

FEM에 의한 CRALL재의 노치강도 해석(I)

윤한기*

(99년 1월 4일 접수)

Notched Strength Analysis of CRALL Materials by FEM (I)

Han-Ki Yoon*

Key Words : CRALL (Al7075/CFRP 적층재), Circular Hole Notched Strength (원공노치강도), FEM Analysis (유한요소해석), Law of Mixture(복합법칙), Circular Hole Size(원공크기), CFRP Fiber Orientation(섬유배열방향)

Abstract

As for the properties on both the aluminum and the CFRP which are used to make Al7075/CFRP multi-layered hybrid composites, CRALL(carbon reinforced aluminum laminate). In the CRALL specimen for rule of mixture, we were analyzed notched strength by finite element method. The results obtained from FEM analysis are as follows:

In the unnotch CRALL specimen, the stresses imposed CFRP, epoxy, Al 7075 obtained by finite element method strength solution for A/C0001, when strain is 0.28 %, are 1400 MPa, 38 MPa, 411 MPa. respectively and for A/C9991, when strain 0.48 % , are 392 MPa, 26 MPa and 321 MPa, respectively. the slope of the stress-strain curve by FEM increases in keeping with the hole size and the yield strain decrease to 36 % and 55 % for A/C9993 and A/C9991 respectively.

1. 서론

하이브리드 복합재료는 이종 소재의 접합에 의한 복합구조를 가지므로 원천적으로 금속과 섬유에 대한 복합적인 구조적인 특성으로 인하여 제작 과정에서 발생하는 재료의 기계적 특성 편차가 매우 크므로 고려대상 변수도 매우 다양하다. 그리고 많은 변수에 대한 실험결과 속에서 강도가 가장

우수한 최적조건을 구하기 위한 연구들이 시도되고 있다. 또한 시간적, 경제적 손실을 줄이기 위해서 이론적 해석방법도 병행되고 있다.

이러한 다적층 복합재를 사용한 구조물의 경우 볼트와 리벳 등에 의한 기계적 결합(mechanical joint)과 접착제를 사용하는 접착결합(bonded joint)을 혼용하여 사용하는 경우가 많다. 특히 기계적 결합의 경우, 구멍크기에 따른 응력해석, 적

* 중신회원, 동의대학교 공과대학 기계공학과

절한 파단 조건(failure criterion)과 파단형태(failure mode)를 예측하는 것은 매우 중요하다. 이와 관련된 국내 연구는 주로 섬유강화 복합재료(CFRP, GFRP)의 인장강도와 피로특성에 대하여 편중되어 발표되고 있다.^{1)2)3)4)5) 정 등6)7)}은 접착이음의 강도평가시 구조 접착제 1500과 EP-007이 정적강도와 피로강도에 미치는 영향 및 접착계면 내의 응력해석과 접착이음의 강도 평가 등을 보고하였다. Kim 등⁸⁾은 두꺼운 복합재료의 삼차원적 기계적 성질을 FEM으로 해석하였다. Ko 등⁹⁾은 편하중을 받는 유한복합적층판의 접착응력을 고려한 파단해석을 FEM으로 해석하였다. 그리고 Kim 등¹⁰⁾은 유리/에폭시(Glass/Epoxy) 적층판 복합재료의 원형결합에 의한 노치강도를 실험적으로 구하였으며, Kim 등¹¹⁾은 원공을 갖는 Glass/Epoxy 복합재료의 노치강도와 파괴조건을 판폭과 원공크기에 대하여 실험적으로 구하였다. Yoon 등¹²⁾¹³⁾은 CRALL재의 원공노치, U노치에 대한 노치강도를 FEM해석과 실험적 연구를 하였다.

그러나 금속/복합재료를 다적층한 하이브리드 복합재료(CRALL)의 제작시 알루미늄층과 CFRP 층 및 epoxy층이 각각 담당하는 상당응력과 노치 크기의 영향을 규명한 연구는 없으며, FEM으로 이러한 관계를 구함으로서 CRALL재의 물성치 평가에 기초자료로 활용할 수 있다고 생각된다. 본 연구에서는 Al 7075/CFRP 다적층 하이브리드 복합재료(CRALL)를 제작시 CRALL재의 각 물성치를 고려하여 알루미늄층, CFRP층, epoxy층이 각각 담당하는 상당응력과 원공노치 크기에 따른 응력 변형률의 관계를 FEM에서 해석하였다.

2. 이론해석

2.1 CRALL재의 복합법칙

본 연구에 이용된 재료는 알루미늄/CFRP 다적층 하이브리드 복합재료로서 Fig. 1과 같이 등방성 재료인 알루미늄과 이방성 재료인 UD 0° 방향 CFRP를 적층한 형태이다.

