성해석을 통한 결과와는 달리 코어의 전단변형을 무시할 경우 처짐을 상당히 과소평가 하였으며, 이를 고려할 경우, 본 연구를 통한 실험값은 탄성이론에 기초한 구조해석 결과와 상당히 잘 일치하였다.
2. 본 실험에 사용된 샌드위치판의 굽힘성능은 탁월하여 동일 중량을 갖는 단판 보에 비해 하니콤 코어의 조합에 따라 작게는 7.5배에서 크게는 23배만큼 처짐량을 작게 할 수 있다.
3. 하니콤 코어 자체의 압축 최종강도와 평균 압괴강도는 Marguerre와 Wierzbicki의 식을 사용하면 비교적 정확히 강도를 예측할 수 있으며, AHP내의 코어의 강도가 코어 자체에 비해 약 50~60%정도 증가함을 볼 수 있는데 이는 덧붙여진 면재의 영향 때문이다.
4. 하니콤 코어의 밀도는 접착제의 영향을 고려하지 않을 경우 30% 정도까지 과소평가 하였으며, 이를 고려하여 계산한 결과 실제에 2%내로 정도 높게 예측할 수 있었다.
5. 압괴실험에 있어서 압축 최종강도와 평균 압괴강도는 코어의 밀도와 상관관계가 있으며, 이 코어 밀도는 코어 재료의 물성치와 셀 크기 및 벽두께 등의 치수에 의해 결정된다.
6. AHP구조는 알루미늄 단판에서와는 달리 충격 에너지 흡수를 목적으로 사용할 경우, 하니콤 코어의 구조적 특성 때문에 탁월한 성능을 발휘하며, 이때 에너지 흡수율을 더 증가시키려면 코어의 벽두께를 증가시키거나 셀 크기를 작게 하여 코어 밀도를 증가시키는 것이 효율적임을 알 수 있었다.
7. 1축 압축력을 받는 주변 단순지지된 사각형 AHP 실험결과, 이 판은 박판에서와는 달리 명확한 좌굴점을 찾을 수 없으며, 최종강도는 코어 밀도보다는 코어 높이에 따라 크게 달라짐을 알 수 있었다.
8. AHP의 최종강도를 평가하기 위하여 등가강성

이론과 간이 실험식을 조합하여 계산한 결과, 코어 높이가 작을 경우 ($h_c=12.7\text{mm}$)에는 실험값에 비해 상당히 과대 평가하지만, 코어 높이가 상대적으로 클 경우 ($h_c=25.4\text{mm}$)는 계산 결과보다 안전측의 실험값을 얻을 수 있었다. 또한, AHP와 동일중량을 갖는 알루미늄 단판에 대해서 간이 실험식을 적용하면, 전자에서 과대 평가되었던 코어 두께가 작은 부분에서도 실험치와 상당히 근사한 결과를 얻을 수 있었다.

9. 1축 압축실험에서 동일한 면재와 코어 재질을 사용하여도 코어 높이에 따라 붕괴모드는 크게 달라짐을 확인할 수 있었다. 즉, 코어 높이가 작을 경우 ($h_c=12.7\text{mm}$)에는 면재와 코어가 함께 좌굴하는 일반적인 좌굴모드를 나타내며, 코어 높이가 클 때 ($h_c=25.4\text{mm}$)에는 양 면재가 중립축에 대해서 대칭적으로 박리 되면서 파손되었다. 또한, 후자의 경우와 같은 파손모드로 붕괴될 경우 최종강도가 더 커짐을 알 수 있었다.

본 연구에서는 AHP 구조에 대한 기초적인 실험을 통하여 AHP에 대한 구조적 거동을 파악할 수 있었으며, 등가의 중량을 갖는 알루미늄 단판구조와 비교하여 볼 때 AHP가 훨씬 우수한 구조성능을 가짐을 정량적으로 확인할 수 있었다.

따라서, 이 AHP를 초고속 대형선의 선각과 같은 구조 경량화를 필요로 하는 곳에 적용할 경우, 기존의 구조적 문제점의 해소는 물론 상당한 중량감소 및 구조 안정성을 기하는 데 본 연구결과가 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 재단법인 산학협동재단과 (주) 세모의 연구비 지원에 의해 수행된 것임.

참 고 문 헌

- [1] Yamaguchi, S., Okuto, K. and Irie, H., "Design and Fabrication of Welded Aluminium Honeycomb Structures", Sumitomo Light Metal Technical Reports, Vol. 34, No. 2, April 1993, pp. 99-111.
- [2] Kaneko, Y., Takeuchi, K. and Aokage, K., "Design and Construction of a Seawater Survey Ship Built Using Aluminium Honeycomb Panels", Proc. of 2nd International on Fast Sea Transportation, Yokohama, Japan, December 1993, pp. 449-460.
- [3] "1994 Deliveries and Orders for High Speed Craft", J. of Fast Ferry International, January-February 1995, pp. 43-44.
- [4] Lindstrom, J., Sirvio, J. and Yli-Rantala, "A Superslender Monohull with Outriggers", Proc. of Third International Conference on Fast Sea Transportation, Vol. 1, September 1995, pp. 295-306.
- [5] 백점기, 이용욱, "초고속 대형선의 선각재료 및 구조에 관한 고찰", 대한조선학회지, 제32권 제6호, 1995년 12월, pp. 26-33.
- [6] CIBA-GEIGY, Information sheet, No. ATC 183a, June 1991.
- [7] Wierzbicki, T., "Crushing Analysis of Metal Honeycombs", Int. J. of Impact Engineering, Vol. 1, 1983, pp. 157-174.
- [8] Goldsmith, W. and Sackman, J.L., "An Experimental Study of Energy Absorption in Impact on Sandwich Plates", Int. J. of Impact Engineering, Vol. 12, No. 2, 1992, pp. 241-262.
- [9] Kunimoto, T. and Mori, N., "Study on the Buffer Characteristics of the Corrugated-core Used for the 5052 Aluminum Alloy Sandwich Construction under Dynamic Loading", Keikin-zuku/Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 39, No. 10, October 1989, pp. 687-692.
- [10] Ogawa, T. and Okazaki, N., "Mechanical Properties of Honeycomb Prepared from Aromatic Polyamide Film", J. of Applied Polymer Science, Vol. 48, 1993, pp. 1739-1748.
- [11] Bleich, F., "Buckling of Metal Structures", McGraw-Hill, New York, 1952.
- [12] Timoshenko, S.P. and Krieger, S.W., "Theory of Plates and Shells", McGraw-Hill, 1981.
- [13] von Karman, T., "Festigkeitsproblem in Maschinenbau". Encyk. Math. Wiss., Vol. 4, 1910.

- [14] Yamaki, N., "Postbuckling Behavior of Rectangular Plates with Small Initial Curvature Loaded in Edge Compression", J. of Applied Mechanics, Vol. 26, 1959.
- [15] Udea, Y., Rashed, S.M.H. and Paik, J.K., "Buckling and Ultimate Strength of Plates and Stiffened Plates under Combined Loads", J. of Marine Structures, Vol. 8, 1995, pp. 1-36.
- [16] 백점기, 이제명, "판 및 보강판의 압축 최종강도 실험식", 대한조선학회 논문집, 제 33권 제 3호, 1996, pp. 8-21.
- [17] Giancarlo, Caprino, Roberto and Teti, "Sandwich Structures Handbook", Prato, Italy, 1989.