한국정밀공학회지 제 21 권 제 11 호 (2004 년 11 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 21, No. 11, November 2004.

탄소섬유/에폭시 복합재로 보수된 알루미늄의 피로특성에 대한 연구 - 알루미늄 표면처리 효과

김만태*, 이경엽#

A Study on the Fatigue Behavior of Aluminum Repaired by Graphite/Epoxy Composite - Pretreatment Effect of Aluminum

Man Tae Kim*, Kyong Yop Rhee#

ABSTRACT

For a present study, we investigated fatigue behavior of cracked aluminum repaired by unidirectional graphite/epoxy composite material. Three different specimens were used in the fatigue tests: cracked aluminum, cracked aluminum repaired by graphite/epoxy composite patch, and plasma-treated aluminum repaired by graphite/epoxy composite patch. The surface of the aluminum was treated using a DC plasma. The results showed that the fatigue crack growth behavior of cracked aluminum was significantly improved by repairing the cracked area with a composite patch. Specifically, the specimen repaired by composite patch showed about 300 % more fatigue life than the cracked aluminum. In particular, the plasma-treated aluminum repaired by composite patch showed almost 12 % more fatigue life than the cracked aluminum repaired by graphite/epoxy composite patch. The increased fatigue life of plasma-treated case was attributed to the surface roughness of aluminum by plasma treatment.

Key Words : Stress Intensity Factor (응력확대계수), Graphite/epoxy Composite (탄소섬유/에폭시 복합재), Plasma Treatment (플라즈마 표면처리), Fatigue Life (피로 수명)

기호설명

a = Crack length
K = Stress Intensity Factor
N = Number of cycle
W = Specimen wdth
σ = Applied stress

1. 서론

탄소섬유/에폭시 복합재료는 기존의 금속재료와 비교하여 뛰어난 비강도와 내부식성을 가지며, 탁월한 피로강도를 가지고 있다.[1] 이 같은 우수한 특성 때문에 2 차 구조재에 대한 응용범위를 넘어 1 차 구조재에도 응용하는 추세이다.[2-4] 또한 금속소재와 복합재료를 접합한 이종재료는 기존의

접수일: 2004 년 5 월 17 일; 게재승인일: 2004 년 9 월 9 일
* 경희대학교 대학원
# 교신저자: 경희대학교 테크노공학대학
E-mail : rheeky@khu.ac.kr Tel. (031) 201-2565

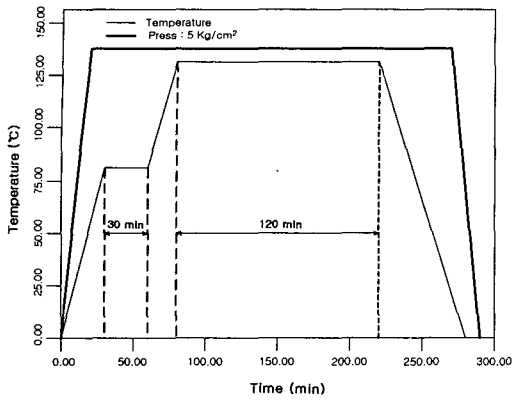


Fig. 1 Illustration of consolidation cycle of CFRP composite

금속소재가 가지지 못하는 뛰어난 기계적 특성 및 무게의 절감으로 인해 다양한 산업에서 광범위 하게 사용되고 있다. 특히 항공산업에서는 탄소섬유/에폭시 복합재를 균열이 발생한 구조물에 접착시켜 항공기의 내구성을 향상 시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

