

論文

토오크를 받는 접합 원형 Single Lap 조인트의 피로특성에 관한 실험적 연구

이대길* · 김기수* · 전의진**

Experimental Investigation of the Torsional Fatigue Strength of the Adhesive Bonded Tubular Single Lap Joints

Dai-Gil Lee*, Ki-Soo Kim* and Eui-Jin Jun**

ABSTRACT

The torsional fatigue strength of the adhesive bonded tubular single lap joints was investigated by experimental method. The surface preparation method and the bonding process of the joints for the uniform quality of the test specimens were discussed.

The effects of the adhesive thickness and the surface roughness of the adherends on the torsional fatigue strength of the adhesive bonded tubular single lap joints were investigated.

초 록

접합원형 Single Lap 조인트가 변동하는 토오크를 받을때의 피로특성을 실험적으로 연구하였다. 시편의 균일한 성질을 얻기 위한 접합부위의 표면처리와 접합공정에 관하여 논의하였다.

본 연구에서는 접착제의 두께와 접착부위의 표면 조도가 접합 원형 Single Lap 조인트의 피로특성에 미치는 영향을 규명하였다.

1. 서 론

접착제 (Adhesive)는 물질을 결합시키기 위하여 수세기 동안 사용되어 왔으나, 점착(Adhesion)과

접착제에 대한 과학적인 연구는 주로 지난 50년 동안에 이루어졌다[1].

접착제가 넓게 사용되는 이유는 접착제는 다른 물질에 잘 붙는 성질을 가지고 있을 뿐만 아니라 한 물

* 정회원, 한국과학기술원 생산공학과

** 정회원, 한국기계연구소

질에서 다른 물질로 가하여진 힘을 잘 전달시킬 수 있는 강도를 가지고 있기 때문이다.

섬유로 보강된 복합재료가 재료의 높은 비강성(Specific stiffness), 높은 비강도(Specific strength) 및 높은 감쇠(Damping) 특성때문에 항공기, 우주선, 로봇 팔 및 공작기계에 사용되기 시작하면서[2, 3, 4], 조인트의 설계와 제작은 매우 중요한 연구분야로 대두되었다. 왜냐하면 복합재료로 이루어진 구조의 효율성은, 약간의 예외적인 경우를 제외하고는, 구조 자체보다는 조인트에 의해서 결정되기 때문이다[5]. 조인트의 설계는 조인트가 자주 복합재료 구조중에서 가장 약한 부분이 되기 때문에 특별히 중요하게 된다[6].

접합 조인트는 기계적 조인트에 비하여 여러가지 이로운 점이 있는데, 기계적 조인트보다 넓은 영역에 하중을 분포시키며 구조물에 구멍을 낼 필요가 없으며, 또한 구조물에 거의 부가적인 하중을 가하지 않는다는 점 등이다. 그러나, 접합 조인트는 분해하기가 어려우며, 접합되는 물질의 기하학적인 형상, 표면처리 상태, 사용온도, 습도 및 다른 환경조건에 의해서 많은 영향을 받게 된다.

접합 원형 Lap 조인트에는 Single Lap 조인트, Double Lap 조인트, Stepped Lap 조인트와 Scarf 조인트 등의 종류가 있는데, 이중에서 Single Lap 조인트가 제작하기가 용이하고 비용이 적게들기 때문에 가장 많이 사용된다. 그러나 Single Lap 조인트는 접착층의 양단에서 높은 응력과 응력의 변화를 발생시키는 단점이 있다.

원형의 Single Lap 조인트에 대한 정력학적인 연구는 다른 형상의 조인트에 비하여 많은 연구자들에 의하여 FEM 이나 해석적인 방법으로 연구가 되었다.

Alwar 와 Nagaraja[7]는 토오크를 받는 원형 조인트의 응력을 해석하기 위하여 FEM 을 사용하였는데, 접착제의 성질이 시간에 따라 변화한다는 가정하에서 해석을 하였다.

Adams 와 Peppiatt[8]는 Volkersen[9]의 해석을 개선하여 Fig. 1과 같은 토오크를 받는 원형 조인트의 응력 $\tau_{r\theta}$ 의 해석적인 해를 구하였다. 또한, 그들은 접착부분에 필릿(Fillet)이 있는 경우에 대하여 토오크를 받는 경우와 인장을 받는 경우에 대하

여 FEM 으로 해석을 하였다.

Chon[10]도 Adams의 방법과 거의 유사한 방법에 의하여 접합되는 물질이 복합재료인 경우에 대하여 해석을 하였다.

