

〈논 문〉

동시경화법으로 제조된 복합재료 조인트의 강도 및 파괴모드 연구

최진호* · 이대길**

(1996년 4월 25일 접수)

A Study on the Strength and Failure Mode of Co-cured Composite Joints

J.H. Choi and D.G. Lee

Key Words : Co-cure(동시경화), Joint(접합), Adhesion(접착), Composite(복합재료)

Abstract

The joint design and manufacture of the composite structure have become an important research area because the structural efficiency of the composite structure is often determined by its joint not by its basic structure. The co-cured joint is an efficient joint technique because both curing and joining for composite structures are achieved simultaneously. In this paper, the torque capacities of the co-cured tubular lap joint with and without knurling of the pyramid type were experimentally measured. From the experimental results, it was found that the excess resin played a role as an adhesive in the co-cured tubular lap joint whose steel adherends were not knurled. Also, it was found that the torque capacity of the co-cured joint was increased as the knurling size of the pyramid type on the surface of the steel adherend was increased.

1. 서 론

복합재료는 높은 비강성 및 비강도 특성으로 인하여 우주항공산업뿐만 아니라, 일반 기계 구조물에도 그 적용이 확대되고 있다. 복합재료의 광범위한 적용으로 인하여 복합재료간의 접합 또는 이종재료간의 접합문제는 매우 중요한 문제로 대두되었다.⁽¹⁾

복합재료의 접합방법에는 기계적 접합법과 접착제에 의한 접합법으로 크게 나눌 수 있다. 기계적 접합법은 신뢰성 높은 체결력을 이룰 수 있으나, 모재에 구멍이 형성되므로 모재의 강도저하를 가져온다. 이에 반해 접착제에 의한 접합법은 하중을

넓게 분포시킬 수 있으며, 모재에 구멍을 낼 필요가 없으므로 모재의 강도 저하를 방지할 수 있으나⁽²⁾ 분해가 곤란하고 환경조건에 민감한 단점을 지니고 있다.⁽³⁾

위의 두 가지 방법의 중간형태라 할 수 있는 동시경화법은 복합재료의 경화와 접합을 동시에 이루는 방법이다. 동시경화법의 주 접합 메카니즘은 잉여수지에 의한 접착력과 널링과 같은 인위적인 굴곡에 의한 기계적 체결력(mechanical interlocking)이 혼합된 형태이다. 동시경화법은 복합재료의 제조와 접합을 동시에 수행하므로 구조물의 제조시간을 줄일 수 있는 경제적인 방법이다. 그러나 동시경화법에 대한 정, 동적 접합특성과 접합 메카니즘에 대한 연구가 거의 이루어지지 않고 있다.

본 논문에서는 Fig. 1과 같은 원형조인트를 동시경화법으로 제작하여 접합특성을 살펴보았다. 실린

*경상대학교 기계설계학과

**회원, 한국과학기술원 기계공학과

더 형태의 강재 튜브시편의 표면에 인위적인 널링의 존재 유무에 따른 조인트의 적합력을 토크특성으로 비교 평가하였다. 또한 복합재료의 섬유부피분율이 접합강도에 미치는 영향을 살펴보았으며, 유한요소해석으로 조인트의 응력분포를 구하여 실험결과와 서로 비교하였다.

2. 실험

2.1 피착제 표면에 널링이 없는 동시경화조인트

Fig. 1과 같은 동시경화조인트 구조에서, 피착제 표면에 널링과 같은 기계적 굴곡이 존재하지 않는 경우에 대한 조인트의 적합력을 실험에 의한 토크값으로 평가하였다. 동시경화된 원형조인트 시험편의 토크특성 조사를 위한 그리퍼(Gripper)는 제작하기가 매우 까다로우므로 본 논문에서는 Fig. 1과 같은 두 부분의 접합면을 갖는 조인트 구조를 설계 제작하여 토크실험을 수행하였다. 그림에서 보는 바와 같이 두 접합면 사이의 간격을 일정하게 유지하고 단면방향으로 접촉을 방지하기 위하여 길이 7 mm의 테프론 봉을 삽입하였다. 그림과 같은 구조의 동시경화조인트는 경화중에 편심이 발생할 우려가 존재하므로 Fig. 2와 같은 V-블록을 사용하여 편심을 방지하였다. 복합재료의 반경방향 두께는

2.4 mm로, 접합길이는 15 mm로 고정하여 실험하였다. 또한 강철 피착제의 평균 표면거칠기는 피로특성이 우수하다고 보고되어 있는 $2 \mu\text{m}$ 로 조절하였다.^(4,5) 동시경화조인트의 복합재료부분은 (주)선경에서 제공한 USN150을 이용하였다. USN150은 일방향 탄소섬유 에폭시 프리프레그로서 기계적 물성치는 Table 1에 나타나 있다.

