

굽힘 하중을 받는 딴플형 내부구조 금속 샌드위치 판재의 최적설계변수의 수식화 및 파손선도

성대용*, 정창균*, 윤석준*, 양동열#, 안동규**

Formulation of Optimal Design Parameters and Failure Map for Metallic Sandwich Plates with Inner Dimpled Shell Structure Subject to Bending Moment

Dae Yong Seong*, Chang Gyun Jung*, Seok Joon Yoon*, Dong Yol Yang# and Dong Gyu Ahn**

ABSTRACT

Metallic sandwich plates with inner dimpled shell subject to 3-point bending have been analyzed and then optimized for minimum weight. Inner dimpled shells can be easily fabricated by press or roll with high precision and bonded with same material skin sheets by resistance welding or adhesive bonding. Metallic sandwich plates with inner dimpled shell structure can be optimally designed for minimum weight subject to prescribed combination of bending and transverse shear loads. Fundamental findings for lightweight design are presented through constrained optimization. Failure responses of sandwich plates are predicted and formulated with an assumption of narrow sandwich beam theory. Failure is attributed to four kinds of mechanisms: face yielding, face buckling, dimple buckling and dimple collapse. Optimized shape of inner dimpled shell structure is a hemispherical shell to minimize weight without failure. It is demonstrated that bending stiffness of sandwich plate is 2 or 3 times larger than solid plates with the same strength. Failure mode boundaries and iso-strength lines dependent upon the geometry and yield strain of the material are plotted with respect to geometric parameters on the failure map. Because optimal parameters of maximum strength for given material weight can be selected from the map, analytic solutions for maximum strength are expressed as a function of only material property and proposed strength. These optimal parameters match well with numerical optimal parameters.

Key Words: Inner dimple structure (내부 딴플 구조), Sandwich plate (샌드위치 판재), Optimal design (최적설계), 3-Point bending(3 점 굽힘 하중), Failure map(파손선도), Optimal design parameter(최적설계변수)

기호설명

M = Maximum moment of sandwich plate
V = Transverse shear of sandwich plate
l = Characteristic length

☞ 접수일: 2005년 11월 1일; 게재승인일: 2006년 7월 13일

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

교신저자: 한국과학기술원 기계공학과

E-mail dvyang@kaist.ac.kr Tel. (042) 869-3214

** 조선대학교 기계공학과

- Π = Dimensionless load
- ψ = Dimensionless weight
- W = Sandwich plate weight per unit area
- ρ = Density of the material
- E = Young's modulus
- I = 2nd moment of inertia
- L = Span length
- t_f = Thickness of face sheet
- t_i = Thickness of Inner dimpled shell
- R = Radius of dimpled shell structure
- θ = Angle of dimpled shell structure
- ν = Poisson's ratio
- λ = Mode parameter of dimple failure
- ϵ_y, σ_y = Yield strain and stress
- α = Bending stiffness ratio

1. 서론

금속 샌드위치 판재는 벌집형(honeycomb), 트러스(truss), 직조금속(metallic textile), 메탈 폼(foam), 딴플(dimple)등 다양한 형태의 내부구조 상하 양면에 표면판재를 저항용접이나 접착제로 접합하여 만드는 경량 고강성/고강도 판재이다.¹ 대부분 금속 샌드위치 판재는 우선적으로 굽힘 하중에 대한 최적화를 통해 설계변수의 특성을 분석한 후 제작되고 압축, 전단, 뒤틀림 등의 하중에 대한 특성분석을 하여 목적과 용도에 맞게 설계를 하는 것이 일반적이다. 그 중에 벌집형,² 트러스,^{2,3} 직조금속,^{4,5} 메탈 폼⁶의 내부구조 금속 샌드위치 판재는 굽힘 하중에 대한 최적화 및 기계적 특성에 대한 연구가 진행되었고 경량 고강도/고강성 판재임이 이론적 또는 실험적으로 입증되었다.

그런데, 프레스나 롤 금형으로 내부구조재를 성형하고 표면판재와 접합하여 높은 정밀도 가지는 Fig. 1 과 같은 딴플형 내부구조 금속 샌드위치 판재의 굽힘 특성에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 그리고, 면재의 박판을 이용한 딴플형 내부구조는 선재의 내부구조보다 다소 무거우나 표면판재항복에 의한 파손이 발생한 후 붕괴하기까지 많은 하중을 지탱할 수 있고 붕괴하기까지의 처짐량이 커서 굽힘에 의한 성형에 유리하고 많은 에너지를 흡수하여 빔으로써 안전한 구조이다.^{6,7} 이러한 딴플형 내부구조 금속 샌드위치 판재의 제작에 앞서 굽힘 하중에 대한 경량 최적설계를 수행하여 설계

변수를 분석이 필요하다.

