

## Al/PC 접합재의 접착강도특성에 미치는 표면처리의 영향

서도원\*·윤호철\*\*·유성철\*\*·임재규†·Lutz Dorn\*\*\*  
(2002년 12월 18일 접수, 2003년 3월 24일 심사완료)

### Effect of Surface Treatment on Adhesive Strength Properties of Al/PC Adhesive Joints

Do-Won Seo, Ho-Cheol Yoon, Sung-Chol Yoo, Jae-Kyoo Lim and Lutz Dorn

**Key Words:** Adhesive Joints(접착제 접합재), Adhesive Strength(접착강도), Roughness(조도), Surface Treatment(표면처리), Loading Speed(하중속도)

#### Abstract

The bonding strength of adhesive joints is influenced by the surface roughness of the joining parts. However, the magnitude of the influence has not yet been clarified because of the complexity of the phenomena. In this study, it is shown that surface treatment affects adhesive strength and durability of aluminum/polycarbonate single-lap joints, and loading speed affects tensile-shear strength of adhesive joints. To evaluate effect of surface treatments on the adhesive strength, several surface treatment methods are used, that is, cleaning, grinding, SiC polishing and sand blasting. It is shown that an optimum value of the surface roughness exists with respect to the tensile-shear strength of adhesive joints. The adhesive strength shows linear relationship with the surface roughness and loading speed. And the mechanical removal of disturbing films of lubricants, impurities and oxides make adhesive strength increase significantly.

#### 1. 서 론

접착제 접합방법(adhesive bonding method)은 자동차 산업에서 자동차의 제조상 사용되는 여러 가지 결합방법 중 하나로 적용되고 있으며, 특히 이종재료의 접합이나 복잡한 형상의 결합이 가능하여 다른 용접방법보다 우수한 특성을 가지고 있다.<sup>(1,2)</sup> 또한 최근의 자동차의 경량화 추세와 더

불어 알루미늄과 플라스틱 재료가 차지하는 비중이 커져가고 있으며, 이를 제작하는 경우에 접착제 접합에 의한 재료의 결합은 확대되는 추세이다.<sup>(3,4)</sup> 접착제 접합공정에서 피착재(adherend)의 접합부 표면처리는 접합강도 및 내구성에 큰 영향을 미치며, 각종 표면처리 기술이 광범위하게 개발되고 있다.<sup>(5)</sup> 접합부의 접착기구는 주로 기계적, 화학적 및 흡착 등이 작용하며, 표면처리를 거친 후, 피착재에서 발생하는 구조상의 변화, 형태의 변화 및 화학성분의 변화는 모두 접합성능에 영향을 미칠 수 있다.<sup>(6-8)</sup> 따라서 피착재 표면처리방법과 접합강도의 관계를 규명하는 것은 접착제 접합연구의 중요한 구성 부분이다. 한편, 접착제 접합에서 접착제는 대체로 고분자 재료이며, 이의 특성에 의해 강도는 하중속도(loading

† 책임저자, 회원, 전북대학교 기계항공시스템공학부, 공학연구원 공업기술연구소

E-mail : jklim@moak.chonbuk.ac.kr

TEL : (063)270-2321 FAX : (063)270-2452

\* 전북대학교 기계항공시스템공학부

\*\* 전북대학교 일반대학원 기계설계학과

\*\*\* 독일 베를린공대(TUB) 접합코팅연구소

speed)에 상당한 영향을 받는 것으로 알려져 있어 접합이음부의 강도평가에 있어서 하중속도의 영향에 대한 검토는 필수적이다.<sup>(3,4)</sup>

본 연구에서는 2액형 에폭시 접착제로 알루미늄과 폴리머 시편을 접합한 피착재의 접합부 표면을 몇 가지 방법으로 처리하여 피착재 표면처리방법과 접합재 접착강도와와의 관계를 규명하고자 하였다. 또한 인장·전단 시험을 통해 하중속도를 변화시켜 접합강도에 미치는 하중속도의 영향을 고찰하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 시험편 제작

