

Al/CFRP 하이브리드 복합재료의 인장파괴거동

강지웅 · 권오현^{*†} · 유진규

부경대학교 안전공학과 · ^{*}부경대학교 안전공학부

(2009. 1. 22. 접수 / 2009. 4. 12. 채택)

The Behavior of Tensile Fracture for Al/CFRP Hybrid Composite Material

Ji-Woong Kang · Oh-Heon Kwon^{*†} · Jin-gyu Ryu

Department of Safety Engineering, Pukyong National University

^{*}Division of Safety Engineering, Pukyong National University

(Received January 22, 2008 / Accepted April 12, 2009)

Abstract : The hybrid composite materials are recently used in many field as an advanced material due to their high resistance to fracture. However, hybrid composite materials have several problems, especially delamination, compared with homogeneous materials such as an aluminum alloy, etc. In this study, we carried out the tensile test to study the tension failure appearances and tensile ultimate strength of CFRP/Al/CFRP hybrid composite materials. The CFRP material used in the experiment is a commercial material known as CU175NS in unidirectional carbon prepreg. Also Al/CFRP/Al hybrid composites with three kind length of a single edge crack were investigated for the relationship between an aluminium volume fraction and a crack length. The crack length was measured by a traveling microscope under a universal dynamic tester. Futhermore the stress intensity factor behavior was examined according to a volume fraction and an initial crack length ratio to a width.

Key Words : carbon fiber reinforced plastics (CFRP), hybrid composite materials, delamination, stress intensity factor, apparent stress, volume fraction, tension failure appearance

1. 서론

항공기 기체재료로 많이 사용되어져 온 알루미늄 합금은 신뢰성, 경제성 및 경량성 등의 측면에서 우수하나 비강도 및 내피로 특성에 한계가 있어 복합재료로 대체되는 부분이 점점 증가하고 있다. 그러나 일반적으로 널리 사용되는 탄소섬유 강화 복합재(Carbon Fiber Reinforced Plastics: CFRP)는 열에 약하고 화학적으로 불안정하며 취성을 가져 사용에 제약과 받고 있는 실정이다¹⁾. 이러한 섬유강화 복합재료의 단점을 보완 하기위해 최근 이종재료를 접합한 하이브리드 복합재료(Hybrid Composite)의 사용이 급증하고 있다²⁾. 하지만 하이브리드 복합재료는 보강섬유의 구성비, 프리프레그의 적층순서, 적층각도 뿐만 아니라 기지인 이종재와의 접합 등과 같은 접합구조가 하이브리드 복합재료의 성질에 영향을 주어 파괴메카니즘이 매우 복잡하여 이에 대한 연구가 국외에는 상당수 진행 중에 있지만³⁻⁵⁾ 국내에는 아직 미비한 실정이다⁶⁾. 따라서 본 연구의 목적은 하이브리드 복합재료로서 알루미늄과 탄소섬유 강화복합재를 사용하여 CFRP/Al/CFRP 하이브리드 복합재료의 파괴특성 및 Al/CFRP/Al 하이브리드 복합재료에 편축균열을 삽입한 후 단순인장파괴 실험을 수행하여 하중의 변화와 알루미늄의 두께가 강도특성 및 파괴특성에 어떠한 영향을 미치는가를 평가하는 것이다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1. 시험편 및 실험재료

CFRP/Al/CFRP 및 Al/CFRP/Al 하이브리드 복합재료 시험편을 만들기 위하여 국내 한국카본(주)에서 생산·시판되는 CU175NS(두께 t: 0.16mm) 일방향 탄소섬유강화 프리프레그와 두께 0.3, 0.5, 0.8mm의 Al 2036 알루미늄합금을 사용하였다. Table 1과 2는 시험편 제작에 사용한 프리프레그의 섬유 및 수

[†] To whom correspondence should be addressed.
kwon@pknu.ac.kr

Table 1. Compositions of the fiber and resin in CUI75NS prepreg

Material	Fiber Wt(g/m ²)	Resin Wt(g/m ²)	Resin Content(%)	Total Wt(g/m ²)
CUI75NS	175±2	90±9	34±2	265±11

