

GMT 평판의 볼트조인트 강도 평가

강완석*·민지현**·이재욱***·임용택†
(2002년 9월 26일 접수, 2003년 7월 14일 심사완료)

Estimation of Bolted Joint Strength of Flat Plate of Glass-Mat Reinforced Thermoplastics

Wan-Seok Kang, Ji-Hyun Min, Jae-Wook Lee and Yong-Taek Im

Key Words: Joint Strength(조인트 강도), Bolted Joint(볼트조인트), Bearing Failure(베어링 파괴).

Abstract

In this study, bolted joint made of Glass-Mat Reinforced Thermoplastics (GMT) specimen was under tensile loading to investigate the relation between joint strength and glass-fiber weight fraction of the flat plate specimen. The effect of molding conditions such as the initial size of a GMT charge and molding temperatures was investigated under plane strain condition. In consideration of the specimen geometry, minimum end distance and width of the specimen to induce the bearing fracture mode of the bolted joint were determined. And finally, the effect of the outer diameter of washer and clamping pressure on joint strength was also investigated. Since joint strength is dependent on the local glass-fiber weight fraction, experimentally measured strength was modified, considering its irregular values of the specimen molded under various processing conditions in order to obtain a reasonable correlation between the two.

1. 서 론

Glass Mat-Reinforced Thermoplastics (GMT)는 유리섬유 매트에 폴리프로필렌 수지를 함침한 판재형상의 열가소성 복합재료로 기계적 강도가 우수하고 경량화 효과가 크며, 비강성, 비강도 등이 우수하여 경량화가 요구되는 자동차의 부품, 특히 구조용 부품 제작에 널리 이용되고 있다. 이와 같은 복합재료를 기계요소 혹은 구조물의 부재로 적용하고자 할 경우 다른 재료와의 접합이 필수적이므로 조인트의 설계 및 강도 평가는 매

우 중요하다.

지금까지 기계적 접합 조인트에 관한 이론적인 연구는 이론해의 한계를 극복하기 위해 주로 유한요소법을 이용하여 수행되었는데 접합 조인트의 정확한 응력 분포를 얻기 위해서는 볼트와 구멍 사이의 마찰, 재료의 비선형성과 3차원적인 효과를 모두 고려해야 하기 때문에 이론적인 연구는 제한적으로 수행되었고 주로 실험적인 연구가 많이 수행되었다.⁽¹⁾

Collings⁽²⁾는 서로 다른 세 가지 복합재료에 대하여 적층각도에 따른 베어링 강도를 실험을 통해 밝혀내었고 이 사실을 이용해 베어링 강도를 예측하는 식을 유도하였으며, Hart-Smith⁽³⁾는 조인트의 베어링강도가 구멍 주위의 두께 방향 구속 조건에 큰 영향을 받는다는 것을 밝혔다. Quinn과 Matthews⁽⁴⁾는 유리섬유 복합재료에서 적층 순서가 베어링강도에 미치는 영향을 연구하였고, Oh 등⁽⁵⁾과 Matthews 등⁽⁶⁾은 하이브리드 (hybrid)

* LG전자 에어컨사업부 연구2실

** 한국과학기술원 기계공학과

*** JATCO Korea

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : ytim@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3227 FAX : (042)869-3210

복합재의 최적 조인트 설계에 관한 연구를 하였다. Herrington과 Sabbaghian⁽⁷⁾은 볼트와 와셔의 반경방향 공차가 베어링 강도에 미치는 영향을 연구하였다. 또한 Kim과 Whitney⁽⁸⁾은 온도와 습도가 베어링 강도에 미치는 영향을 연구하였고 Akay⁽⁹⁾는 일방향 탄소섬유 복합재료와 직조 탄소섬유 복합재료가 흡습열상태에 노출되었을 경우 정적 및 동적베어링 강도에 대하여 연구하였다.

기존의 연구들은 복합재료의 성형과정보다는 주로 성형된 복합재료의 부품설계에 초점을 맞추었으며, 성형된 복합재료의 기계적 성질이 부위별로 차이가 나지 않는 복합재료를 제작하여 조인트 성능을 평가하는 연구가 주를 이루어 왔다. 그러나 본 연구에서는 제품 성형시 발생하는 수지와 섬유유 유동 양상들이 재료의 기계적 강도에 영향을 미치는 점을 고려하여, 수지와 섬유의 유동을 변화시킬 수 있도록 성형 방법을 다양하게 변화시켜가면서 이에 따른 조인트 강도 변화를 평가하였다. 이를 위해 성형조건에 따라 기계적 성질이 국부적으로 변할 수 있는 복합재료로 평판을 제작하고 볼트 조인트의 강도평가를 실험적으로 수행하여, GMT의 기계적 접합 조인트 설계에 도움을 주고자 하였다.

