

경화 압력이 접착 조인트의 비틀림 피로 특성에 미치는 영향

황희윤[†] · 김병중* · 이대길**

Effects of the curing pressure on the torsional fatigue characteristics of adhesively bonded joints

Hui Yun Hwang, Byung Jung Kim and Dai Gil Lee

Key Words : Curing Pressure(경화 압력), Adhesively Bonded Joint(접착 조인트), Fatigue(피로)

Abstract

Adhesive joints have been widely used for fastening thin adherends because they can distribute the load over a larger area than mechanical joints, require no hole, add very little weight to the structure and have superior fatigue resistance. However, the fatigue characteristics of adhesive joints are much affected by applied pressure during curing operation because actual curing temperature is changed by applied pressure and the adhesion characteristics of adhesives are very sensitive to manufacturing conditions. In this study, cure monitoring and torsional fatigue tests of adhesive joints with an epoxy adhesive were performed in order to investigate the effects of the applied pressure during curing operation. From the experiments, it was found that the actual curing temperature increased as the applied pressure increased, which increased residual thermal stress in the adhesive layer. Therefore, the fatigue life decreased as the applied pressure increased because the mean stress during fatigue tests increased due to the residual thermal stress.

기호설명

a : 접착층의 평균 반경 (m)
 D : 소산계수
 L : 접착 길이 (m)
 T : 비틀림 하중 (Nm)
 t : 경화 시간 (min)
 τ_{avg} : 평균 전단응력 (MPa)

1. 서론

조인트를 가지는 구조물의 구조 효율성은 대부분 구조물 보다는 조인트에 의하여 결정되기 때문에, 많은 연구자들에 의하여 분리된 두 부품의 연결

을 위한 조인트의 설계에 관한 연구가 수행되어 왔다⁽¹⁻²⁾. 특히, 접착 조인트는 기계적 접합부에 비하여 넓은 면적에 하중을 분산시킬 수 있으며, 구멍 가공을 요하지 않으면서도 우수한 피로 특성을 가지기 때문에 금속이나 복합재료의 결합에 널리 사용되어 왔다. 접착 조인트의 성능에 영향을 주는 인자로는 피접착체의 표면처리 조건, 사용 온도나 습도와 같은 사용 환경, 경화 온도와 경화 압력과 같은 제작 조건, 조인트의 형상 등이 있다⁽³⁻⁵⁾.

특히, 접착 조인트의 실제 경화 온도는 제작 시 가해지는 경화 압력이 변하면 공기의 밀도 변화에 따른 열전달 계수의 변화에 의하여 변하게 되며, 이로 인하여 피접착체와 접착체의 열팽창계수 차이에 의하여 발생하는 잔류 열응력의 크기도 변하게 된다. 잔류 열응력은 접착 조인트의 정적 강도 및 피로 수명에 영향을 주므로, 경화 압력에 따른 접착 조인트의 정적 강도 및 피로 수명에 관한 연구는 필수적이다⁽⁶⁻⁹⁾. Kim 등⁽¹⁰⁾은 경화 압력에 따른 접착 조인트의 경화 모니터링

[†] 한국과학기술원 기계공학과
 E-mail : yellow@kaist.ac.kr
 TEL : (042)869-3261 FAX : (042)869-5202

* 한국과학기술원 기계공학과

** 한국과학기술원 기계공학과 정교수

을 통하여 실제 경화 온도의 변화를 관찰하였으며, 접착 조인트의 정적 강도 변화를 경화 온도에 따른 잔류 열응력의 크기를 이용하여 설명하였다. 그러나, 경화 압력에 따른 접착 조인트의 피로 특성에 관한 연구는 미비한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 경화 압력이 접착 조인트의 피로특성에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하였다. 접착 조인트의 경화 모니터링을 통하여 경화 압력에 따른 실제 경화 온도를 얻었으며, 비틀림 피로 실험을 통하여 경화 압력에 따른 접착 조인트의 피로 특성을 파악하였다. 또한, 실제 경화 온도를 고려한 접착 조인트의 유한요소해석을 수행하여 경화 압력에 따른 접착층의 잔류 열응력 분포를 분석하였으며, 실험 결과와 응력 분석 결과로부터 경화 압력과 접착 조인트의 피로특성의 관계를 규명하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 실험 재료

원통형 단일 겹치기 접착 조인트 제작을 위하여 에폭시 계열의 접착제인 AW106/HV953 (Vantico, Inc., Japan)를 사용하였다. Table 1은 본 연구에서 사용한 접착제와 피접착제의 기계적 물성을 나타내며, Fig. 1는 접착제의 응력-변형을 선도를 나타내고 있다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 접착제는 탄성 영역 내에서도 비선형 거동을 보이고 있으므로, 유한요소해석에서 비선형 거동을 고려하였다.

