

## 끝단형상에 따른 복합소재 단일접치기 체결부의 응력집중 저감에 관한 연구

김 정 석\*† · 황 재 연\*

\* 한국철도기술연구원 철도구조연구실

### End-Shape Effect for Stress Concentration Reduction of Composite Single-Lap Bonded Joint

Jung-Seok Kim\*† and Jae-Yeon Hwang\*

\* Railway Structure Department, Korea Railroad Research Institute

(Received November 10, 2010 ; Revised January 10, 2011 ; Accepted January 10, 2011)

**Key Words:** End Shape(끝단형상), Composite(복합재료), Stress Concentration(응력집중), Bonded Joint(접착조인트)

**초록:** 본 연구에서는 복합소재 단일접치기 조인트의 접착부재 형상 및 필렛 유무에 따른 응력집중 완화 효과를 평가하였다. 이를 위해 6가지 서로 다른 끝단부 형상에 대해 비선형 유한요소 해석을 수행하였다. 또한, 복합재 접착부재와 접착제의 다양한 강성비에 따른 6가지 모델의 최대 전단 및 수직응력의 변화를 고찰하였다. 접착부재가 순방향 테이퍼를 갖는 모델의 경우에는 가장 높은 응력값을 보여 조인트의 접합강도가 가장 취약할 것으로 예상되었다. 이에 반해, 접착부재가 역방향 테이퍼를 갖고 필렛이 존재할 경우 가장 낮은 응력값을 보였다. 접착부재와 접착제의 강성변화에 따른 최대응력 변화를 고찰한 결과 접착부재의 강성은 클수록, 접착제 강성은 낮을수록 응력집중은 완화되었다.

**Abstract:** We evaluated the stress-reduction effect for different shapes of a composite adherend with or without a spew fillet. Six different single-lap joint specimens were modeled and assessed using nonlinear finite element analysis. Moreover, we investigated the effect of the stiffness ratio of the adherend and adhesive. The single-lap joint with normal tapering had the highest stress values, and the single-lap joint with reverse tapering and a spew fillet had the lowest stress values. The composite adherends with higher stiffness had lower stress values, and the adhesives with lower stiffness had lower stress values.

### 1. 서 론

일반적으로 복합재 구조물을 체결하는 기법에는 접착 체결, 기계적 체결 및 하이브리드 체결 기법이 널리 이용되고 있다. 기계적 체결기법의 경우 분해가 용이하고, 표면처리가 불필요한 장점이 있지만 중량증가 및 응력집중을 유발하는 단점이 있다.<sup>(1-3)</sup>

이러한 기계적 체결기법은 주로 두꺼운 체결부재의 체결시 적용된다. 이에 비해 접착 체결부(bonded joint)는 유지보수의 어려움 및 표면처리에 민감한 단점이 있지만, 구멍가공이 불필요하

고 무게증가가 미미하기 때문에 주로 얇은 복합재 구조물의 접합에 많이 적용된다.<sup>(4)</sup> 최근에는 이러한 두 가지 체결기법을 동시에 적용한 하이브리드 체결기법도 다양하게 연구되고 있다. 특히, 접착 체결기법은 최근 차량 경량화 추세에 따라 얇은 복합소재 구조물 및 이종소재간의 접합에 많이 적용될 수 있을 것으로 기대된다. 접착 체결기법의 경우 접착층이 하중을 전달하는 매개체로 작용하게 된다. 이러한 접착 체결기법에는 단일접치기 조인트(single lap joint), 이중접치기 조인트(double lap joint), 버트 조인트(butt joint), 스카프 조인트(scarp joint) 등 여러가지 기법이 있다. 이들 중에서 특히 단일접치기 조인트는 체결방법이 단순하여 항공기를 비롯한 여러

† Corresponding Author, jskim@krii.re.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

분야에서 다양하게 적용되고 있다. 그러나, 단일 겹치기 조인트의 겹침부 끝단(overlap end)의 경우 기하학적 특징에 의해 이론적으로 응력이 무한대인 특이점이며, 실제 초기 균열이 발생하는 부위이다. 따라서, 이러한 응력집중부의 응력을 완화할 수 있다면 단일겹치기 조인트의 접합강도를 향상시키는데 기여할 수 있다. 또한, 이러한 접합체결부에 대한 신뢰성을 향상시키기 위해서는 접착제(adhesive) 및 접착부재(adherend) 내에서의 응력 및 변형률 분포를 정확히 예측할 수 있는 기법이 선행되어야 한다.