Table 2. Compositions of the Al 2036 aluminum alloy (%)

Material	Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Other
Al 2036-T4	95.8	2.8	0.4	0.5	0.2	0.04	0.15	0.021	0.08

Table 3. The mechanical properties of Al 2036 and CUI75NS

Material	Tensile Strength (GPa)	Yield Strength (MPa)	Elastic Modulus (GPa)	Poisson's Ratio
Al 2036-T4	0.32	153	71	0.3
CUI75NS	3.7	-	124	0.28

지 함유량과 Al 2036 알루미늄합금의 화학적 성분을 나타낸다. Table 3은 Al 2036과 CUI75NS 프리프레그의 기계적 특성을 나타낸다. 성형판에 성형된 Al/CFRP 하이브리드 복합재료판을 절단시 계면 분리 현상의 문제점이 발생하는데 이 문제점을 해결하기 위해 성형 전 2플라이 프리프레그와 Al 2036 알루미늄 박판을 시험편 사이즈인 122mm×122mm로 제작하여 Fig. 1과 같이 적층하였다.

적층된 CFRP 프리프레그와 알루미늄 Al 2036은 열성형기(Hot Press)에서 성형하였다. 성형조건은 분당 5℃로하여 130℃까지 승온한 후 게이지 압력으로 30kgf/cm²의 압력을 가한 후 90분간 유지하였다. 성형이 완료된 후 시험편의 잔류응력에 의한 힘을 방지하기 위해 압력을 유지한 상태에서 약 0.5℃/min의 냉각속도로 서서히 상온까지 냉각시켰다. 성형된 하이브리드 복합재는 Al/CFRP/Al에 대하여 노치결합의 영향을 평가하기 위하여 a₀/W=0.4, 0.5, 0.6이 되도록 편측 균열을 삽입하였다. a₀는 초기 노치균열길이이며 W는 시험편폭을 나타낸다. 균열 삽입은 고속정밀 절단기를 사용하여 폭 0.5mm로 균열의 약 80~90%를 삽입하였고 나머지 부분은

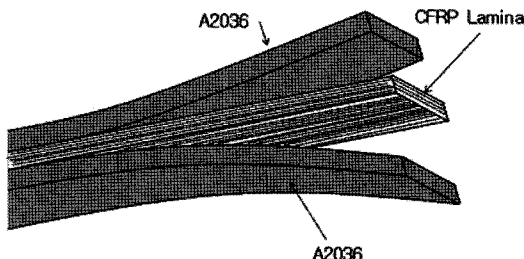
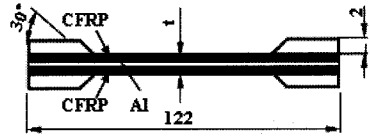
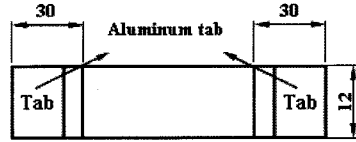
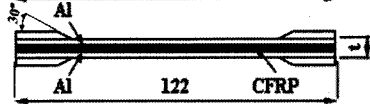
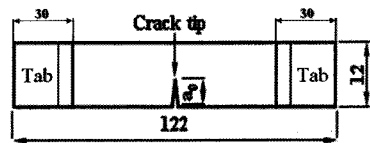


Fig. 1. Example of Al/CFRP/Al laminate lay-up.



unit : mm

Fig. 2. Specimen configuration of CFRP/Al/CFRP hybrid composite.



unit : mm

Fig. 3. SENT specimen configuration of Al/CFRP/Al hybrid composite.