본 연구에서는 ASTM 1002를 기초로 접착제 접합 시험편을 설계·제작하였다. 접합형태는 Fig. 1과 같이 단일접침 결합(single-lap joint) 형상으로 제작하였으며, 길이 110mm, 폭 25mm이고, 폴리카보네이트(polycarbonate; PC)의 두께는 4mm, 알루미늄(aluminum; Al) 6061의 두께는 1mm로 하여 접합을 하였다. 인장전단시험에서 하중의 편심을 막기 위해, 양 그립(grip)부에는 각각 1mm와 4mm 두께의 추가적인 부착물(25x30mm)을 사용하였다. 접착제 접합길이(overlap length)는 예비시험을 통하여 얻은 사용재료의 강도와 시험편의 두께 등을 고려하여 10mm로 설정하였다.<sup>(3)</sup> 시험편의 접침 길이와 접착제 층의 두께를 일정하게 제작하기 위하여 Fig. 2와 같은 형상의 고정장치

(curing jig)를 이용하여 시험편 제작에 사용하였다. 접착제 층의 두께는 시험편에 작용하는 응력의 형태와 접합강도에 영향을 주기 때문에 적절한 가압력을 필요로 한다.<sup>(3,4)</sup> 이를 위해 접착층에 가해지는 압력을 23.52kPa(0.24kgf/cm<sup>2</sup>)으로 일정하게 하였다. 이는 6.37N(0.65kgf)의 추를 접착제

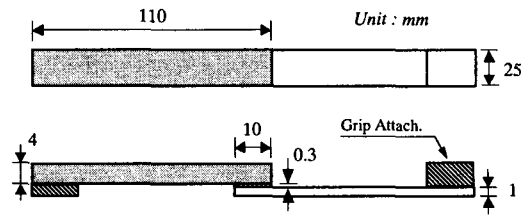


Fig. 1 Schematic diagram of specimen

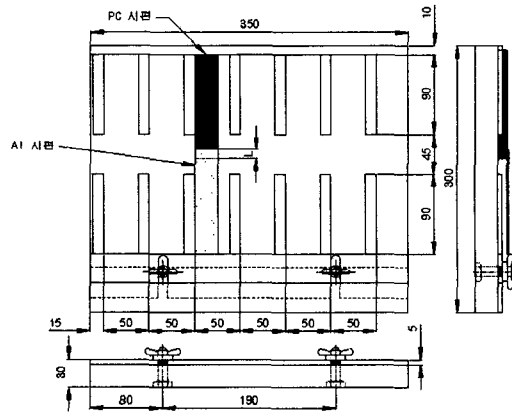


Fig. 2 Schematic diagram of the curing jig

Table 1 Properties of adhesive bond

Product data		
Description	technicoll 8266 comp. A	technicoll 8267 comp. B
Density	1.30±0.05 g/cm <sup>3</sup>	1.10±0.05 g/cm <sup>3</sup>
Viscosity	496±160 Pas (25℃)	400±96 Pas (25℃)
Properties of the reaction product		
Hardness	70±5 Shore D(set 30 min at 120℃)	
Weight/Volume	1.20±0.05 g/cm <sup>3</sup>	
Peeling strength	ca. 4.5 N/mm(setting 1d/RT and 2h/100℃)	
Bonding strength	ca. 20-22 N/mm <sup>2</sup> after 7d/22℃	
	ca. 30-32 N/mm <sup>2</sup> after 30min/125℃	

접합부(10× 25mm)에 적재하여 얻어진 가압력이다. 또한 접착제의 두께를 일정하게 하기 위하여 지름 0.3mm의 동선을 접합부에 두 가닥씩 삽입하여 접합하였다.

본 연구에 사용한 접착제는 열 경화성 에폭시 계열인 Technicoll 8266/8267(H.B. Fuller, Germany)을 사용하였다. 이 접착제의 특성을 고려하여 125℃에서 30분간 분위기 전기로에서 접합을 행하였고, 접합공정후 실온(약 19℃)에서 5일(120hr)간 보관 후 실험을 실시하였다. Table 1은 본 연구에 사용된 접착제의 특성을 보여주고 있다.

## 2.2 표면처리

본 연구에 사용된 시편 접착부위의 표면처리는 아세톤으로 세밀하게 세척한 degreasing, SiC #100 연마지 처리한 표면조도에 상응하는 grinding, SiC #800 연마지로 연마, 고속입자를 분사하여 처리한 sand blasting 등의 4가지 방법을 택하였다. 표면처리 공정후에 표면조도를 관찰하고자 접촉식 표면조도계를 이용하여 접착부위를 x, y방향 각각 5부위에 대하여 표면조도를 측정하고 결과치를 평균하였다. Table 2는 Al과 PC 접착부위에서 측정된 표면조도 평균값을 각각의 표면처리방법에 따라 분류한 것이다.

