

측면하중을 받는 트러스형 내부구조를 가지는 샌드위치 튜브의 특성

정창균¹, 성대용¹, 양동열[#], 문경제², 안동규³

The Characteristics of a Sandwich Tube with a Truss Core under Lateral Loading

C. G. Jung¹, D. Y. Seong¹, D. Y. Yang[#], K.J.Moon², D.G. Ahn²

Abstract

A sandwich tube is a structured material that has two inner and outer circular tubes and light material between them. In this paper, a sandwich tube with a pyramidal truss core is introduced. Fabrication method and example made by brazing are shown. The behavior of the sandwich tube under lateral loading is predicted by analytical and numerical method. Comparative study between the sandwich and the monocoque tube is performed at a point of view such as strength and weight saving. As a result, proposed tube is appropriate for application to lightweight structural material

Key Words : Sandwich tube, monocoque tube, truss core, lightweight, lateral loading

1. 서론

경량화는 대부분의 구조설계에 있어 가장 중요한 연구 목적 중의 하나이다. 이는 다양한 방법을 통해 이루지고 있으며 가장 대표적인 것이 샌드위치 구조를 이용한 경량화이다. 샌드위치 구조는 하중이 작게 걸리는 내부에는 비교적 약한 재료를, 하중이 많이 걸리는 외각에는 강한 재료를 배치시켜 재료의 효율성을 증가시킨 구조를 말한다 [1]. 대표적으로 허니컴 구조를 가진 샌드위치 판재 등을 들 수 있다.

이러한 샌드위치 판재는 일반적으로 높은 굽힘강성으로 인해 성형이 매우 어려워 판재형태로 사용하고 있다. 특히 가장 일반적인 허니컴 코어의 경우 곡률 변형 시 곡면상에 또 하나의 곡률이 발생하는 안티클래스틱 곡 (anticlastic curvature) 으로 인해 면재와 심재의 층간박리를 유발하여 형상적용을 더욱 어렵게 하고 있어 이에 대한 개

선된 심재구조가 개발되고 있다[2].

금속 트러스형 샌드위치 판재는 내부에 금속 트러스 구조를 배치하고 외부에 금속 박판을 접합한 판재로서 경량화률이 높고 금속재료를 이용하므로 소성변형에 의한 에너지 흡수 및 넓은 사용온도를 가지는 장점을 지닌다.[3] 그러나 트러스형 샌드위치 판재 역시 일반 샌드위치 판재와 마찬가지로 높은 굽힘강성으로 인해 곡률 혹은 형상을 가진 제품의 응용으로 적용에 제한을 받는다. 한편 면재로 사용되는 판재와 심재로 사용되는 트러스 구조는 금속재료로서 쉽게 변형이 가능하고 안티클래스틱 곡률이 발생하지 않으므로 성형 후 판재접합을 통해 원통형과 같은 곡률을 가진 형상을 쉽게 만들 수가 있다.

한편 원통형 재료가 축하중을 받는 경우에 대한 연구는 많은 연구가 진행되었으나 측면하중을 받는 경우는 상대적으로 연구가 드물며 특히 샌드위치 튜브에 대한 연구는 매우 드문 실정이다.

1. KAIST 기계항공시스템학부 대학원
2. 조선대학교 공과대 기계공학과 대학원
3. 조선대학교 공과대 기계공학과
교신저자: KAIST 기계항공시스템학부, dyyang@kaist.ac.kr

Abdul-latif 는 두쌍의 실린더형 재료가 측면하중을 받는 경우 변형형상 및 에너지 흡수율의 경향을 연구한 바 있다[4]. 한편 Morris 는 여러가지 지름의 링이 중첩된 튜브시스템의 에너지 흡수 정도를 해석적 방법으로 연구하였다[5]

본 연구에서는 트러스형 심재를 가지는 샌드위치관을 모델링하고 이를 트러스형 샌드위치 튜브(이하 샌드위치 튜브, sandwich tube) 라고 명하였다. 또한 이를 일반 원통형 관(이하 단일 튜브, monocoque tube)과 비교 해석을 통해 샌드위치 튜브가 가지는 특성을 해석적으로 비교하여 트러스형 샌드위치 튜브가 가지는 경량특성 및 변형특성을 비교하여 경량구조재료로서의 가능성을 판단하고자 한다.

