한국표면공학회지
Journal of the Korean Institute of Surface Engineering
Vol. 34, No. 3, Jun. 2001
<연구논문>

# 탄소섬유/에폭시 복합재(CFRP)의 표면처리가 금속재/CFRP의 전단강도에 미치는 영향에 대한 연구

지창헌 · 양준호

원광대학교 기계공학부

# Effect of Graphite/Epoxy (CFRP) Surface Treatment on the Shear Strength of CFRP/Metal Composites

C. H. Chi, J. H. Yang

Division of Mechanical Engineering, Wonkwang University, Sinyong-Dong, Iksan-City, Chonbuk 570-749, Korea

## Abstract

In this study, the effect of surface treatment of CFRP (Carbon Fiber Reinforced Composites) on the shear strength of CFRP/metal composites was investigated. The surface of 14 plied unidirectional (0-deg) CFRP was treated by an $Ar^+$ ion beam under an oxygen environment. Shear strength tests were performed using SLS (Single Lap Shear) specimens based on the ASTM D906-94a procedure. The shear strength of the surface-treated CFRP/metal composites was compared with that of the untreated CFRP/metal composites. The results showed that the shear strength of surface-treated CFRP/metal composites was 36% greater than that of untreated CFRP/metal composites.

## 1. 서 론

최근 연비와 성능 향상을 위한 경량화의 사회적 요구가 증가되면서 비강도 및 비강성이 뛰어난 섬유강화 복합재의 사용이 늘어가고 있는 추세이며 섬유보강에 의한 이방성은 효율적인 구조물의 설계가 가능하여 자동차, 철도차량, 항공, 우주산업 등에서 각광받고 있다. 한편 선진 외국에서는 구조물 자체의 경량화를 위해 강판, 알루미늄 합금, 섬유강화 복합재를 접착제를 이용해 상호 접합하여 일체 구조물로 사용하거나 기존 구조물에 발생된 균열을 복합재 패치(patch)를 접착하여 보수하는 연구가 활발히 이루어 지고 있다[1-4].

현재 패치와 균열이 발생한 구조물 사이의 접착력 및 내구성을 향상시키기 위해 적용되고 있는 구조물에 대한 표면처리는 크게 표면세정과 실란(silane) 처리로 이루어지고 있다. 즉 MEK(Methyl Ethyl Ketone)을 이용하여 표면을 세척하거나 에칭 세정함으로서 표면의 유기물등 오염물질을 제거하며 또한 알루미나 가루를 이용한 grit blasting으로 표면을 활성화 시킨다. 그 후 표면을 실란 처리하고 촉매재(primer)를 접착제 이전에 바르는 방법이 적용되

고 있다[5]. 패치의 경우 별도의 표면처리 없이 프리프레그 형태로 적층한 후 경화시키거나 단순히 MEK를 이용하여 표면을 세척한 후 섬유가 손상되지 않을 정도로 표면을 거칠게 하는 방법을 적용하고 있다. 그러나 보다 향상된 접착강도와 내구성을 위해 새로운 표면처리에 대한 연구가 요구되고 있다.

본 논문은 CFRP/금속재 복합재의 접착강도의 향상을 위한 CFRP의 표면처리에 관한 연구로서 CFRP의 표면을 산소환경 하에서 $Ar^+$ 이온도움반응법(Ion Assisted Reaction)으로 표면처리하였으며 이온도움반응법에 의한 표면처리 조건은 이전 연구에서 얻어낸 결과인 $1\times10^{16}$ions/㎠의 이온 에너지 양을 조사하였다[6].

표면처리를 수행한 CFRP와 표면처리를 수행하지 않은 CFRP를 각각 적용하여 제작한 CFRP/금속재(알루미늄) 복합재를 SLS(Single Lap Shear)시험편으로 제작하여 동일한 조건에서 전단강도 시험을 통해 표면처리가 접착강도 향상에 미치는 영향을 정량화 하였다.

