

論文

탄소섬유/에폭시 복합재 원통 구조물의 튜브삽입형 접착에 관한 연구

갈영순* · 황태경* · 조원만* · 정 발*

A Study on Tubular-Type Adhesion of Carbon/Epoxy Composite Tubes

Y.S. Gal*, T.K. Hwang*, W.M. Cho* and B. Jung*

ABSTRACT

This paper deals with the tubular adhesion, which was occasionally applied to the manufacturing of composite structures. The adhesive shear strengths of single lap specimen which was immediately cured at 100°C were higher than those of the specimen which was cured at 100°C after exposing at room temperature for 24hrs. In the tubular adhesive specimens, the shear strength of the specimens, which were made by notched FRP adherend did not be greater than those of specimens using a straight FRP adherend although the adhesive was uniformly spreaded in each adherend plane. It was observed that the adhesive shear strength is increased to the extent of 15% by changing the adhesion method from the simple once insertion to the modified twice insertion. As the difference of gap between outer steel adherend and inner FRP adherend in the tubular adhesive specimens was increased, the adhesive shear strength was notably decreased.

초 록

본 논문은 복합재 구조물 제작에서 빈번히 접하게 되는 튜브삽입형 접착에 관해서 연구한 것이다. 100°C에서 바로 경화시킨 싱글랩 접착시편의 접착강도가 상온에서 24시간 방치한 후 100°C에서 경화시킨 접착시편의 접착강도보다 우수하였다. 튜브삽입형 접착시험에서 나사산을 준 FRP 튜브 피착체를 사용한 접착시편의 접착강도가 Straight형 FRP 튜브 피착체를 사용한 접착시편의 접착강도보다 높지 않았으나 나사산을 준 FRP 튜브 피착체를 사용한 경우 접착제 분포는 전부위에 걸쳐 비교적 균일하였다. 튜브삽입형 접착에서 접착방식을 단순 1회 삽입방식에서 개선된 2회 반복삽입방식으로 바꾼 결과 15%의 접착강도 향상이 관찰되었다. 외부 STEEL 피착체와 내부 FRP 피착체사이의 접착 Gap간격 차이의 변화가 클수록 피착체의 끝단 부위의 미접착이 발생되어 접착강도가 현저히 감소하였다.

* 국방과학연구소

1. 서 론

복합재료(Fiber-reinforced composites)는 다른 금속재질에 비해 비강도, 비강성 등의 기계적 물성이 월등히 우수함으로 인해 1960년대부터 민수용 뿐만 아니라 항공우주용 1, 2차 구조물에 다양하게 적용되고 있다[1~3]. FRP 구조물과 다른 구조물의 결합은 크게 접착에 의한 결합과 기계적 결합으로 나누어 지는데 기계적 결합인 볼트체결은 구조물에 노치를 주어서 구조물 강도저하를 유발시키는 반면에 접착에 의한 결합은 기계적 결합에 비해 신뢰성은 다소 떨어지나 작업이 간단하고 구조물에 기계적 가공을 하지 않는다는 점에서 많이 이용되어 왔다. 접착결합에 있어서 접착력을 지배하는 주된 인자로서는 피착체(Adherends) 표면의 오염 및 거칠기 정도, 접착제의 상변화(주로 액상→고상), 온도변화등에 기인하는 내부응력, 접착층의 두께등을 들 수 있다. 지금까지 주로 많이 사용되어 온 항공우주용 접착제로서 로켓노즐용 FRP 접착에 CIBA-GEIGY사의 AW 106/HV953U, HYSOL사의 EA9460, EA9330 등의 에폭시계 접착제가 알려져 있다. 복합재 구조물 개발에 있어서 다양한 접착방식중 타 구조물과의 연결 부위에 있어서 FRP 만으로는 강도가 약하기 때문에 FRP 튜브의 끝단을 STEEL 등으로 보강하는 방법을 많이 사용하는데 이 경우 내부 혹은 외부에 STEEL TUBE를 접착시켜 보강한 후 결합력의 신뢰성을 증진시키기 위해 기계적 결합을 수행한다[7, 9]. 이러한 FRP 튜브 끝단의 외부 STEEL 튜브 삽입형 접착은 접착력에 따라 구조물의 파괴 여부가 결정되는 매우 중요한 변수이나 이에 관해 언급된 체계적인 공정 연구가 거의 없는 실정이며 그 요구 사양이 대부분 다르기 때문에 실제 구조물 접착시 일반적인 접착방법을 사용하여 접착공정에 적용하고 있는 실정이다. 본 연구는 복합재 구조물 체결 부위에 빈번히 적용되는 튜브삽입형 접착에서 내부 피착체가 Carbon/Epoxy 튜브이고 그 끝단에 외부 Steel Insert를 삽입하게 될 경우의 접착공정에 관한 내용으로서 피착체의 표면처리, 공정조건, 피착체 내·외부 튜브간의 접착 간격 차이, 경화조건 등의 변화에 따른 접착강도와 접착거동에 관한 연구내용을 다루었고, 원통형 접착

시편의 접착파손 원인규명을 위해 유한요소 응력 해석을 수행하였다.

2. 실 험

2-1. 재료(Materials) 및 피착체

본 연구에서 사용한 접착제는 구조용 에폭시 접착제로서 CIBA-GEIGY사의 AW106/HV953U이다. AW 106/HV953U 접착제는 금속, 유리, 세라믹, 목재, 가황고무, 경질 플라스틱의 동종 및 이종간의 접착에 광범위하게 사용되고 있다. Table 1은 AW106/HV

Table 1. AW 106/HV 953U의 기본 특성

항 목	특 성
품 목	AW 106(Epoxy)/HV 953U
혼합비	100/60-100(Pbw, 현재 적용 100/80)
Shelf life(18~25°C)	2년
Pot life(실온, 100g)	60 ~ 90 min
Adhesive Consumption (g/m ²)	150 ~ 300
Cure Schedule	· 23°C (7~12h) · 60~70°C (45min) · 100°C (10~20min)
Shear Strength (N/mm ²)	12 - 32
Heat Stability	-60°C ~ + 60°C
Remarks	For semi-rigid bonds between metal, ceramics, vulcanized rubber and cured plastics, with excellent resistance to impact and vibration.