단일겹치기 조인트의 겹침부 끝단의 응력집중을 완화시키는 방법은 필렛 형상조정(shaping of spew fillet geometry), 접착부재와 접착제의 강성구배부(modulus grading of adherends and adhesives) 및 접착부재 끝단의 테이퍼링(tapering of adherends) 등이 있다. 필렛 형상조정과 관련된 연구로 Tsai 등<sup>(5)</sup>은 모아레 프린지(Moire fringe)기법과 유한요소해석기법을 이용하여 복합재 단일 겹치기 접착 체결부의 응력분포를 고찰하였다. 또한, 접착 체결부 끝단에 필렛이 존재할 경우 응력집중을 완화시킬 수 있음을 확인하였다. 또한, 기하학적 비선형 거동의 고려가 접착층의 응력분포 예측 정확도에 상당한 영향을 미치는 것을 확인하였다. Lang 등<sup>(6)</sup>은 끝단 필렛의 형상에 따른 단일겹치기 조인트의 응력분포에 미치는 영향을 분석하여 완만한 도입부 형상은 응력집중을 상당히 완화시킴을 확인하였다. 특히, 반경이 6mm인 아크 형상을 갖는 필렛 형상의 경우 가장 응력저감효과가 컸으며 끝단이 수직인 형상(square ended)을 갖는 조인트 대비 수직응력(peel stress)과 전단응력(shear stress)을 각각 87%와 60% 감소시켰다.

접착부재와 접착제의 강성구배부관련 연구로 Boss 등<sup>(7)</sup>은 브레이드 복합재 접착부재(braided composite adherend)를 이용하여 접착부재의 강성구배를 부과하고, 이를 통해 전단응력은 20%, 수직응력은 5% 저감됨을 확인하였다. 그리고, 강성구배와 테이퍼를 통한 기하학적 형상구배(geometrical grading of adherends)가 유사한 응력완화효과가 있음을 확인하였다.

Haghanl 등<sup>(8,9)</sup>은 스틸 빔(steel beam)에 부착된 탄소/에폭시 접착부재의 끝단에 순방향(normal)과 역방향 테이퍼(reverse tapering)를 부과하여 응력완화효과를 고찰하였다. 이 연구를 통해 필렛이

존재하는 역방향 테이퍼가 부과된 접착부재의 경우 전단응력은 42.3%, 수직응력은 76.0% 저감됨을 확인하였다.

본 연구에서는 복합소재 단일겹치기 조인트의 접착부재 형상 및 필렛 유무에 따른 응력집중 완화 효과를 평가하고, 각 형상별 접착층 내부에서의 응력분포를 고찰하였다. 이를 위해 6가지 서로 다른 끝단부 형상을 갖는 접착부재로 접착된 단일 겹치기 조인트를 모델링하고, 비선형 유한요소 해석을 수행하였다. 또한, 복합재 접착부재와 접착제의 다양한 강성비에 따른 6가지 모델의 최대 전단 및 수직응력의 변화를 고찰하였다.

## 2. 단일겹치기 조인트의 유한요소 모델링

### 2.1 형상 및 물성치

본 연구에서 복합소재 단일 겹치기 접착 체결부의 접착부재 끝단 형상에 따른 거동을 고찰하기 위해 Tsai<sup>(5)</sup>가 시험에 적용한 형상과 물성을 이용하여 유한요소 모델링을 수행하였다. 본 연구에 적용된 단일 겹치기 접착 체결부의 형상과 치수는 Fig. 1과 같다.

단일 겹치기 접착 체결부는 두께  $t=2.0\text{mm}$ , 폭  $W=25.4\text{mm}$ 이고 길이  $L=127\text{mm}$ 인 탄소/에폭시 접착 부재가  $2c=24.5\text{mm}$ 의 겹침부(overlapped section)에서 두께  $t_a=0.13\text{mm}$ 의 접착제에 의해 체결되어 있다. 해석에 적용된 탄소/에폭시 복합소재(CFRP, XAS/914C)의 물성치는 Table 1과 같고, 접착부재는  $[0/45/-45/0]_2s$ 의 적층구조를 갖는다. 해석을 위한 경계조건은 Fig. 1과 같이 단일 겹치기 접착 체결부의 한쪽 끝단은 고정지지조건을 부과하고 반대쪽 끝단에  $F=4448\text{N}$ 의 하중을 부과하였다.

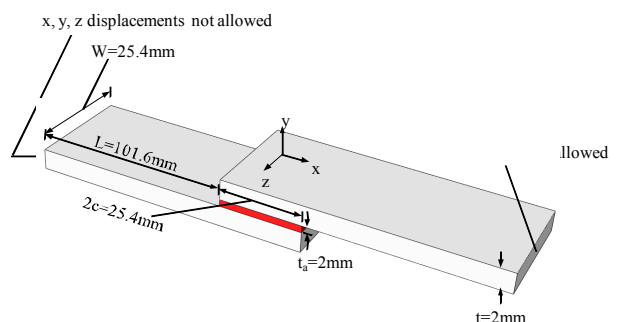
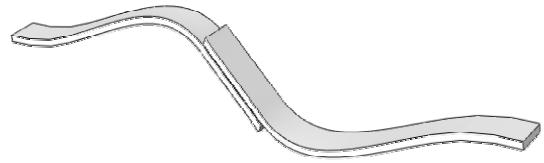