2.2 시험편 형상 및 제작

실험에 사용된 원통형 단일 겹치기 접착 조인트의 형상은 Fig. 2와 같다. 강철로 된 원형 튜브 형태의 바깥쪽 피접착제와 실린더 형태의 안쪽 피접착제를 접착제를 사용하여 단일 겹치기 형태로 접착하였다. 두 피접착제의 접착면은 80 메쉬 사포로 표면 처리를 하였으며, 이 때의 평균 표면 거칠기는 약 $2 \mu\text{m}$ 였다. 안쪽과 바깥쪽 피접착제의 안내면 (Guide surface)은 정밀하게 가공되어 접착제의 성형 시 정밀한 V-블록에 피접착제의 안내면을 올려 놓음으로써 두 피접착제의 중심이 일치하도록 유지시킬 수 있었다. 두 피접착제 사이에는 테프론으로 제작된 스페이서를 삽입하여, 접착길이를 일정하게 유지하였으며, 피접착제 사이의 원주 방향으로만 접착이 되도록 하였다. 조립된 접착 조인트는 80°C 의 온도에서 2 시간 동안 어러 압력에서 오토클레이브를 이용하여 경화시켰다.

Table 1 Mechanical properties of the epoxy adhesive and the steel adherend used

	Adhesive (AW106/HV953)	Adherend (Steel)
Young's modulus (GPa)	1.42	210
Poisson's ratio	0.45	0.30
Tensile strength (MPa)	26.7	350.0
C.T.E ($1/^\circ\text{C}$)	66.0×10^{-6}	11.7×10^{-6}

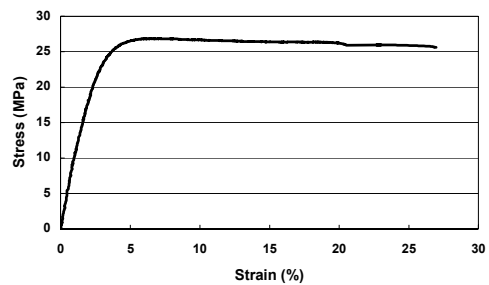


Fig. 1 Stress-strain curve of the epoxy adhesive used.

2.3 접착 조인트의 경화 모니터링 실험

경화 압력이 접착 조인트의 경화 반응에 미치는 영향을 조사하기 위하여 유전기법을 이용하여 경화 모니터링 실험을 수행하였다. 유전기법은 고분자 재료의 경화과정을 연속적으로 모니터링 할 수 있는 방법으로, 경화 과정 중 에폭시 접착제의 소산계수 D (Dissipation factor)를 측정하여 접착제의 경화 정도를 추정할 수 있다⁽¹¹⁾.

경화 모니터링 실험 장치는 Fig. 3에 나타난 것과 같이 접착 조인트, LCR meter (ELC-133A, Escort, Taiwan), K-type thermocouple 및 PC로 구성된다. 경화 모니터링 실험으로부터 접착 조인트의 경화 공정 중 접착제의 온도 및 소산계수, 오토클레이브 내부 온도를 실시간으로 측정하였다.

2.4 접착 조인트의 비틀림 피로 실험

앞에서 언급한 바와 같이 경화 압력을 달리하면서 제작된 접착 조인트의 피로 특성을 파악하기 위하여 Instron 8032 (Instron Co., USA) 비틀림 전용 시험기를 사용하여 비틀림 피로 실험을 수행하였다. 하중 조절 (Load control) 방식으로 10 Hz의 가진 주파수, $\pm 40.4 \sim \pm 53.8 \text{ Nm}$ 의 비틀림 피로 피로하중을 주었으며, 이는 접착층에 $6.0 \sim 8.0 \text{ MPa}$ 의 평균 전단 응력 (Average shear stress)으로 작용한다. 토크 T 가 가해질 때, 접착층의 평균 전단응력 τ_{avg} 은 다음의 식 (1)로 계산할 수 있다.