2. 트러스형 샌드위치 튜브

2.1 개요

트러스형 내부구조를 가지는 금속 샌드위치 관은 심재와 면재가 모두 금속이며 특히 심재의 형상이 트러스 형상을 가진 재료를 의미한다. 이러한 트러스형 샌드위치 관재를 원형관 형상으로 만든 것이 샌드위치 튜브이다.

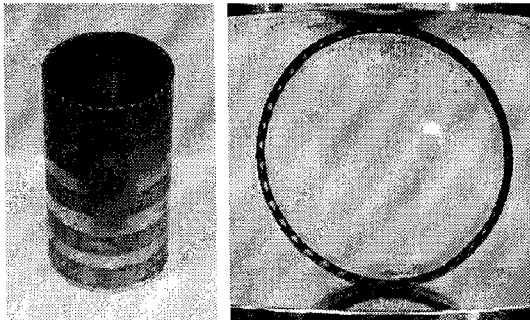


Fig. 1 Example of metallic sandwich tube with a truss core; fabricated by brazing (diameter of inner tube : 80 mm, width : 30 mm, thickness : 3.3 mm)

샌드위치 튜브 속의 트러스 구조는 다양한 방법으로 제조될 수 있으나 경제성 및 생산성의 관점에서 익스팬디드 금속을 절곡(crimping)한 공정을 이용하면 피라미드 형상의 트러스 구조를 재료의 손실없이 연속적으로 구조를 제작할 수 있다[5]. 일반적인 금속 관은 원형곡률을 가지도록 굽힌 후 용접을 통해 제작 되거나 압출공정 등을

통해 관 형태를 직접 뽑아내기도 한다. 하지만 샌드위치 관재는 굽힘강성이 높아 관재형태에서 곡률을 가지도록 성형하기는 힘들어 면재와 심재를 원형형상으로 제작한 후 내외측 관 및 심재를 접합하는 공정을 이용할 수 있다.

면재와 심재의 접합은 원형 또는 곡률을 가지는 전극을 이용한 다점전기저항용접, 브레이징, 화학적 접합을 통해 제작할 수 있다[6-7]. Fig.1 에 브레이징으로 제작된 샌드위치 튜브를 보였다.

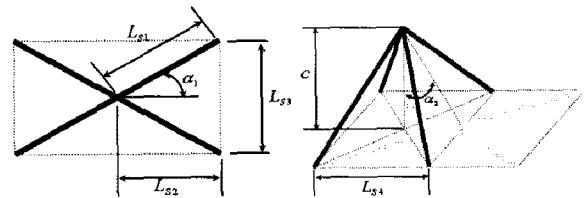


Fig. 2 Dimension of expanded metal (left; before crimping, right: after crimping)

2.2 질량 및 변위하중관계

샌드위치 튜브의 밀도는 심재의 공간점유율에 의해 결정된다. 익스팬디드 금속을 절곡하여 피라미드 형상을 제작할 경우 심재의 공간점유율은 아래와 같다.

$$V_f = \frac{V_{total}}{V_{strut}} = \frac{4A_s}{(L_{s1})^2 \cos \alpha_1 \sin 2\alpha_1 \sin 2\alpha_2} \quad (1)$$

여기서 V_{total} 은 단위 트러스 구조가 차지하는 육면체의 부피를 의미하며 V_{strut} 는 트러스 구조가 차지하는 부피를 의미한다. 그 밖에 A_s , L_{s1} , α_1 , $2\alpha_2$ 는 각각 트러스 부재의 단면적, 트러스 부재의 길이, 트러스 부재의 측각, 절곡각을 의미한다(Fig. 2 참조). 따라서 샌드위치 튜브의 질량은 아래와 같이 계산된다.

$$m = \rho_{sheet} V_{sheet} + \rho_{core} V_{core} V_f \quad (2)$$

한편 측면하중을 받는 단일튜브의 하중과 변위의 관계는 최소일의 정리를 이용하여 구할 수 있다[8]. Fig. 3 과 같이, 원형 구조물이 측면하중 P 을 받을 때, 각 θ 만 큼의 위치에서 굽힘모멘트 및 하중과 변위는 식 (3) 과 (4)와 같이 계산된다.

$$M = \frac{Pr}{2} \cdot \left(\cos \theta - \frac{2}{\pi} \right) \quad (3)$$

$$\delta = \left(\frac{\pi}{4} - \frac{2}{\pi}\right) \cdot \frac{Pr^3}{D} \quad (4)$$

여기서 r 은 반지름, EI 는 재료의 단면에 대한 굽힘강성을 나타낸다. 상기 식에서 샌드위치 튜브의 단면 굽힘강성을 적용하여 예측하였다.