## 2. 실 험

### 2. 1. CFRP 복합재 성형

본 연구에서는 탄소섬유/에폭시 프리프레그((주)SK 케미칼, 모델명:USN 150B)를 100×100 ㎜ 크기로 절단하여 이를 0° 단일방향으로 14플라이 적층한 후 오토클레이브(autoclave) 내에서 Fig. 1의 성형조건에 따라 열과 압력을 가함으로써 성형하였다. Fig. 1은 복합재 성형을 위해 가해진 성형온도, 성형압력 및 성형시간을 나타낸다.

성형이 끝난 후 복합재(두께:약 2㎜) 표면의 오염물을 제거하기 위해 아세톤에 10 분간 초음파로 표면을 세척하였다. 그 후 에탄올과 삼차 증류수를 사용하여 각각 5 분간 초음파로 표면을 세정한 후 고순도 질소($N_2$) 가스를 이용하여 시험편의 표면에 잔류하는 용액을 제거하였다.

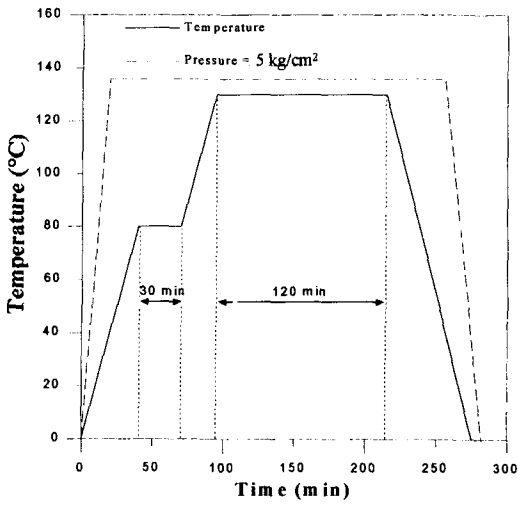


Fig. 1. Illustration of consolidation cycles

### 2. 2. 이온도움반응법에 의한 CFRP 복합재 표면처리

본 연구에서는 이온도움반응법을 적용 산소 분위기에서 $Ar^+$ 이온을 CFRP 복합재 표면에 조사하였다. 산소 분위기는 표면처리 과정시 복합재 시험편 표면에 질량흐름제어기(Mass Flow Controller, MFC Sierra Inc., USA)를 이용하여 4sccm의 산소를 흘려줌으로서 조성하였다. 입사되는 $Ar^+$ 이온은 할로우 캐소드타입 이온건(hollow cathod type ion gun)을 이용하여 발생시켰으며 이때 이온의 에너지는 1KeV로 하였다. 시험편 표면에 도달하는 이온빔의 전류량은 패러디 컵(faraday cup)을 이용하여 조절하였으며 시험편에 도달한 전체 이온 에너지의

Fig. 2. Photograph of Ion-assisted reaction system

양은 $1\times10^{16}$ions/㎠로 처리하였다. Fig. 2는 탄소섬유/에폭시 복합재 표면처리에 사용된 이온도움반응장치이며 Fig. 3은 시스템 개략도를 나타낸다.