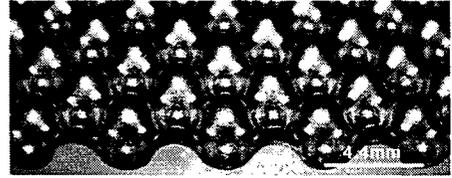


Fig. 1(a) Inner dimpled shell formed with punch and die

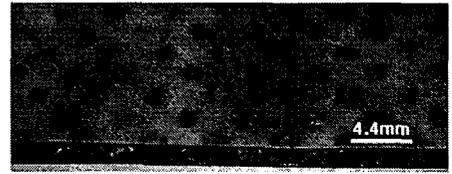


Fig. 1(b) Sandwich plate bonded by resistance welding

금속 샌드위치 판재의 최적설계에 대한 연구는 Ashby⁸ 등이 메탈 폼 샌드위치 판재에 대하여 디자인 다이어그램(design diagram)과 붕괴기구선도(collapse mechanism map)를 작성하여 특정 설계변수에 대한 탄성파손모드와 소성붕괴모드를 예측하였고 Deshpande⁹ 등이 유사사방 트러스형 샌드위치 판재의 붕괴기구선도(collapse mechanism map)에 등 강도선도를 도시하여 설계변수에 대한 붕괴모드와 붕괴하중을 가시화하였다. 그러나 선도작성에 있어서 두 개의 설계변수를 임의로 고정하였기 때문에 최적화된 최소무게 값과 최대강도의 설계변수를 선도상에 사상시키지 못하였다. 그리고, Zok¹⁰ 등은 목적함수인 판재의 무게와의 관계에서 하나의 설계변수를 소거하여 피라미드형 트러스 샌드위치 판재의 파손선도(failure map)를 작성하였으나 코어의 각도를 임의로 고정하며 최적의 설계조건에서 파손선도를 작성하지 못하였다. 본 연구에서는 SQP-PD 알고리즘의 수치적 결과와 목적함수와의 관계에서 설계변수를 정의하여 샌드위치 판재의 최대강도 설계를 위한 파손선도(failure map)를 작성하였다. 따라서 최대강도를 가지는 최적의 변수조합을 선도상에 사상시키고 최적의 설계변수를 재료 물성과 목표강도의 함수로 표현하고자 한다.

2. 최적화 과정

2.1 하중조건과 목적함수의 정의

Fig. 2 와 같이 다양한 굽힘 하중이 작용 할 때 샌드위치 판재가 받는 최대 모멘트는 전단력과 특성길이(l)에 의해 $M = Vl$ 과 같은 관계를 가지도록 특성길이를 정의함으로써 다양한 경계조건의 굽힘 하중을 3 점 굽힘 하중조건으로 일반화 할 수 있다. 또한 굽힘 하중조건에 의해 특성길이가 정해지고 전단력이나 모멘트만 계산하면 모든 하중에 관한 모든 경계조건을 묘사할 수 있다. 무차원 하중변수를 식 (1)과 같이 정의하면 최적설계의 목적함수인 최소무게를 식 (2)와 같이 유도할 수 있고 구속조건인 파손모드를 무차원 기하학적 변수와 하중변수로 기술할 수 있다.²

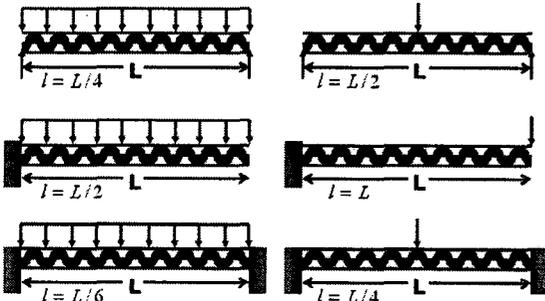


Fig. 2 Relationship between l and loading span L for common test configuration

$$\Pi = \frac{V}{\sqrt{EM}} \quad (1)$$

$$\Psi = \frac{W}{\rho l} \quad (2)$$

2.2 기하학적 형상의 정의

딴플형 내부구조 금속 샌드위치 판재는 Fig. 3 같은 2 차원 A 단면(A plane)으로 기술 할 수 있다. 표면 판재의 두께를 t_f , 내부 판재의 두께를 t_i , 상부 딴플의 반경을 R_1 , 하부 딴플의 반경을 R_2 , 상부 딴플의 각도를 θ_1 , 하부 딴플의 각도를 θ_2 로 각각 재료의 효율성 측면에서 딴플 간의 간격을 최소화하였다. 이는 중립면에 있는 재료를 최소화하여 강성을 높이고 표면판재의 좌굴을 최대한 방지하기 위해서이다.

2.3 구속조건의 정의 및 수식화

기하학적 변수들의 굽힘 하중에 대한 특성을 분석하기 위한 기초연구 대상으로 상부 딴플과 하부 딴플이 같은 $R_1 = -R_2 = R_o, \theta_1 = \theta_2 = \theta_o$ 의 경우를 최적화 대상으로 선정하였다. 또한, 수식의 간편화를 위해 기하학적 무차원 변수들의 집합을 식 (3)과 같이 정의하였다.

$$\vec{x} \equiv (x_1, x_2, x_3, x_4) = \left(\frac{R_o}{l}, \theta_o, \frac{t_f}{l}, \frac{t_i}{l} \right) \quad (3)$$