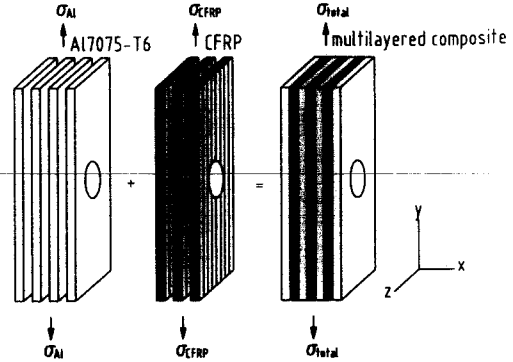


Fig. 1 Illustration model for uniaxial tensile deformation of Aluminum/CFRP multilayered composite

정적평형조건에 의하여

$$\sigma_{total}A_{total} = \sigma_{CFRP}A_{CFRP} + \sigma_{Al}A_{Al} \quad (1)$$

여기서, σ_{total} 과 A_{total} 은 각각 전체 복합재료에 걸리는 응력과 전체 복합재료의 단면적이며, σ_{CFRP} 와 A_{CFRP} 는 CFRP층에 걸리는 응력과 단면적, σ_{Al} 과 A_{Al} 은 알루미늄층에 걸리는 응력과 단면적이다.

복합법칙에 의하여 하중방향의 응력은 식(2)와 같다.

$$\sigma_{total} = \sigma_{CFRP}v_{CFRP} + \sigma_{Al}v_{Al} \quad (2)$$

여기서, v_{CFRP} 는 CFRP층의 단면비, v_{Al} 은 알루미늄층의 단면비이다.

알루미늄은 등방성재료이며, CFRP가 이방성재료이므로, 모든 재료가 일차원적인 Hooke의 법칙을 따른다고 가정하면 식(3)을 만족하므로

$$\begin{cases} \sigma_{total} = E_{total}\epsilon_{total} \\ \sigma_{CFRP} = E_{CFRP}\epsilon_{CFRP} \\ \sigma_{Al} = E_{Al}\epsilon_{Al} \end{cases} \quad (3)$$

식(2)는 식(4)로 된다.

$$E_{total}\epsilon_{total} = E_{CFRP}\epsilon_{CFRP} + E_{Al}\epsilon_{Al} \quad (4)$$

다적층 하이브리드 복합재료의 경우 두 재료는 동일한 변형률을 가진다고 가정하면

$$\epsilon_{total} = \epsilon_{CFRP} = \epsilon_{Al} \quad (5)$$

이며, 식(4)는 다음과 같이 된다.

$$E_{total} = E_{CFRP} \nu_{CFRP} + E_{Al} \nu_{Al} \quad (6)$$

3. CRALL재의 구성과 해석 모델링

3.1 CRALL재의 구성

Al 7075/CFRP 다적층 하이브리드 복합재료의 FEM해석을 위하여 실제 각 소재에 대하여 성분 검사 및 인장실험을 실시하였으며 알루미늄의 화학적 조성은 Table 1과 같다.

Table 1 Chemical composition of Al 7075-T6 sheet metal

Element Material	Zn	Mg	Cu	Cr	Mn	Fe	Si	Ti	Al
Al 7075-T6	5.6	2.5	1.7	0.23	0.3	0.5	0.4	0.2	re.

Al7075-T6는 미국 Alclad사 제품으로 두께 0.4mm의 얇은 박판이며 판 표면에 aclading한 QQ-A-250/13E로 통용되는 제품이며, T6 처리는 판재를 냉간가공후 인공시효 처리한 것이다. 다적층재로 사용한 탄소강화섬유는 고탄성 탄소강화섬유(CFRP : Torayca M40)인 플라이 두께는 0.15mm, UD(unidirection) 0°를 사용하였으며, 사용된 접착제는 Epoxy 250°F #2560을 사용하였다. 이들 재료의 기계적 성질은 Table 2와 같다.

Table 2 Mechanical properties of epoxy, CFRP and aluminum

Material Properties	epoxy 250°F	CFRP		Al 7075-T6
	#2560	0°	90°	
Tensile strength (MPa)	130	1400	400	524
Shear modulus (GPa)	2.1	23	23	26
Tensile modulus (GPa)	5.5	220	60	69
Failure strain (%)	2.8	1.0	-	12
Density (g/cm3)	1.2	1.9	1.9	2.8
Poisson's ratio	0.3	0.25	0.02	0.33

3.2 FEM해석 모델링

하이브리드 다적층 복합재료의 탄성계수와 강도를 예측하기 위하여 3차원 8절점 3자유도를 갖는 Solid45요소를 이용하였고, 평면응력상태인 등방성 재료로 가정하고 범용 유한요소 해석 프로그램인 Ansys 5.3을 사용하여 해석을 실시하였다. 해석에 사용된 모델은 실제 제작될 시험편이 대칭성을 가지고 있으므로 평행부의 1/8만을 모델링하였다.