953U의 기본 특성을 표시한 것이다[8]. AW106/HV 953U의 혼합비는 통상 100/80, 100/100을 많이 사용하나 경화된 접착제의 요구 물성에 따라 가변적이다. 즉, AW106/HV953U의 혼합비가 100/100인 경우는 더 높은 Peel 강도를 보이면서 더 유연한 결합을 갖지만 열과 화학물질에 대한 안정성은 떨어진다. Single Lap 접착시편인 경우 피착체 FRP는 Carbon (T-300, 3K-fabric)/Epoxy 프리프레그를 Autoclave 성형으로 제작하였으며 피착체 STEEL은 SCM 3를

Table 2. STEEL 및 FRP 튜브의 Dimension

종 류	Dimension (mm)			비 고
	내 경	외 경	높 이	
STEEL	165 \pm 0.2 \pm 0.1	177	50 \pm 0.2	접착간격 max:0.2mm min:0.1mm
FRP (Straight)	157.0	164.85 \pm 0.05	50 \pm 0.2	
FRP (Notch)	157.0	164.85 \pm 0.05	50 \pm 0.2	

사용하여 ASTM D1002에 준하여 제작하였다. 원통형 시편의 경우 실제 구조물과 동일한 적층수와 순서대로 필라멘트 와인딩 공법으로 Carbon (T800-12K)/Epoxy 튜브를 제작한 후 외경의 치수를 맞추기 위하여 선반가공하였으며 Steel도 치수를 맞추기 위해 접착되는 내경을 선반가공하여 사용하였다. 원통형 FRP 및 Steel Insert의 치수를 Table 2에 표시하였다. 또한 FRP 원통시편은 피착체 표면의 거칠기가 접착강도에 미치는 영향을 연구하기 위하여 FRP 튜브외면에 깊이 0.5, 피치 1인 나사선을 가공한 Notch형과 외면을 그대로 사용한 Straight형으로 나누어 제작하였다.

2-2. 표면처리

피착체의 표면탈지등에 사용한 용매는 아세톤, 트리클로로에틸렌(TCE)이었으며 인산전처리를 하기 위하여 인산(orthophosphoric acid, H_3PO_4)과 에틸알콜을 사용하였다. 이때 사용한 시약은 EP(extra pure)급이었다. 피착체의 표면처리는 JIS-K-6843-1972에 준하여 수행하였다. 그 방법을 간단히 설명하면 다음과 같다.

FRP(Carbon/Epoxy)의 표면처리는 먼저 접착면을 Acetone으로 적신 형질으로 3회 닦은 후 접착면에서 Acetone이 모두 증발할 때까지 방치한다. 그 후에 접착면을 사포(400번)로 표면 광택이 없어질 때까지 갈아낸다. 끝으로 Acetone으로 닦은 후 Acetone이 모두 증발할 때까지 방치한다. 이때 최종적으로 가아제로 닦았을 때 검은 오염물질이 묻어나지 않아야 한다. 원통형 FRP 시편중 Notch형인 경우는 가아제로 닦을 수 없는 관계로 아세톤을 충분히 적신 솔을

사용하여 세척하였다. STEEL의 표면처리는 먼저 접착면을 TCE로 적신 형질으로 세척한 후 접착면에서 TCE의 냄새가 없어질 때까지 대기에 방치한다. 이때 표면에 증류수를 조금씩 부을 때 얇은 피막이 형성되어야 한다. 접착면을 인산(H_3PO_4)과 에탄올을 무게비로 1:2로 혼합한 용액에 실온에서 120분(60°C에서 10분) 담근 후 꺼내어 흐르는 물에서 nylon brush 등을 사용하여 접착면에 있는 흑연 침전물(Carbon residue)을 깨끗이 세척한 후 증류수로 최종세척한다. 이 과정을 거친 피착체를 60°C의 오븐에서 60분간 건조후 사용하였다.

2-3. 접 착

본 연구에서 수행한 접착시편 유형은 크게 2가지로 나뉘어진다. 첫째는 Single Lap Shear Strength 측정용 접착 시편 제작이고, 둘째는 튜브삽입형 원통시편 제작이다. Single Lap 접착시편은 ASTM D1002에 준하여 미리 준비한 피착체에 혼합한 접착제를 접착부위에 열게 도포한 후 압착하여 잉여 접착제를 제거한 후 Clamp을 사용하여 고정시킨다(이때 접착부위의 길이는 12.5mm를 기준으로 하였다). 원통형 접착시편의 제작을 위하여 Fig.1에 표시한 도면에 준하여 STEEL 치구를 제작하였다. 이때의 치구는 내경을 $\phi 165.0$ mm로 하여 FRP 튜브가 치구내부로 삽입되고 STEEL 튜브는 치구 외부에 지지됨으로 인하여 미접착 길이가 FRP와 STEEL 튜브 각각 약 5 mm 정도 생기게 하였다. 이것은 압축하중을 주었을 때 내·외부간의 상대변위를 발생케하여, 접착면에 균일한 전단하중을 받도록 설계한 것이다. 미리 혼합한 접착제를 피착체의 접착면에 스페큘라로 균일하게

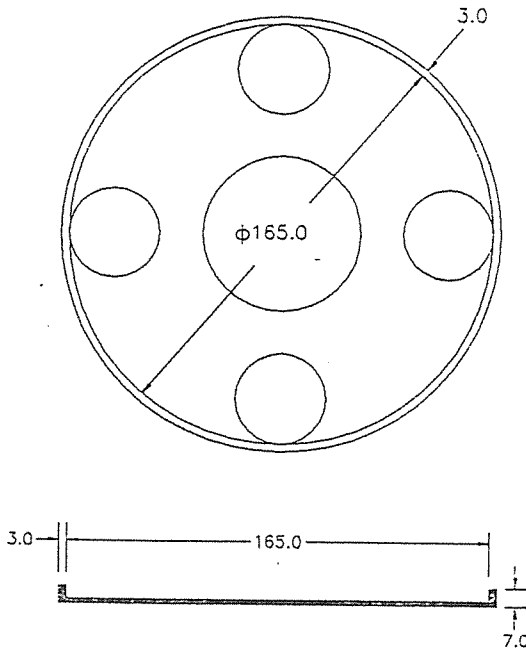


Fig. 1. 원통형 접착시편 제작용 치구

Table 3. 외부 STEEL에 내부 FRP 튜브의 삽입방법

방 법	내 용
A	접착제 도포 후 외부 STEEL을 바로 FRP 튜브에 삽입한 후 밀려나온 과잉 수지 제거
B	A과정 후 내부 FRP 튜브를 고정하고 외부 STEEL 튜브를 좌우로 약 45°씩 회전시킨 다음 내부 FRP와 외부 STEEL을 분리하고 접착제를 재도포한 후 내부 FRP 튜브에 외부 STEEL 튜브를 삽입하여 전과 동일한 방법으로 좌, 우로 45°씩 회전시킨후 밀려나온 과잉수지 제거

도포한 후 시편 제작 치구에 탈형을 용이하게 하기 위하여 비닐 1 ply를 깔고 그 위에 내부 FRP를 끼워 넣는다. 접착공정 방법의 변화가 실제 접착률과 접착강도에 많은 영향을 미칠 것으로 생각되어 기존 접착방식(A)와 개선된 방식(B)[Table 3]으로 나누어 각 시편을 제작하였다.

