

양면접착기 동시경화조인트의 피로특성에 영향을 미치는 설계변수에 관한 연구

신금철* · 이정주**

Design parameters on the fatigue characteristics of a co-cured double lap joint

Kum Cheol Shin and Jung Ju Lee

KEY WORDS : Co-cured double lap joints(양면접착기 동시경화조인트), Fatigue characteristics(피로 특성), Surface roughness(표면조도), Stacking sequence(적층각도)

ABSTRACT

The use of the co-cured joining method for composite structures is attractive due to several benefits. However, since the design stress level in cyclic loads is often smaller than the joint strength obtained from the static tensile load test, it is important to establish proper fatigue design criteria. Although some researchers have reported on co-cured joints, there are only a few papers published on the fatigue characteristics of co-cured joints. In this paper, the effect of bond parameters on the fatigue characteristics of a steel-composite co-cured double lap joint under cyclic tensile loads was experimentally investigated. We considered the surface roughness of the steel adherend and the stacking sequence of the composite adherend as bond parameters. A fatigue failure mechanism of the co-cured double lap joint was explained systematically by investigating the surfaces of failed specimens.

1. 서론

재료간 접합방법으로는 크게 기계적인 접합방법과 접착제에 의한 접합방법으로 나뉘는데 접착제에 의한 접합방법의 경우 하중이 전달되는 부위가 기계적인 접합방법에 비해 상대적으로 넓기 때문에 피로특성이 뛰어난 것으로 알려져 있다 [1].

접착제에 의한 접합방법의 일종인 동시경화 접합방법은 복합재료 피접합물의 경화공정(Curing process)과 피접합물 간의 접합공정(Bonding process)이 동시에 이루어지기 때문에 효과적인 접합방법이다. 동시경화 접합방법에서는 복합재료

피접합물의 경화 시에 흘러나오는 여분의 수지(Resin)를 이용하여 두 피접합물 간의 접합공정을 수행하기 때문에 복합재료 피접합물의 접합면에 표면처리를 할 필요가 없을 뿐 아니라 두 피접합물을 접합하기 위해 접착제(Adhesive)가 따로 필요하지 않아 제작공정이 간편하다 [2]. 게다가 복합재료 피접합물에서 흘러 나오는 여분의 수지를 접착제로써 사용하기 때문에 동시경화 조인트의 제조공정 이후에도 복합재료의 모재(Matrix)의 성분과 접착제의 성분이 동일하여 새로운 접착제를 이용하여 접합공정을 수행하는 접착제에 의한 접합방법에 비해 해석 및 설계에 있어 유리한 장점이 있다[3-4]. 그러나 동적 하중이 가해지는 경우에는 동시경화조인트 구조물의 설계응력수준이 정적 하중이 가해지는 경우에 비해 낮기 때문에 적절한 피로파괴 설계조건(Fatigue failure criteria)이 필요하

* 한국과학기술원 기계공학과

** 한국과학기술원 기계공학과

다. 최근 동시경화조인트에 관한 연구가 많이 진행되고 있음에도 불구하고 피로설계에 관한 연구는 미흡한 상태이다.

일반적으로 조인트의 접합강도는 접합계면의 표면상태에 영향을 받는 것으로 알려져 있다 [5-8]. 그리고 서로 다른 강성을 지니는 이종재료를 접합할 경우에는 강성의 차이에 따른 면외 응력(Out-of-plane stresses)의 발생으로 인한 파괴가 중요하게 된다. 게다가 복합재료를 피접합물로 사용하게 되면 복합재료의 적층각도에 따라 발생하는 강성의 변화가 조인트의 면외 응력의 크기를 결정하기 때문에 중요한 설계변수가 된다 [9-10].

본 연구에서는 동적 인장하중을 받는 강철재료와 탄소섬유/에폭시 복합재료를 이용한 양면접치기 동시경화조인트(Co-cured single lap joint)의 피로 특성에 대해 연구하였다. 조인트의 접합강도에 영향을 미치는 설계 인자들, 즉 강철재료 피접합물 접합면의 표면조도와 복합재료 피접합물의 적층각도에 따라 어떠한 영향을 받는 지에 관하여 실험적으로 연구하였다. 최종적으로 양면접치기 동시경화조인트의 피로강도 설계 시 효과적인 기계적 특성을 얻기 위한 설계조건을 제시하고자 한다.

