

# 자동차용 구조접착접합이음의 응력해석과 강도평가에 관한 연구

## — 알루미늄 합금 단순접치기이음의 접착강도 —

유영철\* · 오승규\*\* · 이 원\*\*\*  
(1997년 6월 13일 접수)

### Stress Analysis and Strength Evaluation of Structural Adhesive Joints in Automobiles

#### — Bond Strength for Adhesive-Bonded Aluminum Alloy Single-Lap Joints —

Yeong-Chul Yu, Seung-Kyu Oh and Won Yi

**Key Words :** Adhesive-Bonded Single-Lap Joints(단순접치기 접착이음), Lap Length(랩길이), Adherend Thickness(피착재 두께), Adhesive Thickness(접착층 두께), Breaking Strength(파단강도), Modified Joint Factor(수정된 이음계수)

#### Abstract

Static tensile tests using adhesive-bonded single-lap joints of aluminum alloy were conducted to investigate the effect of geometric factor, overlap length, adherend thickness, adhesive thickness and material composition of adherend/adhesive on the strength of adhesive joint. The average applied shear stress at joint fracture decreased with increasing lap length. However increasing the adherend thickness resulted in a higher joint strength. Higher yield strength of adherend and lower elastic modulus of adhesive is advantageous to the adhesive joint. Newly proposed modified joint factor could be well evaluated the influence of lap length, adherend thickness and adhesive thickness on the bond strength for adhesive joints.

#### 1. 서 론

최근 자동차산업에서는 자동차의 출력향상과 대기오염 저감을 위하여 많은 연구가 이루어지고 있으며, 특히 자동차의 배기가스를 줄이고, 연비를 높이며, 폐차시에 발생하는 폐기물을 줄이는데 유리한 수단으로서 차체 경량화가 자동차 제조업계의 공통적인 연구 목표가 되고 있다. 차체의 무게를

줄이는 가장 직접적인 방법은 철강을 대체하여 알루미늄, 플라스틱 등의 경량재의 사용량을 늘리는 것이다. 알루미늄재 자동차는 철강재 자동차에 비하여 무게가 50%정도 가볍고, 하중에 견디는 강성과 내식성이 우수하며, 안전성이 높고 소음이 적을 뿐만 아니라 유지보수가 용이한 장점을 갖고 있음에도 불구하고, 경제성에서 경쟁력이 떨어져 일부 고급차종 및 스포츠카에만 제한적으로 사용되고 있다. 따라서 이러한 알루미늄 소재를 양산차종에까지 확대 적용하기 위해서는 제조원가를 낮춤과 동시에 판재성형과 접합기술의 고도화가 요청된다. 알루미늄 합금의 스폿용접성이 강판에 비하여 취약

\*회원, 숭실대학교 대학원  
\*\*회원, 성우정공(주)  
\*\*\*회원, 숭실대학교 기계공학과

하다는 사실은 이미 널리 알려져 있으며, 접착접합이 이의 대체접합법으로서 유망하게 거론되어 그 적용기술이 활발히 연구되고 있다.<sup>(1,2)</sup> 실제로 자동차 차체의 접합에 있어서 접착접합을 병용함으로써 차체강성이 향상되었다는 보고도 있었다.<sup>(3)</sup>

그러나 접착접합강도는 물성적 인자, 화학적 인자, 역학적 인자, 사용환경 등이 상호작용하여 결정되는 복잡한 문제이며, 특히 파손, 파괴가 발생하는 접합부는 구조적 불연속부가 되어서 해석상 어려움이 많다. 구조접착이음의 적용을 확대하기 위해서는 접착이음의 신뢰성을 향상시켜야 하며, 이를 위해서 이음강도 및 파괴에 대한 정성적·정량적 파악이 선행되어야 한다. 이러한 노력의 일환으로 접착접합의 대표적 이음형태인 단순결치기이음의 변형 및 강도에 관하여 여러 검토가 있었다. 여기에는 해석적인 방법<sup>(4-8)</sup>에 의한 연구, 유한요소법<sup>(9-11)</sup>이나, 경계요소법<sup>(12-14)</sup>과 같은 수치해석적인 방법에 의한 연구 등이 있으나, 현재까지는 접착강도 특성에 대한 여러 평가법이 제안되고 있는 단계이고 앞으로 통일적 강도평가법의 정립이 필요하다.

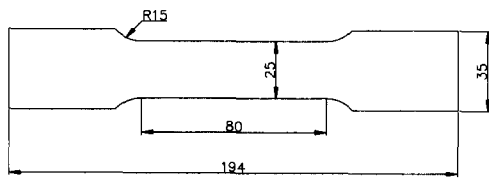


Fig. 1 Dimensions of tensile specimens.

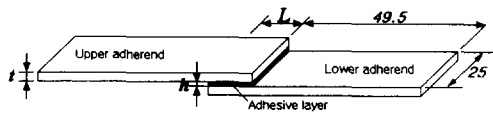


Fig. 2 Configurations and dimensions of single-lap adhesive joints.

한편 Debruyne,<sup>(15)</sup> Heywood,<sup>(16)</sup> Groth<sup>(17)</sup> 등은 접착이음의 정적강도와 피로강도를  $\sqrt{t/l}$ 로 정의되는 이음계수(joint factor)에 의하여 정리할 수 있음을 보였다. 여기서  $t$ 는 피착재 두께,  $l$ 은 랩길이이다. 그러나 저자들이 이미 지적한 바와 같이<sup>(18,19)</sup> 접착강도에 대한 접착층 두께의 영향도 무시할 수 없으므로 이를 고려한 새로운 이음계수의 도입이 필요하다.