복합재료를 이용한 보수 응용기술들이 활발히 연구되는 가운데 실제 현장에서 적용할 수 있는 신속하고 효과적인 보수방법에 대해 관심이 증대되고 있다. 이러한 방법으로 대두되고 있는 기술이 복합재료를 금속 표면에 선택적으로 접합하는 기술이다.[5] 복합재와 금속재의 접합에는 크게 기계적 접합과 접착에 의한 접합으로 나눈다. 때로는 이 두 가지의 방법을 함께 사용하는 경우도 있다. 복합재료를 접착하여 보수하는 기술에는 여러 가지 변수가 작용하지만 특히 보수 구조물과 복합재료 간의 계면 결합력, 접착제의 특성, 복합재료 물성 등이 보수 구조물의 내구성을 결정하는데 영향을 주는 변수이다.[6] 이 중 계면 결합력은 표면상태와 접착 처리방법에 의해 큰 영향을 받는다. 계면 결합력을 개선 하기 위한 방법에는 기본적으로 기계적 방법과 화학적 방법이 있다. 기계적 방법은 보수 구조물의 표면을 거칠게 함으로써 계면의 표면적을 넓혀주는 방법이다. 화학적인 방법은 보수 구조물 또는 복합재료의 표면을 화학적으로 처리함으로써 표면의 친수성을 증가 시켜주는 방법이다. 따라서 금속재 및 복합재료의 표면 친수성을 증가

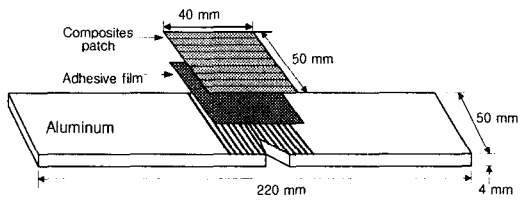


Fig. 2 Schematic diagram of SEN (Single-Edge Notched) Al/CFRP composite specimen

시키기 위한 다양한 표면 처리방법이 연구 되고 있으며, 이를 적용한 경우의 접합강도 특성결과가 발표 되고 있다. 그러나, 이에 비해 표면처리가 이종재 구조물의 내구성에 미치는 영향에 대한 연구는 거의 발표되지 않고 있는 실정이다.

따라서 본 논문에서는 탄소섬유/에폭시 복합재를 균열이 발생한 알루미늄에 접착시켜 알루미늄 구조물의 내구성을 향상시키기 위한 기초연구로서 알루미늄의 표면처리 효과에 대해 다루었다. 이를 위해 알루미늄을 플라즈마로 표면처리 하였으며, 표면처리에 따른 알루미늄-탄소섬유/에폭시 이종재의 피로특성에 대해 연구하였다. 또한 알루미늄의 플라즈마 표면처리가 내구성 향상에 미치는 영향을 이해하기 위해 표면처리 유무에 따른 알루미늄 표면을 원자 현미경을 이용하여 분석하였다.

2. 실험방법

2.1 탄소섬유/에폭시 (CFRP) 복합재 성형

본 연구에 사용된 탄소섬유/에폭시 복합재 패치는 ㈜SK 케미칼에서 생산되는 탄소섬유/에폭시 프리프레그를 250 mm * 250 mm 크기로 절단 후 0° 방향으로 4 장 적층하여 오토클레이브를 이용하여 성형하였다. 성형된 복합재 패치의 두께는 약 0.75 mm 였다. 탄소섬유/에폭시 복합재의 성형 조건은 Fig. 1 에 나타내었다.

2.2 알루미늄 표면처리 및 알루미늄-CFRP 이종재 성형

알루미늄은 크기가 220 mm * 50 mm * 4 mm 인 7075-T6 를 사용하였고, 한 쪽에 16 mm 의 V-형태의 노치를 가공하여 SEN (Single- Edge Notched)시편을 제작하였다. 알루미늄 표면에 DC 플라즈마 처리는 다음과 같이 수행 하였다.