2. 시험편 제조 공정 및 실험방법

조인트의 접합강도를 향상시킬 뿐만 아니라 균일한 표면조도를 얻기 위해 사포를 이용하여 강철재료의 표면에 표면처리를 하였다. 완전 경화되지 않은 복합재료 프리프레그(Prepregs)를 시험편의 크기에 맞게 재단한 후 적층하여 복합재료 피접합물을 만들어 강철재료 피접합물에 가접합(Prebonding)하였다. 완전히 경화시키기 위하여 오토클레이브에 넣은 후 경화 사이클(Cure cycle)에 따라 경화하여 동시경화조인트를 제작하였다. 성형중 복합재료 피접합물로부터 흘러나오는 여분의 수지(Excess resin)는 피접합물간의 접착제의 역할을 하기 때문에 레진 블리더(Resin bleeder)나 필플라이(Peel ply)를 사용하지 않았다[11]. 경화공정이 끝난 뒤에는 여러 가지 사포를 이용하여 시험편의 날카로운 부분을 제거하였다. 접착층을 형성하는 레진층(Resin layer)의 평균두께는 약 10 μm 로 형성되었다. 완전히 제작된 양면접치기 동시경화조인트 시험편의 모습을 그림 1에 나타내었는데 ASTM D3528에서 규정하고 있는 시험편 규격을 참고로 하였다 [12]. 본 실험에서는 세 가지 접합조건인 시험편을 선택하였는데, A형 시험편은 $[\pm 0]_{16T}$ 의 적층각도와 1.2 μm 의 표면조도를 갖고, B형 시험편은 $[\pm 0]_{16T}$ 의 적층각도와 0.3 μm 의 표면조도를 가지

며, C형 시험편은 $[\pm 45]_{4S}$ 의 적층각도와 1.2 μm 의 표면조도를 갖는다. 접합길이는 20 mm로 고정하였다.

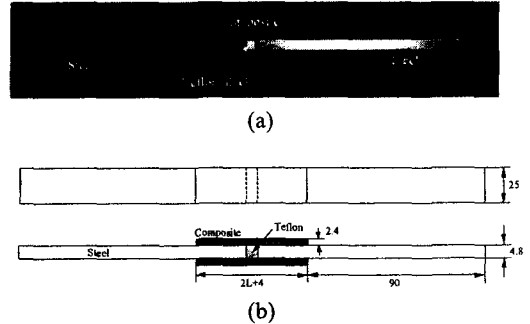


Fig. 1 A co-cured double lap joint specimen. (a) Photograph and (b) shape and dimensions.

양면접치기 동시경화조인트의 피로실험은 250kN MTS(Materials Testing System)를 사용하여 실험하였다. 응력비(Stress ratio)는 0.1 이었고 하중 주파수>Loading frequency)는 5Hz로 실험하였다. 가해진 동적 하중의 최대하중(Maximum load)은 정적 인장하중 전달용량(Tensile load bearing capacity)의 30%, 40%, 50%, 60%, 70%로 결정하였다.

3. 실험 결과

그림 2는 A형 시험편의 동적 하중 실험에서 파괴된 강철재료 파단면이다. 파단면에 보이는 흰색 영역은 복합재료 피접합물과 강철재료 피접합물의 계면에 형성된 레진층이 떨어져 나와 형성된 것이다. 파단면으로부터 A형 시험편의 파괴형태는 레진층의 부분적 파괴에 의한 접착부 파괴(Partial cohesive failure in the resin layer)임을 알 수 있다. 응력집중이 예상되는 접합부의 한쪽 끝에서 계면분리로 시작된 조인트의 균열은 계속되는 동적 하중으로 인하여 계면을 따라 균열의 성장이 진행되다가 상대적으로 약한 레진층을 관통한 것으로 파악된다. 피로하중이 낮은 수준의 시험편의 파단면(그림 2a)에서는 흰색 영역이 넓지 않은 대신 부식 영역(Corrosion area)이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 부식 영역은 압축하중 상태에서 동적 하중이 계속 가해지는 경우에 발생하는 것으로 알려져 있다 [13]. 피로하중이 높은 수준의 시험편의 파단면(그림 2b)에서는 흰색 영역이 넓게 나타나는 대신 부식 영역이 나타나지 않았다. 이

것은 가해지는 동적 하중의 크기가 커서 계면을 따라 진행되던 균열 성장이 상대적으로 약한 레진 층을 통과해 진행하는 불안정한 파괴 현상을 보이는 것으로 판단된다. 가해지는 하중이 높으므로 계면의 두 표면간의 마찰 힘수도 적어서 부식 영역이 생기지 않았다.

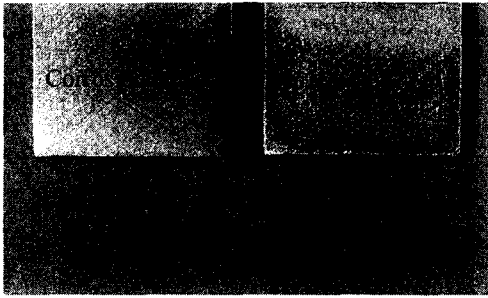


Fig. 2 Photograph of the typical failure surfaces of the steel adherend of the A-type specimens. (a) $P_{max}=0.5P_S$; (b) $P_{max}=0.7P_S$.