시험편은 적층 시퀀스(stacking sequence)를 $[\pm 45]$ 로 하여 오토클레이브(autoclave)에서 진공포장 성형법(vacuum bag process)으로 경화시켰다. Fig. 3은 (주)선경에서 제공한 복합재료의 경화사이클이다.⁽⁶⁾ 진공포장성형법으로 복합재료를 제조할 경우, 필-플라이(peel-ply)는 잉여수지를 흡수하는 역할을 하므로 삽입되는 필-플라이의 개수를 변화시키면 복합재료의 섬유부피분율을 조절할 수 있다. 진공포장성형시 필-플라이를 삽입하지 않으면 잉여수지가 거의 제거되지 않은 상태가 되어 복합재료의 섬유부피분율이 최저가 되는데, 본 논문에서 사용한 프리프레그는 약 56.4%가 되었다. 또한 8장의 프리프레그에 그에 대하여 3장의 필플라이를 삽입하면 복합재료의 섬유부피분율은

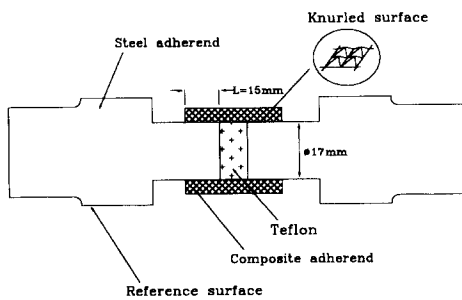


Fig. 1 Shape of the co-cured tubular lap joint

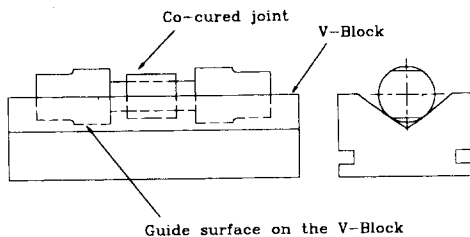


Fig. 2 V-Block used for concentric bonding of the co-cured joint

Table 1 Mechanical properties of the carbon fiber epoxy composites

E_L (Longitudinal modulus)	130.00 GPa
E_T (Transverse modulus)	10.50 GPa
G_{LT} (Shear modulus)	6.00 GPa
V_{LT} (Poisson's ratio)	0.28
E_θ ($[\pm 45]$)	20.64 GPa
E_z ($[\pm 45]$)	20.64 GPa
$G_{\theta z}$ ($[\pm 45]$)	33.87 GPa

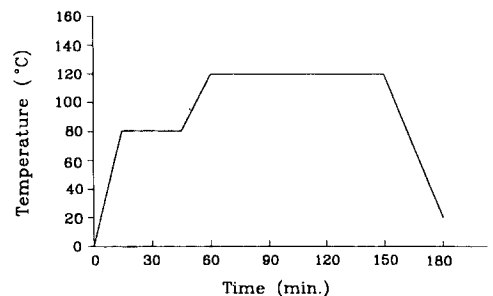


Fig. 3 Conventional autoclave cure cycle

약 64.0%가 되었다. 복합재료의 섬유부피분율을 측정할 수 있는 방법에 여러가지가 있으나 탄소섬유에폭시 복합재료는 일반적으로 매트릭스 다이제션(matrix digestion)법을 이용한다. 매트릭스 다이제션법은 70%의 질산용액에 측정하고자 하는 시편을 약 5시간 동안 담구어 수지를 녹여내는 방법이다. 질산처리된 시편은 아세톤과 물로서 세척한 다음 건조시킨다. 건조된 시편은 섬유부만 남아있는 상태이므로 이때의 무게를 측정한다. 측정된 섬유부의 무게와 실험전 시편과의 무게차를 이용하여 복합재료의 섬유부피분율을 계산하였다.