2. GMT 평판 및 시편 제작

2.1 GMT 평판 제작

본 연구에 사용된 재료는 50 mm 길이의 유리 섬유를 포함하고 있는 입의 방향성을 갖는 GMT이다. 판재의 성형 공정은 장입재의 재단, 가열, 프레스 성형, 후가공의 순으로 진행된다.

우선 필요한 크기로 장입재를 절단한 후, 폴리프로필렌을 반응용 상태로 만들기 위해 절단된 장입재를 히터 속에서 250 °C로 약 8분 가량 가열한다. 가열된 장입재는 가열되기 전보다 두께 방향으로 2~3배 정도 부풀어 오르게 되며 이렇게 반응용 상태에서 부풀어 오른 두께 3.8 mm의 장입재를 Fig. 1에 나타난 금형에 넣고 101 mm×127 mm의 평판이 되도록 금형 내에서 성형하였다.

프레스에 장착된 상·하부 금형을 일정한 온도로 가열하기 위해 개당 100W의 용량을 낼 수 있는 지름 9.5 mm의 원형 히터봉 (heating rod)을 4개씩 상·하부 금형에 각각 설치하였다. 금형의 온도를 유지하기 위해서 지름 0.25 mm의 J형 열전대를

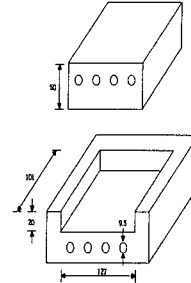


Fig. 1 A schematic diagram of the upper and lower mold (dimensions in mm)

금형 표면에 부착하여 금형의 온도를 측정하였고, 이를 온도제어기에 입력신호로 사용함으로써 방출 열량에 대한 출력제어를 할 수 있게 하였다.⁽¹⁰⁾

본 연구에서는 평판을 성형하기 위하여 유압식 프레스를 사용하였다. 평판 제작시 금형의 닫힘 속도는 8.5 mm/s였으며, 10~20 ton의 성형하중을 사용하였다. 금형이 최대 위치까지 내려온 이후에는 소재의 응고를 위하여 1분간 금형의 닫힘 상태를 유지하였다. 한편, 성형 전에 실리콘 이형제를 금형 표면에 고루 도포하여 최종 성형품의 탈형이 용이하게 하였으며, 금형에 제품이 고착되어 분리가 용이하지 않을 경우에는 하부 금형에 장착된 2개의 탈형핀을 사용하여 제품을 탈형시켰다.

이렇게 만들어진 평판을 이용하여 기계적 접합 조인트 강도 평가를 위한 시편으로 제작하였으며, 이를 본 실험에 사용하였다.

2.2 기계적 접합 조인트의 파괴모드

기계적 접합 조인트 실험을 위한 시편을 제작하기 전에 시편의 형상을 먼저 결정해야 한다. 이는 시편의 형상에 따라 기계적 접합 조인트의 파괴 양상이 Fig. 2에서 보는 바와 같이 다양하기 때문이다. 일반적으로 파괴모드를 결정하는 요소는 기하학적 형상이며 특히 시편의 너비와 끝단으로부터의 거리가 중요한 요소이다. 실제로는 두 가지 이상의 파괴모드가 혼합되어 나타나기 때문에 파괴모드를 명확히 정의하기는 힘들다.

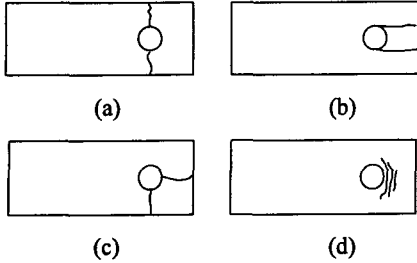


Fig. 2 Typical failure modes of composite materials : (a) tension, (b) shear-out, (c) cleavage, and (d) bearing

