

Al/AFRP 적층재의 수지혼합비가 인장 및 티-필(T-peel) 강도 특성에 미치는 영향

송삼홍[†] · 김철웅^{*}

(2002년 3월 21일 접수, 2002년 8월 30일 심사완료)

The Effect of Resin Mixture Ratio on Characteristics of Tensile and T-peel Strength in Al/AFRP Laminates

Sam-Hong Song and Cheol-Woong Kim

Key Words: Al/AFRP Laminates(알루미늄/아라미드섬유강화 적층재), Resin Mixture Ratio(수지 혼합비), Epoxy Resin(에폭시 수지), Curing Agent(경화제), Accelerator(경화촉진제), Prepreg(프리프레그), T-peel Strength(티-필 강도)

Abstract

Aluminum alloy/aramid fiber reinforced plastic(Al/AFRP) laminates consists of high strength metal(A15052) and laminated aramid fiber with structural adhesive bond. The mixture ratio effect of epoxy resin · curing agent · accelerator on the tensile strength and T-peel strength characteristic in Al/AFRP laminates were investigated in this study. The epoxy, diglycidylether of bisphenol A(DGEBA), was cured by methylene dianiline(MDA) with or without an accelerator(K-54). Eight different kinds of resin mixture ratios were selected for the test ; five kinds of Al/AFRP laminates were named as Al/AFRP(1) and three others of Al/AFRP laminates were named as Al/AFRP(2). The comparison of tensile strength and T-peel strength with variation of resin mixture ratio were studied. Respectively, Al/AFRP(1) and Al/AFRP(2) indicated approximately 6.0 times and 7.0 times more improved maximum tensile strength in comparison with those of monolithic A15052. Al/AFRP(2) indicated approximately 1.5 times more improved maximum T-peel strengths in comparison with those of Al/AFRP(1). As results, Al/AFRP(2) turned out to have more effective characteristics on the tensile strength and T-peel strength than those of Al/AFRP(1).

1. 서론

최근 알루미늄 합금에 고장력 섬유층을 적층한 새로운 개념의 하이브리드 복합재가 개발되었다.⁽¹⁾ 기존의 항공기에 적용되던 알루미늄에 비해 우수한 피로특성과 경량성을 보유한 이 복합재는

알루미늄 합금의 강도향상과 고장력 아라미드섬유의 개발로 인해 최신 항공기에 부분적으로 적용되기 시작하였다. 이러한 하이브리드 복합재료가 Fig. 1에 제시한 알루미늄 합금/아라미드 섬유 강화 적층재(Aluminum alloy sheet/aramid fiber reinforced plastic laminates, 이하 Al/AFRP)이다. Al/AFRP 적층재는 연신율과 유연성이 좋고 피로특성이 우수하기 때문에 항공기의 주익 및 동체-주익 연결부 등에 적용되고 있다. 이 적용부위는 항공기의 임계부(Critical part)로서 파손되었을 때 감항성을 상실한다.⁽²⁾ 또한 운항 중에 지속적인 변동진폭의 반복-굽힘 모멘트를 받게된다. 변동진

[†] 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과

E-mail : shsong@korea.ac.kr

TEL : (02)3290-3353 FAX : (02)921-8532

^{*} 회원, 고려대학교 대학원 기계공학과

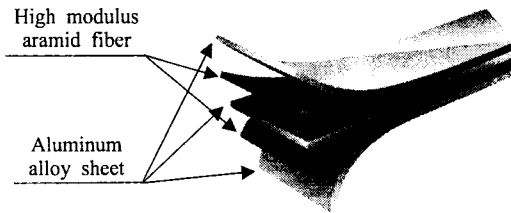


Fig. 1 Schematic of Al/AFRP laminates

폭이 커질 때 Al/AFRP 적층재의 층간에서는 층간 전단강도(Interlaminar shear stress)가 증가한다. 이러한 층간전단강도는 거시적으로는 Al/AFRP 적층재의 알루미늄층과 섬유층간의 접착강도에 크게 영향을 받으며 미시적으로는 섬유층에서의 기지재와 강화재간의 결합강도에 크게 영향받는다. 따라서 큰 진폭의 반복적인 굽힘모멘트를 받는 Al/AFRP 적층재의 거동 연구는 층간전단강도에 영향을 미치는 인장강도 및 계면접착강도의 연구가 선행되어야 한다.

Al/AFRP 적층재는 FRPs의 단점인 횡방향 하중, 충격특성, 피로특성이 상대적으로 우수하고 고온특성이 뛰어난 신소재이지만 이중재료(알루미늄과 아라미드 프리프레그)의 결합이므로 경화과정에서 서로 다른 잔류응력이 계면에 영향을 미친다. Al/AFRP 적층재의 계면은 외부에서 가해지는 외력을 알루미늄층에서 섬유층으로 전달해주는 역할을 하고 아라미드 섬유의 균일성과 연속성을 유지시켜준다. 이와 같은 계면은 Al/AFRP 적층재에서 알루미늄층과 섬유층간에 가교역할을 하며 계면의 접착력 향상을 통해서 Al/AFRP 적층재의 기계적 특성은 크게 향상될 수 있다. 따라서 최근 화학적 처리를 통한 복합재료의 계면 결합력 증가에 대한 연구는 주목받고 있다.^(3,4)

송 등⁽⁵⁾과 김 등⁽⁶⁾은 계면에 직접적인 영향을 미치는 매트릭스 수지를 개선하기 위해 수지혼합비를 다양하게 분류하여 Al/AFRP 적층재를 제작하고 수지혼합비가 Al/AFRP 적층재의 피로거동에 미치는 영향에 대해 고찰한 바 있다. 그러나 수지혼합비가 Al/AFRP 적층재의 인장 및 접착(티-필(T-peel))강도 특성에 미치는 영향에 대한 실험적 연구는 아직 미흡하다.