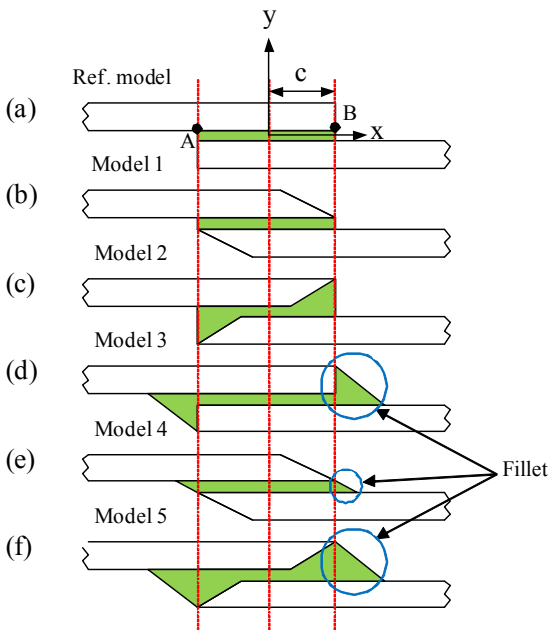
Fig. 1 Geometric dimension and boundary conditions of the single lap joint

**Table 1** Material properties of the adherend and the adhesive

Material	Type	E1 (GPa)	E2 (GPa)	G12 (GPa)	v12
CFRP adherend	XAS/914C	138	9.4	6.7	0.32
Epoxy adhesive	Hexcel Redux 308A	3.0	3.0	1.15	0.31



**Fig. 3** Deformed shape of the reference model (scale factor of 30)



**Fig. 2** Six different shapes of the composite single lap joint

Fig. 2는 본 연구에 적용된 6가지 서로 다른 끝단부 형상을 갖는 모델을 나타낸 것이다. 6가지 모델은 다음과 같다.

- . 접착부재 끝단이 직각(square end)인 모델 (ref. model)
- . 순방향 테이퍼(normal tapering)를 갖는 모델 (model1)
- . 역방향 테이퍼(reverse tapering)를 갖는 모델 (model2)
- . 기준모델에 필렛이 추가된 모델 (model 3)
- . 순방향 테이퍼에 필렛이 추가된 모델 (model 4)
- . 역방향 테이퍼에 필렛이 추가된 모델 (model 5)

본 연구에서 적용된 테이퍼와 필렛은 모두 45° 각도를 갖는다.

2.2 유한요소 모델링

본 연구에서는 접착층 중앙(centerline of the adhesive

layer) 및 접착부재와의 계면에서의 변형률 및 응력 분포를 고찰하기 위해 3D 솔리드 요소(solid element)를 이용하였다. 모델의 대칭성을 고려하여 폭방향으로 1/2모델만을 모델링하였다. 해석은 ABAQUS를 이용하였으며, 해석에 이용된 요소는 솔리드 8절점 C3D8IC3요소를 이용하였다. 유한요소 모델링시 각 방향으로 요수를 등간격으로 생성하기 않고 응력집중이 크게 발생하는 분은 더욱 조밀하도록 10배의 편의(bias)를 주어 모델링 하였다. 해석은 단일 접치기 접착 체결부의 대변형(large deflection)을 고려하기 위한 기하학적 비선형 해석(geometric nonlinear analysis)을 수행하였다.

3. 결과분석

3.1 유한요소 모델의 검증

Fig. 3은 기준 모델의 변형된 형상을 30배 확대하여 나타낸 것이다. 단일 접치기 접착 체결부는 그 형상적 특성에 의해 접침부에 편심하중(eccentric loading)이 작용하게 된다. 이러한 편심하중 경로 때문에 접착부재와 접합부에서 큰 변형이 발생하고, 접합부의 끝단부(free end of the overlap region)에서 끝단 모우멘트가 발생하여 Fig. 3과 같이 변형하게 된다.

Fig. 4는 본 연구에서 모델링된 단일 접치기 접착 체결부 모델을 검증하기 위해 기준 모델의 접착층 중립면에서의 수직(peel strain) 및 전단 변형률(shear strain) 분포를 Tsai<sup>(6)</sup>의 시험결과와 비교한 것이다.

Fig. 4(a)는 필렛이 없는 경우에 대한 결과로 수직 변형률의 경우  $x/c=0.7\sim 0.95$ 에서 시험치와 오차를 보이나 전체적으로 시험치와 잘 일치하고 있으며,  $x/c=1$ 에서 시험치와의 오차는 약 4.84%였다. 전단 변형률의 경우  $x/c=0.4$ 이후에 시험치와 오차를 보이기 시작하며  $x/c=0.75$ 에서 최대 편차를 보였다.  $x/c=0.75$ 이후에는 시험치에 접근하였으며,  $x/c=1$ 에서 시험치와의 오차는 약 13.1%로 수직 변형률에 비해 큰 오차를 보였다. Fig. 4(b)