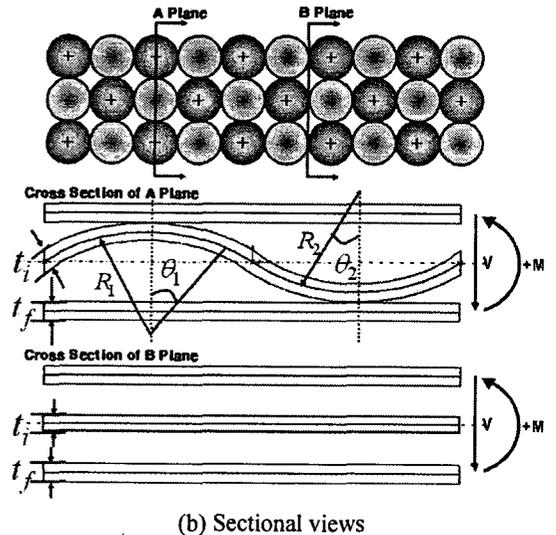
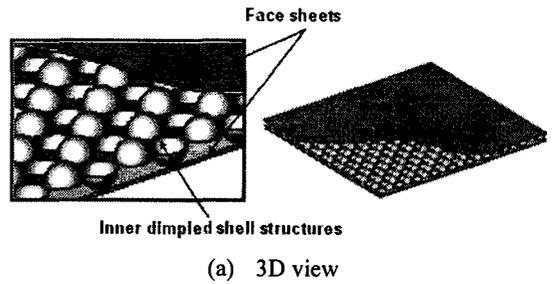


Fig. 3 Schematics of the sandwich plate with inner dimpled shell and geometry

목적함수는 딴플 형상이 곡면을 따라 두께가 일정하다는 가정하에서 식 (4)와 같이 유도하였다. 단면 이차 모멘트는 Fig. 3의 단면 B와 같이 샌드위치 판재의 중립면에 내부판재가 존재한다는 가정하에 무차원 기하학적 변수들로 식 (5)와 같이 표현하였다. 여기서 형상의 단순화는 결국 내부구

조의 강성을 무시하는 효과를 가진다.

$$\Psi = \frac{W}{\rho l} = 2x_3 + \left\{ 1 - \frac{\pi}{4} + \frac{\pi(1 - \cos x_2)}{2 \sin^2 x_2} \right\} x_4 \quad (4)$$

$$I^* = \frac{x_4^3}{12} + \frac{x_3^3}{6} + \frac{x_2}{2} (2x_1(1 - \cos x_2) + x_3 + x_4)^2 \quad (5)$$

Fig. 4는 딴플형 내부구조를 가진 샌드위치 판재의 가능 파손모드를 나타내는 그림이다. ①표면 판재항복, ②표면판재좌굴, ③딴플붕괴, ④딴플좌굴, 총 4 가지의 가능한 파손모드를 최소무게 최적화의 구속조건으로 선정하였으며 각각의 구속조건들을 무차원 변수들로 식 (6)~(8)과 같이 기술하였다. 그리고 Fig. 5 와 같이 표면판재좌굴에서도 내부 딴플의 굽힘 강성을 무시한다는 가정과 좌굴단위경계를 따라 단순지지되었다고 가정하였다.

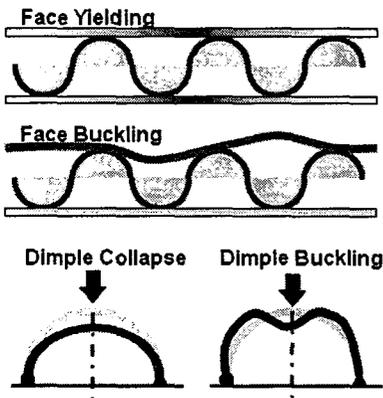


Fig. 4 Possible failure mode: Face yielding, Face buckling, Dimple Collapse, Dimple buckling

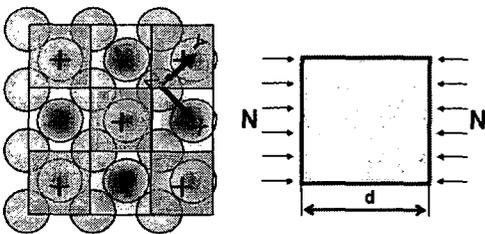


Fig. 5 Face buckling line of sandwich plate

딴플파손모드는 딴플의 중심에 굽힘에 의한 전단력이 딴플 중심에 집중하중으로 작용한다는 가

정과 각각의 딴플이 중립면에서 단순지지되었다고 가정하여 수식화하였다. 식 (8b)의 λ 는 딴플의 파손모드를 결정짓는 값으로써 값이 낮을수록 항복에 의한 딴플붕괴(collapse)가 발생하고, 값이 클수록 좌굴(buckling)이 발생하는 경향을 나타낸다. 그리고 주어진 λ 값의 범위에서 축 대칭인 딴플형 박판구조가 집중 하중을 받을 때의 좌굴 및 붕괴하중을 측정한 실험결과와 식 (8)이 비교적 잘 일치한다.¹²

구속조건(Constraints):

1) 표면판재항복(Face Yielding)

$$\left(\frac{V^2}{EM} \right) \left(\frac{1}{\epsilon_y} \right) \times \left(\frac{x_1(1 - \cos x_2) + x_3 + 0.5x_4}{I^*} \right) \leq 1 \quad (6)$$

2) 표면판재좌굴¹¹(Face Buckling)

$$\left(\frac{V^2}{EM} \right) \left(\frac{24(1 - \nu^2)}{\pi^2} \right) \left(\frac{x_1^2 \sin^2 x_2}{x_3^2 I^*} \right) \times (x_1(1 - \cos x_2) + x_3 + 0.5x_4) \leq 1 \quad (7)$$

3) 내부딴플결함¹²(Dimple Failure)

$$\left(\frac{V^2}{EM} \right) \left(\frac{24}{1 - \nu^2} \right)^{\frac{1}{2}} (x_1 \sin x_2) \times \left(x_4^2 \sin^2 \frac{x_2}{2} \right)^{-1} \leq 1 \quad (8a)$$

$$4 \leq \lambda = (12(1 - \nu^2))^{\frac{1}{4}} \left(\frac{x_1}{x_4} \right)^{\frac{1}{2}} 2 \sin \frac{x_2}{2} \leq 18 \quad (8b)$$

