

폴리머 사출 용접부 및 접착제 접합부의 파괴강도 특성

전북대학교 기계공학부 임 재 규

1. 서 언

최근 폴리머 복합재료는 자동차 및 항공 우주분야를 위시해 많은 분야에서 사용되어지고 있다. 더욱이 섬유강화 폴리머 복합재료는 엔지니어링 플라스틱으로써 지난 십여년 사이에 그 개발이 활발히 진행되고 있다. 따라서 복합재료의 신뢰성과 안전성을 확보하기 위해서는 그의 강도평가가 중요한 문제로 되고 있다.

Engineering plastics는 역학적 특성, 열적 특성, 치수 안정성 등이 우수한 고성능 폴리머로 공업용 부품에 사용되는 급속 대체재료로 그 사용도가 점점 확장되고 있다. 또한 폴리머가 가지는 외관성, 성형성, 내식성 등의 우수한 특징을 그대로 유지하면서 기계적 강도를 향상시키고 열적 안정성을 유지하기 위해서 유리섬유나 탄소섬유를 혼입한 복합재료의 용도가 점점 확대되어가고 있다. 그런데 폴리머 복합재료를 이용한 사출성형품에는 용접부가 존재하게 되는데 이 용접부의 강도를 저하시키지 않기 위해서는 용접부의 구조 및 파괴연구가 필수적이라고 할 수 있다.

또한 자동차 구조 중 승용차와 버스 등은 상당부분이 박강판 결합으로 이루어진다. 현재까지 이러한 박강판 구조의 이음부는 주로 Spot 용접 결합방식을 취하고 있으나 구조용 접착제 접합기술의 개발 및 진보와 더불어 접착제 접합으로 Spot 용접을 대체하거나 Spot 용접과 접착제 접합을 겸용한 방법이 점차적으로 박강판 이음부에 적용되고 있다.

구조용 접착제 접합은 Spot 용접에 비해 상대적으로 큰 면적에 걸쳐 결합이 이루어지며 용접보다 응력을 훨씬 균일하게 분포시키므로 큰 하중을 전달할 수 있으며 특히 구조물의 내구성과 강성이 우수한 것으로 알려져 있다. 구조용 접착제 접합기술의 발전과 접착제 접합의 우수한 특성에 의해 그것의 응용범위는 점차 확대되고 있으며, 특히 자동차 산업으로 적용이 확대되고 있는 추세에 있다. 그러나 용접이나 기계적 결합법에 비해 역사가 짧고 특히 내구성에 관한 데이터는 아직 충분히 축적하지 못한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 단유리섬유(Short Glass Fiber)가 혼합된 폴리머 복합재료에서 모재의 사출방향과 하중방향의 관계 및 용접부의 섬유방향과 하중방향의 관계에 대한 인장 및 굽힘강도 평가와 섬유방향에 따른 탄성계수의 평가, 그리고 편광현미경과 SEM(Scanning electronic microscopy) 관찰을 통한 용접부에서의 유리섬유방향과 사출방향의 미시적 파괴기구를 해석하고자 한다.

또한 접착제 종류, 접착부에 대한 평균압력 및 표면조도 등 인자들이 박강판 접합부의 내구성에 미치는 영향을 고찰하고 또한 박강판 Spot 용접결합에서 겹침 층수가 내구성에 미치는 영향을 고찰하고 접착제 접합시편과 Spot 용접 시편의 내구성을 비교, 평가하여 구조용 접착제 접합의 활용을 위한 기초적 자료를 제공하고자 한다.

2. 시험편 및 실험방법

2-1. 시험편

본 실험에서 사용되어진 폴리머 복합재료는 단유리섬유(Short glass fiber)를 40% 포함하고 있는 PC(폴리카보네이트)와 고성능 엔지니어링 플라스틱인 PPS(폴리페닐렌 설파이드)이다. 유리섬유 치수는 직경이 $13\mu\text{m}$, 길이가 $200\sim 400\mu\text{m}$ 정도이다. 이 실험에서 Fig. 1과 같이 double-gate mold에서 사출성형에 의해 dumbbell-type의 인장시편과 3점굽힘시험을 하기 위한 굽힘시편이 molding 관재로부터

터 기계가공으로 만들어졌다. 사출된 폴리머 판재는 중심에 용접부를 가지는 $3\text{mm} \times 70\text{mm} \times 270\text{mm}$ 로 제작되었다. 사출성형의 표준 조건들은 사출온도 320°C , mold 온도는 115°C 이며 성형사이클은 20~80sec이다.