$$\tau_{\text{avg}} = \frac{T}{2\pi r^2 L} \quad (1)$$

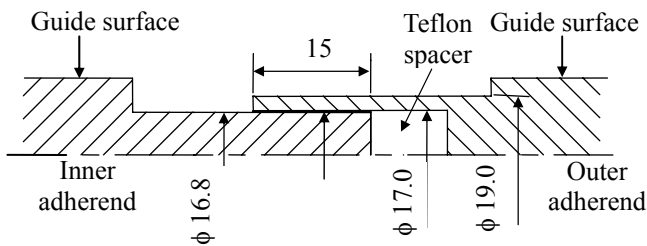


Fig. 2 Configuration of the adhesively bonded tubular single lap joint (Units in mm)

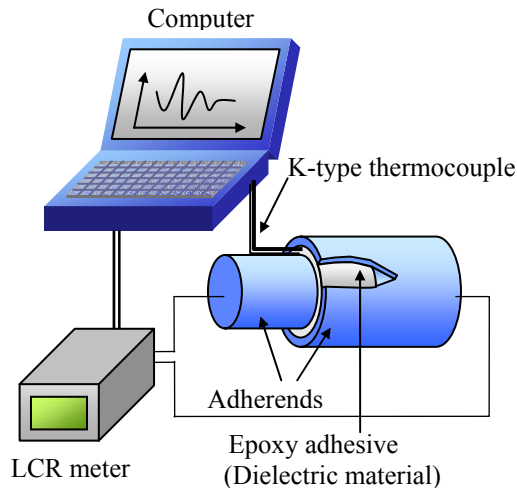


Fig. 3 Configuration of cure monitoring experimental setup

피로 수명에 대한 주위 온도의 영향을 제거하기 위해 피로실험이 진행되는 동안 주변 온도를 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지시켰다.

2.5 접착 조인트의 잔류 열응력 해석

접착 조인트의 접착제가 상온 이상의 온도에서 경화되면 접착제와 피접착체 사이의 열팽창 계수 차이에 의한 잔류 열응력이 발생하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 비틀림 하중을 받는 접착 조인트의 접착층에 걸리는 최대 전단응력과 잔류 열응력을 구하기 위하여 ABAQUS 6.4 (Hibbit, Karlsson & Sorensen, USA)를 이용하여 유한요소 해석을 수행하였다.

Fig. 4 는 접착 조인트의 응력을 계산하기 위한 유한요소 모델을 나타내고 있다. 유한요소 해석에는 8 절점 축대칭 등매개변수 요소를 사용하였고, 전체 요소 개수는 4,322 개이다. 접착제의 비선형 물성을 고려하기 위하여, Fig. 1 의 응력-변형을 선도를 50 개의 Multi-linear strain-hardening approximation 으로 근사하여 해석에 사용하였다 (12).

유한요소해석은 경화 모니터링 결과로부터 얻은 실제 경화 온도를 고려한 잔류 열응력 해석과 주

어진 비틀림 하중에 대하여 접착층에 걸리는 최대 전단응력 해석을 순차적으로 수행하였다.

3. 실험 및 해석 결과

3.1 접착 조인트의 경화 모니터링 결과

Fig. 5 는 경화 압력이 0, 2 및 4 기압일 때의 경화 모니터링 결과를 보여주고 있다. Fig. 5 로부터 경화 압력이 높은 경우 경화 시간에 따른 오토클레이브 내부 온도 곡선은 동일하지만, 접착층의 온도가 더 빨리 상승하며, 경화 정도를 나타내는 소산계수의 변화가 없는 시점 ($dD/dt=0$), 즉 경화 완료 시점도 빨라짐을 알 수 있었다. 경화 완료 시점에서의 접착층 온도가 실제 경화 온도이며, 경화 압력에 따른 실제 경화 온도의 변화는 Fig. 6 에 나타나있다. 오토클레이브 내부 온도가 80°C 로 동일하더라도, 경화 압력이 증가함에 따라서 접착 조인트의 실제 경화 온도가 증가하게 되는데, 이것은 경화 압력이 높아지게 되면 오토클레이브 내부 공기의 대류 열전달 계수가 높아지기 때문이다.