따라서 본 연구에서는 정량적인 실험을 통해 수지혼합비가 Al/AFRP 적층재의 인장 및 티-필 강도에 미치는 영향을 연구하고자 하였다.

2. Al/AFRP 적층재의 제작

2.1 혼합비별 수지용액 제작

기지재로 사용된 에폭시 수지는 열경화성 에폭시 수지인 비스페놀 A계 수지(Diglycidylether of bisphenol A(DGEBA) type, YD-128, KUKDO Chemical)이다. 또한, 에폭시 수지의 경화반응을 촉진시키고 화학적으로 안정된 반응을 유도하기 위해서 경화제로는 메틸렌 디아닐린(Methylene dianiline, MDA-150, KUKDO Chemical)을 사용했고, 경화의 촉매역할을 하는 경화촉진제로는 방향성 3급 아민계에 속하는 트리스(디메틸 아미노 메틸) 페놀(Tris(dimethyl amino methyl) phenol, K-54, KUKDO Chemical)을 사용했다.

이상에 열거한 에폭시 수지, 경화제, 경화촉진제를 이용하여 크게 두 가지 형태의 혼합비로 분류하였다. 첫 번째는 에폭시 수지와 경화제의 혼합에 따른 분류, 두 번째는 에폭시 수지, 경화제 및 경화촉진제의 혼합에 따른 분류이다.

첫 번째 방법은 에폭시 수지와 경화제의 이상적인 당량비(Equivalence ratio)인 <에폭시 수지 : 경화제 = 1 : 1>에 경화제 함량을 25%씩 증감시켜 5가지 수지혼합비(1:0.5, 1:0.75, 1:1, 1:1.25, 1:1.5)의 수지용액을 제작하였다. 두 번째 방법은 에폭시 수지와 경화제의 당량비 <1:1>에 경화촉진제를 10, 20, 30%로 첨가하여 3가지 수지혼합비(1:1:0.1, 1:1:0.2, 1:1:0.3)의 수지용액을 제작하였다. 이때 에폭시 수지와 경화제, 경화촉진제의 함량은 당량비를 부피비로 환산하여 적용하였다.

이처럼 수지용액의 제작을 크게 에폭시 수지와 경화제를 혼합하는 방법과 에폭시 수지와 경화제, 경화촉진제를 혼합하는 방법으로 구분한 이유는 경화촉진제가 Al/AFRP 적층재의 인장 및 티-필 강도에 미치는 영향을 정량적으로 고찰하기 위함이다. 수지 용액 제작시 경화촉진제(K-54)는 첨가량의 미세한 차이에 따라 경화반응이 급진적으로 일어나게 되며 가사시간이 단축되고 열이 발생하므로 특별한 주의를 요한다.

2.2 아라미드섬유 프리프레그 제작

프리프레그는 Preimpregnate의 약자로 섬유층에 수지용액이 B-stage로 함침되어 있는 상태를 말한다. 프리프레그의 제작에 사용된 강화제는 아라미드섬유(Aramid fiber : Twaron®, type-2200,

Table 1 Mechanical properties of Twaron® 2200

Tensile modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Density (g/cm ³)	Coeff. of thermal expansion (10 ⁻⁶ /K)	Filament diameter (μm)
115	3150	2.6	1.44	-3.5	12

Table 2 Chemical composition of Al5052

Composition	Fe	Mg	Si	Cu	Mn	Cr	Zn
wt%	0.40	2.60	0.25	0.10	0.10	0.25	0.10

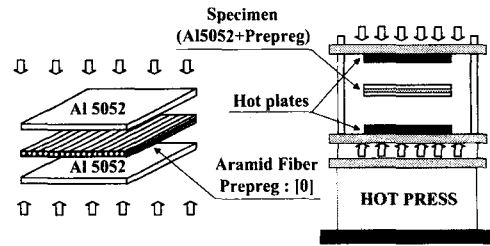
Table 3 Mechanical properties of Al5052

Alloy	Tensile strength (MPa)	Yielding strength (0.2% offset) (MPa)	Thickness (mm)
Al5052	283	228	0.5

AKZO-NOBEL Co.)가 사용되었다. 본 연구에 사용된 아라미드 섬유층의 두께는 1.0 mm이며, 기계적 특성은 Table 1과 같다. 2.1절에 언급한 총 8가지 혼합비의 수지용액을 각각 단방향 아라미드 섬유에 함침시켜 8가지 수지혼합비의 아라미드 섬유 프리프레그를 제작하였다. 수지함침은 레진베스(Resin bath)를 사용하는 방법이 일반적이거나 수지함침률을 정확히 조절하기 힘들기 때문에 계산에 의해 측정된 수지량을 스프레이 형태로 함침시키는 방법을 택했다. 이때 수지함침률은 45%로 적용했다.