본 연구에서는 단순결치기 접착이음의 강도평가를 확립하기 위한 기초적 실험데이터의 확보를 위하여, 알루미늄재 접착이음에 대하여 물성파라미터로서 알루미늄 피착재 및 접착제의 종류를 변경하고, 형상파라미터로서 랩길이, 피착재 두께, 접착층 두께를 달리하여 인장-전단강도시험을 수행하였다. 또한 랩길이, 피착재 두께, 접착층 두께를 함께 고려한 수정된 이음계수(modified joint factor)를 제안하고, 이에 의하여 각 알루미늄 피착재와 접착제의 기계적 성질 및 이들의 조합성질에 따른 접착강도특성을 평가하였다.

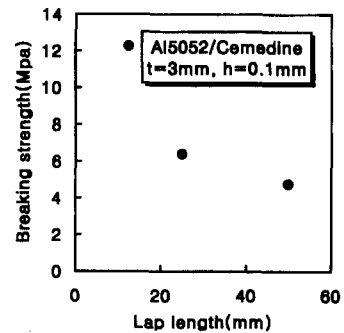


Fig. 3 Effect of the lap length on the breaking strength of Al5052/Cemedine bonded joint, adherend thickness : 3 mm, adhesive thickness : 0.1 mm.

Table 1 Mechanical properties of the adherend and the adhesive.

| Properties<br>Materials | Young's modulus<br>(GPa) | Poission's ratio | Yield strength<br>(MPa) | Tensile strength<br>(MPa) |
|-------------------------|--------------------------|------------------|-------------------------|---------------------------|
| Al 5052                 | 65.47                    | 0.34             | 168.9                   | 224.8                     |
| Al 6061                 | 67.29                    | 0.37             | 238.2                   | 288.0                     |
| Cemedine 1500           | 1.16                     | 0.39             | 18.5                    | 37.6                      |
| Epoxy                   | 2.07                     | 0.37             | 29.0                    | 46.3                      |

## 2. 시험편

### 2.1 피착재 및 접착제의 기계적 성질

접착이음의 피착재로는 피착재 항복강도에 따른 접착강도를 비교·분석하기 위하여 판재성형에 주로 이용되는 알루미늄 5052와 자동차 차체용 판재에 적절한 재질특성과 성형성 및 내식성을 갖고 있는 알루미늄 6061을 사용하였다. 접착제로는 접착제의 종류에 따라서 응집력에 차이가 있는 점을 감안하여 이액형 상온경화 에폭시수지(epoxy resin)와 Cemedine 1500의 두 종류를 검토하였다. 피착재와 접착제의 기계적 성질을 조사하기 위하여 Fig. 1과 같은 시험편을 가공하여 인장시험을 실시하였으며, 그 결과는 Table 1과 같다.

### 2.2 접착시험편 제작순서 및 실험방법

Fig. 2에 실험에 사용한 접착이음 시험편의 형상 및 치수를 나타내었다. 시험편의 제작순서는 먼저 알루미늄 판재를 치수에 따라 밀링가공한 후, 접착면을 에머리페이퍼 #600으로 연마하고 아세톤으로 탈지 세정하였다. 이 때 판재의 압연방향과 시험편 인장방향을 일치시킨다. 여기에 접착제를 고르게 도포하고, 플레이트와 클립을 사용하여 시험편 전면에 고르게 가압하여 전기로내에서 110℃로 1시간 동안 경화시킨 후에 상온까지 냉각하고, 공기중에서 최소 10일 이상 방치한 후 사용하였다. 이 때 접

착층 두께는 테프론 테이프를 사용하여 원하는 두께가 되도록 하였다.

단순겹치기 접착이음의 접착강도를 측정하기 위하여 인장시험을 실시하였다. 단순겹치기이음의 하중작용 특성상 인장하중을 작용시키더라도 파단이 일어나는 접착층 중앙부는 인장-전단 하중상태가 된다. 실험에는 용량 150 kN의 인장시험기를 사용하였으며, 크로스헤드 이동속도는 0.1 mm/min.으로 일정하게 유지하였다. 또한, 시험편의 파단강도는 파단하중을 접착단면적(랩길이×시험편 폭)으로 나눈값으로 하였고, 각 조건에 대하여 3회 반복실시하여 그 평균값을 취하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

두종류의 피착재(알루미늄 5052, 6061), 두종류의 접착제(에폭시수지, Cemedine 1500), 세단계의 랩길이(12.5, 25, 50 mm), 세단계의 피착재 두께(1, 2, 3 또는 3, 5, 10 mm), 세단계의 접착층 두께(0.1, 0.2, 0.5 mm)에 대하여 인장시험을 실시하여 구한 파단강도를 정리하여 Tables 2, 3, 4에 나타내었다.