Fig. 4는 복합재료의 섬유부피분율이 56.4%일 때와 64.0%일 때에 대한 동시경화조인트의 토크특성을 실험한 결과이다. 금속 피착체 표면부는 앞에서 언급하였듯이 평균 표면거칠기를 $2\mu\text{m}$ 로 하였다. 동일한 시험편을 각각 4개씩 제조하여, 실험값을 평균하였는데 각각의 실험값은 Table 2와 같다. Fig. 4는 실험치의 평균 값을 그래프로 나타낸 그림으로, 복합재료의 섬유부피분율이 56.4%일 경우가 64.0%보다 훨씬 큰 토크절단 능력을 가짐을 볼 수 있다. 토크실험한 시편의 단면을 관찰하기 위하여 시편을 축방향에 수직인 방향으로 절단한 다음, 절단면을 연삭하였다. 연삭된 면은 SEM(scanning electron microscope)을 이용하여 단면을 관찰하였다. Fig. 5는 시편의 단면을 SEM으로 촬영한 사진으로 복합재료의 섬유부피분율이 64.0%일 때는 금속과 복합재료의 경계층에 수지층

이 거의 존재하지 않음을 관찰할 수 있다. 따라서 금속과 복합재료간의 접합기구가 형성되지 않아 현저한 강도저하가 발생된 것으로 추정된다. 이에 반해 복합재료의 섬유부피분율이 56.4%일 때는 수지

Table 2 Torque capacities of the co-cured joint without knurling

Fiber volume fraction (%)	Torque capacity (N.m)
56.4	178
	183
	191
	171
64.0	12
	26
	35
	20

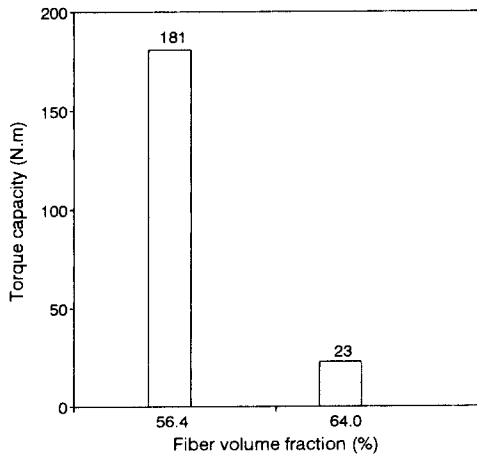
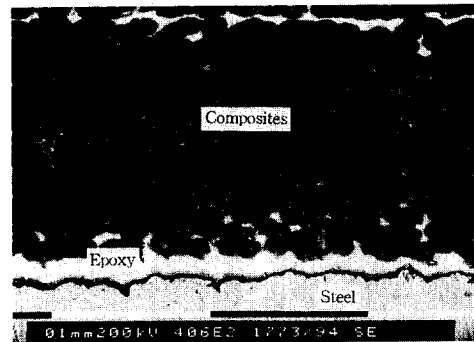
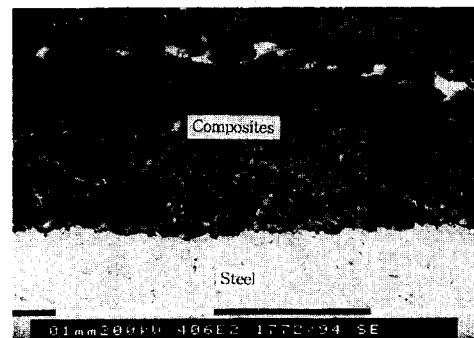


Fig. 4 Torque capacities of the co-cured joint when the surface roughness of the steel adherend was $2\mu\text{m}$



(a) 56.4% fiber volume fraction of the composite adherend



(b) 64.0% fiber volume fraction of the composite adherend

Fig. 5 Cross-section of the co-cured joint without knurling

도록 복합재료의 섬유부피분율을 낮게 조절하여야 한다는 결론을 내릴 수 있다.