Hipol[11]은 강철 튜브가 복합재료 튜브에 접합되어 있는 경우에 대하여 토오크를 받을때의 해석을 FEM 을 이용하여 수행하였다.

Graves 와 Adams[12]는 접합된 Orthotropic 복합재료가 토오크를 받는 경우에 FEM 을 이용하여 해석을 하였다. 그들은 복합재료의 각층(Ply)의 성질을 FEM 의 해석에서 고려하였으며, Laminate의 평균값을 사용한 경우와의 결과를 비교하였다.

Hart-Smith[13]는 Single Lap, Double Lap, Scarf Lap 과 Stepped Lap 조인트의 해석을 위한 컴퓨터 프로그램을 개발하였다.

Imanaka[14] 등은 주기적인 하중을 받는 접합 버트(Butt) 조인트에 대한 피로실험을 하였다. 그들은 접착제의 두께가 피로강도에 미치는 영향 및 접착제에 첨가제(Filler)를 가했을 경우의 피로강도에 미치는 영향을 실험하였다.

이와 같이 접합 원형 조인트의 정력학적인 해석은 많이 수행되었으나, 실험적인 연구는 많이 수행되고 있지 않았다. 특히, 동적인 응력을 받는 경우의 접합 조인트에 대한 실험은 많이 수행되고 있지 않다. 그러나 많은 조인트들은 변화하는 응력상태에 있기 때문에, 조인트의 설계는 동 특성이 피로강도에 의거하여 설계하는 것이 타당하다. 피로강도가 중요한 것은 변동하는 응력상태의 구조물은 단순한 응력을 받는 구조물 보다 훨씬 낮은 응력상태에서 파괴가 발생하거나, 같은 진폭의 응력상태라도 변동하는 응

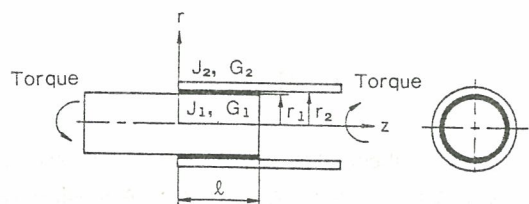


Fig. 1 Adhesive bonded tubular single lap joint subjected to a torque.

력상태의 구조물은 단순 응력상태의 구조물보다 훨씬 짧은 시간에 파괴가 발생하기 때문이다[1].

접합 조인트의 정적 강도와 동적 강도에 영향을 미치는 인자는 매우 많아서 접착되는 물질의 표면구조, 접착제의 두께, 접착되는 물질의 기하학적인 형상, 경화조건 및 사용되는 환경조건(압력, 온도, 습도)에 의하여 영향을 받게 된다.

본 연구에서는 접착제의 두께와 접착되는 물질의 표면 조도가 접합 원형 Single Lap 조인트의 피로 강도에 미치는 영향을 실험적으로 규명하였다. 접착되는 물질은 접착제의 두께와 접착되는 물질의 표면을 정확히 제어하기 위해 탄소함유량이 0.45%(SM 45C)인 강철만을 사용하였다.

2. 접착제로 사용한 에폭시의 성질

실험에 사용한 접착제는 에폭시 수지이고, 한국 IPCO 9923을 사용하였으며, 이 재료는 접합 및 수리용도로 사용하기 위하여 인성을 강화한(Toughened) 수지이다. 수지와 경화제의 비율은 무게로 1:1이고, 경화시간은 25°C에서 75분이며, 최고 사용온도는 120°C이다.

Fig. 2는 에폭시 수지의 인장실험 결과를 보여주며, Table 1은 에폭시 수지의 기계적 성질을 나타낸다.

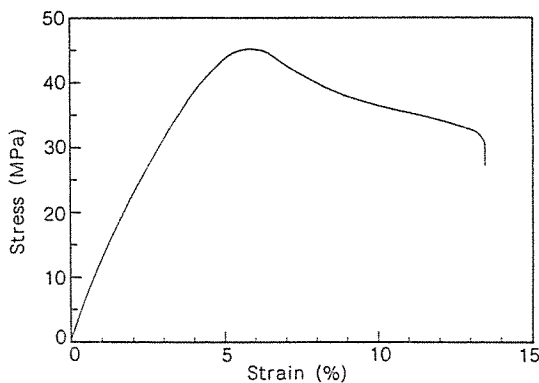


Fig. 2 Tensile stress-strain behavior of the epoxy resin (IPCO 9923) used in the adhesive joint.