인장시험편에서 모재(Parent)는 인장하중을 부가하는 방향이 MFD(mold filling direction)에 대하여 각각 0° , 30° , 45° , 60° , 90° 가 되도록 제작되었고 용접선(weld line)을 갖는 용접재(weld)는 용접선의 방향이 인장방향에 대해 각각 0° , 30° , 45° , 60° , 90° 가 되도록 dog-bone type의 인장시험편을 제작하였다. 굽힘시험편은 인장시험편과 동일한 제작 방법으로 bar-type으로 제작되었다.

편광현미경에 의한 유리섬유 방향을 해석하기 위해서 microtoming technique을 이용하여 초박판 시험편을 절단한다. 절단된 시험편을 기계연마와 수동연마를 통하여 두께가 $10 \sim 15\mu\text{m}$ 가 될 때까지 연마되어 진다. 이와 같은 방법으로 제작된 초박판 시험편은 투과 현미경의 시험편으로 사용된다. 또한 시험편의 파단면을 통한 파괴양상을 관찰하기 위해 SEM을 이용하여 파면을 관찰하였다.

또한 접착제 접합시험편의 재료는 1.2mm 두께의 냉간압연강판(SPCC)이다. 시험편의 설계는 ASTM D1002-94 기준에 근거하여 단일접침형식으로 하였으며 접침길이, 접착층 두께를 변화시켜 Fig. 2와 같이 제작하였다.

해석에서 사용된 물성치들은 탄성계수와 포와송 비로서 접착제만으로 된 시험편과 냉간압연강판으로 된 시험편을 인장시험을 통하여 구해진 물성치를 해석모델에 적용하였다. 경계 조건은 해석하려는 접착층의 내부에 구속조건이 걸리지 않도록 시험편 양 끝에 Fig. 3과 같이 주었다.

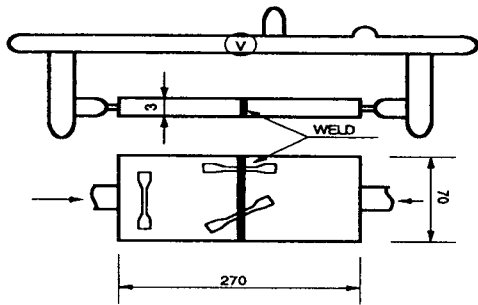


Fig. 1 Layout and dimensions of injection mold and specimen

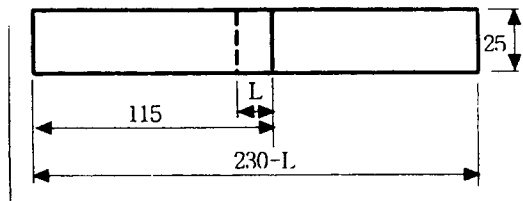


Fig. 2 The adhesive bonded specimen

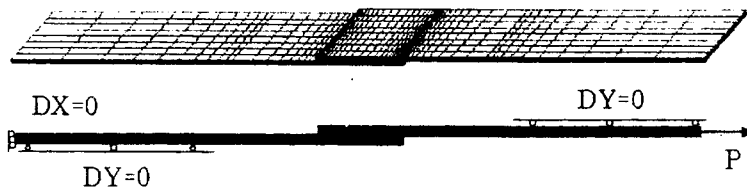


Fig. 3 FEM boundary condition

3. 폴리머 사출 용접부의 미시적 파괴평가

3-1. 사출 성형부의 섬유방향 해석

사출 용접부를 갖는 폴리머 복합재료는 용접부에서의 강도저하가 필수적으로 나타난다. 이러한

용접부의 기계적 강도 특성은 섬유상의 상태 및 섬유방향분포, 섬유길이 분포, 섬유집중부 등의 영향에 따라서 강도의 변화가 발생함을 알 수 있다.

Fig. 4는 PC 모재의 미세조직을 3D로 관찰하여 얻어진 사진이다. 전단면은 유리섬유의 단면만이 관찰되어지고 횡단면에서는 섬유가 MFD에 평행하게 배열함으로써 일방향성을 보여줌을 알 수 있다.

