

# WAVY LAP JOINT 응력 해석

김위대\* 양승희\*\*

## Stress Analysis Of Wavy Lap Joint

W.D Kim , S.H Yang

**Key Words:** adhesive joint, single-lap joint, wavy-lap joint, peel stress

### Abstract

The adhesive bonded single-lap joint is due to its intrinsic load eccentricity problem, severe peel stresses concentration occur at both end of the joint. In this paper, new lap-joint is designed to avoid the singular peel stress, and to compare the stresses of the middle adhesive layer between the single-lap joint and the wavy-lap joint. Two adherend lay-up, i.e.,  $[90/0/90/0]_2s$  and  $[0/90/0/90]_2s$  were consider in the study.

### 1. 서론

특히 복합재료로 이루어진 구조물은 약간의 예외적인 경우를 제외하고 접합부분의 강도에 의해 수명이 좌우된다. 그러므로 복합재료의 접합 부분 설계는 매우 중요하다.

접합 방법에는 기계적 접합과 접착제(Adhesive)에 의한 접합이 있다. 접착제에 의한 접합의 경우 하중을 넓은 표면에 분산시키므로 기계적 결합에 비해 응력집중이 생기지 않는다. 또한 리벳(Rivet)이나 볼트(Bolt)를 사용하는 경우 복합재료 내에 섬유(Fiber)가 끊어지는 부분이 생기므로 접합강도가 떨어진다. 그러므로 복합재료의 특성상 기계적 결합보다는 접착제에 의한 결합이 낫다고 볼 수 있다.

접착제에 의한 접합에는 single-lap조인트, double-lap조인트, stepped-lap조인트, scarf조인트등이 있다. 이중에서 single-lap조인트가 가장 간단하며 제작비용이 적다.

그러나 single-lap조인트의 경우 비대칭으로 하중이 작용하기 때문에 굽힘 하중을 받게 되어, 접합부분의 끝단에 인장력인 peel 응력을 받게 된다. 이 peel응력은 접착제와 피접합물(Adherend)의 경계면에 파괴를 발생시키는 원인이 되기 때문에 접합 강도를 저하시킨다.

double-lap조인트의 경우는 회전에 의한 전단응력에 의해 높은 peel응력이 발생된다. scarf조인트의 경우 피접합물이 복합재료인 경우 scarf를 가공하는 것이 쉽지 않으며, 끝부분의 강도(strength)가 약하기 때문에 제일 먼저 파괴가 발생한다.

구조적으로 single-lap조인트보다 double-lap조인트, stepped-lap조인트, scarf조인트가 낫지만 복잡한 형상을 가지고 있고 제작비용이 많이 든다.

그래서 본 연구에서는 single-lap조인트의 강도에 가장 큰 영향을 주는 peel응력을 감소시키는 새로운 형상의 wavy-lap 조인트를 설계하고 single-lap 조인트와 wavy-lap 조인트의 경계면에서의 응력을 비교하고자 한다.

\* 정희원, 부산대학교 항공우주공학과

\*\* 부산대학교 항공우주공학과

## 2. 접착제에 의한 조인트 형상 설계

일반적인 single-lap조인트와 wavy-lap 조인트의 응력 비교를 위해서 2차원으로 설계한 도면이 Fig.1, 2, 3에 나타나 있다.

single-lap조인트의 경우 접합 길이는  $l$ 이며, 피접합물의 두께는  $t_a$ , 접착제의 두께는  $t_g$ 이다.

접합 강도에 영향을 주는 peel응력을 개선하기 위해서 wavy-lap조인트는 다음과 같이 설계하였다. 첫번째로 Fig.2와 같이 접합부분을 3부분으로 나눈 후 일정한 각도로 기울여서 그림과 같이 설계한다. 두 번째로 접합 부분의 날카로운 부분에 모따기를 하여 원형을 만든다. 여기서 접합부분의 총 길이는 single-lap조인트와 동일해야 한다.

