

알루미늄/CFRP 복합재의 접착강도 향상을 위한 경화방법에 관한 연구

A Study on the Curing Method to Improve Bonding Strength of Aluminum/CFRP Composites

이 경 엽*, 양 준 호**, 최 낙 삼***
Kyong Yop Rhee, Jun Ho Yang, Nak Sam Choi

ABSTRACT

This study investigates the effect of curing method on the bonding strength of aluminum/CFRP composites. The surface of aluminum panel was treated by DC plasma. Lap shear tests and T-peel tests were performed based on the procedure of ASTM 906-94a and ASTM D1876-95, respectively. Test samples were fabricated by using the co-curing method and the secondary curing method. The results showed that the shear strength of test samples made by the co-curing method was 2.5 times greater than that of test samples made by the secondary curing method. The T-peel strength of the co-curing method case was almost 2 times greater than that of the secondary curing method case.

주요기술용어 : DC plasma(DC 플라즈마), T-peel strength(T-peel 강도), Single lap shear specimen(단일 랩 전단 시편), Adhesive bonding(접착제 본딩), Composite patch(복합재 패치), Co-curing method(동시경화법), Secondary curing method(이차경화법)

1. 서 론

최근 들어 자동차 및 항공기 구조물에 있어 부식이나 피로에 의한 균열을 어떻게 보수할 것인가가 주요 관심사로 떠오르면서 균열 부위에 복합재 패치를 접합시키는 방법이 적용되고 있다.¹⁻³⁾ 복합재 패치를 균열부위에 접착하는 보수 방법은 전 접착면에서 하중이 재분포되므로 응력집중을 피할 수 있는 장점이 있으며 복합재의 고강도 및 고강성의 성질을 최대한 이용할 수 있으므로 더 얇은 패치의 부착이 가능하여 패치 접

착에 의한 항력감소에 이롭다. 특히 복합재 패치는 굴곡면이나 자유곡면 등 임의의 형상대로 부착이 가능하며 접착에 의한 완전 밀봉으로 부식의 피해도 최소화 할 수 있으며 보수 시간과 비용에 있어서도 훨씬 경제적이다.⁴⁾ 그러나 이러한 복합재 패치를 접착하여 보수하는 방법에도 패치와 보수구조물 간의 접착력 약화로 인한 접착 분리가 발생되어 내구성을 떨어뜨리는 단점이 있다. 따라서 패치와 보수구조물 간의 접착력을 향상시킬 수 있는 연구가 더욱 요구되고 있는 실정이다.

복합재 패치를 이용한 보수기술은 무엇보다 보수구조물과 복합재 패치 사이의 접착력과 접착 내구성 구비가 중요하다. 여기에 가장 큰 영향

* 회원, 경희대학교 기계산업시스템공학부

** (주)센테크

*** 회원, 한양대학교 기계산업공학부

을 주는 요소는 보수구조물과 수지의 기계적 결합 (Mechanical Interlocking)을 강화시킬 수 있는 보수구조물 표면처리공정과 에폭시 수지계 접착제 경화공정의 효과적인 선택이라 할 수 있다. 최근에는 알루미늄 구조물 경우 알루미늄을 DC 플라즈마 고분자 합성법으로 표면처리 할 경우 알루미늄/CFRP(탄소섬유/에폭시) 복합재의 필(peel)강도는 표면처리 안한 경우에 비해 500% 이상 증가한다는 논문이 발표된 바 있다.⁵⁾

본 연구는 자동차 및 항공기 구조물의 보수를 복합재 패치로 하기 위한 기초연구로서 플라즈마로 표면처리된 알루미늄을 적용 알루미늄/CFRP 복합재를 제작할 때 알루미늄/CFRP 복합재의 접착강도 향상을 위한 경화방법에 관한 것이다. 첫째 DC 플라즈마 고분자 합성법으로 알루미늄을 표면처리 하였다. 둘째 동시경화법(co-curing method)과 이차경화법(secondary curing method)을 적용하여 알루미늄/CFRP 복합재 전단강도 시험편과 T-peel강도 시험편을 제작한 후 경화방법에 따른 전단강도 및 필강도를 비교함으로써 효과적인 경화방법을 정량화하였다. 또한 각 경우의 파단면을 주사현미경을 이용하여 비교 검토함으로써 경화방법에 따른 파괴기구를 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1 DC Plasma에 의한 알루미늄 표면처리