### 3.1 랩길이의 영향

단순겹치기 접착이음의 랩길이가 이음 파단강도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 그 대표적인 경우의 결과를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. 피착재

Table 2 Breaking strength for A 16061/epoxy bonded joint.

| Material of adherend | Material of adhesive | Lap length (mm) | Adherend thickness (mm) | Adhesive thickness (mm) | Breaking strength (MPa) |
|----------------------|----------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Al 6061              | Epoxy                | 12.5            | 3                       | 0.1                     | 10.51                   |
|                      |                      |                 | 5                       |                         | 16.09                   |
|                      |                      |                 | 10                      |                         | 19.04                   |
|                      |                      | 25.0            | 3                       |                         | 6.07                    |
|                      |                      |                 | 5                       |                         | 8.20                    |
|                      |                      |                 | 10                      |                         | 10.36                   |
|                      |                      | 50.0            | 3                       |                         | 3.96                    |
|                      |                      |                 | 5                       |                         | 3.98                    |
|                      |                      |                 | 10                      |                         | 7.69                    |

**Table 3** Breaking strength for A 15052/Cemedine 1500 bonded joint.

| Material of adherend | Material of adhesive | Lap length (mm) | Adherend thickness (mm) | Adhesive thickness (mm) | Breaking strength (MPa) |
|----------------------|----------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Al 5052              | Cemedine 1500        | 12.5            | 1                       | 0.1                     | 7.65                    |
|                      |                      |                 | 2                       |                         | 9.09                    |
|                      |                      |                 | 3                       |                         | 12.26                   |
|                      |                      |                 | 1                       | 0.2                     | 10.14                   |
|                      |                      |                 | 2                       |                         | 12.20                   |
|                      |                      |                 | 3                       |                         | 15.46                   |
|                      |                      |                 | 1                       | 0.5                     | 5.95                    |
|                      |                      |                 | 2                       |                         | 8.16                    |
|                      |                      |                 | 3                       |                         | 11.99                   |
|                      |                      | 25.0            | 0.1                     | 1                       | 5.30                    |
|                      |                      |                 |                         | 2                       | 5.98                    |
|                      |                      |                 |                         | 3                       | 6.38                    |
|                      |                      |                 | 0.2                     | 1                       | 6.22                    |
|                      |                      |                 |                         | 2                       | 7.44                    |
|                      |                      |                 |                         | 3                       | 8.59                    |
|                      |                      |                 | 0.5                     | 1                       | 5.63                    |
|                      |                      |                 |                         | 2                       | 6.91                    |
|                      |                      |                 |                         | 3                       | 7.71                    |
|                      |                      | 50.0            | 0.1                     | 1                       | 3.34                    |
|                      |                      |                 |                         | 2                       | 3.64                    |
|                      |                      |                 |                         | 3                       | 4.76                    |
|                      |                      |                 | 0.2                     | 1                       | 3.49                    |
|                      |                      |                 |                         | 2                       | 5.06                    |
|                      |                      |                 |                         | 3                       | 7.43                    |
|                      |                      |                 | 0.5                     | 1                       | 3.46                    |
|                      |                      |                 |                         | 2                       | 4.98                    |
|                      |                      |                 |                         | 3                       | 6.98                    |

두께가 3 mm인 알루미늄 5052/Cemedine 1500 접착이음과 피착재 두께가 5 mm인 알루미늄 6061/에폭시 접착이음에 있어서 서로 상이한 경우임에도 불구하고 파단강도가 랩길이에 반비례하는 경향은

일치하고 있으며, 이는 다른 경우에 있어서도 마찬가지였다. 따라서 피착재의 두께, 피착재와 접착제의 조합 등에 관계없이 파단강도는 랩길이에 반비례한다고 할 수 있다. 이와 같은 고찰은 파단강도

**Table 4** Breaking strength for Al 5052/epoxy bonded joint.

| Material of adherend | Material of adhesive | Lap length (mm) | Adherend thickness (mm) | Adhesive thickness (mm) | Breaking strength (MPa) |
|----------------------|----------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Al 5052              | Epoxy                | 12.5            | 1                       | 0.1                     | 4.16                    |
|                      |                      |                 | 2                       |                         | 4.80                    |
|                      |                      |                 | 3                       |                         | 5.76                    |
|                      |                      |                 | 1                       | 0.2                     | 4.80                    |
|                      |                      |                 | 2                       |                         | 5.60                    |
|                      |                      |                 | 3                       |                         | 6.24                    |
|                      |                      |                 | 1                       | 0.5                     | 4.10                    |
|                      |                      |                 | 2                       |                         | 4.74                    |
|                      |                      |                 | 3                       |                         | 5.50                    |
|                      |                      | 25.0            | 0.1                     | 1                       | 3.23                    |
|                      |                      |                 |                         | 2                       | 3.44                    |
|                      |                      |                 |                         | 3                       | 3.84                    |
|                      |                      |                 | 0.2                     | 1                       | 4.51                    |
|                      |                      |                 |                         | 2                       | 4.82                    |
|                      |                      |                 |                         | 3                       | 5.74                    |
|                      |                      |                 | 0.5                     | 1                       | 3.47                    |
|                      |                      |                 |                         | 2                       | 4.64                    |
|                      |                      |                 |                         | 3                       | 5.12                    |
|                      |                      | 50.0            | 0.1                     | 1                       | 2.46                    |
|                      |                      |                 |                         | 2                       | 2.98                    |
|                      |                      |                 |                         | 3                       | 3.17                    |
|                      |                      |                 | 0.2                     | 1                       | 3.21                    |
|                      |                      |                 |                         | 2                       | 3.74                    |
|                      |                      |                 |                         | 3                       | 4.37                    |
| 0.5                  | 1                    |                 | 2.63                    |                         |                         |
|                      | 2                    |                 | 3.13                    |                         |                         |
|                      | 3                    |                 | 3.56                    |                         |                         |

로서 접착면적을 고려한 이음과괴시의 평균 전단응력을 취한 결과이나, 랩단부 근방의 전단응력 집중도가 랩길이의 증가에 따라 커지는 Goland 등<sup>(4)</sup>의 연구결과와도 잘 일치하고 있다. 즉 랩길이가 길어짐에 따라 응력집중도가 증가하고 이로 인하여 낮