Table 1. Properties of the epoxy adhesive (IPCO 9923)

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

3. 시험편

시험편의 모양과 크기는 접합 조인트의 이론에 근거하여 제작되어야만 한다. Adams와 Peppiatt [8]는 Fig. 1과 같은 원형 Single Lap 조인트가 토오르크 T를 받는 경우에 대하여 필릿(Fillet)이 없는 상태에서 접착제가 받는 전단응력 τ_{θ} 를 다음과 같이 유도하였다.

$$\tau_{\theta} = \frac{T\alpha}{2\pi a^2} \left[\left(\frac{1 - \Psi(1 - \cosh \alpha \ell)}{\sinh \alpha \ell} \right) \cosh \alpha z - \Psi \sinh \alpha z \right] \dots\dots\dots (1)$$

여기서,

$$\Psi = \frac{G_2 J_2 r_1}{r_2 G_1 J_1 + r_1 G_2 J_2} \dots\dots\dots (2)$$

$$\delta = \frac{2\pi a^2 r_1 G_a}{G_1 J_1 \eta} \dots\dots\dots (3)$$

$$\alpha = \left(\frac{\delta}{\Psi} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (4)$$

$$a = \frac{r_1 + r_2}{2} \dots\dots\dots (5)$$

$$\eta = r_2 - r_1 \dots\dots\dots (6)$$

로 정의되며, J_1 과 J_2 는 접착되는 물질의 단면 2차극 모멘트이며, G_1 , G_2 는 접착되는 물질의 가로탄성계수(Shear modulus), G_a 는 접착제의 가로탄성계수이고, r_1 과 r_2 는 접착제의 내면과 외면의 반경을 나타낸다.

식(1)에 의하면 Ψ 가 0.5보다 클때 $z=0$ 에서의 전단응력이 $z=\ell$ 에서의 전단응력 보다 크다. 전단응력이 최소로 되는 값은 z 의 중간값이다. 이 z 의 최

소값을 z_{min} 으로 표현하면 다음과 같다.

$$z_{min} = \frac{1}{2\alpha} \ell \ln \frac{1 - \Psi + \Psi \cosh \alpha \ell + \Psi \sinh \alpha \ell}{1 - \Psi + \Psi \cosh \alpha \ell - \Psi \sinh \alpha \ell} \quad (7)$$

본 연구에서는 접착제의 두께가 0.254mm(10 mil) 일때, 양단에서 접착제에 발생하는 전단응력이 같게 되는 조건을 접착제의 길이로 택하였다. 이 경우 강철 시험편의 모양을 Fig. 3과 같이 취하면 접착부분의 길이는 $\ell = 15\text{mm}$ 가 된다.

$\ell = 15\text{mm}$ 인 상태에서 접착제의 두께 η 를 변화시키면 정적인 토오크 전달능력이 변화하게 되는데, 최대 토오크 전달능력 T_{max} 와, 이때 접착제가 받는 평균 전단응력 τ_a 를 접착제의 두께변화에 대한 그래프로 표시하면 Fig. 4와 같다. 여기서 τ_a 는 다음과 같이 정의되었다.

$$\tau_a = \frac{T_{max}}{2\pi a^2 \ell} \quad (8)$$

Fig. 4에서 알수 있는 바와 같이 접착부분의 길이를 일정하게 하면서 접착제의 두께를 1mm에서부터 0.1mm로 감소시키면 최대 토오크 전달능력이 1.5배 정도 감소하며, 이때 접착제에 발생하는 평균 전단응력 τ_a 는 1.7배 감소한다. 이와같이 정적 하중 상태에서 접착제의 두께가 감소하면 토오크 전달능

력이 감소하는 현상은 Hipol[11]에 의해서 FEM으로 증명된 결과이다. Fig. 4에서 T_{max} 는 접착제의 두께가 0.8mm 상태에서 포화되며, 1.0mm 보다 증가하면 오히려 약간 감소하는 현상이 나타난다.

본 실험에 사용된 에폭시의 전단 강도(ASTM D-1002-72)가 13.7MPa인 것을 고려하면, 접착제의 두께가 작아지면 정적 하중상태에서는 접착제의 효율이 매우 떨어지는 것을 알수 있다.