본 연구에 이용된 알루미늄은 두께가 2mm인 Al 5052 H34로 DC 플라즈마 고분자 합성법을 적용하여 표면처리를 수행하였다. 알루미늄은 표면의 압연유와 기타 유기물을 세척하기 위해 아세톤에 10분간 초음파로 표면을 세척하고 다시 에탄올과 삼차 증류수를 사용하여 각각 5분간 초음파로 세정한 후 고순도 질소(N₂) 가스를 이용하여 표면에 잔류하는 용액을 제거하였다. 플라즈마 형성의 원료기체로는 아세틸렌(C₂H₂)과 질소(N₂)의 혼합기체를 사용하였으며 아세틸렌 대 질소 가스 혼합 비율은 5 : 5이며 DC 플라즈마 고

분자 막 합성시간은 30초로 고정하였다. 가스 혼합 비율을 5 : 5로 플라즈마 고분자 막 합성시간을 30초로 적용한 이유는 이 경우에 있어 접촉각이 가장 작으며 필강도가 가장 크기 때문이다.⁶⁾ 플라즈마 고분자 합성반응을 일으킬 때의 진공압력은 1×10^{-5} Torr, 파워는 200W, anode와 cathod 사이의 거리는 10cm로 하였으며 알루미늄 자체에 전류가 흐를 수 있게 anode에 연결시키고 전류는 100 mA, 전압은 800~820V를 합성시간 동안 유지하였다. 플라즈마 합성장치 내부로의 원료기체는 질량흐름제어기(Mass Flow Controller, MFC Sierra Inc., USA)를 이용하여 공급하였다. Fig. 1은 DC 플라즈마 고분자 합성장치에 대한 개략도를 나타낸다.

2.2 시험편 제작 및 실험

경화방법이 알루미늄/CFRP 복합재의 접착강도에 미치는 영향을 비교하기 위해 동시경화법과 이차경화법을 적용하여 SLS (Single Lap Shear) 시험편과 T-peel 시험편을 제작하였다. 시험편 제작에 이용된 CFRP는 0° 단일방향 탄소섬유/에폭시복합재 ([0°]₁₄)로 (주)SK 케미칼의 탄소섬유/에폭시 프리프레그 (USN 150B)를 이용하여 제작하였다. 동시경화법을 적용한 시험편 제작은

