

# 복합재료 Wavy-Lap Joint의 3-D 상세 응력 해석

신현\* · 이창성\* · 김승조\*\* · 김위대\*\*\*

## Refined 3-D Stress Analysis of Composite Wavy-Lap Joint

Hun Shin, Chang Sung Lee, Seung Jo Kim, and Wi Dae Kim

**Key Words:** adhesive bonding, single-lap joint, wavy-lap joint, load eccentricity, interfacial peel stress, 3-D stress analysis

### Abstracts

Due to intrinsic load eccentricity, severe peel stress concentration occurs at both ends of the single-lap joint. To avoid load eccentricity as well as the singular tensile peel stress in the joint interface, composite wavy-lap joint is proposed. In this paper, refined 3-D stress analysis of wavy-lap joint is performed by finite element method using parallel multifrontal solver. Analysis results show that the singular tensile peel stress concentration is totally avoided in wavy-lap joint, and that loads are more evenly transferred over the length of the joint. Therefore, the strength of wavy-lap joint is significantly higher than that of conventional single-lap joint. And it is believed that even higher strengths can be obtained by optimizing the new design configuration.

### 1. 서 론

대부분의 구조물들은 하중을 지지하기 위해서 서로 연결된 수많은 기본 부품들로 구성되어 있는데 그 중에서 연결 부위(connections)나 조인트(joints)가 구조적으로 가장 취약한 부분이다. 따라서 복합 재료를 접합하거나 복합재료와 금속 재료를 접합하는 것은 복합재료를 다루는데 있어서 기술적으로 중요한 문제라고 할 수 있다. 복합재료를 사용함으로써 부품들의 수를 크게 줄일 수 있다 하더라도, 용접(welding)이나 납땜질(soldering)과 같이 금속 재료를 접합하는 전통적인 방법들은 섬유 보강(fiber-reinforced) 복합재료에는 분명히 부적합하다. 기계적인 조임(mechanically fastening)과 비교해서 접착제에 의한 접합(adhesive bonding)은 볼트와 리벳을 사용할 때 발생하는 국부적인 응력을 감소시킬 뿐만 아니라 구조물의 손상이 발생하지 않기 때문에 섬유 보강 복합재료를 접합하는데 있어서 유리하다. 또한 접착제(adhesive)에 의한 접합이 하중을 더욱 균등하게 전달하며, 그로 인해 피로 수명(fatigue life)을 개선시킨다는 사실이 입증되어왔다[1]. 무엇보다도, 접착제에 의한 접합은 기계적인 조임에 비해 비용이 적게 들고 2차 구조물의 경우 25%,

주 구조물의 경우 5-10%의 중량 감소 효과를 가져오기 때문에 항공 우주 산업에서 이점이 더욱 크다고 할 수 있다[9].

접착제에 의해 접합된 조인트는 다양하게 다른 조합을 이루어서 사용되고 있는데, 그 중에서도 single-lap 조인트, double-lap 조인트, scarf 조인트, 그리고 step-lap 조인트가 일반적으로 사용되고 있다. single-lap 조인트는 단순하며 생산비용이 가장 적게 든다. 그러나, single-lap 조인트 특유의 하중 편심(load eccentricity) 문제로 인해, 조인트의 양 끝단에서 극심한 필 응력(peel stress) 집중이 발생하게 된다. double-lap 조인트의 경우에는 전단 응력의 불균형으로 인해 발생하는 모멘트에 의해서 큰 필 응력이 발생한다. single-lap 조인트에 비해 필 응력이 크지 않다 하더라도, 이것은 여전히 접착할 수 있는 피접합물(adherend)의 두께를 제한하게 된다. 한편, scarf 조인트와 step-lap 조인트는 필 응력이 거의 생기지 않지만 세심한 가공과 준비가 필요하기 때문에 비용이 많이 들게 된다. 접착물을 테이퍼(taper) 처리하거나 조인트 끝단에서 접착제에 필렛(fillet)을 줌으로써 필 응력을 어느 정도 감소시킬 수는 있지만 그 효과는 그렇게 크지 않다.