3.2 접착 조인트의 비틀림 피로실험 결과

Fig. 7 은 경화 압력에 따른 접착 조인트의 비틀림 피로 수명을 나타내고 있다. 접착 조인트에 가해지는 평균 전단 응력이 각각 6, 8MPa 인 경우 모두 경화 압력이 증가함에 따라서 피로 수명은 감소하였다. 특히, 경화 압력이 0.0 MPa 에서 0.1 MPa 로 증가함에 따라서 피로 수명이 약 25,000 cycles 에서 7,000 cycles 로 크게 감소하였으며, 그 이상의 경화 압력에 대해서는 완만히 감소함을 알 수 있다. 비틀림 피로 실험 결과 경화 압력이 증가함에 따라서 동일한 비틀림 하중 하에서도 접착 조인트의 피로 수명은 감소하였으

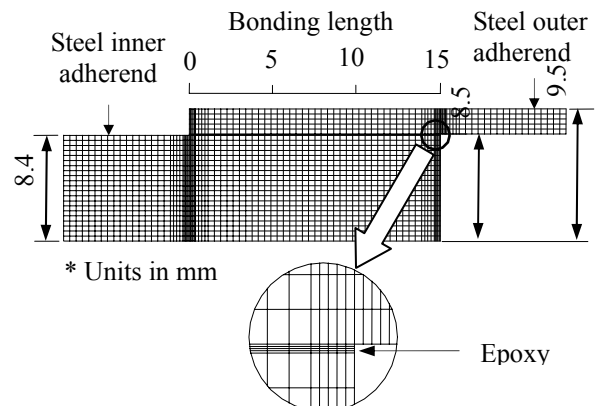


Fig. 4 Finite element model for the calculation of residual thermal stress in the adhesive layer

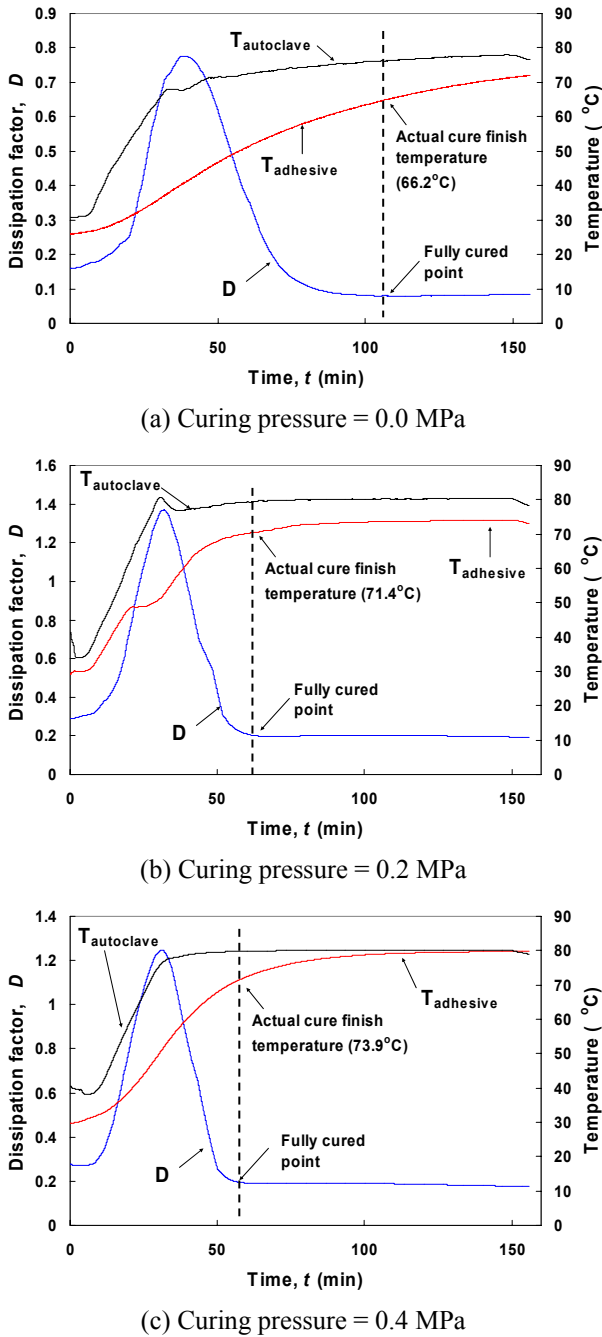


Fig. 5 Cure monitoring results of adhesively bonded joints w.r.t. curing pressure

며, 이로부터 접착 조인트의 경화 압력은 피로 특성에 영향을 준다는 것을 알 수 있었다.

