

샌드위치구조의 Edgewise압축실험과 Flatwise 전단실험에 대한 연구

金 益 泰*
(96년 2월 6일 접수)

A Study of Edgewise Compression and Flatwise Shear Test to Sandwich Structure

Ik-Tai Kim*

Key Words : Edgewise Compression(샌드위치 압축), Flatwise Shear(샌드위치 면재방향 전단), Face(면재), Foam Core(선박용 심재), Delamination(박리현상)

Abstract

This paper is aimed to solve local buckling problem that can frequently occur when the high speed ship's hull of sandwich structural type is crushed by harbour and cargo. Experiment is performed on 36 specimens cut of 4-plates that made of sandwich type(Kevlar-Epoxy, Klegecell foam) and 16-Edgewise compressive test specimen, 16-Flatwise test specimen were tested by A.S.T.M. test method.

The result of this study is analyzed and compared in test method and test jig to perorm Edgewise compressive test and Flatwise test.

1. 서 론

샌드위치구조의 고속선이 항구 접안시 접안시설과의 충돌이나 화물선적시 바다과의 충돌로 인하여 면재와 심재가 서로이완되는 현상이 자주 발생할 수 있고 발생한 이완상태를 육안으로 구별할 수 없기 때문에 종래에는 큰사태로 발전하거나 뒤늦게 발견했을 경우라도 높은 수리비 때문에 샌드위치구조의 확산이 늦어지고 있는 이유중의 하나

이다.

특히, 샌드위치구조가 면재와 면재사이에 가볍고 저밀도인 심재를 삽입하여 중립축으로부터의 거리를 멀리한 형식이기 때문에 다른구조형식에 비하여 중량이 작고 고밀도와 고강성을 지닌 섬유와 수지의 합성으로 된 면재구성이어서 고강도, 고강성, 높은 방음, 방습, 방진, 방충효과 및 내식성의 우수성등이 이미 입증되어 졌으나 작은충격으로 국부적인 이완현상이 발생할 수있다는 점이 가

* 정회원, 홍익대학교 조선해양공학과

장 큰 단점중의 하나라고 사료된다.

본연구에서는 이상과같은 샌드위치구조의 약점을 규명하기위한 수단중의 하나로써 샌드위치구조의 Flatwise전단실험과 Edgewise압축실험을 수행하고 결과를 분석하여 이완현상의 규명에 보탬이 되고자 한다.

샌드위치실험에 대한 연구는 1973년 캐나다의 Chemacryl사가 의뢰하여 독일의 Darmstadt Technical College¹⁾ 재료실험실에서 Airex F.R.P. 샌드위치에 대해 행해졌고 1980년 Huckins 요트회사에서 의뢰하여 미국국립시험소에서 1979년부터 80년까지 2년간 Weissman-Berman¹⁾이 Airex, Klegecell, Divinacell의 3종류 P.V.C.심재와 F.R.P.면재의 조합으로 굽힘실험과 굽힘 전단실험을 행하고 간략하게 I범으로 간주하여 재료역학적으로 굽힘응력과 전단응력을 계산하였다.

그후, 유럽, 특히 노르웨이에서 실험을 주로 한 흔적은 보이나 보안문제때문에 자료입수가 불가능한 실정이다.

복합재료의 단판구조에 대한 실험적 연구는 국내 외를 통하여 많이 있으나 샌드위치구조의 실험에 대한 연구는 1960년 Gibbs & Cox사²⁾에서 F.R.P.에 대해서 섬유와 각도와 두께를 변화시켜 실험을 수행하였고 1973년 Warnock Hersey International LTD.¹⁾를 포함하여 항공분야에서 많은 실험을 하였다. 국내의 복합재료에 대한 실험은 개인 및 연구실 단위로 항공 및 조선등 각분야에서 많이 수행되었다.

