

(論 文)

단면형상에 따른 단일접착기 이음의 피로 및 정적 토크 전달특성에 관한 실험적 연구

최진경* · 이대길**

(1993년 9월 28일 접수)

Effect of the Cross Sectional Shapes on the Static and Fatigue Torque Transmission Capabilities of Adhesive Single Lap Joints

Jin Kyung Choi and Dai Gil Lee

Key Words : Adhesive Polygonal Single Lap(다각형 접착 단일접착기), Adhesive Circular Single Lap(원형 접착 단일접착기), Adhesive(접착제), Adherend(피접착제)

Abstract

In this paper, the effects of the adhesive thickness and adherend roughness on the static and fatigue strengths of the adhesively bonded circular single lap joints has been investigated by an experimental method. The stacking sequence effect of the composite adherend on the static and fatigue strength and the fracture patterns of the adhesive failure were also observed. Since the circular single lap joint fails catastrophically beyond the static strength or fatigue limit, the tubular polygonal adhesively bonded joints such as triangular, tetragonal, pentagonal, hexagonal as well as elliptical joints were manufactured in order to give partial mechanical characteristics to the adhesively bonded tubular joints. These joints were tested both in static and fatigue modes. From the experimental investigations, it was found that the fatigue strength of the circular adhesively bonded joints was much dependent on the arithmetical average surface roughness of the adherends and the polygonal adhesively bonded joints had better fatigue strength characteristics than the circular adhesively bonded joints.

1. 서 론

섬유로 보강된 복합재료(fiber reinforced composite)는 기존의 철강재료나 알루미늄재료에 비하여 높은 비강성(E/ρ) 및 비강도(S/ρ) 특성때문에, 인공 위성이나 항공기의 재료로 많이 사용되어 왔다.⁽¹⁾ 또한 에폭시를 기지로 하는 탄소섬유 복합재료는 감쇠특성⁽²⁾과 피로특성⁽³⁾이 우수하기 때문에 로봇

팔 및 공작기계 등의 기계부품에 사용하면 좋은 특성을 나타낸다.^(4,5,6)

복합재료를 사용하여 제품을 제조할 때에는 정형 가공을 하는 것이 바람직하나, 이 경우 제조공정이 어렵고 경제성이 떨어지기 때문에 복합재료와 기존의 재료를 접합하는 경우가 많다.

복합재료로 이루어진 구조의 효율성은 몇몇 예외적인 경우를 제외하고는 구조 자체보다 조인트에 의해서 결정되기 때문에 조인트의 설계와 제작은 매우 중요한 연구분야로 대두 되었다.⁽⁷⁾

접합방법에는 기계적인 접합법과 접착제에 의한

*한국과학기술원 정밀공학과

**정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

접합법으로 크게 분류할 수가 있다. 기계적인 접합 방법은 복합재료에 구멍을 만든 후 볼트로 체결하거나 리벳팅을 하게 되는데 이 경우 섬유 파손으로 재료내의 응력전달에 좋지않은 결과를 준다.

또한 복합재료는 이방성재료이므로 접합부위의 응력집중계수가 등방성재료보다 더 커질 염려가 있다.⁽⁸⁾ 또한 반복하중에 의한 응력집중부위의 피로현상과 접합부위를 공기역학적으로 매끄러운 면을 만들기 어렵기 때문에 기계적인 접합은 사용에 제한을 받게 된다.

이에 반해 접착제에 의한 접합은 기계적인 접합에 비해 더 넓은 영역에 하중을 분포시키고, 구조물에 구멍을 낼 필요가 없어서 섬유가 끊어져서 발생하는 응력집중현상을 줄일 수 있으므로 전단력에 대한 강도를 리벳이음에 비해 3배 이상 증가시킬 수 있다.⁽⁹⁾ 따라서 접합부위의 높은 피로저항과 소음감소 및 진동발생을 억제시키는 효과를 준다. 또한 무게절감과 제작공정의 간소화로 경쟁력이 향상된다.

그러나 접착제에 의한 접합은 피접합체의 표면처리를 필요로 하며, 주위의 온도나 습도에 따라 접착제의 성능이 좌우된다. 또한, 한번 접합한 후에는 수리 및 내부 부품의 교환을 위해 분해하기가 불가능하며, 접합자의 숙련도에 따라 접착성능이 달라진다. 특히 접착제성능이 접착정도를 결정하는데 최근 우수제품의 개발로 접착제에 의한 접합을 좀 더 용이하게 하고 있다.

접착제에 의한 접합방법에는 단일접치기(single lap), 이중접치기(double lap), 계단식접치기(steped lap) 및 경사접치기(scarf lap) 이음 등이 있으나, 여러 상황에서 사용하기 용이한 단일접치기(single lap) 접합법을 가장 널리 사용하고 있다.

원형 접착 단일접치기(adhesive circular single lap) 이음의 이론적인 연구는 해석적인 방법이나 유한요소법(FEM)을 사용하여 많이 수행되어 왔다.

Adams와 Peppiatt는 Volkersen의 해석을 개선하여 원형 접합이음의 해석적인 해와 유한요소법의 해를 비교하였으며 또한 그들은 접합부분에 필릿(fillet)이 있는 경우에 대하여도 토크를 받는 경우와 인장을 받는 경우에 대하여 유한요소법(FEM)으로 해석을 하였다.⁽¹⁰⁾

Chon도 Adams의 방법과 거의 유사한 방법에 의하여 접합되는 물질이 복합재료인 경우에 대하여 해석을 하였다.⁽¹¹⁾

Graves와 Adams는 직교이방성의 복합재료가 토크를 받는 경우에 대하여 각층의 성질을 고려한 해석과 적층판(Laminate)의 평균값을 사용한 해석을 유한요소법을 사용하여 비교 평가하였다.⁽¹²⁾

Alwar와 Nagaraja는 접착제의 점탄성성질을 고려하여 유한요소법으로 조인트의 응력해석을 수행하였다.⁽¹³⁾

Hart-Smith는 단일접치기, 이중접치기, 경사접치기와 계단식접치기 이음의 해석을 위한 컴퓨터 프로그램을 개발하였다.⁽¹⁴⁾

Imanaka 등은 주기적 하중을 받는 접합 맞대기(butt) 이음에 대한 피로실험을 하였다.⁽¹⁵⁾ 그들은 접착제의 두께가 피로강도에 미치는 영향 및 접착제에 첨가제(filler)를 가했을 경우에 피로강도에 미치는 영향을 실험하였다.