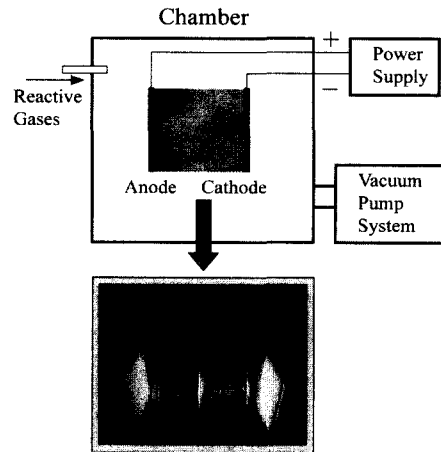


Fig. 1 Schematic diagram for a DC plasma polymerization system

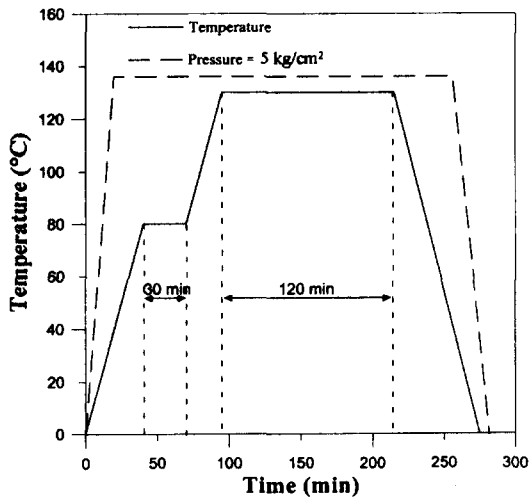


Fig. 2 Illustration of consolidation cycles

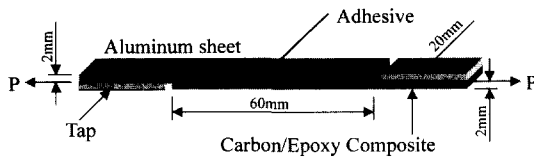


Fig. 3 Schematic diagram of single lap shear specimen

알루미늄의 압연방향과 탄소섬유/에폭시 프리프레그의 섬유방향이 일치하게 적층한 후 오토클레이브 내에서 열과 압력을 가하여 동시에 경화시킴으로 완성하였다. Fig. 2는 탄소섬유/에폭시 복합재 제작과 동시경화법에 적용된 성형조건을 나타낸다. 이차경화법을 적용한 시험편 제작은 알루미늄의 압연방향과 CFRP의 섬유방향이 일치하게 적층한 후 접착제를 이용하여 알루미늄/접착제/CFRP 형태로 프레스 내에서 $5\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 일정 압력으로 상온에서 24시간 경화하여 완성하였다. 접착제는 열경화성 에폭시 수지인 비스페놀 A형 디글리시딜 에테르(Diglycidyl Ether of Bisphenol A-DGEBA, YD-115, (주)국도화학)와 경화제로디아닐렌(Dianiline, D-230, (주)국도화학)을 중량비 4 : 1의 수지 혼합비로 사용하였다.

SLS 시험편의 경우 랩(lap)과 스트랩(strap)의 하중작용선이 일치하지 않아 겹친부위(overlap)에 모멘트가 발생하게 된다.⁷⁾ 따라서 모멘트를

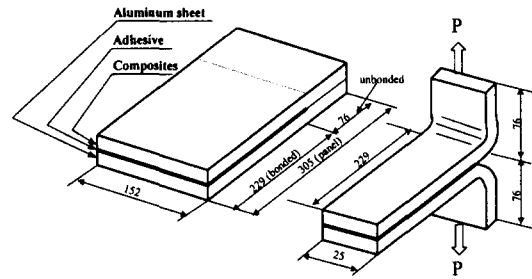


Fig. 4 Schematic diagram of T-peel specimen

제거하고 겹친 부위에 대한 순수 전단력을 구하기 위해 알루미늄과 복합재의 두께와 동일한 2mm의 탭을 양 끝단에 미끄러지지 않도록 부착하였다. 전단강도 시험과 T-peel 시험은 각각 ASTM D906-94a와 ASTM D1876-95에 준하여 수행하였다.^{8,9)} Fig. 3과 Fig. 4는 실험에 적용된 SLS 시험편과 T-peel 시험편 형상을 나타낸다.

3. 결과 및 검토

Fig. 5는 플라즈마 고분자 합성법으로 표면처리한 알루미늄/CFRP 복합재에 있어 이차경화법과 동시경화법으로 제작한 SLS 시험에 대한 전형적인 하중-변위선도를 나타낸다. 그림에 나타나 있듯이 동시경화법과 이차경화법 모두 변위가 증가함에 따라 초기에 하중이 급격히 증가한다.