2-4. 경 화

접착시편의 경화는 다음과 같이 수행하였다. 지

금까지 많이 사용되어온 AW106/HV953U의 경우 접착제의 유동성 혹은 고착화(Vitrification)가 구조물의 접착강도에 미치는 영향을 조사하기 위하여 바로 고온(100°C)에서 경화시키는 경우와 상온에서 일정시간(24hr) 방치후 고온(100°C)에서 최종경화(일종의 후경화) 시키는 방법을 사용하였는데 이들 각각의 경화온도 및 시간은 Table 4와 같다.

Table 4. 경화주기(AW 106/HV 953U)

방 법	경 화 주 기
C - A	100°C (30 min)
C - B	실온(24hr) + 100°C (30 min)

Tensile Single lap 접착시편의 경화시 튜브삽입형 접착시편을 실제 복합재 구조물의 경화 조건과 동일하게 하기 위하여 FRP를 아래로 하여 시편을 세워서 경화시켰다. 튜브삽입형 접착시편의 경우 경화시 경화과정중에 내부 FRP 튜브가 올라와 균일한 접착면적을 갖지 못하는 현상을 방지하기 위하여 내부 FRP 튜브상에 지지대를 가로놓은 후 약 3 Kg의 무게로 눌러주었고, 경화온도는 100°C, 30분이었다. Fig.2는 경화후 치구에서 분리한 Trimming전의 튜브삽입형 접착시편의 사진이다.

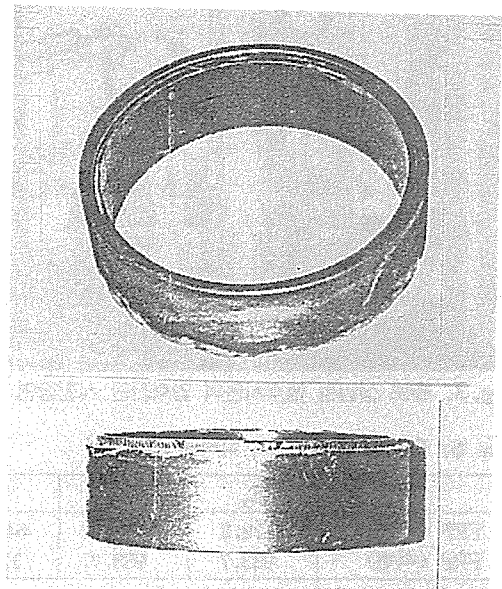


Fig. 2. 치구에서 분리한 튜브삽입형 접착시편

2-5. 접착강도 시험

접착강도 시험은 본 구조물이 내압에 의해 복합재와 금속보강재(Steel 튜브) 간에 발생하는 불균일 변형과 축방향 하중으로 접착부위에 가해지는 하중이 전단력이 지배적이기 때문에 전단강도시험을 수행하였다. Single Lap 접착시편과 튜브 삽입형 접착시편의 전단강도 시험은 INSTRON 1335를 사용하여 수행하였다(Fig.3). 이 튜브압축전단시편은 Fig.2에서와 같이 내·외부의 튜브에 약 5 mm 정도의 변위를 주어 아래·위로 압축하중을 가할 경우 접착면은 전단하중을 받도록 제작되었으며 이러한 압축하중을 주기위하여 Fig.3과 같이 균일하중을 시편의 위·아래에서 가하도록 제작된 압축치구를 사용하여 시험을 수행하였는데 전반적으로 접착이 떨어지는 시기에 순간적으로 Unloading되는 현상이 발생하였다. 이때의 Loading rate는 1.27 mm/min으로 하였다.

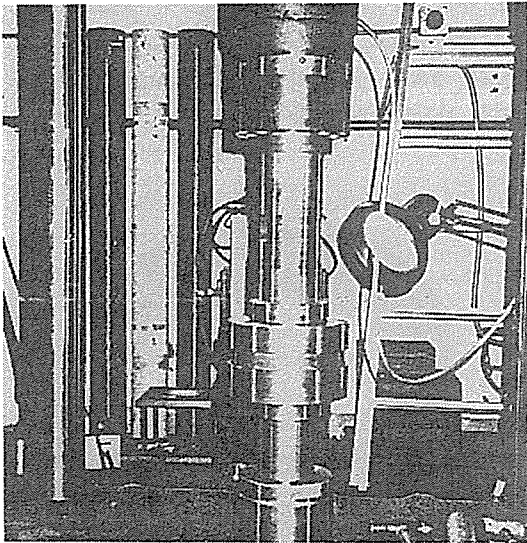


Fig. 3. 튜브 삽입형 접착시편의 압축전단 시험장면

3. 유한요소 응력 해석

본 해석에 이용된 프로그램은 상용 유한 요소해석 코드인 NISA II Composite으로서 약 2000개의 4절점 2차원 축대칭 요소를 사용하여 선형 해석을 수행하였다. 두께 방향으로의 요소 갯수는 피착체인 경우 8개, 접착제인 경우 2개로 나누고, 피착체 끝단이나, 미접착 부위 등 응력집중이 우려되는 부위는 응력 계산결과와 정확도를 위해 요소의 가로, 세로비(Aspect ratio)를 3이내로 세밀한 요소 분할을 하였다. 접착부위의 정확한 응력 거동을 해석하기위하여 접착제의 탄, 소성물성을 이용한 비선형해석이 이루어지고 있으나[10, 11] 본 시험에 적용된 접착제질의 응력에 따른 변형도 거동 시험치를 확보하지 못하였고, 또한 시험후 시편들의 접착 상태가 해석 모델링과 같은 축대칭이 아닌 비대칭 상태를 보임으로인해 본 해석을 정성적인 방향으로 수행한 관계로 접착제의 탄성 물성만 고려한 선형해석을 하였다. 해석의 모델링은 Fig.4과 같으며, 해석의 수렴성은 몇가지 모

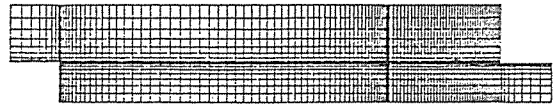


Fig. 4. 원통형 접착시편의 유한요소 해석 Modeling

델링을 적용/비교하여 확인하였다. 외부 보강 금속 튜브와 내부 복합재 튜브의 치수는 Table 2와 같고, 해석 변수를 줄이기 위해 접착간격을 0.2mm로 고정하였다. 적용된 복합재는 TORAYCA사의 T800섬유와 에폭시 수지로써 내면의 헬리컬 층과 외면의 90° 원주방향 층으로 구성되는데, 접착 시험후의 파괴양상이 접착층 계면 분리와 복합재 외면층의 박리로 나타남으로 인해 이러한 파괴양상을 관찰하기 위하여, 복합재 내·외면층을 각각 따로 모델링하여, 다른 물성값을 갖게하였다. 해석에 적용된 구조물의 물성은

Table 5. 원통형 접착시편의 피착체 재료강성

Unit: Kg/mm²

	E_x	E_y	E_z	ν_{xy}	ν_{yz}	ν_{xz}	G_{xy}
FRP (내면)	1172.2	7352.7	6440.3	0.0568	0.281	0.068	381.6
FRP (외면)	933.7	933.7	17064	0.49	0.018	0.018	285.4
Steel	16520.0			0.33			6210.5

Table 5와 같다.