## 2.3 강도평가

접합강도를 평가하기 위하여 이 시험에 사용된 장치는 10kN 용량의 유압식 만능시험기(Instron, USA)를 사용하였다. 하중속도의 변화에 따른 접

합강도의 영향을 평가하기 위해 CHS(crosshead speed)를 각각 0.05, 0.5, 5, 50mm/min의 조건으로 실험하였다. ASTM 표준규격에서 제시하는 정적 강도시험의 하중속도 범위에 해당하는 CHS는 상한 35mm/min 이하를 권장하고 있어,<sup>(9,10)</sup> 본 실험에서 채택하였던 50mm/min의 시험결과는 일반적인 접합강도의 분포에서 벗어난 경향을 보여주어, 단지 파단 경향을 분석하는 참고자료로 감안하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 Al/PC 접합재의 강도특성

#### 3.1.1 표면처리의 영향

표면조도 변화에 따른 접합강도의 변화를 평가하기 위하여 4가지 방법으로 표면처리된 Al/PC 시편에 대해 인장전단 시험을 행하였다. Fig. 3에

Table 2 Roughness according to various surface treatments

	Aluminum R <sub>y</sub> (μm)	Polycarbonate R <sub>y</sub> (μm)
Degreasing	1.48	3.09
Grinding	5.10	5.58
SiC #800	8.48	5.90
Sand blasting	16.12	14.21

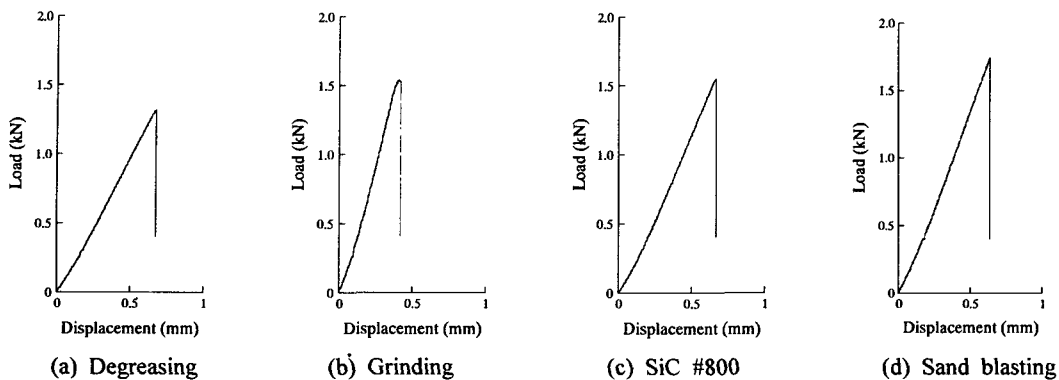


Fig. 3 Load-displacement curves of Al/PC joints at CHS=5mm/min according to various surface treatments

나타난 하중-변위 관계에서 알 수 있듯이 모든 경우의 접합제에서 취성파괴의 경향을 보이고 있으며, 하중속도가 CHS=5mm/min로 동일한 경우에 표면처리 방법에 따라 degreasing, grinding, SiC #800 연마, sand blasting 순으로 접착층의 최대파괴하중( $P_{max}$ )이 큰 것으로 나타났다. 이것은 표면처리방법에 따라 표면조도( $Ry$ )가 증가하고 또한 최대파괴하중도 증가되고 있음을 보여주고 있다. Al과 PC의 접착부위에 같은 표면처리방법을 사용하여도 모재 재질의 상이한 특성으로 인해 각각의 조도는 약간씩 다르다(Table 2).