2.3 적층

2.2절에 제시한 방법에 의해 제작된 8가지 수지 혼합비의 프리프레그를 두께가 0.5 mm인 알루미늄 판재(Al5052 sheet)와 2/1의 형태로 적층했다. 이때 프리프레그의 섬유방향과 알루미늄의 압연방향이 일치되게 적층했다. 사용된 Al5052의 화학적 성분과 기계적 특성은 Table 2, 3과 같다. 적층형태는 Fig. 2(a)와 같다. 이때 프리프레그와 알루미늄 판재간의 화학적 안정성과 접착력 향상을 유도하기 위해서 선처리로 Al5052의 접착면을 크롬산 아노다이징(Chromic acid anodizing) 처리



(a) Lamination (b) Hot-plate press curing

Fig. 2 Schematic of Al/AFRP laminates manufacture

하였다. Fig. 2(a)에 제시한 바와 같이 아라미드섬유 프리프레그와 알루미늄 판재가 적층된 복합재를 알루미늄/아라미드섬유 강화(Al/AFRP) 적층재라고 한다. 이때, 프리프레그의 기지를 에폭시 수지와 경화제의 혼합(수지혼합비 1:0.5, 1:0.75, 1:1, 1:1.25, 1:1.5)으로 제작한 Al/AFRP 적층재를 Al/AFRP(1)이라고 명명하였고, 프리프레그의 기지를 에폭시 수지, 경화제 및 경화촉진제의 혼합(수지혼합비 1:1:0.1, 1:1:0.2, 1:1:0.3)으로 제작한 Al/AFRP 적층재를 Al/AFRP(2)라고 명명하였다.

Table 4는 Al/AFRP(1)에 해당하는 5가지 수지 혼합비의 당량비와 부피비의 관계를 나타낸 것이고 Table 5는 Al/AFRP(2)에 해당하는 3가지 수지 혼합비의 당량비와 부피비의 관계를 나타낸 것이다. Table 4, 5에서 부피비 계산에 적용된 에폭시 수지(YD-128)와 경화제(MDA-150), 경화촉진제(K-54)의 분자량은 각각 368, 169, 265 g/mol이고, 비중은 각각 1.18, 1.13, 0.97이다.

2.4 경화

프리프레그와 알루미늄 판재간의 접착 및 경화는 Fig. 2(b)와 같이 핫-플레이트 프레스를 이용하였다. 에폭시 수지는 일반적으로 80°C 이상의 온도에서 서서히 반응을 시작하며 경화반응에 의하여 에폭시 수지의 분자 사이에는 가교결합이 일어나서 분자량이 증가하며 3차원의 망상구조로 변화한다. Al/AFRP 적층재는 이중재료의 결합이므로 경화시 두 재료는 서로 다른 열팽창계수와 잔류응력 때문에 열변형이 발생한다. 아라미드 섬유의 경우 열팽창계수는 알루미늄에 비해 극히 낮으나 섬유방향과 섬유직각방향의 열팽창계수는 35배 이상 차이가 난다. 경화 후 냉각이 진행되면 섬유층은 잔류압축응력이 작용하고, 알루미늄층은 잔류인장응력이 발생한다. 따라서 경화 후

Table 4 Resin mixture ratio system of Al/AFRP(1)

Factor	Component	Equivalence ratio	Volume ratio ^{##}	Thickness (mm)	
Name	Al/AFRP (1)	A15052	-	-	0.5
		Matrix of prepreg [*]	1 : 0.50	320 : 75	1.0
			1 : 0.75	320 : 112	1.0
			1 : 1.00	320 : 150	1.0
			1 : 1.25	320 : 187	1.0
			1 : 1.50	320 : 224	1.0

^{*} Matrix of prepreg = Epoxy resin + Curing agent

^{##} Volume ratio (Molecular weight / Specific gravity) × Equivalence ratio

Table 5 Resin mixture ratio system of Al/AFRP(2)

Factor	Component	Equivalence ratio	Volume ratio	Thickness (mm)	
Name	Al/AFRP (2)	A15052	-	-	0.5
		Matrix of prepreg [*]	1:1:0.1**	320:150:38	1.0
			1:1:0.2**	320:150:76	1.0
			1:1:0.3**	320:150:114	1.0

^{*} Matrix of prepreg = Epoxy resin + Curing agent + Accelerator

^{**} 10, 20, 30% of epoxy content

변형을 방지하고 잔류응력 체계를 보완하기 위하여 Al/AFRP 적층재에 서냉시간을 길게한 후 포스트-스트레인(Post-strain)을 가하는 방법을 택하였다. 또한, 본 연구에서 오토크레이브 성형을 적용하지 않은 이유는 다음과 같다. 첫째, 일반 FRPs와 달리 Al/AFRP 적층재는 외피를 알루미늄층이 둘러싸고 있기 때문에 오토크레이브 진공성형을 통한 적층재 내의 기공제거가 불가능하므로 오히려 시간적·경제적 효과가 떨어진다. 둘째, 오토크레이브를 이용하여 Al/AFRP 적층재를 제작한 경우, 핫-플레이트 프레스 경화법에 비해 경화 후 열변형이 심하게 발생하였으며 이로 인한 층간분리가 종종 발생했다.

Fig. 3은 Al/AFRP(1)와 Al/AFRP(2)의 경화시 적

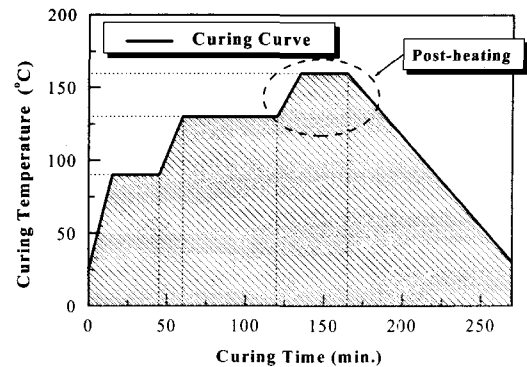


Fig. 3 Curing cycle of Al/AFRP laminates

용하였던 경화사이클이다. 일반적으로 프리프레그 제작사에서 추천하는 경화 사이클과 달리 후가열(Post-heating) 과정을 추가한 이유는 프리프레그의 DSC(Differential scanning calorimetry) 측정 결과를 경화과정에서 반영했기 때문이다. 따라서 화학적으로 더욱 안정된 적층재를 제작할 수 있었다.