재료의 물성치는 항복변형률($\epsilon_y = \sigma_y / E$)로 선택하였으며 일반강판($\epsilon_y = 0.001$)에서부터 고강도 알루미늄($\epsilon_y = 0.007$)까지 물성과 하중을 변화시키면서 최적화를 수행하였다. 무차원 하중변수가 0.0001 에서 0.003 사이의 7 가지 값에 대하여 항복 변형률이 0.003, 0.004, 0.007 의 3 가지 조건으로 총 21 가지 경우에 대하여 최적화하였다. 실제 알고리

증 상에는 표면판재항복, 표면판재좌굴, 내부딴플 파손 3 가지 구속조건과 딴플파손모드에 관한 2 가지 구속조건, 총 5 가지 구속조건을 적용하였다. 그리고 하중과 물성에 따라 최소무게를 갖는 최적의 금속 샌드위치 판재의 설계변수조합을 찾기 위해 비선형 구속조건 최적화에 대표적인 알고리즘인 SQP-PD 알고리즘을 사용하였다.¹³ SQP-PD 알고리즘은 비선형 목적함수와 구속조건이 있는 최적화 문제에서 비선형 식을 선형화하여 최적 값을 찾는 알고리즘으로 수렴성이 높다. 초기값이 가용영역 내에 존재하지 않아도 되며 등식으로 된 구속조건을 처리할 수 있다는 장점이 있으나 초기값에 따라 국부적 최적 값을 찾을 수 있다는 단점이 있다. 따라서 비선형식으로 표현된 결함 및 파손모드를 구속조건으로 하는 구조체의 치수 최적화 문제에 널리 쓰인다.

3. 최적설계 결과 및 분석

3.1 특정 굽힘 하중에 대한 최소무게

최적화 결과로는 파손이 발생하지 않는 범위에서 샌드위치 판재의 최소무게를 가지는 변수조합과 최적화 경향을 알 수 있다. 최적변수들로부터 목적함수인 최소무게 값을 계산하고 Fig. 6 과 같이 그래프로 도식화하였는데 무차원 하중 변수와 목적함수가 선형적인 거의 관계가 있음을 알았다.

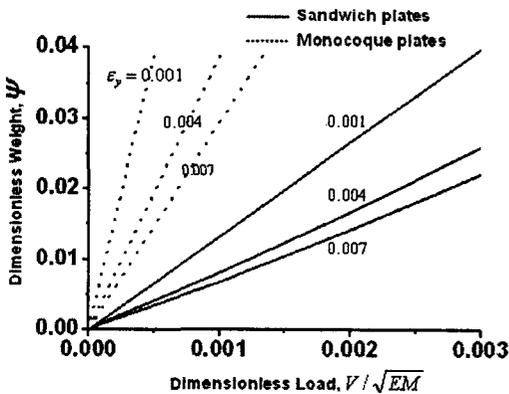


Fig. 6 Comparison of optimal weights of nearly-optimized sandwich plates with inner dimpled shell and solid plates

3.2 특정 굽힘 하중에 대한 설계변수의 영향

무차원 하중범위(0.0001~0.003)에서 최소무게를 가지는 최적변수를 Fig. 7 과 같이 그래프로 도식화하였다. 그리고 최소무게를 가지기 위한 설계변수의 경향을 분석해보면 딴플 반경이 커지면 단면 이차모멘트가 증가하여 굽힘 강성이 좋아지나 표면판재와의 접점간의 간격이 커져 표면판재좌굴에 불리하게 된다. 따라서 표면판재좌굴이 발생하지 않는 범위에서 딴플 반경을 가능한 크게 하는 경향을 보였다. 그리고 표면판재의 두께는 표면판재의 항복, 내부판재의 두께는 딴플파손이 발생하지 않는 범위에서 가능한 작아지는 경향을 보였다. 딴플 각도의 경우는 모든 하중 영역에서 90°로 수렴하였는데 반구형 딴플이 단면 이차모멘트를 증가시키고 접점간의 간격을 줄여 표면판재파손에 유리하도록 하기 때문이다. 따라서 반구형 딴플 구조가 굽힘 하중에 대한 최적의 내부구조 형상임을 알 수 있었다.

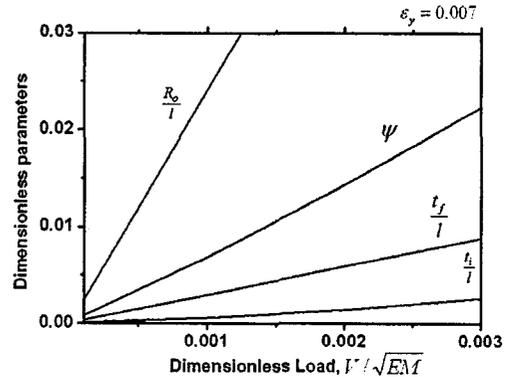


Fig. 7 Size of geometric parameters for optimized sandwich plates ($\nu=1/3$)

3.3 샌드위치 판재의 굽힘 강성

최적화된 설계변수조합에서 무차원 하중변수는 샌드위치 판재의 파손이 발생하는 시점의 하중 값이므로 샌드위치 판재의 항복 및 좌굴 강도라고 판단할 수 있다. 따라서 동일 강도와 물성을 가지는 샌드위치 판재와 일반판재의 굽힘 강성비(α)를 Fig. 8 과 같이 계산하여 비교할 수 있다. 물성에 따라 최적화된 샌드위치 판재는 일반 판재보다 모든 하중범위에서 2 배에서 3 배 정도로 일정한 값으로 굽힘 강성이 개선되었고 굽힘 강성은 하중 변수와 무관하고 재료물성만의 함수이며 항복변형률이 작을수록 굽힘 강성비가 더 개선되었다.