3.3 접착 조인트의 잔류 열응력 해석 결과

3.1 절과 3.2 절의 실험 결과로부터 경화 압력이 접착 조인트의 실제 경화 온도 및 피로 수명의 변화를 준다는 것을 관찰하였다. 경화 압력에 의하여 변화되는 접착 조인트의 실제 경화 온도와 피로 수명의 정량적인 분석을 위하여 경화 온도

에 따른 접착 조인트의 잔류 열응력 해석을 수행하였다.

Fig. 8 은 접착 조인트의 경화 온도에 따라서 상온 (25°C)에서의 접착층에 걸리는 잔류 열응력 및 최대 응력을 나타내고 있다. Fig. 8 에 나타난 것과 같이 접착 조인트의 잔류 열응력은 좌측 끝단에서 최대가 되며, 경화 압력이 증가함에 따라서, 즉 접착 조인트의 실제 경화 온도가 증가함에 따라서 전체적인 잔류 열응력 수준이 증가하였다. Fig. 8f 에 나타난 것과 같이 실제 경화 온도 증가함에 따라서 접착층에 걸리는 최대 응력은 4.7 MPa 에서 5.6 MPa 까지 20% 정도 증가함을 알 수 있다. 비틀림 피로 하중에 의하여 접착층에 걸리는 응력 진폭 8MPa 을 Von Mises stress 로 환산하면 17.5 MPa 이 되며, 잔류 열응력의 크기는 응력 진폭의 26.8%에서 32.0% 정도가 된다. 접착층에 걸리는 잔류 열응력은 접착 조인트 피로 실험 시 평균 응력 (Mean stress)를 증가시키는 효과를 주며, 평균 응력이 인장으로 걸리는 경우, 평균 응력이 증가하게 되면 피로 수명이 감소하

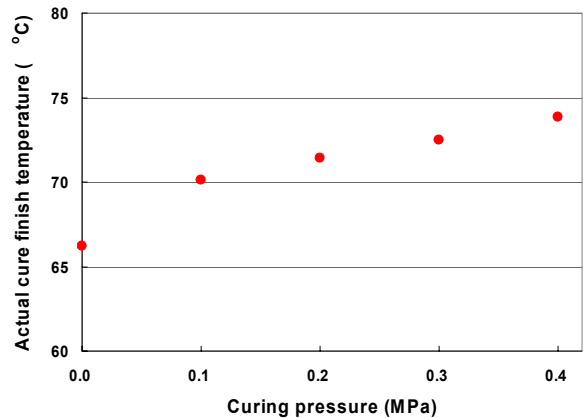


Fig. 6 Actual cure finish temperature w.r.t. curing pressures

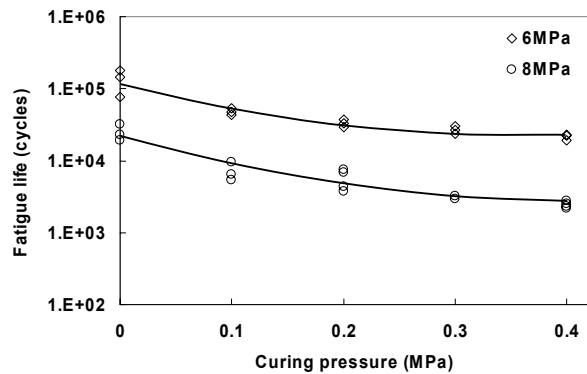
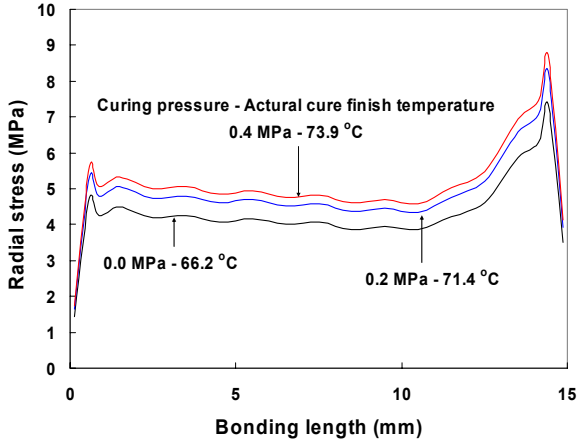
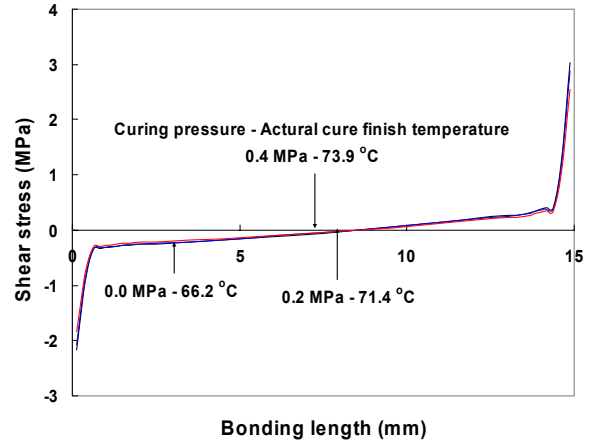


