

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.3.315

피로하중이 가해지는 외면접치기 동시경화조인트의 파괴에 미치는 부식의 영향

신 금 철*†

* 안산공과대학

Effects of Corrosion Behavior on Failure of Co-Cured Single Lap Joints Subjected to Cyclic Tensile Loads

Kum Cheol Shin*†

* Ansan College of Technology

(Received October 8, 2009 ; Revised January 8, 2010; Accepted January 12, 2010)

Key Words : Corrosion Fatigue(부식피로), Co-Cured Single Lap Joints(외면접치기 동시경화조인트), Interfacial Transverse Compressive Stress(경계면 전달 압축응력), Surface Roughness(표면조도), Stacking Sequence(적층 순서)

초록: 반복 인장하중이 가해지는 외면접치기 동시경화조인트는 피접합물의 경계면 가장자리에서 균열이 발생하여 전체 파손에 이르게 되는데, 그 과정 중 피접합물의 경계면에서 발생하는 부식 현상이 중요한 영향을 미치게 된다. 그러므로 본 논문에서는 외면접치기 동시경화조인트의 피로 파괴에 미치는 부식 현상의 영향을 규명하기 위하여 접합부 계면의 표면조도와 피접합물의 하나인 복합재료의 적층 각도의 변화에 따른 피로실험을 수행하였으며 유한요소해석을 통하여 얻은 경계면 응력 분포와 비교, 분석하였다.

Abstract: Co-cured single lap joints under cyclic tensile loads fail initially at the tip of the interface corner between the two adherents. The failure mechanism is complex because it is related to corrosion fatigue. Corrosion behavior at the interface affects the failure of the joints because corrosion deteriorates fatigue resistance. In this study, we clarified the cause of interfacial corrosion in co-cured single lap joints under cyclic tensile loads. The failure mechanism was also analyzed by observing the failed surfaces of specimens and the stress distribution along the interface. The surface roughness at the interface and the stacking sequence of the composite adherent were examined to investigate their effects on failure of the joint.

- 기호설명 -

1. 서론

$R = \frac{P_{\min}}{P_{\max}}$: 최대하중과 최소하중의 비

$\Delta P = P_{\max} - P_{\min}$: 최대하중과 최소하중의 차

P_m : 평균 하중

P_{\max} : 최대 하중

P_{\min} : 최소 하중

P_S : 정적 인장하중 전달능력

섬유강화 복합재료의 우수한 기계적 특성을 잘 활용하기 위해서는 기존에 많이 사용되는 금속재료와의 접합이 필수적인데, 접착제를 이용한 접합공정은 그 제조공정이 복잡하여 비용과 시간이 많이 들어 효과적이지 못하다. 그러므로 최근 접착제 접합방법에 비해 접합공정이 간단한 동시경화 접합방법에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다.^(1~5)

동시경화조인트는 두 개 이상의 피접합물을 접착하기 위해 접착제를 사용하는 접착제 접합조인트와 유사하지만 제조공정상 차이점이 있다. 접착제 접합조인트는 피접합물을 접합하기 위해 접

† Corresponding Author, classician@act.ac.kr

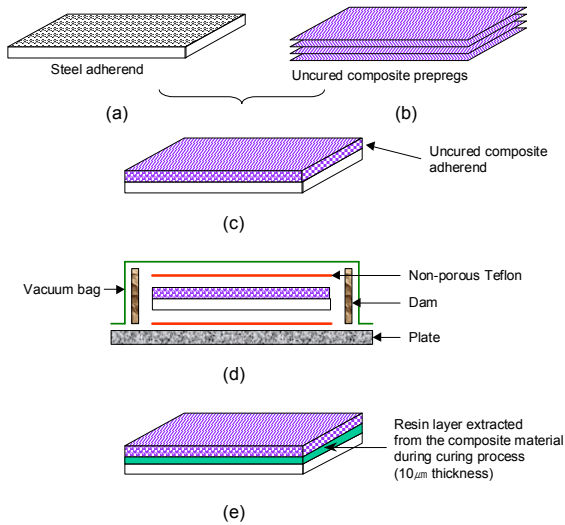


Fig. 1 Fabrication process of the co-cured joint

착제를 사용하는데 비해 동시경화조인트는 피접합물, 특히 복합재료의 경화 중 흘러나오는 여분의 수지를 접착제로 사용하여 다른 피접합물과 접합하므로 복합재료의 경화공정과 접합공정이 동시에 수행되어 제조공정이 간단해지는 장점이 있다.⁽⁶⁾