심재가 포함되어진 샌드위치구조의 실험은 1983년 과기처주관으로 한국항공기술연구소에서 시제품의 개발을 위한 실험과 연구¹¹⁾가 진행 되었고 우주항공에서는 지금도 실험실 단위로 실험 및 연구가 행해지고 있으며 이상과 같은 연구 및 실험에서도 고속 운항중 충돌이나 접안시의 충격등에 대한 국부좌굴현상의 실험과 연구는 배제되어있다.

선박에서 사용하고 있는 샌드위치평판의 실험은 각 선급 규정과 ASTM, ISO, DIN 등에서 복합재료와 샌드위치구조의 인장, 심재의 압축, 전단, 굽힘에 대한 시험편의 규격과 지그 및 시험법을 명시하고 있으나 Flatwise 전단, Edgewise 압축실험에 대한 것은 A.S.T.M.뿐이다.

특히, 비대칭인 시험편의 실험에 대해서는 언급이 전무하고 Edgewise압축실험과 Flatwise전단실험의 경우는 ASTM의 실험법에서만 시험편의 규격과 목적, 지그 및 방법을 명시하고 있으나 얻어진 결과에 대한 산정식이 없고 실험지그의 설치가 미흡한 상태이다. 즉, 본연구의 실험에서는 Edgewise 압축시험 목적이 압축과 좌굴 및 국부적인 좌굴을 검토하기 위한 것이기 때문에 국부좌굴의 발생을 기대 했으나 결과는 전좌굴의 현상만을 얻었고 면재의 두께가 극히 얇은 일부 시험편에서만 국부좌굴을 얻을 수 있었다. 이결과는 면재의 두께에 따라서 좌굴의 형태가 분류되어지는 이론과 일치되는 것이고 비교적 얇은 두께에서 국부좌굴이 발생하고 있다. 특히, A.S.T.M.시험법에서는 시험편의 길이를 전두께의 12 배이하로만 규정하고 있어서 길이에 따른 장주, 중간주, 단주의 구분이 없으므로 이에대한 연구가 절실하며 KR 규정에서는 Edgewise 압축시험 및 Flatwise 전단시험에 대한 언급조차도 없기때문에 향후 검토의 대상이 된다. Flatwise전단시험 역시 목적이 전단강도를 알기위한 것이나 실험에 대한 지그의 장작과 계산방법 및 실험법의 정보부족으로 많은실험의 수행에 비하여 얻어진 결과는 극히 미미할 뿐이다.

본 실험에 사용된 면재는 Kevlar섬유와 Epoxy 수지의 조합이고 심재는 Klegecell P.V.C. foam으로 구성되었으며 1,2,4번평판은 아래 윗면재의 두께가 거의 대칭이나 2번평판은 접착제의 기능을 보고자 심재에 직경2mm정도의 구멍을 뚫고 접착재와 수지를 혼합한 상태로 간헐적으로 주입시켰다. 3번평판은 면재 두께의 대칭과 비대칭효과를 검토하기 위하여 윗면재두께의 70%정도를 아랫면재의 두께로 구성하였다. 실험시험편의 규격은 다음과 같다.

가. Edgewise 압축실험 시험편

1. $T > 35\text{mm}$ 인 경우
길이: 시험편 두께의 12배 폭: 80mm
2. $T < 35\text{mm}$ 인 경우
길이: 시험편 두께의 12배 폭: 60mm