위의 동시경화조인트는 접착 메카니즘이 주접합 기구이므로 접착제에 의한 접합시편을 제조하여 접합강도를 비교평가하였다. Fig. 6은 접착조인트의 기하학적 형상을 나타낸 그림으로 접착부의 기하학적 형상은 접착길이가 15 mm이고, 복합재료의 두께가 2.4 mm로 동시경화조인트와 같은 구조로 되어 있다. 실험에 사용한 접착제는 IPCO National

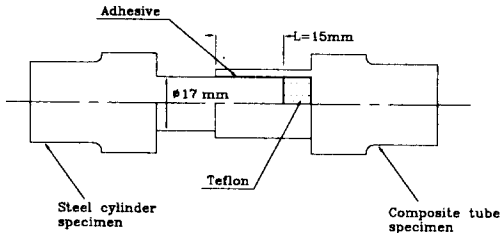


Fig. 6 Geometry of the tubular adhesive joint

Table 3 Properties of the epoxy adhesive(IPCO 9923)

Mix ratio by wight (Part A : Part B)	50 : 50
Curing temp.(°C)	80
Lap Shear strength(MPa)	13.7(ASTM D-1002-72)
Tensile strength(MPa)	45
Tensile modulus(GPa)	1.3
Poisson's ratio	0.41

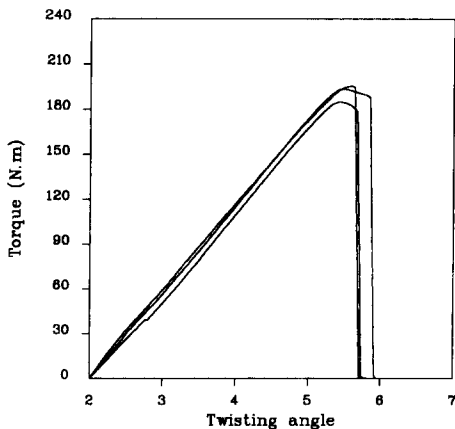
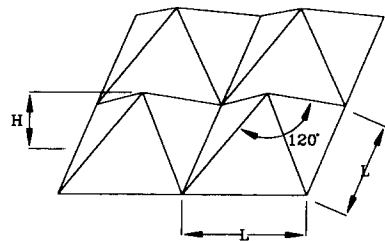


Fig. 7 Torque-twisting angle curves of the tubular adhesive joint

사에서 공급한 IPCO 9923으로서 에폭시 계열의 접착제이다. IPCO 9923재료는 에폭시 수지에 고무성분을 첨가하여 연성을 증가시킨 일반적인 산업용 접착제이다. IPCO 9923의 기계적 물성치는 Table 3에 나타나 있다. 접착두께는 접착강도가 우수하다고 보고되어 있는 0.1 mm로 규정시켜 실험하였다.⁽⁵⁾ 또한 금속 피착제 표면부의 평균 표면거칠기는 동시경화조인트와 같은 2 μm로 조절하였다. Fig. 7은 접착조인트의 토크-비틀림각 선도로서 최대토크값은 약 190 N·m이다, 그림에서 보는 바와 같이 접착조인트의 최대토크값은 동시경화조인트의 최대토크값보다 약간 높은 값을 가짐을 볼 수 있다.

2.2 피착제 표면에 널링이 존재하는 동시경화조인트

동시경화조인트에서 피착제 표면에 적절한 굴곡을 주어서 기계적 체결에 의한 접합강도의 변화를 연구하였다. 피착제 표면의 굴곡은 금속 피착제 표면에 널링처리를 하여 Fig. 1과 같은 동시경화조인트를 제조하였다. 널링 크기와 복합재료의 섬유부피분율의 변화에 따른 동시경화조인트의 최대토크 변화특성을 실험적으로 평가하였다. Fig. 8은 본 논문의 동시경화조인트에 적용된 널링의 형상 및 치수를 표시하였다. 널링의 크기는 1인치당 널링의 갯수로 표시하였으며, 널링의 갯수가 많으면 널링



Number of knurling per inch	L(mm)	H(mm)
18	0.997806	0.407353
24	0.748355	0.305515
32	0.561266	0.229136
46	0.390446	0.159399

Fig. 8 Shape of the surface knurling of the co-cured tubular joint

크기가 작아진다.

Fig. 9는 복합재료 피착제의 두께변화에 따른 최대토크의 실험값을 나타내는 그래프로서 복합재료의 섬유부피분율을 56.4%이다. 복합재료 섬유부피층이 형성되어 수지층이 접착제 역할을 하여 토크의 증가를 가져온 것으로 추정된다.

