

〈論 文〉

접착제로 접착된 원형 겹치기이음의 토크 전달특성 연구

최진호* · 이대길*

(1993년 5월 25일 접수)

The Torque Transmission Capacities of the Adhesive Tubular Lap Joint

J. H. Choi and D. G. Lee

Key Words: Adhesion(접착), Adherend(피착제), Adhesive(접착제), Single Lap Joint(단일 겹치기이음), Double Lap Joint(이중 겹치기이음)

Abstract

With the wide application of fiber-reinforced composite material in aircraft space structures and robot arms, the design and manufacutre of composite joints have become a very important research area because they are often the weakest areas in composite structure. In this paper, the torque transmission capacities of the adhesive tubular single lap joint and double lap joint were studied. The stress and torque transmission capacity of the adhesive joints were analyzed by the finite element method and compared to the experimental results. The torque capacity of the double lap joint was increased 2.7 times over that of the single lap joint. Also, the fatigue limit of the double lap joint was increased 16 times over that of the single lap joint.

I. 서 론

장 섬유(continuous fiber)로 보강된 복합재료로는 높은 비강성, 높은 비강도 및 높은 감쇠(damping) 특성 때문에 항공기, 우주선, 로봇 팔 및 공작기계에 사용되기 시작하면서 접합부의 설계는 매우 중요한 연구분야로 대두되었다. 왜냐하면 복합재료로 이루어진 구조의 효율성은 약간의 예외적인 경우를 제외하고는 구조 자체보다는 접합부에 의해서 결정되기 때문이다.⁽¹⁾

접합방법에는 기계적 접합법과 접착제에 의한 접합으로 크게 분류할 수 있는데 접착제에 의한 접합이 가지는 장점을 살펴보면 첫째, 기계적 접합보다 넓은 영역에 하중을 분포시키며 구조물에 구멍을 낼 필요가 없고, 특히 복합재료의 경우 섬유가 끊

어짐으로써 생기는 응력집중현상을 줄일 수 있으므로 전단력이 작용할 때 강도를 리벳이음(riveting)에 비해 3배 이상 높일 수 있다.⁽²⁾ 둘째, 무게절감과 경비절감 효과를 가져올 수 있으며 게이지재료(gauge materials)와 같은 얇은 재료에도 적용이 가능하다. 세째, 밀링, 선반작업 등의 성형과정을 줄일 수 있다. 네째, 밀봉(sealing) 효과를 기대할 수 있으며 뛰어난 열, 전기의 부도체 역할을 할 수 있으며 부식(corrosion)을 방지할 목적으로 쓸 수 있다. 다섯째, 리벳이음이나 점용접(spot welding)에 비해 아주 뛰어난 피로저항(fatigue resistance)을 가지고 있으며 또한 감쇠나 소음을 줄이는 효과도 대단히 우수하다.⁽³⁾ 이러한 장점들에 반해서 분해하기가 곤란하고 접착되는 물질의 기하학적 형상, 표면처리 상태, 사용온도, 습도 및 다른 환경조건에 의해서 많은 영향을 받는 단점을 가지고 있다. 접착제에 의한 접합법에는 평판의 경우, 단일 겹치기이음(single lap joint), 이중 겹치

*정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

기 이음(double lap joint), 스카프 이음(scarf joint), 맞대기이음(butt joint) 등의 접합법이 있다. 위의 접합방법들은 원형튜브에도 그대로 적용이 가능하다. 원형튜브의 응력분포에 관한 연구는 유한요소법이나 해석적인 방법으로 많은 연구가 진행되었다. Adams와 Peppiatt는 Volkerson의 해석을 개선하여 원형 조인트의 해석적인 해를 구하였고 또한 접착부분에 필렛(fillet)이 있는 경우에 대하여 토크를 받는 경우와 인장을 받는 경우에 대해서 유한요소법으로 해석을 하였다.⁽⁴⁾ Chon도 Adams의 방법과 거의 유사한 방법에 의하여 접착되는 물질이 복합재료인 경우에 대하여 해석을 하였다.⁽⁵⁾ Hipol은 강(steel) 튜브가 복합재료에 접착되어 있는 경우에 대하여 유한요소법을 이용하여 해석을 시도하였다.⁽⁶⁾ Alward와 Nagaraja는 토크를 받는 원형 조인트의 응력해석을 접착제의 성질이 시간에 따라 변화한다는 가정하에 유한요소법을 사용하여 해석을 시도하였다.⁽⁷⁾ Graves와 Adams는 직교이방성(orthotropic) 복합재료가 토크를 받는 경우에 대하여 각층(ply)의 성질을 고려한 해석과 Laminate의 평균값을 사용한 해석을 유한요소법을 이용하여 비교 평가하였다.⁽⁸⁾

