

프레스 접합성형 GMT-Sheet의 크리프 특성

최유성* · 김 혁* · 강명구* · 이동기** · 한길영** · 김이곤***

*조선대학교 대학원 정밀기계공학과, **조선대학교 기계공학부, ***국민대학교 기계자동차공학부

Creep Behavior of Press Joined Molding GMT-Sheet

YU-SEONG CHOI, HYUK KIM, MYOUNG GOO KANG, DONG-GI LEE, GIL-YOUNG HAN AND E-GON KIM

*Dept. of Precision Mechanical Engineering, Chosun University, Kwang-Ju 501-759, Korea

**School of Mechanical Engineering, Chosun University, Kwang-Ju 501-759, Korea

***School of Mechanics & Automobile, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

KEY WORDS: Glass mat reinforced thermoplastic-sheet (GMT-Sheet) 유리섬유강화 열가소성 복합재료 시트, Press joined molding 프레스 접합성형, Randomly oriented composite 랜덤재, Unidirectional oriented composite 한방향재, Compression ratio 압축비, Lap joint 겹치기 이음

ABSTRACT : It is essential to understand the creep behavior, which shows how long the characteristics of material maintains because press joined molding GMT-Sheet for recycle is usually used in the severe environment.

In this study, we predict joining strength of GMT-Sheet for recycle, when lap length was changed. and we will investigate how compression ratio have an effect on creep behavior in press joined molding. The result of experiment of forming condition concerned with joining problem of GMT-Sheet is as followings ; joining efficiency of GMT-Sheet, increases as lap joint length L increases. Increase of compression ratio causes decrease of joining efficiency after of GMT-Sheet joining. As the result of creep test, GMT-Sheet is easily damaged in high temperature range, because it is sensitive to the temperature

1. 서 론

섬유강화 플라스틱 복합재료(fiber reinforced plastics : FRP)는 모재(matrix)인 수지의 특성에 따라 크게 열경화성 복합재료와 열가소성 복합재료로 대별될 수 있는데, 대부분의 플라스틱 복합재료의 추구 목적이 고강성 및 고내열성 소재개발에 있기 때문에 열가소성보다는 열경화성 복합재료 개발에 상대적으로 많은 관심과 연구가 진행되어 왔다(Lee et al., 1996).

그러나 FRP는 뛰어난 복합재료이지만 최근 발생되고 있는 환경문제나 재활용의 측면에서 보면 활용도가 거의 없는 실정이다. 즉, 종래의 플라스틱 복합재료는 열경화성 수지를 모재로 한 성형품이 대부분이었으나 FRP제의 폐선처리문제를 위시해 폐기물처리, 재생문제가 사회문제로서 대두되고 있다. 이들 문제에 대응하는 고성능, 고기능성, 성형성이 뛰어난 플라스틱 복합재료로서 유리섬유 매트에 PP(polypropylene) 수지를 함침한 시트 형상의 유리섬유강화 열가소성

복합재료 시트(glass mat reinforced thermoplastic-sheet : 이하 GMT-Sheet라 한다)가 주목되고 있다. 이 GMT-Sheet의 장점은 원료인 PP 및 유리섬유가 범용 소재이기 때문에 가격이 비교적 저렴하면서도 강성 및 인성이 우수하다는 점이다.

최근, GMT-Sheet는 방향성이 없는 무배향(random) 유리섬유 매트와 한방향으로 배향된 직선 섬유를 조합시킨 UD grade(unidirection grade)가 개발되어 사용되고 있다. 특히, 무기물과 유기물을 잘 결합시켜 제작된 GMT-Sheet는 열경화성 복합재료의 강도 수준에 근접할 뿐만 아니라 열경화성 복합재료의 취약점으로 지적되고 있는 생산성, 리사이클성, 내충격성 등이 우수하다. 그리고 성형성, 강도, 경도, 내약품성 등의 많은 장점을 가지고 있으며 열가소성 플라스틱을 모재로 하기 때문에 재활용의 측면에서 현재 가장 주목받고 있는 복합재료이다(Mallick and Newman, 1990; 自動車用 複合材料, 1990).