이상의 실험결과로부터, 금속 표면에 적절한 기계적 굴곡을 형성하지 않고 동시경화조인트를 제조할 때는 복합재료의 잉여수지에 의한 접착 메카니즘이 주접합기구이며, 잉여수지층이 형성될 수 있는 분율은 진공포장형성에 삽입되는 필-플라이의 갯수로 조절하였다. 그림에서 보는 바와 같이 복합재

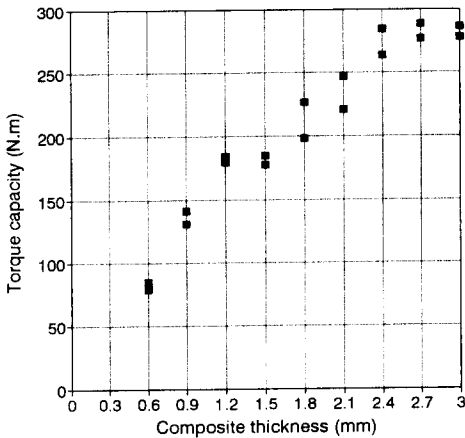


Fig. 9 Torque capacity versus composite thickness of the co-cured joint when the fiber volume fraction of the composites is 56.4%

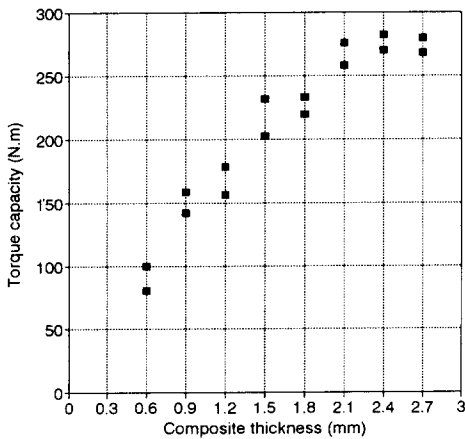


Fig. 10 Torque capacity versus composite thickness of the co-cured joint when the fiber volume fraction of the composites is 61.8%

료 피착제의 두께가 증가하면 최대토크값이 증가하였고, 복합재료 피착제의 두께가 2.7 mm 이상에서는 최대 토크값이 약 280 N·m로 일정한 값을 유지하였다. 8장의 프리플레그에 대하여 1장의 필플라이를 삽입하면 복합재료의 섬유부피분율은 약 61.8%가 된다.

Fig. 10은 복합재료의 섬유부피분율이 61.8%일 때, 복합재료 피착제의 두께변화에 따른 최대토크의 실험값을 나타내는 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이 복합재료 피착제의 두께가 증가하면 최대토크값이 증가하였고, 복합재료 피착제의 두께가 2.4 mm 이상에서는 최대토크값이 약 275 N·m로 일정한 값을 유지하였다.

Fig. 11은 복합재료의 섬유부피분율이 64.0%일 때, 복합재료 피착제의 두께변화에 따른 최대토크의 실험값을 나타내는 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이 복합재료 피착제의 두께가 1.5 m 이상에서는 최대토크값이 약 175 N·m로 일정한 값을 유지하였다. 이상과 같은 실험결과로부터, 동시경화조인트에 기계적 체결을 유도하기 위하여 금속 피착제에 널링처리를 하였을 경우, 복합재료 피착제의 섬유부피분율이 감소하면 동시경화조인트의 강도가 증가한다는 결론을 내릴 수 있다.

금속 피착제 부분의 널링크기가 동시경화조인트의 강도에 미치는 영향을 조사하기 위하여 널링크기를 변화시킨 시편을 제작하여 토크실험을 수행하였다. 복합재료의 섬유부피분율은 56.4%로 일정하게 유지하여 동시경화조인트 시편을 제작하였다.

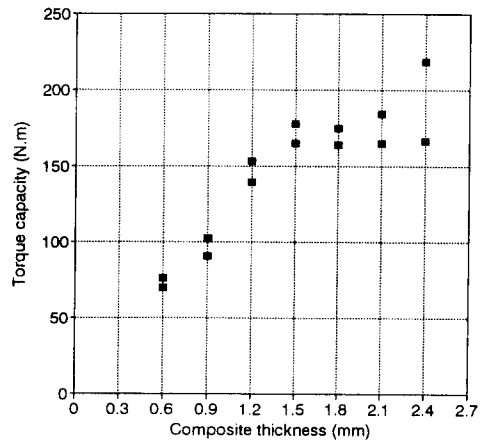


Fig. 11 Torque capacity versus composite thickness of the co-cured joint when the fiber volume fraction of the composites is 64.0%

Fig. 12는 널링크기에 따른 최대토크의 실험결과를 나타낸 그래프로서, 널링크기가 클수록 최대토크가 증가함을 볼 수 있다.

