

자동차용 알루미늄 5185-폴리프로필렌 샌드위치 판재의 성형성

김기주^{*1)} · 정효태²⁾ · 손일선³⁾ · 김철웅⁴⁾ · 김중배⁵⁾

¹⁾쌍용자동차 CAE팀, ²⁾강릉대학교 금속재료공학, ³⁾오산대학 자동차기계계열, 성장동력 특성화사업단,
⁴⁾고려대학교 기계공학과 유엔아이(주) 고려대연구소, ⁵⁾동양공업전문대학 기계설계과

Formability of Aluminum 5182-Polypropylene Sandwich Panel for Automotive Application

Kee Joo Kim^{*1)} · Hyo-Tae Jeong²⁾ · Il-Seon Sohn³⁾ · Cheol-Woong Kim⁴⁾ · Joong Bae Kim⁵⁾

¹⁾CAE Team, Ssangyong Motor Co., 150-3 Chilgoi-dong, Pyeongtaek-si, Gyeonggi 459-711, Korea

²⁾Department of Metallurgical Engineering, Kangnung National University, Gangwon 210-702, Korea

³⁾School of Automotive & Mechanical Engineering, Osan College, Gyeonggi 447-749, Korea

Center for Growth Power Characterization

⁴⁾Mechanical Engineering, U&I Corporation Research Center, Korea University, Seoul 130-701, Korea

⁵⁾Department of Mechanical Design, Dongyang Technical College, Seoul 152-714, Korea

(Received 5 September 2006 / Accepted 9 October 2006)

Abstract : The objective of this study was to develop formability evaluation techniques in order to apply aluminum sandwich panel for automotive body parts. For this purpose, newly adopting formability evaluation (using limit dome height and plane strain test) was carried out in order to secure the fundamental data for the measurement of sheet metal forming and the establishment of optimum forming conditions of the aluminum sandwich panel. The results showed that there were good agreements between the old formability evaluation method and the new method which was more simplified than that of old one. From the results of these formability evaluation, the formability of sandwich panel was higher than that of aluminum alloy sheet alone which was the skin component for the sandwich panel. Also, it was found that sandwich panel could reduce the weight and could have the same flexural rigidity simultaneously when it was compared to the automotive steel sheet.

Key words : Sandwich panel(샌드위치 판재), Aluminum 5182(알루미늄5182), Polypropylene(폴리프로필렌), Forming limit diagram(성형한계도), Limit dome height(한계돔높이)

1. 서론

최근 자동차 산업에서는 경량화가 지속적인 관심의 대상이 되고 있으며, 차체용 판재를 강판으로부터 알루미늄 판재로 대체하려는 노력이 지속되어, 일부 고급차종을 중심으로 알루미늄 판재가 적용되고 있다. 일반적으로 자동차용 판재로는 강도 및 성형성이 우수한 알루미늄 5000계 합금이 사용되고

있으나, 철강재료보다 성형성이 떨어져 대체 재료로의 적용에 큰 문제점을 야기하고 있다. 이와 같은 문제점을 극복하는데 초점을 맞추어 샌드위치 판재를 연구하였는데, 샌드위치 판재란 이중의 단일 혹은 복합판재를 조합·적층하여 제조한 판재를 말한다. 저밀도를 가진 폴리프로필렌을 코어재로 사용하고 상대적으로 강도가 높은 알루미늄 표면재를 접합시켜 제조한 샌드위치 판재는 경량성으로 인해 자동차 차체용 판재에의 적용에 상당한 잠재력을

*Corresponding author, E-mail: kjkimfem@smotor.com

가지고 있다.¹⁻³⁾ 또한 코어재료로 사용한 폴리프로필렌의 경우 연신율이 500% 이상³⁾으로 성형성 향상에도 기여하리라 여겨진다. 단일재료로 구성된 알루미늄 판재의 성형성에 관한 연구는 많은 연구자들에 의해 수행되었으나, 고분자 재료와 알루미늄 합금을 접합하여 제조한 복합재 샌드위치 판재의 성형성에 관한 연구는 그 복합재 구성재의 조합에 따라 다양해질 수 있어 흥미로운 테마이다.