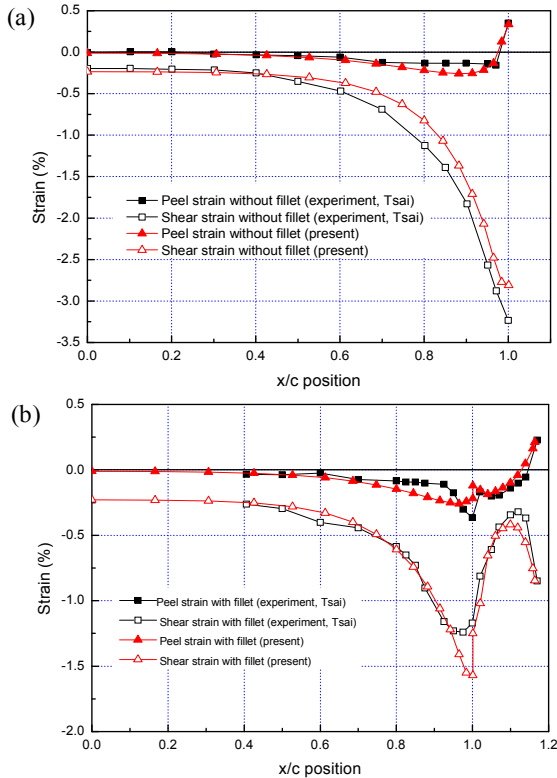


Fig. 4 Comparison of strain distributions between Tsai experiment<sup>(5)</sup> and the present (reference model)

는 필렛이 존재하는 경우로  $x/c=1 \sim x/c=1.164$  부분이 필렛부이다. 시험결과에 근거해 볼 때 필렛이 존재할 경우 필렛이 없는 모델에 비해 필렛의 끝단인  $x/c=1.164$  기준으로 수직 변형률의 경우 약 35.3%, 전단 변형률의 경우 약 73.7% 감소하였다. 또한, 수직 변형률의 경우 필렛의 시작부( $x/c=1$ )에서 음의 최대값을 가지며 전단 변형률의 경우  $x/c=1$  직전에 최대값을 보였다. 해석결과의 경우 필렛 끝단 ( $x/c=1.164$ )에서의 오차는 수직 변형률의 경우 약 6.61%, 전단 변형률의 경우 약 0.47%로 필렛이 없는 경우 대비 시험치와 잘 일치하였다. 시험과 해석치의 최대오차는 필렛의 시작점에서 수직 변형률과 전단 변형률이 모두 가장 큰 오차를 보였다. 이상의 결과를 통해 본 연구의 유효요소 해석모델은 최대 13.1%이내에서 신뢰성을 확인할 수 있었다. 따라서, 본 모델과 동일하게 나머지 모델들을 모델링하여 체결부 끝단의 형상변화에 따른 접착층 및 접착부재와 접착계면에서의 변형률 및 응력 분포를 고찰하였다.

3.2 변형률 분포

Fig. 5(a)와 (b)는 6개의 모델에서 접착제의 중

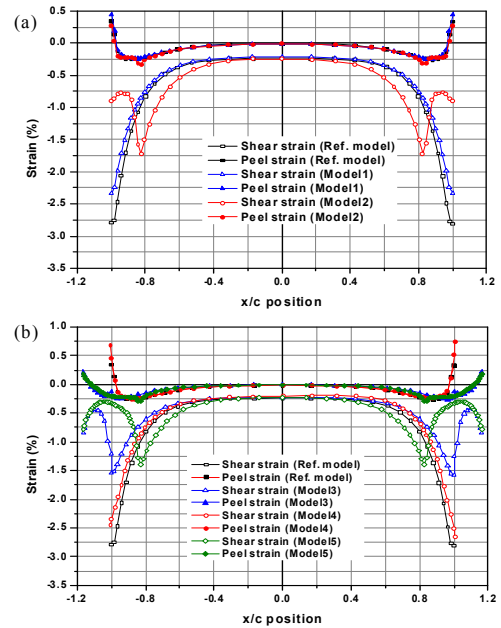


Fig. 5 Comparison of strain distribution along the center line of the adhesive between the reference model and others

양(centerline)을 따른 수직 및 전단 변형률의 분포를 나타낸 것이다. Fig. 5(a)는 접착부재의 끝단부에 순방향 테이퍼와 역방향 테이퍼가 부과되고 필렛이 존재하지 않는 모델 1번과 2번에 대한 결과를 끝단이 직각 형상을 갖는 기준모델과 비교한 것이다. 수직 변형률의 경우 순방향 테이퍼를 갖는 모델 1번의 경우 기준모델에 비해  $x/c=1$ 에서 약 31.7% 높은 값을 보였다. 이것은 끝단부 테이퍼에 의한 접착부재의 굽힘 강성 저하에 기인한 것이다. 반면, 역방향 테이퍼를 갖는 모델 2번의 경우에는 순방향 테이퍼 모델과 반대로 테이퍼에 의한 접착부재 끝단의 강성이 저하되었음에도 불구하고 수직 변형률이 약 19.2% 저감되었다. 또한, 테이퍼가 시작되는  $x/c=0.84$ 에서 최대압축 수직 변형률 값을 보였다. 전단 변형률의 경우 기준 모델에 비해 모델 1번의 경우 약 16.9%, 모델 2번의 경우 67.7% 변형률이 저감되었다. 특히, 역방향 테이퍼를 갖는 모델 2번의 경우에는 테이퍼에 의해 최대 전단 변형률의 발생 위치가 테이퍼가 시작되는  $x/c=0.84$  위치로 이동하였다. 이상의 결과를 통해 본 연구에서 적용된 복합소재 단일 겹치기 조인트의 경우 역방향 테이퍼가 체결부 끝단에서 발생하는 응력집중을 완화시켜 조인트 강도 향상에 유리할 것으로 판단된다. 이러한 경향은 Haghani 등<sup>(8,9)</sup>의 연구결과와