동시경화조인트와 파괴모드를 살펴보기 위하여,

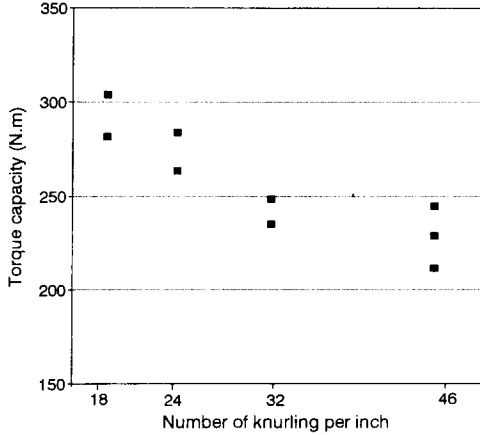


Fig. 12 Torque capacity versus knurling size of the co-cured joint when the fiber volume fraction of the composites is 56.4%

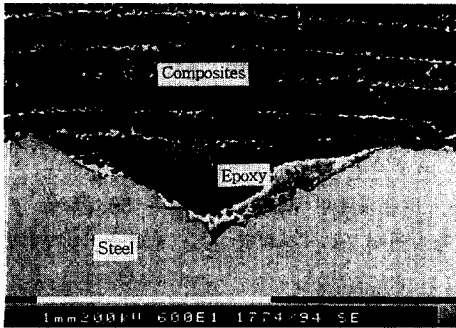


Fig. 13 Surface phenomenon of the cross-section of the co-cured joint with knurling when the applied consolidation pressure was 0.6MPa

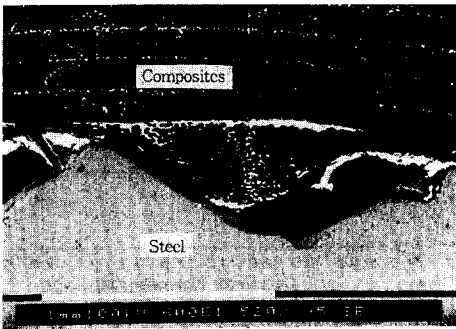


Fig. 14 Fracture surfaces of the co-cured joint with the knurled steel adherend

토크실험 전후의 시편을 축방향에 수직인 방향으로 절단한 다음, 절단면을 연삭하였다. 연삭된 면은 SEM을 이용하여 단면을 관찰하였다. Fig. 13은 복합재료의 경화압력이 0.6 MPa이고 섬유부피분율이 56.4%일 때의 단면사진이다. 그림에서 보는 바와 같이 복합재료의 한층이 금속 피착제의 굴곡사이를 채우고 있음을 관찰할 수 있으며, 잉여수지가 굴곡의 한쪽방향으로 집중된 현상을 볼 수 있다. Fig. 14는 토크실험후에 촬영한 시편사진으로, 응력집중이 예상되는 조인트 끝부분의 단면사진이다. 본 논문에서 사용한 동시경화조인트의 파괴는 금속과 복합재료간의 경계면 파괴와 복합재료 또는 금속부의 파괴 등이 나타날 수 있다. 그림에 나타난 단면의 파괴모습은 금속과 복합재료의 경계면에서 일어난 것으로 추정할 수 있다. 그러나 그림의 단면사진은 시편의 절단면을 연삭하여 촬영한 것이므로, 복합재료부의 파괴로 인한 균열은 연삭과정에서 수지에 의한 눈매움현상때문에 발견되지 않을 가능성이 존재한다. 다음 절에서는 동시경화조인트에 작용하는 응력의 분포를 구하여 조인트의 주 파괴요인을 조사하였다.