성형성을 보다 정량적으로 평가하기 위해서 성형한계도(FLD: forming limit diagram)를 작성하는데, 성형한계도란 과탄을 유발하는 판면상의 임계 주변형률(major strain) 및 부변형률(minor strain)을 미리 마킹한 그리드(grid)를 성형한 후에 실험적으로 측정하여 한 평면상에 도시한 것이다.^{4,6)} 그러나, 성형한계도는 시편의 너비를 달리한 여러개(8~15개)의 시편을 가공하여야 할 뿐만 아니라, 알루미늄의 경우 그리드 마킹시 에칭이 잘 안되거나 에칭라인부위가 성형 후 파손되어 사진감광법(photo etching)이나 실크스크린 등으로 마킹해야 하는 등 그 준비과정이 매우 복잡하다. 또한, 준비된 시편을 각각 성형 후에 변형된 그리드를 성형판독기 등을 이용하여 측정하는데⁷⁾, 측정자에 따라 측정오차가 -5~5% 정도까지 변화할 수 있어 여러 번 측정해야 할뿐만 아니라 시험과 측정에 많은 시간이 걸린다는 단점이 있어 보다 간단한 성형성 평가 기법이 요구된다.⁸⁾

본 연구에서는 현재 차체에 적용 가능한 경량 알루미늄 샌드위치 판재(이하 샌드위치 판재)를 접합하여 제작하고 기존의 방법보다 간단하게 성형성 평가를 정량적으로 할 수 있는 한 방안을 제시하였다. 이는 미리 마킹된 그리드의 변형량을 읽는 기존의 방법보다 재현성이 훨씬 뛰어난 한계돔 높이 측정시험과 평면변형 시험결과를 바탕으로 성형한계도를 계산하여 작성하는 것으로, 제시 방안의 신뢰성을 위하여 기존의 복잡한 성형한계도 측정 시험 후 그 결과와 비교하였다.

2. 알루미늄 샌드위치 판재의 제조 및 실험방법

샌드위치 판재는 먼저 필렛(fillet) 상태의 폴리프로필렌을 압출한 후, 표면 양쪽에 압연재인 AA

5182 판재(또는 알루미늄 표면재)와 함께 접착제인 EVA(ethylene vinyl acetone)수지를 이용하여 재압연 접합(온도는 140°C)하여 제조하였다. 샌드위치 판재의 경우 0.2mm 두께의 AA5182 합금을 표면재료, 0.8mm 두께의 폴리프로필렌을 코어재하여 총두께 1.2mm로 압연접합하여 제조하였으며 이 때 사용한 알루미늄합금 판재는 압연 후 어닐링(annealing, 350°C, 2시간)을 행한 재료였다. 표 1에 본 공정에서 표면재료로 사용한 알루미늄 5182 합금의 화학적 조성을 나타내었으며, 표 2에 구성재료의 재원을 또한, Fig. 1에 제조된 샌드위치 판재의 형상을 나타내었다.

샌드위치 판재와 구성재인 알루미늄 5182 판재의 성형성을 측정하기 위하여 시편은 100mm × 100mm ~ 100mm × 20mm 사이에서 10mm씩 폭의 크기를 변화시켜 가공 후 연마하여 노치효과를 상쇄시켰으며, 실크스크린을 이용하여 한변의 길이가 2.5mm인 정사각형 그리드를 마킹하였다. 준비된 시편은 그리스(grease)를 사용하여 윤활 후 시편 가장자리의

Table 1 Chemical composition of AA5182

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
wt. (%)	0.08	0.18	0.05	0.34	4.51	0.02	0.00	0.02	bal.