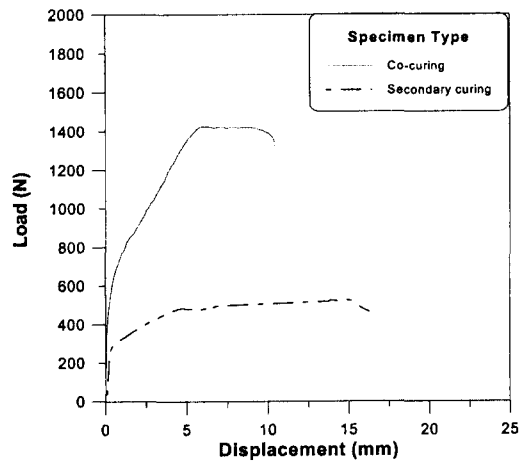


Fig. 5 Load-displacement curves of SLS tests

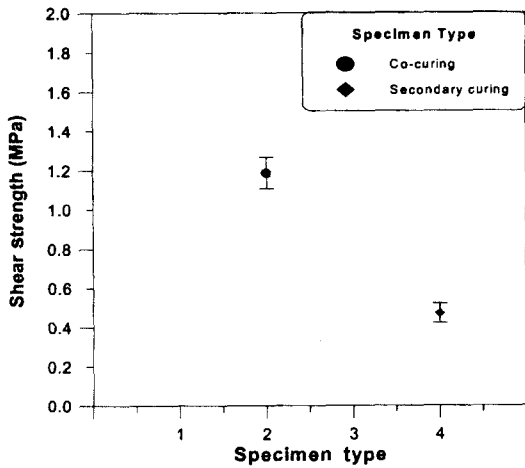


Fig. 6 Shear strength of co-curing and secondary curing specimen

또한 동시경화법 경우가 이차경화법 경우보다 최대하중이 큼을 알 수 있다. 전단강도는 탭에 의해 최소한의 모멘트를 제거하였으므로 다음의 식을 이용해 결정하였다.

$$\tau = \frac{P_{cr}}{A} \quad (1)$$

위 식에서 τ 는 전단강도를, P_{cr} 은 임계하중을, A 는 접착면의 면적을 나타낸다. 임계하중 P_{cr} 은 하중-변위선도에서 최대하중 값으로 결정하였다. Fig. 6은 네 개 이상의 실험을 통해 평균을 구한 양 시험편의 평균 전단강도의 크기를 비교한 그림이다. 그림에 나타나 있듯이 평균 전단강도는 동시경화법이 1.19MPa이며 이차경화법은 0.48 MPa로 동시경화법이 약 2.5배 정도 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 동시경화법과 이차경화법을 적용한 시험편의 T-peel 시험시 하중-변위 선도로서 초기 변위에 대하여 동시경화법의 경우가 이차경화법에 비해 하중이 더욱 높은 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 이 두 가지 시험편에 대하여 각각 네 개 이상의 실험을 통해 평균을 구한 T-peel 강도를 비교한 것으로 동시경화법에 의한 시험편이 이차경화법에 의한 시험편보다 약 2배 정도 peel 강도가 높은 것을 알 수 있다.