위에서 언급한 것과 같이 원형 조인트에 대한 해석은 주로 단일 겹치기이음의 형태가 대부분이고, 주로 응력해석이 대부분이다. 원형 조인트의 접착에서는 단일 겹치기이음의 제조가 쉽기 때문에 큰 토크를 전달하지 않을 경우에는 자주 이용되지만,

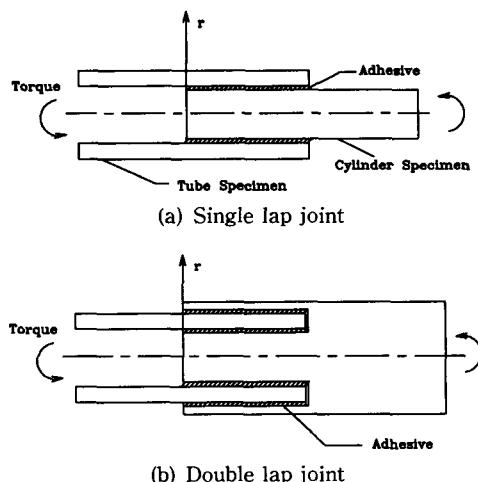


Fig. 1 Shapes of the adhesive bonded tubular lap joints

큰 토크용량이 필요하고, 조인트 치수에 제한이 있을 때는 이중 겹치기이음 등 다른 접착형태가 바람직하다. 그러나 이중 겹치기이음 등의 접착형태는 제조상 좀 까다로운 면이 있다.

본 논문에서는 Fig. 1과 같이 원형튜브 형태로 된 시편과 실린더 형태의 시편을 접착제로 접착하여 접착형태에 따른 조인트의 기계적 특성을 연구하였다. 접착형태는 Fig. 1(a)의 단일 겹치기이음 형태와 Fig. 1(b)의 이중 겹치기이음 형태의 원형 조인트를 제조하여 토크 전달용량을 비교하였다. 또한 유한요소해석으로 원형 조인트를 제조하여 토크 전달용량을 비교하였다.

또한 유한요소해석으로 원형 조인트의 응력분포를 구하여, 파괴예측을 하여 실험치와 비교하였다. 실제 구조물의 설계에 있어서는 피로특성도 매우 중요하므로 이중 겹치기이음의 피로특성을 단일 겹치기이음과 비교하여 피로현상을 살펴보았다.

2. 접착제의 물성치

접착에 사용한 접착제는 에폭시(epoxy) 계열의 접착제로 한국 IPCO사의 IPCO 9923을 사용하였다. 수지와 경화제의 혼합비율은 무게비로 1:1이다. 접착제의 기계적 물성치를 구하기 위하여 Fig.

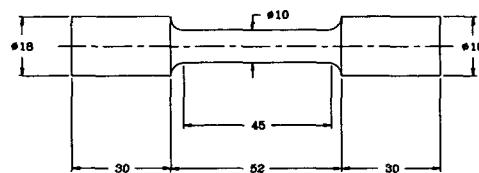


Fig. 2 Geometry of the tensile test specimen

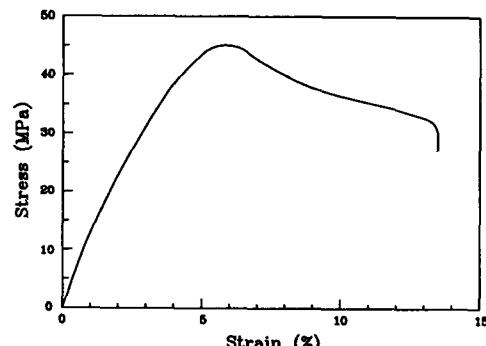


Fig. 3 Tensile stress-strain curve of the epoxy resin(IPCO 9923)

2와 같은 시편을 제작하여 인장실험을 하였다. 인장실험의 결과로 얻어진 응력-변형률 선도는 Fig. 3과 같다. 접착제의 전단 물성을 구하기 위하여