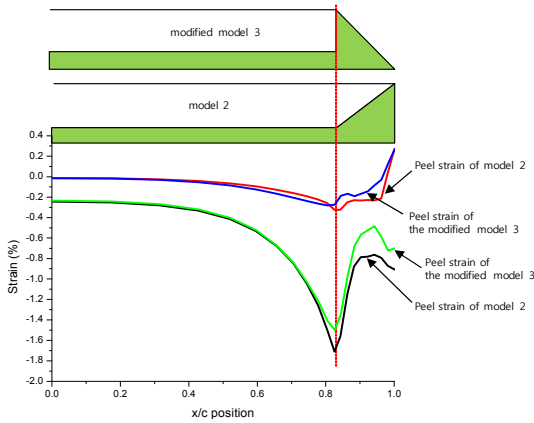


Fig. 6 Comparison of strain distribution along the center line of the adhesive between the model 2 and modification of model 3

일치하는 것이다.

Fig. 5(b)는 기준모델, 모델 1번 및 2번의 끝단에 필렛이 존재하는 모델 3~5번에 대한 결과를 기준모델과 비교한 것이다. 수직 변형률의 경우 필렛이 끝단 전체를 덮는 모델 3번과 5번의 경우 기준모델에 비해  $x/c=1$ 에서 각각 36.5%과 50.3% 감소되었다. 모델 3번의 경우 필렛이 시작되는 겹침부 끝단에서 급격한 변형률 변동이 발생하였고, 모델 5번의 경우 테이퍼가 시작되는  $x/c=0.84$  위치에서 약간의 변동이 발생하나 겹침부 끝단에서는 변동이 발생하지 않았다. 그러나, 순방향 테이퍼 모델 끝단에만 필렛이 부과된 모델 4번의 경우에는 오히려 157.5% 증가된 변형률 값을 보였다. 전단 변형률의 경우 기준 모델에 비해 모델 3~5번이 모두 감소되는 경향을 보였으며, 모델 5번이 가장 높은 75.6%의 변형률 저감을 보였다. 모델 3번과 5번의 경우 전단 변형률 최대값의 위치가 겹침부 끝단에서 필렛 시작부 (model 3)와 테이퍼 시작부 (model 5)로 이동하였다. 이상의 결과를 통해 역방향 테이퍼 모델에 필렛이 부과된 5번 모델에서 가장 큰 변형률 감소를 확인하였다.

Fig. 5(a)와 (b)의 변형률 분포를 통해 흥미로운 결과를 얻을 수 있는데, 필렛이 존재하지 않는 모델 2의 변형률 분포가 필렛이 존재하는 모델 3번과 매우 유사한 것으로 알 수 있다. Fig. 6은 모델 2번의 크기로 변경된 모델 3번과 모델 2번의 접착제 중앙부를 따른 변형률 분포를 나타낸 것이다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 두 모델의 변형률 분포가 거의 유사한 것을 확인 할 수 있다. 이상의 결과를 통해 복합소재 단일 접착기 조인

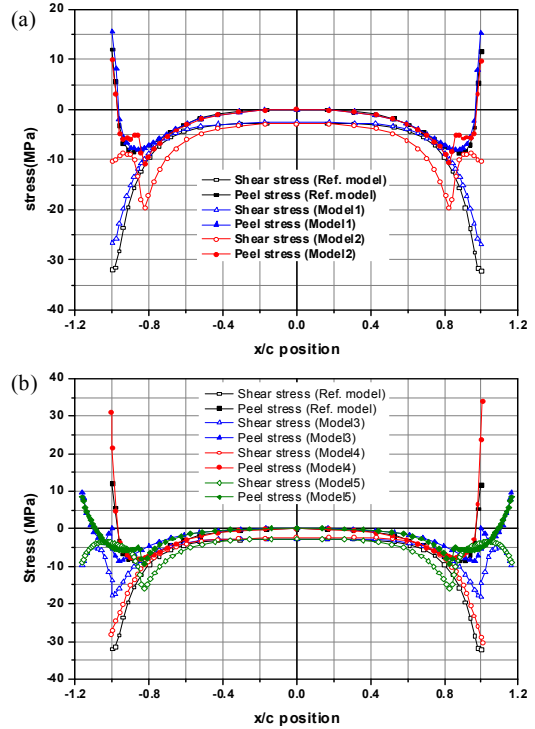


Fig. 7 Stress distribution along the center line of the adhesive; (a) models without spew fillet, (b) models with spew fillet