피로(Fatigue)는 반복하중이 가해지는 부품이 강도 이하의 하중에서 파괴 또는 파손되는 현상이다.⁽⁷⁾ 그 중 부식피로(Corrosion fatigue)는 부식 매개체로 인해 피로 저항이 감소하는 것으로 피로하중이 가해지는 조인트 구조물에서 중요하다.⁽⁸⁾

부식은 주변 환경과의 반응으로 인해 재료가 파손되거나 그 특성이 저하되는 것을 말하는데, 이것은 금속재료에만 해당되는 것이 아니라 햇빛과 화학작용으로 인해 그 특성이 변하는 페인트의 경우와 같이 세라믹, 플라스틱, 고무 등에도 적용되는 개념이다.⁽⁸⁾

접착제 조인트는 볼트, 너트, 리벳 등을 이용한 기계적 접합방법에 비해 접합계면에서 응력 집중현상(Stress concentration behavior)이 크지 않아 피로 특성이 우수한 것으로 알려져 있다.⁽⁹⁾ 그런데 접착제 조인트는 접합 계면에서의 표면조도와 복합재료의 적층각도의 변화에 따라 접합강도가 달라진다.⁽¹⁰⁻¹²⁾

본 연구에서는 접착제 조인트의 일종으로 반복적인 피로하중이 가해지는 복합재료와 강철재료를 이용한 외면접지기 동시경화조인트에서 발생하는 부식 현상의 원인과 그 메커니즘, 그리고 피로파괴에 미치는 원인을 알아보기 위하여 설계변수로서 경계면의 표면조도와 복합재료의 적층각도를 선택하여 연구하였다.

Table 1 Material properties of the carbon fiber-epoxy composite prepreg

Longitudinal Young's modulus E_1 (GPa)	130
Transversal Young's modulus E_2 (GPa)	8
Shear modulus G_{12} (GPa)	4.5
Poisson's ratio ν_{12}	0.28
Longitudinal CTE α_1 ($10^{-6}/^\circ\text{C}$)	-0.9
Transversal CTE α_2 ($10^{-6}/^\circ\text{C}$)	27
Ply thickness (m)	0.15×10^{-6}
Density (kg/m^3)	1560

Subscript 1 and 2 indicate longitudinal and perpendicular directions to the fiber orientation.

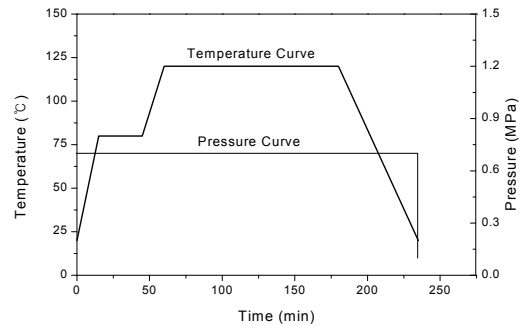


Fig. 2 Cure cycle for the manufacturing process of the co-cured joint

2. 시험편 제작 및 시험방법

외면접지기 동시경화 조인트를 제조하는 공정은 크게 네 단계로 나눌 수 있다. 첫 번째 단계는 강철재료를 제품 형상에 맞게 가공하고 접합부분을 표면처리하는 단계이고, 두 번째 단계는 복합재료를 제품 형상에 맞게 재단하여 적층한 후 미리 표면처리한 강철부분의 접합부에 가접합(Pre-bonding)하는 단계이고, 세 번째 단계는 가접합된 조인트를 온도와 압력을 조절할 수 있는 오토클레이브(Autoclave)에 넣어서 복합재료의 경화 및 두 재료 간 접합공정을 수행하는 단계이며, 네 번째 단계는 완전히 경화 및 접합된 동시경화조인트를 오토클레이브에서 꺼내어 각종 가공기구와 사포를 이용하여 후처리(Finishing process)하는 단계이다. Fig. 1 은 이러한 동시경화 제조공정을 나타낸 그림이고, Fig. 2 는 복합재료의 경화 싸이클(Cure cycle)을 나타낸 그림으로, 7 기압의 압력상태로 상온에서 80°C까지 올려서 단단히(Consolidation) 한 후에 120°C까지 올려서 경화하여 상온으로 다시 내리는 공정이다. Table 1 은 경화 싸이클에 따라