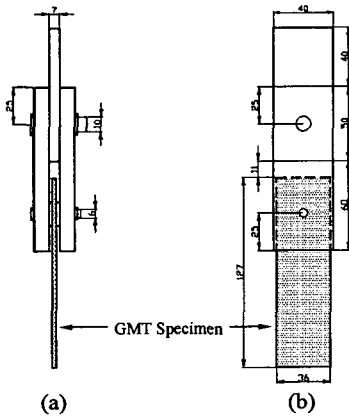


Fig. 3 Schematic diagram of the loading fixture: (a) side view and (b) front view

2.3 시편과 고정구 제작 및 인장 실험

실험에 필요한 시편을 제작하기 위하여 먼저 금형에서 성형된 101×127 mm²의 평판을 다이아몬드 휠커파를 사용하여 절단하였다. 본 연구에서는 지름이 6 mm인 텅스텐 카바이드 드릴을 사용하여 탁상용 드릴 머신으로 구멍을 가공하였다. 가공 시 드릴링 머신의 회전수는 1330 rpm으로 하였다.

하나의 볼트 구멍을 가지는 시편의 기계적 접합 조인트 실험을 수행하기 위해서 Fig. 3과 같은 고정구를 설계하였다. 이 때, 복합재료 시편이 파괴되는 동안 고정구와 볼트가 탄성변형 범위 내에서 미소 변형하도록 하기 위해서, 고정구의 철판 두께를 충분히 크게 하였으며, 볼트는 M6 규격의 볼트를 사용하였다.⁽¹¹⁾

정적실험을 위해 INSTRON 4206을 사용하였고, 하중 속도 (loading rate)는 1 mm/min이었다. 정적 실험을 통해 얻어진 대표적인 힘-변위 그래프는

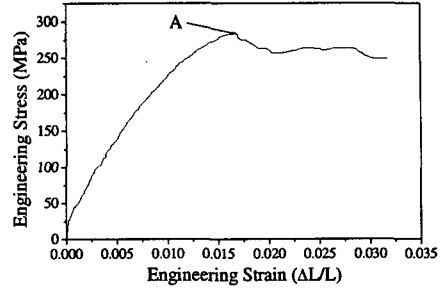


Fig. 4 Typical stress-strain curve obtained from joint strength experiments of GMT specimen

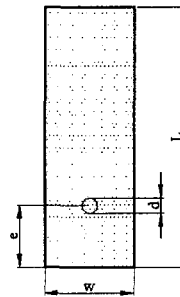


Fig. 5 Geometry of the test specimen

Fig. 4와 같다. 그림에 나타난 바와 같이 인장하중은 A지점까지 계속 증가하며, 이 부분을 지나면서 점차 하중이 감소함을 알 수 있다. A지점 이후 하중이 감소하는 이유는, 시편 내 포함된 섬유들이 파단되어 수지가 소성변형을 하기 때문이다. 본 연구에서는 조인트의 파괴하중으로서 A점의 최대하중을 사용하였다.

2.4 시편 형상 결정을 위한 인장 실험

조인트 실험에 적합한 시편은 인장하중 실험 시 점진적 파괴가 일어나는 베어링 파괴가 발생하도록 만들어져야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 Fig. 5와 같이 구멍의 지름이 6 mm인 시편의 형상을 결정하기 위한 실험을 시편의 크기를 변화시켜 가면서 수행하였다. 시편을 제작하기 위한 평판을 성형할 때 금형 온도는 75℃로 하였고, 장입제의 크기는 금형과 동일하게 하여 성형하였다.

우선 시편의 구멍과 끝단까지의 거리 (e)를 결정하기 위한 실험을 수행하였다. 이 때, w/d값은 Matthews⁽¹⁾의 연구결과를 감안하여 6으로 설정하

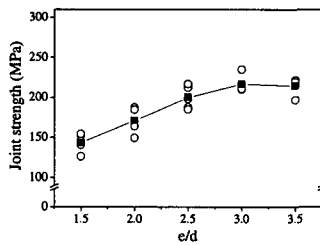
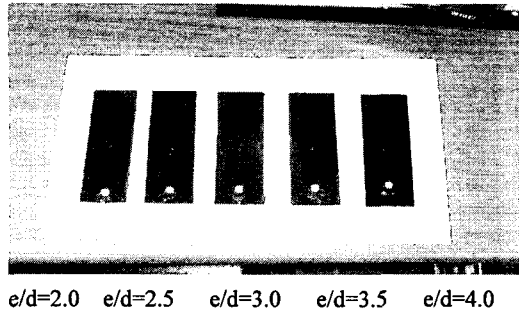