Al 7075/CFRP 적층판의 강성계수는 적층판에 외력이 가해졌을 때 얼마만큼의 변형이 생겼는가를 구하는 강성계수 C_0 에서 구할 수 있다. 복합재료는 적층판의 두께와 적층각 등 공학적 상수에 따라 물성치가 크게 변할 수 있으나 본 연구에서는 적층각을 일정하게 하고 섬유배열방향을 0°로 한 일반직교이방성재료를 제작하여 알루미늄판 층간에 삽입한 샌드위치형 하이브리드 복합재료를 가상하였다. 탄소성유한요소해석에서 알루미늄 합금의 물성치는 MELAS(multi-elastic)으로서 실제 알루미늄합금의 인장선도를 구간별로 입력하였으며, 에폭시층은 취성재료로서 BISO, CFRP는 ANISO로서 물성치를 입력하였다.¹⁴⁾

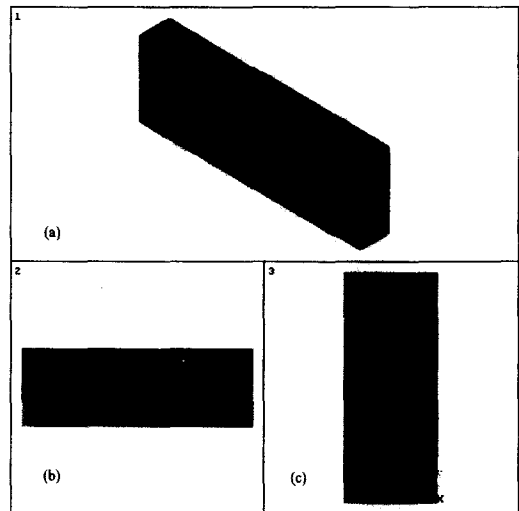


Fig. 2 FEM analysis model for elastic modulus and tensile strength in Al 7075/CFRP multilayered composite specimen
(a) element at inclination view point
(b) element on the x-y plane
(c) element on the right hand side

구속조건으로 시험편의 중심 절점을 고정시키고 대칭면에 대하여 symmetric으로 정하였다. 또한 실제 인장시험과 같이 하기 위하여 응력을 x축 방향으로 부하하고 응력이 부하되는 면들을 couple로서 구속하였다.

해석에 사용한 무노치시험편의 탄성계수 및 강도 해석 모델은 Fig. 2와 같고, 원공노치 시험편의 원공노치 강도해석 모델은 Fig. 3과 같다.

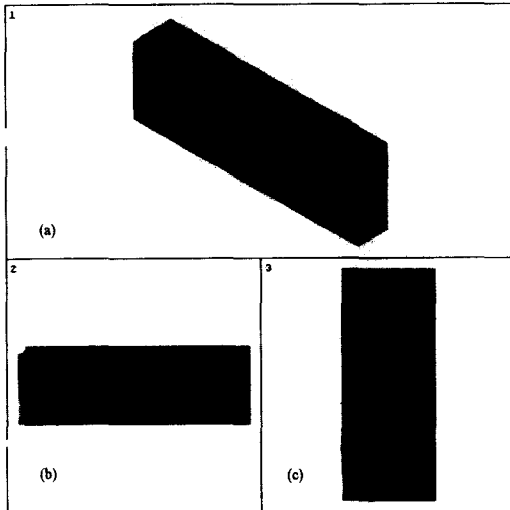


Fig. 3 FEM analysis model of elastic modulus and stress in Al 7075/CFRP multilayered composite specimen with hole notch
 (a) element at inclination view point
 (b) element on the x-y plane
 (c) element on the right hand side

4. FEM에 의한 강도해석결과

4.1 무노치 적층판재의 응력-변형률 해석

무노치복합재료를 섬유배열방향을 기준으로 하여 섬유배열방향 0°방향 CFRP를 1ply두께로 알루미늄판 사이에 적층한 CRALL재를 A/C0001이라 하며 0°방향의 전단방향 90°로 시험편을 모델링한 것을 A/C9991재로 하여 Fig. 2와 같은 모델에서 해석하여 각 시험편에 등분포응력을 작용시키고 점차로 증가시켰다. 시험편의 중앙부 두께 방향으로 각 요소들에 작용하는 등가응력의 분포는 Fig. 4, Fig. 5와 같다.