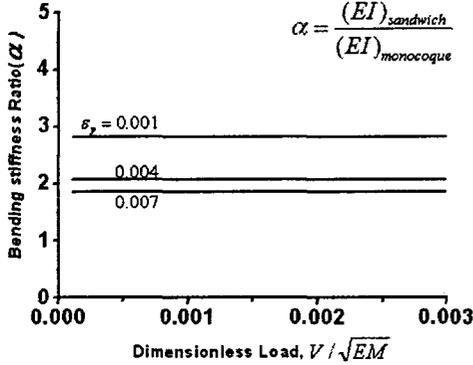


Fig. 8 Bending stiffness comparison of sandwich plates with monocoque plates

4. 파손선도(Failure Map) 작성

4.1 설계변수와 구속조건의 단순화

제 3 장의 연구결과 뒀플형 금속 샌드위치 판재의 최적설계에서 반구형 뒀플이 최적 형상임을 확인하였다. 따라서 뒀플 각도(θ_s)를 90° 로 고정하면 설계변수는 식 (3)과 같이 세 가지로 줄어들게 된다. 여기서 편의상 3 장의 무차원 변수표기를 그대로 사용하였다.

$$\vec{x} \equiv (x_1, x_3, x_4) = \left(\frac{R_o}{l}, \frac{t_f}{l}, \frac{t_i}{l} \right) \quad (9)$$

그리고 목적함수를 무차원 변수들로 표기하면 식 (10)과 같다.

Minimize:

$$\Psi = \frac{W}{\rho l} = 2x_3 + \left(1 + \frac{\pi}{4} \right) x_4 \quad (10)$$

또한, 상하 동일 크기의 반구형 뒀플형 샌드위치 판재는 중립면이 항상 샌드위치 판재 전체 두께의 중앙에 위치하기 때문에 고차항을 무시할 수 있고 샌드위치 판재의 전체 두께가 재료판재의 두께보다 보통 크기 때문에 단면 이차모멘트와 y_{max} 를 식 (11)과 (12)처럼 단순화할 수 있다.

$$I^* = \frac{I}{l^3} = 2x_3x_1^2 \quad (11)$$

$$y_{max}^* = \frac{y_{max}}{l} = x_1 \quad (12)$$

따라서, 식 (9), (11)과 (12)을 이용하여 구속조건 식 (13)~(15)을 얻을 수 있다. 여기서, 뒀플파손은 임계하중만 고려하였고 파손모드는 고려하지 않았다.

Subject to:

- 표면판재항복(Face Sheet Yielding)

$$\left(\frac{V^2}{EM} \right) \left(\frac{1}{2\varepsilon_y} \right) \left(\frac{1}{x_1x_3} \right) \leq 1 \quad (13)$$

- 표면판재좌굴(Face Sheet Buckling)

$$\left(\frac{V^2}{EM} \right) \left(\frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2} \right) \left(\frac{x_1}{x_3^3} \right) \leq 1 \quad (14)$$

- 내부뒀플파손(Inner Dimple Failure)

$$\left(\frac{V^2}{EM} \right) \left(\frac{96}{1-\nu^2} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{x_1}{x_4^2} \right) \leq 1 \quad (15)$$

4.2 파손경계(Failure Boundary)

파손선도를 작성하기 위해서는 구속조건의 경계를 설계변수의 함수로 나타내어야 한다. 따라서 표면판재항복과 표면판재좌굴의 모드경계를 식 (10), (13), (14)을 연립하여 무차원 뒀플반경(x_1)과 무차원 표면판재두께(x_3)에 관한 식 (16)과 같이 유도하였다. 같은 방법으로 표면판재항복과 내부뒀플파손, 표면판재좌굴과 내부뒀플파손의 경계에 관한 식 (17)과 (18)를 얻을 수 있다.

- 표면판재항복 - 표면판재좌굴

$$x_1 = \left(\frac{\pi^2}{24(1-\nu^2)} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{\varepsilon_y} \right)^{\frac{1}{2}} x_3 \quad (16)$$

- 표면판재항복 - 내부뒀플파손

$$x_1 = \left(\frac{1-\nu^2}{384} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{1}{\varepsilon_y} \right)^{\frac{1}{2}} x_3^{\frac{1}{2}} \left(\frac{4\psi - 8x_3}{4 + \pi} \right) \quad (17)$$

- 표면판재좌굴 - 내부뒀플파손

$$\psi = 2x_3 + \left(1 + \frac{\pi}{4} \right) \left(\frac{2\pi^4}{3(1-\nu^2)^3} \right)^{\frac{1}{4}} (x_3)^{\frac{3}{2}} \quad (18)$$

4.3 파손선도 (Failure Map)