3. 실험

3.1 Al/AFRP 적층재 및 AFRP의 인장실험

수지혼합비를 달리한 Al/AFRP(1), (2)와 단일재 A15052의 인장거동 특성을 비교하기 위하여 ASTM E8-95에 근거하여 인장시험을 수행하였다. 이때 시험편의 길이방향과 섬유방향을 일치시켰다. 하중속도는 1 mm/min으로 적용하였다. 한편, Al/AFRP 적층재와 AFRP의 응력-변형을 관계를 비교하기 위해 아라미드 섬유 프리프레그(수지혼합비 1 : 1)를 적층하여 AFRP를 제작하였다.

AFRP의 적층형태는 [0₄]와 [+45₂/-45₂]_S의 형태를 취하였고 시험편 형상은 ASTM D3039-95에 근거하여 제작하였다.

3.2 Al/AFRP 적층재의 티-필 시험

티-필 시험은 이중 재료 접착면의 티-필 강도(T-peel strength)를 측정하는 실험으로 ASTM D1876-93에 의거하여 Fig. 4와 같이 시험편을 제작하였다. 크로스 헤드의 이동속도가 254 mm/min으로 비교적 빠른 속도로 부하가 가해진다. 실험은 만능시험기(UTM, Shimadzu DDS-10T)로 수행하였고 최대하중은 980 N을 가했다. 본 연구에서 Al/AFRP 적층재의 인장 및 티-필 특성의 정량적

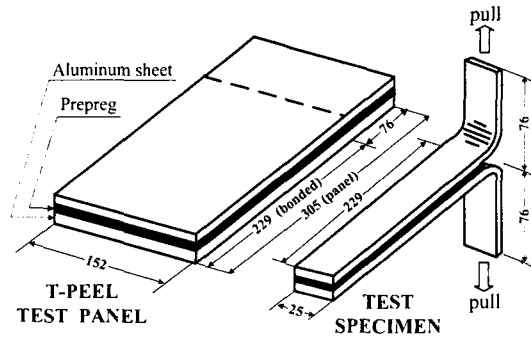


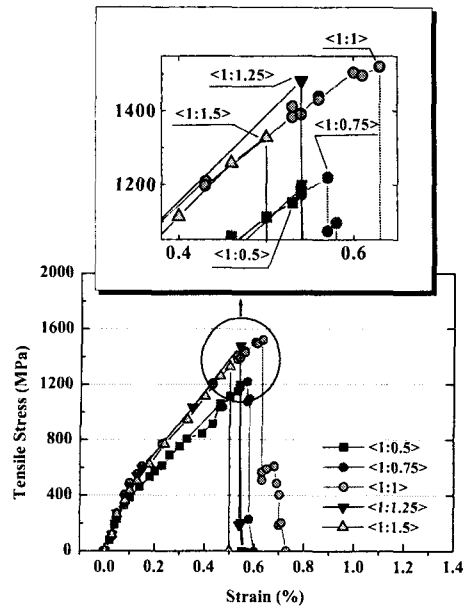
Fig. 4 T-peel test of panel and specimen size in Al/AFRP laminates (unit : mm)

인 결과를 도출하기 위해서 같은 조건의 시험편을 10개씩 사용하여 얻은 평균값을 결과에 적용하였다.

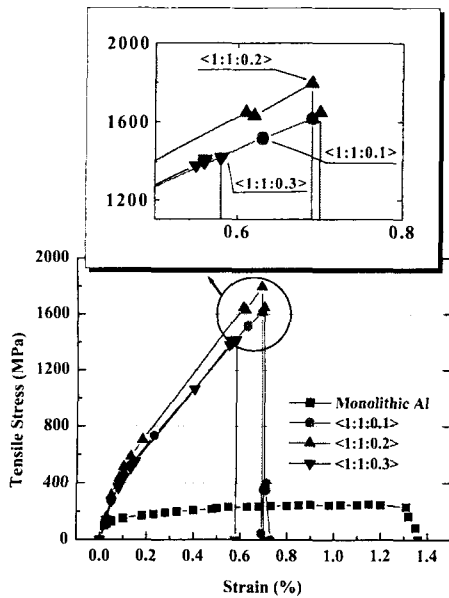
4. 실험결과 및 고찰

4.1 Al/AFRP 적층재의 인장강도 특성

단방향 아라미드 섬유를 사용한 Al/AFRP 적층재는 항복강도, 극한인장강도, 최대연신에 대해 강한 방향성을 나타낸다. 특히 섬유방향과 알루미늄의 압연방향이 일치했을 때 강도가 극대화된다. 그러나 횡방향에서는 알루미늄층이 인장특성을 좌우한다. 따라서 본 연구에서는 모든 수치혼합비 조건에서 섬유방향과 알루미늄 압연방향을 일치하여 시험편을 제작하였고 섬유방향으로 인장응력을 가하였다. Fig. 5(a), (b)에서 Al/AFRP 적층재의 인장거동을 살펴보면 항복점의 구분없이 거의 선형적으로 응력이 증가함을 관찰할 수 있다. 부하초기 알루미늄층에서 섬유층으로의 응력 전달은 원활하게 이루어지지만 부하가 진행됨에 따라 알루미늄 층의 파단이 일어나고 그 후 섬유층에서만 인장응력을 받는다. 그 후 응력의 증가가 지속되다가 섬유층이 극한강도에 이르렀을 때 섬유는 미세한 연신을 동반하며 파단이 일어난다. 파단 발생시 섬유층의 90 % 정도가 뜯김(Pull-out)현상이 일어난다(Fig. 8). 섬유의 파단으로 인해 응력-변형률 곡선이 하향하다가 파단되지 않은 잔류섬유에 의해 파단이 일시정지하는 시험편도 관찰할 수 있다. 이러한 Al/AFRP 적층재의 인장거동을 AFRP의 인장거동과 비교해 보았다. Fig. 6은 AFRP의 응력-변형률 곡선을 나타낸 것이다. $[0_4]$ 와 $[+45_2/-45_2]$ 의 형태로 적층된