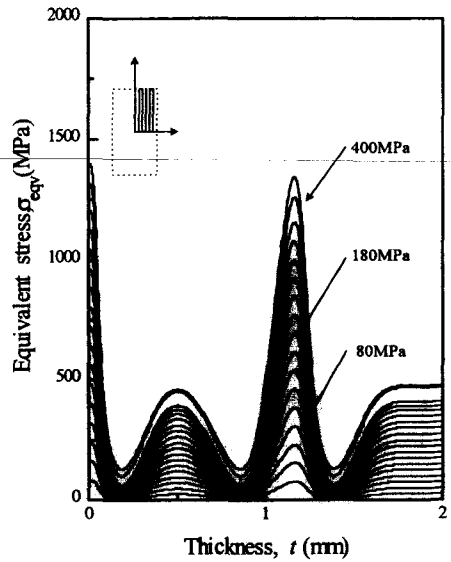


Fig. 4 Distribution of equivalent stress in A/C0001 unnotched specimen along the thickness direction

Fig. 4는 A/C0001 무노치재에서 각 요소에서 하중단계별로 작용되는 등가응력을 FEM에 의하여 구한 결과로서, 응력단계는 20 MPa에서 400 MPa까지 20 MPa단위로 끊어서 표시하였다. 섬유배열방향 0°에서 탄성계수와 인장강도가 가장 높은 CFRP층이 알루미늄과 에폭시층에 비해 작용응력이 매우 높게 작용하고 있으며, 전체응력의 상당부분을 CFRP층이 담당하고 있다. 전체작용응력이 증가함에 따라 작용응력선분들은 균일하게 상승하고 있으나, CFRP층이 항복응력에 다다른 360 MPa에서부터는 Al 7075층의 등가응력이 큰 폭으로 증가하였고, 다시 알루미늄도 항복에 다다르게 되면서 작용응력선간의 폭이 다시 줄어드는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5는 A/C9991재에서 FEM에 의한 등가응력 분포선도이다. 섬유배열방향 90°에서 CFRP층의 물성값은 0°재에 비해 인장강도, 탄성계수 등에서 훨씬 낮은 수치를 갖게되며, 따라서 전체작용응력이 증가함에 따라 Al 7075층과 CFRP층에서의 등가응력은 같은 폭으로 증가하며, Al 7075와 CFRP층이 항복함에 따라 등가응력분포선들간의 폭이

좁아지고 있다. 따라서 A/C9991재에서는 A/C0001 재와는 달리 Al 7075와 CFRP층이 분담하는 응력의 크기차는 크게 감소하여 Al 7075의 최대상당 응력값이 CFRP층의 최대상당응력값의 86%까지 다다르고 있음을 알 수 있다.

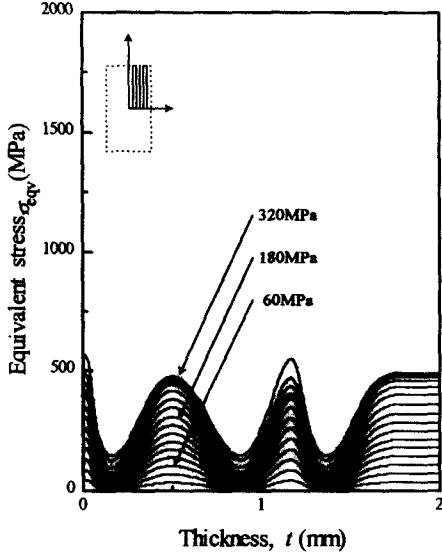


Fig. 5 Distribution of equivalent stress in A/C9991 unnotched specimen along the thickness direction

FEM 해석결과 Fig. 6의 A/C0001재에서는 각 요소들이 연신율 0.28%에서 항복이 일어나고 있으며, 이때 작용하는 등분포응력은 340 MPa, Al 7075에 걸리는 작용응력은 411 MPa, epoxy층에서는 38 MPa, CFRP에서는 1400 MPa이다. 탄성계수가 가장 높고, 강도가 우수한 CFRP에 등가응력이 가장 크게 작용하고 있음을 알 수 있으며, 전체 시험편에 걸리는 등분포응력이 400 MPa에서는 CFRP층은 완전히 소성영역으로 진입해서 더 이상 작용응력의 증가는 없으며, Al 7075와 epoxy층에서는 꾸준히 작용응력이 증가하고 있다.

Fig. 7은 A/C9991재의 FEM 해석결과이며 여기서 연신율 0.48%에서 CFRP층이 항복하였으며, 이때 CFRP에 작용하는 응력은 392 MPa, 에폭시는 26 MPa, Al 7075는 321 MPa이었다. 항복영구 변형 0.2%를 고려하면 연신율 0.81%에서 Al

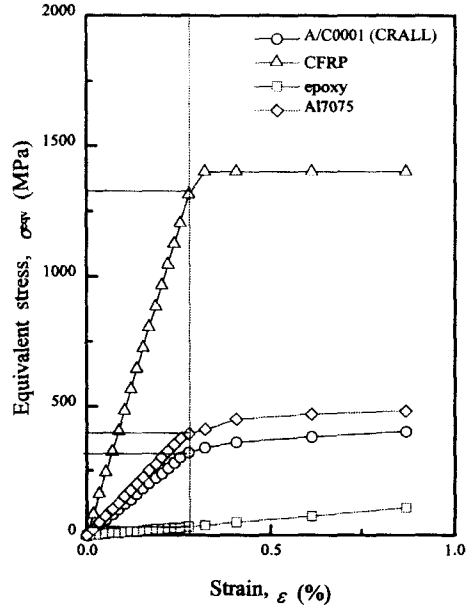


Fig. 6 Relation between equivalent stress and strain of A/C0001 unnotched specimen with fiber orientation $\theta = 0^\circ$