이와 같이 GMT-Sheet 자체가 가지고 있는 특성을 이용해 자동차용 부품으로 그 활용도가 커지고

있고, 그 외 비자동차용으로 그 활용 범위가 넓어지고 있어 보다 광범위한 재활용을 위해서 GMT-Sheet를 프레스 랩 접합성형하여 사용할 수 있다고 하였다.(Kim et al., 2000). 이 접합성형된 GMT-Sheet는 가혹한 환경에서 사용하게 되므로 외부환경에서 얼마나 오랜 기간 그 물성을 유지할 수 있는가를 알아보는 크리프 특성에 대해 이해하는 것이 필수적이다.

크리프시험에 대한 연구는 금속복합재료의 크리프 물성의 예측에 초점이 맞추어져 왔다. Bullock은 금속복합재료의 크리프 속도가 보강재의 직경에 반비례하는 것을 관찰하였는데(Bullock et al., 1977), 이러한 현상을 고려하기 위하여 Goto는 보강재와 기지재의 계면을 고려한 새로운 모델을 제시하였다(Goto and Mclean, 1989). 또한, McDanels은 장섬유 보강 금속복합재료의 정상상태의 크리프 속도는 기지재와 보강재 각각의 크리프 속도와 같다는 가정과 혼합법칙을 이용하여 금속복합재료의 크리프 모델을 세웠다(McDanels et al., 1967). Boller는 유리섬유강화 고분자계 재료에 있어서 초기변형률이 부하응력에 대응하므로 이것을 기준으로 하여 변형률을 표현하였으며(Boller, 1959), Mcloughlin과 Findley 등은 크리프 변형률에 대한 식을 제시하였다(Mcloughlin, 1968; Findley, 1948). 그러나, Lee는 금속재료에서 관찰된 현상과 이를 토대로 이루어진 결과를 섬유강화 고분자 복합재료 구조물에 적용하려고 하는 것은 지향되어야 한다고 하였다(Lee, 1986). 이와 같이 섬유강화 복합재료의 크리프 특성에 대하여는 체계적인 연구결과를 제시한 경우는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 고강도, 고강성 구조부재로써 자동차의 범퍼 등에 사용되고 있는 GMT-Sheet를 재활용하기 위해서 접합성형조건인 랩길이를 변화시켜 접합강도를 예측하고, 랩 접합성형시 압축비가 크리프 특성에 어떠한 영향을 미치는가를 고찰하고자 한다.

2. 압축비 및 랩 접합이음효율의 정의

고온·압축 프레스 랩 접합성형시 Fig. 1과 같이 시험편을 배열하고, 재료의 흐름은 Fig. 2와 같이 폭 방향을 구속하여 길이방향으로만 되게하여 초기두께 h_0 를 h 까지 압축한 경우의 압축비 R_{cr} 은 식(1)과 같이 정의한다(Hojo et al., 1987; Yaguchi et al., 1995).

$$R_{cr} = 1 - \frac{h}{h_0} \quad (1)$$

여기서 h : 접합성형후의 두께
 h_0 : 접합성형전의 두께

시험편의 단면에 작용하는 평균 수직응력의 계산식은 식(2)와 같고(Denton et al., 1985), 실험의 횟수는 각각 5회씩 수행하여 평균값으로 계산하였다.

$$\sigma_{(w)} = \frac{P}{b \cdot t} \quad (2)$$

여기서 $\sigma_{(w)}$: 최대 수직응력(MPa)
 P : 최대 하중(N)
 b : 시험편의 폭(mm)
 t : 시험편의 두께(mm)
 t : 인장