면도칼을 사용하여 예비균열을 삽입하였다. ASTM D 3039에 따라 제작된 시험편의 형상은 Fig. 2 및 Fig. 3에 나타내었다. 이 때 알루미늄의 두께는 0.3, 0.5, 0.8mm의 3가지 경우에 대하여 시험편을 제작하였고, 제작 후 Al/CFRP/Al 하이브리드 복합재료 시험편의 두께(t)는 약 0.9, 1.3, 1.9mm가 되었고 CFRP/Al/CFRP 하이브리드 복합재료 시험편의 두께는 약 0.9, 1.1, 1.4mm가 되었다. Al/CFRP/Al와 CFRP/Al/CFRP 하이브리드 복합재료 시험편의 두께가 차이가 나는 것은 기본적으로 CFRP 프리프레그에 비교하여 Al 2036의 두께가 비교적 클 뿐만 아니라 적층 방법 및 성형시 수지의 감소정도에 따라 나타났다. 시험편 끝단에는 지그에 의한 손상과 미끄럼을 방지하기 위하여 알루미늄 탭을 부착하였다.

2.2. 실험방법

본 실험에서 사용된 시험기는 만능동적시험기(H사, 50kN)를 사용하였으며, Al/CFRP/Al 및 CFRP/Al/CFRP 하이브리드 복합재료에 대한 인장시험은 0.3mm/min 변위제어로 수행하였다. Al/CFRP/Al 하이브리드 복합재료의 파괴시험동안 균열성장길이는 4단 구조의 접안렌즈로 구성된 최저 5.5배율에서 최고 50배의 배율로 조절이 가능한 이동식 현

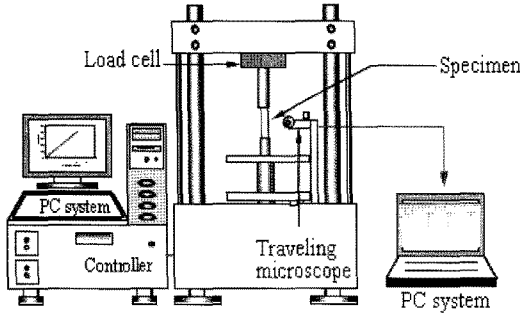


Fig. 4. Schematic diagram of experimental apparatus.

미경(일본, N사)을 이용하여 일정 균열성장 지점에서 50배의 배율로 측정하였다. 이때 측정된 균열길이는 디지털변환기인 IT-005D(일본, M사)를 거쳐 이동식 현미경에서 PC로 직접 저장되었다. Fig. 4는 실험장치의 개략도를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1. CFRP/AI/CFRP 하이브리드 복합재료 인장파괴시험

AI 2036의 두께를 0.3, 0.5, 0.8mm로 변화를 준 CFRP/AI/CFRP 하이브리드 복합재료에 대해 인장실험을 수행하여 파괴양상을 관찰하였다. Fig. 5는 각각의 경우에 대한 길보기 응력-변위선도를 나타낸다.

Fig. 5에는 비교를 위하여 하이브리드 시험편에 사용된 CU175NS 프리프레그를 4플라이로 적층하여 인장시험편을 만든 후 얻어진 결과와 AI 2036의 결과를 같이 표시하였다. Photo 1은 일방향 4플라이 CFRP의 인장파괴의 양상을 나타낸다. 파괴는 최대 3.7GPa에서 가장자리부터 일부 섬유소가 파단이

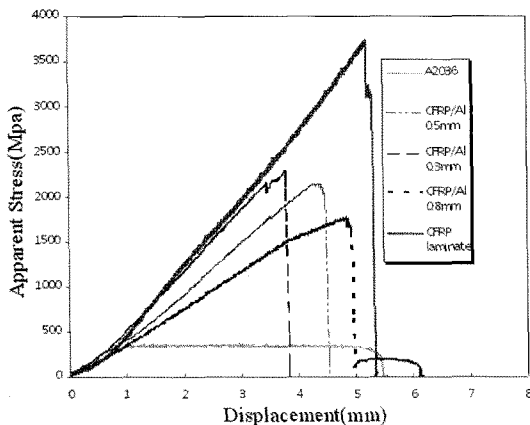


Fig. 5. Apparent stress-displacement curves for CFRP/AI/CFRP hybrid composites.



Photo 1. The typical fracture of unidirectional CFRP laminate composite(4plies).