* wt. : weight, bal.: balance

Table 2 Specifications of 1.2t sandwich panel

Material	Elastic modulus (MPa)	Thickness (mm)	Flexural rigidity (kN-mm)	Density (kg/m ³)
AA5182 skin	79,732	0.2	-	2,650
Polypropylene	827	0.8	-	900
Sandwich	*25,105	1.2	*9.8	*1,480

* Calculated value by rule of mixture

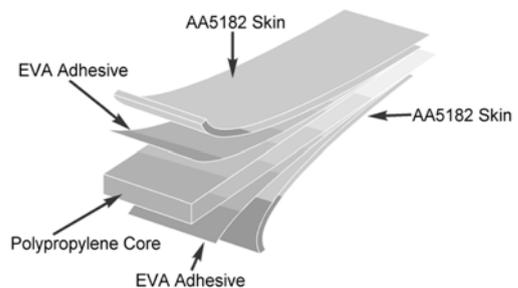


Fig. 1 Schematic drawing of a sandwich sheet

누름압력을 50kN으로 유지하였고 직경 50mm의 반구형 펀치를 상승속도 5mm/min.의 속도로 에릭슨(Ericshen) 시험기를 사용하여 장출(stretching) 성형하였으며 동시에 균열직전까지의 한계돔 높이(LDH : limit dome height)를 측정하였다. 성형 후 시편의 변형된 그리드는 너비 변화에 따라 변형모드가 일축인장(또는 드로잉, drawing)-평면변형-등이축신장 영역으로 변화하므로 성형판독기로 그 때의 한계변형률을 측정하여 성형한계도를 작성하였다. 또한, 평면변형 시험(plane strain test)⁹⁾을 실시하였는데, 변형모드를 평면변형에 최대한 가깝게 하기 위하여 시편 크기를 폭대 표점길이의 비가 7:1이 되도록 Fig. 2와 같이 가공하였다. 평면변형 시험은 성형성 측정 시와 같은 크기의 그리드가 마킹된 시편을 Instron을 사용하여 2.5×10^{-4} /sec의 시험속도로 시험하였으며, 균열이 발생함과 동시에 시험을 중단하여 그리드 변형률을 화상분석기로 측정하여 성형한계도상의 평면변형률과 비교하였다.

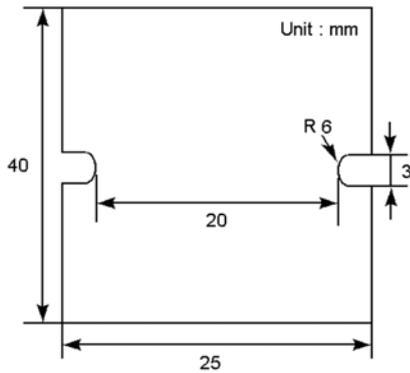


Fig. 2 Drawing of the plane strain test specimen

3. 실험결과

3.1 성형한계도와 평면변형 시험

금속판재의 국부 두께감소와 파괴가 일어날 때까지의 변형수준은 변형경로(주변형률과 부변형률의 비)에 따라 달라진다. 성형한계도는 변형수준과 변형경로 사이의 관계를 그림으로 나타낸 것으로 Fig. 3에 제조된 알루미늄 샌드위치 판재의 성형한계도를 나타내었다. 부변형률(ϵ_2)이 음인 영역은 일축인장 또는 드로잉 모드로 변형을 받은 것이며, 부변형

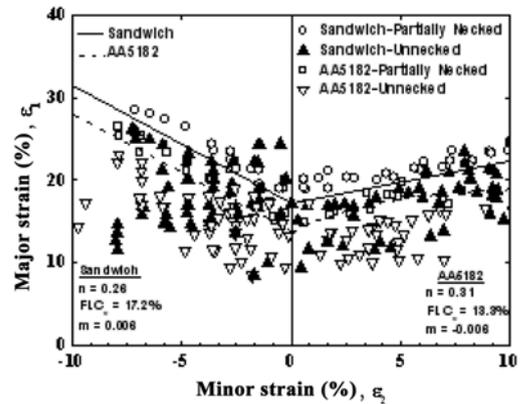
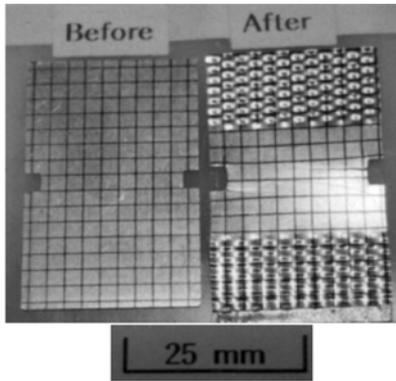