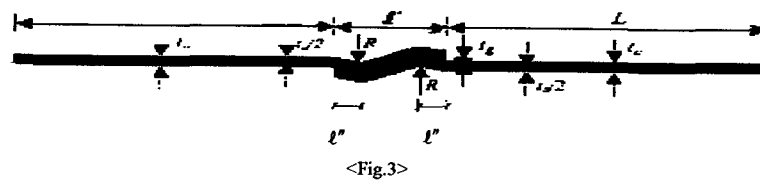
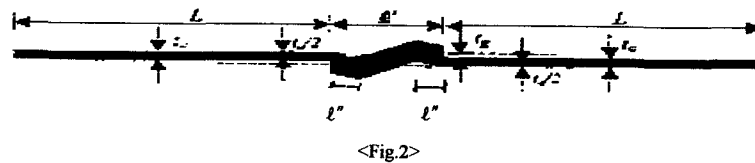
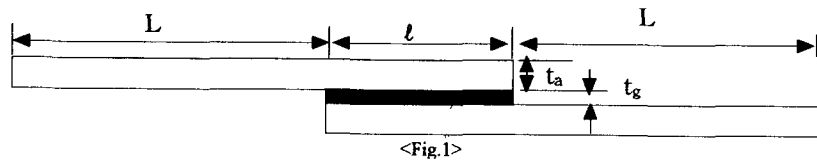
Fig.3에서 보면 완성된 wavy-lap조인트의 두 피접합물이 같은 중심선을 공유하고 있지 않다. 이것은 접착제의 두께가 피접합물에 비해 매우

작으므로 접착제를 고려하지 않고 설계하였기 때문이다. 만약 같은 중심선을 공유하도록 설계하려면 첫 번째 과정에서 접착제의 두께를 고려해서 설계하여야 할 것이다.

두 조인트의 자세한 기하학적 수치는 Table.1에 나타나 있다. 이 연구에서는 2차원으로 설계하였으며 폭은 25.4mm로 동일하다.

두 joint의 피접합물(Adherend) 모두 AS4/3501-6 graphite/epoxy로 구성되어 있고, 접착제는 FM73M이다. AS4/3501-6와 FM73M의 물성치는 Table.2에 나타나 있다.

또한 이 연구에서는 복합재료의 플라이(ply) 적층각에 따른 응력을 비교하기 위해서  $[90/0/90/0]_{2s}$ ,  $[0/90/0/90]_{2s}$ 로 피접합물이 적층되었다고 보았다.



$L$	101.6 mm
$l$	27.94 mm
$l'$	27.2309 mm
$l''$	6.899mm
$t_a$	2mm
$t_g$	0.127mm

<Table 1. 기하학적 수치 >

AS4/3501-6	$E_1=148\text{GPa}$ , $E_2=E_3=10.5\text{GPa}$ ,
	$G_{12}=G_{13}=5.61\text{Gpa}$ , $G_{23}=3.17\text{gpa}$ ,
	$\nu_{12}=\nu_{13}=0.3$ , $\nu_{23}=0.49$
FM73M	$E_g=2.2\text{GPa}$ , $\nu_g=0.31$

<Table 2. AS4/3501-6 과 FM73M의 물성치>

### 3. FEM을 이용한 응력 해석

일반적인 single-lap조인트는 인장하중이 가해질 경우에 대한 많은 수식적 연구가 진행되어 있다. 그러나 wavy-lap조인트의 경우 복잡한 형상으로 인해 수식적인 해석을 하기 힘들다.

따라서 두 조인트의 응력 해석을 위해서 유한 요소법을 적용하였다. 피접합물과 접착제는 모두 탄성체이며, 평면변형상태로 가정하였다. 2차원 해석을 위해 ANSYS를 사용하였다.

요소의 종류는 평면변형요소인 8-node plane82를 사용하였다.