일어나면서 발생된 후 시험편 안쪽 방향으로 섬유소가 연속적으로 각각 파단을 일으키다가 순간적으로 탬주위가 완전 파단되었다. AI 2036시험편은 전형적인 변형을 나타내었고 극한강도는 320MPa로 얻어졌다. 또한 Fig. 5의 AI 두께 0.3mm와 0.5mm인 경우의 CFRP/AI/CFRP 하이브리드복합재는 각각 2.3GPa, 변위 3.46mm, 2.1GPa, 변위 3.80mm의 최대응력부터 CFRP의 부분적인 파단이 발생한 후에, 0.3mm인 경우는 최대응력도달 직 후에, 0.5mm인 경우는 변위 3.98mm 위치에서 CFRP의 완전파단이 발생하면서 AI 2036과 CFRP 적층사이에 계면분리 현상이 나타남과 동시에 AI부분도 하중을 견디지 못하여 거의 동시에 파단되었다. 이와 같은 사실을 통하여 AI 두께 0.3, 0.5mm인 경우에는 CFRP 적층부분이 완전파단 시 시험편 전체에 미치는 하중영향이 잔존하는 AI 층에 순간적으로 전달되면서 파괴응력을 저지하지 못하고 거의 동시에 파단 됨을 알 수 있다. 반면에 AI 두께 0.8mm인 경우에는 파단 응력 1.7GPa, 변위 4.86mm부터 CFRP의 부분적인 파단이 발생하였고, 변위 4.92mm 위치에서 CFRP 적층의 완전파단이 발생하면서 AI과 CFRP 사이에 계면분리 현상이 나타났으나 AI 2036층이 CFRP와 동시 파단 되지 않고 가공경화 현상을 일으키면서 외부하중을 모두 담당하다가 최종변형 파괴되었다.

Photo 2 (a)-(c)는 AI 두께 별로 하이브리드 복합재료의 파괴형상을 나타내었다.

Fig. 5에서 얻어진 하이브리드 복합재료의 극한강도 및 탄성계수는 식 (1)의 혼합물법칙(ROM)⁷⁾에 적용하여 얻어질 수 있다.

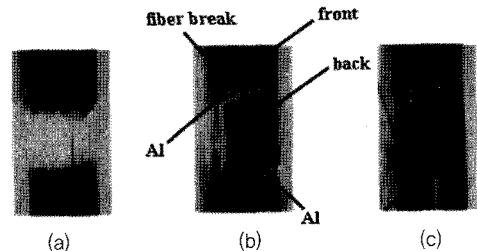


Photo 2. Fracture configuration for CFRP/AI/CFRP hybrid composite specimen((a) 0.3mm Al, (b) 0.5mm Al, (c) 0.8mm Al thickness).

Table 4. The comparison of the ultimate tensile strength between the theory and experiments for CFRP/Al/CFRP hybrid composites

Al thickness(mm)	0.3	0.5	0.8
CFRP Volume fraction(%)	67	55	43
Theory(GPa)	2.58	2.16	1.72
Experiment(GPa)	2.3	2.1	s1.7

$$\sigma_{hc} = v_{cf}\sigma_{cf} + v_m\sigma_m \quad (1)$$

여기서 σ_{hc} , σ_{cf} , σ_m 는 각각 하이브리드 복합재, CFRP적층판 및 Al 2036 알루미늄층의 극한강도를 나타내며 v_{cf} , v_m 은 각각의 체적율(volume fraction)을 나타낸다. 식 (1)에 의해 계산된 CFRP/Al/CFRP 하이브리드 복합재료의 극한강도값은 Al 2036의 두께가 0.3mm, 0.5mm 및 0.8mm로 커짐에 따라 각각 2.58GPa, 2.16GPa 및 1.76GPa를 얻는다. 이 결과는 Table 4에 나타내는 것과 같이 실험치와 거의 유사함을 알 수 있다.