알루미늄 시편에 알루미나 가루 (입자크기:75

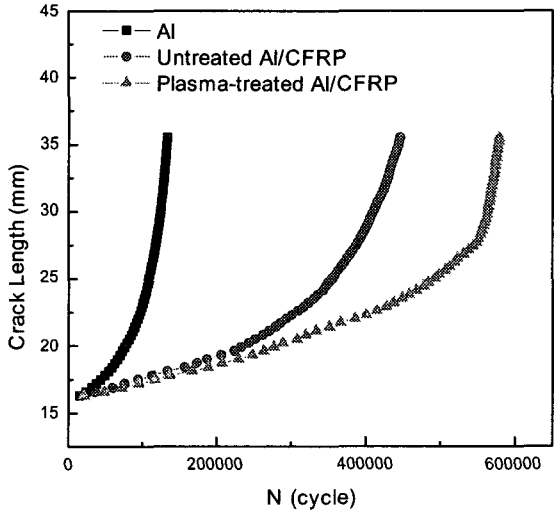


Fig. 3 Comparison of experimental data for the fatigue life of cracked aluminum, cracked aluminum repaired by CFRP, and plasma-treated aluminum repaired by CFRP

㎛)를 사용하여 표면을 브러싱 (brushing)한 후 5 분간 초음파 세척을 통해 알루미늄 표면에 잔류하는 찌꺼기를 세척하였다. 플라즈마 처리는 불순물의 혼입을 막기 위해 진공조에서 수행하였고, 플라즈마 형성기체로는 아세틸렌(C_2H_2)과 질소(N_2)를 5:5 비율로 사용하였다. 혼합비율이 5:5 인 이유는 선행연구 [7] 에서 이 경우가 가장 좋은 필(peel) 강도와 접촉각을 나타내었기 때문이다. 플라즈마 형성은 DC 플라즈마로 압력과 전압은 300 mtorr 와 800 V 를 적용하여 플라즈마 처리를 수행하였다. CFRP 의 전처리는 성형 후 아세톤을 이용한 단순 표면 세척만을 적용하였다.

알루미늄/CFRP 이종재의 성형은 알루미늄과 CFRP 복합재 계면에 항공기용 접착필름 AF-126 을 삽입하여 오토클레이브 내에서 성형 하였다. Fig. 2 는 본 연구에서 사용된 알루미늄/CFRP 이종재 시편형상을 나타낸다.

2.3 AFM(Atomic Force Microscope) 분석

AFM 은 표면구조를 가시적으로 관찰하기 위하여 개발된 표면구조 분석장치로서 일반적으로 표면의 물리적 형상 변화를 측정 목적으로 사용된다. 표면개질을 통한 물리적 변화를 측정하기 위해 알루미늄 표면에 알루미나 가루를 이용하여 전처리

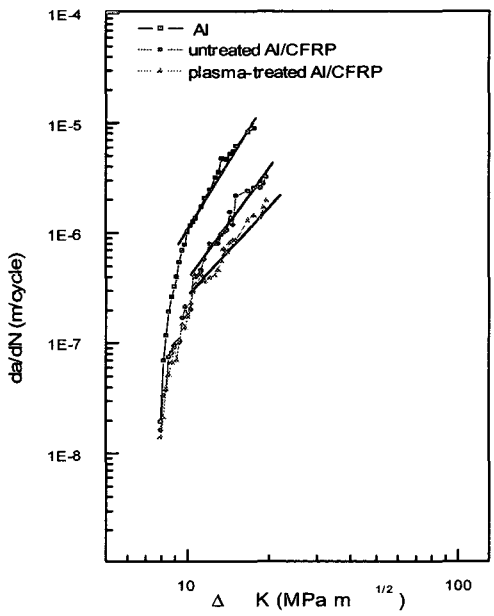


Fig. 4 Comparison of crack propagation for cracked aluminum, cracked aluminum repaired by CFRP, plasma-treated aluminum repaired by CFRP

한 다음 표면에 찌꺼기를 제거하기 위해 5 분간 초음파 세척 과정을 거친 다음 플라즈마 표면처리 유무에 따른 알루미늄의 표면을 관찰하였다. 본 연구에서 사용된 장비는 Autoprobe CP Research System 이며, 20 μm^2 의 면적을 측정하여 알루미늄 표면의 거칠기를 측정하였고, 3D 형상으로 알루미늄 표면의 형상을 비교하였다.