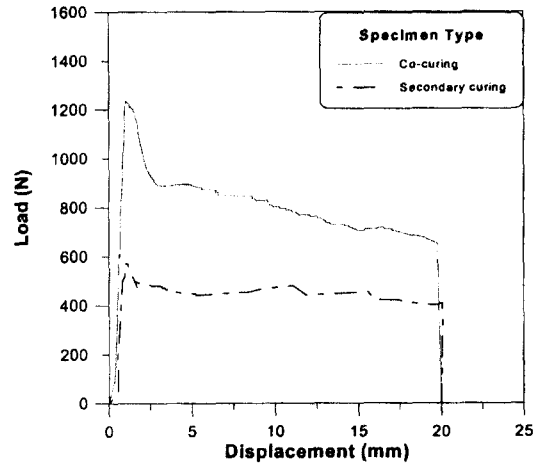


Fig. 7 Load-displacement curves of T-peel tests

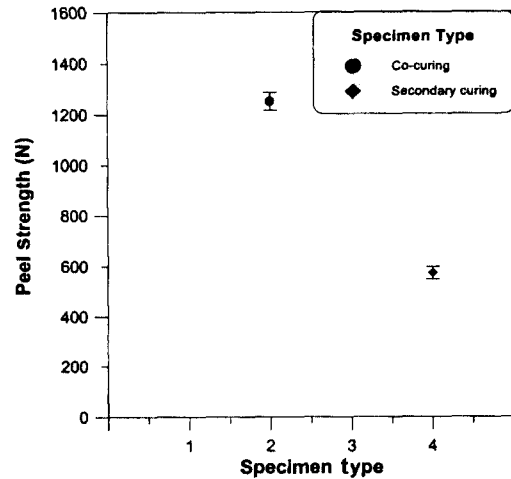


Fig. 8 T-peel strength of co-curing and secondary curing specimens

동시경화법의 경우가 이차경화법에 비해 전단강도 및 필강도가 큰 이유는 다음과 같이 설명될 수 있다. 이차경화법의 경우 알루미늄/접착제, 접착제/복합재 계면이 표면처리된 알루미늄의 표면요철과 계면확산, 복합재의 표면요철에 의존한 기계적 결합을 이루지만 동시경화법의 경우 알루미늄과 접착제 그리고 탄소섬유/에폭시 프리프레그 사이의 계면이 알루미늄의 표면요철과 플라즈마 표면처리에 의한 계면확산 작용 그리고 접착제/프리프레그 계면이 동시 경화과정

에서 보다 결합력이 강한 화학적 결합을 이루어 접착강도 보완효과를 나타내기 때문에 판단된다. 또한 동시경화법에서는 프리프레그 내의 기지재가 동시 경화과정에서 충분한 점도로 떨어지고 오토클레이브 내부의 압력에 의해 계면 전체에 골고루 확산되어 알루미늄/접착재 사이의 접착강도가 높으나 이차경화법의 경우 이미 경화된 복합재와 알루미늄 사이에 접착재 수지만의 점도로 접착하므로 상대적으로 낮은 것으로 판단된다. 그러나 동시경화법의 경우 제작시 프리프레그가 오토클레이브 내의 고온 고압으로 인해 경화도중 알루미늄 판 위에서 측면으로 펼쳐지면서 옆으로 탄소섬유가 밀려나오거나 수지가 흘러나와 치수가 변형되지만 이차경화법의 경우 초기에 lay-up을 실시한 형상 그대로 경화되어 경화 전 공정동안 매우 안정된 치수를 유지하는 장단점이 있다.

경화방법에 따른 접착강도 차이 원인을 이해하기 위해 동시경화법과 이차경화법을 적용한 T-peel 시험편의 파단면 검사를 주사현미경을 이용하여 시행하였다. Fig. 9는 경화방법에 따른 파단면

사진으로 Fig. 9의 (a)는 동시경화법에 의해 제작된 시험편의 알루미늄의 파단면을, (b)는 복합재의 파단면을 나타낸다. 그림 (a)에서 보여지는 바와 같이 알루미늄과 프리프레그의 기지재 사이의 높은 접착강도로 인하여 알루미늄 표면으로 복합재의 일부 섬유가 뜯겨져 나와 붙어있는 것을 관찰할 수 있으며 그림(b)에서는 복합재의 표면이 뜯겨져 있고 섬유의 일부가 파단되어 있는 것을 관찰할 수 있다.

Fig. 9의 (c)와 (d)는 각각 이차경화법에 의해 제작된 시험편의 알루미늄과 복합재의 파단면을 나타낸다. 그림에서처럼 알루미늄과 복합재 표면에 수지가 대체로 고루 덮여 있으나 수지층 자체에서 파괴가 일어난 것을 알 수 있다. 따라서 전단강도와 T-peel 강도가 동시경화법에서 높게 나타난 것은 접착계면의 하중이 알루미늄보다 상대적으로 층간인장력이 작은 복합재쪽으로 전가됨으로써 결국에는 탄소섬유의 파단을 야기시켜 이차경화법과 같이 수지층 자체에서 파괴된 경우보다 높은 하중이 들기 때문에 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 DC 플라즈마 고분자 합성법으로 표면처리된 알루미늄을 적용 알루미늄/CFRP 복합재 성형에 있어 경화방법이 접착강도에 미치는 영향을 정량화 하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 접착강도는 경화방법에 따라 영향을 받는다. 동시경화법을 적용한 시험편의 전단강도는 이차경화법을 적용한 경우의 전단강도보다 약 2.5 배 정도 크다. T-peel 강도는 동시경화법을 적용하였을 때 이차경화법을 적용한 경우보다 약 2배 이상 크게 나타난다.