Fig. 5는 용접재의 섬유방향사진이다. 두 개의 flow가 만나는 선단에서 분화구 같은 모양의 섬유방향 분포가 일어나고 있다. 또한 선단이 부딪히는 근처의 섬유방향은 MFD 방향에 대하여 수직인 방향으로 배열되어 있음을 알 수 있다. 또 선단으로부터의 거리에 따라 혼합역(mixture zone)의 수가 변화하고 있음을 알 수 있다.

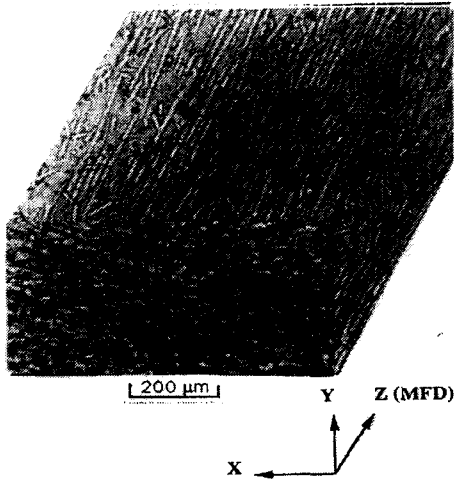


Fig. 4 Photomicrograph taken on three-dimensional fiber orientation of PC parent

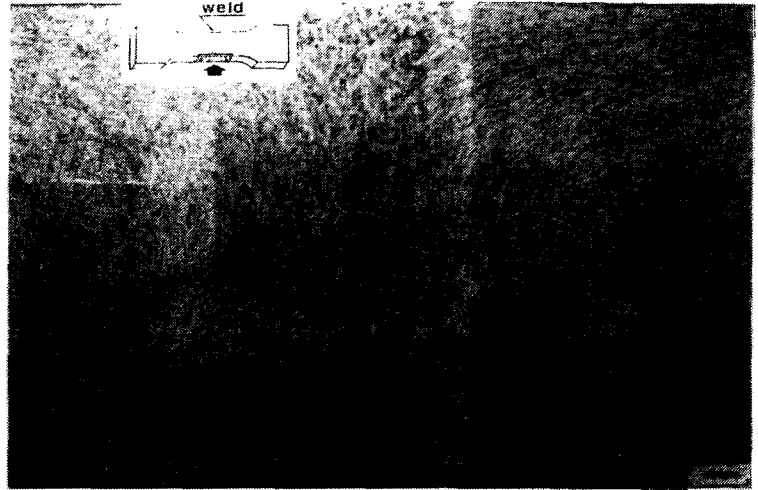


Fig. 5 Photomicrograph of volcano-like pattern of PC weld

3-2. 모재 및 용접부의 강도평가

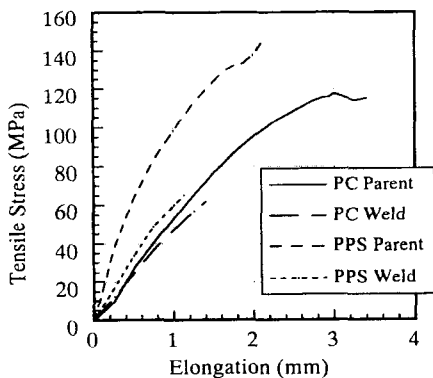


Fig. 6은 단섬유 강화 PC와 PPS의 모재와 용접재의 인장하중과 연신 사이의 관계 그래프이다. 모재는 PC와 PPS의 강도차가 있으나 용접재는 PC와 PPS의 강도차가 거의 없음을 볼 수 있다. 이는 모재의 강도는 기지의 강도차에 의해 나타나지만 용접재는 용접부의 단섬유 방향에 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6 Relation between tensile stress and elongation of PC and PPS

3-3. 섬유방향과 인장강도

Fig. 7은 용접부 각 부분의 섬유방향을 Image 분석기에 의해 찍은 사진이다. 위치 (a)에서는 섬유방향이 MFD에 90° 방향으로 배열되어 있으며 두 flow의 선단이 결합한 후 섬유방향이 바뀌는 곳

이다. 위치 (b)는 표면 flow가 냉각된 후 혼합되는 영역이다. 따라서 섬유방향이 MFD에 45°와 135°로 배열된다. 위치 (d)는 대부분의 섬유방향이 0°와 180°로 배열되어 MFD에 평행한 영역이다. Fig. 8은 인장강도와 섬유방향이 사이의 관계를 보이고 있다. 모재의 인장강도는 용접재에 비하여 25~30% 정도 더 우수하다. 모재와 용접재의 인장강도는 인장방향과 이루는 각이 0°일 때 최대가 되어 각도의 증가에 따라 감소를 보였고 30°에서부터는 완만한 감소현상이 나타났다.