조인트의 구조적인 효율성을 극대화하기 위해서는 하중 편심을 피하고 조인트의 접합부분을 따라 인장 필 응력(tensile peel stress)이 최소가 되도록 조인트를 설계해야 한다. 한편, 접착제가 상대적으로 필 응력이나 분열(cleavage) 응력에 취약하기 때문에 접착제를 전단(shear)이나 압축(compression) 상태로 유지시켜야 한

\* 서울대학교 항공우주공학과 대학원

\*\* 정희원, 서울대학교 항공우주공학과

\*\*\* 정희원, 부산대학교 항공우주공학과

다. 이런 사실들에 근거해서, 최근 새로운 wavy-lap 조인트가 제안되었다[1]. wavy-lap 조인트의 주요 설계 관점은 조인트의 접합부분에서 특이 인장 필 응력 (singular tensile peel stress)뿐만 아니라 하중 편심까지 피함으로써 조인트의 접합 강도(joint strength)를 증가시키는 것이다. C. T. Sun et al.[1]이 수행한 실험에 의하면, wavy-lap 조인트의 강도가 single-lap 조인트보다 1.5-2.2배정도 더 크게 나타났다.

C. T. Sun et al.은 ABAQUS를 이용하여 single-lap 조인트와 wavy-lap 조인트의 2-D 응력 해석을 수행하였다. 본 연구에서는, 병렬 다중 프론트 해법(parallel multifrontal solver)[8]을 사용하여 유한 요소 법(FEM)에 의해 single-lap 조인트와 wavy-lap 조인트의 3-D 상세 응력 해석을 수행하였다. 3-D 상세 응력 해석을 통해 single-lap 조인트와 wavy-lap 조인트의 응력 분포를 비교해보았다.

## 2. Single-Lap Joint와 Wavy-Lap Joint의 구조

Fig. 1과 Fig. 2는 일반적인 single-lap 조인트와 wavy-lap 조인트의 2차원 구조와 기하학적인 수치를 나타낸 것이다. 두 조인트의 접합부분의 면적을 동일하게 하기 위해서 single-lap 조인트가 wavy-lap 조인트보다 접합부분의 길이가 더 길다. 두 조인트 모두 z 방향 폭은 25.4mm이다.

조인트의 피접합물은 직교이방성(orthotropic) 물질인 AS4/3501-6 탄소/에폭시 복합재료를 사용하였고 접착제는 등방성(isotropic) 물질인 FM73M을 사용하였다. AS/43501-6과 FM73M의 물성치를 Table 1.에 정리하였다. 피접합물의 적층 순서에 따른 응력 분포를 비교하기 위해서 피접합물이  $[90/0/90/0]_{2s}$  또는  $[0/90/0/90]_{2s}$ 로 적층된 경우를 고려하였다.

## 3. FEA에 의한 3-D 상세 응력 해석

인장 하중이 가해지는 single-lap 조인트에 대해서는 Adams와 Peppiatt[5], Chen과 Cheng[6], 그리고 Toshiyuki Sawa[7] 등에 의해서 이론적인 연구가 많이 수행되어 왔으며, 최근까지도 이론적인 해석해(analytic solution)를 개선하기 위한 연구가 진행되고 있다. 그러나 wavy-lap 조인트는 복잡한 형상으로 인해 이론적인 해석해를 구하는 것이 쉽지 않다. 따라서, 앞에서 언급한 바와 같이 병렬 다중 프론트 해법을 사용하여 유한 요소 법에 의해 single-lap 조인트와 wavy-lap 조인트의 3-D 상세 응력 해석을 수행하였다.

먼저, full scale 3-D 조인트를 8절점 3차원 유한 요소(8-node solid element)를 사용하여 모델링하였다. Fig. 3은 single-lap 조인트에 대한 FEM 격자(mesh)를 나타낸 것이며, Fig. 4는 wavy-lap 조인트에 대한 FEM 격자를 나타낸 것이다. 전체 절점(node) 수는 147,900이고 전체 유한 요소(element) 수는 136,387이다. 두 조인트의 피접합물은 두께 방향으로 16개의 유한 요소를 사용하였고 접착제는 두께 방향으로 1개의 유한 요소를 사용하였다. 조인트의 접합부분의 길이

방향으로는 95개의 유한 요소를 사용하였으며 조인트 폭 방향으로는 29개의 유한 요소를 사용하였다. 경계 조건은 Fig. 1과 Fig. 2에 나타나 있는 것과 같으며 왼쪽 끝단( $x=-101.6$ )은 0.001로 변위를 구속하였다.