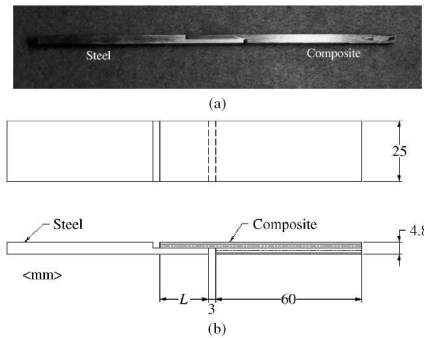


Fig. 3 A co-cured single lap joint specimen. (a) Photograph; (b) shape and dimensions

제작된 복합재료의 물성을 나타낸 표이다. 제작된 동시경화조인트의 접합 경계면을 형성하고 있는 수지층(Resin layer)의 두께는 5-20 μm 이다.

Fig. 3 은 부식피로 실험을 위하여 제작한 외면 접치기 동시경화조인트의 그림 및 치수를 나타내고 있고 L 의 길이는 20mm 이다. 동시경화조인트의 형상 및 치수에 관한 규정은 아직까지 제정되지 않았으므로 접착제 조인트의 시험편 제작으로 제시되고 있는 ASTM D3165 를 참고로 제작하였고,⁽¹³⁾ 표면조도와 복합재료의 적층각도가 부식피로에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 A-Type(표면조도 1.2 μm , 적층각도 $[0]_{32T}$), B-Type(표면조도 0.3 μm , 적층각도 $[0]_{32T}$), C-Type(표면조도 1.2 μm , 적층각도 $\{[\pm 45]_{4S}\}_S$)과 같이 세 가지 형식의 시험편을 준비하였다. 피로실험에 사용된 하중비는 $R=0.1$ 이고 가해진 주파수는 5Hz 이다. Fig. 4 는 피로실험에 사용한 기호와 정의를 나타낸 그림으로서 본 연구에서는 조인트가 인장하중 상태를 유지할 수 있도록 실험을 수행하였다. 피로실험에 사용된 하중의 용량은 정적 파괴 하중의 30-70%이며, 실험에 사용된 장비는 MTS 사에서 제작된 100kN 용량의 피로시험 장비이다.

3. 실험결과

Fig. 5 는 A-Type 시험편의 파손된 단면을 보여주는 그림으로서, 파손 단면에서 부식현상을 볼 수는 없으나 복합재료로부터 떨어져 나온 얇은 수지층으로 이루어진 백색 영역(White mark)을 볼 수 있다. 파손 단면에 백색 영역이 형성된 것으로 보아 접합상태는 양호하다는 것을 알 수 있다. 이로부터 A-Type 의 파괴 메커니즘은 수지층에서의 부분적 접착층 파괴 현상(Partial cohesive failure)으로 분류할 수 있다.

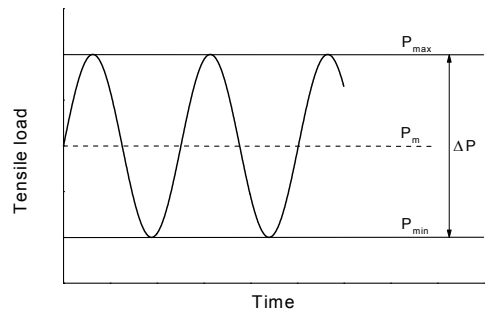


Fig. 4 Terminology for the alternating load

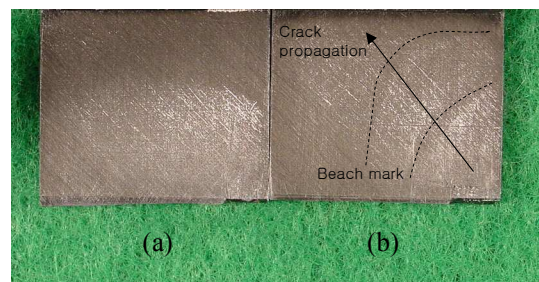


Fig. 5 Typical failed surfaces of the A-type specimen. (a) $P_{max} = 0.7P_s$; (b) $P_{max} = 0.5P_s$