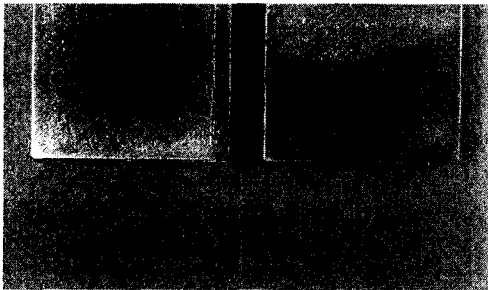


Fig. 3 Photograph of the typical failure surfaces of the steel adherend of the B-type specimens. (a) $P_{max}=0.5P_S$; (b) $P_{max}=0.7P_S$.

그림 3 은 B 형 시험편의 동적 하중 실험에서 파괴된 강철재료 파단면이다. 파단면에 보이는 흰색 영역은 A 형 시험편에서 생긴 것과 동일하나 그 영역의 크기는 상대적으로 작다. 이것은 표면 조도가 접합부의 강도에 영향을 미친다는 것을 의미한다. 그림 3a 에서 나타난 부식 영역의 크기 또한 A 형 시험편의 경우에 비해 작아서 동적 하중을 가해주는 동안 마찰 면적이 적다는 것을 알 수 있다. 그러므로 강철재료 피접합물의 표면조도가 양면접치기 동시경화조인트의 피로특성에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

그림 4 는 C 형 시험편의 동적 하중 실험에서 파괴된 강철재료 파단면이다. 파단면에 보이는 흰색 영역은 A 형 시험편에서 생긴 것과 동일하나

그 영역의 크기는 상대적으로 작다. 이것은 A 형 시험편과 C 형 시험편에서의 복합재료 피접합물의 강성의 차이로 인한 것으로 파악된다. A 형 시험편의 경우보다 B 형 시험편의 복합재료 피접합물의 강성이 더 낮아 계면에서의 전단변형이 더 많이 나타난 결과이다. 이것은 그림 4a 에서도 확인할 수 있는데 더 큰 전단변형의 결과 부식 영역이 더 넓게 분포되는 것을 알 수 있다.

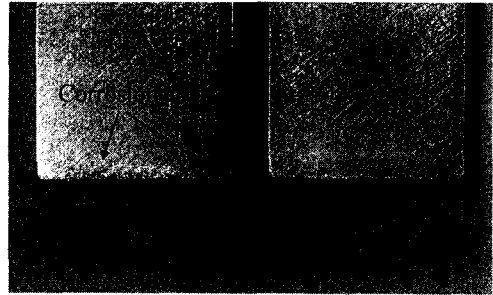


Fig. 4 Photograph of the typical failure surfaces of the steel adherend of the C-type specimens. (a) $P_{max}=0.5P_S$; (b) $P_{max}=0.7P_S$.

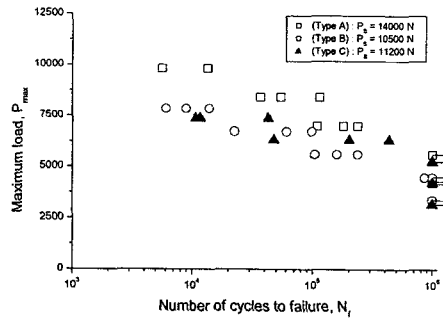


Fig. 5 Relationship between the maximum load and the number of cycles to failure of the co-cured double lap joint.

그림 5 는 양면접치기 동시경화조인트의 최대 하중과 파괴까지의 수명과의 관계를 나타낸 그래프이다. 동일한 하중 크기의 수준에서 수명을 비교해 볼 때 A 형의 시험편이 높은 하중에서 유리하다는 것을 알 수 있고 C 형의 시험편이 낮은 하중에서 유리하다는 것을 알 수 있다. 또한 A 형 시험편과 B 형 시험편을 비교해 볼 때 표면조도는 피로특성에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

그림 6 은 양면접치기 동시경화조인트의 정규화된 하중범위(Normalized load range)와 파괴까지의 수명과의 관계를 나타낸 그래프이다. 그림으로부터 C 형 시험편의 피로특성이 가장 우수함을 알

수 있고 A 형과 B 형 시험편의 비슷한 그래프를 나타내는 것을 알 수 있다. 이것은 정적 인장하중 전달용량으로 정규화한 값을 사용하였으므로 실제 피로설계 시에는 정적 인장하중 전달용량의 크기 또한 고려하여야 할 것이다. 그림 6 으로부터 피로 하중 하에 있는 양면접치기 동시경화조인트의 복합재로 피접합물의 적층각도 또한 중요한 피로설계 변수로 사용될 수 있다는 것을 알 수 있다.