(a) Al/AFRP(1)



(b) Al/AFRP(2)

Fig. 5 Relationship between stress and strain in Al/AFRP(1) and Al/AFRP(2)

AFRP를 비교해 보았다. 적층형태에 따라 최대인장강도, 변형률, 탄성계수 등이 크게 차이가 나타남을 관찰할 수 있다. 일반적으로 FRPs의 최대인장강도는 하중방향과 일치하는 섬유층 수에 따라 좌우된다. 따라서 $[0_4]$ 의 형태로 적층된 AFRP가

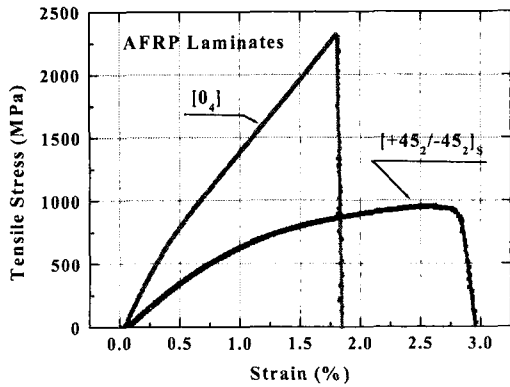


Fig. 6 Relationship between stress and strain in $[0_4]$ and $[+45_2/-45_2]_s$ AFRP

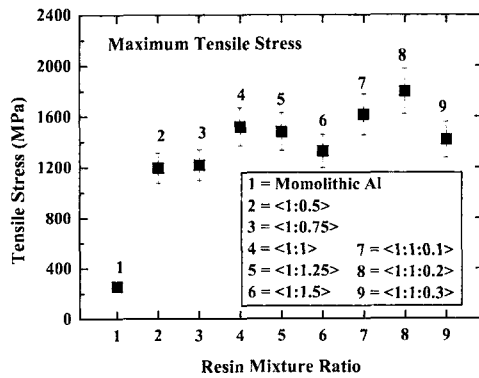


Fig. 7 Result of maximum tensile stress

$[+45_2/-45_2]_s$ 의 형태로 적층된 AFRP보다 약 2.7배 정도 최대인장강도가 향상되었다. 결과적으로 $[0_4]$ 형태로 적층된 AFRP 적층재의 인장거동은 단방향 아라미드 섬유로 제작된 Al/AFRP 적층재의 거동과 유사한 형태를 띠게 됨을 알 수 있다. 혼합법칙에 의하면 Al/AFRP 적층재의 인장거동은 부하초기에 알루미늄층의 탄성특성이 나타나고 알루미늄의 항복강도 이상에서 섬유층의 탄성특성이 나타난다고 한다. 그러나 $[0_4]$ 형태의 AFRP와 Al/AFRP 적층재의 인장거동이 유사한 그래프를 나타낸 것으로 미루어볼 때 Al/AFRP 적층재의 인장거동에서 알루미늄층의 인장특성은 응력-변형률 선도 상에 거의 반영되지 않았음을 알 수 있다. 즉, Table 1, 3에 제시한 바와 같이 알루미늄층의 인장강도는 아라미드 섬유 인장강도의 약 1/11에 해당되는 극히 미약한 값이기 때문에 Al/AFRP 적층재의 응력-변형률 선도에서 알

루미늄층의 인장거동은 섬유층(AFRP)의 인장거동에 중첩되어 선도 상에 거의 나타나지 않는다. 이것은 Fig. 5(b)에서 Al/AFRP(2)와 단일재 Al의 응력-변형률 곡선을 비교해보면 쉽게 알 수 있다.

Bucci 등⁽⁷⁾은 금속층에 영향을 받는 적층재의 전체 항복강도는 계면 접착층의 탄성계수와 수지계의 성분비에 의해 결정된다고 하였다. 또한, Al/AFRP 적층재의 항복강도는 첫째, 알루미늄층에 잔류하는 응력, 둘째, 경화처리 후 Al/AFRP 적층재의 전체 응력, 셋째, 경화과정에서 발생하는 섬유의 변형정도에 의해 결정된다고 하였다. 본 연구 결과, 위의 조건 중 ‘경화처리 후 적층재 전체 응력이 Al/AFRP 적층재 인장특성을 지배함을 알 수 있었다. 또한, Bucci가 제안한 조건 중 ‘금속층에 잔류하는 응력’과 ‘경화과정에서 발생하는 섬유의 변형정도’는 Al/AFRP 적층재의 전체 응력에 비해 극히 미약한 값이고, 프리-스트레인(Pre-strain)법을 이용하여 조절이 가능하므로 지배적인 인자는 아니라고 생각된다.