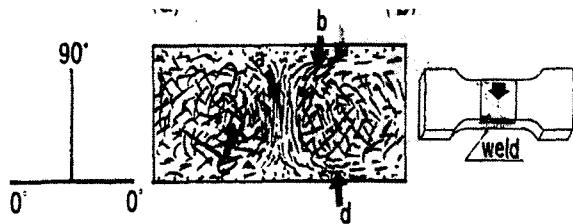
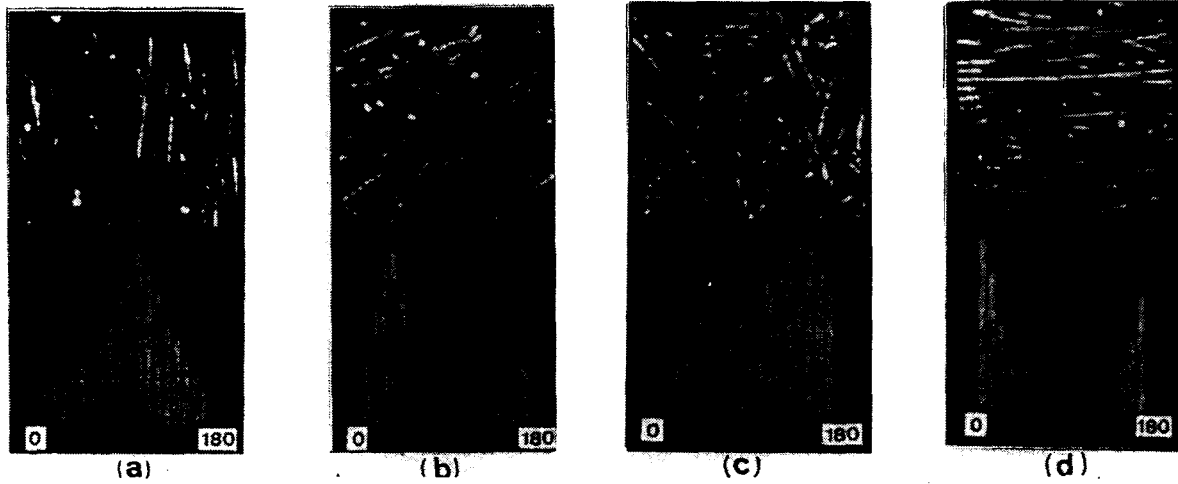


Fig. 7 Orientation analysis of glass fiber by Image Analyzer

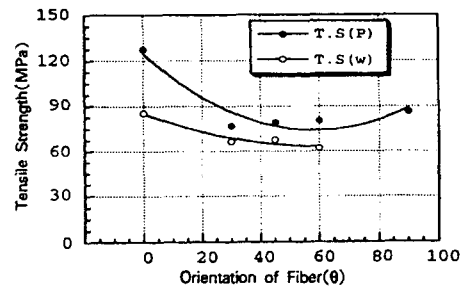


Fig. 8 Relationship between tensile strength and fiber orientation

3-4. 사출성형용접부의 응력집중현상

Fig. 9는 PC 용접부를 SPATE에 의해 응력집중도로 나타낸 사진이다. 용접부에 단섬유의 집중으로 응력이 집중되고 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 10은 중앙에 hole이 있는 PPS 모재와 용접재의 응력집중현상을 보여주고 있다. 용접재에서는 용접부 방향으로 응력확대가 진행되고 있는 것을 볼 수 있다.

3-5. PC 모재의 환경파괴 형태

분위기 온도와 흡습량에 의한 파괴강도형태를 분류하였으며 Fig. 11과 같이 인장강도는 모재 및 용접재 모두 -30°C에서 가장 높으며 모재에서는 기지재의 영향을 받으나 용접재는 기지재보다는 용접부의 섬유방향 및 밀도에 더 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

온도와 흡습량에 따른 파괴모드는 다음 표와 같이 온도의 증가와 흡습시간의 증가에 상호 연관성이 있음을 볼 수 있다.