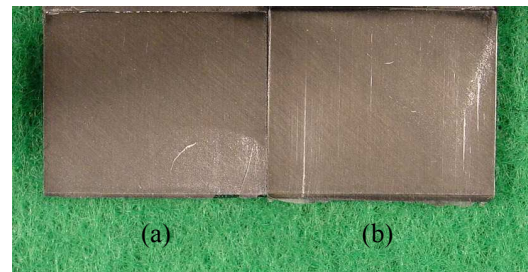


Fig. 6 Typical failed surfaces of the B-type specimen. (a) $P_{max} = 0.7P_s$; (b) $P_{max} = 0.5P_s$

$P_{max} = 0.5P_s$ 인 경우에는 가해진 하중이 작을 뿐만 아니라 피로하중으로 인해 파괴될 때까지의 수명($N_f = 323,652$)이 길기 때문에 피로 파괴에서 흔히 발생하는 비치 마크(Beach mark)가 발생한다. 비치 마크는 두 개의 인접한 균열면(Crack surfaces)에 의해 발생하는 것으로서, 균열면이 열리기도 하고 닫히기도 하고 서로 접촉하여 마찰이 발생하기도 하는 과정을 반복적으로 수행하면서 균열이 성장하고 멈추는 일련의 과정을 통하여 형성된다.⁽¹⁴⁾ $P_{max} = 0.7P_s$ 의 경우에는 가해진 피로 하중이 크고 수명($N_f = 17,851$)이 작아 비치 마크가 발생하지 않고 얇은 수지층으로 이루어진 백색 영역만 관찰할 수 있다.

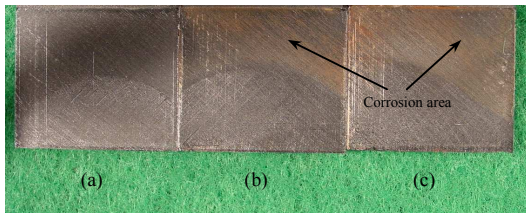


Fig. 7 Typical failed surfaces of the C-type specimen. (a) $P_{\max} = 0.7P_s$; (b) $P_{\max} = 0.6P_s$; (c) $P_{\max} = 0.5P_s$

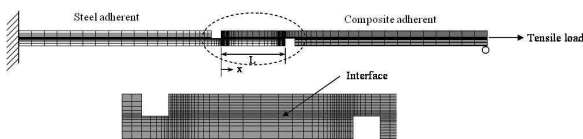


Fig. 8 Finite element meshes and boundary conditions

Fig. 6 은 B-Type 시험편의 파손된 단면을 보여주는 그림으로서, 부식현상을 보이지는 않으나 A-Type 에 비해 좁은 백색 영역의 크기를 알 수 있다. A-Type 에 비해 표면조도가 작은 B-Type 의 경우에도 기계적 결합 면적이 더 적어서 이미 발생하여 진전되는 균열에 대해 저항할 수 있는 능력이 더 낮기 때문에 발생하는 결과이다. 그러므로 피로하중이 가해지는 외면접치기 동시경화조인트의 접합 경계면에서의 표면조도는 피로강도에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. $P_{\max} = 0.5P_s$ 의 경우, 가해진 하중이 크지 않고 수명($N_f = 643,506$) 이 길지만 표면조도가 낮아 균열진전에 대한 저항능력이 떨어지므로 비치 마크가 발생하지 않는다. $P_{\max} = 0.7P_s$ 의 경우에도 가해진 하중이 클 뿐 아니라 수명($N_f = 8,071$)도 짧아서 비치 마크가 발생하지 않고 백색 영역도 좁은 영역에 걸쳐 나타난다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7 은 C-Type 시험편의 파손된 단면을 보여주는 그림으로서, 백색 영역이 나타날 뿐만 아니라 부식현상을 보여주는 적색 영역(Red mark)도 관찰할 수 있다. 이러한 부식현상은 금속재료의 피로현상에서 관찰할 수 있는 프레팅(Fretting)과 유사한 것으로, 두 가지 이상의 부품이 서로 접촉하여 반복되는 하중이 가해질 때 발생하며 접촉면 사이에서 미세한 미끄러짐 현상이 원인이 되어 접촉면의 상태 저하를 발생시킨다.⁽¹⁵⁾ 이와 같은 현상은 엔진을 비롯한 각종 자동차 부품과 볼트로 결합된 기계부품 등에서 관찰할 수 있으며 기계적 결합조인트에서 많이 발생한다.^(16,17) 이러한 현상의 원인으로는 접합부에서 발생하는 상대적 압축응력에 의한 것으로 알려져 있다. 그러나 본 연구에서