3.2. Al/CFRP/Al 하이브리드 복합재료 인장파괴 시험

Al/CFRP/Al 하이브리드 복합재는 편축노치 시험편으로 제작되어 인장파괴시험을 행하였다. Fig. 6~8에는 하중-변위 선도와 균열성장길이(Δa)의 관계를 나타내었다. Δa 는 현재 균열길이에서 초기 노치균열길이를 제외한 값을 나타내며 파괴특성을 파악하기 위하여 응력확대계수 평가에 사용되었다. 균열길이 측정은 실험방법에서 제시한 바와 같이 50배 렌즈배율을 가진 이동식 현미경에서 육안으로 성장하는 균열선단을 연속적으로 추적하였다. 추적된 균열길이는 1/100mm의 정밀도로 디지털변환기 IT-005D 입력기를 통하여 PC에 자동적으로 저장시켰다.

Fig. 6의 (a)는 Al 두께 0.3mm, $a_0/W=0.4$ 인 경우의 하중-변위 선도와 균열성장길이(Δa)의 관계를 나타내며 하중이 가해지기 시작하여 최대하중인 5.35kN까지 선형적으로 증가한 후 변위 1.32mm 위치에서 CFRP 부분적인 급작파괴가 발생하였다. Al 표면에서 관찰된 균열은 변위 1mm 위치에서 성장을 개시한 후 서서히 진전하다 하중의 대부분을 담당하던 CFRP가 파단 되는 순간 과대하중을 견디지 못하고 0.19mm에서 3.61mm로 급성장하였다. 이후 2.35kN에서 2.43kN까지 상승한 후 CFRP가 완전파단 되었다. 이 때 Al의 균열도 급성장하였고

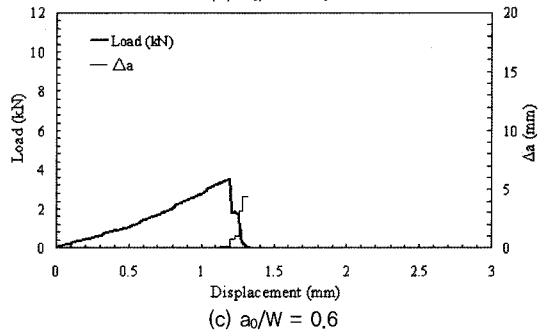
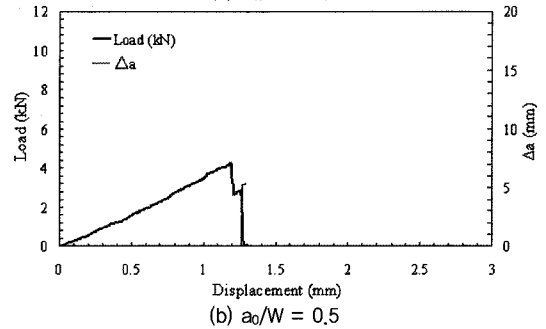
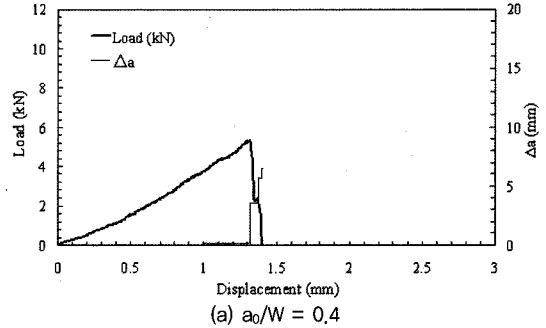


Fig. 6. Load-displacement and crack extension length variation of a fracture test for Al/CFRP/Al hybrid composite(Al thickness = 0.3mm).

이 후 변위 1.4mm 위치에서 완전파단 되었다.

Fig. 6의 (b)는 Al 두께 0.3mm, $a_0/W=0.5$ 인 경우의 하중-변위 선도와 균열성장길이(Δa)의 관계를 나타내며, (c)는 Al 두께 0.3mm, $a_0/W=0.6$ 인 경우를 나타낸다. 이 두 경우도 $a_0/W=0.4$ 인 경우와 유사한 경향이 나왔다. 이것으로 보아 Al 두께 0.3mm인 Al/CFRP/Al 시험편은 CFRP 파단시 Al 두께 0.3mm는 시험편강도유지에 큰 영향을 주지 못하며 CFRP의 취성파괴에 순간적으로 저항력이 저하하였다.