Environmentally Assisted Cracking of PC parent

Temp(°C)	20	40	60	80
condition				
in air-air	×	×	×	×
in air-water	×	×	×	○
in water-water	×	×	○	○

× : no crack in gauge length

○ : surface crack in gauge length

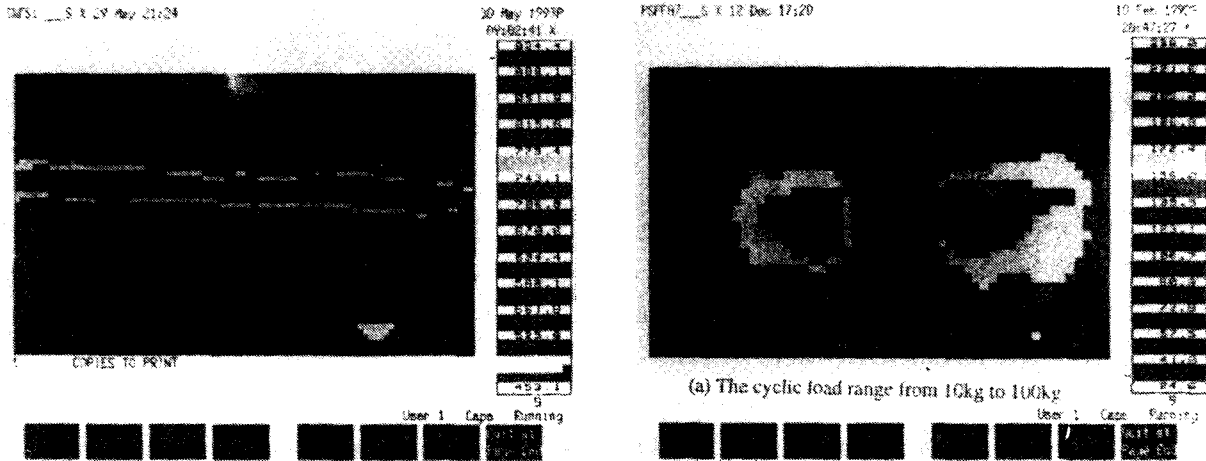


Fig. 9 Stress distribution of PC weld
($P_{min} = 50kg, P_{max} = 100kg$)