적용하중은 시험 조건과 동일하게 한쪽 끝단은 하중 방향으로 단순 지지하고, 다른쪽 끝단은 0.1mm의 균일 변위를 가하였다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 시험 결과

AW106/HV953U를 사용해서 FRP(Carbon/Epoxy)와 Steel을 접착시킬 경우, 전처리와 경화방법이 미치는 영향을 연구하였다. Single Lap 접착시편의 기초실험결과는 관련보고서[9]에 상세히 언급하였으므로 여기서는 튜브삽입형 접착시편 제작을 위해 몇가지 실험결과만을 간단히 언급하도록 한다. 접착제 AW106/HV953U를 사용해서 인산전처리한 Steel 피착체와 Carbon/Epoxy 피착체를 100℃에서 30분간 경화시킨 Single Lap 접착시편의 전단강도는 2.55Kg/mm²이었다. 튜브삽입형 접착의 경우 접착제의 점도, 경화온도전의 Gel화등이 매우 중요한 것으로 생각되어 그 영향을 알아보기 위하여, 동일 접착제를 경화온도(100℃)에서 바로 경화시킨 경우와 실온에서 하루 경과시켜 접착제를 고착화(Vitrification)시킨 후 100℃에서 후경화시키는 방법으로 Single Lap 접착시편을 제작하여 그 결과를 비교 검토하였다. 예상과 달리 100℃에서 바로 경화시킨 경우가 실온에서 하루 경과시킨 후 100℃에서 30분 후 경화시킨 경우보다 접착강도가 더 우수함을 알 수 있었다. 어느정도 접착간격(약 0.2mm)이 있는 경우 접착제의 온도상승이 접착제 점도하강의 원인이 되어 접착제가 아래로 물리는 현상이 발생되어 일부 미접착 부위가 존재할 수 있다는 생각이었으나 Single Lap 시편인 경우 이러한 현상은 발견되지 않았다. 또 다른 측면에서 생각해 볼 수 있는 것이 본 연구에 사용한 접착제가 경화온도(100℃)에 노출된 경우 점도의 하강보다는 빠른 경화반응이 진행되고 두 피착체사이의 접착간격이 충분히 작으므로 100℃에서 바로 경화시킨 경우의 접착강도가 더 우수한 것으로 판단된다. 그러므로 현재 사용중인 접착제의 접착에 있어서는 실온에서의 일정시간 전처리는 필요없는 것으로 보인다.

경화온도에 따른 접착강도의 변화는 실제 CIBA-GEIGY사에서 제공한 Data[8]에서 알 수 있듯이 상온 경화인 경우 접착강도가 약 1.4~1.5Kg/mm²인데 반해서 100℃, 30분 경화시의 접착강도는 약 2.7~3.0Kg/mm²으로, 온도에 따른 이와 같은 강도변화가 본 실험에서도 유사하게 나타남을 알 수 있었다. 복합재 구조물에서 자주 적용되는 원통형 Steel Insert와 복합재 튜브간의 접착과 유사한 조건의 접착을 하기 위하여 FRP 튜브외면에 Steel 튜브를 삽입하는 접착공정을 연구하였다. 이때, 튜브 시편 공차는 실제 고급 FRP 구조물 접착의 공차와 같게하여 제작하였다. 튜브 삽입형 접착에서 접착성능에 미치는 가장 중요한 인자중의 하나가 두 피착체의 치수이다. 본 연구에서 내·외부 피착체 접착간격을 0.2mm(최대), 0.1mm(최소)로 하여 최대 허용 접착간격 차이를 0.1mm로 하였으나, 실제 가공상 약간의 가공공차가 존재하여 모든 피착체가 완전히 동일한 조건이라고는 볼 수 없다. 외부 Steel의 내경치수는 기준($\phi 165.0^{+0.2}_{-0.1}$)에 맞추기위해 선반으로 내면 기계가공을 한후 재 치수검사로 합격품만을 선별하여 실험을 수행하였다. 그리고 내부 FRP 튜브에 대해서는 이들의 외경 치수를 재검사하여 합격 및 불합격품으로 분류하여 실험하였다. 튜브 삽입형 원통 접착시편의 제작 사양은 Table 6과 같다.

Table 6. 튜브 삽입형 원통형접착시편 제작사양^a

No	FRP (형상)	접착제	접착 방법 ^b	경화
1~5	S ^c	AW 106/HV 953U	A	100℃(30분)
6~10	S	〃	B	〃
11~15	N ^d	〃	B	〃
16~20	N ^d	〃	B	〃

^a 접착제 혼합규모는 통상 1조 접착시 30g을 기준으로 함.

^b 접착방법 : Table 3

^c FRP 외면 형상이 Straight Type

^d FRP 외면 형상이 Notch Type

FRP 튜브의 접착표면형상의 영향을 알아보기 위하여 Straight 및 Notch형 FRP 튜브를 사용하여 비교실험하였으며, 접착방법은 기존 튜브 접착방식대로 접착제를 양 접착면에 도포한 후 바로 삽입하는 A

방법과 두 피착체를 삽입하면서 좌·우로 45°씩 회전시킨 후 다시 두 피착체를 분리시킨 다음 접착제를 재도포한 후 좌·우로 45°씩 회전시키면서 삽입하여 접착공정을 완료하는 B방법으로 나누어 실험하였다 (Table 3). 이때의 B방법은 접착공정 초기에 접착제의 밀림현상으로 접착제의 도포가 균일치 못할 것

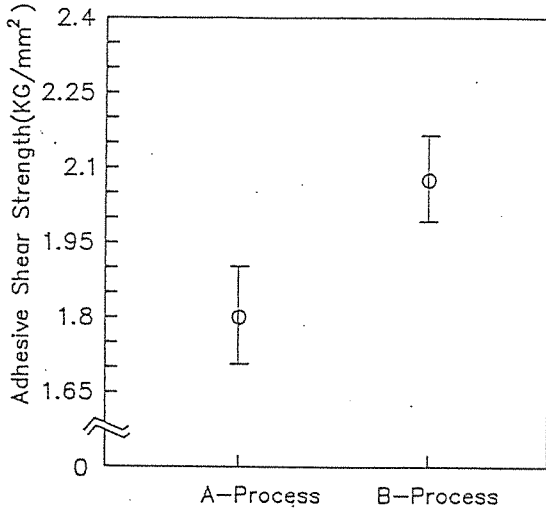


Fig. 5. 접착공정(A, B) 변화에 따른 원통형 접착시편의 접착 전단강도 변화(접착제: AW106, FRP튜브의 표면 형상: Straight)