Table 1 Edgewise 압축 시험편 제원

평판	시험번호	길이 mm	폭 mm	두께 mm	면재두께(mm)	
					Upper	Lower
1	1-1	401.2	80.50	47.40	4.50	4.00
	1-2	401.1	81.05	47.80	4.65	4.15
	1-3	402.3	81.25	48.00	4.25	4.15
	1-4	400.8	80.50	47.95	4.75	4.20
2	2-1	398.8	82.00	46.00	3.45	2.95
	2-2	399.0	81.15	46.30	3.55	2.80
	2-3	400.8	80.75	45.95	3.70	3.00
	2-4	400.0	80.50	45.95	3.40	2.90
3	3-1	297.0	58.90	25.40	3.40	1.90
	3-2	300.4	60.50	24.25	2.85	1.90
	3-3	294.6	59.35	25.55	2.90	2.05
	3-4	299.0	59.45	25.20	3.05	1.80
4	4-1	266.0	60.45	25.90	3.05	2.80
	4-2	267.5	62.00	26.15	2.85	2.65
	4-3	268.3	62.00	25.60	2.75	2.80
	4-4	266.3	60.50	25.15	2.85	2.95

나. Flatwise 압축실험 시험편

1. $T > 35\text{mm}$ 인 경우
길이: 시험편 두께의 12배 폭: 100mm
2. $T < 35\text{mm}$ 인 경우
길이: 시험편 두께의 12배 폭: 50mm

Table 2 Flatwise 전단 실험시험편 제원

시험번호	길이 mm	폭 mm	두께 mm	면재두께(mm)	
				Upper	Lower
1-1	599.4	89.00	55.90	4.00	3.15
2-1	597.8	98.70	48.40	4.50	4.40
4-1	401.0	58.50	25.95	2.95	2.75

2. 실험

2.1 Edgewise 압축 시험

Edgewise 압축 실험에서는 샌드위치 시험편의 압축 강도의 특성을 얻고자 하는데 목적이 있고 샌

드위치 시험편의 면재가 면재의 축방향하중과 시험편의 파단형상을 알고자 하는데 있다. 본 실험의 시험편 규격이나 실험방법등이 A.S.T.M.방법을 제외하고는 규정되어 있지 않으므로 ASTM Code 364-61, "Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Flat Sandwich Constructions." 를 기준하여 수행하였다.

2.1.1 실험 장치

시험기는 Toyo-Baldwin사의 UTM-10Ton을 사용하였고, Data는 Nicolet사의 모델 410 Oscillator를 사용하여 data를 얻었다.

본실험의 Edgewise 압축 시험용 지그는 시험편 두께보다 큰 직경을 갖는 환봉을 반으로 잘라 시험편의 상하에 끼워 넣을 수 있도록 1 cm 깊이의 홈을 파고 시험편 규격에 따라 폭 50mm와 25mm의 시험편을 끼워 넣을 수 있도록 지그를 각각 1조씩 모두 4개를 제작하였다.

상하에 지그를 장착한 시험편을 UTM에 수직으로 장착시킨 다음, 1mm/min의 속도로 압축을 가하였다. 시험 장치는 Fig. 1과 같다.