2.4 피로균열전파 실험

피로균열전파 시험은 상온에서 응력비를 0.1 로 10 Hz 의 하중 주파수를 조건으로 시험편에 부과하여 수행하였다. 피로균열전파 시험에 사용된 시험기는 동적 만능시험기를 사용하였고, 균열전파거동은 광학배율 100X 의 이동현미경을 이용하여 관찰하였다. 균열전파에 따른 균열길이 측정을 용이하게 하기 위해 알루미늄 시편 한쪽 표면을 경면 연마하였다. 피로균열전파 시험은 각 경우의 시편에 대해 최소 두 개 이상의 시편을 적용하여 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

균열전파거동을 해석하기 위해 반복하중 횟수에 따른 균열길이 증가를 세 경우 시편에 대해 비교하였다. 또한 SEN 시편의 응력확대계수를 구하였으며, Paris 식을 적용하여 각 시편에 대한 재료상수 값을 비교하였다. 또한 표면처리 유무에 따른 피로특성의 차이를 관찰하기 위해 AFM 을 이용하여 표면 관찰하였다.

Fig. 3 은 세 경우의 시편에 있어 반복하중 횟수에 따른 균열길이 증가를 비교하여 나타낸 그림이다. Fig. 3 에 나타나 있듯이 두 가지 사실을 알수 있다.

첫째, 균열이 발생한 알루미늄에 탄소섬유/에폭시 복합재 패치를 이용하여 보수할 경우 균열누진이 발생해 피로수명이 상당히 증가함을 알 수 있다. 예를 들어 알루미늄은 약 15000 cycle 에서 초기균열이 진전하는 반면에 복합재 패치로 보수된 알루미늄의 경우는 약 18000 cycle 정도에서 초기균열이 진전되어 약 20 % 정도의 초기균열 진전누진이 발생되었다. 또한 10 mm 의 균열진전 시 균열누진을 비교한 결과 복합재 패치로 보수한 알루미늄의 경우 보수하지 않은 알루미늄 보다 약 3 배 정도의 균열누진이 발생하였다. 완전 파단까지의 피로수명을 비교한 결과 알루미늄의 경우는 약 130,000 cycle 정도에서 파단이 발생하였지만 복합재 패치로 보수한 알루미늄의 경우는 약 470,000 cycle 정도에서 파단이 발생하였다. 피로수명의 차이가 발생하는 이유는 알루미늄의 균열선단에 작용하는 집중하중이 복합재 패치로 인해 분산되어 작용하는 것이 큰 원인으로 판단된다.

둘째, 탄소섬유/에폭시 복합재로 보수된 경우에 있어 초기균열 진전시 피로균열 진전 거동은 표면처리 유무에 상관 없이 비슷하게 진행 함을 알 수 있다. 이는 두 경우의 시편이 거의 동일한 성형상태를 유지함을 나타낸 것이라 할 수 있다. 그러나 균열길이가 약 3 ~ 5 mm 정도 진전된 후에는 표면처리를 한 알루미늄을 적용한 경우가 더 큰 균열누진이 발생하면서 표면처리를 하지 않은 알루미늄을 적용한 경우보다 피로수명이 증가함을 알 수 있다. 구체적으로 알루미늄을 플라즈마로 표면처리한 경우 표면처리하지 않은 경우에 비해 피로수명이 약 12 % 정도 증가하였으며 순수 알루미늄 한 원인에 기인하지만 플라즈마 표면처리로 인해 알루미늄 표면에 식각효과가 발생하여 접착제와의 계면면적이 넓어진 것이 주 원인으로 판단된다.