은 강도에서 파단되는 것으로 파악된다. 랩길이에 대한 이와 같은 실험결과는 접착이음의 설계시 랩길이를 증가시키는 것이 강도적인 관점에서 유리하지 않다는 사실을 시사한다. 그러나 오히려 설계자가 파단강도치만에 의존하여 지나치게 짧은 랩길이

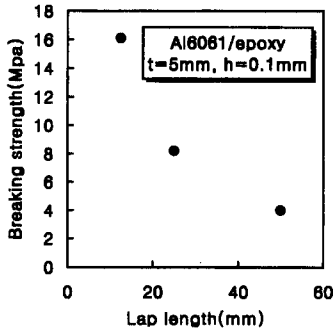


Fig. 4 Effect of the lap length on the breaking strength of A16061/epoxy bonded joint, adherend thickness : 5 mm, adhesive thickness : 0.1 mm.

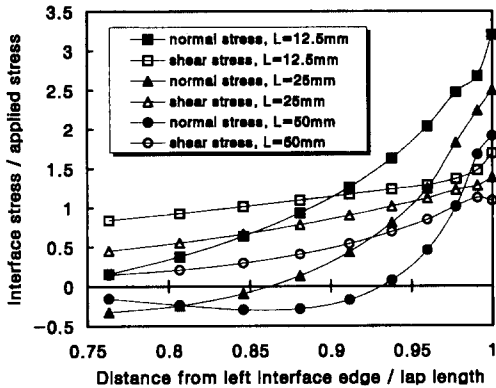


Fig. 5 Normal and shear stress distributions on the interface of aluminum/epoxy single-lap joint from finite element analysis.

를 선택한다면 랩중양부에 과도한 응력이 발생되어 기대하던 효과를 얻지 못할 수도 있으므로 주의해야 한다.

Fig. 5는 피착재가 알루미늄, 접착재가 에폭시인 단순겹치기이음의 FEM 응력해석결과이다. 랩길이가 각각 12.5, 25, 50 mm일 때 피착재와 접착층 사이의 계면에 대한 수직응력과 전단응력의 분포를 랩길이에 무차원화시킨 거리에 따라 나타내었다. 해석에는 범용 구조해석 프로그램인 NISA II를 사용하였으며, 피착재의 두께는 3 mm, 접착층의 두께는 0.1 mm이고, 2차원 평면변형률상태에서 전체 요소수를 840개로 하였다. 수직응력과 전단응력의 양측 모두에서 랩단부 근방의 응력 집중도에 대응하는 그래프의 기울기는 랩길이가 길수록 큰 값을 나타내고, 평균응력과 최대응력은 랩길이가 짧은 경우에 크게 나타났다. 실험결과와 FEM 해석

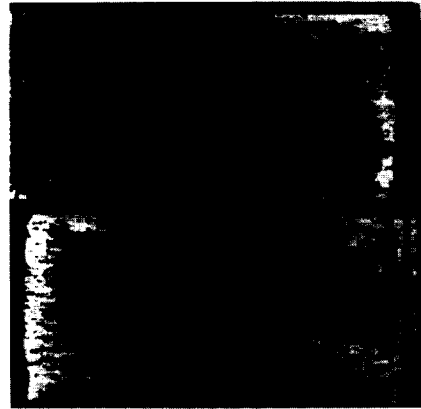


Fig. 6 Photograph of typical cohesive fracture surface.

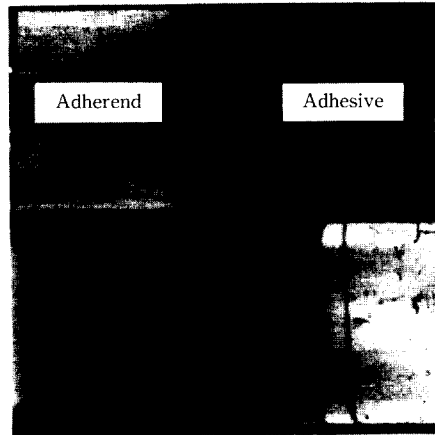


Fig. 7 Photograph of typical cohesive fracture surface.

결과를 종합하여 보면 랩길이에 따라서 랩단부 근방의 응력상태가 변화하고 이것이 접착강도를 결정하는 중요한 인자가 되는 것으로 판단된다.

단순겹치기 접착이음의 인장시험에서 이음의 파단이 진행되는 과정을 관찰한 결과 랩길이가 가장 짧은 12.5 mm의 경우가 피착재의 굽힘량이 가장 컸으며 이러한 굽힘에 의하여 랩단부에 박리가 발생하고 하중이 증가함에 따라 선단부의 개구량도 증가하여 서서히 파단되었다. 따라서 랩길이가 짧은 경우에는 계면에 수직인 응력, 즉 박리응력이 파괴에 중요한 역할을 하며 따라서 응집파괴가 발생하는 것으로 사료된다. 한편, 50 mm의 경우는 피착재의 굽힘이 거의 없이 상하 피착재의 직접적인 분리파단이 이루어지는 것을 관찰할 수 있었다.

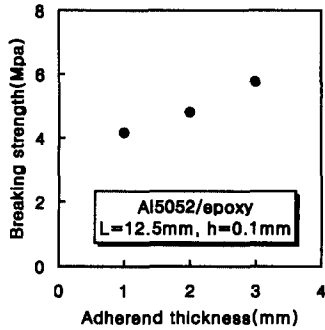


Fig. 8 Effect of the adherend thickness on the breaking strength of A15052/epoxy bonded joint, lap length : 12.5 mm, adhesive thickness : 0.1 mm.