이와 같이 원형 접착 단일접치기 이음에 대한 정역학적인 해석은 많이 수행되어 왔으나, 실험적인 연구는 많이 수행되지 않았다. 실제로 접착제에 의한 접합의 경우 동적인 피로에 의한 파괴가 많기 때문에 이에 대한 실험 및 이론적인 고찰이 필요한 상황이다. 특히, 다각형 접착 단일 접치기 이음은 접착제의 파괴가 일어난 후에도 피접합체가 응력을 받아주기 때문에 원형 접착 단일접치기 이음에 비해 안전한 설계가 될 수 있다.

본 연구에서는 여러가지 단면형상(원형, 3각형, 4각형, 5각형, 6각형)의 강철-강철 접착 단일접치기(steel-steel adhesive single lap) 이음이 반복토크를 받았을 경우의 토크 전달능력을 실험적으로 고찰하였다. 또한 접착두께, 중심선 평균 표면거칠기 및 가진 응력의 변화에 대한 피로 한도의 변화를 측정하였으며, 단면형상, 접착두께 및 중심선 평균 표면거칠기가 조인트의 정적 토크 전달능력에 미치는 영향을 실험하였다.

또한 강철-복합재료 접착 단일접치기 이음의 단면형상(원형, 3각, 4각, 5각, 6각, 타원) 및 복합재료의 적층각이 변할 경우 정적 토크 전달능력의 변화를 측정하였다.

2. 시편 및 접착제

본 연구에서 사용한 접착제는 한국 IPCO 9923의 에폭시 수지로, 이 재료는 접합 및 수리용도로 사용하기 위하여 인성을 강화한(toughened) 수지이다. 수지와 경화제의 배합비율은 무게비로 1:1이

Table 1 Properties of the epoxy adhesive(IPCO 9923)

Lap Shear Strength(MPa)	13.7 (ASTM D-1002-72)
Tensile Modulus(GPa)	1.3
Tensile Strength(MPa)	45
Shear Modulus(GPa)	0.46
Poisson's ratio	0.41

고, 경화시간은 25°C에서 75분이며, 최고 사용 온도는 120°C이다. 이 재료에 대한 물성치는 Table 1에 나타나 있다.

피로실험에 사용한 피로시험기는 일본의 Shimadzu 회사에서 제작한 TB-10형 기계로써, 편심이 진질량을 회전시켜서 최대 ±50 Nm의 토크를 얻을 수 있다. 반복 가진주파수는 2000 rpm으로 주어진다. 본 시험기의 주파수는 접착제 시험용으로 너무 빠르나, 본 연구에서 사용한 시편의 접착제 두께가 매우 얇으므로, 발생한 열이 내부의 강철 피접합체로 잘 전달되어 온도상승 효과를 무시할 수가 있었다.

정적인 실험은 MTS사의 용량 1000 Nm인 유압 서보식 인장 및 토크 검용 실험기를 사용하였다.

강철-강철 접합시편의 형상은 각각의 실험에 사

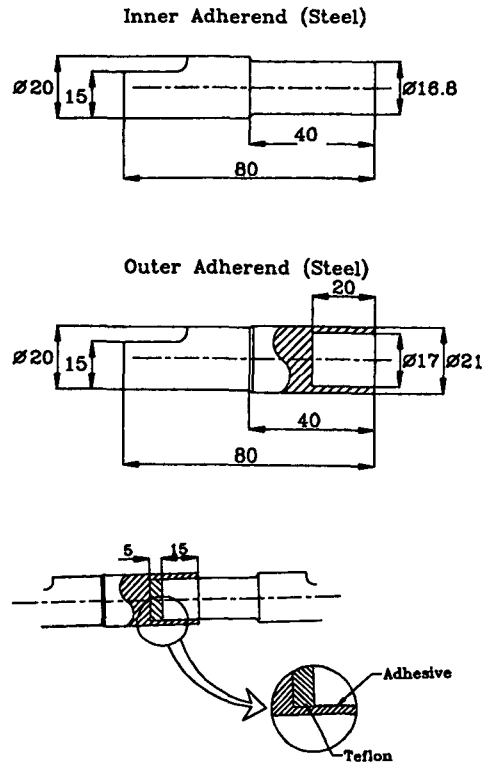


Fig. 1 Dimensions of the adherends of the steel-steel circular single lap joints for the fatigue and static torsion test

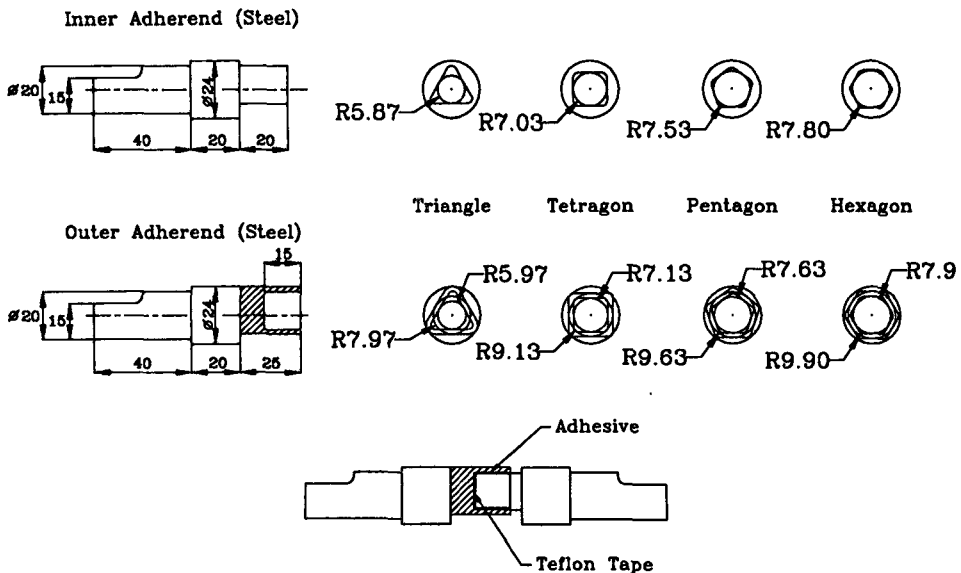


Fig. 2 Dimensions of the adherends of the steel-steel polygonal single lap joints for the static torsion test