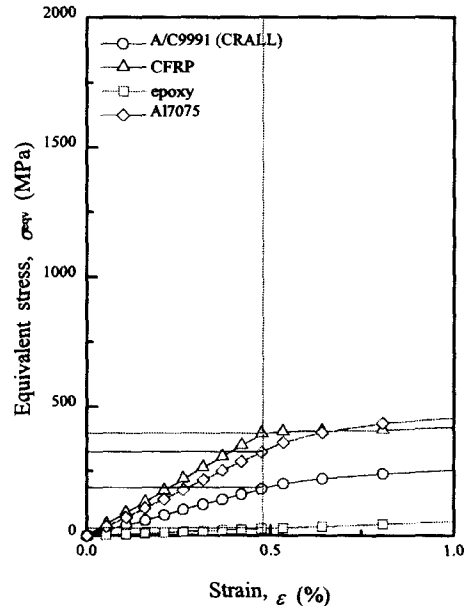


Fig. 7 Relation between equivalent stress and strain of A/C9991 unnotched specimen

7075층의 항복을 확인할 수 있다. A/C0001의 FEM 해석결과와 비교해서 섬유배열방향의 변화에 의해 탄성계수와 강도저하가 초래되며, 연신율은 상대적으로 더 크다. 이것은 적층접착시 이중재의 탄성계수를 유사한 것으로 적층하는 것이 적층재의 물성값을 추정하기가 용이하며 복합법칙에 의한 재료의 물성값 예측이 쉽다는 결론을 얻을 수 있다.

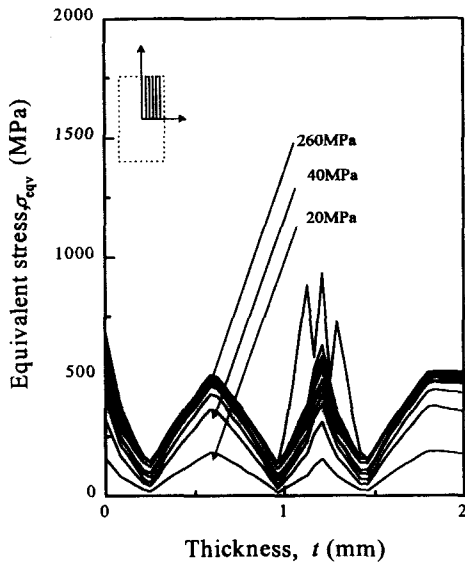
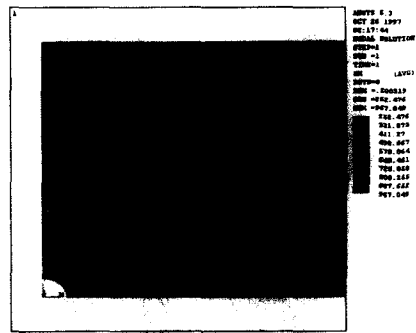


Fig. 8 Distribution of equivalent stress in A/C9991 hole notch specimen along the thickness direction

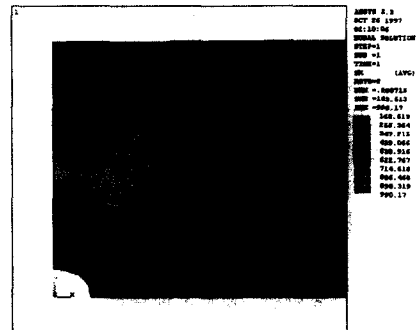
4.2 원공을 갖는 적층재의 강도해석

Fig. 8은 원공노치직경 $\phi 1.0$ mm A/C9991재의 경우 각 요소에서 하중단계별로 작용되는 등가응력을 FEM에 의하여 구한 결과로서, 응력단계는 20 MPa에서 320 MPa까지 20 MPa단위로 끊어서 표시하였다. 원공노치에 의한 응력집중으로 인하여 초기의 낮은 작용응력에서도 각 알루미늄과 CFRP층에 등가응력은 하중단계 80 MPa까지는 급상승하는 경향이 나타났으며, 그 이후 작용응력의 증가에도 불구하고 각 요소에 작용하는 등가응력은 완만한 증가를 나타내었고, 260 MPa 이상의 작용응력에서 CFRP층이 비정상적인 해의 수렴을 보여주고 있다.