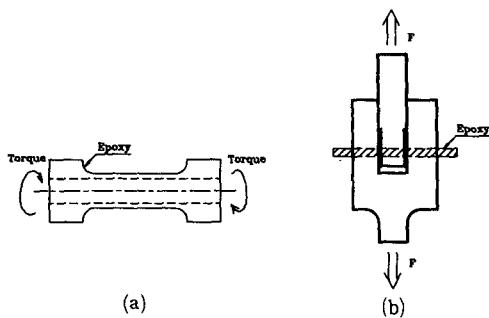


Fig. 4 Method of the bulk shear test

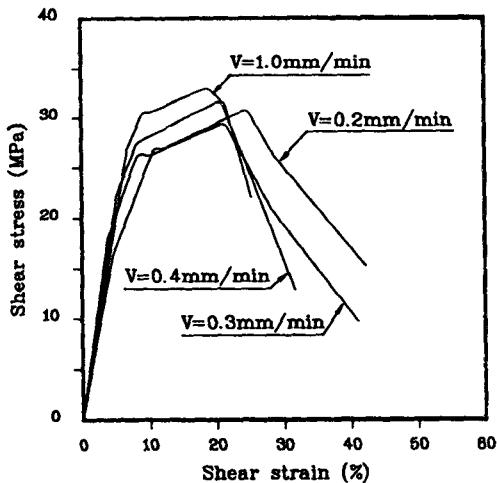


Fig. 5 Shear stress-strain curves of the epoxy resin(IPCO 9923)

Table 1 Properties of the epoxy adhesive (IPCO 9923)

Mix ratio by weight (Part A : Part B)	50 : 50
Curing temp.(°C)	80
Lap shear strength(MPa)	13.7 (ASTM D-1002-72)
Tensile strength(MPa)	45
Tensile modulus(GPa)	1.3
Shear modulus(GPa)	0.46
Poisson's Ratio	0.41

Fig. 4에서 보는 바와 같이 두가지 실험을 병행하여 접착제의 전단탄성계수와 전단강도를 구하였다. Fig. 4(a)는 비틀림 시험법으로 재료의 전단 탄성계수를 구하는 일반적인 방법이나, 탄성범위를 벗어난 응력-변형률 선도와 전단강도를 구하기에는 부적당하다. 따라서 탄성범위 밖의 응력-변형률 선도는 Fig. 4(b)에서 보는 바와 같은 실험을 병행하여 전단 물성을 측정하였다. Fig. 5는 Fig. 4(a)와 (b)의 실험으로부터 구하여진 IPCO 9923 접착제의 전단응력-변형률 선도를 나타낸 그라프이다. Table 1은 IPCO 9923의 물성치와 경화조건을 나타낸다.

3. 시험편 제작 및 접착방법

본 연구에서는 정적 비틀림 강도실험과 피로 비틀림실험을 단일 겹치기이음과 이중 겹치기이음에 대해 각각 실험하였다. 실험에 사용한 피착제(adherend)는 SM45C 강(steel) 재료이다. 단일 겹치기이음에 대한 시험편은 선반작업과 밀링작업을 하여 Fig. 6에서 보는 바와 같은 형상으로 가공하였다. 이중 겹치기이음에 대한 시험편의 최종형상은 Fig. 7에 나타나 있는데, 그림에서 보는 바와 같이 절삭작업으로 완성하기는 힘들다. 따라서 이중 겹치기이음의 바깥쪽 피착제(outside adherend) 부분을 제작한 다음, 내부의 원형시편에 열 박음작업으로 끼워 넣어서 이중 겹치기이음 시편을 완성하였다. 일반적으로 접착제의 접착력은 시편의 표면조건에 따라 크게 변화된다. Lee 등⁽⁹⁾의 결과에 의하면, 피착제가 강(steel) 재료일 경우 평균 표면거칠기가 2 μm일 때 가장 우수한 접착력을 나타낸다고

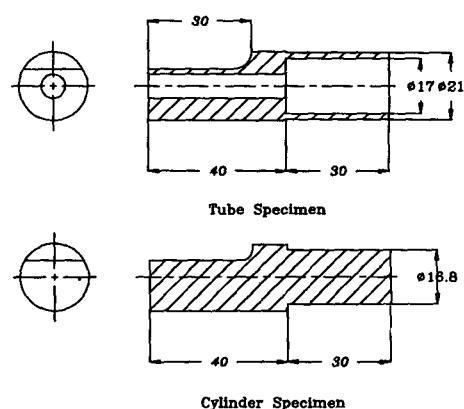


Fig. 6 Shapes of the specimens for the single lap joint

하였다. 본 실험에서는 선반에서 80 mesh의 사포로서 64 rpm의 회전속도로 약 10초간 가공하여 평균 표면거칠기를 $2 \mu\text{m}$ 로 조절하였다. 제조가 완료된 시편은 접착작업을 해야 하는데, 시편의 끝면이 접착되지 않고 일정한 간격을 유지하기 위해 Teflon을 튜브시편의 안쪽면에 삽입시켜 Fig. 8과 같이 접착하였다. 접착제로 사용한 에폭시는 수분을 흡수하면 성질의 저하를 가져오기 때문에 수지와 경화제를 섞을 때는 습도와 온도를 일정하게 유지하여 주는 것이 중요하므로 습도는 약 40%, 온도는 $20\sim25^\circ\text{C}$ 를 유지하여 주었다. 접착시 기포가 생기면 접착에 여러가지 나쁜 영향을 끼치는데, 이 기포를 제거하기 위해 에폭시를 섞은 용기를 진공