Fig. 6 (a) Photograph of fractured specimens and (b) graph of joint strength according to e/d

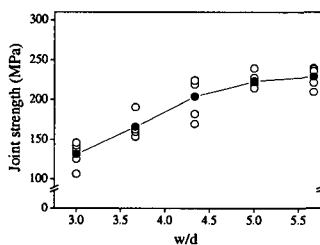
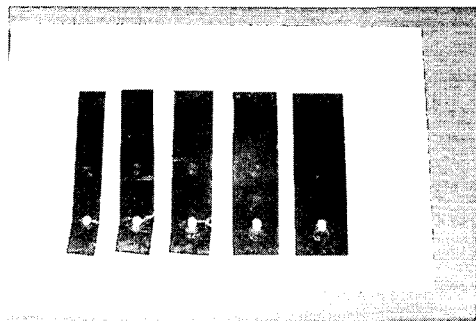


Fig. 7 (a) Photograph of fractured specimens and (b) graph of joint strength according to w/d

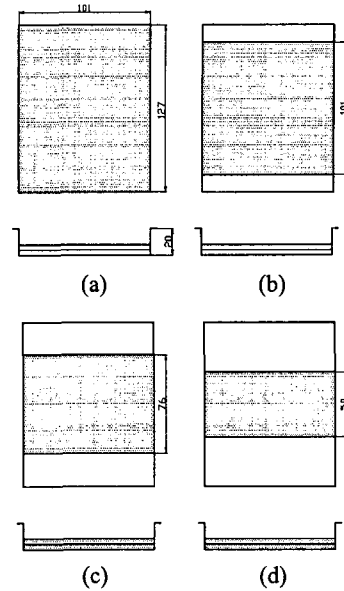


Fig. 8 Schematic diagrams showing the top and front views of GMT sheet positioning for compression molding using initial area fractions of (a) 100 %, (b) 80 %, (c) 60 %, and (d) 40 %

였다. 각 경우마다 다섯 번의 실험을 수행한 결과, Fig. 6(a)에 나타난 바와 같이 e/d가 3.5 미만일 때 분할파괴가 발생하고, 3.5 이상인 경우에는 베어링 파괴가 발생하였다. 분할파괴 모드에서 조인트 강도는 균열 진전길이에 비례하며, 균열 진전길이는 e/d값에 비례하므로 Fig. 6(b)와 같이 조인트 강도가 증가하였다. 한편, 베어링 파괴가 일어날 경우에는 조인트 강도가 일정값에 수렴하게 된다. 이 결과를 바탕으로 본 연구에서 시편의 e/d는 4.0으로 설정하였다.

다음으로 시편의 폭(w)을 결정하기 위한 실험을 수행하였다. Fig. 7(a)에 나타난 바와 같이 w/d가 5.0 미만일 때 분할파괴가 발생하고, 5.0 이상일 때 베어링 파괴가 발생하였다. 앞서 언급한 바와 같이 분할파괴 모드에서는, Fig. 7(b)에 나타난 것처럼 w/d에 비례하여 조인트 강도가 증가하였으며, 베어링 파괴가 발생할 때는 조인트 강도가 수렴하였다. 이 실험결과들을 바탕으로 본 연구에서는 시편의 폭을 36 mm, 시편의 구멍에서 끝단까지의 거리를 24 mm로 설정하였다.

일반적인 복합재료의 경우 w/d가 4 이상일 때

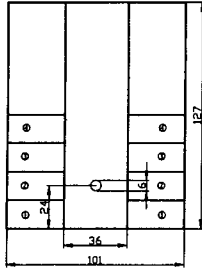


Fig. 9 Dimensions of the GMT specimen for joint strength experiments in relation to the compressed GMT plate

조인트 강도가 수렴⁽¹⁾하는 것에 비해, 본 실험에 사용된 재료의 경우 그 값이 4.0 에서 5.0 으로 증가한 것을 알 수 있다. 평판의 성형 방법을 Fig. 8과 같이 변화시키면서 위 실험을 수행한 결과 w/d값은 큰 차이가 없었다. 따라서 성형 방법 보다는 본 연구에 사용된 재료의 특성으로 인해 w/d값이 증가한 것이라고 사료된다.