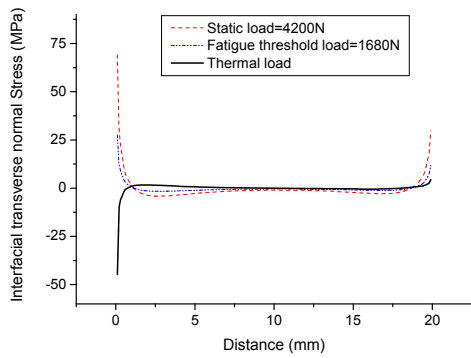
관찰하는 현상은 기계적으로 결합되어 상대운동을 하는 부품이라기 보다는 접착제에 의해 접합된 동시경화조인트에서 발생하는 부식현상이므로 부식피로(Corrosion fatigue)라고 명명하여 사용하고자 한다.

부식피로가 발생하기 위해 필요한 조건들은 다음과 같다. 첫째로는 접합부 경계면에서 압축하중 상태에 있어야 하고, 둘째로는 반복되는 피로하중 상태에 있어야 하며, 셋째로는 경계면에 가해지는 하중 또는 변형량이 상대 변형 또는 미끄러짐을 발생시키기에 충분히 커야 한다. C-Type 조인트의 경우에는 부식피로 현상이 발생하였으므로 위의 세 가지 조건을 다 만족하는데 가해지는 하중의 크기가 작을수록 부식피로 현상이 더 강하게 나타나는 것을 Fig. 7로부터 확인할 수 있다. 부식피로 파괴의 메커니즘은 다음과 같다. 조인트의 파손은 접합부 경계면의 가장자리에서 발생한 균열 첨단부(Crack tip)에서 시작하는데 피로하중이 가해짐에 따라 닫혀진 균열(Closed crack) 사이로 부식된 물질이 삼입됨으로써 균열의 첨단부가 열리게 하여 조인트의 접합강도를 떨어뜨림으로써 이후 균열의 진전을 돕는다. 다시 균열이 진전되면 부식면이 균열면을 따라 성장하는데 이러한 과정이 반복되어 결국 조인트의 파손에 이르게 된다.

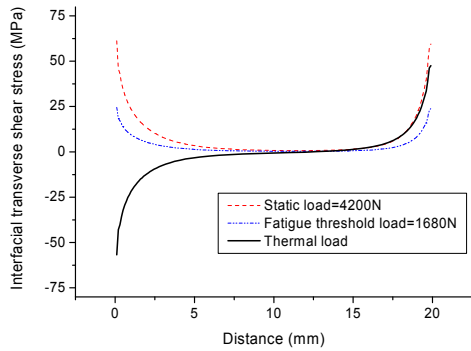
4. 유한요소해석 결과 및 파괴 메커니즘

외면접치기 동시경화조인트의 부식피로 현상을 규명하기 위하여 복합재료의 적층순서의 변화에 따라 유한요소해석을 수행하였다. 접합부의 수지층은 5-25 μm 두께로 매우 얇으므로 접착층은 고려하지 않고 강철재료와 복합재료가 직접 접촉된 것으로 가정하였다.^(18,19) 경계면에서의 응력상태는 상용 유한요소해석 프로그램 ABAQUS 를 통하여 얻었으며 3 차원 요소(Solid element)를 사용하였다. Fig. 8 은 해석에 사용한 모델과 경계조건을 나타낸다.