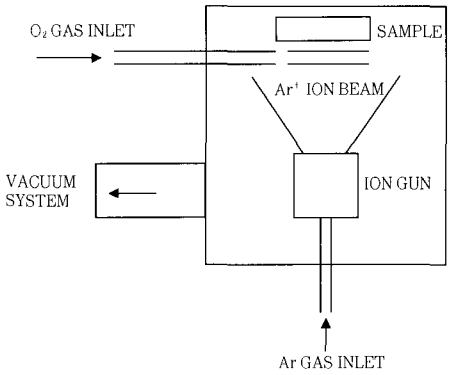


Fig. 3. Schematic diagram for an ion assisted reaction system

### 2. 3. 시험편 제작 및 실험방법

이온도움반응법을 적용한 탄소섬유/에폭시 복합재의 표면처리가 CFRP/알루미늄 복합재의 접착강도에 미치는 영향을 정량화 하기 위해 SLS 시험편을 도입하여 전단강도 시험을 수하였다. 전단강도 시험은 시험편 제작이 용이하며 시험이 비교적 간단하기 때문에 이종재료 접착력 측정시 많이 이용되고 있으며 항공기나 접착구조물의 파괴모드에서 랩 조인트(lap joint)의 특성을 유사하게 묘사 할 수 있는 장점을 가지고 있는 시험법으로 ASTM D906-94a에 준하여 수행하였다[7]. 시험편 제작을 위해 먼저 알루미늄(Al 5052 H34-2T)을 MEK로 세척한 후 질소가스를 이용하여 표면에 잔류하는 용액을 제거하였다. 그후 $Ar^+$ 이온도움반응법으로 표면처리 한 탄소섬유/에폭시 복합재와 표면처리 하지 않은 탄소섬유/에폭시 복합재를 알루미늄의 압연방향과 섬유의 배열방향이 일치하게 적층한 후 접착제를 이용하여 핫프레스(hot press)내에서 5kg/㎠의 일정 압력으로 상온에서 24시간 경화하여 접착시키는 이차경화법(secondary curing method)을 적용하여 제작하였다. Fig. 4는 시험에 사용된 SLS 시험편을 나타낸다.

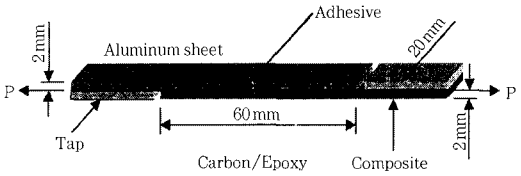


Fig. 4. Schematic diagram of single lap shear specimen

접착제는 열경화성 에폭시 수지(Epoxy Resign)인 비스페놀 A형 디글시딜 에테르(Diglycidyl Ether of Bisphenol A-DGEBA, YD-115, (주)국도화학)와 경화제로 디아닐렌(Dianiline, D-230, (주) 국도화학)을 중량비 4 : 1의 수지혼합비로 기포가 발생하지 않도록 유의하여 혼합해 사용하였다.

SLS 시험편은 시험편의 형상에 의해 하중이 가해지는 위치가 달라 발생하는 모멘트를 제거하고 겹친(overlap) 부위의 순수전단력을 구하기 위해 알루미늄과 복합재의 두께와 동일한 2㎜의 탭을 양 끝단에 미끄러지지 않도록 부착하였다.

실험은 용량이 10ton인 만능재료시험기를 사용하여 변위 조정을 통한 일정 변형률(0.5㎜/min) 하에서 수행하였으며 하중 및 변위 데이터는 만능재료시험기에 부착된 LVDT를 이용하여 10-3㎜까지 측정하였다. 또한 실험 경과의 유사성을 판단하기 위해 각 경우에 대하여 최소한 4개 이상의 실험을 같은 조건하에서 반복 수행하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 5는 SLS 시험편을 적용한 전단강도 시험시 두 경우의 시험편에 대한 전형적인 하중-변위 선도를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 두 경우 모두 변위 초기에는 하중이 급격히 증가하다가 완만한 비선형을 이루는 구간을 거쳐 파괴되기 전까지 하중이 한동안 유지되는 유형을 나타내며 복합재를 표면처리한 경우 동일한 변위에 대하여 하중이 더 높게 나타난다. 따라서 Fig. 5와 같이 파괴가 발생하기 전까지 하중이 변위에 대하여 비선형 거동을 나타내는

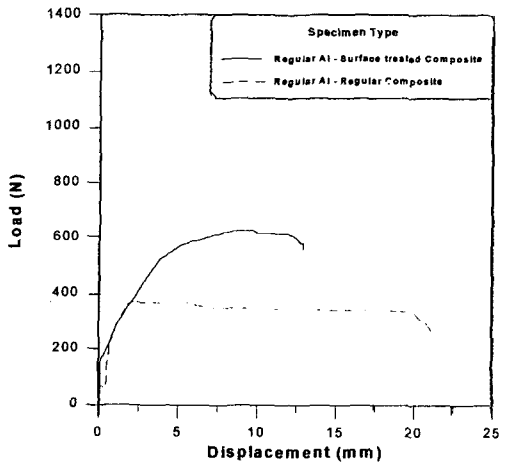


Fig. 5. Load-displacement curves of SLS test for surface-treated CFRP/aluminum and regular CFRP/aluminum composites

경우에 있어서 임계하중, Pcr 결정은 Fig. 6과 같이 세 가지 방법으로 결정 할 수 있다[8].