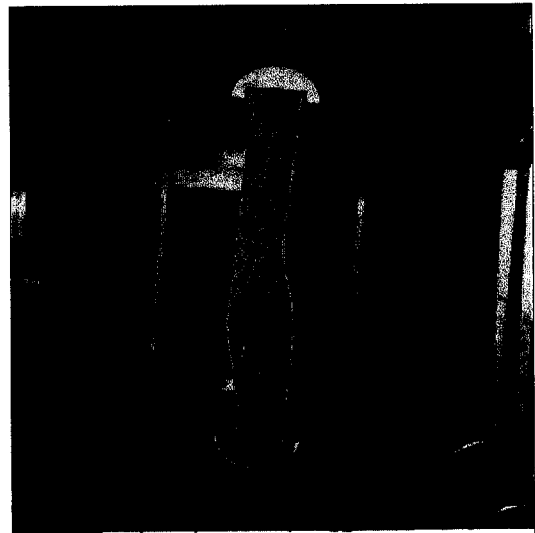


Fig. 1 Edgewise 압축 시험 장치

2.1.2 실험 결과 및 분석

3-4번 평판에서 절단된 시험편은 비교적 비슷한

모양으로 심재의 파단이 일어 났고 1 ton 에서 3 ton 의 파단하중을 보였으나 2번 평판의 시험편은 심재내부에 침투된 수지와 bond 등으로 인해 불규칙한 파단 하중과 면재의 두께에 비해서 낮은 값에서 불안정하게 되므로 인위적이거나 작업시의 실수등으로 접촉제나 수지등이 심재속으로 침투되는 것을 피해야 한다. 1번 평판 시험편의 경우는 윗면재와 아래면재가 대칭이기 때문에 상하 면재의 두께가 다른 2번시험편에 비해 파단 하중이 3-4배 정도 크게 나왔다. 이 결과는 압축에 대한 파단의 형태가 면재에 의해서 지배되고 있고 전체의 두께는 두꺼울지라도 비대칭으로 인하여 얇은 면재를 가진 평판일 경우는 얇은면재의 시험편쪽에서 먼저 파단이 일어나고 있다는 것을 암시하고 있다. 다시말해서 압축이나 좌굴의 견지에서라면 비대칭인 평판을 제작하여 사용할 때는 면재가 가장 작은 쪽의 압축강도를 설계의 대상으로 해야 한다.

특히 전체두께가 두껍고 면재의 두께도 두꺼운 시험편의 경우는 큰 파단 하중을 가지게 되고 큰파단하중에 대한 순간적인 파괴로 인하여 면재 전체가 떨어져 나가면서 지그가 장착된 시험편들이 제 자리를 벗어나 튀어 나갔다. 이러한 현상은 시험시에 위험과 부상 및 시험기와 지그를 파괴시킬수 있기때문에 안전을 위해서 주변에 굵은 철망을 설치하여 실험을 수행하였다.

Table 3는 평판 4장에서 시험편을 4개씩 절단하여 실험한 결과를 나타냈고 Fig. 2는 시험편 1-1의 실험 결과를 하중변위선도로 그려서 대표적으로 나타낸 것이다. Fig. 2에서 실험의 초기 상태에서 파단에 이르기 직전까지의 하중과 변위형상을 고찰해보면 좌굴의 형태가 전좌굴인 것으로 추측이 된다.

실험의 결과를 여러각도에서 분석하고자 상하 양단이 단순 지지된 기둥으로 보고 전좌굴에 대한 단주, 중간주, 장주까지 수용할 수 있는 실험 공식인 Gordon-Rankine 식을 사용하여 Critical Buckling Stress를 추출하였다. 이식은 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_{cr} = \frac{\sigma_c}{1 + \sigma_c \frac{(KL/r)^2}{\pi^2 E}}$$

여기서, σ_c 는 취성 재료의 경우, 압축 파괴 강도를 말한다.

K 는 유효길이 계수로서, 양단이 단순지지된 경우는 1.0 이다.

L 은 Column 의 전체 길이이고,

r 은 $\sqrt{I/A}$ 로서, 회전 반경이다.

E 는 굽힘전단 시험 결과로 부터 굽힘 탄성 계수의 중간값을 택 하였다.

특히, 실험 결과가 전좌굴에 의한 것인지 국부좌굴에 의한 것인지는 향후 상당한 고찰이 필요할 것으로 보인다.

Table 3 Edgewise 압축 시험 결과

평판	시험 번호	파단 하중 Kg	파단 응력 Kg/mm ²		Critical Buckling Stress Kg/mm ²
			Face	Overall	
1	1-1	5113.6	7.473	1.340	3.1822
	1-2	7760.0	10.880	2.003	3.7023
	1-3	7448.0	10.913	1.910	3.7430
	1-4	8512.0	11.814	2.205	3.8163
2	2-1	1587.2	3.024	0.421	1.8994
	2-2	1468.8	2.850	0.391	1.8733
	2-3	2265.6	4.188	0.611	2.2762
	2-4	3740.8	7.376	1.011	3.0066
3	3-1	1547.2	4.956	1.034	2.4746
	3-2	1708.8	5.946	1.165	2.6108
	3-3	1510.4	5.141	0.996	2.6437
	3-4	1729.6	5.999	1.155	2.7133
4	4-1	2257.6	6.384	1.442	3.1785
	4-2	2697.6	7.911	1.664	3.5656
	4-3	2960.0	8.602	1.865	3.5857
	4-4	2142.4	6.105	1.408	3.0092

* 파단 응력에서, "Face" : 시험편의 upper & lower face 단면적의 합.