Table 1 Comparison of Experimental data for material Constant

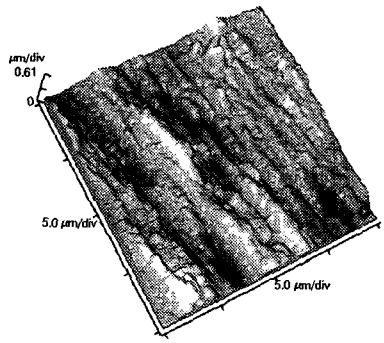
	Al	Untreated Al/CFRP	Treated Al/CFRP
C	$10^{-9.49}$	$10^{-9.88}$	$10^{-9.69}$
n	3.62	3.44	3.09

탄소섬유/에폭시 복합재로 보수된 알루미늄의 피로수명을 예측하기 위해서는 균열길이에 따른 응력확대계수의 결정이 필요하다. 본 연구에서는 식 (1)와 (2)을 이용 세 경우 시편에 대한 응력확대계수를 결정하였다.

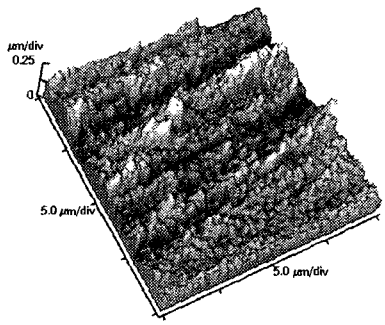
$$K = \sigma\sqrt{\pi a}\, f\left(\frac{a}{W}\right) \tag{1}$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = 1.12 - 0.231\left(\frac{a}{W}\right) + 10.55\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 21.72\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 30.39\left(\frac{a}{W}\right)^4 \tag{2}$$

식 (1)과 (2)에서 "f(*a*/*W*)" 는 SEN 시편의 형상계수를 구하는 식이고, "σ " 는 반복응력을, "a"는 균열길이를, "*W*"는 시편의 폭을 나타낸다. Fig. 4 는 세 경우 시편에 대한 응력확대계수 증가에 따른 균열진전 속도를 log-log 스케일로 비교하여 나타낸 그림이다. Fig. 4 에 나타나 있듯이 균열진전속도는 응력확대계수가 증가함에 따라 알루미늄 > 표면처리 하지 않은 알루미늄을 적용한 알루미늄/CFRP > 표면처리 한 알루미늄을 적용한 알루미늄/CFRP 의 순으로 나타남을 알 수 있다 특히 복합재 패치로 보수된 알루미늄 경우에도 순수 알루미늄 경우처럼 피로균열 진전거동은 세 영역으로 나누어짐을 알 수 있다. 따라서 Paris 식을 이용해 세 경우 시편에 대한 균열진전 거동을 응력확대계수의 함수로 모델링 하였다. 식 (3)은 피로균열전파 거동을 예측하기 위해 널리 사용되고 있는 Paris 식을 나타낸다.



(a) Untreated aluminum.



(b) Plasma-treated aluminum.

Fig. 5 Photograph of aluminum surface, untreated case (a) and plasma-treated case (b)

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \qquad (3)$$

윗 식에서 "da/dN" 는 균열진전속도를 "ΔK" 는 응력확대계수 범위를 나타내고, "C", "n" 은 재료상수를 나타낸다. 각 경우의 시편에 대한 "C"와 "n" 값은 Fig. 4 에서 해당하는 그래프의 영역Ⅱ에 대한 절편과 기울기를 측정하여 결정하였다. Table 1 은 세 경우 시편에 대한 "C"와 "n" 값을 나타낸다. Table 1 에 나타나 있듯이 표면처리한 경우가 "n" 값이 가장 작음을 알 수 있다.

