

論文

열가소성 복합재료 성형성 평가 방법에 관한 연구

조치룡* · 박재영**

On the Formability of Thermoplastic Composite Sheets

Chee-Ryong Joe* and Jae-Young Park**

ABSTRACT

A new method to evaluate the formability of thermoplastic composite sheets is developed. It is shown that the formability of thermoplastic composite sheets can be characterized by a single value "Maximum Spherical Face Angle"(M. S. F. A.). The M. S. F. A. can be determined using a single specimen and is independent of the radius of the sphere.

초 록

본 연구에서는 열가소성 복합재료 판재의 성형성을 평가하는 새로운 방법을 소개한다. 판재의 성형성을 "성형가능 최대구면각"이라는 단일 수치로 표시하고 이를 제품의 형상 난이도와 비교하여 성형가능 여부를 판별할 수 있도록 하는 방법이다. 성형가능 최대구면각은 구면의 크기에 관계없이 일정한 값을 가지며 단 한번의 실험으로 구할 수 있다. 본 성형성 평가 방법은 열가소성 복합재료 판재의 성형성을 평가하고 대상 제품의 성형가능 여부를 알아보는데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

1. 서 론

열가소성 복합재료는 낮은 제조 비용의 가능성과 높은 비강성으로 금속재료와 Thermoset Matrix 복합재료 양자의 잇점을 갖고 있다. 제조에 있어서의 높은 생산성을 위해 열가소성 복합재료를 사용한 제품제조 연구가 진행되고 있지만 이 재료의 사용이 적극적이지 못한 이유는 각각의 완성제품에 따라 성형공정이 다르고 까다롭기 때문이다.

열가소성 복합재료로 어떤 구조물을 성형하고자 할때 그 재료에 대한 성형성을 정확하게 파악하지 못한다면 제품의 Mold를 수정하거나 재료를 교체하는 반복적인 작업을 하게 되어 많은 노력과 시간이 요구된다. 열가소성 복합재료는 종류도 다양하고 fiber의 적층순서나 적층각도에 따라 각기 다른

성형성을 갖기 때문에 그 재료에 대한 성형성이 어렵다고 말하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 많은 노력과 시간을 들이지 않고 복잡하고 다양한 성질을 갖는 열가소성 복합재료에 대한 성형성과 제품의 형상을 정량적으로 비교, 평가할 수 있는 새로운 방법을 제시한다.

2. 최대구면각

열가소성 복합재료의 성형성이란 복잡하게 굴곡진 부분에 대하여 접혀거나 터진 부분이 없이 얼마나 균일하게 성형이 되는가 하는 것으로 볼 수 있다. 그리고 그 성형성이 제품의 복잡한 정도보다 크다면 성형이 가능할 것이다. 따라서 복합재료 판재의 성형성을 평가하고 이를 제품의 성형가능 여

* 창원대학교 기계설계공학과

** 창원대학교 기계공학과 대학원

부를 판별하는 기준으로 사용할 수 있기 위해서는 제품형상의 복잡성과 판재의 성형성을 동시에 표현할 수 있는 방법이 요구된다.

모든 제품형상의 복잡한 정도를 하나의 수치로 나타내기 위해서는 제품의 형상을 이루고 있는 여러 요소들에 관한 집중적인 연구가 필요하다. 본 연구에서는 복합재료 판재로 성형하는 제품들이 주로 가지는 형상에 국한 하고자 한다. 복합재료 판재로 Thermoforming을 이용하여 성형하는 제품의 주된 형상은 구면 및 구면의 변형들로 이루어져 있다고 볼 수 있다. 따라서 제품의 형상 중 가장 복잡한 부분이 얼마나 깊은 구면형태로 되어 있는가 하는 것이 그 제품형상의 복잡성이라고 볼 수 있다. 구면 형상의 구조물은 성형시 늘어나는 부분과 줄어드는 부분이 있으므로 깊은 구면 형태를 갖는다는 것은 굴곡이 심하다는 것이며 성형하기가 힘들다는 것이다. 본 연구에서는 "얼마나 깊은 구면 형태를 갖는가" 하는 것을 제품의 복잡성으로 하고, "얼마나 깊은 구면 형태까지 성형이 가능한가" 하는 것을 판재의 성형성으로 하였다. 얼마나 깊은 구면 형태인가 하는 것을 단일 수치화 하기 위하여 구면각을 정의하였다.