3. 평판성형조건에 따른 조인트 인장 강도 분석

조인트의 강도를 결정하는 요소는 시편의 형상, 와셔의 크기, 클램핑 압력 등 조인트 설계 시 고려되어야 할 요소가 있고, 섬유 방향이나 함유량 등 시편 자체에 영향을 주는 요소가 있다. 또한, 주변 온도나 습도 등 환경적인 영향도 있다. 하지만 환경적인 요소의 경우 다른 요소들에 비해 그 영향이 미미하므로 본 연구에서는 고려하지 않았다. 본 장에서는 평판 성형 방법과 금형의 온도가 조인트 강도에 미치는 영향을 조사하였다.

3.1 평판 성형 방법이 미치는 영향

본 실험에서는 평판 성형 방법이 기계적 접합 조인트에 미치는 영향을 알아보기 위해서 금형 내 차지하는 장입재의 면적을 Fig. 8에 나타난 바와 같이 금형면적의 40~100%가 되도록 변화시키면서 평판을 성형하였다.

이렇게 면적비를 다르게 하여 평판을 성형하는 이유는, 평판 성형 시 발생하는 장입재의 섬유와 수지의 유동을 변화시켜주기 위함이다. 본 실험에서는 위치에 따른 섬유들의 이동정도를 파악하

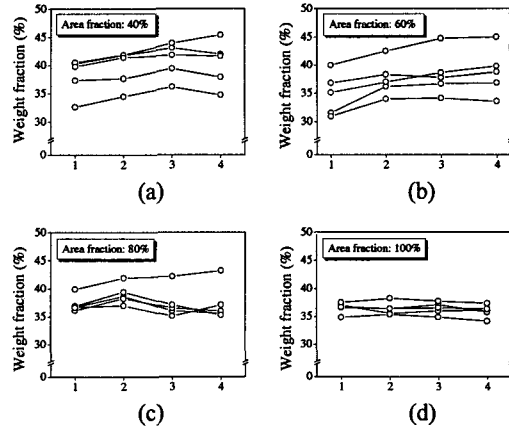


Fig. 10 Fiber weight fraction change according to specimen position for initial area fractions of (a) 40 %, (b) 60 %, (c) 80 %, and (d) 100 %

기 위해 Fig. 9에 보이는 것처럼 조인트 강도 실험용 시편을 제작하고 남은 양쪽의 평판의 반을 사등분하여 각 부분의 섬유분율을 측정함으로써 섬유의 유동양상을 파악하고자 하였다. 본 연구에서는, 섬유의 질량분율을 측정하기 위해 수지를 태우는 방법을 사용하였다. 가열기에 대상 시편을 넣고 700℃에서 6분간 가열하게 되면, 수지는 타서 날아가고 유리섬유만 남게 되므로, 시편을 태우기 전의 질량을 측정하고 시편을 태운 후의 남아있는 유리섬유 질량을 측정하면 장입재의 섬유 함유량을 구할 수 있다.

3.1.1 섬유의 유동 양상

평판 성형 방법에 따른 실험결과를 Fig. 10에 면적비에 따른 섬유의 질량분율 분포로 나타내었다. 면적비 40% 평판과 60% 평판의 경우를 살펴보면, 평판의 끝으로 갈수록 섬유의 질량분율이 감소하는 것을 볼 수 있다. 반면 면적비 100%의 평판을 보면 위치에 관계없이 거의 일정한 섬유분율을 보이는 것을 알 수 있다.

3.1.2 섬유분율의 변화율

Fig. 10의 동일 면적비, 위치에서 섬유분율의 차이가 발생하였는데, 이 원인이 초기 RD GMT 장입재에 유리섬유가 균일하게 분포되지 않았기 때문이라고 판단하여 이를 검증하기 위한 실험을 하였다. RD GMT 장입재의 초기 섬유분율을 측

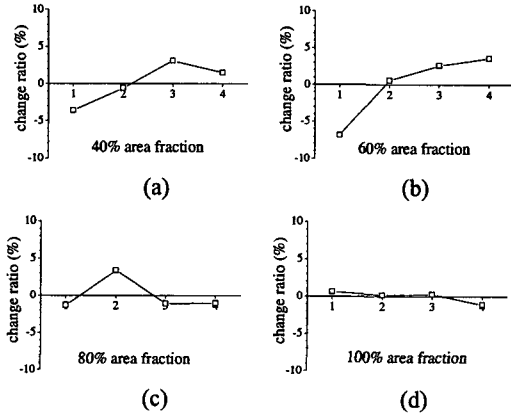


Fig. 11 Average change ratio of fiber weight fraction according to specimen position for initial area fractions of (a) 40 %, (b) 60 %, (c) 80 %, and (d) 100 %