Vermeeren⁽⁸⁾은 Al/AFRP 적층재에서 섬유층의 강도가 최대인장강도를 좌우하는 지배적인 인자라고 보고한 바 있다. 본 연구 결과, 섬유층의 강도뿐만 아니라 수지혼합비로 인해 발생한 계면간의 결합력 차이도 Al/AFRP 적층재의 인장강도를 좌우할 수 있는 지배적인 인자 중 하나임을 인장강도시험 결과를 통해 알 수 있었다(Fig. 7). Fig. 7은 수지혼합비에 따른 최대인장강도의 변화를 나타낸 것이다. Al/AFRP 적층재가 단일재 알루미늄(Al5052)보다 최대인장강도가 현저하게 향상되어 있음을 알 수 있다. 특히, Al/AFRP(1) 중에서 수지혼합비 <1:1>이 가장 높은 인장강도를 나타냈고, Al/AFRP(2) 중에서 수지혼합비 <1:1:0.2>가 가장 높은 인장강도를 나타냈다. 전체적으로 보면, Al/AFRP(1)과 Al/AFRP(2)는 단일재 Al5052보다 각각 6.0배 및 7.0배의 최대인장강도 향상이 발생했다. 따라서 경화촉진제 첨가는 인장강도를 증가시킴을 알 수 있다.

Fig. 8은 인장시험 후 파단면에서 관찰된 섬유의 뜯김(Pull-out) 부위를 전자주사 현미경(SEM photograph)을 통하여 1×10^3 배로 관찰한 사진이다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 아라미드 섬유의 주요 구조인 스트랜드(Strand)구조가 파단으로 인하여 필라멘트 단위로 쪼개짐(Splitting)이 발생하였고 이로 인한 꼬임(Kinking)현상이 일어났음을

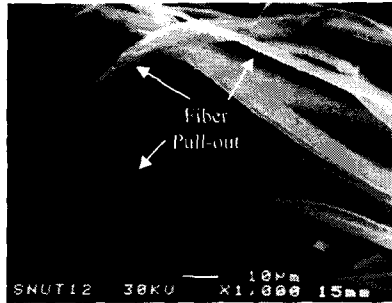
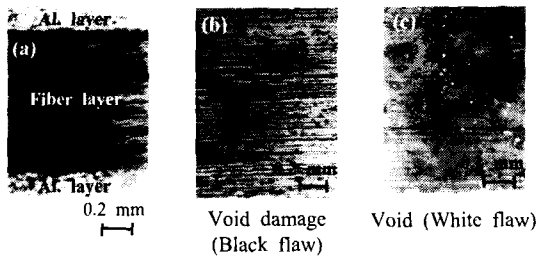


Fig. 8 SEM photograph of pull-out in aramid fiber tensile fracture (×1000)



(a) Cross-section of Al/AFRP laminates
 (b) Al. layer surface at the adhesive part
 (c) Aramid fiber surface

Fig. 9 Cross-section of Al/AFRP and surface of aluminum and aramid fiber (×400)

관찰할 수 있다. 또한 섬유 미세한 연신이 관찰되었다. Al/AFRP 적층재의 알루미늄층과 섬유층의 표면을 관찰하기 위해 화학처리하여 층간을 인위적으로 분리하였다. Fig. 9(a)는 두께방향에서 관찰한 Al/AFRP 적층재의 단면이다. Fig. 9(b)는 섬유층과 접한 알루미늄층의 표면이고 Fig. 9(c)는 아라미드 섬유층의 표면이다. 아라미드 섬유층에 국부적 기공이 발생했음을 관찰할 수 있다. 섬유층이 외피를 형성하는 FRPs와 달리 Al/AFRP 적층재는 알루미늄층이 외피를 형성하고 있어서 성형시 진공압에 의한 섬유층의 기공 제거가 용이하지 않다. 이러한 기공은 외력이 작용할 때 결함으로 작용하므로 추후에 개선되어야 할 과제이다. 또한 이러한 기공은 경화과정 중 알루미늄층 표면에도 표면손상(Void damage) 형태로 악영향을 미쳤음을 Fig. 9(b)를 통하여 관찰할 수 있다.

4.2 Al/AFRP 적층재의 티-필강도 특성

본 연구에서 기술하는 티-필 강도란 두 개의

접착면이 분리되는 과정 중 작용하는 접착강도를 말한다. Fig. 10은 티-필 시험편의 모델링과 티-필 강도에 의한 변형 및 응력분포를 유한요소 해석한 결과이다. 티-필강도에 직접적인 영향을 받는 계면부의 물성은 8가지 수지혼합비로 제작된 수지층의 인장시험을 각각 행한 결과 가장 높은 인장강도를 보인 수지혼합비 <1:1:0.2>의 물성을 해석에 적용하였다. Fig. 10(a)는 3차원으로 모델링한 티-필 시험편 형상이고, Fig. 10(b)는 티-필 강도에 의한 응력분포와 변형을 나타낸 것이다. 유한요소 해석 결과, Fig. 10(b)와 같이 $\theta_1 = \theta_2$ 로 나타났다. 그러나 Al/AFRP 적층재의 제작과정에서 섬유층을 기준으로 상부 경계면과 하부 경계면의 접착강도를 완전히 균일하게 제작하기는 불가능하므로 실제 실험상에서는 상부 경계면과 하부 경계면의 접착강도는 다소 차이를 나타낸다. 따라서 이로 인한 열림각(θ_1, θ_2)도 차이를 보인다. 특히, 티-필 시험은 부하의 속도가 254 mm/min로 빠르게 진행되므로 부하가 진행될수록 부하관성에 의해 양측 열림각의 차이는 심화된다. 주로 $\theta_1 > \theta_2$ 의 관계를 보인다. 또한, 부하가 진행될수록 θ_1 과 θ_2 의 차이는 심화된다. 이러한 현상은 중립축 보정을 통하여 완화시킬 수 있다고 판단된다.