접합되는 면의 조도를 일정하게 하기 위하여 접착

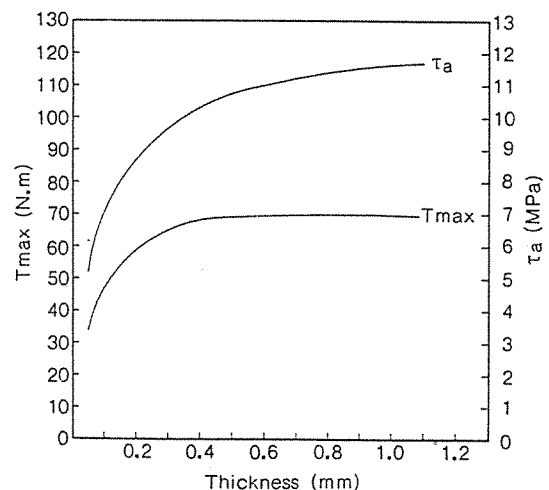


Fig. 4 Effects of the adhesive thickness on the maximum static torque transmission capability (T_{max}) and the average shear stress (τ_a) in the adhesive when T_{max} is applied to the joint of Fig. 3 (Calculated from Eqn. 1).

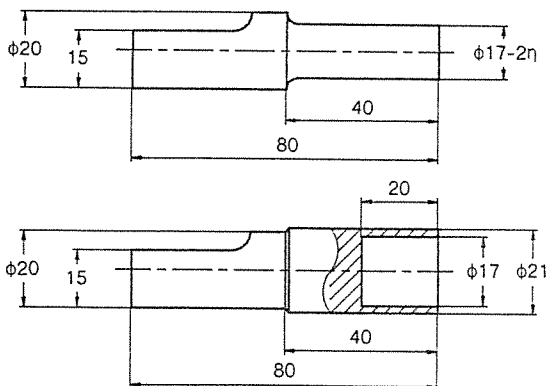


Fig. 3 Dimensions of the adherends of the tubular single lap joints.

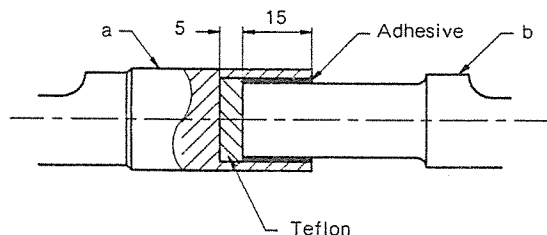


Fig. 5 Adhesive bonded tubular single lap joint tested in the fatigue experiments.

부분의 내부에 들어가는 시험편의 외부면은 선삭을 하였고, 외부에 들어가는 시험편의 내부면은 보링을 하였다. Fig. 5는 외부와 내부 시험편을 접착제를 사용하여 접합한 상태를 보여주고 있다.

접착제로 접합하는 과정에서 접합되는 물질의 표면 조도를 잘 제어하는 것은 필수적이기 때문에, 가공한 후의 시험편의 표면 조도를 표면 조도계로 측정하였다. 사용한 표면 조도계는 일본의 KOSAKA에서 만든 SZ-3A형이다.

Fig. 6a는 선삭된 표면의 조도를 보여주며, 선삭된 면은 절삭속도와 이송 및 절삭깊이가 각각 96m/min, 0.11mm/rev, 0.2mm 일 때의 표면 조도를 보여주고 있다. Fig. 6b는 Mesh 180인 사포(Sand paper)로 연마한 후의 조도를 보여준다.

가공된 표면의 표면조도 R_a 는 절삭이론(15)에 의하여 다음과 같이 표시된다.

$$R_a = \frac{0.032 f^2}{r_a} \dots\dots\dots (9)$$

여기서 R_a 는 산술 평균 조도를 나타내며, 조도의 중앙으로부터 진폭을 나타내며, f 는 이송(mm), r_a 는 절삭공구의 날끝 반경을 나타낸다. Fig. 6a에서 보이는 바와 같이 가공된 면의 표면은 여러개의 날카로운 점과 불규칙한 조도를 보여주고 있다. 이러한 날카로운 점과 불규칙한 조도는 접합면이 주기적인 응력상태에 있을때 균열의 개시점으로 작용할 수 있기 때문에 사용이 불가능하다는 결론을 얻었다.

또한 가공면 표피층에는 전단변형으로 인하여 소재의 성질과는 다른 가공 변질층이 존재한다. 이 가공 변질층 중에서 접합 강도에 큰 영향을 미치는 인자는 공구인선의 마멸로 인하여 발생하는 백색둔화 현상이다. 백색둔화 현상은 버어닝(Burnishing)을 한 것과 같이 가공면에 광택이 나타나게 되는데, 이때의 가공면은 접착성을 저하시킨다.