"Overall" : 시험편의 단면전체의 면적.

* ASTM C364-61에서는 Face 단면적에 대한 파단응력을 요구하고 있음.

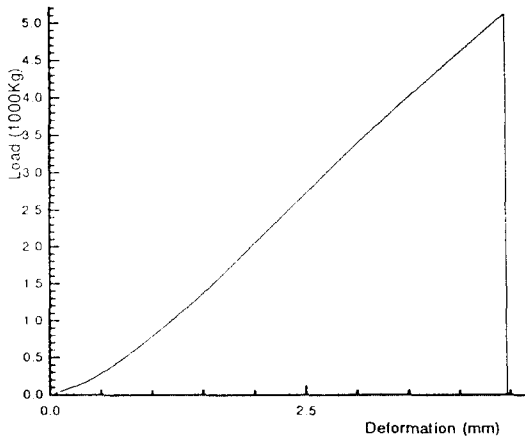


Fig. 2 Edgewise 압축 시험결과

2.2 Flatwise 전단 시험

Flatwise 전단시험에서는 시편의 평면 방향으로 전단력을 가하여 샌드위치 심재의 전단강도 와 전단 탄성계수를 얻고자 하였다. 본 실험은 A.S.T.M.의 273-61, "Standard Test Method for Shear Properties in Flatwise Plane of Flat Sandwich Constructions or Sandwich Cores." 를 참조하여 수행하였다.

2.2.1 실험 장치

시험기는 Toyo-Baldwin사의 UTM-10T를 사용하였고, Data는 Nicolet사의 410 모델을 사용하여 얻었다.

Flatwise 전단시험용 지그는 stainless steel 재질로서 A.S.T.M.에서 규정하는 시편의 규격에 따라 2 조를 만들었다. 즉, 길이 66 cm, 폭 10 cm 의 1조(2개), 길이 33 cm, 폭 5 cm 의 1조(2개)를 제작하였다. 시편두께 48-55 mm는 길이 60 cm, 폭 10 cm와 두께 약 25 mm는 길이 30 cm, 폭 5 cm 로 제작하여 시편의 길이가 두께의 12배정도가 되도록 하였다.

제작된 지그와 시편을 Epoxy Bond 로 접착하여 12시간 이상 건조시켜 충분히 경화 시킨후 C-Clamp 로 지그와 시편 면재의 접착부를 보강하였다. 보강 방법은 시험편 모서리부분의 심재를 약간 파내고 C-Clamp로 조였다. 이렇게 해서 완성된 시편-지

그 Set는 UTM시험기에 힌지된 상태로 설치되어 1mm/min의 속도로 인장하였다. 제작된 지그와 시험편의 고정된 모습을 Fig. 3에 보였다.