첫 번째 방법은 Fig. 6에서 처럼 하중-변위 선도에서 비선형이 시작되는 점의 하중, PNL을 Pcr 값으로 취하는 것이고, 두 번째 방법은 초기 선형 기울기로부터 5% 감소된 기울기를 가지는 직선을 그려서 선도와 만나는 P5값을 $P_{cr}$로 결정하는 것이며 세 번째 방법은 파괴가 발생하기 전까지의 최대하중인 $P_{max}$ 값을 $P_{cr}$로 결정하는 것이다.

본 연구에서는 정확히 비선형이 시작되는 하중점과 비선형 구간을 결정하기가 어려워 $P_{max}$ 값을 $P_{cr}$ 값으로 결정하여 두 시험편의 경우에 대하여 상대비교하는 방법을 취하였다.

Fig. 7은 하중-변위 선도의 최대하중으로 결정된 두가지 경우의 시험편에 대한 임계하중 $P_{cr}$의 평균값을 나타내며 에러바(error bar)는 임계하중 $P_{cr}$의 최대 및 최소값을 나타낸다.

Fig. 8은 두 경우의 시험편에 대한 전단강도를 나타낸다. 전단강도는 탭에 의해 최소한의 모멘트를 제거하였으므로 다음의 식을 이용하여 결정하였다.

$$\tau = \frac{P_{cr}}{A} \tag{1}$$

윗 식에서 $\tau$는 전단강도를, $P_{cr}$은 임계하중을, A는 접착면의 면적을 나타낸다. 그림에 나타나 있듯이 복합재를 표면처리한 시험편의 경우 평균 전단강도는 0.56MPa이며 표면처리하지 않은 시험편의 전단강도는 0.36MPa이다. 즉 최적의 표면처리 조건을 적용하여 복합재를 이온도움반응법으로 표면처리하였을 때 CFRP/알루미늄 복합재의 전단강도는 표면처리하지 않은 경우에 대하여 약 36% 정도 증가

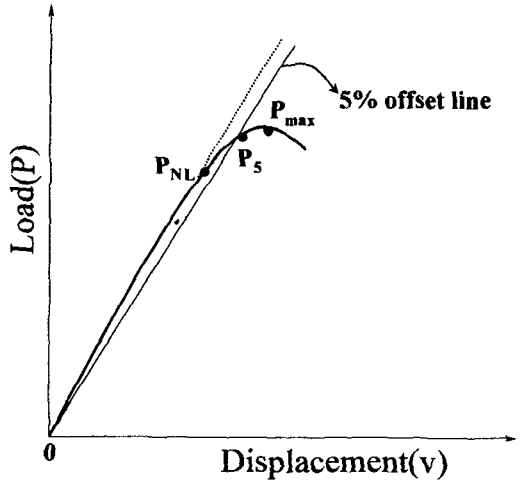


Fig. 6. Schematic illustration of determining $P_{cr}$ in the load-displacement curves