Fig. 9의 (a), (b), (c), (d)는 각각 0.8% 변형후의 원공 주위의 응력분포상태를 원공노치 크기순으로 나타낸 것으로 원공이 커질수록 노치선단에 집중된 응력이 크고 넓게 분포되어 있는 것을 알 수 있다. 이와 같이 FEM해석된 결과를 응력·변형률 관계로 정리하면 Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13과 같다.



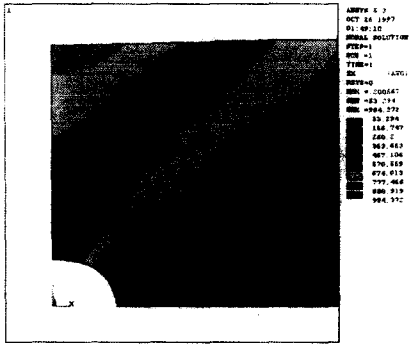
(a) Hole notch 2R = 1.0



(b) Hole notch 2R = 1.5



(c) Hole notch 2R = 2.0



(d) Hole notch 2R = 2.5

Fig. 9 Stress concentration near hole notch

Fig. 10~13은 FEM모델에서 일정한 응력을 부과하고, 각 재질부에서 원공노치부에 위치한 nodedp 작용하는 최대응력과 그때 시험편 전체의 변형률과의 관계를 나타낸 것이다.

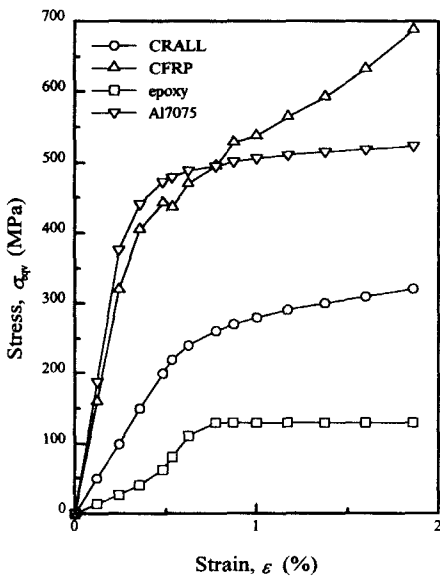


Fig. 10 Relation between stress and strain of A/C9991 specimen with $\phi 1.0$ mm hole notch

Fig. 10은 원공노치크기 $\phi 1.0$ mm인 A/C9991 시험편의 FEM해석결과로서 전체시험편과 각 적층 요소에 작용되는 응력과 연신율의 관계를 나타낸

것이다. 비슷한 탄성계수를 가진 Al 7075와 CFRP의 90° 전단방향층은 응력이 400 MPa까지 거의 선형적으로 증가하며, CFRP의 항복이후 급속히 알루미늄층의 항복과 epoxy층의 응력 증가로 이어진다. CFRP의 항복이후에 나타나는 CFRP층의 비정상적인 응력의 증가는 무노치재의 FEM해석에서는 나타나지 않았던 현상으로 노치에 의한 응력집중으로 FEM해석이 정상해에 수렴되지 못한 결과로 생각된다. 연신율 0.36%에서 CFRP층이 항복되고 그때 시험편 전체에 작용하는 응력은 150 MPa이었다.

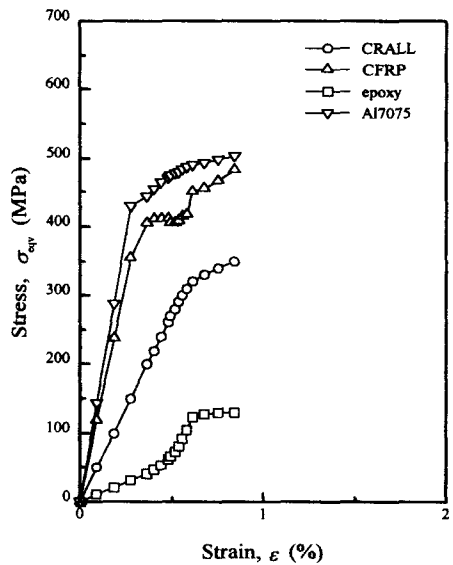


Fig. 11 Relation between stress and strain of A/C9991 specimen with $\phi 1.5$ mm hole notch

Fig. 11은 A/C9991재 원공직경 $\phi 1.5$ mm 시험편의 FEM해석결과로서 CFRP재가 항복에 달하는 연신율은 0.31%이었다. 이것은 A/C9991 원공노치직경 $\phi 1.0$ mm재에 비하여 14%더 작았고, 전체 CRALL재의 탄성구간의 기울기는 48.7 GPa이었다.

Fig. 12는 원공노치 직경 $\phi 2.0$ mm A/C9991 시험편에 대한 FEM해석결과이다. 전체시험편의 탄성구간의 기울기는 60 GPa이고, 연신율 0.25%에서 CFRP의 항복이 발생하였다.