Fig. 4는 표면처리방법에 따른 접합강도의 분포를 표면조도와 하중속도 영역으로 분류하여 나타낸 그래프이다. Al과 PC의 표면조도는 표면처리방법에 따라 degreasing의 경우는 1.5~3.5 $\mu$ m, grinding은 3.5~7 $\mu$ m, SiC #800 연마는 7~10 $\mu$ m, sand blasting은 9~17 $\mu$ m 범위에 분포하며 sand blasting 처리의 경우는 조도의 분포범위가 다른 처리방법에 비해 넓었다. 이는 sand blasting의 특성상 고속입자의 충돌이 불규칙적이기 때문인 것으로 보여진다. 이러한 불균일성으로 인해 Al과 PC 모두에서 상대적으로 큰 조도값이 측정되었으며, 그 분포 편차도 크게 나타났다. 접착제 접합제의 강도는 주로 모재와 접착제간의 기계적인 결합에 기인하기 때문에, 표면조도가 클수록 접착제의

접촉면적이 증가하게되어 sand blasting 시험편에서 상대적으로 큰 강도값이 측정된 것으로 보여진다. 다른 방법으로 표면처리한 시험편에서도 표면조도와 접합강도의 관계는 비례적인 분포를 보여주고 있다. 또한 동일 표면처리 조건에서는 하중속도가 증가할수록 강도가 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이는 대부분의 구조재에서 용이하게 관찰되는 강도와 변형률 속도 및 하중속도와의 비례적 관계를 보여주고 있다.<sup>(11)</sup>

Al/PC 접합제의 대부분은 PC 모재와 접착제 사이의 계면에서 파괴가 되었다. 즉, PC와 접착제의 접착성능에 따라 접합강도 특성이 변하는 접착성 파괴(adhesive-failure)가 주를 이루었다.

3.1.2 하중속도의 영향

Fig. 5는 각각의 Al/PC 접합제에 대해 하중속도에 따른 접합강도 분포를 표면처리 방법에 따라 분류한 그래프이다. 하중속도 조건인 CHS=0.05, 0.5, 5, 50mm/min이며, CHS=5mm/min 이하의 속도에서는 모든 표면처리 조건에서 하중속도가 증가함에 따라 접합강도가 증가하는 경향을 보여주고 있다. 그러나, CHS=50mm/min인 경우에는 모든 표면처리 조건에서 유사하게 접합강도가 감소하였는데, 이는 상대적으로 빠른 하중속도로 인해 모재와 접착제간의 기계적 결합이 파괴균열

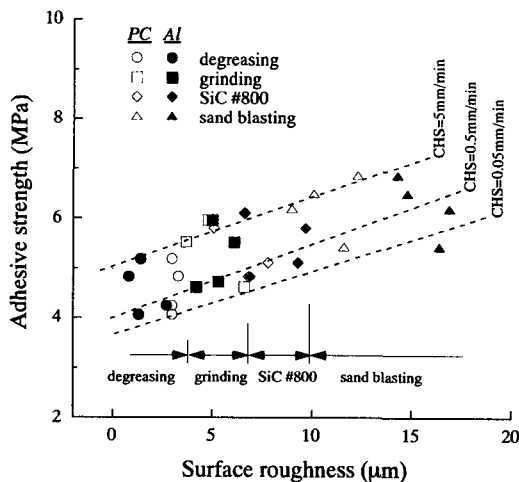


Fig. 4 Adhesive strengths of Al/PC joints according to various surface treatments and loading speeds

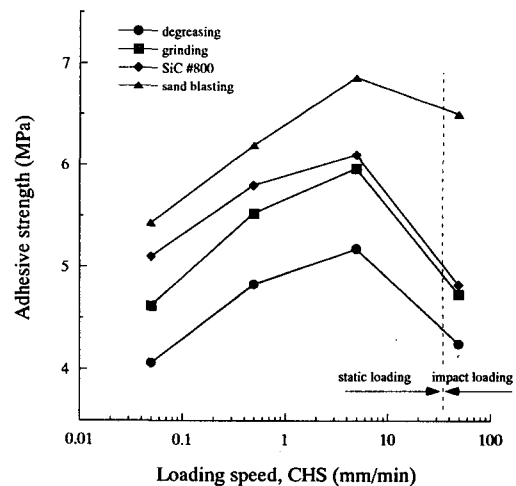


Fig. 5 Adhesive strengths of Al/PC joints as a function of loading speeds

의 진전을 충분히 막지 못한 것으로 보여진다. 이는 주로 구조용 접착제 접합구조물에서 관찰되는 경향으로서, 높은 하중속도 구간에서는 파괴 에너지도 감소하는 것으로 보고되고 있다.<sup>(12)</sup> 본 그래프에서도 표면처리 방법에 따라 표면조도가 증가할수록 강도분포도 증가하는 추세를 보여주고 있다.