피로실험에서 파손이 발생한 접합부 계면과 가장자리는 응력분포를 자세히 관찰하기 위하여 요소의 크기를 매우 작게 분할하였고 경계조건은 인장 피로실험 조건에 맞게 단순지지방식으로 설정하였다. 동시경화조인트는 복합재료의 경화공정과 동시에 접합공정도 수행되기 때문에 경화공정이 끝나고 상온으로 떨어지는 동안 온도 차이(120 $^{\circ}\text{C}$ \rightarrow 20 $^{\circ}\text{C}$)에 의해 발생한 열응력의 영향도 고려하였다.



(a)

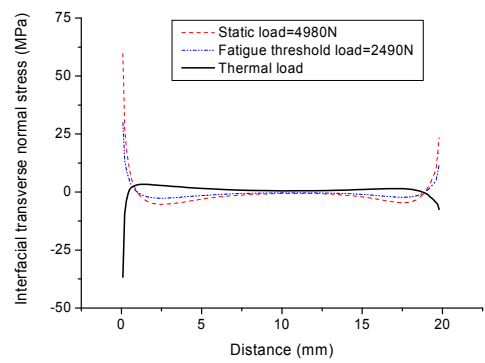


(b)

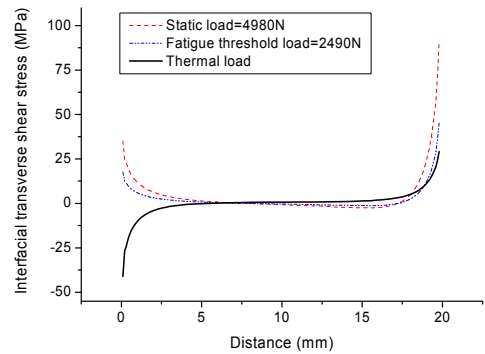
Fig. 9 Stress distribution of the co-cured single lap joint with $[0]_{32T}$ stacking sequence. (a) Interfacial transverse normal stress and (b) interfacial transverse shear stress

Fig. 9는 $[0]_{32T}$ 의 적층각도와 20mm의 접합길이로 제작된 외면접치기 동시경화조인트의 접합부 경계면에서의 응력분포를 나타낸 것이다. 그림으로부터 $x=20mm$ 지점이 가장 약한 부분이라는 것을 알 수 있는데, 그 이유는 온도 차이에 의해 발생한 열응력과 기계적으로 가해진 하중에 의해 발생한 응력의 합을 고려해 볼 때 그 위치에서 경계면 전달 수직응력이 필 응력(Peel stress) 상태이며 경계면 전달 전단응력의 크기도 가장 높게 나타나기 때문이다. 실제 경계면 전달 수직응력의 크기를 구하였는데 피로파괴 하중 기준으로 필응력의 총합은 13.5MPa 이었다. 피로하중을 가할 때 파손이 시작되는 위치도 $x=20mm$ 지점으로 예상할 수 있는데, 경계면 전달 열응력도 인장응력 상태이므로 부식피로 현상의 요구조건인 압축응력상태를 만족하지 못하므로 부식현상을 관찰할 수 없을 것으로 예상된다.

Fig. 10은 $\{[\pm 45]_{4S}\}_S$ 의 적층각도와 20mm의 접합길이로 제작된 외면접치기 동시경화조인트의



(a)



(b)

Fig. 10 Stress distribution of the co-cured single lap joint with $\{[\pm 45]_{4S}\}_S$ stacking sequence. (a) Interfacial transverse normal stress and (b) interfacial transverse shear stress