구면각을 사용하여 복합재료 판재의 성형성을 평가하는 방법은 다음과 같다. 반구의 Mold 위에 재료를 놓고 성형할 때 재료가 어느 부분까지 Wrinkle이 생기지 않고 구면을 덮을 수 있는가를 알아보는 것으로서 Figure 1. 에 그 개략도가 나타나 있다. 빗금친 부분이 결함 없이 성형된 부분이며 이 부분의 부분구형의 외곽과 구의 중심을 연결하여 나타나는 각도를 성형가능 최대구면각이라 한다.

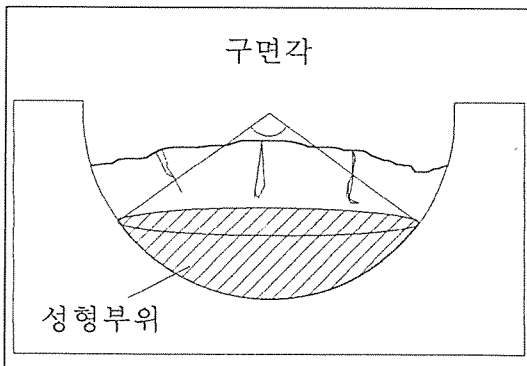


Fig. 1. Spherical Face Angle.

성형가능 최대구면각이 Mold 의 반경에 무관한 지에 대하여 다음과 같이 고찰하였다. Figure 2.의 S_R 은 결함 없이 성형된 부분의 면적이며 S_{C1} 은 그에 대한수직 투영면이다. S_R 면은 반경이 R인 Mold를 사용하여 성형한 것이다. 판재의 성형성은 얼마나 큰 변형이 가능한가 하는 것이므로 성형성이 큰 판재는 S_R 과 S_{C1} 의 비율이 크게 나타날 것이다. 성형가능 최대구면각이 Mold 의 반경에 무관할 것인가 하는 것을 알아보기 위하여 반경이 r인 구면 S_r 과 그의 투영면인 S_{C2} 를 설정하였다. 여기서 S_r/S_{C2} 가 앞에서 설정된 S_R/S_{C1} 과 같다면 성형가능 최대구면각이 Mold 의 반경에 무관하게 나타날 수 있음을 기대할 수 있다.

반경이 R인 경우,

$$S_R = 2 \int_{\frac{\pi}{2}-\theta}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} a^2 \cos v \, dudv$$

$$S_{C1} = \frac{\pi}{4} (2R \sin \frac{\theta}{2})^2$$

$$\frac{S_R}{S_{C1}} = \frac{4 \pi R^2 (1 - \cos \frac{\theta}{2})}{\frac{\pi}{4} (2R \sin \frac{\theta}{2})^2} = \frac{4 (1 - \nu \cos \frac{\theta}{2})}{(\sin \frac{\theta}{2})^2} \dots (1)$$

그리고 반경이 r인 경우,

$$S_r = 2 \int_{\frac{\pi}{2}-\theta}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} a^2 \cos v \, dudv$$

$$S_{C2} = \frac{\pi}{4} (2r \sin \frac{\theta}{2})^2$$

$$\frac{S_r}{S_{C2}} = \frac{4 \pi r^2 (1 - \cos \frac{\theta}{2})}{\frac{\pi}{4} (2r \sin \frac{\theta}{2})^2} = \frac{4 (1 - \cos \frac{\theta}{2})}{(\sin \frac{\theta}{2})^2} \dots (2)$$