따라서 본 연구에서는 가공 변질층, 불규칙한 조도를 조절하기 위하여 가공면을 마른 상태에서 사포로 여러 방향으로 잘 연마한 후에 표면 조도가 어떻게 변화하는가를 관찰하였다. 사포를 이용하여 가공

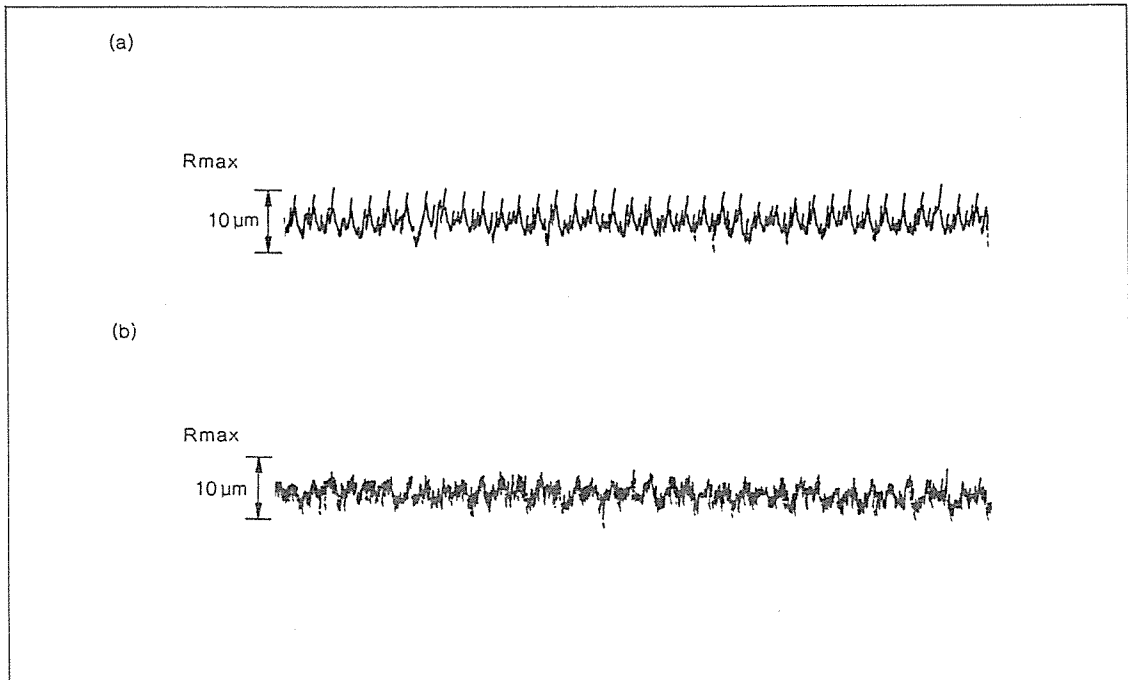


Fig. 6 Surface roughnesses of the adherends a) turned with a lathe, b) abraded with a sand paper (Mesh number 180).

면을 조절할 때, 표면 조도는 피삭재 재질, 메시 숫자, 연마속도(Abrasive speed), 가압력, 기계 가공 후의 표면 조도 등에 영향을 받는다. 그러나 이러한 조건들이 표면 조도에 미치는 영향에 대하여 정확한 정량적인 결과를 얻지는 못하였지만 SM 45C에 대하여 연마속도가 빠를수록, 메시 숫자가 클수록, 가압력이 작을수록 표면 조도는 작아지며, 기계가공 후의 표면 조도에 따라 표면 조절시간이 좌우된다는 사실을 관찰할 수 있었다.

Fig. 7은 직경이 20mm인 피삭재 SM 45C를 선반에서 회전시키면서 평평한 면에 부착시킨 사포로 연마한 후 조도를 측정한 결과이다. 연마조건은 연마속도 4~4.5m/min, 기계 가공 후의 표면 조도 $R_a=1\sim1.3\mu\text{m}$ 이고, 사포에 가한 힘이 300N 정도 일 때, 사포의 메시 숫자와 표면 조도와 관계를 보여주고 있다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 사포의 메시가 400보다 작으면 표면 거칠기의 변화폭이 심하다. 이것은 가압력 조절의 곤란함, 사포의 눈 메움 등에 의한 것으로 생각된다. 또한 사포의 메시가 400보다 크면 연마된 면의 표면 조도에 영향을 거의 미치지 않는 것을 보여주고 있다.

시편의 구조상 Fig. 5에서 a와 b는 각각 속이 찬 원통과 관의 연결이기 때문에 이들 각각의 단면 이차 극 모멘트 값의 차이가 생기므로, 속이 찬 원통 a

의 영향을 제거하기 위하여 일정한 간격을 띄웠으며, 내부 시편의 끝면이 접합되지 않도록 Fig. 5와 같이 외부 시편의 바닥에 테프론(Polytetrafluoroethylene)을 넣었다.