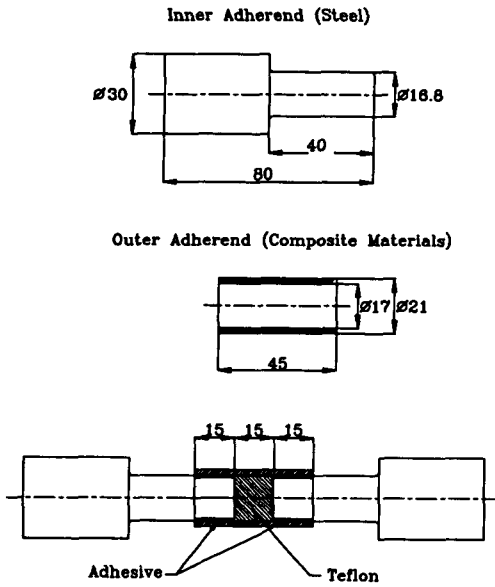


Fig. 3 Dimensions of the adherends of the steel-composite circular single lap joints for the static torsion test

용한 시험기의 규격과 단면형상에 맞게 제작되었으며 (Fig. 1, Fig. 2), 피접합체의 재료는 S45C 강철과 탄소섬유 에폭시 복합재료를 사용하였다. 강철-복합재료 접합시편은 Fig. 3과 Fig. 4에서 보는 바

Table 2 Properties of the unidirectional carbon fiber epoxy composite

Tensile Modulus(GPa)	153.0
Transverse Modulus(GPa)	10.9
Shear Modulus(GPa)	5.6
Poisson's Ratio	0.3
Tensile Strength(GPa)	2.0
Transverse Strength(MPa)	56
Shear Strength(MPa)	72
Fiber Content (Volume Fraction, %)	60
Density (kg/m ³)	1.6

와 같이 두개의 강철봉과 한개의 복합재료 환봉으로 구성되며, 양쪽을 모두 접착체에 의하여 접착을 하였다. 본 실험에서 사용한 복합재료는 탄소섬유 에폭시 프리프레그 (carbon fiber epoxy prepreg)로 제조하였으며, 일방향 복합재료의 물성치는 Table 2와 같다.

시편을 접착체로 접합할 때 가장 중요한 것 중 한가지는 안쪽 시편과 바깥쪽 시편이 편심되지 않

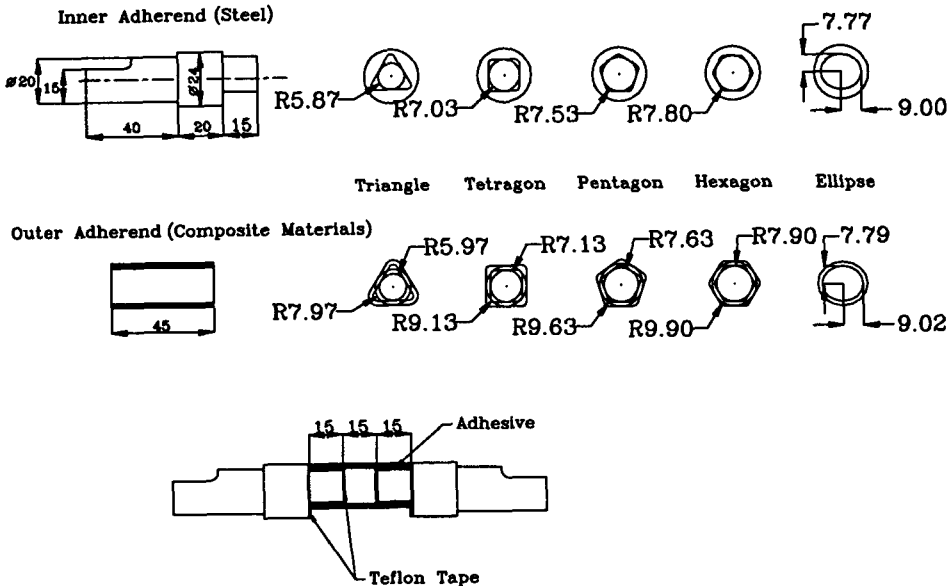


Fig. 4 Dimensions of the adherends of the steel-composite polygonal single lap joints for the static torsion test

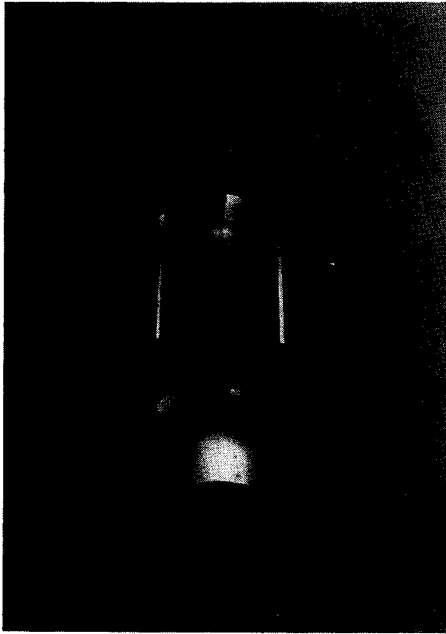


Fig. 5 V-block for the prevention of axial eccentricity

게 고정된 후 접합시켜야 한다는 점이다. 본 연구에서는 Fig. 5와 같이 V블록을 사용하여 접합시의 편심을 제거하였다.