파손선도의 세로축을 뒀플반경, 가로축을 표면판재 두께로 정의하고 파손모드 경계선을 식 (16)~(18)으로 작성한 다음 해당 파손모드에 맞는 등강도선도를 식 (13)~(15)을 이용해 도식하여 Fig. 9 와 같은 파손선도를 작성하였다. 여기서 샌드위치 판재의 무게($\psi = 0.015$)를 고정하였고 재료의 물성은 SUS304($\epsilon_y = 0.0015$, $\nu = 0.28$)이다. 그런데, SQP-PD 알고리즘의 수치적 최적화에서는 목표강도를 고정하고 샌드위치 판재가 파손이 발생하지 않는 범위에서 최소무게 값을 찾았었고 파손선도에서는 재료의 무게가 정해질 때 최대강도를 가지는 설계변수 조합을 그래프로 가시화하여 최적 변수조합을 찾을 수 있다. 최적 변수조합은 표면판재항복, 표면판재좌굴, 내부뒀플파손 세 가지 구속조건이 만드는 평면의 교차점에 존재한다.

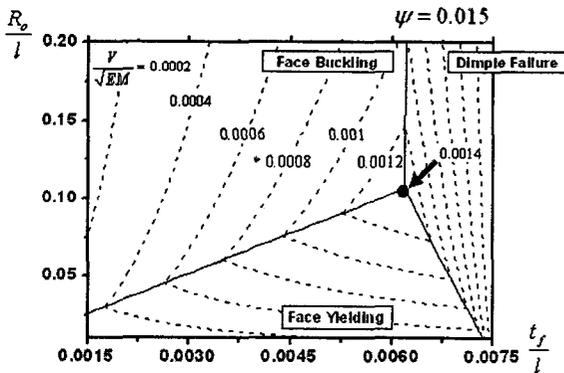
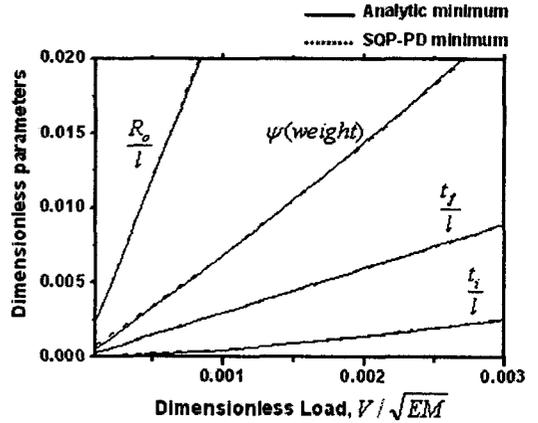


Fig. 9 Failure map for sandwich plate with fixed weight

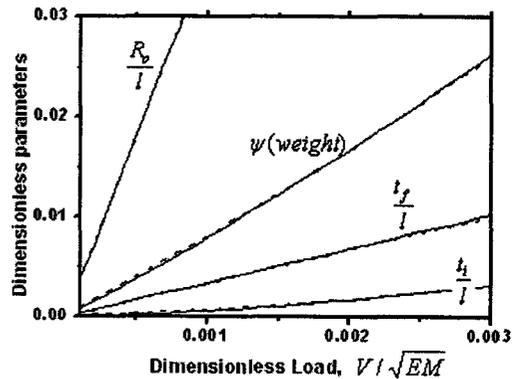
4.4 최적 설계변수의 이론적 수식화

SQP-PD 알고리즘을 이용한 수치적 최적화 결과 반구형 뒀플이 최적형상임을 이용하여 설계변수를 세가지로 식 (9)와 같이 줄일 수 있고, 파손선도로부터 최적의 변수 조합이 표면판재항복, 표면판재좌굴, 내부뒀플파손 세가지 구속조건에 존재한다는 것을 알았다. 따라서 식 (13)~(15)을 연립하여 각각의 설계변수를 재료물성과 목표강도만의 함수로 변환하여 최적의 설계변수를 식 (19)~(21)과 같이 유도 할 수 있다.

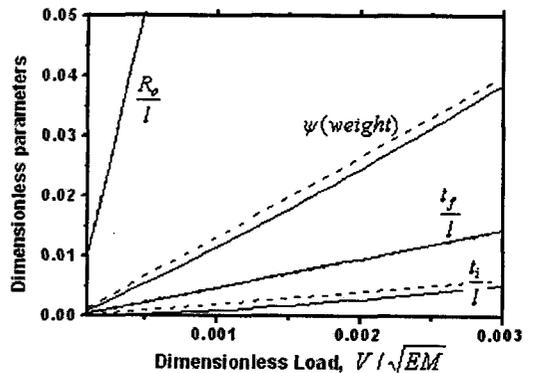
$$x_1 = \frac{R_o}{l} = \left(\frac{\pi^2}{96(1-\nu^2)} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{1}{\epsilon_y} \right)^{\frac{3}{4}} \left(\frac{V}{\sqrt{EM}} \right) \quad (19)$$



(a) $\epsilon_y = 0.007$



(b) $\epsilon_y = 0.004$



(c) $\epsilon_y = 0.001$

Fig. 10 Comparison of optimal Parameters for minimum values by SQP-PD with the analytic minimum

$$x_3 = \frac{t_f}{l} = \left(\frac{6(1-\nu^2)}{\pi^2} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{1}{\varepsilon_y} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{V}{\sqrt{EM}} \right) \quad (20)$$

$$x_4 = \frac{t_i}{l} = \left(\frac{96\pi^2}{(1-\nu^2)^3} \right)^{\frac{1}{8}} \left(\frac{1}{\varepsilon_y} \right)^{\frac{3}{8}} \left(\frac{V}{\sqrt{EM}} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (21)$$