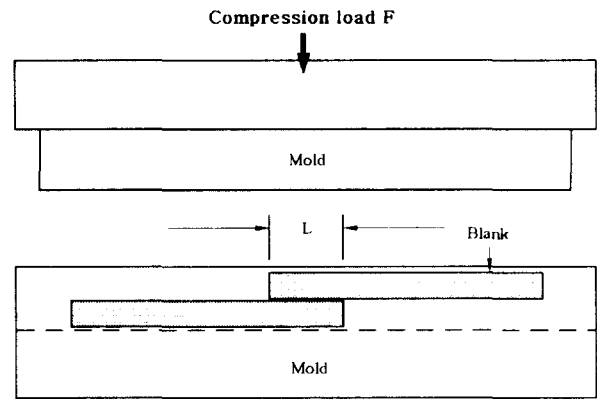


Fig. 1 Illustration of GMT-Sheet joining process

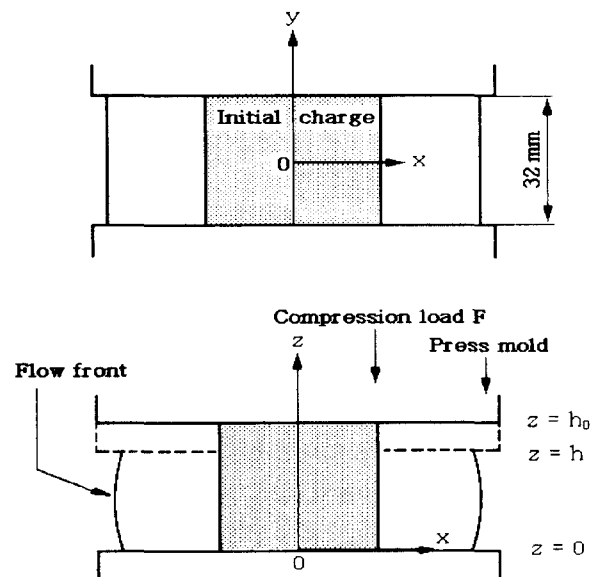


Fig. 2 Nomenclature for slab-shaped part compression molding

고온·압축 프레스 랩 접합이음효율(η)은 식(3)과 같고, 실험의 횟수는 각각 5회씩 수행하여 평균값으로 계산하였다.

$$\eta = \frac{\text{접합이음후의 성형강도}}{\text{접합이음전의 성형강도}} \times 100\% \quad (3)$$

3. 실험

3.1 GMT-Sheet 복합재 물성 및 성형조건

본 실험에 사용한 재료는 시판되고 있는 미국 AZDEL 사 제품으로서 두께 h_0 가 3.8 mm인 GMT-Sheet 중 방향성이 없는 랜덤 유리섬유매트로 강화하여 섬유함유율이 40 wt%인 랜덤재(모재: Polypropylene, 강화재: random glass mat)를 사용하였다. 이 GMT-Sheet내 폴리프로필렌 및 섬유의 밀도는 각각 0.9 g/cm^3 , 2.55 g/cm^3 이다. 이 GMT-Sheet를 다이아몬드 커터(Beuhler, model: Powermat 2000)를 사용하여 32 mm(폭)×100 mm(길이)×3.8 mm(두께)의 직사각형판으로 절단하여 시험편으로 하였다.

GMT-Sheet의 최적성형온도를 얻기 위해서 STA 1500H로 온도에 따른 재료의 열적 특성을 측정하였다. 그 결과 GMT-Sheet내 폴리프로필렌은 Fig. 3과 같이 272.40°C에서 질량이 변화하기 시작하기 때문에 본 실험에서 성형온도는 200°C로 하여 열압축성형하였다. 이 열압축성형시 GMT-Sheet를 가열용 전기오븐에서 200°C의 온도로 40분간 가열하여 Fig. 1과 같이 금형에 충전한 후 Fig. 2와 같이 프레스 압축성형하였다. 금형캐비티의 치수는 32 mm×300 mm로 하고, 가압장치는 25톤 유압 열프레스(Carver, model: 2518)

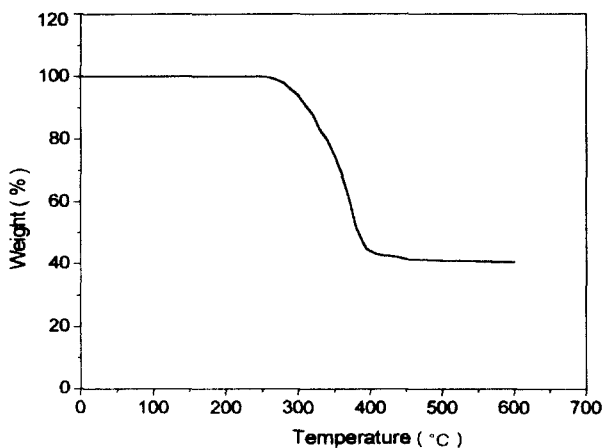


Fig. 3 Relationship between temperature and weight of GMT-Sheet

를 사용하였으며, 금형에는 열전대를 부착시키고 가열은 봉 및 판 히터를 사용하였다(Lee et al., 1995).

GMT-Sheet 성형품의 랩 접합이음효율을 예측하기 위하여 고온·압축 프레스 성형 전·후의 기계적 성질을 Table 1에 나타냈다. Table 1에서 *는 성형 전 시험편이 갖는 자체 인장강도 값이고, **는 시험편을 접합하지 않고 단지 Fig. 2와 같이 고온·압축 프레스 성형하여 나타난 인장강도 값이다. 성형전보다 성형후 인장강도 값들이 약 10% 떨어짐을 알 수 있다. 이때 성형 조건에서 블랭크와 금형온도는 200°C로 동일하게, 압축비는 0, 프레스 압축속도는 10 mm/min로 하였다.