플라즈마를 적용한 알루미늄의 표면처리가 왜 알루미늄/CFRP 이종재의 피로특성을 향상시키는가를 이해하기 위해 알루미늄 표면에 대해 표면분석을 시행하였다. 일반적으로 플라즈마로 표면처리할 경우 극성기가 증가하여 표면력이 향상되고, 계면간의 접착력이 향상되는 것으로 알려져 있다.[8] 따라서 본 연구에서도 이와 같은 화학적인 변화의 요인을 분석하기 위해 XPS 를 이용하여 측정한 결과 별다른 변화가 없음을 알 수 있었다. 따라서 물리적 형상의 변화를 AFM 으로 측정하였다. Fig. 5 는 표면처리 유무에 따른 알루미늄표면을 AFM 으로 관찰한 것이다. Fig. 5 에 나타나 있듯이 플라즈마 표면처리에 의해 알루미늄 표면의 물리적 형상이 변하였음을 관찰할 수 있다. 즉, 플라즈마로 표면처리 한 경우 표면에 식각 효과로 인한 깊이 방향으로 기공이 발생하였음을 알 수 있다. 그러나 표면조도를 측정한 결과 같은 20 μm^2 면적 안에서 표면처리 한 알루미늄이 더 작은 표면조도를 나타내었다. 금속재의 거칠기에 따른 이종재 접합에 대한 기존 연구에서 거칠기가 작을수록 오히려 접착력이 증가되는 경향이 있음이 발표된 바 있다.[9] 결론적으로 표면 거칠기가 작고 표면처리에 의한 식각 효과로 표면적이 증가하였다. 이는 접착력 향상을 야기하며 따라서 피로수명이 증가되는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 균열이 발생한 알루미늄을 복합재 패치로 보수함으로 발생하는 피로수명의 향상과, 표면처리 유무에 따른 피로특성에 대해 연구하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 복합재 패치로 균열이 발생한 알루미늄을 보수한 경우 보수하지 않은 알루미늄보다 약 3 배 이상의 피로수명이 증가 하였고, 특히 표면처리를 한 알루미늄을 적용한 경우는 4 배 정도의 피로수명이 증가하였다. 이는 복합재 패치로 인한 반복하중의 분산과 표면처리를 통한 계면의 물리적 형상 변화가 주 요인으로 판단된다.
2) DC 플라즈마에 의한 식각 효과는 알루미늄 표면의 깊이 방향으로 기공이 발생함으로 접착필름이 잘 스며들어 계면의 접착력을 향상 시키고, 결국 계면의 접촉면적이 증가함으로 접착력이 향상되어 피로수명에 영향을 주는 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 학술진흥재단 선도연구과제 (과제번호 : KRF-2003-041-D00026)의 일환으로 수행되었으며 이에 사의를 표합니다.

참고문헌

1. Yoon, H. K., Chang, H. Y., Park, W. J. and Hue, C. W., "The behavior of crack growth rate for APAL and CPAL patched with FRP laminate in aluminum alloy plate," J. of the KSME, Vol. 19, No. 4, pp. 1013, 1995.
2. Middletion, D. H., "Composites materials in aircraft structure," Longman Scientific & Technical, pp. 273 - 288, 1990.
3. "Advanced composite material(ACM)," Aviation Management Research Institute, pp. 1-16, 1985.
4. Hong, C. H., "Advanced technology of composite materials," J. of the KSME, Vol. 34, No. 5, pp. 334-341, 1994.
5. "Advanced aircraft industry," KIAT, pp. 119-133, 1991.
6. Rhee, K. Y., Yang, J. H. and Choi, N. S., "Effect of aluminum treatment by plasma on the bonding strength between aluminum and CFRP composites, " J. of the KSME, Vol. 25, pp. 1981-1987. 2001.
7. Rhee, K. Y. and Shin, M. K., "Effect of plasma treatment of aluminum on the fracture toughness of Al/CFRP composites," J. of the KSPE, Vol. 20, No. 8, pp. 153-158, 2003.
8. Kim, T. G., Yang, J. H. and Cho, S. B., " A study on the enhancement of bonding strength for dissimilar materials," Theses Collection of The Institute of advanced materials, Vol. 10, pp. 25-32, 1998.
9. Lee, D. G., Kim, K. S. and Jun, E. J., "Experimental investigation of the torsional fatigue strength of the adhesive bonded tubular single lap joints," J. of KSCM, Vol. 3, No. 1, pp. 1-9, 1990.