정하고자 700 mm×500 mm 크기의 장입재 3개를 임의로 선택한 후 장입재마다 9군데를 취하여 32 mm×32 mm시편 27개의 섬유 질량분율을 측정하였다. 그 결과 평균 37.59%를 기준으로 최소값 33.89%부터 최대값 41.58%까지 널리 산재해 있는 것을 알 수 있었다. 결국 각 시편마다 초기에 포함하고 있는 섬유량이 다르다는 점을 고려하여 섬유분율의 변화율 $\alpha = \frac{x-\rho}{\rho} \times 100$ (%)를 정의하여 사용하였다. 이 식에서 ρ 는 각 시편의 평균 섬유분율로서 ①~④ 부분의 측정값을 평균하여 구하였다. 그리고 x 는 각 위치에서 측정된 섬유분율을 의미한다.

Fig. 11은 면적비에 따른 섬유분율 변화율의 평균값을 의미한다. 장입재의 면적비가 100%인 평판의 경우에는 유동의 변화가 거의 없기 때문에 변화율이 0% 부근에 균일하게 모여 있는 것을 알 수 있다. 반면 면적비 40% 평판과 60% 평판에서는 끝단 쪽으로 갈수록 섬유분율이 감소함을 알 수 있고, 80% 평판의 경우에는 ② 위치에서 섬유분율이 가장 많이 증가함을 알 수 있다. 이는 섬유의 유동성이 수지에 비해 작기 때문에 유리섬유가 초기 금형 내 위치하는 장입재의 끝단 근처로 가장 많이 이동하기 때문이다.

3.1.3 조인트 강도 평가

장입재의 면적비를 변화시키면서 성형한 평판

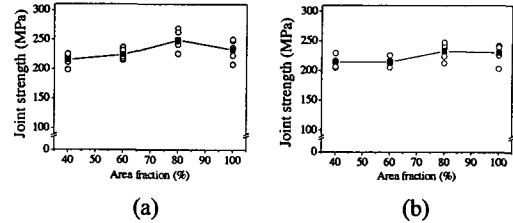


Fig. 12 (a) Original joint strength and (b) modified joint strength for various initial area fractions

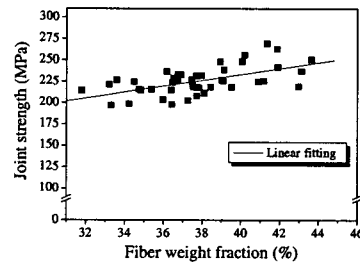


Fig. 13 Linear curve fitting between fiber weight fraction in whole specimen and joint strength

을 Fig. 9와 같이 가공하여 시편을 만들었으며, 이를 이용하여 조인트 강도를 평가하였다. 그 결과를 Fig. 12(a)에 나타내었다. 한편, Fig. 13에 나타난 바와 같이 섬유분율과 조인트 강도 사이에 선형적인 관계를 얻을 수 있었다.

결국 Fig. 12(a)에서 면적비 80% 평판을 이용하여 제작한 시편의 조인트 강도가 가장 크다는 것은 이 평판을 이용한 시편의 조인트 부위에 유리섬유가 가장 많이 존재하기 때문이라고 유추할 수 있다.

3.2 금형의 온도가 미치는 영향

평판 제작시 금형의 온도가 조인트 강도에 미치는 영향을 알아보기 위해 이를 변화시켜주었다. 장입재 수지인 폴리프로필렌이 150℃ 이상에서 용융하는 점을 감안하여 금형 온도를 25℃, 50℃, 75℃, 100℃, 125℃로 설정하여 실험을 수행하였다. 이 때, 평판 내 섬유를 고르게 분포시키기 위하여 금형과 장입재의 크기를 동일하게 하여 평판을 제작한 후 시편의 조인트 강도를 측정하였다.

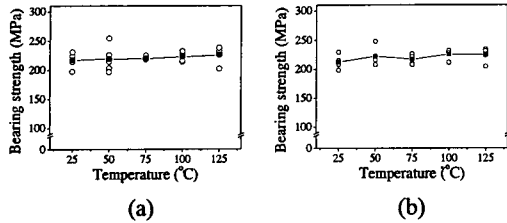


Fig. 14 (a) Original joint strength and (b) modified joint strength for various molding temperatures

Fig. 14(a)에 나타난 바와 같이 금형의 성형 온도와 무관하게 조인트 강도가 일정한 것을 알 수 있으므로, 금형 온도는 조인트 강도에 영향을 끼치지 않는다고 판단된다.