2) 경화방법에 따라 접착강도가 차이가 나는 이유는 동시경화법에서는 프리프레그 내의 기지재가 동시 경화과정에서 충분한 점도로 떨어지고 오토클레이브 내부의 압력에 의해 계면 전체에 골고루 확산되어 알루미늄/접착재 사이의 접

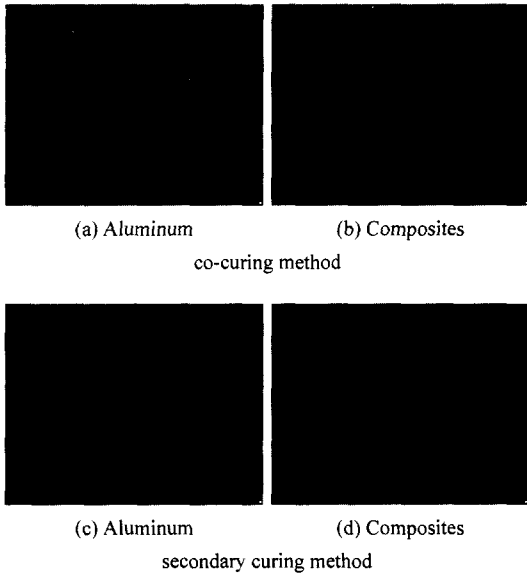


Fig. 9 SEM photographs of fracture surfaces for co-curing method and secondary curing method

착강도가 높으나 이차경화법의 경우 이미 경화된 복합재와 알루미늄 사이에 접착제 수지만의 점도로 접착하므로 상대적으로 낮은 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구과제 (과제번호:2000-1-30400-004-3)에 의하여 연구되었으며 이에 사의를 표합니다.

참 고 문 헌

- 1) C. L. Ong, S. B. Shen, "Repair of F-104 Aircraft Nosedome by Composite Patching," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol.15, pp.75-83, 1991.
- 2) R. J. Chester, K. F. Walker, P. D. Chalkley, "Adhesively Bonded Repairs to Primary Aircraft Structure," *International J. of Adhesion and Adhesives*, Vol.19, pp.1-8, 1999.
- 3) J. J. Denney, S. Mall, "Characterization of Disbond Effects on Fatigue Crack Growth Behavior in Aluminum Plate with Bonded Composite Patch," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.57, pp.507-525, 1997.
- 4) J. J. Schubbe, S. Mall, "Investigation of a Cracked Thick Aluminum Panel Repaired with a Bonded Composite Patch," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.63, pp.305-323, 1999.
- 5) 이경엽, 양준호, "CFRP/알루미늄 복합재에서 CFRP의 표면처리가 T-peel 강도에 미치는 영향," *대한기계학회 2001년도 재료 및 파괴부문 1차 학술대회 논문집*, pp.325-330, 2001.
- 6) 이경엽, 강용태, 양준호, "에너지 구조재 적용을 위한 알루미늄/섬유강화 복합재의 표면처리," *한국표면공학회지*, 제34권 제1호, pp.56-61, 2001.
- 7) C. G. Gustafson, M. Hojo, D. Holm, "A Nonlinear Analysis of the CLS Specimen," *J. of Composite Materials*, Vol.23, pp.146-192, 1989.
- 8) ASTM D906-94a, "Standard Test Method for Strength Properties of Adhesives in Plywood Type Construction in Shear by Tension Loading," *ASTM Standards*, Vol.15.06, pp.25-28.
- 9) ASTM D1876-95, "Standard Test Method for Peel Resistance of Adhesive (T-Peel Test)," *ASTM Standards*, Vol.15.06, pp.107-109.