Fig. 7의 (a)는 Al 두께 0.5mm, $a_0/W=0.4$ 인 경우의 하중-변위 선도와 균열성장길이(Δa)의 관계를 나타내며 하중이 가해지기 시작하여 최대하중인 6.64kN까지 선형적으로 증가한 후 변위 1.43mm 위

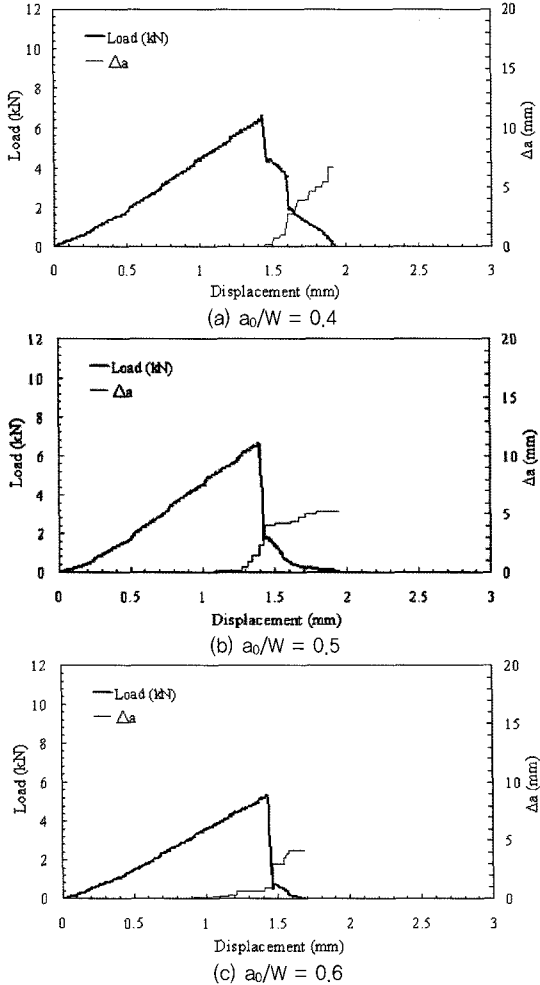


Fig. 7. Load-displacement and crack extension length variation of a fracture test for Al/CFRP/Al hybrid composite(Al thickness = 0.5mm).

치에서 CFRP가 부분적인 급작파괴가 발생하였으나 이후 CFRP와 Al의 균열이 서로 성장 및 정지를 반복하다 변위 1.63mm 지점에서 CFRP가 완전 파단 되었다. 이 때 Al은 완전파단 되지 않고 균열 성장, 정지를 반복하다 변위 1.92mm 위치에서 완전파단 되었다. Fig. 7(b)는 Al 두께 0.5mm, $a_0/W = 0.5$ 인 경우, Fig. 7(c)는 Al 두께 0.5mm, $a_0/W = 0.6$ 인 경우의 하중-변위 선도와 균열성장길이(Δa)의 관계를 나타낸다. 이 경우에도 앞의 Fig. 7(a)인 경우와 유사한 경향이 나왔다.

이 결과로부터 Al 두께 0.5mm인 Al/CFRP/Al 시험편은 CFRP 파단시 Al 두께 0.5mm는 CFRP의 취성파괴를 저지하여 전체적인 시험편의 파단을 지연시켰다. 이때 Al층의 체적율은 77%에 해당된다.