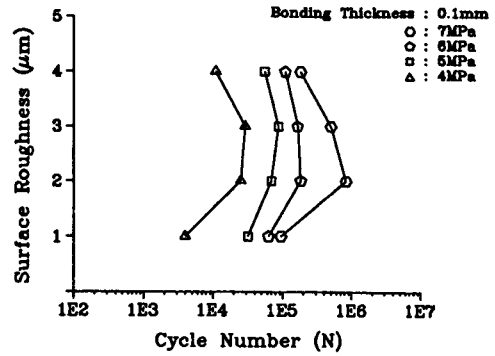
3. 조인트의 피로 및 정적인 실험

3.1 강철-강철 원형 접착 단일겹치기 이음의 피로실험

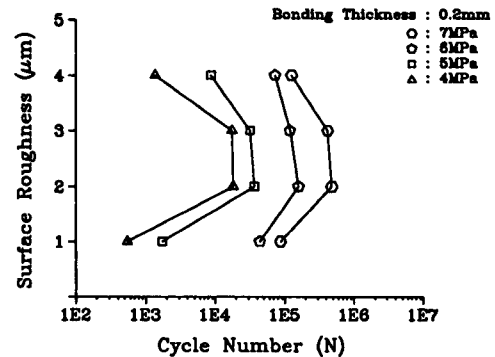
조인트가 정적인 토크를 받을 경우 Adams의 식⁽¹⁰⁾과 유한요소법의 결과에 의하면 접착두께가 증가하면 토크용량도 증가하는 결과가 나타났으나, 피로 실험의 결과는 접착제의 두께가 작을 때 피로한계가 증가하는 것으로 나타났다.⁽¹⁶⁾ 본 실험에서도 이 결과에 따라 접착제의 두께가 0.1 mm와 0.2 mm인 경우에 대하여 접착제로 접합된 강철-강철 원형 접착 단일겹치기 이음이 반복응력 (alternating stress)

$$\tau_a = \frac{T_{amp}}{2\pi a^2 l}$$

여기서, T_{amp} : 반복 가진토크
 a : 접합반경
 l : 접합길이



(a) Adhesive thickness : 0.1 mm



(b) Adhesive thickness : 0.2 mm

Fig. 6 Relationship of the fatigue limit vs. arithmetical average roughness of the steel-steel adherends of the circular single lap joints ($R(\sigma_{max}/\sigma_{min}) = -1$)

상태에 있을 때, 피접합체의 중심선 평균 표면거칠기 (R_a)가 토크 전달능력에 미치는 영향을 연구하였다. 모든 실험은 응력비 $R(\sigma_{max}/\sigma_{min}) = -1$ 인 상태에서 수행되었다.

Fig. 6에서의 결과는 접착두께가 0.1 mm이고, 중심선 평균 표면거칠기가 $2 \mu m$ 인 경우에 가장 좋은 피로한도를 갖는 것을 보여 주고 있다. 피접합체 (adherend)의 중심선 평균 표면거칠기가 피로 실험에 미치는 영향을 관찰하기 위하여, 피로 파괴된 시편의 바깥쪽 피접합체의 두께가 0.1 mm로 될 때까지 선반에서 절삭한 후, 바깥쪽의 피접합체를 시편의 축방향으로 절단하여 시편의 안쪽 면과 바깥쪽 면의 표면상태를 관찰하였다. Fig. 7(a)~(d)는 피접합체의 중심선 평균 표면거칠기가 각각 $1 \mu m$, $2 \mu m$, $3 \mu m$, $4 \mu m$ 인 경우에 접착 부의 파괴된 표면 상태를 보여 주고 있다. 피접합체의 중심

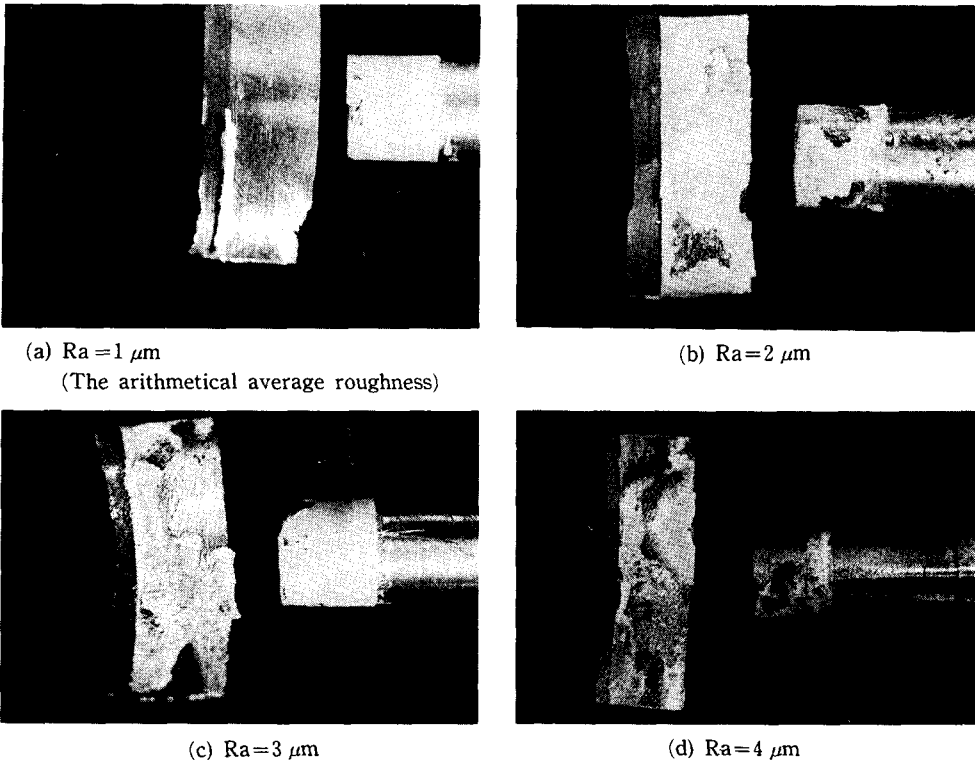


Fig. 7 Fractography of the failed adherends of the steel-steel joints in the fatigue tests