3.3 보정 선도

초기 장입재 내 유리섬유량이 각 시편마다 다른 점을 고려하여 조인트 강도를 다음의 식으로 보정해 주었다.

$$S_i^* = S_i + \beta \times (w_a - w_i) \tag{1}$$

이 식에서 S_i 는 각 시편에서 측정된 조인트 강도, β 는 섬유분율과 조인트 강도 간의 기울기, w_i 는 시편의 평균 섬유분율, w_a 는 임의로 정한 초기 장입재의 평균 섬유분율을 의미한다.

본 연구에서는 w_a 를 초기 장입재 내 섬유분율의 평균값인 37.59%로 정하였고, 기울기 β 는 Fig. 12의 결과를 바탕으로 3.44로 정하였다. 이를 이용하여 데이터를 보정한 결과 Fig. 12(b)와 Fig. 14(b)에 나타난 것처럼 편차가 감소하였다.

4. 클램핑 압력과 와셔의 크기가 조인트 강도에 미치는 영향

4.1 클램핑 압력이 조인트 강도에 미치는 영향

볼트의 체결력이 조인트 강도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 볼트 체결력의 크기를 변화시키면서 조인트 강도를 측정하였다. Fig. 15에 나타난 와셔의 안지름 (d)은 볼트의 지름과 동일한 6 mm로 정하였고, 바깥지름 (d_w)은 14 mm로 고정시킨 후 볼트에 가해지는 토크를 변화시켜가면서

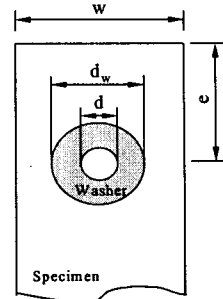


Fig. 15 Geometry of the washer

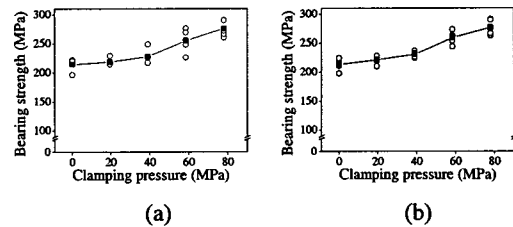


Fig. 16 (a) Original joint strength and (b) modified joint strength for various clamping pressure

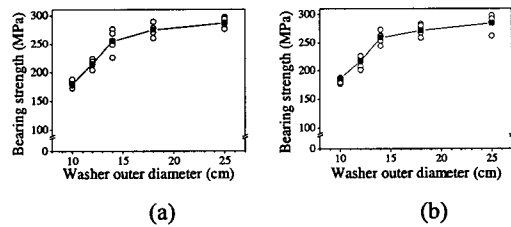


Fig. 17 (a) Original joint strength and (b) modified joint strength for various washer outer diameter

실험을 수행하였다. 볼트의 체결력은 토크렌치를 사용하여 볼트에 토크를 가해주는 형식으로 변화시켰다. 실험에서 사용한 토크의 범위는 0~14.7 N·m로, 조인트 부분에 가해지는 압력으로 환산할 경우 0~97.47 MPa 이 된다.

Fig. 16에 볼트 체결압력에 따른 조인트 강도의 실험값과 보정한 결과를 나타내었다. 이 결과를 살펴보면 볼트 체결력이 증가할수록 조인트 강도가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 볼트 체결압력이 조인트의 압축강도를 증가시켜 균열 봉합 (crack closure) 현상을 유발하므로, 조인트의 크랙 진전 속도를 감소시키기 때문이라고 판단된다.