그러므로 식(2-1) 과 식 (2-2)에서

$$\frac{S_R}{S_{C1}} = \frac{S_r}{S_{C2}} \dots \dots \dots (3)$$

임을 알 수 있다[3]. 그러므로 성형가능 최대구면각이 Mold의 반경에 무관하리라는 추정을 할 수 있으며 이에 관한 실험적 증명은 뒤의 "실험" 부분에

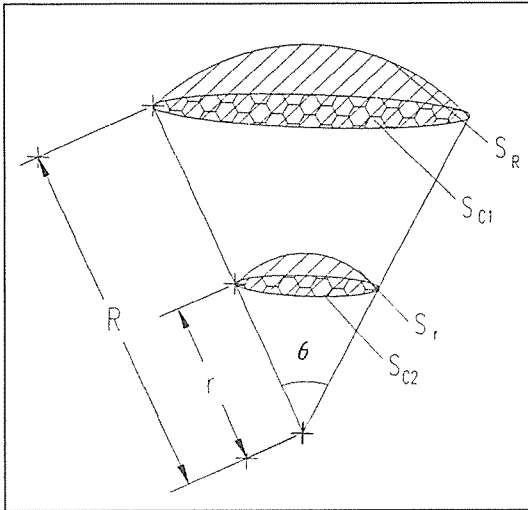


Fig. 2. Two Spherical Faces with A Common Face Angle.

서 다루기로 한다.

이와 같이 구해진 성형가능 최대구면각으로 제품의 성형가능 여부를 판별하려면 제품의 형상이 갖는 가장 복잡한 부분의 최대구면각을 알아야 한다. 구면형상의 제품일 경우는 정의에 의해 바로 적용될 수 있으며 타원형태의 경우에는 타원을 구면형태로 펼친 모양을 고려하여 최대구면각을 정할 수 있을 것이다. 보다 복잡한 형상일 경우에는 최대구면각을 정의하는 방법에 대해서 심도 있는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

3. 실 험

실험에 쓰인 장비는 프레스를 대신하여 Figure 3.에 나타난 만능인장압축시험기(Instron 5567)를 이용하였으며 간단한 치구와 Mold를 만들어 Figure 4.에서 처럼 Chamber (Model 3119-006)안에 설치하여 실험을 하였다. 실험에 쓰인 Mold중 Lower Mold는 AL Powder, Epoxy Resin 그리고 Chopped Glass Fiber를 섞어 만들었고 Upper Mold는 Silicon Rubber와 경화제를 섞어 만들었다. Mold는 Figure 5.에서 보는 바와 같이 $\phi 38\text{mm}$, $\phi 50\text{mm}$, $\phi 65\text{mm}$, $\phi 100\text{mm}$ 4개를 준비하였다. 압축시 Chamber 안의 온도는 150°C 로 유

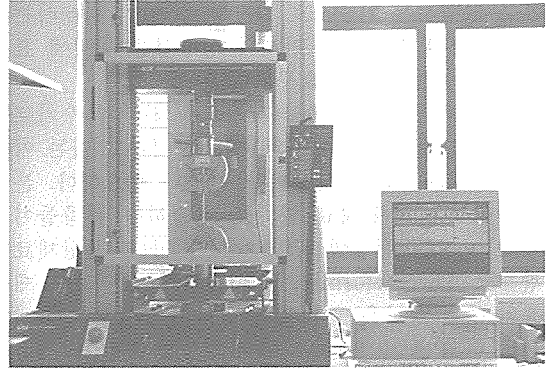


Fig. 3. Instron 5567.