Masaharu 등⁽⁹⁾은 단방향 CFRP 적층재의 층간과 파괴기에 대한 연구에서 열림각 증가에 따른 응력분포의 변화 및 응력이동을 다음과 같은 조건으로 접근하였다. 첫째, 분리면 길이(또는 열림각) 증가에 따른 하중의 관계. 둘째, 분리면 길이증가와 응력분포 변화에 따른 경계구속조건 변화. 위의 두 조건으로 해석한 FEM 결과는 비교적 정확한 해를 구할 수 있다고 보고하였다. 본 연구에서는 Masaharu의 두 번째 조건과 유사한 방법인 열림각 증가에 따른 경계구속조건에서 섬유방향 이동을 적용하여 해석한 결과 중 최종 변형형태를 Fig. 10(b)에 간략하게 나타내었다.

Fig. 11은 Al/AFRP 적층재가 티-필 하중을 받을 때 부하의 진행에 따라 변화하는 티-필 강도의 변화를 나타낸 그래프이다. 모든 수지혼합비에서 부하 초기단계에 최대 티-필 강도를 나타내었고 그 후 티-필 강도가 감소하는 형태를 보였다. Al/AFRP(1)의 경우, 수지혼합비에 따른 티-필 강도는 수지혼합비 <1:1>이 가장 우수하였으며 <1:1>을 기준으로 경화제의 증감에 따라 티-필

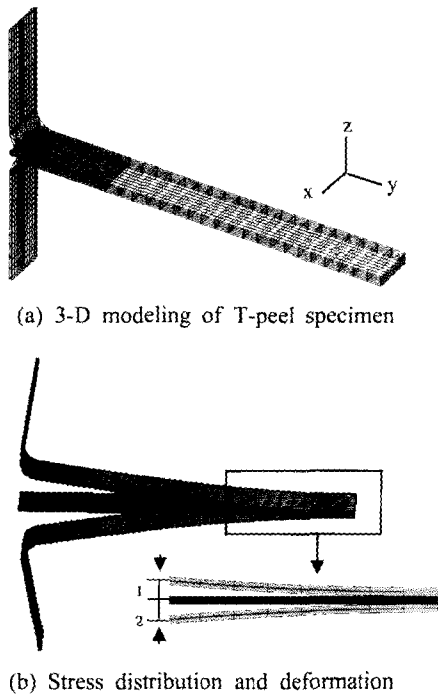
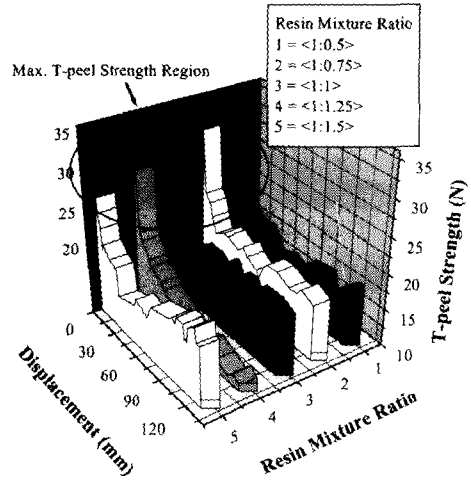


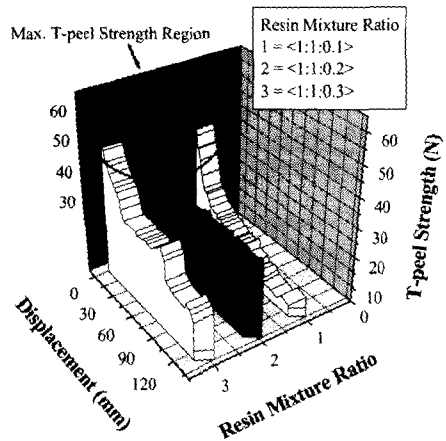
Fig. 10 Simulation of stress distribution and deformation for T-peel test in Al/AFRP

강도가 약화되었다. Al/AFRP(2)에서는 수지혼합비에 따른 타-필 강도 편차가 더욱 심화됨을 관찰할 수 있다. 특히, Al/AFRP(2)의 <1:1:0.1>의 경우, 최대 타-필강도는 <1:1:0.3>과 유사한 값을 나타내지만 부하가 진행될수록 <1:1:0.3>보다 빠르게 타-필 강도가 저하함을 관찰할 수 있다. 그 이유는 Al/AFRP 적층재의 제작공정 중 경화시 경화촉진제의 함량부족으로 에폭시의 가교결합을 통한 망상구조 변환의 촉매역할을 충분히 수행하지 못했기 때문이라고 판단된다.

수지혼합비에 따른 Al/AFRP(1), (2)의 최대 타-필 강도를 살펴보면, Al/AFRP(1)의 경우, 24.5 ~ 33.3 N의 최대 타-필 강도를 나타냈고 수지혼합비 <1:1>이 33.3 N으로 가장 우수한 타-필 강도를 나타냈다. Al/AFRP(2)의 경우, 42.2 ~ 59.8 N의 최대 타-필 강도를 나타냈고 수지혼합비 <1:1:0.2>가 59.8 N으로 가장 높은 타-필 강도를 나타내었다. 전체적으로 보면, Al/AFRP(1)에서 수지혼합비 <1:0.5> ~ <1:1.5>의 최대 타-필 강도의 최대-최소 차이는 약 26%의 차이를 나타냈고, Al/AFRP(2)에서 수지혼합비 <1:1:0.1> ~ <1:1:0.3>의 최대 타-필 강도의 최대-최소 차이는 약 30%