Fig. 3 Forming limit diagram of the aluminum 5182 skin and the sandwich panels

률이 양인 영역은 이축 신장(biaxial stretching) 모드로 성형된 것이다. 또한 부변형률이 0인 영역($\epsilon_2=0$)에서의 주변형률(ϵ_1)을 측정하는 것이 평면변형률(plane strain)인데, 알루미늄 5182 표면재와 샌드위치 판재의 평면변형률은 Fig. 3에서 알 수 있듯이 각각 13.3%와 17.2%로 측정되었다. 최소의 변형수준은 평면변형영역에서 일어나는데, 평면변형률은 자동차 스탬핑 라인에서 관찰되는 성형과파괴의 85~90%가 이 영역에서 발생할 정도로 중요한 의미를 가지고 있다.

Fig. 4에는 Fig. 3의 성형한계도에서 복잡하게 구한 평면변형률을 재확인하기 위하여 실시하였던 평면변형시험 전·후의 시편 형상을 나타내었다. 시험의 폭대 표점길이의 비를 4:1 이상으로 할 경우 하중을 가할 시 시편의 중앙부에 위치한 그리드의 주변형률은 거의 평면변형 수준(최소 부변형률과 주변형률의 비 : -0.05)으로 변형되므로⁹⁾ 본 시편은 최대한 평면변형 경로를 갖도록 시편폭을 크게 가공하여 시험하였다. 평면변형시험 후 시편의 최 중앙의 그리드의 변형률을 화상분석기로 측정하였으며, Fig. 5에서 알 수 있듯이 역시 부변형률이 0에 가까운 수준이었다. 본 시험방법을 이용하여 측정한 알루미늄 5182 표면재와 샌드위치 판재의 경우 평면변형률(혹은 부변형률이 0일 때의 주변형률)은 각각 13.5% 및 17.1%를 나타내었다. 성형한계도상에서 나타나는 샌드위치 판재의 평면변형률과 비교하여 그 차이는 거의 없었다.



(a) Before test (b) After test
(a) Before test (b) After test

Fig. 4 Photographs of the specimens before and after plane strain test

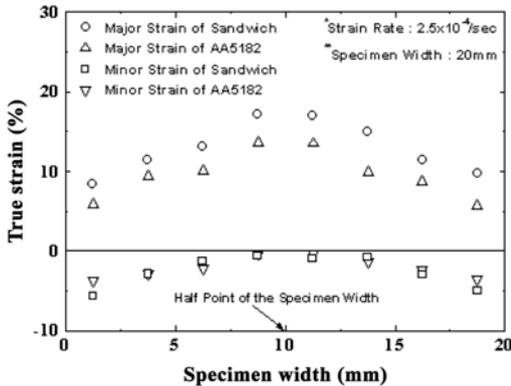


Fig. 5 Major and minor strain of AA5182 skin and sandwich panel after plane strain test

3.2 한계돔 높이 측정

성형한계도의 작성을 위해서는 많은 시간과 노력이 필요하므로, 보다 간편한 시험으로 한계돔 높이를 측정하여 정성적인 금속판재의 성형성을 분석할 수 있다.¹⁰⁾ Fig. 6에 알루미늄 5182 표면재와 샌드위치 판재의 변형경로에 따른 한계돔 높이를 나타내었다. 시편 폭과 시편길이의 비가 0.7일 때 한계돔 높이가 가장 낮게 나타났으며, 이 영역에서의 한계돔 높이는 알루미늄 5182 표면재와 샌드위치 판재 각각 12.1 및 14.1mm로 샌드위치 판재의 평면변형률이 약 14.2% 높은 것을 알 수 있다. 이는 알루미늄 5182 합금을 폴리프로필렌과 압연접합하여 제조된