통속에 넣어 기포를 제거하고, 주사기로 에폭시를 튜브형태의 시편의 안쪽면부터 천천히 채운 다음 실린더 형태의 시편을 천천히 밀어 넣어서 접착시켰다. 또한 접착시 편심이 생기는 것을 방지하기 위해 Fig. 9와 같이 V-Block을 사용하여 접착시의 편심을 제거하였다. 이렇게 만들어진 시편속에 남아 있을지도 모르는 공기방울들의 크기를 줄이기 위하여, 에폭시의 경화는 Autoclave 내에서 0.6 MPa의 압력을 가한 상태에서 경화시켰다. 접착조인트의 끝 부분에 필렛이 존재하면 접착강도는 상승하나, 정확한 끝 부분형상의 유지를 위하여 본 실험에서는 필렛부분을 완전히 제거하였다. 본 실험에 사용한 에폭시는 80°C 근처에서 접성이 가장 작게 되므로 Autoclave에서 80°C 로 18시간 동안 경화시켰다. 접착제로 사용한 에폭시는 한국 IPCO 9923을 사용하였는데 수지와 경화제의 비율은 무게비로 1:1이다.

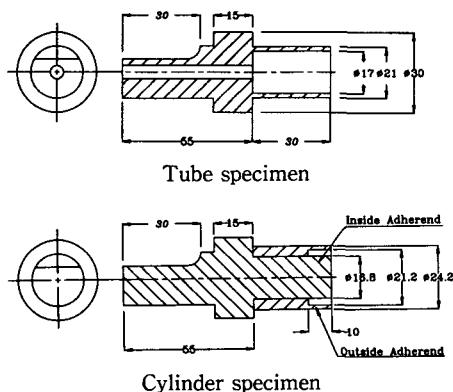


Fig. 7 Shapes of the specimens for the double lap joint

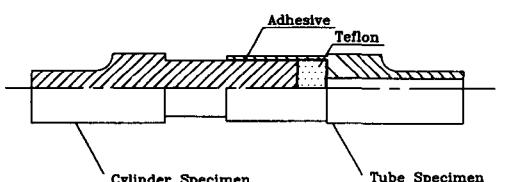


Fig. 8 Configuration of the adhesive tubular lap joint

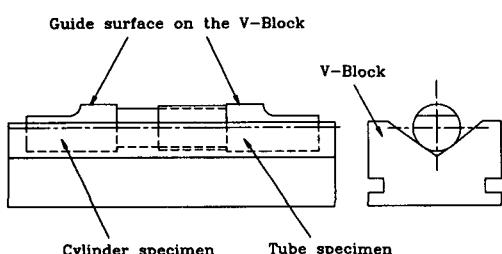


Fig. 9 V-block used for concentric bonding of the adhesive tubular lap joint

4. 정적 비틀림실험

4.1 비틀림실험

단일 겹치기이음과 이중 겹치기이음의 접착특성을 비교하기 위해 정적 비틀림 강도실험을 하였다. 접착제의 두께는 0.1 mm 로 일정하게 하였으며, 접착길이는 10 mm 로 하여 실험을 하였다. 또한 이중 겹치기이음의 바깥쪽 피착제(outside adherend)의 두께는 1.5 mm 로 하였다.

Fig. 10은 단일 겹치기이음과 이중 겹치기이음의

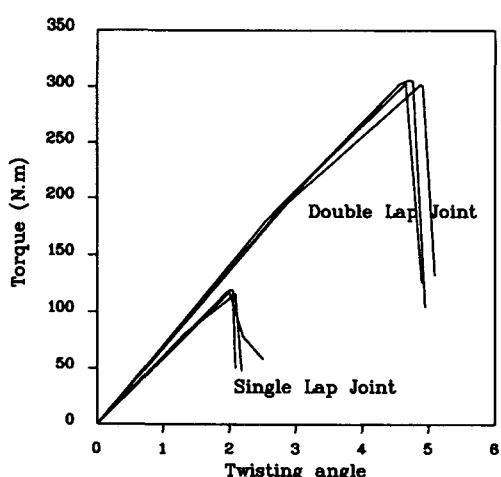


Fig. 10 Torque-twisting angle curves of the tubular adhesive joint

정적 비틀림실험에서 구해진 토크-비틀림각 선도를 나타낸 그래프이다. 이중 겹치기이음의 정적 토크 전달능력은 Fig. 10에 나타나 있는 바와 같이 단일 겹치기이음에 비해 약 2.7배로 되었다. 최대 토크에 접착면적을 나눈값을 평균 접착강도 S_a 라고 정의하면, 단일 겹치기이음에서의 평균 접착강도는 아래식과 같이 계산된다.