Table 1 Mechanical properties of GMT-Sheet

Specimen	Unit	GMT-Sheet
Glass fiber Content	wt%	40
Tensile strength	MPa	* 88
		** 80

* Virgin (Before molding), ** Recycled (After molding)

3.2 GMT-Sheet의 접합성형 및 강도시험

열가소성 플라스틱은 온도가 올라감에 따라 연해져 녹으므로, 낮은 온도에서 용접으로 접합시킬 수 있다. 용접은 접착제로 접합하지 못하는 섬유강화 플라스틱 복합재료의 접합에 특히 유용하다. 그래서 본 실험에서는 GMT-Sheet의 두께($t = 3.8 \text{ mm}$)에 대하여 랩길이를 9t로 일정하게 하고 압축비를 0, 0.15, 0.29, 0.42 4종류로 하였다. 이때 랩 접합성형에서 블랭크와 금형온도는 200°C로 동일하게 하여 앞에서 언급한 Fig. 1과 같은 방법에 의해 Fig. 2와 같은 캐비티를 갖는 금형에 충전하고, 폭방향을 구속하여 길이방향으로만 유동하도록 하여 랩 접합성형하였다.

랩 접합성형시 GMT-Sheet가 고온에서 가열되고 압축되므로 재료의 물성이나 기계적 성질이 떨어지므로 GMT-Sheet 성형품의 랩 접합이음효율을 예측하기 위해, 먼저 접합성형 때와 같은 조건에서 재료를 단순 고온·압축 프레스 랩 접합시켜서 각각의 인장강도 값을 측정하였다. 랩 접합성형된 GMT-Sheet는 크리프시험기의 그림부분을 고려하여 다이아몬드 커터로 ASTM D2990을 참조하여 20 mm×140 mm의 직사각형판으로 절단하여 사용하였다. 이때 시험편의 파단강도는 파단하중을 시험편 단면적(시험편 폭×두께)으로 나눈 값으로 하였고, 각 실험조건에

대하여 5회 반복 실시하여 그 평균값으로 하였다.

인장시험은 상온에서 UTM(5ton, Houndfield)을 사용하여 각각 10개의 시험편을 준비하여 측정하였으며, 크로스 헤드속도는 1.26 mm/min로 하였다.

3.3 GMT-Sheet의 크리프시험

일반적으로 크리프는 결정질의 고체재료에 일정한 중 또는 일정응력을 가하고 특정온도에서 시간이 경과함에 따라 변형량이 증가하는 현상을 말한다. 크리프 변형이 발생할 때 시간에 따른 변형률의 변화는 Fig 4와 같은 거동을 보인다(Mitra and Mclean, 1966). 초기변형은 하중을 가하는 순간의 탄성변형과 시간에 의존하지 않는 소성변형의 합으로 나타내는 순간변형이다. 제1기 크리프는 천이크리프라고 하는데 초기단계를 지나면서 비교적 높은 속도로 변형률이 증가하지만 변형속도는 감소하는 구간이다. 제2기 크리프는 정상크리프라고 하는데 재료의 가공경화와 회복연화가 서로 균형을 이루어서 일정한 변형속도가 유지되는 구간이다. 제3기 크리프는 가속크리프라고 하며 주로 높은 응력이나 하중하의 시험에서 많이 나타난다. 이 영역은 변형속도가 증가하여 파단에 도달할 때까지의 구간으로 재료의 수축이나 내부공동 형성으로 인한 유효단면의 감소가 있을 때 발생한다.

본 실험에서 크리프시험은 노(furnace)내부에 온도 조절장치가 부착된 크리프시험기(Satec, Model : M3)