4.2 와셔의 크기가 조인트 강도에 미치는 영향
볼트에 가해지는 토크는 $9\text{ N}\cdot\text{m}$, 와셔의 내경은 구멍의 지름과 동일한 6 mm 로 고정시켰으며, 와셔의 외경을 $10\sim 25\text{ mm}$ 로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 이 실험을 통해 얻은 결과를 Fig. 17에 나타내었다. 그래프에 나타난 것처럼 와셔의 외경이 증가할수록 조인트 강도가 증가한다는 사실을 알 수 있었으며, 와셔의 크기가 일정값 이상으로 커지면 조인트 강도는 일정한 값에 수렴한다는 것을 알 수 있다. 와셔의 외경이 증가하면 와셔와 시편 간 접촉면적이 증가하게 되고, 와셔와 시편 사이의 마찰력에 의한 응력 분산이 일어나면서 조인트 강도가 증가하는 것으로 판단된다. 하지만 외경이 일정값 이상으로 커지게 되면 와셔와 시편 간 작용하는 압력이 점차 감소하여 마찰력이 감소하게 된다. 이로 인해 마찰력에 의한 응력 분산이 잘 일어나지 않아서 조인트 강도를 증가시키는 데 큰 영향을 주지 못하게 된다. 결국 이러한 이유로 조인트 강도는 일정값까지만 증가하게 되는 것이다.

5. 결론

- (1) 시편의 형상이 e/d 는 3.5, w/d 는 5.0이 될 때 까지 조인트 강도가 증가한 후 수렴한다.
- (2) 평판 성형 방법에 따라 섬유유량의 유동양상이 변한다. 면적비가 80 %일 때 조인트 주위에 가장 많은 섬유유량이 분포하게 되며, 이 때 가장 큰 조인트 강도를 얻을 수 있다.
- (3) 평판 성형시 금형의 온도는 조인트 강도에 영향을 미치지 않는다.
- (4) 클램핑 압력과 와셔의 외경이 증가할수록 조인트 강도는 증가한다. 단, 와셔의 외경이 일정 크기 이상이 되면 조인트 강도는 수렴한다.
- (5) 평판 성형 방법에 따른 섬유유량의 변화는 크지 않다. 성형 과정이 조인트 강도에 미치는 영향보다는 클램핑 압력, 와셔의 크기 등이 조인트 강도에 미치는 영향이 더 크다.

참고문헌

- (1) Matthews, F. L., 1987, *Joining Fiber-Reinforced Plastics*, Elsevier Applied Science.
- (2) Collings, T. A., 1982, "On the Bearing Strength of CFRP Laminates," *Composites*, Vol. 13, pp. 241~252.
- (3) Hart-Smith, L. J., 1986, "Design and Analysis of Bolted and Riveted Joints in Fibrous Composite Structures," *International Symposium on Joining and Repair of Fiber-Reinforced Plastics*, Imperial College, London.
- (4) Quinn, W. J. and Matthews, F. L., 1977, "The Effects of Stacking Sequence on the Pin-Bearing Strength in Glass Fiber Reinforced Plastics," *J. Comp. Mat.*, Vol. 11, pp. 139~142.
- (5) Oh, J. H., Kim, Y. G., and Lee, D. G., 1997, "Optimum Bolted Joints for Hybrid Composite Materials," *Comp. Struct.*, Vol. 38, pp. 329~341.
- (6) Matthews, F. L., Roshan, A. A., and Phillips, L. N., 1982, "The Bolt Bearing Strength of Glass/Carbon Hybrid Composites," *Composites*, Vol. 13, pp. 225~227.
- (7) Herrington, P. D. and Sabbaghian, M., 1992, "Effect of Radial Clearance between Bolt and Washer on the Bearing Strength of Composite Bolted Joints," *J. Comp. Mat.*, Vol. 26, pp. 1826~1843.
- (8) Kim, R. Y. and Whitney, J. M., 1976, "Effect of Temperature and Moisture on the Pin-Bearing Strength of Composite Laminates," *J. Comp. Mat.*, Vol. 10, pp. 149~151.
- (9) Akay, M., 1992, "Bearing Strength of As-cured and Hygrothermally Conditioned Carbon Fiber/Epoxy Composites under Static and Dynamic Loading," *Composites*, Vol. 23, pp. 101~108.
- (10) Kim, K. T., Jeong, J. H., and Im, Y. T., 1994, "An Experimental Study on Heat Transfer and Flow in Compression Molding of SMC," *Trans. KSME*, Vol. 18, No. 9, pp. 2386~2395.
- (11) Juvinall, R. C. and Marshek, K. M., 1991, *Fundamentals of Machine Component Design*, John Wiley & Sons, pp. 367~368.
- (12) Kang, W. S., 2002, *A Study on Bolted Joint Strength of GMT Plate*, Master Thesis, KAIST, Daejeon.

(1) Matthews, F. L., 1987, *Joining Fiber-Reinforced*