경계 조건은 한쪽 끝단은 x, y 방향의 변위를 모두 구속하였으며 다른 끝단의 절점은 y방향의 변위를 구속하고, x 방향으로 같은 변위를 가지며, 분포하중을 가해주었다. single-lap조인트의 경우 분포 하중은  $70.866\text{N/mm}^2$ , wavy-lap조인트 경우  $236\text{N/mm}^2$ 이다.

피접합물은 복합재료이므로 각각의 lamina를 모델링하였다.

두 조인트의 피접합물은 접착제층 위의 적층판이 4개의 요소로 되어있어서 두께 방향으로 총 19개의 요소로 구성되어 있다. 접착제는 두께 방향으로 6개의 요소로 구성되어 있다.

wavy-lap조인트의 경우 섬유 방향을 고려해 주어야 하므로 ANSYS에서 element orientation을 이용하여 요소 좌표를 바꾸어주었다. ANSYS에서는 물성치의 방향은 요소 좌표를 기준으로 한다.

접합 응력은 접착제층의 가운데 절점에서 비교하였다. 이는 접착제층 내의 절점 응력의 평균 값이기 때문이며 경계면에서의 특이해를 가지지 않기 위해서이다.

ANSYS를 이용한 결과를 살펴보자. 우선 Fig. 7,8를 보면 접합부분 끝단에서 peel응력이 최대이며, 전단응력은 최소이다. 예상했던 결과와 일치한다. 그리고 서로 다른 적층각을 가진 경우이지만 경계면에서의 응력 분포는 거의 동일하다. 즉 적층각이 경계면에서의 응력 분포에 영향을 주지 않는다고 볼 수 있다. wavy-lap조인트의 경우도 동일하다.

Fig.9를 보면 single-lap조인트와 다른 응력 분포가 나타나있다. 접합부분 끝단에서 압축(Compressive)응력이 나타나고있다. 처음에 목적했던 대로 인장 peel응력을 감소시킨 것이다. 가운

데 부분에서도 압축응력이 있다는 것을 알 수 있다. 전단응력의 분포를 보면 역시 접합 가운데 부분에서 압축응력이 나타난다.

### 4. 결 론

lap조인트의 접합 강도(Joint Strength)를 증가시키기 위해서 새로운 형상의 wavy-lap조인트를 설계하고 single-lap조인트와 peel 응력과 전단응력을 비교하였다. 수치 해석결과로 볼 때 wavy-lap조인트가 더 나은 접합 강도를 가질 것으로 예상된다.

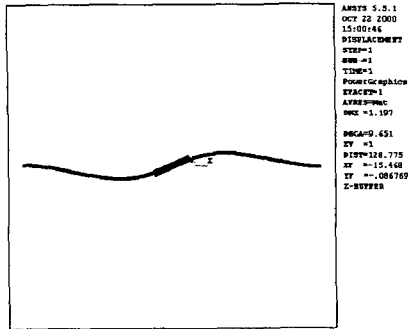
- single-lap조인트의 접합 양끝단에서 높은 인장 peel응력과 압축 전단 응력이 나타난다.
- wavy-lap조인트의 경우는 접합 양끝단에서 압축 peel 응력이 나타나며 전단응력의 경우 가운데 접합부분에서 압축 응력이 나타난다.
- 응력 분포를 비교해 보았을 때 single-lap조인트의 경우 접합부분 양끝단에서 대부분의 하중이 작용하지만 wavy-lap 조인트의 경우 접합부분 중간까지 하중이 전달되는 것을 알 수 있다.