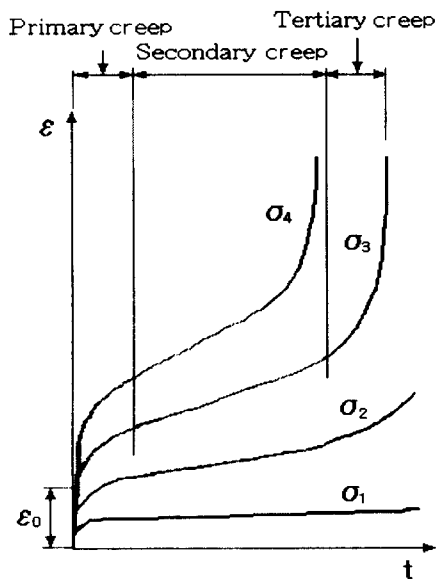


Fig. 4 Typical creep curve showing the three steps of creep

를 사용하였다. 크리프시험온도는 자동차의 범퍼가 받을 수 있는 온도를 고려하여 50℃에서 수행하였으며, 시험편에 가하는 응력은 UTM에서 구한 인장강도 값을 바탕으로 인장강도 값의 30%~60%의 범위에서 각 시험편에 일정한 응력을 주었다(Nam and Han, 1996). 변위는 LVDT에서 나온 신호를 Pan recorder에서 받아 측정하였다. 시험편은 랩 접합성형 품이므로 접합부분이 노치와 같은 역할을 하여 파괴되기 때문에 크리프시험기의 물림부분을 고려하여 직사각형 형상으로 다이아몬드 커터를 사용하여 제작하였다. 시험 중 온도는 일정하게 유지하였고, 하중은 온도가 정상상태에 도달한 후에 가하여 압축비 및 응력을 변화시켜 시험편이 파단 될 때까지 수행하였다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 5는 GMT-Sheet를 고온·압축 프레스 랩 접합성형할 때 프레스 접합 이음부 랩길이가 접합 파단강도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 실험한 결과를 나타낸 그림이다. 이 랩 접합성형시 GMT-Sheet 시제품의 두께와 같도록 하기 위하여 압축비(R_{cr})를 0으로 하여 Fig. 1과 같이 시험편을 겹쳐놓은 다음 Fig. 2와 같이 폭방향을 구속한 후 길이방향으로 유동하도록 하였다. 섬유함유율이 40 wt%인 랜덤재를 고온·압축 프레스 랩 접합성형하여 인장시험한 후 랩길이 변화에 따른 랩 접합 인장강도값을 Fig. 5에 나타냈으며, 랩길이 L이 증가할수록 인장강도 값이 증가함을 알 수 있다.

또한, 랩길이 변화에 따른 랩 접합이음효율을 구하였다. 이때 GMT-Sheet를 겹치지 않은 상태에서

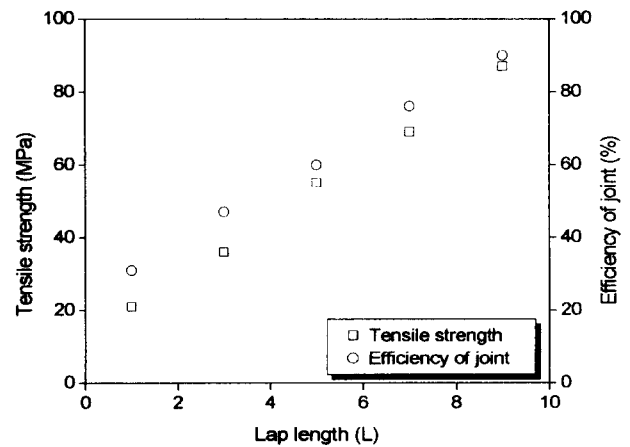


Fig. 5 Comparison with tensile strength and efficiency of joint on the lap length L

Fig. 2와 같이 고온·압축 프레스 성형만을 한 후 인장시험하여 얻은 성형재 인장강도 값과 Fig. 1과 같이 랩 접합성형하여 구한 접합재의 인장강도 값을 비교하여 랩 접합이음효율로 하고, 각 랩길이에 따른 강도차를 비교하였다. 이 그림에 나타나 있는 바와 같이 랩길이 L이 증가할수록 랩 접합이음효율이 증가함을 알 수 있다.

Fig. 6은 GMT-Sheet를 접치지 않은 상태에서 Fig. 2와 같이 압축비를 다르게 하여 고온·압축 프레스 성형만을 한 시험편의 인장강도 값과 Fig. 5에서 랩 접합이음효율이 가장 좋은 접합길이인 9t로 하여 접합성형 한 시험편의 인장강도 값을 비교한 그림이다. 이 그림에서 접합성형을 하지 않은 시험편은 압축비가 증가할수록 모재와 강화재의 유동속도차로 섬유배향이 발생하고, 섬유함유율의 증가에 의해 인장강도 값이 높아지는 것을 알 수 있다.