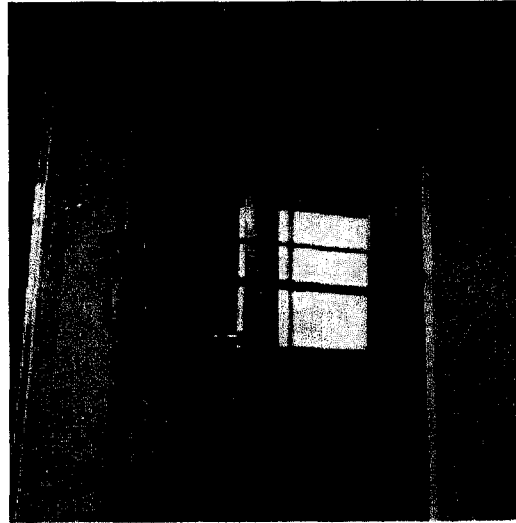


Fig. 3 Flatwise 전단시험장치

2.2.2 실험 결과및 분석

Flatwise 전단시험의 경우도 A.S.T.M.에서만 시험편의 규격과 목적, 지그 및 방법을 명시하고 있으나 얻어진 결과에 대한 산정식이 없고 실험에서는 지그와 면재를 접촉시킬 수 있는 접착제의 접착 성능이 관건이었다. 즉, 면재와 지그를 완벽하게 접착시켰다 해도 면재와 지그사이에서 작용하는 수직력, 다시 말해서 면재의 축방향에서 힘이 가해지지만 힘을 받는 지그와 면재가 약간의 경사각도를 유지하기 때문에 면재에 수직방향에서부터 이완이 시작되면 접착성능이 저하될 수밖에 없었다.

A.S.T.M.에서는 충분한 강도를 갖는 접착제를 특별히 권하고 있지는 않으므로 본 실험에서는 제작에 사용할 수 있는 가장 강력한 본드인 모형항공기 제작용 Epoxy Bond를 사용하였다. 실험의 초기 단계에는 Epoxy Bond 만으로 접착하여 수차례 실험을 시도하였으나 파단이 모두 시편의 심재부분이 아닌 본드 접착부에서 일어났다. 본 실험에서는 시편의 면재와 면재를 인장시킴으로서 심재의 전단강도를 얻고자 하는 것이었는데 면재에 걸리는 인장력이 증대되면서 면재와 지그사이의 접착부

가 찢어지는 것으로 보인다. 따라서, 면재와 지그사이의 접촉부가 찢어지는 것을 막기 위해 C-Clamp를 각 면재와 지그 접촉면에 4개를 사용(총 8개)하여 보강을 하였다. 또, 시편의 면재가 전체적으로 떨어져 나갈 경우 힌지된 아랫쪽의 지그가 붕괴될 것이 예상되었으므로 안전을 위해 시편-지그의 외측에 느슨한 Clamp를 장치하였다.

또한, 면재에 수직한 방향의 분리를 인위적으로 구속시켰다 할지라도 심재의 축방향에 대해서 45°의 파단을 기대했으나 기대와는 달리 대부분의 시험편이 면재와 심재의 접촉부위가 파단되었기 때문에 향후 Flatwise전단실험에 대한 연구가 있어야 한다.

특히, 본실험을 위하여 4장의 평판에서 16개이상의 시험편을 절단하여 실험을 했으나 실험방법의 미숙과 정보부족등으로 3개의 결과만을 얻었고 이러한 문제는 향후 개선 및 연구의 대상임을 밝힌다.

부족한 결과이나 성공한 3가지 시험편에 대해서 Table 4에 전단강도 및 전단응력을 보이고 Fig. 4에 1-1 시험편에 대한 하중-변위선도를 나타내었다.

Table 4 Flatwise 전단 시험결과

시편 번호	길이 mm	면재두께		전단강도 Kg	전단응력 Kg/mm ²
		Upper	Lower		
1-1	599.4	4.00	3.15	2067.2	0.0388
2-1	597.8	4.50	4.40	1952.0	0.0331
4-1	401.0	2.95	2.75	1379.2	0.0588

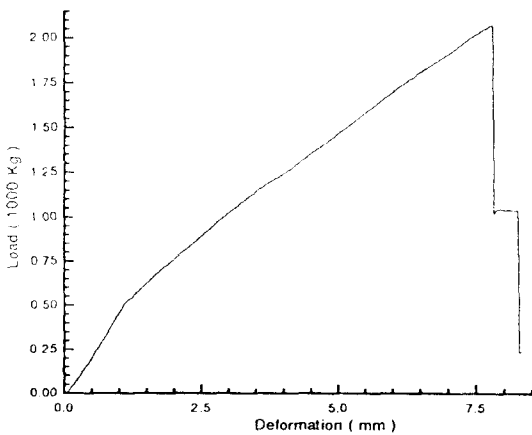


Fig. 4 Flatwise 전단 시험 결과

3. 연구결과

샌드위치평판의 압축 및 국부좌굴과 전단특성을 파악하기 위하여 Edgewise압축실험과 Flatwise전단실험을 위하여 지그를 제작, 설치하여 실험을 수행하였고 얻어진 결과는 다음과 같다.