접합부 경계면에서의 응력분포를 나타낸 것이다. $[0]_{32T}$ 의 적층각도를 가지는 조인트의 응력분포와 비교해 볼 때 다른 것은, $x=20mm$ 지점에서의 경계면 전달 수직응력이 필 응력 상태가 아니라 압축응력 상태에 있다는 것이다. 그러므로 피로하중이 가해지면 경계면 전달 압축응력이 더 크게 발생하는 $x=0mm$ 의 위치에서 압축 피로하중에 의해 파손이 시작되어 전파해 갈 것이다. 실제 경계면 전달 수직응력의 총합의 크기를 구하였는데 피로파괴 하중 기준으로 -5.2MPa 이었다. 가해지는 피로하중이 작으면 작을수록 열응력과의 총합에 의한 경계면 전달 수직응력은 더 강한 압축응력 상태가 되는데, 피로하중이 가해지는 접합부에서의 압축응력은 부식피로 현상을 발생시킨다는 3장에서 관찰한 실험결과와도 일치한다. 가해지는 피로하중이 커지면 압축응력 상태에서 필 응력 상태로 바뀌게 되는데 이러한 결과도 실험결과와 일치함을 알 수 있다.

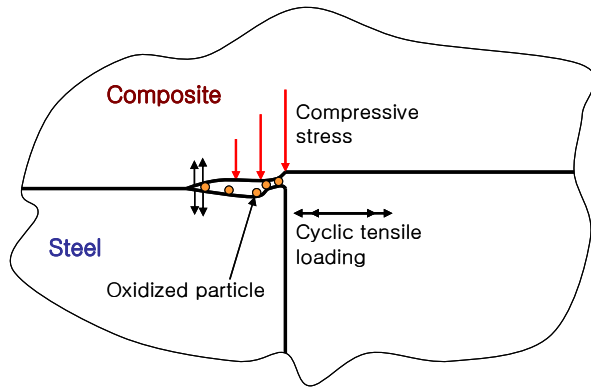


Fig. 11 Mechanism of the corrosion fatigue

Fig. 11 은 층간 전달 압축응력에 의해 발생하는 부식피로 메커니즘을 설명하는 그림으로서, 균열의 첨단부분이 경계면 전달 압축응력 상태에 있으므로 첨단부는 두 표면이 붙으려고 하지만 부식작용에 의해 발생된 입자들에 의해 열려진 상태가 되어 국부적인 필 응력(Local peel stress condition)이 발생하게 된다. 이러한 필 응력 상태는 피로하중이 가해짐에 따라 균열이 전파되는 속도를 증가시키는 역할을 하게 되므로 결국 부식작용이 없을 때보다 조인트는 더 빨리 파손에 이르게 된다.

결과적으로 반복적인 인장하중이 가해지는 외면접치기 동시경화조인트에서 조인트 강도를 증가시키기 위해서는 경계면 전달 수직응력 상태를 압축응력 상태로 유도하는 것이 유리하지만 이로 인해 발생하는 부식작용은 조인트의 피로강도를 떨어뜨리는 역할을 한다는 결과를 얻을 수 있다. 그러므로 조인트의 상태가 경계면 전달 압축응력 상태에 있는 경우에는 피로하중에 의해 발생하는 부식작용으로 인해 생기는 입자(Oxidized particle)를 제거하면 조인트 강도를 향상시킬 수 있다.

5. 결론

강철재료와 복합재료로 이루어진 외면접치기 동시경화조인트에 피로하중이 가해질 때 접합부 경계면에서 발생하는 부식현상의 메커니즘을 살펴보기 위하여 경계면의 표면조도와 복합재료의 적층순서를 설계변수로 하여 실험 및 해석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 외면접치기 동시경화조인트의 파괴 메커니즘은 접합부 수지층에서의 부분적 파괴 모드로 나타났다. 파손은 접합부 경계면 가장자리에서 시작하여 수지층을 관통하여 지나갔으며, 부식현상은 $\{[\pm 45]_{4S}\}_S$ 의 적층순서로 제작된 조인트에서만

발생하였다.

(2) 접합부 경계면에서의 응력분포를 관찰한 결과, 조인트의 파괴에 영향을 미치는 응력성분은 경계면 전달 전단응력 및 수직응력이었고, 부식현상을 발생시키는 응력 성분은 경계면 전달 압축응력이었으며 $\{[\pm 45]_{4S}\}_S$ 의 적층순서로 제작된 조인트에서 발생하였다.