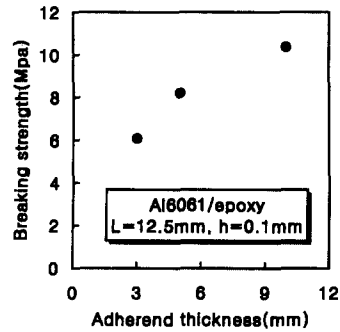


Fig. 9 Effect of the adherend thickness on the breaking strength of A16061/epoxy bonded joint, lap length : 12.5 mm, adhesive thickness : 0.1 mm.

그렇다면 이 경우에는 수직응력보다는 전단응력이 강하게 관계하는 접착층내 계면파괴가 이루어지는 것으로 보여진다. Fig. 6과 Fig. 7은 응집파괴와 계면파괴가 일어난 파면의 사진으로 앞서의 고찰을 뒷받침하고 있다. 이음의 랩길이가 짧은 경우에는 접착면에서 마치 접착층이 뜯겨져 나간 듯한 응집 파면이 관찰되었으며, 랩길이가 긴 경우에는 파면이 매끄러운 계면파면이 관찰되었다. 특히 계면파괴는 알루미늄 피착재와 접착제의 계면단에서 발생한 박리가 접착층을 따라 빠르게 진전하면서 일어나는 것으로 관찰되었다.

### 3.2 피착재 두께의 영향

Fig. 8과 Fig. 9는 각각 피착재가 알루미늄 5052와 6061일 때, 피착재 두께가 접착이음 파단강도에 미치는 영향을 나타낸 그래프이다. 그래프로부터 접착이음의 파단강도는 피착재 두께에 따라 달라지며 대체적으로 비례관계를 이루는 것으로 생각된다. 여기서는 편의상 에폭시 접착제의 경우만 나타내었지만 Cemedine 1500의 경우 및 다른 랩길이에 서도 마찬가지로 경향을 나타내었다. 접착이음의 파단강도  $\propto$ (피착재 두께) $^\alpha$ ( $\alpha=1, 1/2$ )으로 나타낼 수 있으며, 여기서 지수  $\alpha$ 의 값은 다른 물성 또는 형상파라미터와의 관계를 생각해야 하므로 쉽게 단일수치로 결정하는 것은 곤란하다.

실험결과에서 피착재 두께가 얇으면 파단강도는 저하하는 것으로 나타났다. 이는 얇은 피착재의 경우 하중에 의한 피착재의 변형량이 커지므로 피착재/접착층 계면부에 응력이 집중되어 파단강도가 저하하는 반면에 두꺼운 피착재의 경우에는 피착재

탄성계수의 두께 의존성<sup>(20)</sup>에 따라 종탄성계수의 증가로 이음 파단강도가 커졌기 때문으로 보인다. 시험편의 파면관찰 결과도 이와 같은 고찰을 뒷받침한다. 즉, 피착재가 얇을 때는 시험편 전체의 변형에 따른 응집파괴면을 보이다가, 두꺼워지면 전단력에 의한 계면파괴의 양상을 나타내었다.

특히 피착재 두께가 1 mm이고, 랩길이가 50 mm인 이음의 경우, 접합부에서 정상적으로 분리 파단이 이루어지지 않고 피착재 스스로가 인장 파단되는 경우도 관찰되었다. 앞으로 에너지 절감을 위한 경량화를 목적으로 박판화가 기대되는 자동차 차체 판넬에 알루미늄 접착이음을 적용하는 데는 이와 같은 특성을 고려해야만 할 것으로 생각된다.

### 3.3 접착층 두께의 영향

Fig. 10과 Fig. 11의 그래프는 두께 2 mm의 알루미늄 5052 접착이음의 파단강도를 접착층 두께에 따라서 나타낸 것으로 접착제로는 Cemedine 1500과 에폭시를 각각 적용하여 비교하여 보았다. 그림에서 ▲, △, ■ 기호는 각각 랩길이 12.5, 25, 50 mm를 나타낸다. 실험결과에서 접착층 두께가 0.1 mm에서 0.2 mm로 증가하면 파단강도 값도 증가하였으며, 그 이상 접착층 두께가 증가하면 파단강도 값이 감소하는 것으로 나타났다. 즉 접착길이나 접착제의 종류에 관계없이 접착층 두께 0.2 mm에서 파단강도는 최대치가 된다. 이와 같은 실험결과는 Niwa,<sup>(21)</sup> Tagami<sup>(22)</sup> 등에 의한 강판에 대한 실험 및 해석결과와도 유사한 경향을 보이고 있다. 접착층 두께 0.2 mm에서 1 mm 사이의 범위에서는 접착층 두께에 따라 파단강도가 감소하는 것이

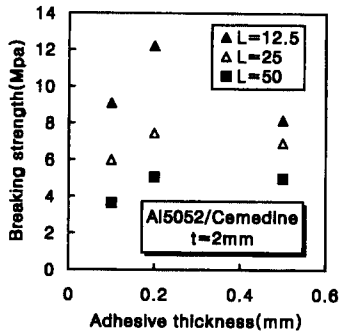


Fig. 10 Effect of the adhesive thickness on the breaking strength of Al5052/Cemedine bonded joint, adherend thickness : 2 mm.

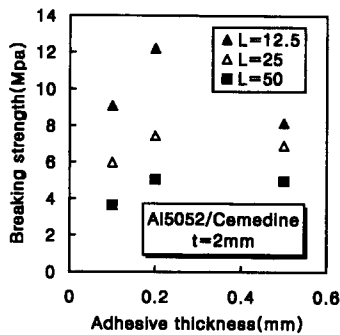


Fig. 11 Effect of the adhesive thickness on the breaking strength of Al5052/epoxy bonded joint, adherend thickness : 2 mm.