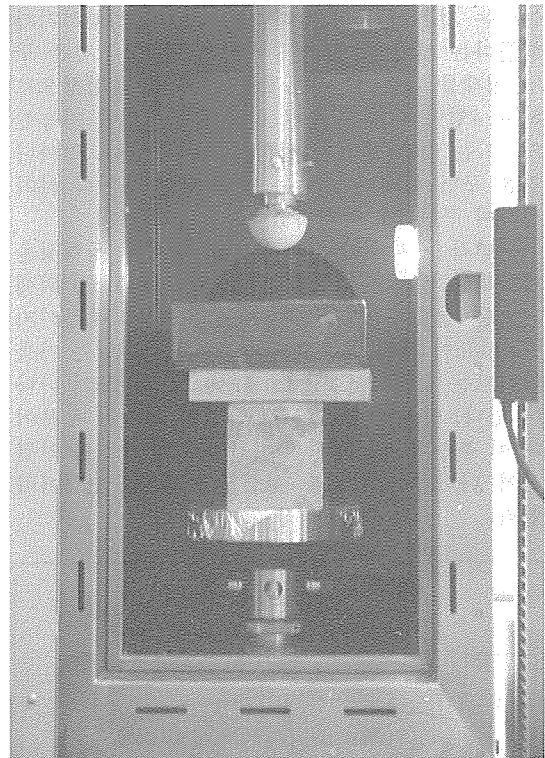


Fig. 4. Chamber(model 3119-006) with A Set of Molds in It.

지하였으며 가압한 상태에서 Chamber를 열어 자연 냉각시켰다.

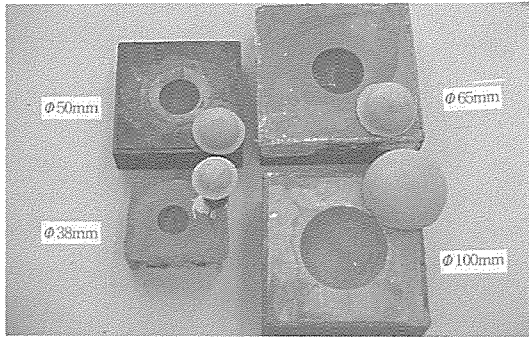


Fig. 5. Lower and Upper Molds.

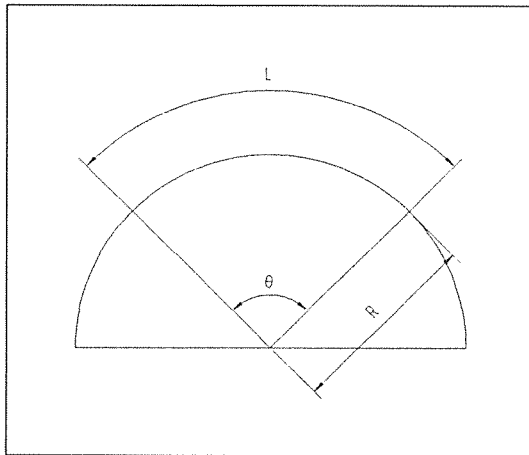


Fig. 6. Schematic Diagram for A Spherical Face Angle.

Figure 6.에서와 같이 Wrinkle이 생기지 않는 부분의 원호길이 L을 구해 Mold의 반경(R)으로 나눠 성형 가능한 최대구면각 θ 를 구하였다.

$$\theta = \frac{L}{R} \dots\dots\dots (4)$$

4. 결과 및 고찰

열가소성 복합재료 판재(Sheet)는 Fiber의 방향에 따라 성형성이 방향성을 갖는다[4]. 본 연구에서는 실험목적상 Fiber가 들어가지 않은 Thermoplastic Sheet를 사용하였다. 본 연구의 주된 실험

목적은 성형가능 최대구면각이 Mold의 반경에 무관한지를 알아보는 것이므로 방향성이 없으며 낮은 온도에서도 성형이 가능한Thermoplastic Sheet를 사용하는 것이 보다 적절할 것으로 사료되었다. 실제로 열가소성 복합재료 판재의 성형성을 평가하려면 각 방향에 대한 성형가능 최대구면각을 측정해야 할 것이다.

열가소성 복합재료는 Fiber의 특성 때문에 성형시 Fiber 방향으로는 거의 늘어나지 않는다. 본 실험에 사용된 Thermoplastic Sheet를 방향성이 없는 Randomly Oriented 복합재료 판재와 유사하게 거동하도록 하려면 면 방향으로의 변형이 크게 발생하지 않도록 하여야 한다. 따라서 가열온도를 판재의 Melting Point에 비해 낮은 온도로 설정하였고, 판재 주변 부위를 Free Load한 상태로 유지하여 자연스럽게 Mold 속으로 빨려 들어가도록 하는 것이 적절할 것으로 사료되었다.