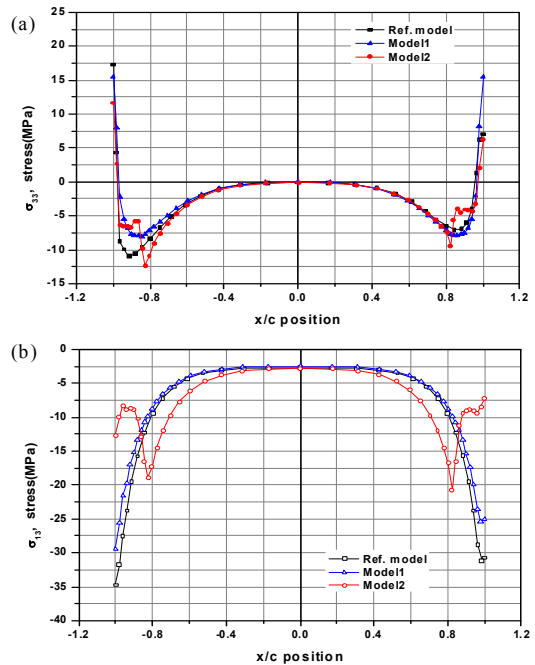


Fig. 8 Stress distribution along the interface of the adhesive of models without spew fillet

트의 경우에 접착부재에 역방향 테이퍼에 의해 형성되는 접착층의 증가는 필렛을 통한 접착층의 추가와 동일한 효과가 있음을 확인할 수 있었다.



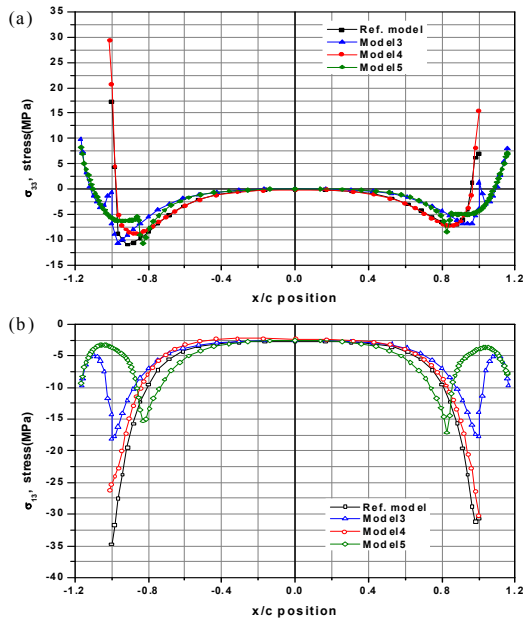


Fig. 9 Stress distribution along the interface of the adhesive of models with spew fillet

3.3 응력 분포

Fig. 7~9는 전 모델에서 접착제의 중앙부와 계면부를 따른 수직 및 전단응력의 분포를 나타낸 것이다. Fig. 7은 필렛이 존재하지 않는 모델과 존재하는 모델별로 접착제 중앙부 응력분포를 나타낸 것이다. 접착제의 중앙부를 따른 응력분포는 Fig. 5의 변형률 분포와 거의 유사한 특성을 보였다. 특히, 모델 4번의 경우 기준 모델에 비해 수직 응력이 190.7% 증가하였다.

Fig. 8은 필렛이 존재하지 않는 모델들의 계면부에서의 응력분포를 나타낸 것이다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 계면부를 따른 수직 및 전단응력의 분포는 중앙부와 과 달리 비대칭적 분포(non-symmetric distribution) 거동을 보인다. 수직응력의 경우 A점 (Fig. 2 참조)에서 응력이 B점 보다 컸다. 따라서, 초기균열은 A지점에서 발생하게 된다. 전단응력(Fig. 8(b))의 경우에는 모델 2번을 제외하고 수직응력과 유사하게 A점에서 높은 값을 보였다.

Fig. 9는 필렛이 존재하는 모든 모델들의 결과로 수직응력의 경우에는 B지점보다 A지점에서 높은 값을 보였다. A지점과 B지점의 수직 응력비는 기준 모델의 경우 A지점에서 B지점보다 약 145% 로 가장 높았고, 모델 4번이 약 88.9%로 두 번째 높은 응력 불균형 거동을 보였다. 반면, 모델 5번의 경우 약 17.5%로 가장 낮은 응력 불균