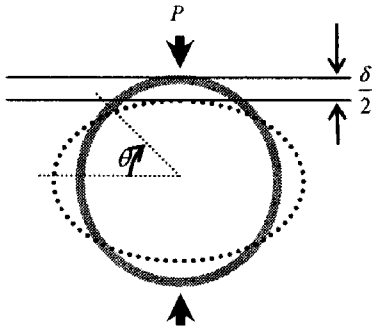


Fig. 3 Tubular structure under lateral loading

2.3 유한요소해석

샌드위치 튜브의 하중 및 변형특성을 유한요소 해석을 이용하여 그 특성을 파악하고자 한다. 적절한 비교를 위해 샌드위치 튜브와 동일한 무게를 가지는 일반 튜브(monocoque tube)를 비교 해석하였다.

샌드위치 튜브는, 한 변의 길이(L_{ST})가 4 mm 이고 트러스 부재의 단면(A_s)이 0.5 mm 의 정사각형 형상을 가지는 사각망을 대각선 방향으로 90°로 절곡한 형상을 가정하였으며 면재는 두께가 0.3 mm 인 스테인레스 강(SUS 304)으로 가정하였다. 따라서 트러스 코어의 높이는 이론적으로 2.83 mm, 샌드위치 튜브의 전체 두께는 약 3.4 mm 이다. 샌드위치 튜브의 내,외측 면재의 반지름은 두께를 포함하여 각각 40 mm 와 43.3 mm 이다.

해석은 1/4 model 을 이용하였다. 두께 방향으로 트러스 부재의 형상이 규칙적으로 반복되므로 한열의 셀(cell)을 가지도록 모델링 하였다. 면재는 셀, 심재인 트러스 부재는 빔 요소로 모델링 하였다. 비교대상인 일반판재의 경우 두께가 0.7 mm 인 원형튜브를 동일한 조건인 1/4 model 로 해석하였다. 면재와 심재는 완전히 접합된 것으로 가정하였다. 변위조건을 주었으며 샌드위치 튜브 및 단일 튜브의 지름에 대비 15% 까지 측면 방향으로 압하하였다.

각 재료의 물성은 샌드위치 튜브 및 일반튜브

의 재료는 SUS304 의 물성을 이용하였으며 트러스 구조의 경우 일반냉연강판인 CN 1 종 재료를 이용하였으며 그에 대한 물성을 Table 1 에 나타내었다. 해석은 상용 해석기인 ABAQUS(implicit)를 이용하였다.

Table 1 Material properties of SUS 304

K [MPa]	n	ϵ_0	E [GPa]	Yield stress [MPa]
742.1	0.210	0.01	180	280

3. 결과

튜브가 측면하중을 받을 때의 변형형상의 결과를 Fig. 4 에 나타내었다. 샌드위치 튜브는 90° 간격으로 면재 항복이 발생하며 이후 급격하게 함몰하고 있다. 트러스 심재는 면재에 비해 상대적으로 굽기 때문에 트러스 심재의 변형은 크게 발생하지 않았다

응력은 하중이 직접 작용하는 영역역인 외측 튜브의 상단부에서 먼저 항복하중에 도달하게 되고 항복이 발생한 후 항복점은 소성힌지의 역할을 하게 되며 응력집중이 발생함을 보여준다. 이러한 면재의 항복은 면재의 두께와 트러스 심재의 간격에 의해 결정됨이 알려져 있다[6]. 따라서 샌드위치 튜브의 기계적 성능향상을 위해서는 면재의 항복을 막는 방향으로 설계되어야 할 것이다.

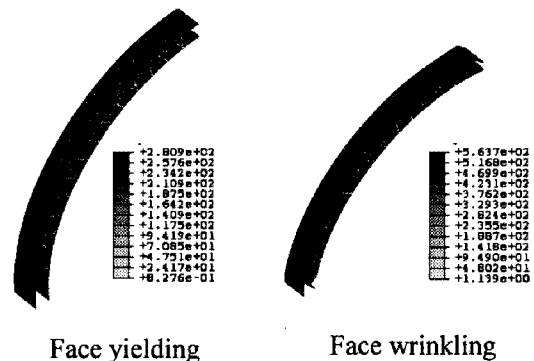


Fig. 4 Stress distribution of sandwich tube; Mises stress, MPa)

Figure 5 에 샌드위치 튜브와 단일 튜브의 이론 및 해석결과를 나타내었다. 그래프의 x 축은 변형량을, y 축은 단위질량당 하중을 나타내었다. 일반 튜브가 일정수준의 하중을 지탱한 후 하중-변위곡

선의 평탄한 현상을 나타내는 것에 반하여 샌드위치 튜브는 최고점 도달 후 50 % 정도의 하중감소를 나타낸다. 이는 면재항복 후 발생하는 소성힌지에 의해 판재가 내부구조의 사이로 급격히 함몰하면서 나타나는 현상으로 판단된다.