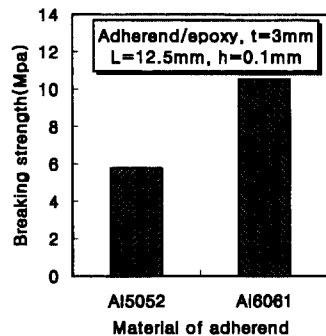


Fig. 12 Relationship between the breaking strength and material of adherend adhesive : epoxy, lap length : 12.5mm, adherend thickness : 3 mm, adhesive thickness : 0.1 mm.

밝혀져 있으며 그 원인의 한가지로는 접착층이 두꺼울수록 경화시의 부분적 온도차에 의한 내부응력의 불균형이 커지는 것을 생각할 수 있다. 그러나 실용적으로 널리 사용되는 0.2 mm미만의 경우는

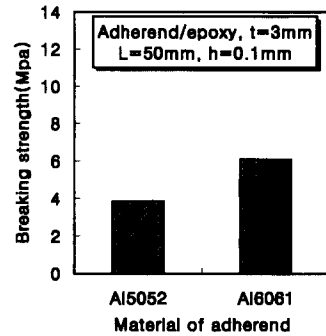


Fig. 13 Relationship between the breaking strength and material of adherend adhesive : epoxy, lap length : 50mm, adherend thickness : 3 mm, adhesive thickness : 0.1 mm.

아직 충분한 이론 및 실험적 검토가 부족한 실정이다. 추후 이 부분에 대한 정밀한 실험 및 평가가 이루어져야 할 것으로 보인다.

### 3.4 피착재 종류의 영향

본 연구에서는 피착재로서 항복강도가 서로 다른 두 종류의 알루미늄 합금을 사용하였다. 랩길이가 12.5 mm일 때 두 알루미늄 합금의 파단 접착강도를 비교하여 Fig. 12에 나타내었다. 알루미늄 6061의 접착강도가 같은 조건의 알루미늄 5052보다 매우 큰 것으로 나타났다. 이와 같은 경향은 그 차이가 줄어들기는 했지만 Fig. 13의 랩길이 50 mm의 경우에도 마찬가지였다. Table 1의 피착재의 기계적 성질로부터 알 수 있듯이 알루미늄 6061은 알루미늄 5052와 비교하여 탄성계수는 거의 같지만 항복강도에서는 1.4배가 된다. 이러한 항복강도의 차이가 접착강도에 영향을 준 것이라 생각된다. Sawa 등<sup>(23)</sup>은 알루미늄 7075와 알루미늄 5052재 접착이음에 대한 탄소성 유한요소해석으로부터 이음강도를 결정하는 주요한 인자의 하나로서 피착재의 항복강도를 들었다. 즉 낮은 항복강도를 갖는 피착재는 하중의 증가에 따라 빨리 항복강도에 도달하고 굽힘량이 커져서 낮은 하중에서 파단되는 것으로 사료된다.

### 3.5 접착제 종류의 영향

접착이음강도에 있어서는 피착재의 성질뿐만 아니라 접착제의 종류 또한 중요하다. 본 연구에서 사용한 두종류의 접착제에 대하여 접착강도를 비교하기 위하여 그 대표적인 경우를 각각 Fig. 14,



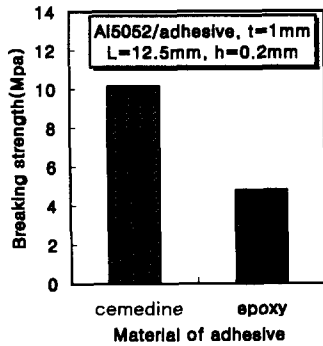


Fig. 14 Relationship between the breaking strength and material of adherend adhesive : A15052, lap length : 12.5 mm, adherend thickness : 1 mm, adhesive thickness : 0.2 mm.

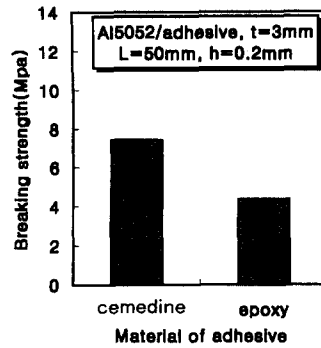


Fig. 15 Relationship between the breaking strength and material of adherend adhesive : A15052, lap length : 50mm, adherend thickness : 3 mm adhesive thickness : 0.2mm.

Fig. 15에 나타내었다. 같은 에폭시계 접착제임에도 불구하고 Cemedine 1500의 접착성능이 에폭시 수지에 비하여 월등히 우수하였다. 이는 각 접착제의 접착성능에도 차이가 있을 수 있겠지만, Table 1의 접착제의 기계적 성질로부터 설명이 가능하다. 즉 항복강도와 탄성계수에서 Cemedine 1500이 작은 값을 갖지만, 낮은 항복강도보다는 낮은 탄성계수로부터 유추되는 상대적으로 적은 취성의 영향으로 높은 접착강도를 유지하는 것으로 파악된다. 따라서 접착제의 경우에는 피착재의 경우와는 달리 항복강도가 아닌 탄성계수가 이음강도의 지배적 인자가 됨을 알 수 있다.