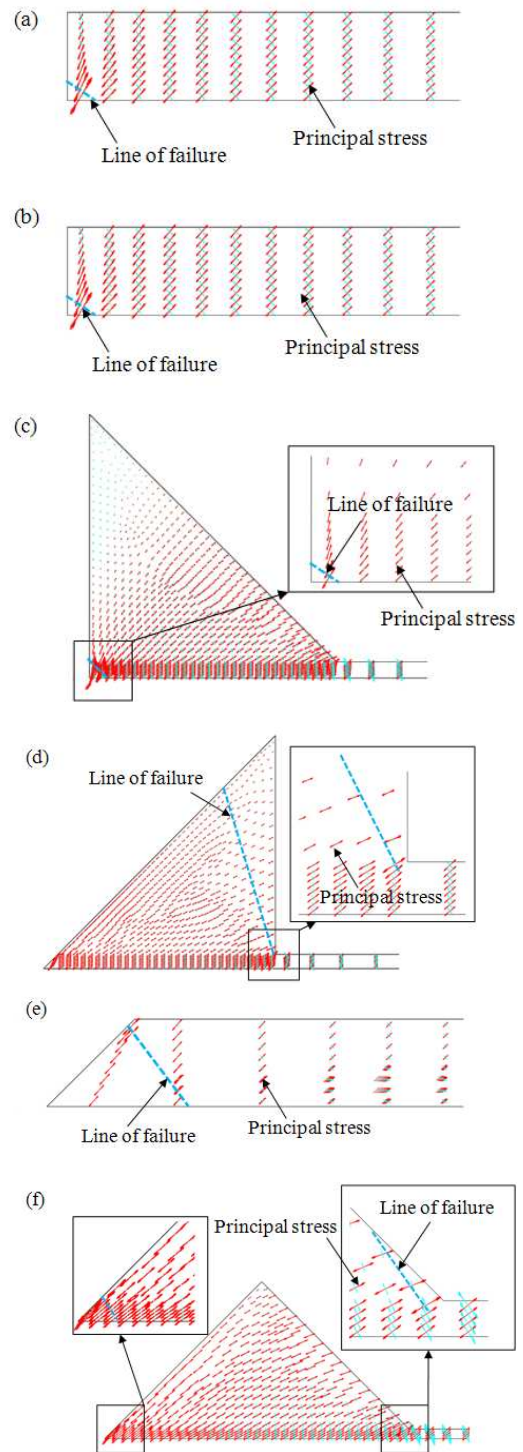


Fig. 10 Principal stress directions and expected crack propagation paths of each model

형 거동을 보였다.

Fig. 10은 각 모델들의 접착층에서의 주응력의 분포를 나타낸 것이다. 일반적으로 균열은 최대 주응력에 수직한 방향으로 진전하기 때문에 Fig. 10을 통해 균열진전 방향을 추측할 수 있다. Fig.

10(a)는 기준 모델에 대한 결과로 주응력의 최대 값은 하부 접착부재(lower adherend)와의 계면에서 발생하고, 초기 균열은 점선 방향으로 진전할 것으로 예측 되었다. 이것은 Silva 등<sup>(10)</sup>의 결과와 잘 일치한다. 또한, 모델 3번의 경우에도 초기 균열이 상부 접착부재(upper adherend)의 직각 끝단 부에서 발생하여 바깥쪽으로 진전하는 것으로 예측되었다.

3.4 최대 응력

Table 2는 접착층의 중앙부를 따른 각 모델별 최대 수직 및 전단 응력을 기준 모델과 비교한 것이다. 먼저 필렛이 존재하지 않는 모델들의 경우 모델 1번의 최대 수직응력은 기준모델에 비해 약 29.2% 증가하였으며, 모델 2번의 경우에는 18.3% 감소하였다. 필렛이 존재하는 3가지 모델에서는 모델 4번의 경우에는 수직응력이 약 182.5% 증가하였다.

이를 통해 순방향 테이퍼를 갖는 모델의 경우에는 이전 변형률 분포에서 확인한 바와 같이 조인트의 접합강도가 가장 취약할 것으로 예상된다. 필렛이 존재하는 모델 3번과 5번은 각각 19.2%와 30.0%의 수직응력 감소를 보였다. 전단 응력의 경우에는 모든 모델에서 기준 모델에 비해 응력값이 감소하는 경향을 보였으며, 특히 모델 5번이 50.3%의 최대 감소율을 보였다.

Table 2 Summary of the maximum stress values of each model along the interface

Models	Maximum values (MPa)			
	Peel stress	$(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{ref}}) \cdot 100$	shear stress	$(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{ref}}) \cdot 100$
Ref.	12.0	-	32.2	-
1	15.5	-29.2	26.8	16.8
2	9.8	18.3	19.6	39.1
3	9.7	19.2	18.0	44.1
4	33.9	-182.5	30.4	5.59
5	8.4	30.0	16.0	50.3

Table 3 Elastic modulus of the adherend and the adhesive

Elastic modulus	Values (GPa)
$E_{adherend}$	35, 138
$E_{adhesive}$	2, 3, 4, 5, 6, 7

3.5 강성 효과

본 연구에서는 6가지 모델에 대해서 접착부재와 접착제의 강성변화에 따른 최대응력의 변화를 고찰하였다. 이를 위해 Table 3과 같이 12가지(접합부재의 강성 2가지, 접착제 강성 6가지)의 서로 다른 접착부재와 접착제의 비,  $\frac{E_{adherend}}{E_{adhesive}}$ , 에 따른 해석을 수행하고 최대 수직응력 및 전단응력의 변화를 고찰하였다. 여기서 추가된 접착부재의 탄성계수 35GPa은 유리/에폭시의 탄성계수에 해당한다.

Fig. 11과 12는 접착부재와 접착제의 계면에서 얻어진 접착부재와 접착제의 강성비에 따른 최대 수직 및 전단응력을 나타낸 것이다. 각 모델에 따른 응력의 크기는 이전 해석에서 평가된 순서를 따르고 있다. 그러나, 모델 3번의 경우 접착부재 대비 접착제의 강성이 낮을 경우에는 수직응력이 모델 5번 다음으로 낮은 값을 갖지만 접착제의 강성이 증가되면 수직응력이 모델 2번 보다 증가하는 거동을 보였다. 이러한 거동은 전단응력에서도 나타났다.