$$S_a = \frac{\text{Torque}}{2\pi l \times r^2} \quad (1)$$

r 은 접착 단면내에서의 접착제의 중앙점까지의 반지름을 나타내고, l 은 접착길이를 나타낸다. 이중 겹치기이음에서 평균 접착강도를 구하는 식은 아래와 같다.

$$S_a = \frac{\text{Torque}}{2\pi l \times (r_1^2 + r_2^2)} \quad (2)$$

r_1 은 안쪽 피착제의 반지름을 나타내고, r_2 는 바깥쪽 피착제의 반지름을 나타낸다. 단일 겹치기이음과 이중 겹치기이음의 평균 접착강도는 약 26.5 MPa로 거의 같은 값을 가짐을 볼 수 있다.

4.2 유한요소해석

원형으로된 단일 겹치기이음과 이중 겹치기이음의 정적 비틀림 강도시험의 결과와 비교하기 위하여 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석에 사용한 프로그램은 상용 소프트웨어인 ANSYS 4.4A를 사용하였다. 해석에 사용한 요소(element)는

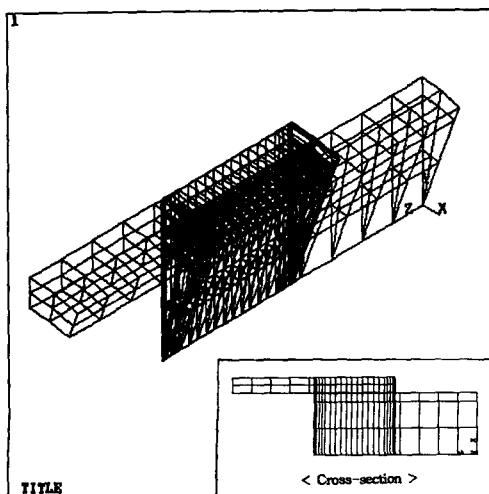


Fig. 11 Finite element mesh for the calculation of the stresses in the single lap joint

8-Node 3-D isoparametric solid element를 사용하였다. 계산시간을 줄이기 위하여, θ -방향의 대칭성을 고려하여 단면의 1/4만 해석하였다. 접착조인트의 양 끝단 부분은 응력집중현상이 크게 발생하므로 접착조인트의 양 끝단부분에 요소를 집중적으로 배치하였다. Fig. 11과 Fig. 12는 해석에 사용한 접착조인트 요소의 일부만 나타낸 그림으로 전체 접착조인트의 1/18에 해당된다. 단일 겹치기이음의 해석에 사용한 전체 절점(node)의 수는 1647개이고, 요소의 수는 1359개이다. 또한, 이중 겹치기이음의 해석에 사용한 절점(node)의 수는 2467개이고, 요소의 수는 2052개이다. 피착제(adherend)로 사용한 강(SM45C) 재료는 선형 탄성재료라고 가정하여 해석하였으며, 강 재료의 물성치는 Table 2에 나타나 있다. 접착제로 사용한 에폭시는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 비선형성이 매우 큰 재료이므로, 비선형 특성을 Multi-linear곡선으로 입력시켜 반복계산에 의한 비선형 해석을 수행하였다. 원

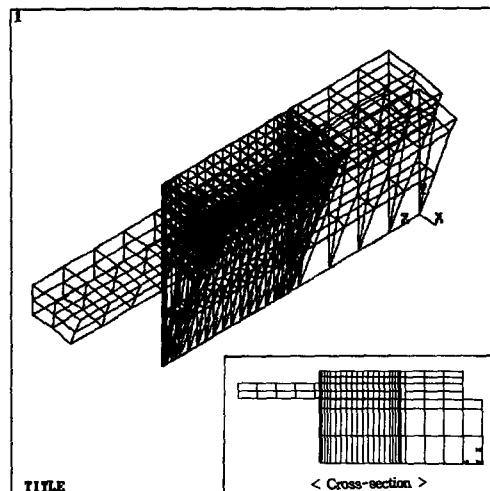


Fig. 12 Finite element mesh for the calculation of the stresses in the double lap joint

Table 2 Mechanical properties of the steel (SM45C) adherend

Tensile modulus(GPa)	200
Tensile strength(MPa)	345
Poisson's ratio	0.33

형튜브 접착의 경우, 토크만 가하는 하중상태에서 는 전단응력만이 존재하므로 접착제의 전단특성을 유한요소해석에 사용하여야 한다. 그러나 대부분의 유한요소해석 프로그램처럼 ANSYS에서도 인장응력-변형률 선도만 재료의 물성값으로 입력하게 되어 있다. 따라서 본 논문에서는 실험으로 구한 접착제의 전단응력-변형률 선도를 아래와 같은 Von-Mises의 파괴조건식⁽¹⁰⁾을 적용시켜, Fig. 13과 같이 인장응력-변형률 선도로 치환시켜 해석하였다.