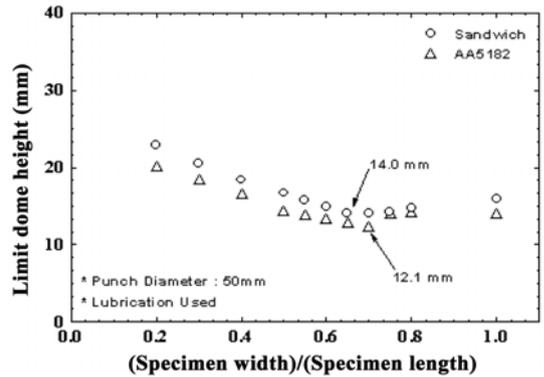


Fig. 6 Limit dome height variation of the aluminum 5182 and the sandwich panels

샌드위치 판재의 성형성이 증가한 것을 의미하는 결과이다.

4. 고찰

4.1 성형성 평가

자동차 경량화를 위해 제조된 샌드위치 판재의 성형성 평가결과 알루미늄 5182 단일판재보다 우수하였는데, 그 원인은 샌드위치 판재의 중심재로 접합된 폴리프로필렌의 연신율이 500% 이상인 초소성 재료로 초소성 재료가 지닌 높은 변형안정성에 기인한 것 때문이다.

성형성의 정량적인 평가를 위해서 행해지는 기존의 복잡한 성형한계도 시험을 보다 간단하게 측정할 수 있는 방안이 있다면 성형성을 좀더 용이하게 평가하여 스탬핑 공정에 반영할 수 있을 것이다. 가장 간단하고 재현성이 높은 정성적인 성형성 측정 시험은 한계돔 높이 측정이나, 이는 직접적으로 성형한계도를 작성할 수 없으므로 큰 한계를 가지고 있었다. 성형한계도를 작성하기 위한 각종 시험 없이 성형한계도를 예측하고 재료의 성형성을 모사하기 위하여, Marciniak와 Kuzianski 및 F. Barlat 등은 일축인장 시험결과로 성형한계도를 예측할 수 있는 방법에 관하여 많은 연구를 거듭하였으나^{4,5,11)} 재료의 초기 결함(defect)을 시험으로 측정하여야 할뿐만 아니라 아직까지도 모든 재료에 적용될 수 있는 항복함수가 없기 때문에 수많은 항복함수 중에 단지 가정에 의해 정의 되는 항복함수를 이용해야 하는 등 여러 가지 문제점들이 산재해 있다. 이러한 연

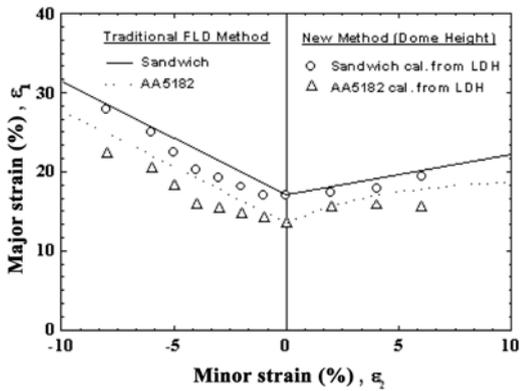


Fig. 7 Forming limit diagram comparison between the traditional measuring method and the calculation from the result of limit dome height and plane strain test

구들과는 달리 본 연구결과에서는 성형한계도를 미리 마킹된 그리드의 에릭슨 신장시험 후 성형판독하는 복잡한 과정 없이 단순 한계돔 높이측정과 평면변형 시험을 통해 쉽게 작성하여 성형성 평가를 보다 단순화시킬 수 있었다. Fig. 7에 한계돔 높이와 평면변형 시험결과를 바탕으로 계산된 성형한계도를 기존의 성형한계도 작성시험으로 얻어진 결과와 비교하여 나타내었다. 평면변형시험 결과로 주변형률이 0이고 주변형률이 최저점인 샌드위치 판재의 평면변형률이 17.1%였으며, Fig. 6에서 시편폭과 길이의 비가 0.7인 영역에서의 측정된 한계돔 높이가 14.1mm 였으므로 이를 바탕으로 한계돔 높이와 평면변형률과의 상관관계를 도출해 낼 수 있었다. 이와 같이 기준점을 마련 후 마찬가지로 방법으로 나머지 다른 변형모드에도 본 상관관계를 이용하여 한계돔 높이를 주변형률의 값으로 환산하여 계산할 수 있으며 이렇게 계산하여 작도한 것이 Fig. 7이다. 기존의 복잡한 방법으로 작성된 성형한계도의 평면변형률과 새로운 방법에서의 평면변형률은 거의 같은 수준이었음을 알 수 있었고, 다른 변형경로에서도 대체적으로 그 경향은 유사하였으므로, 본 방법으로 성형한계도를 작성하는 것이 보다 간단하고 타당함을 알 수 있었다.