에폭시는 수분을 흡수하면 성질의 저하를 가져오기 때문에 수지와 경화제를 섞은 에폭시를 용기에 넣어 진공하에서 공기방울을 제거한 후, 주사기에 넣은후 에폭시를 바깥 시편의 바닥부터 천천히 채운 다음 안쪽 시편을 바닥까지 밀어 넣었다.

원형 시편을 접착제로 접합할때 가장 중요한 것중의 한가지는, 안쪽 시편과 바깥쪽 시편이 편심되지 않게 고정된 후 접합시켜야 한다는 점이다. 본 연구에서는 Fig. 8과 같이 V 블록을 사용하여 접합시의 편심을 제거하였다.

이렇게 만들어진 시편속에 남아있을지도 모르는 공기방울들의 크기를 줄이기 위하여, 에폭시의 경화는 Autoclave 내에서 0.6MPa의 압력을 가한 상태에서 경화시켰다. 본 실험에 사용한 에폭시는 80°C 근처에서 점성이 가장 작게 되므로 Autoclave 온도를 80°C로 하여 18시간 동안 경화시켰다. 이렇게 경화시킨 시편은 30°C를 유지하는 항온기에 넣어 6일동안 보관하여 완전히 경화시킨후 실험을 하였다.

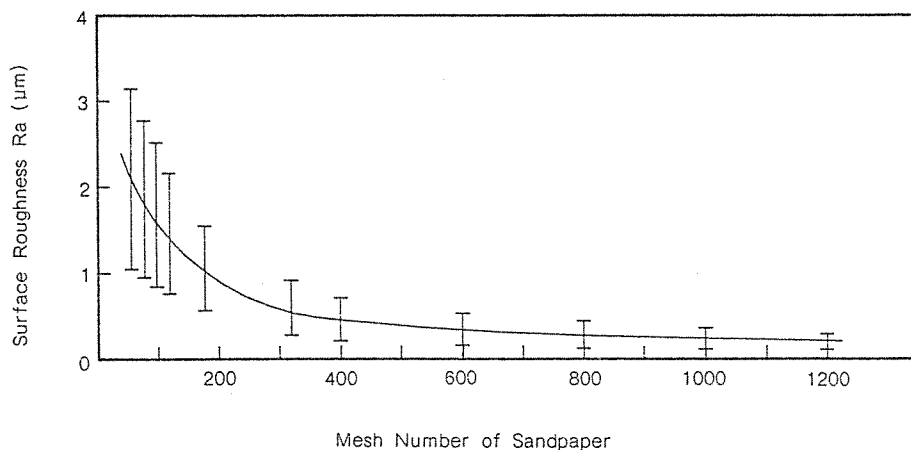


Fig. 7 Relationship between the surface roughness and the mesh number of the sand paper (Adherend diameter 20mm, Abrasion speed 4-4.5m/min).

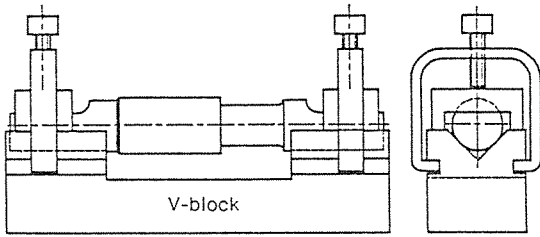


Fig. 8 V-block used in the adhesive bonding to remove eccentricity between adherends.

4. 실험

본 연구에 사용한 피로시험기는 일본의 Shimadzu 회사에서 제작한 TB-10형 기계로써, $\pm 50\text{N}\cdot\text{m}$ 의 토오르크를 가할 수가 있다. 이 피로시험기는 편심이 진 질량을 회전시켜서 토오르크를 얻으며, 토오르크의 주파수는 2,000 RPM으로 정하여져 있다. 이렇게 빠른 주파수는 접착제에 파괴가 생기기 시작하면 접착제의 온도를 상승시킬 염려가 있으나, 본 연구에서 사용한 시편은 접합된 부분이 강철이므로 접착제에서 발생한 열이 쉽게 발산될 수가 있기 때문에 토오르크 주파수 문제는 고려에 넣지 않았다.

본 연구에서는 시편의 평균 피로강도 S_a 를 다음과 같이 정하였다.

$$S_a = \frac{T_{\text{amp}}}{2\pi a^2 \ell} \dots\dots\dots (10)$$

여기서 T_{amp} 는 조인트에 가해진 변동하는 토오르크의 진폭을 나타내며, 모든 실험은 응력비 $R=-1$ ($R=\sigma_{\text{min}}/\sigma_{\text{max}}$)인 상태에서 수행되었다.