그리고, 식 (20)과 (21)를 (10)에 대입하면 샌드위치 판재의 최적최소무게 식 (22)를 얻는다.

$$\psi = 2 \left(\frac{\pi^2}{96(1-\nu^2)} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{1}{\varepsilon_y} \right)^{\frac{3}{4}} \left(\frac{V}{\sqrt{EM}} \right) + \left(1 + \frac{\pi}{4} \right) \left(\frac{96\pi^2}{(1-\nu^2)^3} \right)^{\frac{1}{8}} \left(\frac{1}{\varepsilon_y} \right)^{\frac{3}{8}} \left(\frac{V}{\sqrt{EM}} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (22)$$

이론적 최적변수의 결과를 검증하기 위해 SQP-PD 알고리즘에 의한 수치적 최적화 결과와 Fig. 10 와 같이 비교해 보았다. SQP-PD 알고리즘을 이용한 목표강도를 만족하는 최소무게설계와 파손선도를 이용한 특정 재료무게로부터 최대강도설계의 결과가 항복변형률이 $\varepsilon_y = 0.007$ 와 0.004 일 때는 거의 동일하였고 $\varepsilon_y = 0.001$ 의 경우 뒤틀반경과 표면판재의 두께는 거의 일치하나 내부판재의 두께가 이론적 최적화의 값이 다소 적게 나타났다. 이는 뒤틀의 파손모드를 고려하지 않은 이론적 최소값이 파손모드를 고려한 SQP-PD 알고리즘의 최소값보다는 보다 넓은 가용영역에서 최소값을 찾으므로 목적함수인 샌드위치 판재의 최소무게 값이 약 10% 정도 적게 계산된 것으로 판단된다.

4.5 유사모델 금속 샌드위치 판재와의 비교

뒤틀형 금속 샌드위치 판재를 굽힘 하중에 대하여 최적화하여 그 결과를 유사 모델 금속 샌드위치 판재들의 굽힘 하중에 대한 경량 최적화 결과와 그래프를 중첩하여 Fig. 11 과 같이 비교해 보았다. 비교 대상으로는 선재를 이용한 트러스²와 직조 금속망,⁴ 면재를 샌드위치 판재 두께방향으로 절단하여 만든 벌집구조²와 면재를 굽힘 성형한 다각기둥의 주름판재구조¹⁴를 내부구조로 하는 금속 샌드위치 판재를 선정하였다. 여기서 모든 샌드위치 판재의 물성은 항복변형률($\varepsilon_y = 0.007$)로 통일하였으며 동일 무차원 변수와 목적함수로 비교

하였다. 샌드위치 판재가 특정 굽힘 하중을 받을 때 벌집구조가 가장 가벼우며 직조금속망, 트러스 구조, 박판을 성형한 뒤틀, 주름판재 내부구조 순으로 나타났다.

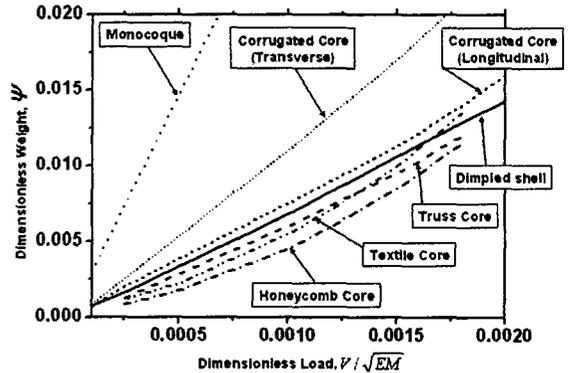


Fig. 11 Comparison of optimized weights of sandwich plates

그러나 벌집구조와 직조금속망은 하중이 증가할수록 굽힘 하중에 대한 최소무게측면에서 이점이 사라지는 경향을 보여 오히려 높은 하중에서는 뒤틀과 트러스 구조가 좋은 특성을 보인다. 그리고, 주름판재 내부구조 샌드위치 판재는 주름방향의 굽힘 특성은 좋으나 주름의 수직방향 굽힘 특성에서 표면판재의 좌굴이 쉽게 발생하는 단점을 가진다.

4.6 일반적 형상의 뒤틀형 샌드위치 판재

지금까지 뒤틀형 금속 샌드위치 판재의 최적화 대상으로 상하 뒤틀의 형상이 같은 경우에 대하여 최적화한 결과에서 반구형 뒤틀이 최적 형상임을 확인하였고 각각의 설계변수와 파손모드를 분석하였다. 따라서 보다 일반적인 뒤틀형 내부구조 샌드위치 판재의 굽힘 하중에 대한 특성을 파악하기 위하여 한 방향 뒤틀은 반구형으로 고정하고 다른 방향은 일반적인 뒤틀인 Fig. 12a 와 같은 경우를 분석하면 뒤틀 간의 간격이 길어져 표면판재좌굴에 불리해진다. 그리고 Fig. 12b 와 같이 뒤틀반경이 다른 반구형 뒤틀 샌드위치 판재의 경우는 샌드위치 판재의 중립면이 샌드위치 판재 전체두께의 중앙에서 작은 뒤틀 방향으로 이동하게 되어 두 표면판재가 동시에 항복되지 않고 한쪽 판재가 먼저 항복되는 현상이 발생하므로 표면판재항복에

취약해진다. 따라서 내부구조의 강성을 무시 할 수 있는 딩플형 금속 샌드위치 판재는 상하 동일한 반경의 반구형 딩플이 굽힘 하중에 대한 최적의 내부구조 형상임을 결론지었다.