### 3.2 PC/PC와 Al/Al 접합재의 강도특성

Fig. 6은 하중속도가 CHS=0.5mm/min인 경우에 동일 모재를 사용한 PC/PC, Al/Al 접합재의 표면조도에 따른 강도분포를 보여주고 있다. 동종 재료인 PC/PC와 Al/Al 접합재에서도 Al/PC 시편의 경우와 동일한 4가지의 표면처리 방법을 적용하였다. 표면처리 방법에 의한 조도변화와 이에 따른 접합강도의 분포도 Al/PC 접합재의 경향과 유사하게 동일 하중속도 조건에서 degreasing, grinding, SiC #800 연마, sand blasting 순으로 접착강도가 큰 것으로 나타났다. Fig. 6(a)의 PC/PC 접합재의 경우에는 접합강도가 가장 큰 sand blasting 시편은 degreasing 및 grinding 시편보다 각각 121%, 58.5% 크게 나타났다. 이는 Al/PC 접합 시편과 유사한 파괴경향으로서, 접합재의 파괴강도특성에 표면조도가 영향을 많이 주고 있음을 보여주고 있다. PC/PC 접합재는 PC와 접착제사이의 계면을 따라 파괴가 진전하는 접착성 파괴

가 주를 이루었다. Fig. 4에서 보여진 것처럼 Al/PC 접합재의 파괴도 PC와 접착제사이의 계면에서 발생하였고, 접합강도의 분포도 3~7.5MPa사이로 서로 유사하다. 이는 이종재료인 Al과 PC의 접착제 접합에서는 PC와 접착제의 결합특성이 Al/PC 접합재의 접합강도특성에 직접적인 영향을 주고 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6(b)의 Al/Al 접합재의 접합강도는 약 15.2~17.4MPa 사이에 분포하였다. 이는 PC/PC 접합강도에 비해 Al/Al의 접합강도가 약 250~500% 정도 증가한 수치이다. 이로 인해 Fig. 4에서 보여진 Al/PC 접합재의 파괴는 결합력이 강한 Al과 접착제 계면보다는 상대적으로 약한 PC와 접착제사이의 계면에서 파괴가 일어난 것으로 보여진다. 이처럼 표면조도가 약간 감소하는데도 불구하고 PC에서보다 Al 계면에서 강한 접착력을 보이는 것은 알루미늄의 제조공정에서 특성 향상을 위해 형성된 산화피막이 기계적 표면처리로 인해 제거되어 접착제와의 기계적 결합과 더불어 추가적인 화학적 결합이 이루어져 응집성 파괴(cohesive-fracture)양상을 보이기 때문인 것으로 사료된다.<sup>(3,6)</sup> 알루미늄은 활성인 금속으로 대기중에서 쉽게 산화되지만 표면에 치밀한 알루미늄(알루미나)을 형성시켜 내부의 산화를 방지한다. 이 산화피막은 내부의 치밀한 피막과 그 위에 수화된 피막이 합해진 산화층으로 되어 있으며, 인공

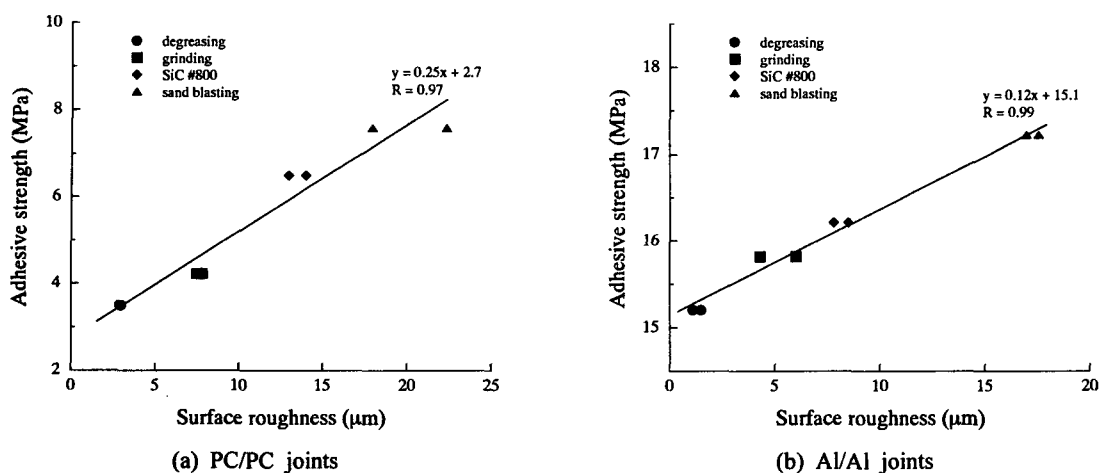


Fig. 6 Adhesive strengths of PC/PC and Al/Al joints at CHS=0.5mm/min according to various surface roughness

적으로 양극산화에 의하여 만들어지고 내식성과 내마모성이 향상된다.