### 후 기

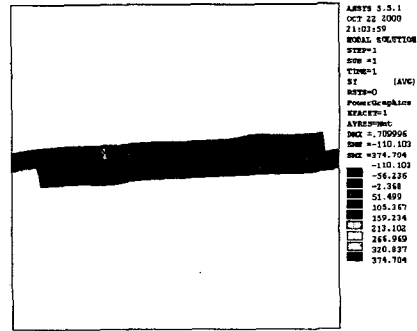
이 연구는 BK21 핵심 사업에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌

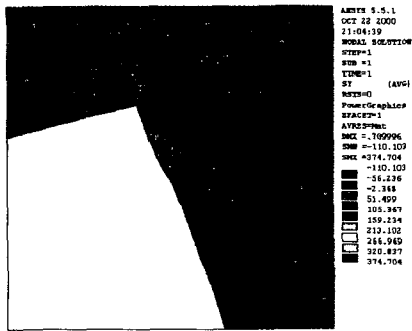
- (1) Michael C.Y. Niu, Composite Airframe Structure
- (2) Q. Zeng, C.T. Sun, A New Bonded Composite Wavy Lap Joint, AIAA-2000-1484
- (2) 이대길, 정광섭, 최진호, 복합재료 역학 및 제조 기술
- (4) C.H. Wang, L.R.F. Rose, Determination Of Triaxial Stress In Bonded Joints, Journal Adhesion and Adhesive Volume 10 number 1 1977, pp17-25
- (5) Y.Frostig, O.T.Thomen, F.Mortenser, Analysis Of Adhesive-Bonded Joints, Square-End, And Spew-Fillet - High Order Theory approach, Journal of Engineering Mechanics, November, 1999, pp 1298-1307



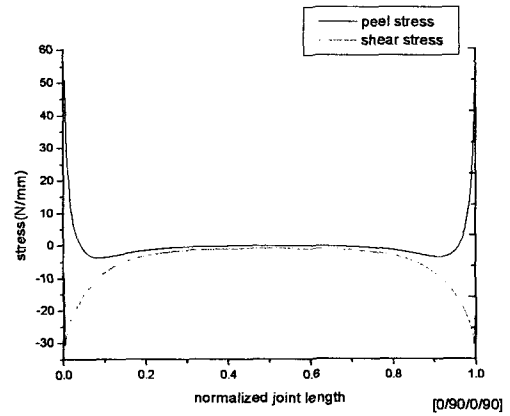
<Fig.4. Single-Lap Joint Deform Shape>



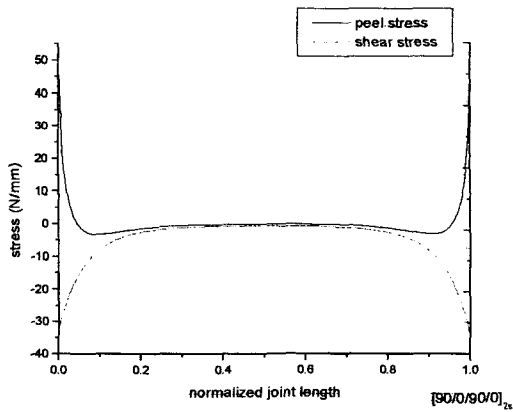
<Fig.5 Wavy-Lap Joint Peel Stress>



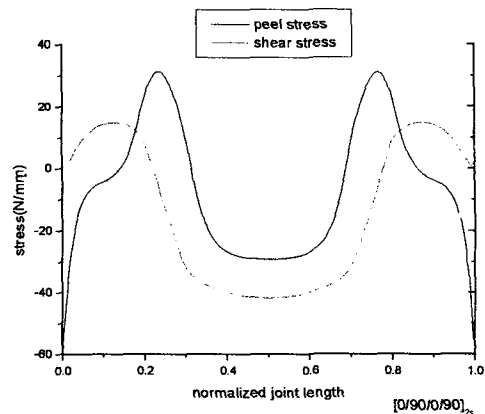
<Fig.6 Wavy-Lap Joint Peel Stress>



<Fig.7 Single-Lap Joint>



<Fig.8 Single-Lap Joint >



<Fig.9 Wavy-Lap Joint>