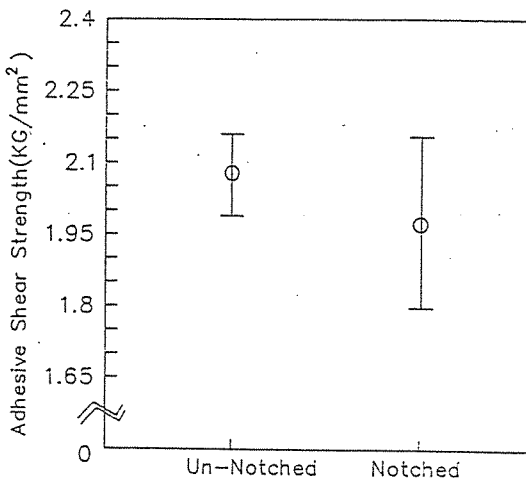


Fig. 6. FRP튜브의 표면 형상에 따른 원통형 접착시편의 접착 전단강도 변화(접착제: AW106, 접착방법: B)

으로 예상되어 접착제의 균일한 도포를 위하여 마련한 개선 공정안이다. Fig. 5는 Straight형 FRP 튜브시편의 접착공정방법(A, B)에 따른 전단강도를 표시한 것이다. 여기서 알 수 있는 바와 같이 기존 공정(A)보다 개선된 공정(B)이 더 높은 전단강도를 보였으며 평균 접착강도향상정도는 약 15%였다. Fig. 6은 내부 FRP 튜브의 접착면이 Notch형인 경우와 Straight인 경우의 접착강도 차이를 표시한 것이다. FRP 튜브의 접착면에 Notch를 준 경우 평균 접착강도는 오히려 떨어지며 접착강도 변이폭이 매우 큼을 알 수 있다. 피착체에 Notch를 줌으로서 접착제의 균일도포(한 측면에 접착제가 거의 없는 경우는 없음)가 가능하고 FRP에의 접착면적이 충분히 넓어질 것으로 예상되었으나 피착체 FRP의 나사산이 약해짐으로서 FRP의 조기 파괴가 수반되므로서 접착강도가 떨어지는 것으로 판단된다. Notch를 준 경우는 대부분의 시편이 Fig. 7과 같이 Notch를 주지않은 경우에 비해 점진적인 하중의 Unloading 상태 (FRP의 밀림 현상, 접착일부의 떨어짐 및 접착된 FRP의 일부 떨어짐)를 보였다. 이와같은 점진적인 파손양상은 복합재 외면층인 나사부 노치의 강도저하로 인하여, 초기 나사부 파손후 갑작스런 최종 파단으로 이어지지않고 다음 나사부로 이어짐을 의미한다.

피착체 표면의 기계적 가공문제는 앞으로 가공체의 적층 각도와 강도, 가공정도, 표면상태, 전처리등에 관한 종합적인 연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다. AW106/HV953U의 온도에 따른 점도변화를 알

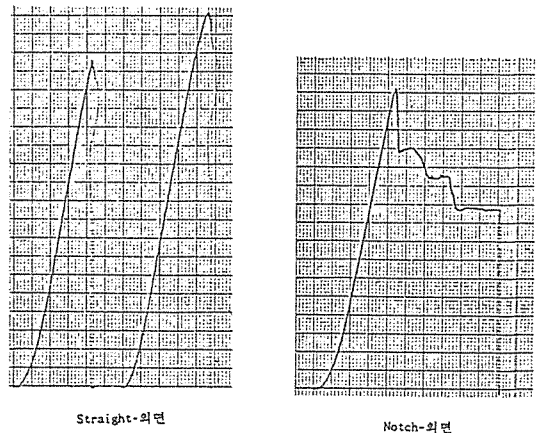


Fig. 7. 원통형 접착시편의 대표적인 하중-변위 곡선

아보기 위해 FRP와 Steel 시편표면에 AW106/HV953U를 도포한 후 85°C Oven에서 세운채로 30분동안 경화시켰다. 그 후 접착제의 흐름정도를 버어니어 캘리퍼스로 측정해본 결과 최대, 최소 접착두께 차이는 약 0.13mm정도였다. 그리고 최소접착두께가 약 0.14mm였다. 그러나 실제 Tube시편의 접착간격 크기가 0.1~0.2 mm이므로 이러한 접착유동(Flow)의 영향은 실제 튜브삽입형 접착제품인 경우 튜브의 내·외면의 표면장력으로 더욱 미소해진다고 볼 수 있다. 그러므로 온도에 따른 AW106/HV953U 접착제의 흐름현상은 접착제의 불균일 분포를 야기시킬 수 있으나 아래로 접착제가 물리는 극단적인 이상현상은 나타나기 어려울 것으로 생각된다. 앞에서 간단히 언급하였듯이 튜브 삽입형 접착에서 가장 중요한 인자중의 하나가 접착부위의 치수인데 이들의 영향을 피착체중의 하나인 FRP 튜브 관점에서 연구하였다. 즉 접착간격 측면에서 각 튜브삽입형 접착시험편의 접착강도를 살펴보았다. Fig.8과 Fig.9은 FRP 튜브와 Steel 튜브와의 접착 접착간격 차이의 합격품만을 선별하여 시험한 결과이다. 이때의 접착 접착간격 차이는 Steel 튜브와 FRP 튜브사이에 생길 수 있는 최대 접착간격에서 최소 접착간격을 뺀 차이로서

진원도로 볼 수 있다. Fig.8~9에서 알 수 있듯이 접착 접착간격 차이가 클수록 전단강도가 현저히 떨어짐을 확인할 수 있다. 단순히 접착간격 영향만을 고려할 수는 없으나 Fig.8과 Fig.9에서 볼 수 있듯이 관찰된 최소 접착간격과 최대 접착간격사이의 접착강도 변화는 접착간격 차이가 커질수록 Notch형 피착체인 경우 14%, Straight형 피착체인 경우 8% 감소하였다. 여기서 규정된 튜브시편의 최대 허용 공차 GAP은 0.1mm이다. 이러한 GAP 변화를 다른 접착체인 Hysol사의 EA9460에 적용하여 시험을 수행하였는데 Notch를 준 경우 GAP이 0.045에서 0.19 mm까지 변함에 따라 층간 전단 접착강도가 약 24% 감소되었고, Straight형은 GAP이 0.065에서 0.125mm까지 변함에 따라 층간 전단 접착강도가 약 22% 감소되었다[9]. GAP 합격품의 경우(GAP : 0.1mm이내)를 FRP 튜브 표면가공(Straight, Notch) 여부에 따른 접착강도를 Fig.10에 표시하였다. 피착체인 FRP 튜브가 Notch형인 경우를 GAP 합격품에 대하여 접착실험하였는데 Notch형인 경우가 접착제의 균일도포와 접착제의 흐름현상을 막을 수 있으므로 어느 정도 접착강도의 향상이 있을 것으로 기대했으나 Straight형인 경우의 접착강도와 거의 차