반면에 랩 접합성형을 한 시험편의 경우는 압축비가 적을수록 인장강도 값이 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 랩 접합성형시 압축비가 커지면 강화재에 비해서 모재인 폴리프로필렌이 심하게 유동하게 되어 온도에 약한 폴리프로필렌의 감소로 랩 접합이음효율의 낮게되는 원인이 됨을 알 수 있다. 랩 접합성형 전·후 시험편의 인장강도 값을 비교했을 때 압축비가 약 0.1이하일 때 가장 좋은 효율을 가지는 것을 예측할 수 있다.

그러나 압축비를 0으로 하여 접합성형을 한 시험편의 경우는 성형전 재료를 전기오븐에 넣어 폴리프로필렌을 반응용상태로 하여 압축성형하기 때문에 낮은 압축비에서는 보이드 영향으로 인해 인장강도 값이 다른 압축비와 비교하여 낮게 나타남을 알 수 있다.

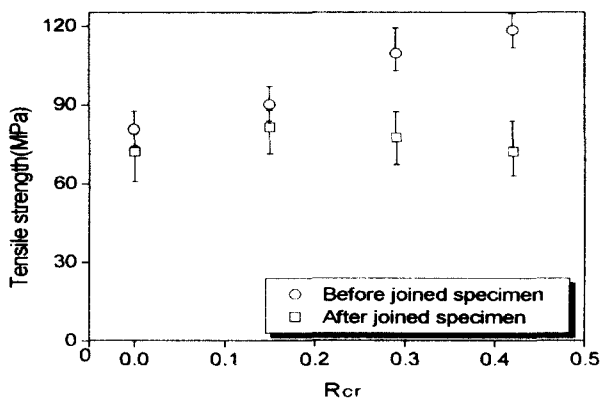


Fig. 6 Comparison with before joining and after joining on the compression ratio R_{cr} (Tensile test)

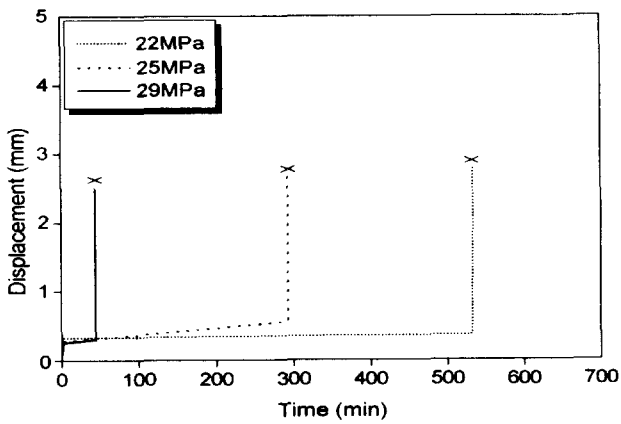
Fig. 7은 랩 접합성형한 GMT-Sheet를 50°C의 일정한 온도에서 각각의 인장강도에 30%, 35%, 40%의 응력을 가하였을 때의 크리프시험 결과이다. Fig. 7(a)는 압축비를 0.29로 하여 랩 접합성형한 시험편에 대해 시간에 따른 변위를 나타낸 것이고, Fig. 7(b)는 압축비를 0.15로 하여 랩 접합성형한 시험편의 변위를 나타낸 그래프이다. Fig. 6에서 알 수 있는 바와 같이 접합성형된 시험편은 압축비가 낮을수록 더 오랜 시간을 견디고 있으며, 응력이 높을수록 더 쉽게 파단됨을 볼 수가 있다. Fig. 7(c)는 압축비를 0.06으로 하여 랩 접합성형한 시험편을 나타내고 있다. Fig. 6에서 예상한 것처럼 압축비 0.1이하일 때 다른 시험편보다 하중의 변화에 따른 변형률이 상당히 안정함을 보이고 있다.

GMT-Sheet의 크리프 실험결과가 Fig. 4와 같은 전형적인 크리프 곡선을 나타내지 않고 초기변형이 끝나면 정상크리프를 거쳐서 제3기 크리프가 없이 바로 파단이 이루어지는 것을 알 수 있다. 크리프 변형 중에서 제2기 크리프의 모습만을 보여주는 것은 섬유강화 고분자 복합재료의 경우에 모재(폴리프로필렌)와 강화재(유리섬유) 중 하중의 대부분을 강화섬유가 받기 때문인 것으로 예측할 수가 있다. 또한, 제3기 크리프 변형이 없이 시험편이 바로 파단되는 이유는 모재가 열에 약하기 때문에 외력을 감당하지 못하여 금속복합재료와는 달리 강화재의 외력감당 한계에 미치면 바로 파단되는 것을 알 수가 있다.