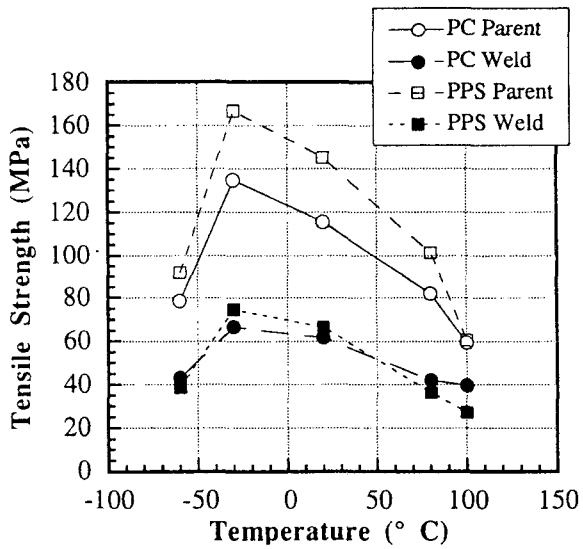


Fig. 11 Relation between tensile strength and temperature

4. 접착제 접합부의 파괴강도 특성

4-1. 접착부의 유한요소 해석

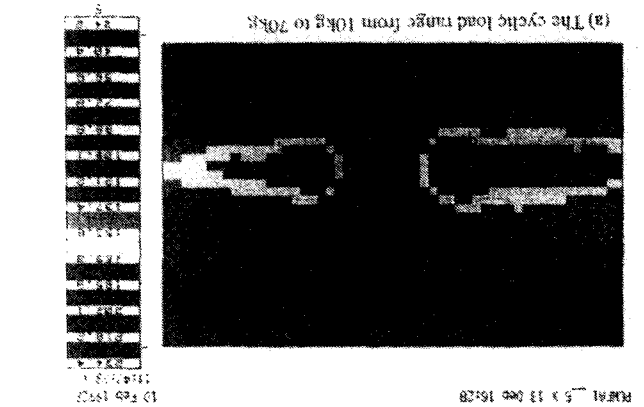
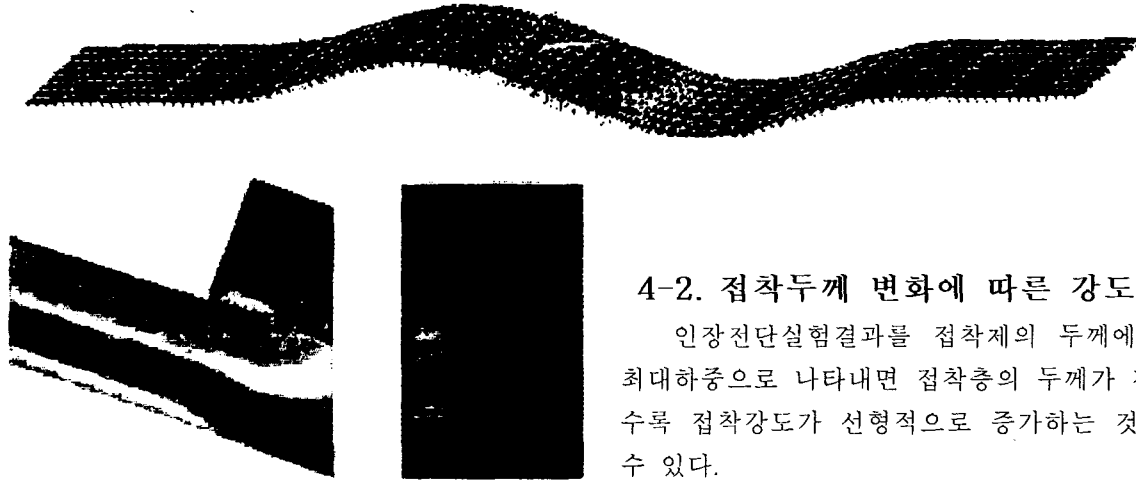


Fig. 10 The shape of stress concentration with load in PPS parent with hole

진제적인 시편의 응력집중을 보았을 때의 응력집중의 분포도는 Fig. 12와 같고 응력은 겹침부 끝부분을 기준으로 접착제 쪽보다는 모재 쪽으로 더 많이 집중되어 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 인장하중이 증가함에 따라 접착부위는 거의 변형이 일어나지 않은 반면 겹침부 끝부분이 가장 먼저 항복점을 넘어서고, 모재와 급격하게 늘어나면서 시편이 크게 변형된다는 것을 의미한다.



4-2. 접착두께 변화에 따른 강도평가

인장전단실험결과를 접착제의 두께에 따라 최대하중으로 나타내면 접착층의 두께가 감소할수록 접착강도가 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 12 Adhesive bonded single-lap joints using finite element analysis
(Overlap length 8mm, Adhesive thickness 100 μ m)

4-3. 겹침길이 변화에 따른 강도평가

인장전단 실험결과를 접착제의 겹침길이에 따라 최대하중으로 나타내보면 Fig. 13과 같고 겹침길이 증가할수록 접착강도가 증가하지만 15mm 이상에서는 접착하중이 접착면적에 비례적으로 증가하지 않는 것을 볼 수 있다. 이는 접착하중이 접합부 면적에 균일하게 분포하지 않고 가장자리에 집중적으로 작용해 하중과 면적은 선형적으로 증가하지 않는다.