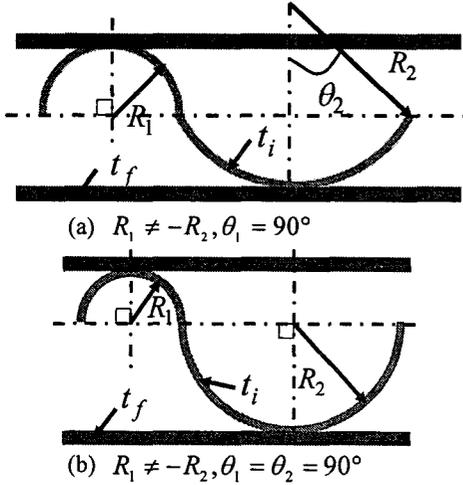


Fig. 12 Schematic of sandwich plates with general dimpled shell structures

5. 결론

굽힘 하중을 받는 딩플형 내부구조 금속 샌드위치 판재를 탄성파손이 발생하지 않는 범위에서 최소무게를 가지도록 최적의 변수 조합을 계산하였고 그 결과를 다음과 같이 정리 하였다.

- 1) 최소무게 및 최대강도를 갖는 최적의 변수 조합은 표면판재항복, 표면판재좌굴, 내부딩플파손이 동시에 발생하는 영역에 존재한다.
- 2) 반구형 딩플이 굽힘 하중에 대한 내부구조의 최적형상임을 확인하였다.
- 3) 딩플형 내부구조 금속 샌드위치 판재는 같은 강도의 일반판재보다 물성에 따라 2~3 배의 굽힘 강성을 가진다.
- 4) 최대강도를 갖는 딩플형 샌드위치 판재의 파손선도를 작성하고 최적변수를 물성과 목표강도의 함수로 수식화하였다.
- 5) 굽힘 하중에 대한 무게특성은 벌집형, 직조금속, 트러스, 딩플, 주름판재 순으로 가볍다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 차세대신기술개발사업인 마이크로 첨단복제 생산시스템 개발사업결과의 일부이며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Waldley, H. N. G., Fleck, N. A. and Evans, A. G., "Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures," Composites Science and Technology, Vol. 63, pp. 2331-2343, 2003.
2. Wicks, N. and Hutchinson, J. W., "Optimal truss plates," International Journal of Solids and Structures, Vol. 38, pp. 5164-5183, 2001.
3. Jung, C. G., Yoon, S. J., Yang, D. Y., Lee, S. M., Na, S. J., Lee, S. H. and Ahn, D. G., "Fabrication and static bending test in ultra light inner structured and bonded(ISB) panel containing repeated inner pyramidal structure," J. of the KSPE, Vol. 22, No. 6, pp. 175-182, 2005.
4. Zok, F. W., Rathbun, H. J. and Evans, A. G., "Design of metallic textile core sandwich panels," International Journal of Solids and Structures, Vol. 40, pp. 5707-5722, 2003.
5. Jung, C. G., Yoon, S. J., Yang, D. Y., Lee, S. M., Na, S. J., Lee, S. H. and Ahn, D. G., "Basic study in fabrication and mechanical characteristics of ultra light inner structured and bonded(ISB) panel containing perpendicularly woven metal," J. of the KSPE, Vol. 22, No. 5, pp. 152-158, 2005.
6. Seong, D. Y., Jung, C. G., Yoon, S. J. and Yang, D. Y., "Efficient methods of prediction incorporating equivalent models for elastic-plastic bending behavior of metallic sandwich plates with inner dimpled shell structure," Transactions of Materials Processing, Vol. 14, No. 8, pp. 718-724, 2005.
7. Seong, D. Y., Jung, C. G., Yoon, S. J., Yang, D. Y., Lee, S. M., Na, S. J., Lee, S. H. and Ahn, D. G., "Fabrication of Metallic Sandwich Plates with Inner Dimpled Shell Structure and Static Bending Test," J. of the KSME, Vol. 30, No. 6, accepted, 2006.
8. Ashby, M. F., "Metal Foam: A Design Guide,"

- Butterworth Heinemann, Boston, 2000.
9. Deshpande, V. S. and Fleck, N. A., "Collapse of truss core sandwich beams in 3-point bending," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 38, pp. 6275-6305, 2001.
 10. Zok, F. W., Waltner, S. A., Wei, Z., Rathbun, H. J., McMeeking, R. M. and Evans, A. G., "A protocol for characterizing the structural performance of metallic sandwich panels: application to pyramidal truss cores," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 40, pp. 6249-6271, 2004.
 11. Timoshenko, S. P. and Gere, J. M., "Theory of Elastic Stability," McGraw-Hill, New York, 1961.
 12. Baker, E. H., Kovalevsky, L. and Rish, L. F., "Structural analysis of shells, Huntington," New York, pp. 220-276, 348-439, 1981.
 13. Belegundu, S. D. and Chandrupatla, T. R., "Optimization concepts and applications in engineering," Prentice Hall, New Jersey, pp. 141-194, 1999.
 14. Valdevit, L., Hutchinson, J. W. and Evans, A. G., "Structurally optimized sandwich panels with prismatic cores," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 41, pp. 5105-5124, 2004.