4.2 자동차용 샌드위치 판재의 굽힘강성과 무게

자동차 외부 판재 재료로 사용하기 위한 기본 물

성은 강도, 성형성, 굽힘강성, 내흡집성 등이 있다. 경량 알루미늄 합금으로 강판을 대체하기 위해서는 강도와 내흡집성은 강판과 비슷한 수준으로 바꿀 수 있지만, 성형성과 굽힘강성은 면밀한 검토가 필요한 것이 사실이다. 성형성 측면은 샌드위치 판재의 제조로 어느 정도 해소가 되었지만, 일반적으로 강판의 굽힘강성은 그 두께가 두꺼워 질수록 증가하나 두께가 두꺼워 지면 무게가 증가하므로, 적절한 굽힘강성과 무게간의 임계조건이 필요하다.

자동차 본넷용 0.74mm 두께의 강판은 7.1 kN-mm의 굽힘강성을 지니는 것으로 알려져 있는데,¹⁾ 경량 알루미늄 합금 판재로 대체시 강판과 동일한 굽힘강성을 갖기 위해서는 1.06mm의 두께가 필요하게 된다. 샌드위치 판재의 제조로 강판이나 단일 두께의 알루미늄 합금판재 보다 큰 굽힘강성을 갖는 것과 동시에 더 높은 경량화가 이루어지기 위해서는, 샌드위치 판재의 최적설계 방안을 굽힘강성과 무게를 고려하여^{12,13)} 고찰하여야 한다.

만약 ρ 가 샌드위치의 밀도이고 E_{PP} , E_{Al} 이 각각 Fig. 8(샌드위치 판재 구성체 각각에서의 용어의 정의)에서와 같은 폴피프로필렌과 알루미늄 표면재의 탄성계수라면, 샌드위치 판재의 총 무게는 샌드위치 판재의 총두께 h 와 판재의 길이 l 을 고려하여 식 (1)로 표현할 수 있다.

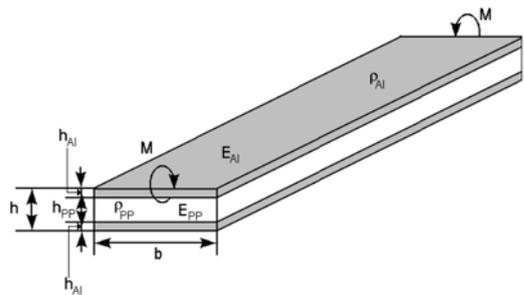


Fig. 8 Schematic of the sandwich panel for explaining notation

$$bh\rho = bl(h_{PP}\rho_{PP} + 2h_{Al}\rho_{Al}) \tag{1}$$

식 (1)에 구성 판재의 부피분율 f 를 표현한 식 (2)를 이용해 변환하면 식 (3)이 된다.

$$f = h_{PP}/h \tag{2}$$

$$\rho = \rho_c f + \rho_s (1 - f) \quad (3)$$

식 (3)에서 아래첨자 c와 s는 각각 중심판재(core)와 표면판재(skin)의 약어를 의미한다.