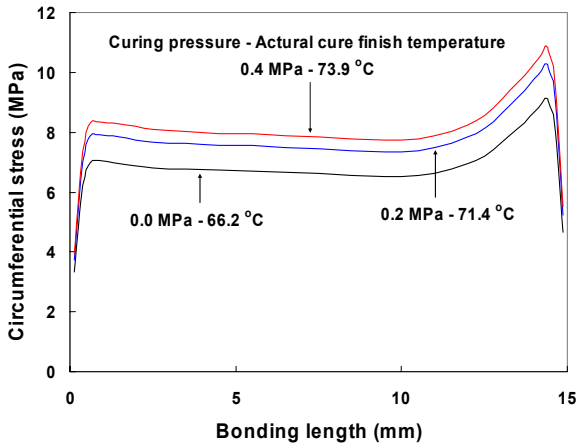
Fig. 7 Torsional fatigue test results of adhesively bonded joints w.r.t. curing pressures



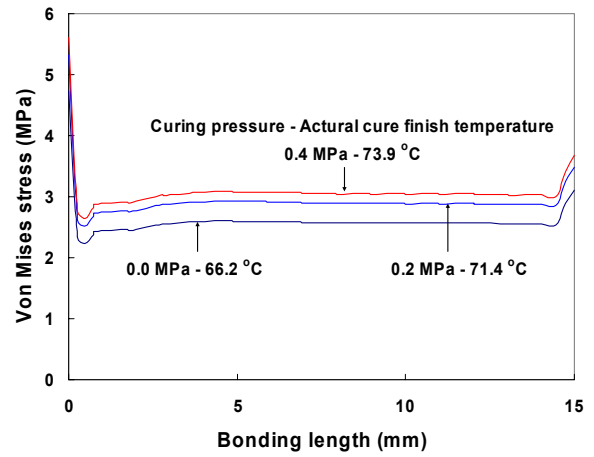
(a) Radial stress (σ_{rr}) along the bond line



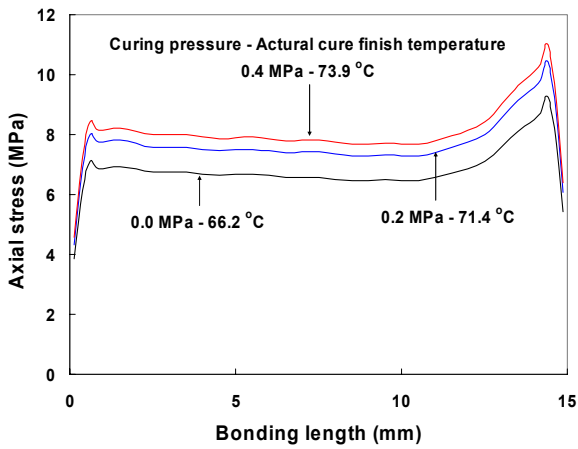
(d) Shear stress ($\sigma_{r\theta}$) along the bond line



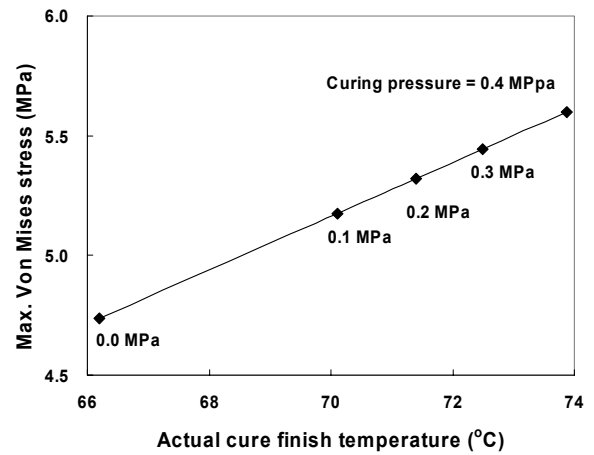
(b) Circumferential stress ($\sigma_{\theta\theta}$) along the bond line