선 평균 표면거칠기가 $1\ \mu\text{m}$ 와 $4\ \mu\text{m}$ 인 경우에는 접착제가 안쪽 피접합체에만 주로 접착되어 있는 것을 관찰할 수 있으며, 이것은 시편이 계면 전단 응력(interfacial shear stress)에 의해 주로 파괴가 일어난다는 것을 보여 준다. 또한 중심선 평균 표면거칠기가 $2\ \mu\text{m}$ 와 $3\ \mu\text{m}$ 인 경우는 접착제가 양쪽의 피접합체에 고루 접착되어 있는 것을 관찰할 수 있으며, $2\ \mu\text{m}$ 인 경우가 더 고루 접착되어 있는 것을 관찰하였다. 이것은 접착부가 체적 전단 응력(bulk shear stress)에 의해 주로 파괴가 일어난다는 것을 보여 준다. 따라서, 피접합체의 최적 중심선 평균 거칠기는 $2\ \mu\text{m}$ 인 것을 알 수가 있다.

3.2 강철-강철 원형 접착 단일겹치기 이음의 정적인 실험

피로실험의 결과 피접합체의 중심선 평균 표면 거칠기가 $2\ \mu\text{m}$ 가 최적이므로, 정적인 실험은 피접합체의 중심선 평균 표면거칠기가 $2\ \mu\text{m}$ 인 경우에 대하여 접착제의 두께를 변화시키면서 실험을 하였다. Fig. 8은 접착제의 두께와 최대 토크와의 관계

를 보여 준다. 그림의 결과는 접착제의 두께가 증가하면, 조인트의 토크 전달능력이 감소하는 것을 보여주며, 이것은 Adams의 이론 식⁽¹⁰⁾과는 반대의 결과가 된다. 접착제의 두께가 $0.1\ \text{mm}$ 보다 작으면, 균일한 접착이 매우 어려운 것을 발견하였다.

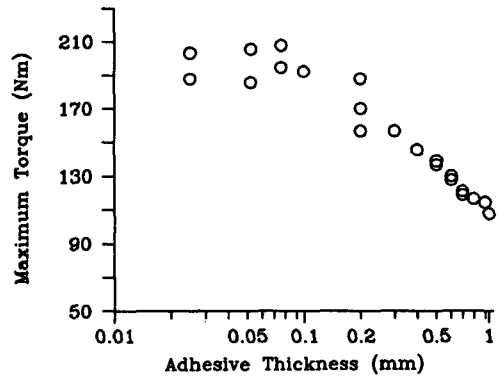


Fig. 8 Static torque transmission capabilities of the adhesive circular steel-steel single lap joints w. r.t. the adhesive thickness when the arithmetical average roughness was $2\ \mu\text{m}$

따라서, 실제 접착에서는 0.1mm의 접착 두께가 추천된다.

3.3 강철-강철 다각형 접착 단일겹치기 이음의 피로실험

원형 접착 이음의 경우 응력은 접착면에 접선방향으로 전달되며, 따라서 접착제가 파괴되면, 피접합체가 부가적인 하중을 견디지 못한다. 그러나 다각형 접착이음의 경우에는 일차적으로 접착제에서 파괴가 일어나지만 기하학적인 형상때문에 파괴 후에도 일정량 이상의 토크를 피접합체를 통하여 전달하게 되며, 전단응력뿐만 아니라 접착면에 수직인 방향으로 인장, 압축응력을 동시에 받게 된다.

본 다각형 접착이음실험을 원형 접착이음실험과 비교하기 위하여, 평균 반복 응력값을 아래와 같이 정의하였다.

$$\tau_a = \frac{T_{amp}}{A \cdot a}$$

여기서, T_{amp} : 반복 가진토크

A : 접합면적

a : 평균 접합반경

실험시편의 제작은 3각, 4각, 5각 및 6각형 각각의 변을 같게 하여 접합 면적(A)을 같게 하였으며, 평균 접합반경(a)과 반복 가진토크(T_{amp}) 값은 원형 접착이음에서의 접합반경과 반복 가진토크 값과 같도록 설계하였다. 위의 원형 접착이음에서 접착두께가 0.1mm이고, 중심선 평균 표면거칠기가 $2 \mu\text{m}$ 인 경우에 가장 좋은 피로한도를 얻었기 때문에, 본 실험에서도 시험편의 실험조건을 이 값에 맞추었다. 다각형 접합이음의 경우 접착부의 파괴 후 피접합체가 일정량 이상의 응력을 받아 완전

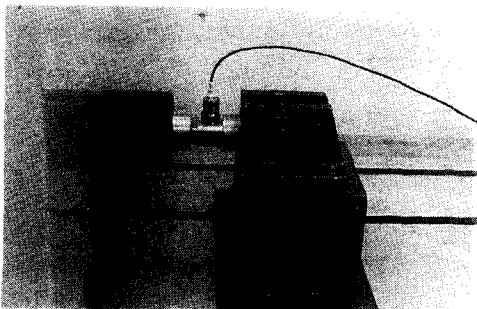


Fig. 9 Photograph of the adhesive joint in the fatigue tester with the accelerometer attached to detect the fracture status of the adhesive

Table 3 Failure fatigue cycles of polygonal single lap joints (Alternating stress : 5 MPa, Bonding thickness : 0.1 mm)

Cross section of the specimen	Number of stress cycles before fracture
Triangular	1.8×10^6
Tetragonal	3.5×10^5
Pentagonal	8.0×10^4
Hexagonal	6.0×10^4
Circular	2.0×10^5

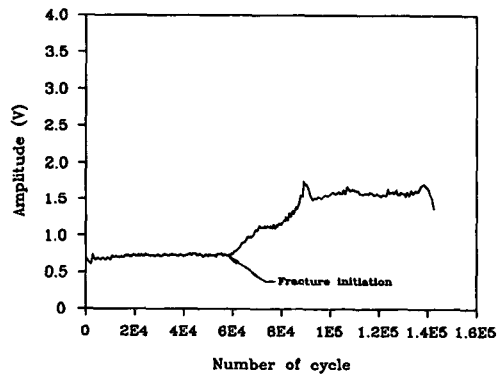


Fig. 10 Amplitude of the accelerometer vs. number of cycles in the fatigue torsion tests. (Cross section : hexagon, Alternating stress : ± 5 MPa)

한 파괴가 일어나지 않기 때문에 접착제의 파괴시점을 알아내는 것이 어렵다. 그래서 가속도계 (accelerometer)를 시험편의 접합부에 설치 (Fig. 9) 하였고, 진폭의 변이 값을 컴퓨터로 인터페이스하여 접합부의 파괴가 일어나는 최대 피로한도 값을 측정하였다.