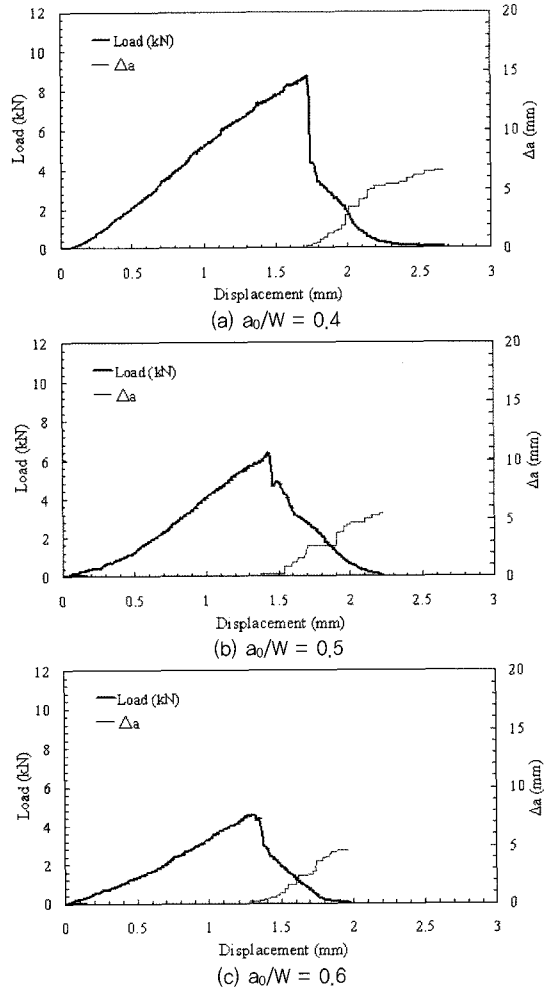


Fig. 8. Load-displacement and crack extension length variation of a fracture test for Al/CFRP/Al hybrid composite(Al thickness = 0.8mm).

Fig. 8 (a)~(c)는 Al 두께 0.8mm, $a_0/W=0.4,0.5,0.8$ 인 경우의 하중-변위 선도와 균열성장길이(Δa)의 관계를 나타낸다. 하중이 가해지기 시작하여 최대 하중까지 선형적으로 증가한 후에도 CFRP가 완전 파단되지 않고 부분적으로 섬유소의 급작파괴가 발생하였다. 또한 Al 두께 0.5mm의 경우처럼 이후 CFRP와 Al에서의 균열 성장 및 정지가 반복되다가 CFRP가 완전 파단되었다. 이 때에도 Al층은 완전파단되지 않고 균열 성장, 정지를 완만히 반복하다 변위 2.65mm, 2.2mm, 2.0mm 위치에서 완전 파단되었다. Fig. 8의 경우에는 Al 층 부분이 비교적 두꺼워 CFRP층이 완전 파단되어진 후에도 부하하중의 영향이 전부 Al층에 전달되어져 파손저항력이 증대하고 CFRP의 취성파괴에 따른 급작

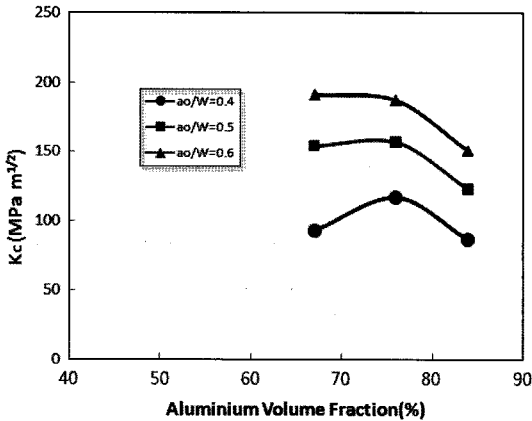


Fig. 9. Critical stress intensity factor(K_c) with the aluminium volume fraction at various a₀/W ratios.

파괴를 저지하여 전체적인 시험편의 파단을 지연시키고 있음을 나타낸다.

Fig. 9는 a₀/W의 변화에 따른 Al/CFRP/Al 하이브리드 복합재료의 Al층의 체적율변화에 대한 K_c 값의 분포를 나타낸 그래프이다. K_c는 식 (2)에 의해 정해졌다⁸⁾.

$$K_c = \frac{P}{h\sqrt{W}} f(a_0/W) \quad (2)$$

여기서 h는 시험편 두께이며 f(a₀/W)는 다음과 같다.

$$f(a_0/W) = \frac{\sqrt{2 \tan \frac{\pi a_0}{2W}}}{\cos \frac{\pi a_0}{2W}} \times [0.752 + 2.02(\frac{a_0}{W}) + 0.37(1 - \sin \frac{\pi a_0}{2W})^3] \quad (3)$$

체적율 v_m이 Al 두께가 0.3mm일 경우 a₀/W가 증가함에 따라 K_c가 93, 154 그리고 191MPa√m, Al 두께 0.5mm일 경우 117, 157 그리고 187MPa√m, 0.8mm일 경우 87, 123 그리고 151MPa√m 으로 나타나 Al층의 두께가 0.5mm인 체적율이 76%에 도달하면 값이 오히려 역전되어 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 Al/CFRP/Al 하이브리드 복합재를 제작할 때 CFRP에 대한 Al의 두께비를 고려해야 함을 나타낸다.