$$\sigma_y = \sqrt{3} \cdot \tau_y \quad (3)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sqrt{3}\tau_y}{2G(1+\nu)} \quad (4)$$

σ_y : 인장항복강도

τ_y : 전단항복강도

ε_y : 인장항복변형률

ν : 푸아송비

여기서 접착조인트의 파괴조건은 피착제인 강(steel)은 Von-Mises기준을 적용하였으며, 접착제는 Fig. 13에서 보는 바와 같이 변형률이 최대 변형률(ultimate strain)에 도달하면 파괴가 된다고 가정하였다. Fig. 14에서는 유한요소해석에 의한 조인트의 파괴 토크를 계산한 결과와 실험결과를 비교한 그림이다. 단일 겹치기이음의 경우는 14% 범위 내에서, 이중 겹치기이음의 경우는 1% 범위 내에서 예측이 가능하였다. 또한 이중 겹치기이음의 정적 토크전달능력은 단일 겹치기이음에 비해 약 2.7배로 되었다. Fig. 15는 단일 겹치기이음에 토크를 가했을 때 파괴가 일어나기 직전에 접착제가 받는 전단응력분포를 나타낸 그림이고, Fig. 16은 이중 겹치기이음의 경우에 대한 접착제의 전단응력

분포이다.

이중 겹치기이음에서 바깥쪽 피착제 두께가 접착조인트의 강도에 미치는 영향을 알기 위하여 응력분포를 유한요소해석으로 구하였다. Fig. 17에서 보는 바와 같이 바깥쪽 피착제의 두께가 1.5 mm 이하에서는 접착제가 파괴되기 전에 바깥쪽 피착제가 먼저 파괴되는 것을 볼 수 있다. 또한 바깥쪽 피착제의 두께가 1.5 mm를 넘으면 접착조인트의 한쪽 끝단에 접착제의 변형률이 집중되므로 오히려 접착조인트의 강도를 저하시킨다. 따라서 이중 겹치기이음의 설계는 접착조인트의 양쪽 끝단의 변형

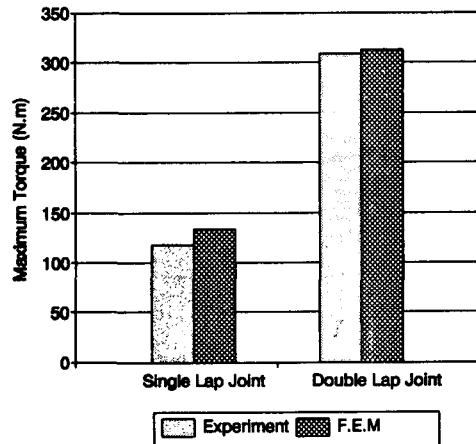


Fig. 14 Comparision of the maximum torques calculated by the finite element analysis and tested by the static torsion test

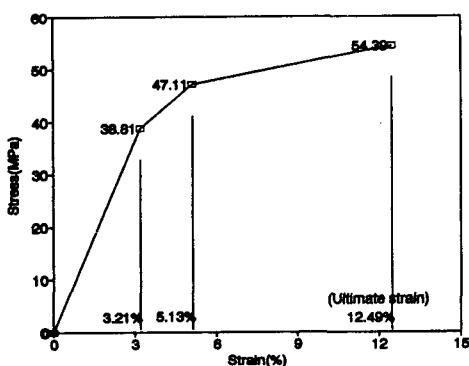


Fig. 13 Multi-linear stress-strain curve

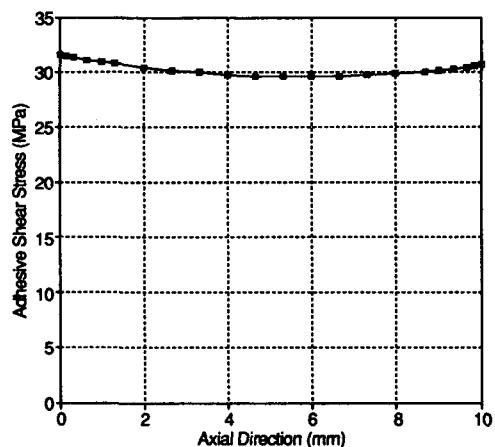


Fig. 15 Shear stress distribution in the adhesive of the tubular single lap joint when the maximum shear strain reached the ultimate shear strain