Fig. 7은 하중속도가 CHS=0.5mm/min로 동일한 경우에 표면조도에 따른 접합제의 접합강도를 접합 소재의 종류에 따라 분류한 그래프이다. 표면 처리 방법에 따라 다소 차이는 있으나 평균적으로 Al/PC, PC/PC로 구성된 접합제에 비해 Al/Al 접합제가 약 350% 정도 접합강도가 증가한 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 Al/PC, PC/PC, Al/Al 접합부 접착면의 조도가 모두 동일하다고 할 때, Al의 아연 도금 층이 표면처리에 의해 제거되면서 표면이 활성화되어 접착제와의 결합력이 증가한 것으로 보여진다. 반면 Al/PC, PC/PC 접합제는 구성된 소재가 상이하더라도 모두 PC와 접착제의 계면에서 파괴되므로 서로 유사한 접합강도 분포를 보여주고 있다.

3.3 접착제 접합의 파괴기구

접착제의 접합력은 하나 또는 복합적인 기구 (mechanism)에 의해서 생성되고, 접합부를 파괴시키는 기구도 역시 다양하다. 이러한 접착제 접합제의 파괴기구는 접착성 파괴와 응집성 파괴로 분류된다.<sup>(3,12,13)</sup> 접착성 파괴는 접착제와 모재의 계면에서 발생하는 파괴로서 접합 경계층이 취약하여 발생한다. 이러한 파괴는 주로 부적절한 표면처리방법이나 과정에 의해 야기된다. 반면 응집성 파괴는 접합제가 파괴되었을 경우 접착제

층이 모재의 접착면에 잔존하거나 모재 내부에서 균열이 진전하는 경우를 말한다. Fig. 8은 이러한 접착제 접합제의 여러 파괴양상을 분류한 것이다. 접착제 접합의 이상적인 파괴형태는 응집성 파괴가 접착제 층이나 모재 내부에서 발생하는 것이다. 이러한 응집성 파괴는 접합성 파괴에 비해 접합강도가 크게 나타난다. 그러나, 일반적으로는 두 파괴양상이 혼재하여 나타나게 된다.

3.4 파단양상 및 파면사진

Fig. 9는 본 실험에서 관찰된 접착제 접합부의 대표적 파단양상을 분류 및 설명한 그림으로서,<sup>(3,12,13)</sup> CHS=0.5mm/min인 경우 grinding으로 표면처리한 Al/PC, PC/PC, Al/Al 접합제에 대한 것이다. 이는 전체 길이(110mm)의 시험편에서 접착된 부분만을 발취한 사진으로서, 각각의 상단 및 하단에 표시된 물결형 곡선은 전체 시험편 형상의 생략을 의미한다. Fig. 9(a)는 Al/PC 접합제인 경우로서 단지 접착성 파괴만을 보이며 접착제와 PC 모재사이의 접합계면에서 계면파괴 (interfacial-failure)가 나타나는 경우이다. 이러한 경우는 접합강도가 상대적으로 낮게 나타나게 된다. Fig. 9(b)의 PC/PC 접합제의 경우는 응집성 파괴와 접착성 파괴가 교대로 나타나는 양상을 띄고 있다. 접착제와 PC 접합 계면의 끝단에서 계면파괴가 발생하여 접착제 층을 일부 교차하는 응집성 파괴 단계를 거쳐서 다시 반대편 끝단에서 계면파괴 형태로 균열이 진행된다. 그러나 균