(a) Al/AFRP(1)



(b) Al/AFRP(2)

Fig. 11 Result of T-peel test in Al/AFRP(1) and Al/AFRP(2)



(a) Before T-peel test (b) After T-peel test

Fig. 12 SEM photograph of aramid fiber in failure (×500)

의 차이를 나타냈다. 따라서 경화촉진제의 함량이 최대 타-필 강도에 더 지대한 영향을 미침을 알 수 있다. 이러한 결과는 경화제의 함량변화가 타-필 강도에 미치는 영향보다 경화촉진제의 함량변화가 타-필 강도에 미치는 영향이 더 지대했

기 때문이라고 사료된다. 종합해보면, Al/AFRP(2)가 Al/AFRP(1)보다 약 1.5배의 티-필 강도의 향상이 나타났다. Fig. 12는 티-필 시험에 의해 손상된 계면의 섬유상태변화를 관찰한 SEM 사진이다. Fig. 12(a)처럼 티-필 하중이 가해지기 전에 가지런히 정렬되어 있던 섬유층이 티-필 하중에 의해 Fig. 12(b)처럼 불규칙한 섬유배열이 발생하고 부분적으로 뜯김이 발생되었음을 관찰할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 수지혼합비가 Al/AFRP 적층재의 인장특성, 티-필 특성에 미치는 영향을 고찰하였다. 그리고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 인장시험 결과, Al/AFRP(1) 중에서 수지혼합비 <1:1>이 가장 높은 인장강도를 나타냈고, Al/AFRP(2) 중에서 수지혼합비 <1:1:0.2>가 가장 높은 인장강도를 나타냈다. 전체적으로 Al/AFRP(1)과 Al/AFRP(2)는 단일재 알루미늄보다 각각 6.0배 및 7.0배의 최대인장강도 향상이 발생했다. 따라서 경화촉진제 첨가는 최대인장강도를 증가시키며 계면간의 접착력이 Al/AFRP 적층재의 인장강도를 결정하는 중요한 인자 중 하나임을 알 수 있었다.

(2) Al/AFRP 적층재와 [0₄], [+45₂/-45₂]_s 형태의 AFRP의 인장거동을 비교해 본 결과, [0₄]로 적층한 AFRP는 Al/AFRP 적층재의 인장거동과 유사한 경향을 나타내었다. 그 이유는 섬유방향과 하중방향이 일치하면 섬유의 강도가 Al/AFRP 적층재의 인장강도 특성을 지배하기 때문이다.

(3) 티-필 시험 결과, Al/AFRP(2)가 Al/AFRP(1)보다 약 1.5배의 티-필 강도의 향상이 나타났다. Al/AFRP(1)의 경우 수지혼합비 <1:1>이 가장 우수한 티-필 강도를 보였고, Al/AFRP(2)의 경우 <1:1:0.2>가 가장 우수한 티-필 강도를 보였다. 모든 수지혼합비에서 부하초기에 최대 티-필 강도를 나타냈다.

(4) Al/AFRP 적층재의 인장 및 티-필강도의 특성을 종합한 결과, 수지혼합비 <1:1:0.2>가 가장 우수한 인장 및 티-필 강도를 나타냈다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 : R01-2001-000-00395-0) 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Glyn Lawcock, Lin Ye and Yiu-Wing Mai, 1995, "Novel Fiber Reinforced Metal Laminates for Aerospace Applications - A Review," *SAMPE Journal*, Vol. 31, No. 1, pp. 23 ~ 31.
- (2) Jung-Ho Kwon, 1990, "The Analysis of Damage Tolerance in Aircraft Structural Design," *Journal of KSME*, Vol. 30, No. 2, pp. 131 ~ 140.
- (3) Lee, H. J. and Hawong, J. S., 2000, "A Study on the Improvement of Interfacial Bonding Shear Strength of Ti₅₀-Ni₅₀ Shape Memory Alloy Composite," *Transaction of the KSME A*, Vol. 24, No. 10, pp. 2461 ~ 2468.
- (4) Joong-Hee Lee, Jeong-Kwon Lee and Kyong-Yop Rhee, 2000, "Effect of the Glass Fiber Characteristics on the Mechanical Properties of Thermoplastic Composite," *Transaction of the KSME A*, Vol. 24, No. 7, pp. 1697 ~ 1702.
- (5) Sam-Hong Song and Cheol-Woong Kim, 2001, "The Mixture Ratio Effect of Epoxy Resin, Curing Agent and Accelerator on the Fatigue Behavior of FRMLs," *Transaction of the KSME A*, Vol. 25, No. 4, pp. 592 ~ 601.
- (6) Cheol-Woong Kim and Se-Won Sohn, 1999, "Study on the Effect of Resin Mixture Ratios on the Fatigue Crack Propagation Behavior and Mechanical Property in a FRMLs," *Journal of KSPE*, Vol. 16, No. 8, pp. 149 ~ 154.
- (7) Bucci R. J., Mueller L. N., Vogelesang L. B. and Gunnink J. W., 1988, *Treatise on Mater*, Delft Univ., Sci. 33, Netherlands.
- (8) Vermeeren C. A. J. R., 1991, "The Application of Aramid Fibers in ARALL Laminates," *Report LR-658*, Delft University of Technology.
- (9) Masaharu Iwamoto, Qing-Qing Ni, Teruhiko Fujiwara and Ken Kurashiki, 1999, "Intralaminar Fracture Mechanism in Unidirectional CFRP Composite - Part II : Analysis," *Journal of Engineering Fracture Mechanics*, No. 64, pp. 747 ~ 764.