3. 동시경화조인트의 유한요소해석

동시경화조인트의 응력분포를 구하기 위하여 유한요소해석을 수행하였다. 해석에 사용한 해석프로그램은 상용 프로그램인 ANSYS 5.0을 사용하였다.⁽⁷⁾ 금속표면에 널링처리를 하지 않고 동시경화조인트를 제조하여 토크를 가하였을 경우에 대한 응력분포를 조사하였다. 해석에 사용한 요소는 4-절점 축대칭 요소(4-node axisymmetric elements)로서 원주방향으로의 응력은 균일하다고 가정하였다. 동시경화조인트의 축방향과 수직방향에 대한 복합재료의 기계적 물성치는 고전 적층판 이론을 이용하여 구하였는데, $[\pm 45]$ 의 기계적 물성

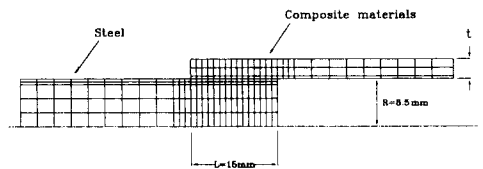


Fig. 15 Configuration of the axisymmetric finite element mesh for the shear stresses in the co-cured tubular lap joint

치는 Table 1에 나타나 있다. Fig. 15는 해석에 사용한 축대칭 요소배치형상인데, 전체 절점수는 264개이고 요소수는 216개이다. Fig. 16은 동시경화조인트에 100 N·m의 토크를 가하였을 때, 금속과 복합재료의 경계면에서 작용하는 복합재료의 전단응력 τ_{θ} 의 분포이다. 그림에서 보는 바와 같이 복합재료의 두께가 증가할수록 동시경화조인트의 오른쪽 끝단으로 응력이 집중됨을 볼 수 있다.

널링이 존재하는 동시경화조인트의 응력분포를 조사하기 위하여 널링부를 포함한 조인트의 전체 구조에 대한 응력해석은 많은 계산시간이 소요되므로 편의상 2차원 형상으로 단순화하였다. Fig. 17은 단순화된 2차원 형상의 요소배치이다. 그림과 같은 널링형상에 대한 해석은 동시경화조인트의 축방향에 수직인 임의의 단면부에 대한 응력분포와

비슷한 형태로서 동시경화조인트의 파괴모드에 대한 경향성을 고찰할 수 있다. 동시경화조인트에서 복합재료부분의 파괴가능성을 조사하기 위하여, 복합재료부에 걸리는 응력성분중 가장 큰 값을 가지는 전단 응력성분을 살펴보았다. Fig. 18은 10 MPa의 평균전단응력을 가하였을 때, 널링크기의 변화에 따른 복합재료부의 최대 전단응력 변화를 나타낸 그래프이다. 복합재료의 전단응력은 그림에 표시된 바와 같이 널링산의 바닥부에서 최대 전단응력이 발생하였다. 앞서서도 언급하였듯이 널링크기는 1인치당 널링의 갯수를 가리키므로 널링의 갯수가 많으면 널링크기가 작아진다. 그림의 결과에 따르면 널링크기가 클수록 최대 전단응력이 크게 발생하여 조인트의 강도는 감소된다고 할 수 있다. 이 결과는 Fig. 12의 실험결과와는 반대되는 현상

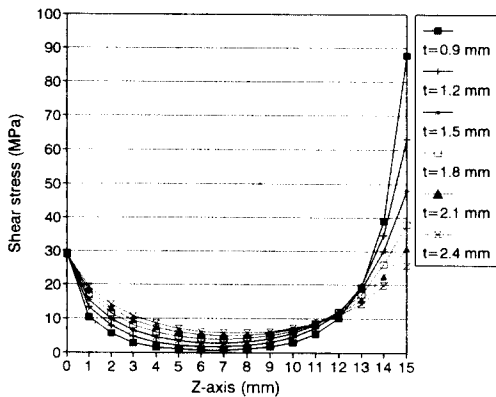


Fig. 16 Shear stress (τ_{θ}) distribution in the co-cured tubular joint (t : thickness of the composite adherend)

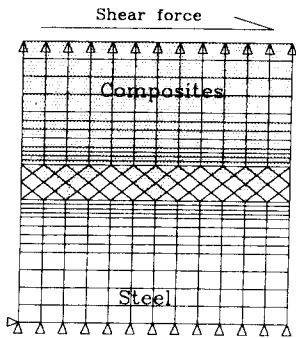


Fig. 17 Configuration of the finite element mesh used in the calculation of the fracture mode of the co-cured joint with the knurled steel adherend.