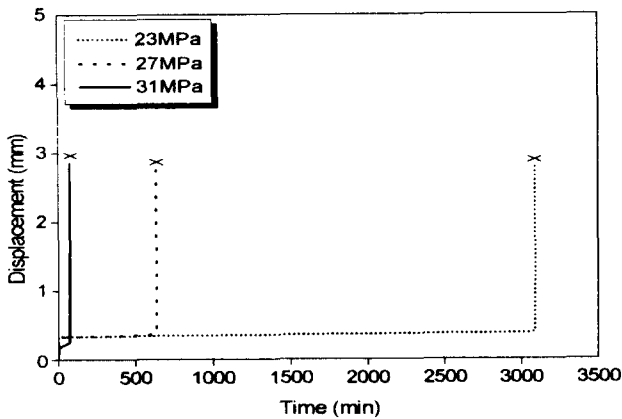
Fig. 8은 압축비가 0.15와 0.29인 두 종류의 시험편을 온도변화를 시켜서 크리프 변화상태를 알아본 것이다. 접합성형한 GMT-Sheet를 크리프 실험한 결과 온도변화에 매우 민감함을 알 수가 있다. 또한, 랩 접합성형시 압축비가 증가할수록 강화재에 비해서 모재의 유동이 많이 되어 섬유함유율이 증가하기 때문에 압축비에 따른 파단시간의 차이가 많다(Lee et al., 1995).

Photo(a)는 인장시험 후 GMT-Sheet의 파단형상의 정면과 측면부의 사진이다. 고온·압축 성형할 때 층간에 인접한 섬유들의 층간유동이 발생하는데 이와 같은 섬유연계현상(bridging)에 의하여 상온상태에서 균열이 전파될 때 인접한 다른 층으로 균열이 이동하거나 몇 개의 층으로 확대되는 현상이 발생하므로 경사단면이 짧은 파단면이 형성된다.

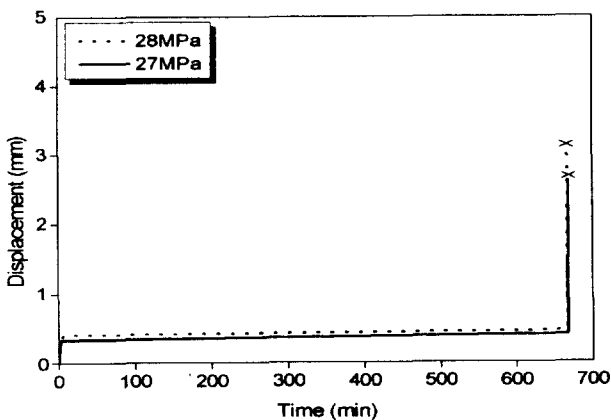
Photo(b)는 크리프시험 후 GMT-Sheet의 파단형상의 정면과 측면부의 사진이다. 온도의 영향으로 섬유연계현상이 일어나지 않아 균열이 전파될 때 하나의 층간으로 전파되어 파단면은 랩 접합면이 슬립되어 긴 경사단면을 형성한다.



(a) Compression ratio $R_{cr} = 0.29$



(b) Compression ratio $R_{cr} = 0.15$



(c) Compression ratio $R_{cr} = 0.06$

Fig. 7 Comparison of creep curves with each strength

따라서 GMT-Sheet 랩 접합성형은 장기간 고온에 노출되는 부재에는 사용이 부적합함을 알 수 있으며, 이에 대한 적절한 접합방법이 연구되어야 한다.