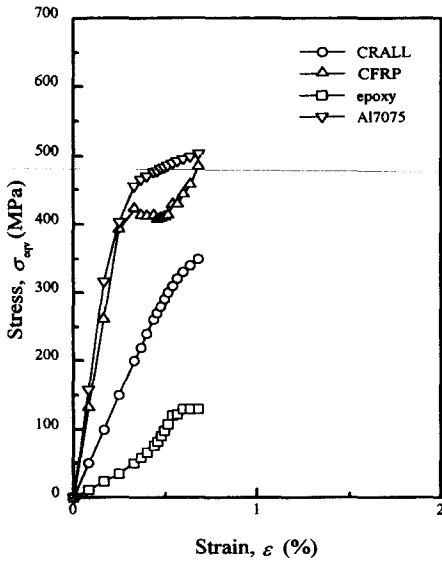


Fig. 12 Relation between stress and strain of A/C9991 specimen with ϕ 2.0 mm hole notch

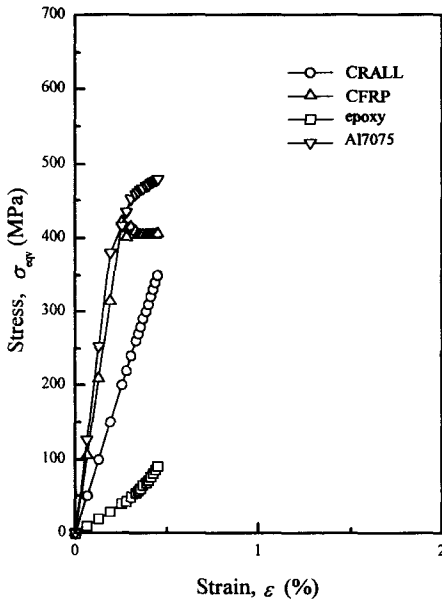


Fig. 13. Relation between stress and strain of A/C9991 specimen with ϕ 2.5 mm hole notch

Fig. 13은 ϕ 2.5 mm A/C9991재의 FEM해석결

과이다. 전체시험편의 탄성구간의 기울기는 78.53 GPa, CFRP의 항복은 연신율 0.24%에서 일어났다. 이 결과를 무노치재의 탄성구간의 기울기와 비교해보면 ϕ 1.0, 1.5, 2.0, 2.5에서 각각 10.3%, 28.5%, 58.3%, 107.2% 이상 증가하였으며 시험편 전체의 연신율이 떨어져서 쉽게 파괴될 수 있다는 결론을 얻었다. 소성변형 후의 CFRP층의 해석해의 발산으로 인하여 정확한 파단강도를 추정할 수는 없었으나 CFRP의 항복강도는 확인할 수 있었다. 그리고 CFRP를 3ply 적층한 A/C9993재에 대해서 해석한 결과를 종합하여 Table 3에 표시하였다.

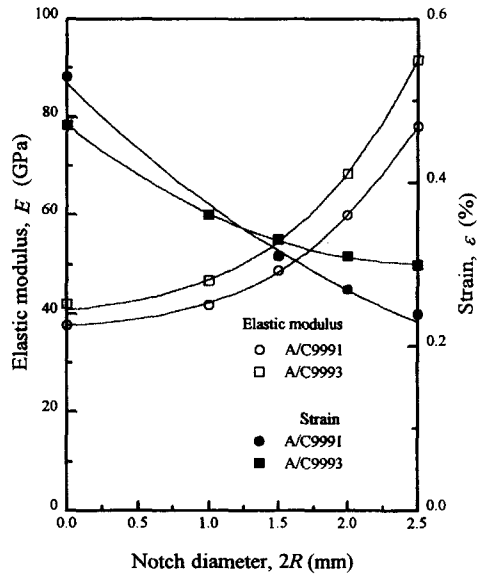


Fig. 14 The comparison of modulus and yield strain according to unnotch and hole notch specimens along hole notch diameter

Fig. 14는 각 재료에 대한 원공노치직경 증가에 따른 탄성구간의 기울기와 최초 CFRP층이 항복하는 연신율의 변화를 나타내었다. 원공노치직경의 증가에 따라 CRALL재의 탄성구간의 기울기는 점차 증대하는 경향을 나타내었으며, 연신율은 감소하였다. 따라서 노치효과에 의해 CRALL재에 하중을 가하였을 때 작은 변형에도 쉽게 파괴된다

는 것을 알 수 있다.