탄성계수는 혼합률(rule of mixture)을 잘 따르므로 샌드위치의 탄성계수, E 는 식 (4)이고 굽힘강성, D 는 식 (5)로 표현된다.

$$E = E_{pf}f + E_{Al}(1 - f) \quad (4)$$

$$D = E_{pp}I_{pp} + 2E_{Al}I_{Al} \quad (5)$$

여기서 I_{pp} 와 I_{Al} 은 각각 폴리프로필렌 중심재와 알루미늄 표면재의 빔(beam)의 중립축에 대한 단면의 관성모멘트이다. I_{pp} 과 I_{Al} 은 각각 식 (6)과 (7)로 나타낼 수 있으며 식 (8)로 표현할 수 있다.

$$I_{pp} = bh_{pp}^3/12 \quad (6)$$

$$I_{Al} = bh_{Al}^3/12 + (h_{pp} + h_{Al})^2bh_{Al}/4 \quad (7)$$

$$D = bE_{Al}[h_{Al}^3/6 + h_{Al}(h_{pp} + h_{Al})^2/2] + bE_{pp}h_{pp}^3/12 \quad (8)$$

식 (8)을 유효 굽힘 모듈러스(effective flexural modulus), E_e 를 이용하여 정리하면 식 (9)를 얻을 수 있으며 식 (8)을 더 간단하고 유용한 식 (10)으로 바꿀 수 있다.

$$D = bh^3E_e/12 \quad (9)$$

$$E_e = E_{pp}f^3 + E_{Al}(1 - f^3) \quad (10)$$

또한 경량화율에 직접적으로 관련이 있는 무게를 설계에 반영 시 식 (11)을 고려하여야 한다.

Fig. 9에 샌드위치 판재의 굽힘강성(EI/b)과 무게 (W)와의 관계를 식 (4)~식 (10)을 바탕으로 제시하였다.

$$W = [\rho_s \cdot (h - h_{pp}) + \rho_p \cdot h_{pp}]/1000 \quad (11)$$

알루미늄 표면판재의 탄성계수(79,732 N/mm²) 및 폴리프로필렌 코어판재의 탄성계수(827 N/mm²)는 인장 실험으로 구하였으며, 알루미늄 표면판재의 비중(=2,650 kg/m³)과 폴리프로필렌 코어판재의 비중(900 kg/m³)은 문헌에서 인용하였다.²⁾

Fig. 8에서 실차적용 시 요구되는 굽힘강성을 7.1 kN-mm라고 볼 때, 경량화를 최대 이룰 수 있는 최적의 코어판재 부피분율은 80% 정도인 것을 알 수 있다. 그러나, 실제로는 표면판재의 두께에 많은 영향을 받는 내흔집성 및 성형성 등의 다른 요구조건을 고려해 볼 때 이 보다 다소 낮은 부피 분율을 가지는 것이 바람직하다. 동일한 굽힘강성을 갖는 경우, 차체 판재로서 경량재료를 사용하는 것이 유리하다. 또한, 자동차재료의 외관으로 사용되려면 내흔집성을 고려하여 항복강도가 현저히 낮아 표면 스크래치가 상시 발생 가능한 고분자재료가 외관재료로 사용될 수는 없다. 현재 자동차의 차체 판재로 많이 사용되고 있는 0.74mm 두께의 강판을 기준으로 할 때, 동일한 굽힘강성을 갖기 위해서는 1.06mm 두께의 알루미늄 판재가 필요하며, 이 때 동일면적에 대하여 약 50%의 중량 감소 효과를 가질 수 있다. 그러나, 알루미늄 샌드위치 판재의 경우 표면판재로 0.2mm 두께의 AA5182 판재를 사용하고 코어로서 0.8mm 두께를 갖는 폴리프로필렌을 사용하여 총 두께 1.2mm의 샌드위치 판재를 제조할 경우 9.8 kN-mm의 굽힘강성을 지닐 뿐만 아니라 강판에 비하여 65%의 커다란 중량 감소 효과를 얻을 수 있다.