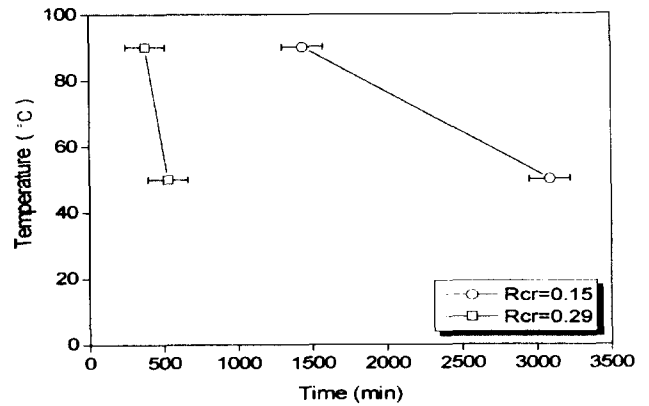


Fig. 8 Comparison of creep with each temperature on the compression ratio for tensile strength 23MPa



(a) Tensile rupture specimen



(b) Creep rupture specimen

Photo. Rupture shape of GMT-Sheet

5. 결 론

프레스 랩 접합성형 GMT-Sheet의 크리프 특성에 미치는 성형조건의 영향에 관한 실험 결과를 고찰하면 다음과 같다.

- (1) GMT-Sheet의 프레스 랩 접합성형에서 랩길이 L의 증가에 따라 랩 접합이음효율이 증가하고, 압축비의 증가는 GMT-Sheet 접합 성형후의 랩 접합이음효율의 저하를 야기시킨다.
- (2) GMT-Sheet의 크리프시험은 금속복합재료와는 달리 제3기 크리프의 변형없이 바로 파단이 되는데 이는 모재가 열에 약하기 때문에 장기간 고온에 노출되면 외력에 쉽게 손상함을 알 수 있다.
- (3) GMT-Sheet의 프레스 랩 접합성형에서 압축비가 커지면 강화재에 비해서 모재가 심하게 유동하게

되어 온도에 약한 폴리프로필렌의 감소로 크리프시험에서는 과단속도를 더 빠르게 하는 요인이 된다.
 (4) GMT-Sheet 랩 접합 성형품을 상온에서 인장시험하면 과단면은 섬유연계현상으로 크랙형상으로 나타나지만, 크리프시험시 복합재의 모재가 폴리프로필렌이기 때문에 온도에 매우 민감하여 과단면은 섬유연계현상없이 랩 접합면이 슬립되어 파괴됨을 알 수 있다.

후기

본 연구에 사용된 시험장비는 산업자원부 지정 (사)부품산업테크노센터에서 제공한 것임.

참고문헌

Boller, K. H.(1959) Proc. 14th SPI RP Div., Sec. 6-C
 Denton, D. L. and Munson-McGee, S. H.(1985).
 "in ASTM STP 873", pp 23.
 E. Bullock, M. Mclean, and D. E. Miles.(1977)
 Acta Metall. Vol. 35, pp 333~334
 Findley, W. N.(1948) Proc. ASTM, 48, P.1217
 Kim, H., Choi, Y. S., Lee, C. H., Han, K. Y., Lee, D.
 G.(2000), "Mechanical Properties of GMT-Sheet
 on Press Joined Molding", The Korea Committee
 for Ocean Resources and Engineering, pp 305~314.
 Lee, D. G., Han, G. Y. and Kim, E. G.(1995), "Effect
 of Mold Temperature on the Separation and the
 Orientation during Compression Molding of
 Fiber-Reinforced Polymeric Composites", The
 Korea Committee for Ocean Resources and
 Engineering, Vol. 9. No. 2. pp 305~314.
 Lee, J. R.(1986) Polymer(korea) Vol. 10, No. 4, pp 305~309
 Lee, S. H. and Kang, T. J.(1996). "Mechanical
 Properties of Textile Composite(III) - Mode I
 Interlaminar Fracture Toughness of Nonwoven
 Glass Fiber Composite -", The Korean Society for
 Composite Materials, Vol. 9. No. 4. pp 82~89.
 Mallick, P. K. and Newman, S.(1990). "Composite
 Materials Technology", Hanser Publisher, New York.
 McDanel, D. L., et all.(1967) Fiber Strengthened
 Metallic Composites. ASTM

McLoughlin, J. C.(1968) Modern Plastics, 45, 6, p.97
 Nam, H. U. and Han, K. S.(1996), KSME, 96F023,
 PP132~137
 S. Goto and M. Mclean.(1989) Scripta Metall. Mat.
 Vol. 23, pp 2073~2078
 S. K. Mitra and D. Mclean.(1966) Work Hardening
 and Recovery in Creep, Proc. Roy. Soc., Vol.
 295. pp 288~299.
 Yaguchi, H., Hojo, H., Lee, D. G. and Kim, E.
 G.(1995). "Measurement of Planar Orientation
 of Fibers for Reinforced Thermoplastics Using Image
 Processing", International Polymer Processing, Vol. X.
 Issue 3. pp 262~269.