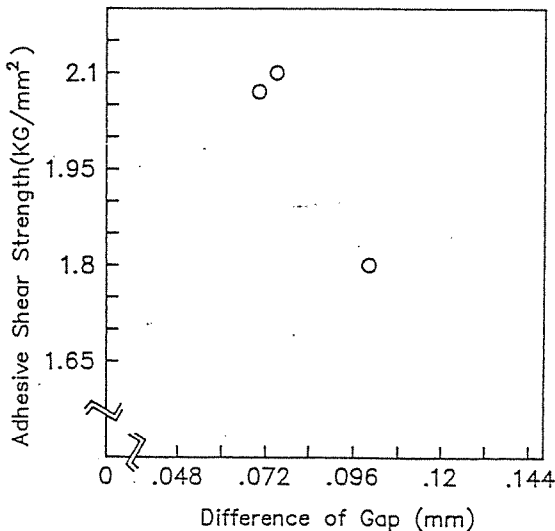


Fig. 8. 내부 FRP 튜브와 외부 Steel 튜브간의 Gap 크기에 따른 원통형 접착시편의 접착 전단강도변화 (접착제: AW106, FRP 튜브의 표면 형상: Notched, 접착방법: B)

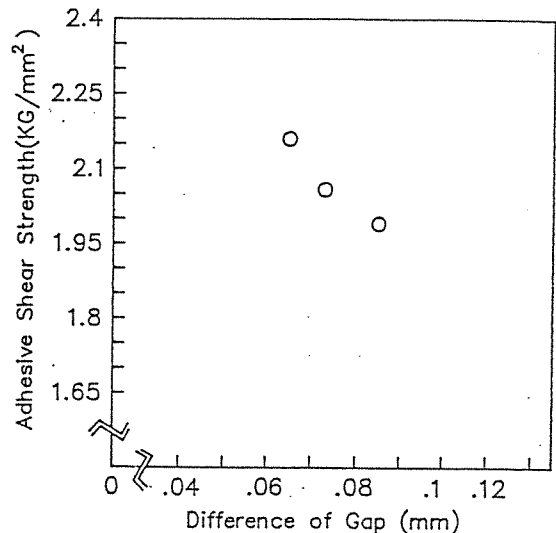


Fig. 9. 내부 FRP 튜브와 외부 Steel 튜브간의 Gap 크기에 따른 원통형 접착시편의 접착 전단강도변화 (접착제: AW106, FRP 튜브의 표면 형상: Straight, 접착방법: B)

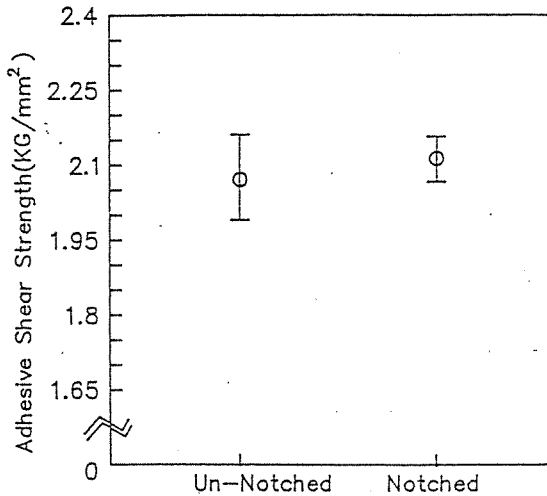


Fig. 10. FRP 튜브의 표면형상에 따른 원통형 접착시편의 접착 전단강도변화(접착제: AW106, GAP 검사: 합격품, 접착방법: B)

이를 발견할 수 없었다. Fig. 11~12는 접착간격 차이가 합격품인 것과 불합격품인 것중 대표적인 튜브삽입형 접착시편의 파손 표면 사진으로서 시험후 이등분하여 두 피착체를 분리한 접착면이다. 일부는 접착강도시험 완료후에도 분리가 불가능(외관상으로는 접착되어 있는 것같이 보임)하여 접착면을 관찰하지 못했다. 많은 경우가 FRP층이 파괴되는데 이것은 접착력이 그만큼 큰것도 원인이 될 수 있지만 FRP 튜브외경의 약 0.6 mm가 원주 방향 적층임으로 인해, 층간 전단 강도와 인장 강도가 매우 약하여 두 피착체에 적용되는 강한 전단응력과 인장응력으로 FRP층의 박리가 발생된 것으로 추정된다.

4-2. 원통형 접착의 해석 결과

원통형 접착시편의 시험후 시편을 이등분하여 파손 표면을 검토해본 결과 Fig. 11~12와 같은 접착 분포가 관찰되었다. 즉 Fig. 11과 같은 시편간의 접착 간격 차이가 0.06 mm이내고 접착 공정이 개선된 경우, 접착부위가 강성이 큰 Steel 튜브 끝단을 기준으로 분포되어 있고 미접착 부위는 복합재 튜브 끝단에 주로 존재하며 튜브 길이 방향으로 국부적으로 존재하는데 비해, Fig. 12와 같은 접착간격 차이가 0.1

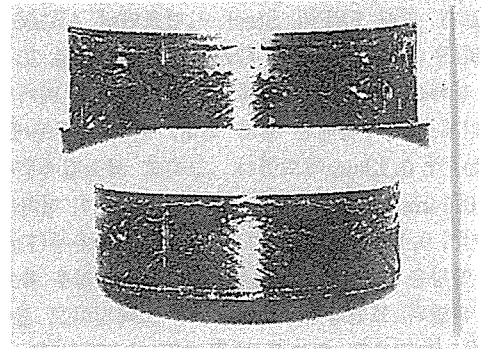


Fig. 11. 원통형 접착시편중 합격품의 파손된 접착표면 형상

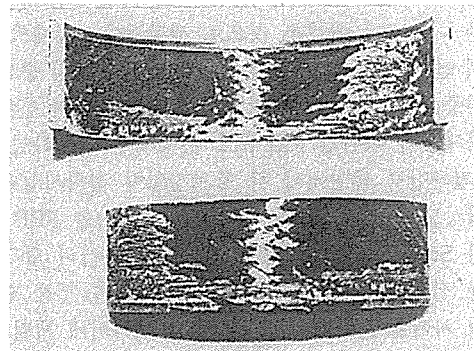


Fig. 12. 원통형 접착시편중 불 합격품의 파손된 접착표면 형상

mm보다 크고, 접착 공정이 기존 방법인 경우 강성이 작은 복합재 튜브 끝단을 기준으로 분포하고 있었고, 미접착 부위 분포가 Steel 튜브 끝단에 약 10 mm 존재하여 원주 방향으로 이어져 있었다. 이와같은 접착 분포의 영향을 측 대칭 요소에서 계산하기 위해 미 접착 부위가 원주 방향 전체로 떨어져 있다는 가정하에, 양끝단에서 각 10 mm 정도의 미접착간격을 만들어 유한요소해석 모델링을 하였다. Fig. 13~14는 접착이 피착체에 완벽히 도포되었다는 가정하의 응력 분포로서 접착제와 FRP외면의 응력 집중이 Steel 튜브 끝단에서 발생됨을 볼 수 있다. 이러한 응력 집중은 급격한 강성 차이로 인하여, 적용 하중에 대해 Steel 튜브는 미소 변형으로 거동하는데 비해 접착 층과 FRP외면 층은 많은 변형을 담당함에 기인된다. 이러한 응력 집중은 Steel 튜브에서 Al 튜브로 전환 시킴으로 인해 강성 차이가 작아져서 약 33% 응력