Figure 7.은 $\phi 100\text{mm}$ 의 Mold에서 성형한 것으로 왼쪽에 있는 재료가 Mold 속으로 빨려 들어가지 않도록 Edge에 구속을 준 것이고, 오른쪽에 있는 재료가 Mold속으로 자연적으로 빨려 들어가도록 Free Edge한 상태로 성형한 것이다.

주위를 구속한 시편의 성형가능 최대구면각은 180° 에 가깝게 나타났으며 주위를 구속하지 않은 시편은 약 90° 였다. 구속한 것과 구속하지 않은 것은 큰 차이를 보임을 알수 있다.

정확한 성형가능 최대구면각을 구하기 위하여 Figure 8.과 같이 판재를 원형으로 잘라서 크기별로 준비한 뒤 차례로 성형하여 Wrinkle이 생기지 않는 가장 큰 원판까지 실험을 하였다. 이러한 방

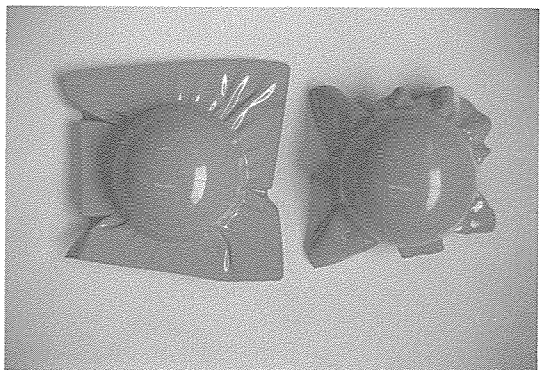


Fig. 7. A Constrained Specimen and A Free Edge Specimen.

법으로 성형가능 최대구면각을 구하려면 많은 수의 시편을 실험해야 한다. 그래서 Mold의 전 면을 덮을 수 있는 커다란 판재를 사용하여 구한 성형가능 최대구면각과 작은 시편으로부터 시작하여 점차 큰 시편을 성형함으로써 구한 값이 일치하는 지를 알아보기로 하였다.

Figure 9는 커다란 사각의 판재를 사용하여 Free Edge한 상태로 성형한 시편 위에 작은 시편으로부터 키워가면서 성형한 최대 시편을 겹쳐 놓은 모습을 보여준다. 그림에서 좌측의 시편은 $\phi 100$ mm의 Mold를 사용한 경우이며 우측은 $\phi 65$ mm의 Mold를 사용한 것이다. 커다란 판재로 성형한 시편에 Wrinkle이 발생하였으며 이 시편에서 정상적으로 성형된 부위가, 작은 시편으로부터 키워 가면서 성형한 최대 시편의 크기와 일치함을 보여준다. 이같이 면적이 넓은 시편을 사용하

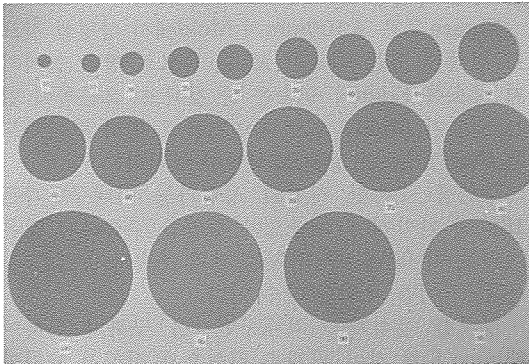


Fig. 8. Circular Plates Prepared for Thermoforming.



Fig. 9. Comparison of Large Plate Specimens with Just-Fitted Specimens.