피접합물과 접착제가 만나는 접합부분의 경계면에서 두께 방향으로 가운데에 위치한 절점에서의 응력 분포를 비교해 보았다. Fig. 5와 Fig. 6은  $[90/0/90/0]_{2s}$  single-lap 조인트의 접합부분에서의 필 응력과 전단 응력 분포를 나타낸 그림과 그래프이며 Fig. 7과 Fig. 8은  $[0/90/0/90]_{2s}$  single-lap 조인트의 접합부분에서의 필 응력과 전단 응력 분포를 나타낸 그림과 그래프이다. 피접합물의 적층 순서가 다르더라도 조인트의 접합 부분에서의 응력 분포는 크게 차이가 나지 않는다. single-lap 조인트의 접합부분의 양 끝단에서 큰 인장 필 응력과 전단 응력이 발생한다. 이는 single-lap 조인트의 접합부분의 양 끝단에서부터 파괴가 일어나기 시작한다는 실험결과를 설명해준다[1]. single-lap 조인트의 경우 대부분의 하중이 조인트의 접합부분의 양 끝단을 통해 전달되며 접합부분의 가운데는 응력 분포가 거의 없음을 알 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10은  $[90/0/90/0]_{2s}$  wavy-lap 조인트의 접합부분에서의 필 응력과 전단 응력 분포를 나타낸 그림과 그래프이며 Fig. 11과 Fig. 12는  $[0/90/0/90]_{2s}$  wavy-lap 조인트의 접합부분에서의 필 응력과 전단 응력 분포를 나타낸 그림과 그래프이다. wavy-lap 조인트의 경우 single-lap 조인트의 접합부분의 양 끝단에서 나타났던 특이 인장 필 응력 집중이 전혀 나타나지 않으며 접합부분의 양 끝단에서 압축 필 응력이 발생한다. 접합부분의 양 끝단과 접합부분의 가운데 사이에서는 상대적으로 작은 인장 필 응력이 발생한다. 또한, single-lap 조인트와는 달리 전단 응력이 조인트의 접합부분의 가운데를 통해서도 전달된다는 것을 알 수 있다. 이로 인해, wavy-lap 조인트는 single-lap 조인트에 비해 더 큰 접합 강도를 갖게 된다.

## 4. 결론

병렬 다중 프론트 해법을 사용하여 유한 요소 법에 의해 single-lap 조인트와 wavy-lap 조인트의 3-D 상세 응력 해석을 수행하였다.

single-lap 조인트의 경우 조인트의 접합부분의 양 끝단에서 큰 인장 필 응력과 전단 응력이 발생하며 대부분의 하중이 접합부분의 양 끝단을 통해서 전달된다. 반면, wavy-lap 조인트의 경우 특이 인장 필 응력 집중이 전혀 발생하지 않는다. 조인트의 접합부분의 양 끝단에서 압축 필 응력이 발생하고 접합부분의 양 끝단과 접합부분의 가운데 사이에서는 상대적으로 작은 인장 필 응력이 발생하며, 접합부분의 가운데에서는 전단 응력이 발생한다. 즉, wavy-lap 조인트의 경우에는 응력이 접합부분의 양 끝단에 집중되는 것이 아니라 접합부분 전체에 비교적 고르게 분포하게 된다. 이로 인해 새로운 wavy-lap 조인트는 기존의 single-lap 조인트에 비해 접합 강도가 더 크며 피로에 대한 저항성도 우수하게 된다. 이로부터, 설계 최적화의 방법에 따라 조인트의 접합 강도를 상당히 향상시킬 수 있다는 사실을 확인할 수 있다.