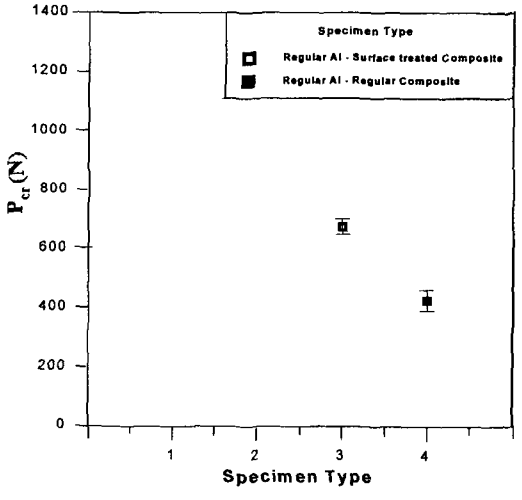


Fig. 7. Change of critical load, Pcr for specimen type

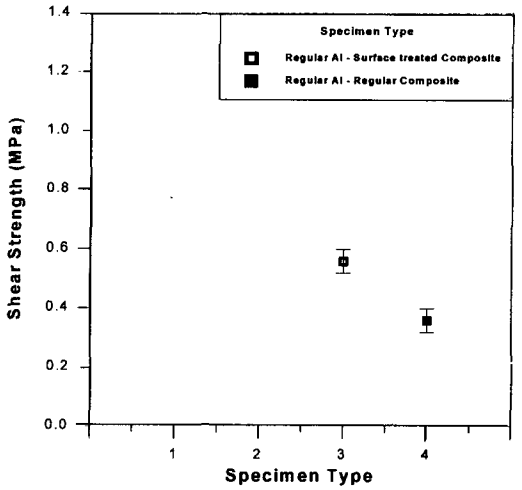


Fig. 8. Comparison of shear strength for surface-treated CFRP/aluminum and regular CFRP/aluminum composites

함을 알 수 있다. 이러한 결과는 $Ar^+$ 이온 조사에 의해 화학적 반응이 높은 불안정한 반응성기와 주입된 반응성 산소 가스가 결합하여 복합재 표면에 C-O, C=O, C=O-O와 같은 친수성 기능그룹의 형성에서 기인된 것으로 사료된다[9]. 즉 높은 표면에너지로 인해 에폭시 고분자가 접착계면에서 확산을 이루어 층간접착강도를 향상시켜 복합재 표면처리를 경우가 표면처리하지 않은 경우에 대하여 전단강도가 향상된 것으로 사료된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 $Ar^+$ 이온도움반응법을 적용 최적의 표면처리 조건(이온에너지 1keV, 이온에너지양 $1\times10^{16}$ions/㎠)으로 CFRP를 표면처리시 CFRP 표면처리가 CFRP/금속재 복합재의 전단강도에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 표면처리를 수행한 CFRP와 표준 CFRP를 적용한 SLS 시험편을 이용하여 전단강도 시험을 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) CFRP를 표면처리한 경우 하중-변위 선도는 두 경우 모두 변위 초기에는 하중이 급격히 증가하다가 완만한 비선형을 이루는 구간을 거쳐 파괴되기 전까지 하중이 한동안 유지되는 유형을 나타내며 복합재를 표면처리한 경우 동일한 변위에 대하여 하중이 더 높게 나타난다.

2) 표면처리 한 경우의 평균 전단강도는 0.56MPa이며 표면처리하지 않은 경우의 평균 전단강도는 0.36MPa로 약 36%정도 증가하였으며 이는 이온도움반응법에 의한 표면처리가 CFRP 표면에 친수성 기능그룹을 형성시켜 높은 표면에너지로 인해 에폭시 고분자가 접착계면에서 확산을 이루는데 기인하는 것으로 사료된다.

## 후 기

본 논문은 2000년도 원광대학교 교비연구비 지원에 의하여 연구된 논문이며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Denney, J.J. and Mall S., "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)
2. Chester, R.J., Walker, K.F. and Chalkley, P.D., "Adhesively bonded repairs to primary aircraft structure", International J. of Adhesion and Adhesives, Vol. 19, pp. 1-8, (1999)
3. Baker, A.A., "Bonded composite repair of fatigue-cracked primary aircraft structure", Composite Structures, Vol. 47, pp.431-443, (1999)
4. Schubbe, J.J. and Mall, S., "Investigation of a cracked thick aluminum panel repaired with a bonded composite patch", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 63, pp.305-323, (1999)

5. Baker, A.A. and Jones A.A., editors, "bonded repair of aircraft structures", Martinus Nijhoff Publishers, (1988)
6. 이경엽, 강용태, 양준호, "에너지 구조재 적용을 위한 알루미늄/섬유강화 복합재의 표면처리" 한국표면공학회지, 제34권, 1호 pp.56-61, (2001)
7. ASTM D906-94a, "Standard test method for strength properties of adhesives in plywood type construction in shear by tension loading1," ASTM Standards, Vol. 15.06, pp. 25-28.
8. Benezeggah, M.L. and Kenane, M., "Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus," composite science and technology, Vol. 56, pp. 439-449. (1996)
9. Choi, S.C., Park, Y.K., Choi, W.K., "Thin film growth and surface modification by KeV ion beam," Japan J. of Applied Physics, Vol. 37, pp. 6984-6990. (1998)