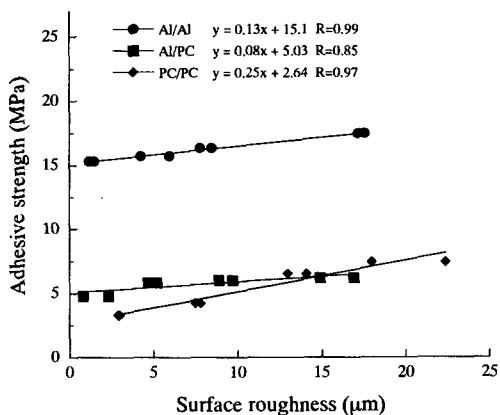


Fig. 7 Adhesive strengths of joints at CHS=0.5 mm/min according to various adherend materials and surface roughness

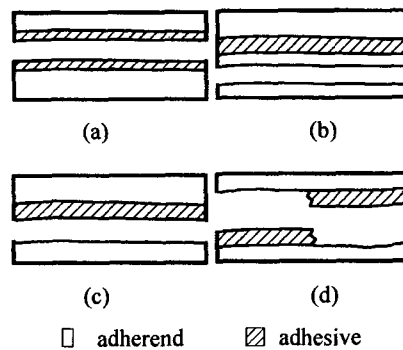


Fig. 8 Fracture types of adhesive bonded joints; (a) cohesive-failure in adhesive, (b) cohesive-failure in adherend, (c) adhesive-failure at interface and (d) partial cohesive-failure

열이 접착층을 교차하는 경로가 극히 제한적이어서 높은 접합강도의 증가를 기대하기는 어렵다. Fig. 9(c)는 Al/Al 접합재의 경우로서 균열이 접착제 층을 교차하는 경로가 PC/PC 접합재의 경우에 비해 상대적으로 증가하였다. 이러한 응집성 파괴는 접합강도의 상대적 증가를 가져오며, 이로 인해 Fig. 7처럼 Al/Al 접합재의 강도가 Al/PC, PC/PC 접합재에 비해 상대적으로 크게 나타났다. 표면처리 방법 중 표면조도가 가장 큰 sand

blasting 접합재의 경우에는 파괴 균열이 접착제 층을 교차하는 경로가 많아지게 되며 접합강도도 증가하게 된다.

이상과 같이 이종재료인 Al/PC 접합재의 강도를 증가시키기 위해서는 취약부분인 접착제와 PC 계면에서의 결합력을 향상시키는 노력이 필요하다. 접착제와 PC사이에서 추가적인 화학결합이 가능한 접착제를 선택하는 것도 손쉬운 한 방법이 될 수 있다.

#### 4. 결론

접착면의 표면처리 및 조도가 Al/PC 에폭시 접착제 접합재의 강도특성에 미치는 영향을 인장전단시험을 통해 평가하고자 하였으며, 하중속도의 영향도 고려하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) Al 및 PC의 접착제 접합재에서는 표면조도가 증가함에 따라 접합강도가 증가하며, PC에 비해 Al과 접착제사이의 결합력이 강한 것은 금속산화막이 연마에 의해 제거됨으로써 표면이 활성화되어 추가적인 결합으로 인해 접합강도가 증가한 데 기인한 것으로 보인다.

(2) Al/PC 접합재의 경우, 하중속도가 증가함에 따라 인장전단강도는 선형적으로 증가하였다. 또한 하중속도가 변하여도 표면처리법에 따른 강도 분포는 유사한 특성을 보였다.

(3) Al/PC, PC/PC, Al/Al 접합재를 동일한 방법으로 표면처리하였을 경우에는 Al/Al 접합재의 접착강도가 상대적으로 우수하였으며, 응집성 파괴와 접합성 파괴가 공존하는 파괴양상을 보여주었다.

#### 후 기

이 논문은 2001년도 전북대학교의 지원 연구비에 의하여 연구되었음.

#### 참고문헌

(1) Dorn, L. and Salem, N., 1999, "Plastic adhesive joints," *Kunststoffe German Plastic*, Vol. 83, pp.