또한, 탄성구간의 기울기는 A/C9991, A/C9993 재 모두 원공노치경직의 변화에 따라 유사한 기울기로 증가하였으나, CFRP층이 두꺼운 A/C9993재는 CFRP의 항복연신율이 36% 감소하였으며, A/C9991는 55% 감소하였다. CFRP적층수가 큰 A/C9993재가 A/C9991재에 비해 완만한 기울기의 감소를 나타내었다. 이것은 CFRP층의 두께에 의한 영향으로 CFRP층이 두꺼운 것이 원공노치경변화에 따른 CFRP 항복연신율의 변화에 둔감하다는 것을 알았다.

Table 3 The comparison of slope and yield strain according to unnotch and hole notch specimens

		Unnotch	Hole Notch Diameter 2R (mm)			
			1.0	1.5	2.0	2.5
Slope (GPa)	A/C9991	37.7	41.8	48.8	60.0	78.1
	A/C9993	42.0	46.7	55.0	68.5	91.7
CFRP yield strain (%)	A/C9991	0.53	0.36	0.31	0.27	0.24
	A/C9993	0.47	0.36	0.33	0.31	0.30

5. 결 론

Al 7075/CFRP 다적층 하이브리드 복합재료를 제작할 때 CRALL재의 각 물성치를 고려한 복합법칙의 만족범위에서 알루미늄층, CFRP층, epoxy 층이 각각 담당하는 상단응력과 변형률의 관계 및 원공노치 크기에 따른 응력-변형률의 관계를 FEM으로 해석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 무노치재 A/C0001재의 FEM강도해석결과 변형률 0.28%에서 CFRP, epoxy, Al 7075의 각층에 나타난 응력은 각각 1400 MPa, 38 Mpa, 411 MPa이고, A/C9991재의 경우는 변형률 0.48%에서 392 MPa, 26 Mpa, 321 MPa이었다.
- 2) 원공노치를 갖는 CRALL재의 FEM에 의한 강도해석 결과 원공의 크기가 커질수록 탄성구간의 기울기는 증가하고, CFRP 항복연신율은 무노치재에 비해 A/C9993재의 경우 36%감소, A/C9991재는 55% 감소하였다.

후 기

이 논문은 동의대학교 산업기술 개발 연구소 1998년도 학술 연구 조성비의 지원을 받아 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 이창수, 황운봉, 한경섭, 윤병일, “탄소섬유강화 복합적층판의 피로특성”, 대한기계학회 논문집, 제15권, 제1호, pp. 49-60, 1991
- 2) 김광수, 김상태, “직물 탄소섬유강화 복합재료의 피로강도 평가 및 피로수명 예측”, 대한기계학회 논문집, 제17권, 제10호, pp. 497-505, 1992
- 3) 김정규, 김도식, “Glass/Epoxy 복합재료의 피로강도평가 및 피로수명 예측”, 대한기계학회 논문집, 제17권, 제10호, pp. 2475-2482, 1993
- 4) 김정규, 김도식, 박제범, “CFRP 복합재료의 피로특성에 관한 신뢰성 해석”, 대한기계학회 추계학술대회 논문집(I), pp. 388-391, 1993
- 5) 심봉식, 성낙원, 웅장우, “CFRP 복합재료의 잔류강도 저하해석에 의한 피로수명평가”, 대한기계학회 논문집, 제15권, 제6호, pp. 1908-1918, 1991
- 6) 정남용, “접착이음의 강도평가(I)”, 대한기계학회논문집, 제17권, 제4호, pp. 667-674, 1992
- 7) 정남용, “접착이음의 강도평가(II)”, 대한기계학회논문집, 제17권, 제4호, pp. 855-862, 1993
- 8) 김동민, 손형우, 홍창선, “두꺼운 고등 복합재료의 삼차원 기계적 성질”, 한국복합재료학회지, 제12권, 제1호, pp. 1-13, 1989
- 9) 고한영, 조창민, 유정규, 안동만, 광병만, “편하중을 받는 유한복합적층판의 적층응력을 고려한 파단해석”, 한국항공우주공학회지, 제16권, 제2호, pp. 29-39, 1988
- 10) 김형근, 황운봉, 한경섭, “적층판 복합재료의 원형 결함에 의한 노치강도”, 한국항공우주공학회지, 제19권, 제3호, pp. 40-51, 1991

- 11) 김정규, 김도식, "원공을 가진 Glass/Epoxy 복합 재료의 노치강도 및 파괴조건", 대한기계학회지, 제16권, 제7호, pp. 1285-1293, 1992
- 12) 윤한기, 김연겸, 박준수, "FEM에 의한 CRALL재의 원공노치 강도 해석", 한국해양공학회, '98 춘계학술대회 논문집, pp. 66~71, 1998
- 13) 윤한기, 김연겸, 박준수, "FEM에 의한 양단 U노치를 갖는 CRALL재의 노치강도 예측", 한국해양공학회, '98 추계학술대회 강연논문집, pp. 213~217, 1998
- 14) "ANSYS Theory Reference, 001099, ninth Edition, SAS IP, Inc. pp. 4-1~4-24, 1998