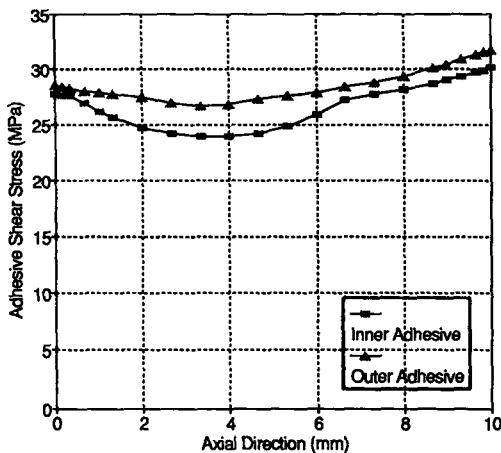


Fig. 16 Shear stress distribution is the adhesive of the tubular double lap joint when the maximum shear strain reached the ultimate shear strain

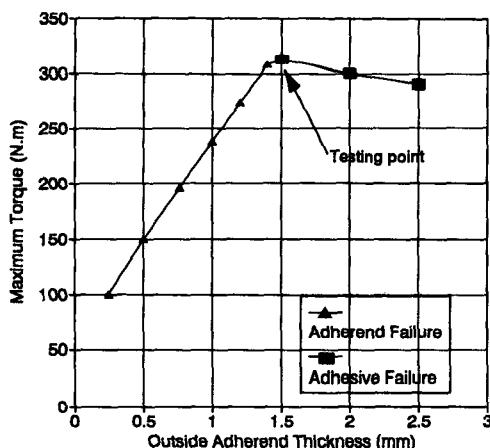


Fig. 17 Effect of the outside adherend thickness on the maximum torque

률이 균일하게 걸리도록 설계하는 것이 바람직하며, 피착제가 먼저 파괴되지 않는 충분한 두께가 요구되어 진다.

5. 피로 비틀림실험

단일 겹치기이음과 이중 겹치기이음의 피로한도를 피로 비틀림실험을 통하여 서로 비교하였다. 실험에 사용한 피로시험기는 일본의 Shimadzu Corp.에서 만든 모델번호 TB-10B로서 기계식 피로시험기에 속한다. 양쪽방향으로 $\pm 50 \text{ Nm}$ 의 토크를 가할 수 있으며 되풀이속도는 33 Hz로 고정되어 있

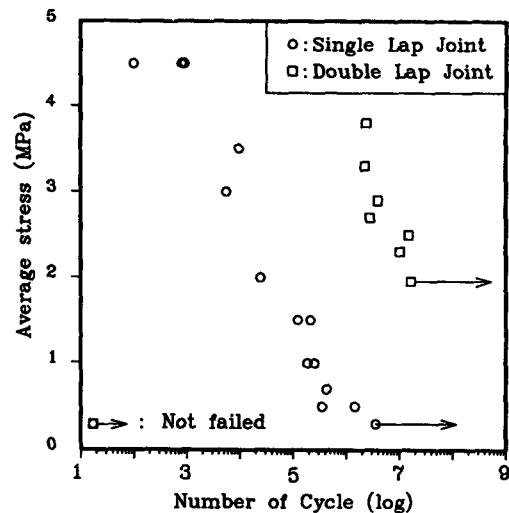


Fig. 18 Fatigue strengths of the single lap joint and the double lap joint

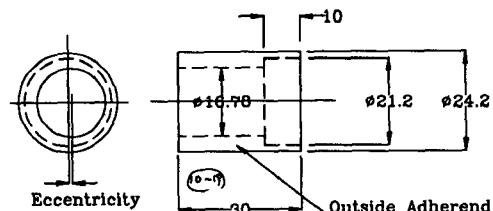


Fig. 19 Outside adherend specimen of the double lap joint having an eccentricity

다. 본 실험에 사용한 시험기의 되풀이 속도는 매우 높은 범위에 속하는데, 피착제가 강(steel)이므로 열 방출이 충분하여 온도 상승이 거의 발생되지 않는다. 따라서 고분자 재료의 피로에서 일반적으로 문제가 되는 되풀이속도에 의한 열피로현상은 발생하지 않는다. 평균 비틀림 피로한도는 단일 겹치기이음과 이중 겹치기이음에 대해 각각 식(1)과 식(2)를 사용하였다. Fig. 18에서 보는 바와 같이, 이중 겹치기이음의 평균 비틀림 피로한도는 단일 겹치기이음보다 약 6.5배로 되었다. 또한 이중 겹치기이음은 접착면적의 크기 및 위치를 고려하면, 이중 겹치기이음의 토크 전달능력은 약 16배로 됨을 알 수 있다. 따라서 이중 겹치기이음은 단일 겹치기이음에 비해 피로특성이 매우 우수한 접착형태임을 알 수 있다.