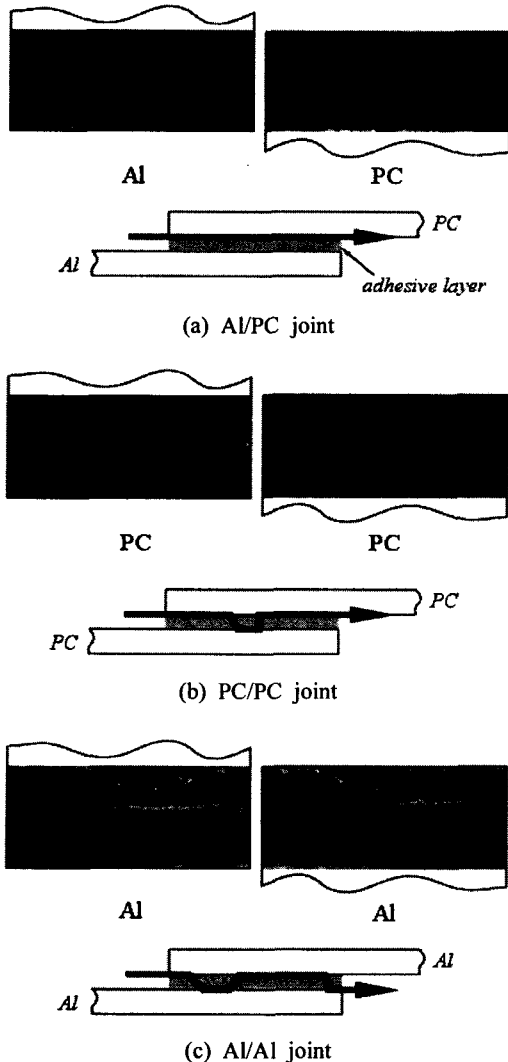


Fig. 9 Fracture surfaces of Al/PC, PC/PC and Al/Al joints treated with grinding

- 19~21.
- (2) Armstrong, K. B., 1996, "Long-term Durability in Water of Aluminium Alloy Adhesive Joints Bonded with Epoxy Adhesives," *Int. J. Adhesion and Adhesives*, Vol. 17, pp. 89~105.
- (3) Zhongsen Li, Jae-Kyoo Lim and Yon-Jig Kim, 2001, "Stress Distribution and Strength Evaluation of Adhesive Bonded Single-Lap Joints," *Journal of Korean Welding Society*, Vol. 19, No. 3, pp. 91~96.
- (4) Dorn, L. and Weiping, L., 1994, "Stress and Deformation Analysis of Single Lap Plastic-Steel Adhesive-bonded Joints," *Welding and Cutting*, Vol. 3, pp. 42~44.
- (5) Belingardi, G., Goglio L. and Tarditi A., 2002, "Investigating the Effect of Spew and Chamfer Size on the Stresses in Metal/Plastics Adhesive Joints," *Int. J. Adhesion and Adhesives*, Vol. 22, pp. 273~282.
- (6) Sorensen, B. F., 2002, "Cohesive Law and Notch Sensitivity of Adhesive Joints," *Acta Materialia*, Vol. 50, pp. 1053~1061.
- (7) N.Y. Chung and J.M. Jang, 1997, "Fracture Criterion of Mixed Mode in Adhesively Bonded Joints of Al/Steel Dissimilar Materials," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 21, No. 8, pp. 1322~1331.
- (8) Wylde, J. W. and Spelt J. K., 1998, "Measurement of Adhesive Joint Fracture Properties as a function of Environmental Degradation," *Int. J. Adhesion and Adhesives*, Vol. 18, pp. 237~246.
- (9) ASTM standard D1002-94, 1994, "Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 15.06, pp. 45~48.
- (10) ASTM standard D2295-96, 1996, "Standard Test Method for Strength Properties of Adhesives in Shear by Tension Loading at Elevated Temperatures (Metal-to-Metal)," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 15.06, pp. 144~146.
- (11) Seo D. W. and Lim J. K., 2002, "Effects of Strain Rate and Temperature on Fracture Strength of Ceramic/Metal Joint Brazed with Ti-Ag-Cu Alloy," *KSME International Journal*, Vol. 16, No. 9, pp. 1078~1083.
- (12) Jae-Kyoo Lim, Je-Hoon Shin, Han-Ju Park, T. Shoji and H. Takeda, 2001, "A Study on Deformation and Strength of High-Strength Polymer Composites using Automobiles," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 25, No. 7, pp. 1082~1088.
- (13) Jun-Hee Song, Hee-Jae Lee and Jae-Kyoo Lim, 2002, "Effect of Temperature and Immersion Time on the Environmental Adhesive Strength of Adhesively Bonded Joints of Rooled Steel Sheet," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 26, No. 12, pp. 2662~2669.