Table 3은 단면이 3각형일 경우 피로하중에 가장 오래 견디는 것을 보여 주고 있으며, Fig. 10에서는 접착부의 파단이후에도 접착제에 의한 접착이음 (adhesive joint)에서 피접합체의 기계적 이음 (mechanical joint)으로 되어 피접합체가 어느 정도의 하중을 계속 받게 되는 것을 보여준다.

3.4 강철-복합재료 원형 접착 단일겹치기 이음의 정적실험

일방향 장섬유 강화복합재료의 경우 적층각에 따

라 기계적 성질이 달라진다. 따라서 강철을 복합 재료와 접착할 경우 적층각의 변화가 토크 전달용량에 미치는 영향을 연구하기 위하여, 시편의 바깥쪽 피접합체를 복합재료로 제작하고 안쪽 피접합체를 강철로 제작하였다.

실험결과를 강철-강철 원형 접착이음과 비교하기 위해서 양쪽 시편의 치수가 같도록 설계하였으며, 실험조건으로 접착두께를 0.1 mm로 하였고, 강철의 평균 중심선 평균 표면거칠기를 2 μm 에 맞추었

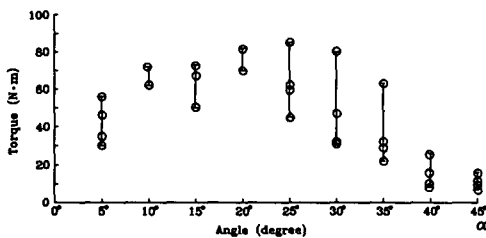


Fig. 11 Static torque transmission capabilities with respect to the stacking sequence $[\pm\alpha]_{nT}$ of the composite adherends

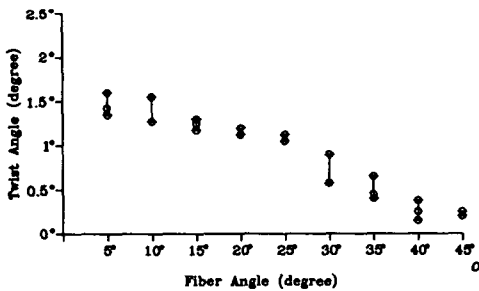


Fig. 12 Maximum static twist angle of adhesive with respect to the stacking sequence $[\pm\alpha]_{nT}$ of the composite adherends



Fig. 13 Photograph of the fracture shape of the circular adherends

다. 그러나, 복합재료는 표면처리가 어렵기 때문에 사포를 사용하여 접착표면에 거칠기를 주었다.

복합재료는 적층각을 시편의 축방향에 대하여 $[\pm 5]_{nT}$ 에서 $[\pm 45]_{nT}$ 까지 $\pm 5^\circ$ 씩 증가시켜서 제작하였는데, 실험결과 Fig. 11에서 보는 바와 같이 복합재료의 적층각이 $[\pm 5]_{nT}$ 에서 $[\pm 25]_{nT}$ 까지는 토크용량이 증가하다가 $[\pm 30]_{nT}$ 이후부터는 토크용량이 감소하는 곡선을 얻었다. 또한 파단이 일어나는 순간까지의 시편의 비틀림각은 Fig. 12에서 보는 바와 같이 복합재료의 적층각이 $[\pm 45]_{nT}$ 에 가까워질수록 감소하는 결과를 얻었다. 이와같은 결과는 복합재료의 적층각이 $[\pm 45]_{nT}$ 에 가까워질수록 비틀림 강성이 증가하기 때문이다. Fig. 13은 재료내면과 강철시편 바깥쪽면 사이의 접착제 내에 균열(crack) 발생에 따른 접착면의 파단형상을 보여준다.

3.5 강철-복합재료 다각형 접착 단일겹치기 이음의 정적실험

위에서 언급한 바와 같이 다각형 접합이음은 피접합체가 원형이 아니고 각을 가지는 형상이기 때문에 접착부에서 순간적인 파괴가 일어나지 않으며, 피로하중이나, 정적인 토크가 가해질 경우 원형 접합이음보다 좋은 토크 전달능력을 갖는다는 이점이 있다. 본 실험에서는 바깥쪽의 다각형 피접합체가 복합재료일 경우 복합재료의 적층각이 토크 전달능력에 미치는 영향을 측정하였다.

3각형, 4각형, 5각형, 6각형 및 타원의 단면 형상(Fig. 14)을 가진 강철-복합재료 다각형 접착 단일겹치기(adhesive polygonal single lap) 이음의 실험결과를 강철-강철 다각형 접착 단일겹치기

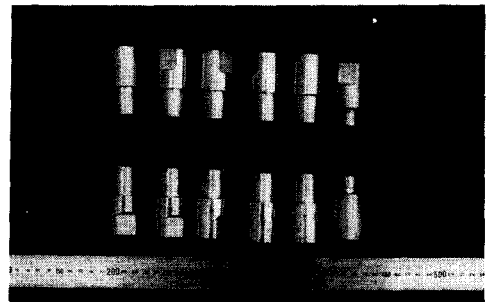
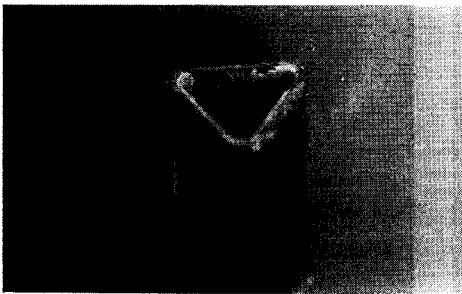