4. 결론

일방향 CFRP 적층복합재료와 Al합금 Al 2036판

을 이용하여 CFRP/Al/CFRP 및 Al/CFRP/Al 하이브리드 복합재를 제작한 후 인장파괴시험을 수행하여 파괴양상 및 균열성장파괴를 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) CFRP/Al/CFRP 하이브리드 복합재료에서 Al 두께 0.3mm과 0.5mm의 경우, CFRP 적층부분이 완전파단 시 시험편 전체에 미치는 하중영향이 잔존하는 Al 층에 순간적으로 전달되면서 파괴응력을 저지하지 못하고 거의 동시에 급작 파단되었다. 8 mm의 경우 CFRP의 부분적인 파단발생에서 완전파단으로 진전하면서 Al과 CFRP 사이에 계면분리가 일어나고 Al 2036층이 가공경화 현상을 일으키면서 외부하중을 모두 담당하다가 최종변형 파괴되었다.

2) Al/CFRP/Al 하이브리드 복합재료에서 Al 두께 0.3mm인 하이브리드 복합재료일 경우에는 하중을 담당하던 CFRP가 파단되는 순간 하중을 견디지 못하고 Al의 균열이 급성장 및 급작파괴하는 양상이었다. Al 두께 0.5mm 이상인 경우는 CFRP 파단시 CFRP의 취성파괴를 저지하여 전체적인 시험편의 파단을 지연시켰다.

3) Al/CFRP/Al 하이브리드 복합재료에서 K_c는 Al 두께 0.3mm일 경우 a₀/W별로 93, 154, 191MPa√m, 0.5mm일 경우 a₀/W별로 117, 157, 187MPa√m, 0.8mm일 경우 a₀/W별로 87, 123, 151MPa√m 으로 나타났으며, Al 0.3mm의 경우 a₀의 변화가 크게 나타나 CFRP의 파단과 함께 시험편 전체의 파단진행이 급격함을 알 수 있었고, 반면에 Al층의 두께가 0.5mm인 체적율이 76%에 도달하면 값이 오히려 역전되어 감소하였다.

참고문헌

- 1) H. Asauma and O. Haga, J. Ohira, K. takemoto and M. Imori, "fabrication of CFRP/Al active laminates", JSME International Journal, A, Vol. 46, No. 3, pp. 478 ~ 483, 2003.
- 2) T. X. Mao and J. H. Han, "Tensile fracture of carbon/epoxy aluminium laminates", ISCMS/II, China, August, pp. 899 ~ 904, 1992.
- 3) T. X. Mao, J. H. Han, J. L. Qing and F. L. Dai, "An experimental study of bending behavior of CALL hybrid composites", Composites science and technology, Vol. 53, pp. 275 ~ 279, 1995.
- 4) Y. Xu, K. Otsuka, H. Yoshida, H. Nagai, R. Oishi, H.

- horikawa and T. Kishi, "A new method for fabricating SMA/CFRP smart hybrid composites", *Intermetallics*, Vol. 10, pp. 361 ~369, 2002.
- 5) A. Asundi and A. Y. N. Choi, "Fiber metal laminates;an advanced material for future aircraft", *journal of material processing technology*, Vol. 63, pp. 384 ~ 394, 1997.
- 6) 곽대원, 하이브리드복합재료의 층간파괴인성치에 관한 연구, 석사학위논문, 경상대학교, 2004.
- 7) K. C. Krishan, *Composite materials: Science and Engineering*, Springer, p. 378, 1998.
- 8) T. L. Anderson, *Fracture mechanics*, CRC Press, pp. 604 ~605, 1995.