#### 4. 이음계수에 의한 접착이음의 강도평가

이상에서 고찰한 바와 같이 단순접치기 접착이음의 이음강도는 랩길이, 피착재 두께, 접착층 두께와 각각 일정한 상관관계를 갖고 있으며, 이들의 상호작용에 의하여 최종적으로 결정된다. 따라서 Fig. 16과 같이 알루미늄/접착제의 세가지 조합, 즉 알루미늄 5052/Cemedine 1500, 알루미늄 5052/epoxy, 알루미늄 6061/epoxy의 접착강도를 피착재 두께  $t$ 와 랩길이  $l$ 에 의해 결정되는 이음계수  $\sqrt{l}/l$ 에 대하여 정리하여 하나의 그래프에 나타내어 보았다. 그래프로부터 이음계수와 파단강도간에는 대체적인 선형관계가 성립한다고 할 수 있지만 그 산포도가 크며, 또한 각 피착재/접착제의 조합에 따른 강도특성을 명확히 분리하는 것이 곤란하다. 이것은 3.3절의 결과와 같이 접착층 두께가 접착강도에 영향이 있음에도 불구하고 이음계수에서

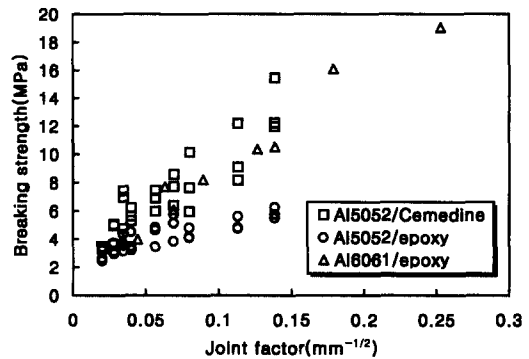


Fig. 16 Evaluation of the breaking strength of aluminum single-lap joints by joint factor.

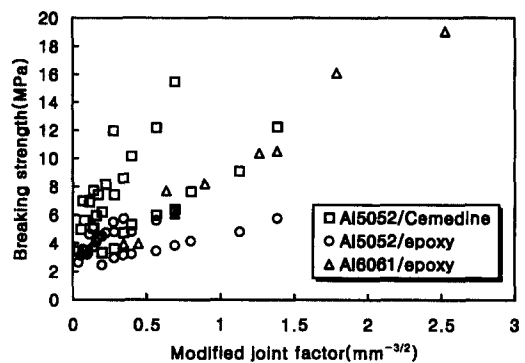


Fig. 17 Evaluation of the breaking strength of aluminum single-lap joints by modified joint factor.

는 이를 고려하지 않고 있기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 접착층 두께  $h$ 를 포함하는 수정된 이음계수  $\sqrt{l}/(l \cdot h)$ 를 제안하고 이에 따라 접착강도

실험결과를 정리하여 Fig. 17에 나타내었다. 수정된 이음계수에 의한 이음계수치가 작은 영역에서는 데이터가 복잡하게 모여 있으나 약 0.4를 넘으면서 각 피착재/접착재의 강도특성이 명확하게 구분되어 나타나고 있다. 본 실험결과에서는 알루미늄 5052/Cemedine 1500의 접착특성이 가장 우수하며, 알루미늄 5052/epoxy가 가장 취약한 것으로 나타났다. 따라서 단순접치기 접착이음에 있어서 접착강도는 랩길이와 피착재 두께, 접착층 두께를 함께 고려한 수정된 이음계수에 의하여 정리하는 것이 타당할 것으로 생각된다.

## 5. 결 론

피착재 및 접착제의 종류, 랩길이, 피착재 두께, 접착층 두께를 달리한 알루미늄재 단순접치기 접착이음 시험편에 대하여 정적인장시험을 실시하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 인장시험의 결과, 알루미늄 합금재 단순접치기 접착이음의 접착 파단강도는 랩길이에 반비례하였다. 이는 랩단부 근방의 전단응력 집중도를 파라미터로 하는 Goland 등의 이론해석 결과와 잘 일치하며, FEM 해석에서도 랩단부 근방의 응력집중도에 해당하는 응력선도의 기울기는 랩길이가 길수록 크게 나타나 이와 같은 실험결과를 뒷받침하고 있다. 또한 피착재의 변형과 파면관찰로부터, 랩길이가 짧은 경우에는 랩단부로부터 박리응력에 의한 응집파괴가 일어나고 또한 상대적으로 랩중양부의 과도한 응력부담을 주의해야 하며, 랩길이가 긴 경우에는 전단응력에 의한 계면파괴 양상이 나타나고 강도적 관점에서의 불리함을 감수해야만 하므로, 접착이음의 설계에 있어서는 이러한 사실을 감안해야 한다.

(2) 피착재 두께와 파단강도 사이에는 비례관계가 성립하였다. 얇은 피착재의 경우 두꺼운 피착재보다 피착재 자체의 변형량이 커서 계면단부로부터의 파괴가 쉽게 일어나는 것으로 생각된다. 이러한 성질은 피착재 두께 감소를 통한 자동차 차체의 경량화에는 저해요인이 되므로, 최대 접착강도를 발휘할 수 있는 피착재의 최소두께를 찾아내는 작업이 필요하다.

(3) 접착층 두께와 파단강도의 관계에서는 접착층 두께 0.2 mm 미만에서 파단강도값이 증가하다가 그 이상의 접착층 두께에서는 파단강도 값이 감

소하였다. 따라서 본 실험의 경우에는 접착이음의 최적 접착층 두께는 0.2 mm로 나타났다.