(3) 실험 및 해석결과를 종합해 볼 때, 반복적인 인장하중이 가해지는 외면접치기 동시경화조인트에서 피로강도를 증가시키기 위해서는 경계면 전달 수직응력 상태를 압축응력 상태로 유도하는 것이 유리하였지만 이로 인해 발생하는 부식작용은 조인트의 피로강도를 떨어뜨리는 역할을 하였다.

참고문헌

- (1) Jones, R., Chiu, W.K. and Paul, J., 1993, "Designing for Damage Tolerant Bonded Joint," *Composite Structures*, Vol. 25, pp. 201~207.
- (2) He, S. and Rao, M.D., 1994, "Residual Stresses and Delamination Problems Induced by Co-Curing of Damped Composite Laminates," *Journal of Composite Materials*, Vol. 28, pp. 112~129.
- (3) Kim, H.S., Lee, S.J. and Lee, D.G., 1995, "Development of a Strength Model for the Co-Cured Stepped Lap Joints Under Tensile Loading," *Composite Structures*, Vol. 32, pp. 593~600.
- (4) Scott, M.L., Raju, J.A.S. and Cheung, A.K.H., 1998, "Design and Manufacturing of a Post-Buckling Co-Cured Composite Aileron," *Composites Science and Technology*, Vol. 58, pp. 199~210.
- (5) Olivier, P. and Cottu, J.P., 1998, "Optimisation of the Co-Curing of Two Different Composites with the Aim of Minimizing Residual Curing Stress Levels," *Composites Science and Technology*, Vol. 58, pp. 645~651.
- (6) Shin, K.C. and Lee, J.J., 2000, "Tensile Load Bearing Capacity of Co-Cured Double Lap Joints," *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 14, pp. 1539~1556.
- (7) Bannantine, J.A., Corner, J.J. and Handrock, J.L., *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- (8) Fontana, M.G., 1986, *Corrosion Engineering*, third ed., McGraw-Hill Book Company, New York.
- (9) Shin, K.C. and Lee, J.J., 2000, "Prediction of the Tensile Load Bearing Capacity of a Co-Cured Single Lap Joint Considering Residual Thermal Stresses," *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 14, pp. 1691~1704.
- (10) Crane, L.W., Hamermesh, C.L. and Maus, L., 1976, "Surface Treatment of Cured Epoxy Graphite Composite to Improve Adhesive Bonding," SAMPE

- Journal, Vol. 12, pp. 6~9.
- (11) Parker, B.M. and Waghorne, R.M., 1982, "Surface Treatment of Carbon Fiber-Reinforced Composites for Adhesive Bonding," *Composites*, Vol. 13, pp. 280~288.
- (12) Renton, J.W. and Vinson, J.R., 1975, "On the Behavior of Bonded Joints in Composite Material Structures," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 7, pp. 41~60.
- (13) 1995, Annual book of ASTM standards (General Products, Chemical Specialties, and End Use of Products), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, Vol. 15, pp. 205~208.
- (14) Fuchs, H.O. and Stephens, R.I., 1980, *Metal Fatigue in Engineering*, John Wiley & Sons, New York.
- (15) Waterhouse, R.B., 1981, *Fretting fatigue*, Applied Science, London.
- (16) Hills, D.A., 1994, "Mechanics of Fretting Fatigue," *Wear*, Vol. 175, pp. 107~113.
- (17) Ciavarella, M. and Demelio, G., 2001, "A Review of Analytical Aspects of Fretting Fatigue, with Extension to Damage Parameters, and Application to Dovetail Joints," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 38, pp. 1791~1811.
- (18) Choi, J.H. and Lee, D.G., 1997, "Torque Capacity of Co-Cured Tubular Lap Joints," *Journal of Composite Materials*, Vol. 31, pp. 1381~1396.
- (19) Cho, D.H. and Lee, D.G., 1998, "Manufacturing of Co-Cured Composite Aluminum Shafts with Compression During Co-Curing Operation to Reduce Residual Thermal Stresses," *Journal of Composite Materials*, Vol. 32, pp. 1221~1241.