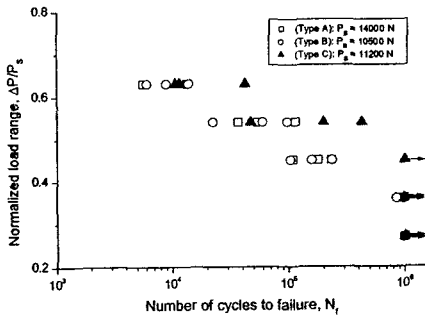


Fig. 6 Relationship between the normalized load range and the number of cycles to failure of the co-cured double lap joint.

4. 결론

본 연구에서는 인장 피로하중 하에서 강철재료와 탄소섬유/에폭시 복합재료를 이용하여 제작한 양면접치기 동시경화조인트의 피로특성을 몇 가지 설계변수에 따라 실험적으로 연구하였다. 연구 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 인장 피로하중 하의 양면접치기 동시경화조인트의 피로파괴 메커니즘은 부분적 레진 접착부의 파괴로 나타났다. 응력집중 하의 조인트 끝단에서 발생한 계면분리 파괴는 하중이 계속 가해짐에 따라 상대적으로 약한 레진층을 통과하여 파괴된 것으로 나타났다.
2. 강철재료 피접합물의 접합부 표면조도는 양면접치기 동시경화조인트의 피로특성에 영향을 미치는 것으로 나타났는데 표면조도가 클수록 접합면적이 넓으므로 피로강도가 더 큰 것으로 나타났고 동적 압축하중 하에서 마찰에 의해 발생하는 부식 영역 또한 더 넓게 분포하였다.
3. 복합재료 피접합물의 적층각도에 따라 조인트의 강성이 변화하므로 피로강도에 영향을 주는 것으로 나타났다. 적층각도가 클수록 전단변형

의 양이 커서 상대적으로 부식 영역이 더 넓게 분포되었고 피로강도 또한 더 크게 나타났다.

참고문헌

- (1) A. J. Kinloch, *Adhesion and Adhesives: Science and Technology*. Chapman and Hall, London, 1987.
- (2) K. C. Shin, J. J. Lee and D. G. Lee, 2000, "A Study on the Lap Shear Strength of a Co-Cured Single Lap Joint," *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 14, pp. 123-139.
- (3) K. C. Shin and J. J. Lee, 2000, "Tensile load bearing capacity of co-cured double lap joints," *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 14, pp. 1539-1556.
- (4) K. C. Shin and J. J. Lee, 2000, "Prediction of the Tensile Load Bearing Capacity of a Co-Cured Single Lap Joint Considering Residual Thermal Stresses," *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 14, pp. 1691-1704.
- (5) L. W. Crane, C. L. Hamermesh and L. Maus, 1976, "Surface Treatment of Cured Epoxy Graphite Composite to Improve Adhesive Bonding," *SAMPE Journal*, Vol. 12, pp. 6-9.
- (6) B. M. Parker and R. M. Waghorne, 1982, "Surface Pretreatment of Carbon Fiber-Reinforced Composites for Adhesive Bonding," *Composites*, Vol. 13, pp. 280-288.
- (7) D. G. Lee, K. S. Kim and Y. T. Im, 1991, "An Experimental Study of Fatigue Strength for Adhesively Bonded Tubular Single Lap Joints," *Journal of Adhesion*, Vol. 35, pp. 39-53.
- (8) R. F. Wegman, *Surface Preparation Techniques for Adhesive Bonding*. Noyes Publications, Park Ridge, NJ, 1989.
- (9) J. W. Renton and J. R. Vinson, 1975, "On the Behavior of Bonded Joints in Composite Material Structures," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 7, pp. 41-60.
- (10) K. C. Shin, Y. G. Kim, D. G. Lee and J. M. Choi, "Adhesively Bonded Lap Joints for the Composite-Steel Shell Structure of High Speed Vehicles," *Composite Structures*, Vol. 38, pp. 215-227, 1997.
- (11) J. H. Choi and D. G. Lee, "Expert Cure System for the Carbon Fiber Epoxy Composite Materials," *Journal of Composite Materials*, Vol. 29, pp. 1181-1200, 1995.
- (12) *Annual Book of ASTM Standards (General Products, Chemical Specialties, and End Use Products)*, Vol. 15, pp. 240-243. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1995.
- (13) M. G. Fontana, *Corrosion Engineering (International Edition)*. McGraw-Hill Book Company, Singapore, 1987.