1) Flatwise 전단시험

축력에 의한 전단강도는 면재와 심재의 접촉에서 접촉력이 중요하고 심재속으로 수지나 접촉재의 함침량에 비례한다.

특히, 면재와 보조판의 재질이 서로 다르므로 인장력이 가해졌을 때 면재와 심재사이가 이완되는 경우보다는 면재와 보조판사이가 먼저 이완되는 문제, 인장력의 축을 조절하는 문제, 압축력의 세기와 축일치에 따른 압괴(Crushing)문제 및 계측된 결과를 분석하고 계산하는 문제등이 크게 대두되었다.

2) Edgewise압축시험

비대칭면재를 갖는 샌드위치구조에서는 얇은 면재에서 파단이 일어나므로 압축해석은 얇은 면재를 기준으로 해야한다.

심재의 보강을 위해서 접촉재나 수지를 심재속으로 투입하는 경우, 압축강도를 저하시킨다.

그리고 실험후의 계산과정에서 축력에 대한 압축뿐만 아니라 좌굴에 대한 계산도 했으므로 본연구의 자료를 현장에서 충분히 활용할 수 있다고 판단된다.

참 고 문 헌

- 1) ASTM Designation C 274-53, 1953
- 2) P.Seide and E.Z.Stowell. "Elastic and plastic buckling of simply supported metalite type sandwich plates in compression". NACA TN 1882;also NACA. Rep. 967, 1949
- 3) Norris, C.B., & Erickson, W.S., & March, H.W., & Smith, C.B., & Boller, K. H., "Wrinkling of the Facings of Sandwich Con-

- struction Subjected to Edgewise Compression”, Report NO.1810, U.S.Forest Products Lab., Madison, Wis., 1949
- 4) Deborah Weissman-Berman, “Structural Tests and Preliminary Laminate Design for Sandwich-Cored Panels”, M. Rosenblatt & Son, INC., 1980
 - 5) Gibbs and Cox Inc., “Naval Architects and Marine Engr. Marine Design Manual for Fiberglass Reinforced Plastics”, McGraw-Hill Book Company Inc., 1960
 - 6) P.Seide, “Compressive buckling of flat rectangular matalite type sandwich plates with simply supported load edges and clamped un-load edges”, NACA. TN. 1886, 1949
 - 7) P.Seide, “Shear buckling of infinitely long simply supported matalite type sandwich plate” NACA TN 1910, 1949
 - 8) E.W. Kuenzi, W.S.Ericksen and J.J.Zahn, “Shear stability of flat panels of sandwich constructions” FPL Rep. 1560(Revised May 1962)
 - 9) Benson,A.S. and Mayer,J., “General Instability and Face Wrinkling of Sandwich Plate- Unified theory and Applications”, AIAA Journal, Vol. 5, pp.729-739, 1967
 - 10) Nemeth, M. P., “Importance of Anisotropic on Buckling of Compression-Loaded Symmetric Composite Plates”, AIAA Journal, Vol.24, November, 1986, pp.1831-1835, 1986
 - 11) 한국항공기술연구소. “항공기용 하니컴구조물 시제 개발 연구 보고서(1), (2)”, 과학기술처, 1983
 - 12) 김익태, 김기성, “두꺼운 F.R.P.면재를 갖는 샌드위치 평판의 구조해석”, 대한조선학회, 1995