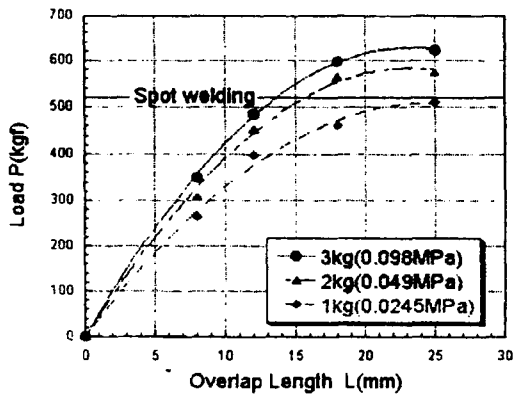


Fig. 13 The effect of overlap upon tensile-shear strength

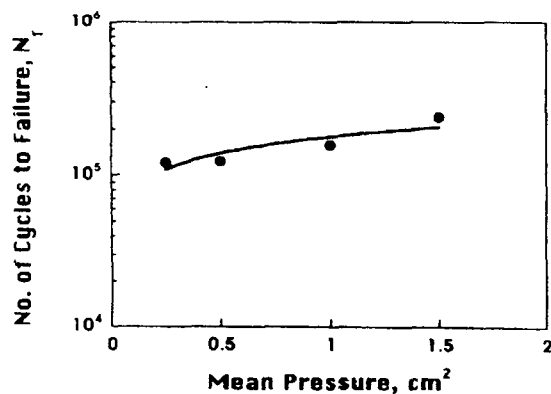


Fig. 14 The Relation between N_f & mean pressure on overlap

4-4. 내구성에 미치는 평균압력과 표면조도의 영향

M-type 접착제로 평균가압력을 변화시켜 제작한 4가지 시편의 피로시험 결과 각 하중에서의 파단수명을 Fig. 14에 나타내었다. 그림에서와 같이 평균압력의 증가에 따라 피로수명은 일정한 증가를 보이나 그 차이가 현저하지는 않았으나 Fig. 15와 같이 표면 조도의 영향은 상당히 크며 특히 거칠기가 낮은 수준에서 내구성의 변화는 크게 나타났다.

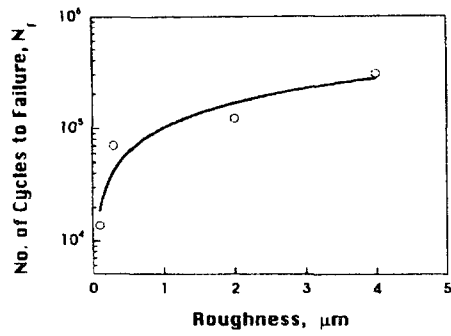


Fig. 15 The Relation between N_f & adherend's roughness of joint part

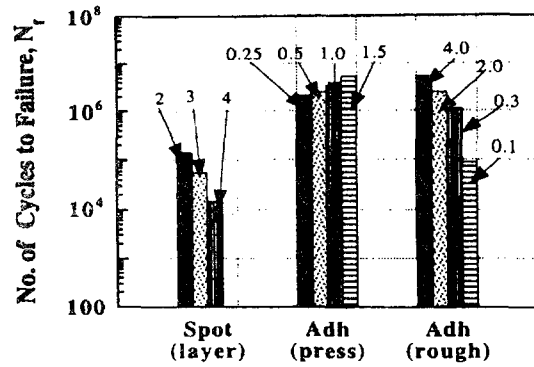


Fig. 16 Relation between No. of cycles to failure (N_f) with spot welding and adhesive bonded specimens

4-5. 접착제 접합부와 Spot 용접부의 내구성 비교

가압력과 피접착 소재의 표면조도를 변화시켜 제작한 접합시편에 대한 피로시험결과와 3가지 Spot 용접시편(2, 3, 4접)에 대한 피로시험결과를 종합하여 Fig. 16에 보여주고 있다. 그림에서 접착제 접합시편의 경우 가압력이 변화하거나 표면조도를 변화시킨 시편 모두 Spot 용접시편보다 내구성이 훨씬 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 피로수명의 측면을 고려하면 박강판 구조의 설계에서 접착제 접합으로 spot 용접결합을 대체 가능하다고 판단된다.

5. 결 론

1. 폴리머 사출 용접부의 섬유방향은 mold 위치와 크기에 좌우된다. 특히 두 개의 유동이 만나는 사출 용접부에서는 flower-like pattern이나 volcano-like pattern 같은 형태로 섬유방향의 배열이 나타난다.
2. 섬유방향에 따른 인장강도는 $0^\circ \sim 30^\circ$ 에서는 섬유방향에 의해 영향을 받으나 30° 이상에서는 섬유방향의 영향보다는 matrix의 영향이 더 크게 작용함을 알 수 있으며 용접부에서의 굽힘강도는 섬유방향보다는 matrix에 더 큰 영향을 받고 있다.
3. 폴리머 복합재료의 환경조장 크랙 발생은 흡습시간과 온도의 영향을 받는다. 환경조장 표면크랙은 water-water 조건에서는 60°C 의 환경온도이상에서, air-water 조건에서는 80°C 이상에서 발생한다.
4. 접착제 접합부의 두께와 접착길이가 증가함에 따라 접합강도에 미치는 영향은 일정한 범위에서만 선형적으로 증가하여 접합부의 설계에 중요한 인자가 된다.