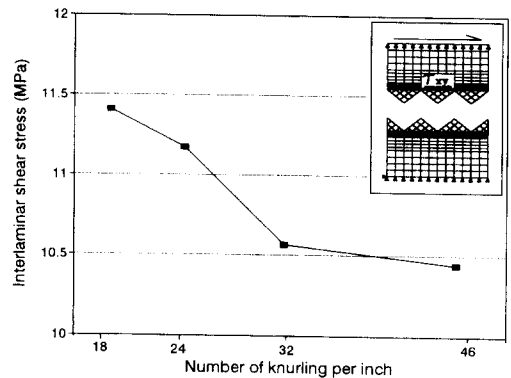


Fig. 18 Interlaminar shear stress (τ_{xy}) versus knurling size when the average applied shear stress was 10 MPa

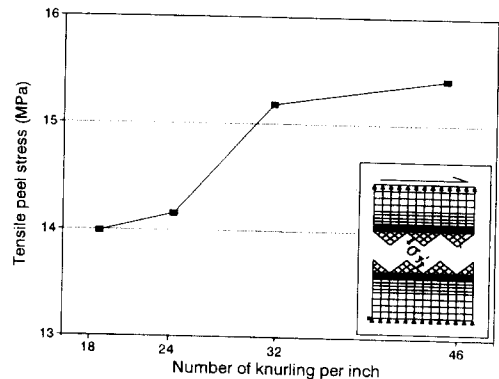


Fig. 19 Tensile peel stress (σ_y) versus knurling size when the average applied shear stress was 10MPa

으로, 동시경화조인트의 주 파괴요인은 복합재료에 발생하는 최대 전단응력으로 인한 복합재료의 파괴와는 무관함을 알 수 있다. Fig. 19는 10 MPa의 평균전단응력을 가하였을 때 널링크기의 변화에 따른 금속과 복합재료의 경계면에 작용하는 인장응력의 변화를 나타낸 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이 널링크기가 작을수록 인장응력이 크게 발생하여 조인트의 강도는 감소된다고 할 수 있다. 이 결과는 Fig. 12의 실험결과와는 일치되는 현상으로, 동시경화조인트의 주 파괴요인은 금속과 복합재료의 경계면에 작용하는 인장응력임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 동시경화법으로 원형조인트를 제작하여 널링에 의한 기계적 체결효과와 복합재료의 섬유부피분율에 대한 영향을 실험과 유한요소해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

(1) 피착제 표면에 기계적 굴곡없이 동시경화조인트를 제작할 경우에는 경화중의 잉여수지가 접착제의 역할을 하므로 복합재료로부터 수지를 제거하여서는 안된다.

(2) 사각뿔 형태의 널링을 금속 피착제 표면에 생성시켜 기계적 체결에 의한 접합을 유도한 동시경화조인트는 금속과 복합재료의 경계면에서 작용하는 인장응력이 주 파괴요인이다.

(3) 금속 피착제의 표면에 널링처리를 하여 동시

(5) Lee, D.G., Kim, K.S. and Im, Y.T., 1991, "An Experimental Study of Fatigue Strength for Adhesively Bonded Tubular Single Lap Joints," *J. Adhesion*, Vol. 35, pp. 39~53.

(6) Choi, J.H. and Lee, D.G., 1995, "Expert Cure System for the Carbon Fiber Epoxy Composite Materials," *J. Composite Materials*, Vol. 29, No. 9, pp. 1181~1200.

(7) *ANSYS User's Manual*, 1989, Swanson Analysis System, Inc., Houston, TX, U.S.A.

경화조인트를 제조할 때, 널링크기가 크면 최대토크값이 증가한다.

참고문헌

(1) Renhart, T.J., 1987, "Composite," *ASM International*, pp. 475~495.

(2) Vinson, J.R. and Sierakowski, R.L., 1987, *The Behavior of Structure Composed of Composite Materials*, Martinus Nijhoff Publishers, Chap. 8.

(3) Malick, P.K., 1987, *Fiber-Reinforced Composites*, Marcel Dekker, Inc., New York and Basel, Chap. 1, Chap. 6.

(4) Choi, J.H. and Lee, D.G., 1994, "The Torque Transmission Capabilities of the Adhesively-Bonded Tubular Single Lap Joint and the Double Lap Joint," *J. Adhesion*, Vol. 44, pp. 197~212.