(e) Von-Mises stress along the bond line



(c) Axial stress (σ_{zz}) along the bond line



(f) Maximum stress in adhesive layer

Fig. 8 Torsional fatigue test results of adhesively bonded joints w.r.t. curing pressures

감소하게 되므로⁽¹³⁾, 잔류 열응력이 증가함에 따라서 피로 수명이 감소한다고 판단할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 경화 압력이 접착 조인트의 피로 특성에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하였으며, 경화 압력과 접착 조인트의 피로 수명의 관계를 규명하였다.

접착 조인트의 경화 모니터링을 통하여 접착 조인트의 실제 경화 온도는 경화 압력이 증가함에 따라서 증가함을 알 수 있었으며, 비틀림 피로 실험을 통하여 접착 조인트의 피로 수명은 경화 압력이 증가함에 따라서 감소함을 알 수 있었다. 또한, 실제 경화 온도를 고려한 접착 조인트의 유한요소해석을 수행하여 경화 압력에 따른 접착층의 잔류 열응력 분포를 분석하였으며, 경화 압력이 증가함에 따라서, 즉 접착 조인트의 실제 경화 온도가 증가함에 따라서 접착층에 걸리는 최대 응력도 증가함을 알 수 있었다.

접착 조인트의 경화 모니터링, 비틀림 피로 실험 및 잔류 열응력 해석 결과로부터 접착 조인트 제작 시 가해지는 경화 압력이 증가하면 접착층에 걸리는 잔류 열응력이 증가하게 되고, 잔류 열응력은 비틀림 피로 실험 시 평균 응력으로 작용하므로 접착 조인트의 피로 수명이 감소한다는 결론을 얻을 수 있었다.

후 기

이 연구는 과학기술부 지원으로 수행되는 21 세기 프론티어 연구사업 (스마트무인기기술개발)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Hart-Smith, L. J., 1987, *Composites*, ASM International, Vol. 1, pp. 479-495.
- (2) Vinson, J. R. and Sierakowski, R. L., 1987, *The Behavior of Structures Composed of Composite Materials*, Martinus Nijhoff, pp. 239-283.
- (3) Mallick, P. K., 1988, *Fiber Reinforced Composite*, Marcel Dekker, pp. 417-425.
- (4) Kinloch, A. J., *Adhesion and Adhesives*, Chapman & Hall, pp. 2-3.
- (5) Lee, D. G., Kim, J. K. and Cho, D. H., 1999, "Effects of Adhesive Fillers on the Strength of Tubular Single Lap Adhesive Joints," *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 13, No. 11, pp. 1343-1360.
- (6) Harrison, N. L. and Harrison, W. J., 1972, "The Stresses in an Adhesive Layer," *Journal of Adhesion*, Vol. 3, pp. 195-212.
- (7) Lee, D. G., Kim, K. S. and Lim, Y. T., 1991, "An Experimental Study of Fatigue Strength for Adhesively Bonded Tubular Single Lap Joints," *Journal of Adhesion*, Vol. 35, pp. 39-53.
- (8) Lee, S. J. and Lee, D. G., 1992, "Development of a Failure Model for the Adhesively Bonded Tubular Single Lap Joint," *Journal of Adhesion*, Vol. 40, pp. 1-14.
- (9) Lee, S. J. and Lee, D. G., 1995, "Optimal Design of the Adhesively Bonded Tubular Single Lap Joint," *Journal of Adhesion*, Vol. 50, pp. 168-180.
- (10) Kim, J. K. and Lee, D. G., 2004, "Effects of Applied Pressure and Temperature during Curing Operation on the Strength of Tubular Single Lap Adhesive Joints," *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 18, No. 1, pp. 87-107.
- (11) Kwon, J. W., Chin, W. S. and Lee, D. G., 2003, "In-Situ Cure Monitoring of Adhesively Bonded Joints by Dielectrometry," *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 17, No. 16, pp. 2111-2130.
- (12) Lee, D. G., Jeong, K. S., Choi, J. H., 1998, *Composites: Mechanics and Manufacturing Method*, SigmaPress, pp. 322-323.
- (13) Fuchs, H. O. and Stephens, R. I., 1980, *Metal Fatigue in Engineering*, John Wiley & Sons, pp. 69-76.