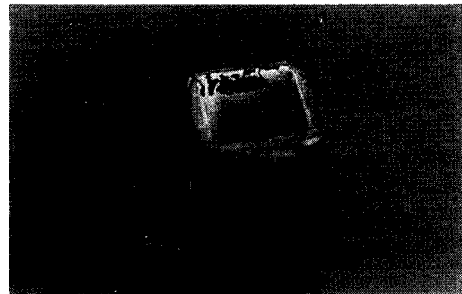
Fig. 14 Photograph of the adhesively bonded polygonal single lap joints with the composite-steel adherends

Table 4 Torque transmission capabilities of adhesively bonded polygonal single lap joints (Arithmetic average roughness : 2 μm , Bonding thickness : 1 mm) [unit : Nm]

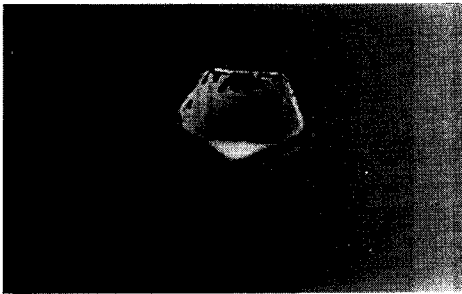
Stacking sequence / Cross section	$[\pm 15]_{nT}$	$[\pm 30]_{nT}$	$[\pm 45]_{nT}$
Triangular	108~123	64~82	42~61
Tetragonal	104~117	63~72	52~60
Pentagonal	69~76	72~77	75~83
Hexagonal	70~87	87~98	76~87
Elliptical	86~97	152~157	22~26
Circular	62~71	79~83	16~20



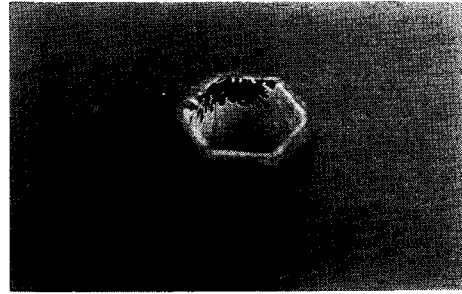
(a) Triangular



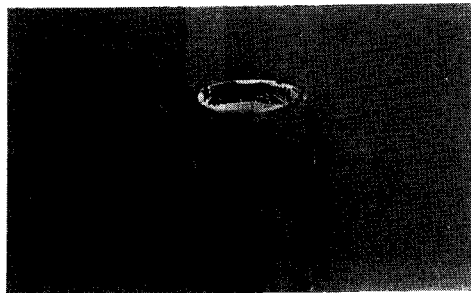
(b) Tetragonal



(c) Pentagonal



(d) Hexagonal



(e) Elliptical

Fig. 15 Crack shapes of the surfaces of the polygonal outer adherends when the stacking sequence was $[\pm 30]_{nT}$

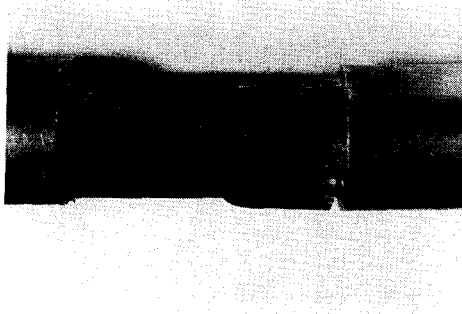


Fig. 16 Photograph of the failed shape of the triangular composite outer adherend under static torque

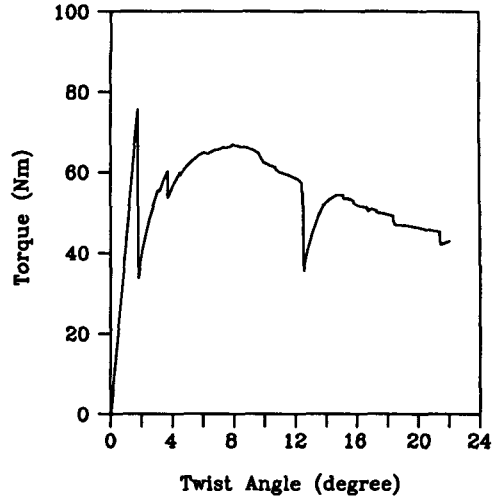


Fig. 17 Variations of the torque with respect to the twist angle of the triangular cross sectional adhesive joint (Stacking sequence : $[\pm 30]_{nr}$).

Table 5 Torque transmission capabilities of the polygonal single lap joints when the composite adherends were failed after adhesive fracture [unit : Nm]

Stacking sequence	$[\pm 15]_{nr}$	$[\pm 30]_{nr}$	$[\pm 45]_{nr}$
Torque	23~41	62~82	75~120

(steel-steel adhesive polygonal single lap) 이음의 실험결과와 비교하기 위하여 치수를 같게 제작하였으며, 바깥쪽 복합재료 피접합체의 적층각이 $[\pm 15]_{nr}$, $[\pm 30]_{nr}$, $[\pm 45]_{nr}$ 가 되도록 제작하였다.

Table 4에서 보는 바와 같이 단면형상이 3각형, 4각형인 경우는 복합재료 피접합체의 적층각이 작을수록 토크의 전달능력이 우수하였고, 단면 형상이 5각형, 6각형에서는 실험한 세가지 적층각에서 모두 비슷한 파괴 토크 전달 용량값을 얻었으며, 단면이 타원형인 경우는 피접합 복합재료의 적층각이 $[\pm 30]_{nr}$, $[\pm 15]_{nr}$, $[\pm 45]_{nr}$ 의 순이었다.

이것은 원형 접착이음과 달리 다각형 접착이음의 접합부인 접착제와 피접착체가 전단응력과 수직응력을 동시에 받으므로, 주응력(principal stress) 방향은 시편의 단면 형상에 따라 변하며, 이 결과로 피접착체의 적층각에 따라 토크의 전달 능력이 차이가 나기 때문이다.