이중 겹치기이음에 대한 바깥쪽 피착제의 편심효과를 살펴보기 위하여 Fig. 19와 같이 바깥쪽 피착제에 편심을 주어 편심에 의한 피로특성을 살펴보

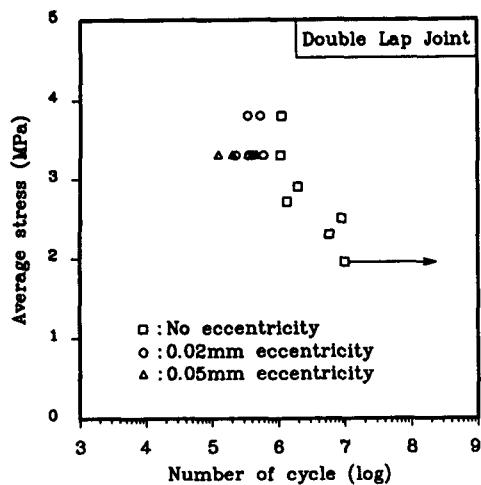


Fig. 20 Effect of the eccentricity of the outside adherend on the fatigue strength

았다. 바깥쪽 피착제에 0.02 mm 와 0.05 mm 의 편심을 가지는 두가지 경우에 대하여 실험하였다. Fig. 20은 이중 겹치기이음에 대한 바깥쪽 피착제의 편심효과를 실험한 결과로서 그림에서 보는 바와 같이 바깥쪽 피착제의 편심이 존재하면 피로수명이 저하됨을 볼 수 있다.

6. 결 론

원형튜브 형태로 된 시편과 실린더 형태의 시편을 접착제로 접착하여 단일 겹치기이음과 이중 겹치기이음의 접착특성에 대한 연구에 있어서 아래와 같은 몇 가지 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 접착제의 비선형 특성을 이용하여 유한요소 해석을 수행하여 단일 겹치기이음의 경우는 14% 범위내에서, 이중 겹치기이음의 경우는 1% 범위내에서 실험에서 구한 최대 토크값과 일치된 결과를 얻을 수 있었다.

(2) 이중 겹치기이음의 평균 접착강도는 단일 겹치기이음과 거의 같은 값을 가지나, 접착면적의 크기 및 위치를 고려하면 정적 토크 전달능력은 단일 겹치기이음에 비해 약 2.7배로 되었다.

(3) 피로 비틀림실험에서는 이중 겹치기이음의 접착형태가 단일 겹치기이음의 접착형태보다 평균 비틀림강도는 6.5배로 되었고, 접착면적의 크기 및 위치를 고려하면 토크 전달능력은 본 시험편의 경우 약 16배로 되므로, 확실한 채결이 필요한 부분

의 접착형태로서 추천된다.

(4) 이중 겹치기이음 형태에서 바깥쪽 피착제의 편심이 존재하면 피로수명이 저하된다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 장기기초연구(ADD-90-5-8)의 재정적 지원에 의한 것으로 관계자 제위께 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Reinhart, T. J., 1987, Composite, ASTM International, pp. 479~495.
- (2) Vinson, J. R. and Sierakowski, R. L., 1987, The Behavior of Structure Composed of Composite Materials, MARTINUS NIJHOFF PUBLISHERS, chap. 8.
- (3) Kutscha, D. and K. E. Hofer, Jr., 1969, Feasibility of Joining Advanced Composite Flight Vehicles, AFML-TR-68-391.
- (4) Adams, R. D. and Peppiatt, N. A., 1977, "Stress Analysis of Adhesive Bonded Tubular Lap Joints," J. Adhesion, Vol. 9, pp. 1~18.
- (5) Chon, C. T., 1982, "Analysis of Tubular Lap Joint in Torsion," J. Composite Materials, Vol. 16, pp. 268~284.
- (6) Hipol, P. J., 1984, "Analysis and Optimization of a Tubular Lap Joint Subjected to Torsion," J. Composite Materials, Vol. 18, pp. 298~311.
- (7) Alwar, R. S. and Nagaraga, Y. R., 1976, "Viscoelastic Analysis of an Adhesive Tubular Lap Joint," J. Adhesion, Vol. 8, pp. 79~82.
- (8) Graves, S. R. and Adams, D. F., 1981, "Analysis of a Bonded Joint in a Composite Tube Subjected to Torsion," J. Composite Materials, Vol. 15, pp. 211~224.
- (9) Lee, D. G., Kim, K. S. and Im, Y. T., 1991, "An Experimental Study of Fatigue Strength for Adhesively Bonded Tubular Single Lap Joints," J. Adhesion, Vol. 35, pp. 39~53.
- (10) Stephen H. Crandall., Norman C. Dahl and Thomas J. Lardner, 1978, An Introduction to the Mechanics of Solids, McGraw-Hill, Chap. 5.