5. 실험결과 및 고찰

Fig. 9는 메시가 100인 사포로 시험편을 연마한 후 접착부분의 두께를 1mm로 하여 피로시험한 결과를 나타낸다. 이 결과는 피로 한도가 3.5MPa 정도가 됨을 보여주고 있다. 사용한 에폭시 재료의 전단강도가 13.7MPa인 것을 고려하면 접착 조인트의 피로 한도는 재료의 전단강도의 35%이내인 것을 알수가 있다.

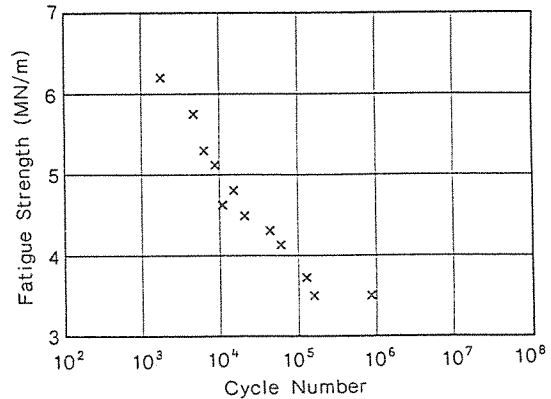


Fig. 9 Fatigue life-fatigue strength of the adhesive bonded tubular single lap joint (The fatigue strength is the average shear stress in the adhesive and the adhesive thickness is 1mm).

Fig. 10은 표면 조도와 수명과의 관계를 알기 위하여 접착부분의 두께를 1mm로 하고, 피로응력의 진폭을 4.0MPa로 하였을 경우의 결과를 보여준다. Fig. 10은 사포로 연마한 시편의 표면 조도를 표면 조도계로 측정한 후, 피로시험을 한 결과이다. Fig. 10에서 표면 조도가 $1\mu\text{m}$ 이하에서는 접착제의 경계면에서 파괴가 발생하여 급격히 피로수명이 떨어지고, $1.5\mu\text{m}$ 로부터 $2.5\mu\text{m}$ 까지는 기울기의 변화가 둔화되어 거의 일정하며, $2.5\mu\text{m}$ 이상에서는 수명이 다시 감소하는 결과를 얻었다. 그러므로 피로수명은 표면 조도가 $1.5\mu\text{m}$ 에서 $2.5\mu\text{m}$ 사이에서는 조도에 민감한 편이 아니며, 최적 접합조건은 $2\mu\text{m}$ 부근임을 알수 있다.

Fig. 11은 접착제의 두께와 피로수명과의 관계를 나타내는 실험결과이다. 시편의 표면 조도는 R_a 를 $1.5\mu\text{m}$ 에서 $2.5\mu\text{m}$ 이내가 되도록 조절하였고, 피로응력의 진폭을 4.0MPa로 일정하게 하여 실험하였다. Fig. 11에서 접합 조인트의 피로특성은 접착제 두께가 감소할수록 좋은 결과를 보여주고 있다. 그러나 실제 접합작업을 할때 접착제의 두께가 0.15mm 이하가 되면 편심이 없는 상태에서 접합을 하는 것이 매우 힘들다는 것을 발견하였다. 따라서 접착제의 두께는 0.15mm 정도로 하는 것이 좋다는 결론을 얻었다.

Fig. 11에서 보는 바와 같이 접합 조인트의 두께에 대한 토오크 특성은 정적 하중상태에서의 값과 동적 하중상태에서의 값이 매우 다르다. 두께가 0.15mm 인 접합 조인트의 피로한도는 4.0MPa 정도가 되어 접착제내의 평균 전단응력 τ_a 의 50%까지 증가함을 알수가 있다. 이와 같이 접착제의 두께가 증가하면 정적인 토오크 전달능력은 증가하나 피로

강도는 감소한다. 이것은 접착제의 두께가 증가하면 접착제내에 공기방울 같은 결함이 발생하는 것 때문으로 추정된다.

6. 결 론

본 연구에서는 접합 원형 Single Lap 조인트가 변동하는 토오크를 받는 경우에 대하여 피로강도와 수명에 대한 실험을 행하였으며, 실험의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 접착면의 최적 표면 조도(R_a)는 $2\mu\text{m}$ 정도이고, 1.5와 $2.5\mu\text{m}$ 사이에서는 피로강도에 큰 영향을 미치지 않는다.