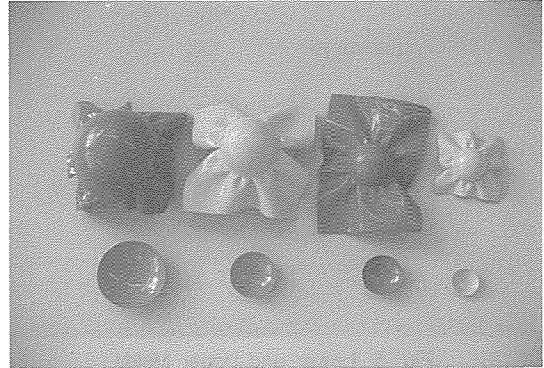


Fig. 10. Formed Specimen with Four Different Mold Sizes.

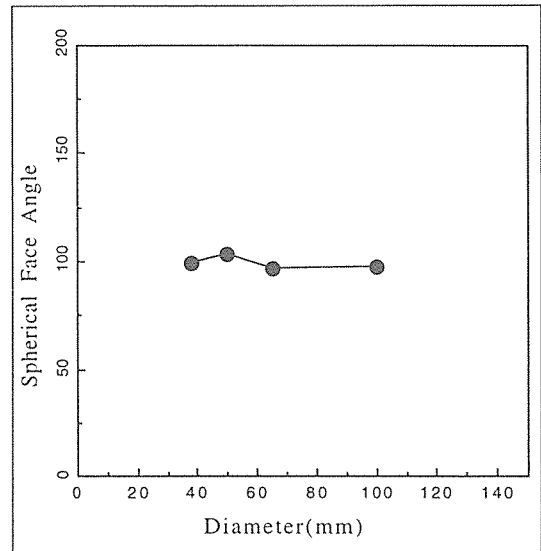


Fig. 11. Maximum Spherical Face Angle vs. Mold.

면 단 한 번의 실험으로 판재의 성형가능 최대구면각을 구할 수 있다.

Figure 10.에 4가지 서로 다른 크기의 Mold에 대하여 성형한 각각의 시편들이 나타나 있다. Mold 크기에 따른 성형가능 최대구면각이 Table 1.에 나타나 있다. Figure 11. 에 각각의 Mold 직경에 따른 성형가능 최대구면각을 Plot 하였는데, 동일한 판재의 성형가능 최대구면각은 Mold의 크기에 관계없이 거의 일정함을 알 수 있다.

Table 1. Maximum Spherical Face Angle for Diameter of Mold

Dia. of Mold. (mm)	∅38	∅50	∅65	∅100
M. S. F. A.	99.5°	103.1°	97°	97.4°

5. 결 론

본 연구에서는 성형가능 최대구면각을 이용하여 열가소성 복합재료의 성형성을 평가할 수 있는 새로운 방법을 개발하였다. 성형가능 최대구면각이 Mold 의 직경에 무관하며 단 한 번의 실험으로 구할 수 있음을 보였다. 본 방법은 열가소성 복합재료의 판재의 성형성을 평가하고 비교적 형상이 단순한 제품의 성형가능 여부를 알아보는 데 바로 적용될 수 있을 것으로 사료된다. 복잡한 부품의 형상을 수치화 하는 기법은 CAD/CAM 분야에서 주로 이루어지고 있다. 이러한 기법의 도입으로 복잡한 형상을 최대구면각으로 환산하는 방법이 완성되면 본 성형성 평가 방법은 복잡한 형상을 갖는

제품의 성형 가능 여부 판별에도 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. Erwin Kreyszig "Advanced Engineering Mathematics " Fifth Edition.
2. C. R. JOE and J. H. LEE, "Development of Processing for the Composite Monocoque Structures", The Korean Society for Composite Materials, Vol. 9, No. 1, 1996.
3. E. J. Jun, B. S. Kim and C. R. Joe, "COMPOSITE MONOCOQUE FRAME FOR BICYCLES, THE DESIGN AND THE FABRICATION" Proceedings of the Ninth International Conference on Composite Materials (ICCM/9), Madrid, 12-16 July, 1993, Vol. 6, pp. 208-215.
4. 이지환, 문창권, 박상보, "복합재료", 원창출판사, 1993.