위의 강철-강철 다각형 접착 단일 겹치기이음의 피로실험에서는 3각, 4각, 5각, 6각형의 순으로 피로강도가 좋았으나, 강철-복합재료 다각형 접착 단

일겹치기 이음의 정적실험에서는 위에서 보는 바와 같이 피접합 복합재료의 적층각에 따라 토크 전달 용량 값이 변하였다.

Fig. 15(a)~(e)는 각각의 다각형 단면 형상에 대한 접착제내의 크랙의 진전으로 파단이 발생한 모양이며, Fig. 16은 접착제의 파괴이후 3각형 단면형상의 복합재료 피접합체가 응력을 받으면서 파단이 일어나는 것을 보여 준다.

또한, Fig. 17에서 보는 바와 같이 접착제가 파괴된 이후에도 비틀림 각이 증가함에 따라 복합재료 피접합체가 2차적인 파단을 일으키게 되는데, 이 경우 복합재료 피접합체가 파괴될 때의 토크 값은 다각형의 단면형상에는 거의 무관하였으나, 복합재료 피접합체의 적층각에는 많은 영향을 받는 것으로 나타났다. Table 5는 이 결과를 보여 준다.

4. 결 론

- (1) 강철-강철 원형 접착 단일겹치기 이음이 피

로 토크하중을 받는 경우, 최적의 접착두께와 평균 중심선 평균 표면거칠기는 각각 0.1 mm, 2 μ m이다.

(2) 강철-강철 다각형 접착 단일접치기 이음이 피로 토크하중을 받는 경우, 단면형상이 3각형일 때 가장 긴 피로 사이클 값을 갖는다.

(3) 강철-강철 원형 접착 단일접치기 이음이 정적인 토크를 받는 경우, 접착제의 두께가 작을수록 큰 토크용량 값을 갖는다.

(4) 강철-복합재료 원형 접착 단일접치기 이음이 정적인 토크를 받을 때, 적층각이 $[\pm 25]_{nr}$ 일 경우 가장 큰 토크 전달용량을 가지며, 파괴가 일어날 때까지의 비틀림 각은 복합재료의 적층각이 $[\pm 45]_{nr}$ 에 가까워질수록 감소한다.

(5) 강철-복합 재료 다각형 접착 단일접치기 이음이 정적인 토크를 받을 경우, 단면형상이 3각형, 4각형에서는 복합재료의 적층각이 $[\pm 15]_{nr}$ 일 때, 단면형상이 타원형인 경우에는 $[\pm 30]_{nr}$ 에서 최대의 토크용량 값을 가지며, 5각형, 6각형에서는 각에 관계없이 일정 범위의 토크 값을 갖는다.

참고문헌

- (1) Reinhart, T. J., 1897, *Composite*, ASM INTERNATIONAL, pp. 816~822.
- (2) Crawley, E. F. and Mohr D. G., "Experimental Measurements of Material Damping in Free Fall with Tuneable Excitation," AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural Dynamics and Materials Conference Paper No. 83-0858-CP.
- (3) Mallick, P. K., 1988, *Fiber-Reinforced Composites*, Marcel Dekker, Inc., pp. 214~248.
- (4) Lee, D. G., Kim, K. S. and Kwak, Y. K., 1991, "Manufacturing of a SCARA-Type Direct-Drive Robot With Graphite Epoxy Composite Materials," *Robotica*, Vol. 9, pp. 219~229.
- (5) Lee, D. G., Jeong, K. S., Kim, K. S. and Kwak, Y. K., 1993, "Development of the Anthropomorphic Robot with Carbon Fiber Epoxy Composite Materials," *Composite Structures*, pp. 313~324.
- (6) Lee, D. G., Sin, H. C. and Suh, N. P., "Manufacturing of a Graphite Epoxy Composite Spindle for a Machine Tool," *Annals of the CIRP*, Vol. 27(1), 1985, pp. 365~369.
- (7) ASM International, *Composites*, 1988, pp. 479~495.
- (8) Lekhnitskii, S. G., 1963, *Theory of an Anisotropic Elastic Body*, Holden-Day, Inc., pp. 169~174.
- (9) Vinson, J. R. and Sierakowski, R. L., 1987, *The Behavior of Structure Composed of Composite Materials*, MARTINUS NIJHOFF PUBLISHERS, Chap. 8.
- (10) Adams, R. D. and Peppiatt, N. A., 1977, "Stress Analysis of Adhesive Bonded Tubular Lap Joints," *Journal of Adhesion*, Vol. 9, pp. 1~18.
- (11) Chon, C. T., 1984, "Analysis of Tubular Lap Joint in Torsion," *Journal of Composite Materials*, Vol. 18, pp. 298~311.
- (12) Graves, S. R. and Adams, D. F., 1981, "Analysis of a Bonded Joint in a Composite Tube Subjected to Torsion," *Journal of Composite Materials*, Vol. 15, pp. 211~224.
- (13) Alwar, R. S. and Nagaraja, Y. R., 1976, "Viscoelastic Analysis of an Adhesive Tubular Lap Joint," *Journal of Adhesion*, Vol. 8, pp. 79~82.
- (14) Hart-smith, L. J., 1981, "Further Development in the Design and Analysis of Adhesive Bonded Structural Joints," in *Joining of Composite Materials*, ASTM Special Technical Publication, 749, ASTM, Philadelphia, USA, pp. 3~31.
- (15) Imanaka, M., Kishimoto, W., Okita, K., Nakayama, H. and Shirato, M., 1984, "Improvement of Fatigue Strength of Adhesive Joints Through Filler Addition," *Journal of Composite Materials*, Vol 18, pp. 412~419.
- (16) Lee, D. G., Kim, K. S. and Im, Y. T., 1991, "An Experimental Study of Fatigue Strength for Adhesively Bonded Tubular Single Lap Joints," *Journal of Adhesion*, Vol. 35, pp. 39~53.