(2) 접착제의 두께가 증가하면, 접합 조인트의 정적인 토오크 전달능력은 빠르게 증가하다가 곧 포화상태에 도달하나 피로한도는 접착제의 두께가 얇을수록 증가한다. 그러나 접착제의 두께가 너무 얇으면 접합작업이 어려워지므로, 접착두께 0.15mm가 추천된다.

참고문헌

1. Kinloch, A.J., *Adhesion and Adhesives*, Chapman and Hall, Chap. 1, Chap. 4 and Chap. 8(1987)
2. Vorlicek, P.L., *Material Damping of Aluminum and Graphite/Epoxy in a Simulated Zero-Gravity Environment*, S.M. Thesis, Dept. of Aeronautics and Astronautics, M.I.T.(1981)
3. Asada, H. and Youcef-Toumi, K., *Direct-Drive Robots*, The MIT Press, pp.8-11(1987)
4. 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(International Institution for Production Engineering Research)*, 34(1): 365-369(1985)
5. ASM International, *Composites*, pp.479-495(1987)
6. Mallicak, P.K., *Fiber-Reinforced Composites*, Marcel Dekker, Inc., pp.417-418(1988)
7. Alwar, R.S. and Nagaraja, Y.R., "Vis-

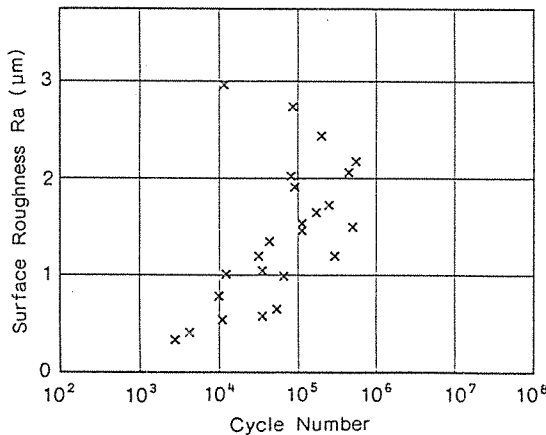


Fig. 10 Effect of the surface roughness on the fatigue strength of the adhesive bonded tubular single lap joint (Adhesive thickness: 1mm, Shear stress amplitude: 4.0 MPa).

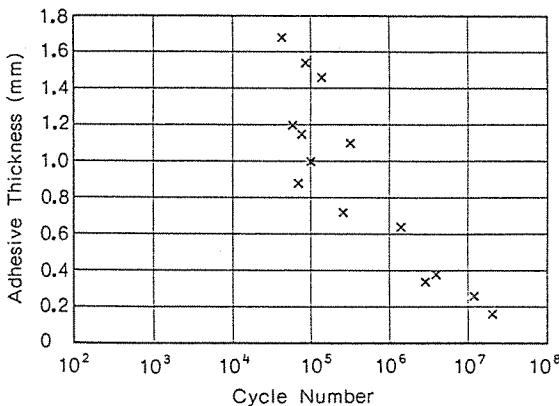


Fig. 11 Fatigue life-adhesive thickness behavior of the adhesive bonded tubular single lap joint (Shear stress amplitude : 4.0 MPa, $1.5\mu\text{m} < R < 2.5\mu\text{m}$).

coelastic Analysis of an Adhesive Tubular Joint," Journal of Adhesion, Vol. 8, pp.79-92(1976)

8. Adams, R.D. and Peppiatt, N.A., "Stress Analysis of Adhesive Bonded Tubular Lap Joints," Journal of Adhesion, Vol. 9, pp.1-18(1977)

9. Volkersen, O., "Recherches sur la Theorie des Assemblages Colles," Construction Metallique, Vol. 4, pp.3-13(1965)

10. Chon, C.T., "Analysis of Tubular Lap Joint in Torsion," Journal of Composite Materials, Vol. 16, pp.268-284(1982)

11. Hipol, P.J., "Analysis and Optimization of a Tubular Lap Joint Subjected to Torsion," Journal of Composite Materials, Vol. 18, pp.298-311(1984)

12. Graves, S.R. and Adams, D.F., "Analysis of a Bonded Joint in a Composite Tube Subjected to Torsion," Journal of Composite Materials, Vol. 15, pp.211-224(1981)

13. Hart-Smith, L.J., "Further Development in the Design and Analysis of Adhesive Bonded Structural Joints," in Joining of Composite Materials, ASTM Special Technical Publication, 749: 3-31(1984)

14. Imanaka M. and et al., "Improvement of Fatigue Strength of Adhesive Joints Through Filler Addition," Journal of Composite Materials, Vol. 18, pp.412-419(1984)

15. Boothroyd, G., *Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools*, McGraw-Hill Book Company, pp.134-138(1981)