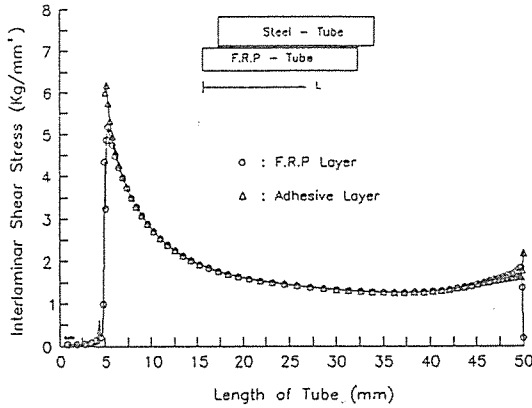


Fig. 13. 접착이 완벽한 원통형 접착시편의 복합재 외면층과 접착층의 시편 길이에 따른 층간 전단응력 분포

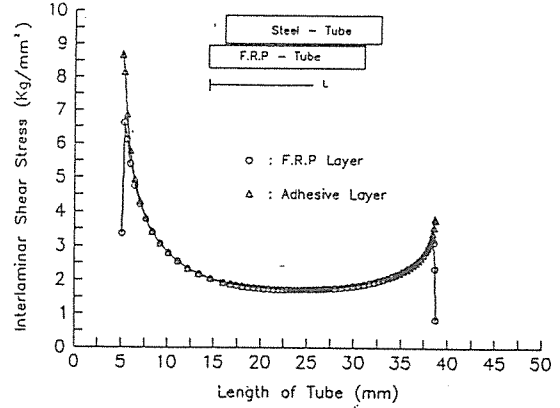


Fig. 15. 복합재 튜브 끝단으로부터 약 10mm의 미 접착이 존재하는 원통형 접착시편의 복합재 외면층과 접착층의 시편 길이에 따른 층간 전단응력 분포

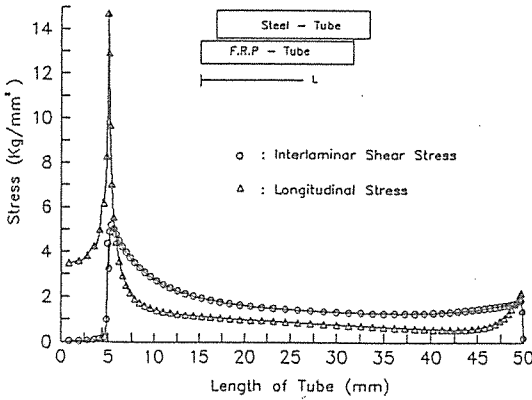


Fig. 14. 접착이 완벽한 원통형 접착시편의 복합재 외면층의 시편길이에 따른 축 방향 응력과 층간 전단응력 분포

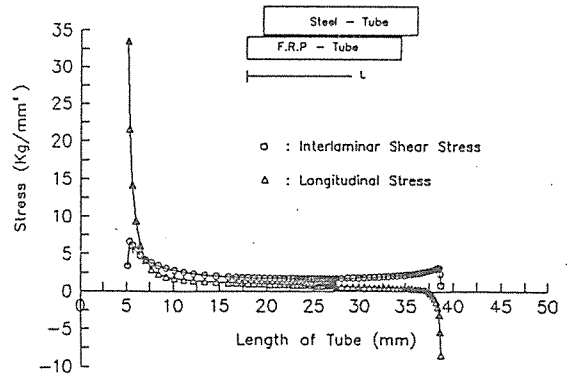


Fig. 16. 복합재 튜브 끝단으로부터 약 10mm의 미 접착이 존재하는 원통형 접착시편의 복합재 외면층의 시편 길이에 따른 축 방향 응력과 층간 전단응력 분포

집중이 감소되었다[12]. 해석 결과로 접착제와 복합재 외면층의 파손을 평가하기 위해 주된 적용 하중에 대한 시험을 수행하여 다음과 같은 강도 값을 구하였다[12].

접착 층의 층간전단 강도 :

2.5~3.0 Kg/mm² (ASTM D1002)

복합재 원주 방향 층의 층간전단 강도 :

5.6 Kg/mm² (ASTM D2344)

복합재 원주 방향 층의 인장 강도 :

4.07 Kg/mm² (ASTM D3039)

완벽한 접착인 경우 복합재 외면층의 인장 응력이 접착제의 층간 전단 응력의 2.3배로서 응력 집중되는 끝단으로부터 복합재 외면층의 박리가 발생된다. Fig. 15~16은 복합재 튜브 끝단으로부터 10 mm정도 미 접착이 발생되었을때의 응력 분포로서 첫번째 경우에 비해 약 40% 큰 접착 층간전단 응력 집중이 발생되었고, 복합재 외면층의 인장응력은 약 2.3배의 집중이 발생되어 현격한 강도 저하가 발생하였다. 이 경우에 해당되는 Fig.11에서보듯이 미 접착부를 제외한 나머지 지점은 복합재 외면 층의 파손 양상을

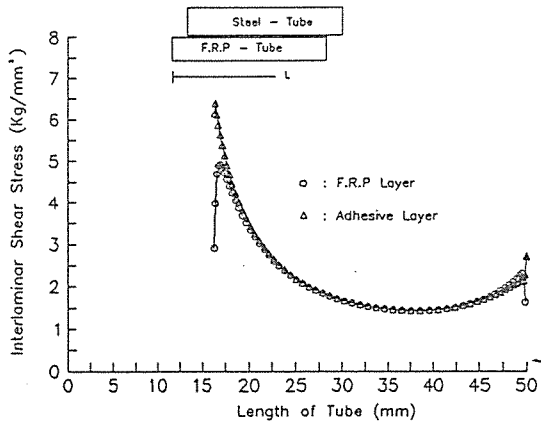


Fig. 17. Steel 튜브 끝단으로부터 약 10mm의 미 접착이 존재하는 원통형 접착시편의 복합재 외면층과 접착층의 시편 길이에 따른 층간 전단응력 분포