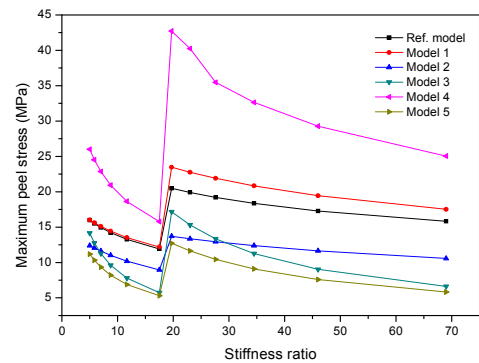


Fig. 11 Maximum peel stress variation according to different stiffness ratio of composite adherend and adhesives

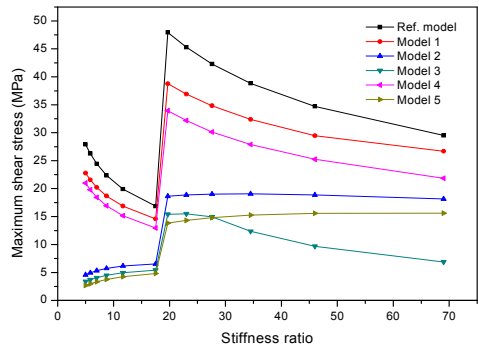


Fig. 12 Maximum shear stress variation according to different stiffness ratio of composite adherend and adhesives

강성변화의 효과를 분석한 결과, 동일한 접착부재하에서 접착제 강성이 클수록 최대 수직 및 전단응력은 급격히 증가하였고, 동일한 접착제 강성조건에서는 접착부재 강성이 낮을수록 최대 응력은 큰 값을 보였다. 대체로, 접착부재 강성 138GPa과 접착제 강성 2GPa을 갖는 모델 5번이 가장 낮은 최대 응력값을 보였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 복합소재 단일접치기 조인트의 접착부재 형상 및 필렛 유무에 따른 응력집중 완화효과를 평가하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 복합소재 단일접치기 조인트의 경우 접착부재의 역방향 테이퍼 형상이 응력집중완화에 가장 효과적인 것을 확인할 수 있었다.

(2) 또한, 역방향 테이퍼에 의해 형성되는 접착제층의 증가는 필렛을 추가한 것과 동일한 효과가 있음을 확인할 수 있었다.

(3) 접착층내의 주응력 분포고찰을 통해 초기균열의 발생위치와 진전방향을 예측한 결과 기준모델의 경우 Silva<sup>(10)</sup>의 결과와 잘 일치하였다.

(4) 접착부재와 접착제의 강성변화에 따른 최대 응력의 변화를 고찰한 결과 접착부재의 강성은 클수록, 접착제 강성은 낮을수록 응력집중은 완화되었다.

#### 참고문헌

(1) Ban, C. S., Lee, Y. H., Choi, J. H. and Kwon, J. H., 2008, "Strength Prediction of Adhesive Joints Using the Modified Damage Zone Theory," *Composite Structures*, Vol. 86, pp. 96~100.

(2) Wang, Z. Y., Wang, L., Guo, W., Deng, H., Tong, J. W. and Aymerich, F., 2009, "An Investigation on Strain/Stress Distribution Around the Overlap End of Laminated Composite

Single-Lap Joints," *Composite Structures*, Vol. 89, pp. 589~595.

- (3) Shenoy, I. V., Asgcroft, I. A., Critchlow, G. W., Crocombe, A. D. and Abdel Wahab, M., 2009, "An Investigation into the Crack Initiation and Propagation Behaviour of Bonded Single-Lap Joints Using Backface Strain," *Int. J. Adhesion & adhesives*, Vol. 29, pp. 361~371.
- (4) Kim, Y. G., Lee, S. J., Lee, Y. M. and Lee, D. G., 1996, "Failure Model for the Adhesively Bonded Tubular Single Lap Joints Under Static Tensile Loads," *J. of KSME*, Vol. 20, No. 5, pp. 1543~1551.
- (5) Tsai, M. Y. and Morton, J., 1995, "The Effect of a Spew Fillet on Adhesive Stress Distributions in Laminated Composite Single-Lap Joints," *Composite Structures*, Vol. 32, pp. 123~131.
- (6) Lang, T. P. and Mallick, P. K., 1998, "Effect of Spew Geometry on Stresses in Single Lap Adhesive Joints," *Int. J. Adhesion & adhesives*, Vol. 18, pp. 167~177.
- (7) Boss, J. N., Ganesh, V. K. and Lim, C. T., 2003, "Modulus Grading Versus Geometrical Grading of Composite Adherends in Single-lap Bonded Joints," *Composite Structures*, Vol. 62, pp. 113~121.
- (8) Haghani, R., Alemrani, M. and Kliger, R., 2010, "Stress Distribution in Adhesive Joints with Tapered Laminates-Effect of Tapering Length and Material Properties," *JCM*, Vol. 44, pp. 287~302.
- (9) Haghani, R., Alemrani, M. and Kliger, R., 2010, "Effect of Laminate Tapering on Strain Distribution in Adhesive Joints: Experimental Investigation," *JCM*, Vol. 29, pp. 972~985.
- (10) Da Silva, L. F. M. and Adams, R. D., 2007, "Techniques to Reduce the Peel Stresses in Adhesive Joints with Composites," *Int. J. Adhesion & adhesives*, Vol. 27, pp. 227~235.