(4) 피착재의 항복강도에 대해서는 항복강도가 클수록 접착강도도 증가하는 것으로 나타났다. 즉 항복강도에 도달한 피착재는 굽힘량이 급격히 증가하고 이것이 파단의 직접적인 원인이 된다. 그러나 접착제의 경우에는 항복강도가 아닌 탄성계수가 이음강도의 지배적 인자가 되는 것으로 나타났다.

(5) 이음의 형상 파라미터의 영향을 배제하고 각 피착재/접착제의 조합에 의한 강도특성을 파악하기 위하여 새로이 제안한 수정된 이음계수  $\sqrt{l}/(l \cdot h)$ 에 의하여 접착강도 실험결과를 정리한 결과, Al 5052/Cemedine 1500, Al 6061/epoxy, Al 5052/epoxy의 순으로 접착특성이 우수한 것으로 나타났다.

## 후 기

본 연구는 1996학년도 교육부 학술연구 조성비(과제번호 ME96-C-11)로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) 長谷川, 宇佐見, 1992, “自動車用 アルミニウム合金の接着接合,” 日本接着協會誌, Vol. 28, No. 10, pp. 427~435.
- (2) Nardini, D., 1989, “Structural Design Considerations for Bonded Aluminum Structured Vehicles,” SAE 890716, pp. 697~707.
- (3) 吉田夕貴夫, 金川浩之, 志村邦久, 濱野信之, 1991, “ウェルドボンド構造の剛性検討について,” 自動車技術會 シンポジウム 新時代を擔う構造接着技術 '90, pp. 151~157.
- (4) Goland, M. and Reissner, E., 1944, “The Stresses in Cemented Joints,” ASME Journal of Applied Mechanics, Vol. 66, pp. A-17~A-27.
- (5) Chen, D. and Cheng, S., 1983, “An Analysis of Adhesive-Bonded Single-Lap Joints,” ASME Journal of Applied Mechanics, Vol. 50, pp. 109~115.
- (6) 澤俊行, 中野勝之, 虎谷寛, 堀内雅彦, 1995, “引張せん断荷重を受ける単純重ね合わせ接着継手の二次元応力解析,” 日本機械學會論文集(A編),

- 61卷, 589號, pp. 1994~2002.
- (7) Tong, L., 1996, "Bond Strength for Adhesive-Bonded Single-Lap Joints," *Acta Mechanica*, Vol. 117, pp. 101~113.
- (8) Yang, C., 1996, "Stress-Strain Analysis of Single-Lap Composite Joints Under Tension," *ASME Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 118, No. 4, pp. 247~255.
- (9) Wooley, G. R. and Carver, D. R., 1971, "Stress Concentration Factors for Bonded Lap Joints," *Journal of Aircraft*, Vol. 8, No. 10, pp. 817~820.
- (10) 杉林俊雄, 池上皓三, 1984, "單純重ね合わせ継手の引張りせん断負荷に対する変形と強度," 日本機械學會論文集(C編), 50卷, 449號, pp. 17~27.
- (11) 服部敏雄, 1990, "応力特異場パラメータを用いた接着継手の強度評価," 日本機械學會論文集(A編), 56卷, 523號, pp. 618~623.
- (12) 西川哲也, 原賀康介, 1985, "境界要素法による接着継手の応力解析," 日本接着協會誌, Vol. 21, No. 4, pp. 136~141.
- (13) 結城良治, 劉金橋, 許金泉, 大平壽昭, 小野智佳, 1992, "接着継手の疲労強度の界面破壊力學による評価," 材料, Vol. 41, No. 467, pp. 1299~1304.
- (14) 이 원, 정의섭, 유영철, 1995, "단순겹치기 접착이음에 대한 응력 및 응력특이성 파라미터의 해석," 대한기계학회 1995년도 춘계학술대회논문집(1), pp. 139~144.
- (15) DeBruyne, N. A., 1944, "The Strength of Glued Joints," *Aircraft Engineering*, Vol. 16, pp. 115~118.
- (16) Heywood, R. B., 1962, *Designing Against Fatigue of Metals*, Reinhold, New York.
- (17) Groth, H. L., 1985, "A Method to Predict Fracture in an Adhesively Bonded Joint," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 5, No. 1, pp. 19~22.
- (18) 유영철, 정의섭, 오승규, 이원, 1996, "인장-전단하중을 받는 알루미늄 6061-T6재 접착이음의 강도특성," 한국자동차공학회 1996년도 추계학술대회논문집(1), pp. 84~89.
- (19) 오승규, 유영철, 정의섭, 이 원, 1997, "Al 합금 단순겹치기 접착이음의 인장-전단강도 평가," 한국정밀공학회 1997년도 춘계학술대회논문집, pp. 567~571.
- (20) 森きよみ, 磯野宏秋, 杉林俊雄, 1992, "被着体材料の剛性が接着継手の強度に及ぼす影響," 日本機械學會論文集(A編), 58卷, 551號, pp. 1281~1285.
- (21) 丹羽省三, 1991, "鋼板接着継手の試験方法と靜的強度," 自動車技術會 シンポジウム 新時代を擔う構造接着技術 '90, pp. 12~19.
- (22) 山田邦雄, 松川不二夫, 1991, "實車による調査結果について(市場経年車接合部の殘存強度測定)," 自動車技術會 シンポジウム 新時代を擔う構造接着技術 '90, pp. 148~150.
- (23) 澤俊行, 鈴木晴昭, 渡邊茂樹, 堀内雅彦, 1993, "引張りせん断荷重を受ける單純重ね合わせ接着継手の弾塑性有限要素解析," 日本機械學會論文集(A編), 59卷, 564號, pp. 1881~1887.