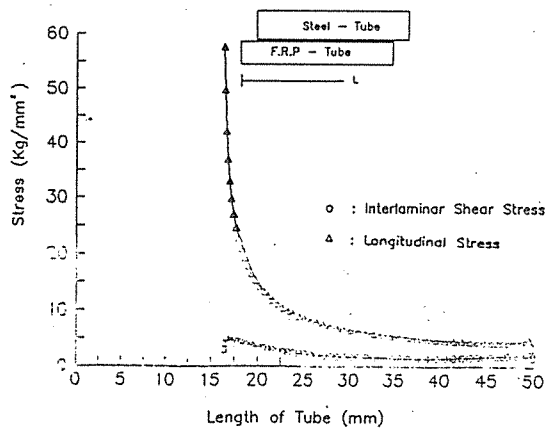


Fig. 18. Steel 튜브 끝단으로부터 약 10mm의 미 접착이 존재하는 원통형 접착시편의 복합재 외면층의 시편 길이에 따른 축 방향 응력과 층간 전단응력 분포

보이고 있다. 이와는 반대로 Steel 튜브 끝단으로부터 약 10 mm 미접착이 발생되었을 때는 Fig. 17~18과 같이 접착층은 오히려 갑작스러운 강성 변화가 줄어들고 복합재 외면층이 변형을 흡수함으로써 층간 전단 응력이 감소되었으나 복합재 외면층의 인장응력은 2번째 경우보다 60% 증가하는 양상을 보인다. Fig. 11~12에 해당되는 시험 결과는 파괴 전단응력이 2.164 Kg/mm^2 과 1.45 Kg/mm^2 으로 약 49% 강도 차이가 발생되어 해석 결과인 60%보다 작게 나타났다, 그 이유는 실제 시편의 미 접착이 원주 방

향으로 균일하게 발생되기 보다는 불균일한 분포를 보임으로 인해 시험과 해석간에 차이가 발생되었다고 생각한다.

5. 결 론

지금까지 복합재 구조물 개발에 있어서 빈번히 만나게되는 튜브삽입형 접착방법에 대한 연구결과를 설명하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. Single Lab 전단 시편에서 접착경화온도를 변수로 하여 시험한 결과 100°C 에서 바로 경화한 경우가, 상온에서 하루정도 방치한 후 100°C 에서 경화한것에 비해 약 25%의 접착강도 증가를 보였다. 이러한 현상은 본 접착제의 화학적 특성에 기인하는 것으로 100°C 에 노출될 경우 점도 하강보다는 바로 가교화 반응이 진행되었기 때문으로 분석되었다.

2. 튜브삽입형 접착에서 접착제의 흘러내림을 방지하고 접착제의 균일한 도포를 위하여 피착체인 내부 FRP 튜브에 Notch를 준 경우를 실험했는데, 이 경우의 접착면을 관찰해보면 내부 FRP 튜브가 Straight인 경우보다 접착제가 균일하게 도포되어 있으나 Notch준 FRP 부분이 원주 방향 적층임으로 인해 이곳의 강도가 약화되어 접착력은 오히려 떨어졌다.

3. 튜브삽입형 접착시편의 강도 저하의 한 원인인 접착제의 불균일 도포현상을 해결하기 위하여 기존에 수행하였던 양 피착체에 접착제 도포후 1회 삽입으로 접착공정을 완료하는 방법을 개선하여 외부 STEEL 피착체 삽입시 좌·우 45° 씩 회전시키면서 접착시키고 다시 두 피착체를 분리시킨 다음 접착제를 재도포한 후 동일한 방법으로 끼워넣어 접착공정을 완료하는 방법을 실험하였다. 이 경우에는 시편의 파면으로 볼때, 기존 공정은 초기 삽입시 접착층의 밀림 발생으로 끝단에 균일 미접착이 발생하는 반면 개선된 공정은 미 접착부가 불균일하게 분포함으로 인해 전자의 방법을 사용할 때보다 후자의 방법을 사용했을 경우 접착강도가 약 15% 향상됨을 알 수 있었다.

4. 튜브삽입형 시편에서, Steel 및 FRP 튜브간의 진원도 차이에 의한 접착강도 변화를 시험하였다. 특히 이러한 진원도 차이는 Steel 튜브와 FRP 튜브

간의 미접착 틈새를 만듦으로 인해 접착강도의 결정적인 저하의 원인이 되고 있었다. 즉 미접착 틈새 차이가 클수록 미접착 부위가 Steel 튜브 끝단에 발생되어 해석에서 언급한 바와 같이 복합재 외면층의 인장 응력 상승으로 파손이 발생되었다.

FRP 튜브의 최대, 최소 외경으로 인한 최대 반경차이가 0.065 mm에서 0.1 mm까지 변함에 따라 약 8%~14%의 접착강도 저하가 발생되었다.

5. 복합재 구조물의 튜브 삽입형 접착에서 최적의 접착 조건은 피착체의 강성이 접착제와 유사하고, 피착체의 접착부 강도가 우수해야하며, 미 접착이 발생될 때는 가능한한 강성이 큰 끝단은 피해야함을 해석과 시험을 통해 검증하였다.

참 고 문 헌

1. T.J. Reinhart, "Composites" ASM International. Ohio, 1987. pp 683-705.
2. H.V. Gerlach, "Composite Motor Cases for Tactical Rockets", AIAA-88-3327.
3. A.K. Munjal, "Use of Fiber-Reinforced Composites in Rocket Motor Industry", SAMPE Quarterly, January, 1986, pp 1-11.
4. J. Shields, "Adhesive Handbook", Newnes-Butterworths, London-Boston, 1976.
5. L.H. Lee, "Adhesive Chemistry, Developments and Trends", Plenum Press, N.Y. 1984.
6. 이학오 "최근 기능성 접착제의 진보와 활용", 산업연구원 기술정보시리즈, 1990.
7. D.M. Mazenko, G.A. Jensen, and P.J. McCormick, "Joint Technology for Graphite/Epoxy Space Structures", SAMPE Journal, May/June, pp 28 (1987).
8. CIBA-GEIGY Data Sheet, Araldite AW106/Hardner HV 953U.
9. 정 발, 갈영순, 황태경, "탄소섬유강화 복합재 튜브의 접착공정 연구", 연구보고서, MSDC-416-92153, 국방과학연구소, 1992.
10. L. Hollaway, A. Romhi and M. Gunn, "Optimisation of Adhesive Bonded Composite Tubular Sections", Composite Structures, 16, 1990, pp 125-170.
11. 이수정, 이대길, "원형 Single Lap 접착 조인트의 파괴 모델에 관한 연구", 한국복합재료학회지, 5(1), 6 (1992).
12. 황태경, 갈영순, 조원만, 정 발, "원통형 복합재 튜브와 금속 튜브 접착에 관한 공정 및 재료 변수에 따른 시험 및 응력 해석", 연구보고서, MSDC-421-93424, 국방과학연구소, 1993.
13. B. Higuera and Murat Kural, "A Finite Element Analysis of Joints Involving Graphite Epoxy Tubes and Metallic Fittings", SAMPE Symp., April 3-5, 1984.