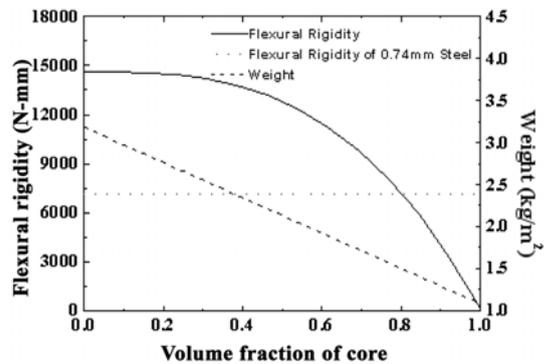


Fig. 9 Variation of the flexural rigidity and the weight of the sandwich panels as function of volume fraction of the polypropylene core

5. 결론

- 1) 알루미늄 5182 단일재와 샌드위치 판재의 평면 변형 시험 후, 평면변형률은 각각 13.5와 17.1%로 샌드위치 판재의 성형성이 우수하였으며, 성

형한계도에서의 경향과 거의 같은 수준이었다.

- 2) 복잡하고 시간과 인력소모가 심한 기존의 성형한계도 측정시험을 보다 간단한 한계도 높이 측정과 일축 인장 시험중 시편의 형상만 변화시켜 측정(시편 너비:표점거리=7:1)하는 평면변형시험결과를 이용한 간단한 계산으로 기존 성형한계도와 유사한 성형한계도를 얻을 수 있었다.
- 3) 굽힘강성, 내흔집성 및 경량화율의 척도인 무게를 고려한 샌드위치 판재의 최적 설계기술을 고찰하였으며, 이것으로 알루미늄 표면재와 폴리프로필렌을 접합하여 제조되는 샌드위치 판재를 자동차 경량 대체재료로 적용하기 위한 기반 기술을 마련하였다.

References

- 1) E. W. Veenstra, "Aluminum-Plastic-Aluminum Sandwich Sheet for Maximum Weight Reduction in Body Panels," SAE 1993, 930706.
- 2) J. D. Davis, "Aluminum and Aluminum Alloys," ASM International, pp.678-689, 1993.
- 3) K. J. Kim and K. S. Shin, "Characterization of Aluminum Sandwich Panels," Proc. of 5th Next Generation Workshop, KATECH, pp.639-647, 1997.
- 4) S. L. Semiatin and H. R. Piehler, "Forming Limits of Sandwich Sheet Materials," Metall. Trans. A, Vol.10A, pp.1107-1118, 1979.
- 5) F. Barlat, "Forming Limit Diagrams-Predictions Based on Some Microstructural Aspects of Materials," The Minerals, Metals & Society, pp.275-301, 1989.
- 6) S. C. Baik, J. H. Oh and D. N. Lee, "Forming Limit Diagram of Perforated Sheet," Scripta Metall., Vol.33, No.8, pp.1201-1207, 1995.
- 7) D. W. Manthey, R. M. Bassette and D. N. Lee, "Application of the Latest Technology in Surface Strain Analysis for Metal Stamping Problem Solving," PMA Tech. Symp. Proc., Vol.4, pp.397-409, 1994.
- 8) K. S. Kim, J. B. Nam, W. J. Choi and R. W. Chang, "Experimental Study on Formability of Automotive Steel Sheet," J. Korean Inst. Met. & Mater., Vol.32, No.5, pp.531-537, 1994.
- 9) D. N. Lee, "Formability Testing of Sheet Metals," Bulletin of the Korean Inst. Met. & Mat., Vol.10, No.3, pp.221-231, 1997.
- 10) Y. S. Kim and K. C. Park, "Study on Stability of Plane Strain Stretching Test," J. Korean Inst. Met. & Mater., Vol.32, No.1, pp.74-79, 1994.
- 11) S. L. Semiatin and J. J. Jonas, "Formability and Workability of Metals," ASM Series in Metal Forming, Ohio, pp.199-223, 1983.
- 12) A. F. Johnson and G. D. Sims, "Mechanical Properties and Design of Sandwich Materials," Composites, Vol.17, No.4, pp.321-328, 1986.
- 13) K. J. Kim "Plastic Strain Ratios and Planar Anisotropy of AA5182/Polypropylene/AA5182 Sandwich Sheets," Int. J. Automotive Technology, Vol.6, No.3, pp.259-268, 2005.