A' 선도와 D' 선도는 이론적 결과를 나타낸 것으로 일반튜브는 매우 유사한 결과를 나타내나, 샌드위치 튜브는 변위 대 하중비가 비교적 큰 차이를 보이고 있다. 이는 계산식이 코어의 변형을 반영하지 못하기 때문에 발생하는 것으로 판단된다.

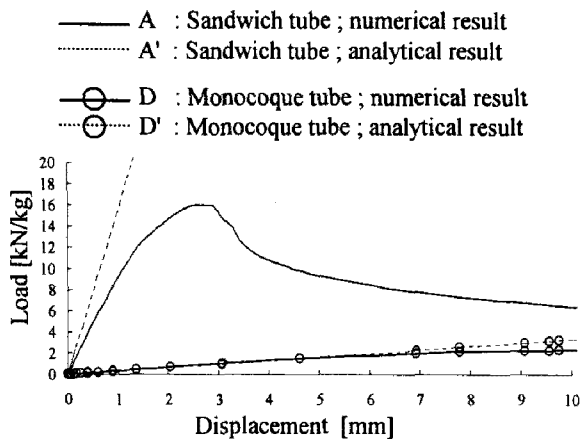


Fig. 5 Specific load - displacement curve

A 선도와 D 선도는 유사무게를 가지는 경우의 비교이다. 이때 각각의 무게는 1.62 kg/m, 1.44 kg/m로 유사하나 단위무게당 최대 하중에서 10 배이상의 차이를 보이고 있다. 이러한 큰 차이는 샌드위치 판재의 경량특성을 극명하게 보여주는 것으로 제안된 샌드위치 튜브는 매우 우수한 경량재료임을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다. 첫째, 샌드위치 튜브의 경우 90° 간격으로 발생하는 소성힌지에 의해 하중은 급격히 감소하게 되므로 샌드위치 튜브는 면재의 항복을 최소화 할 수 있도록 설계되어야 한다. 둘째, 샌드위치 튜브는 일반 튜브에 비해 측면압축강도의 효율이 대

단히 높다. 셋째, 심재의 변형을 고려하지 않은 하중-변위식은 무시할 수 없는 오차를 수반함으로 수정, 고려되어야 한다. 넷째, 따라서 제안된 샌드위치 튜브는 매우 우수한 구조재료로 활용이 기대된다.

후 기

본 연구는 산업자원부 산하 차세대신기술개발사업의 일부이며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] H. G. Allen, 1969, Analysis and design of structural sandwich panels, Pergamon Press, London.
- [2] 김대용, 김지용, 이범수, “ 허니콤코어 ” 대한민국 공개특허, 출원번호 10-2005-0015452
- [3] C. G. Jung, S. J. Yoon, D. Y. Yang, S. M. Lee, S. J. Na, S. H. Lee and D. G. Ahn, 2004, Fabrication and static bending Test on ultra light inner Structured and bonded (ISB) Panel containing repeated inner pyramidal structures, Korea society of precision engineering, Vol. 22, pp. 175 - 182.
- [4] A. Abdul-Latif, 2004, “On the lateral collapse of an identical pair of cylinders”, International journal of solids and structures, Vol.37, pp1955-1973
- [5] E. Morris, A. G. Obali and M. S. J. Hashmi, 2006, “Lateral crushing of circular and non-circular tube system under quasi-static conditions” Advanced in Materials and Processing Technologies (AMPT) 2006 conference, Dublin City University, Ireland.
- [6] Lee, S.M., Kim, J.T., Na, S.J., 2004, “ A study on multi points electrical resistance welding,” Proceedings of the spring meeting of Korean Welding Society, Vol. 42, pp.30-32
- [7] 정창균, 성대용, 양동열, 안동규, 2006, “트러스형 내부구조가 용접된 금속 샌드위치 판재의 저속충격 변형특성 비교 연구” 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집.
- [8] S.P. Timoshenko, J. N. Goodier, 1934, Theory of Elasticity, McGraw-Hill, USA