## 후기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실 사업에 의해 지원되었습니다.

## 참고 문헌

- (1) Q. Zeng, C.T. Sun, A New Bonded Composite Wavy Lap Joint, AIAA-2000-1484
- (2) 김위대, 양승희, WAVY-LAP JOINT 응력 해석, 한국복합재료학회 2000년도 춘추학술 대회 논문집, 2000, pp. 216-219
- (3) 여해진, 복합재료 랩 조인트 구조물의 정밀 구조해석 연구, 석사학위논문, 서울대학교
- (4) Seung Jo Kim, Hea Jin Yeo, Soon Wan Chung and Woo-Suck Han, Direct Numerical Simulation of Adhesively Bonded Composite Lap Joint, Proceedings of The second Aian-Australasian Conference on Composite Materials(ACCM-2000), 18-20 August, 2000
- (5) Adams, R. D., and Wake, W. C., Structural Adhesive Joints in Engineering, Elsevier Applied Science, 1987
- (6) Chen, D., and Cheng, S., An Analysis of Adhesive-Bonded Single-Lap Joints, ASME Journal of Applied Mechanics, Vol. 50, pp.109-115, 1983
- (7) Sawa, T., and Nakano, K., A two-dimensional stress analysis of single-lap adhesive joints subjected to tensile loads, Journal of Adhesive Science Technology, Vol. 11, No. 8, pp.1039-1062, 1997
- (8) Seung Jo Kim, Chang Sung Lee and Jeong Ho Kim, Large-Scale Structural Analysis by Parallel Multifrontal Solver Through Internet PC's, 41st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit, The Westin Peachtree Plaza Atlanta, Atlanta, GA, 3-6 April, 2000
- (9) George Lubin, Handbook of composites, 1984

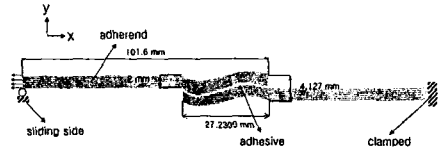


Fig. 1 Geometry and dimensions of single-lap joint

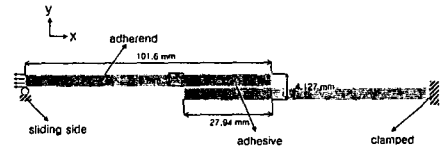


Fig. 2 Geometry and dimensions of wavy-lap joint

Material	$E_1$ (GPa)	$E_2$ (GPa)	$E_3$ (GPa)	$\nu_{12}$	$\nu_{13}$	$\nu_{23}$	$G_{12}$ (GPa)	$G_{23}$ (GPa)	$G_{31}$ (GPa)
ASA7501-6	143	10.5	10.5	0.3	0.49	0.3	5.61	3.17	5.61
FM73M	2.2	2.2	2.2	0.31	0.31	0.31	0.840	0.840	0.840

Table 1. Elastic properties of joint materials

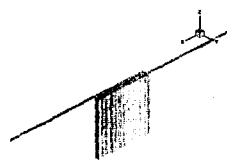
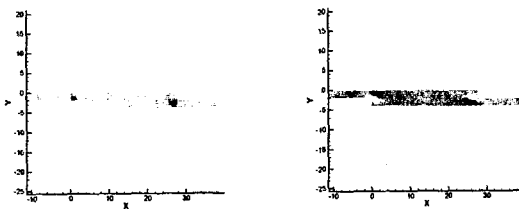


Fig. 3 FEM mesh of single-lap joint



Fig. 4 FEM mesh of wavy-lap joint



(a)  $\sigma_{yy}$  distribution of  $[90/0/90/0]_{2s}$  single-lap joint

(b)  $\sigma_{xy}$  distribution of  $[90/0/90/0]_{2s}$  single-lap joint

Fig. 5. Stress distributions of  $[90/0/90/0]_{2s}$  single-lap joint

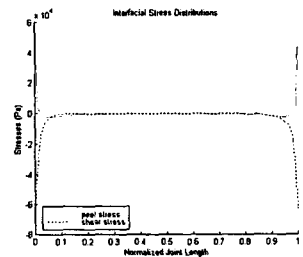
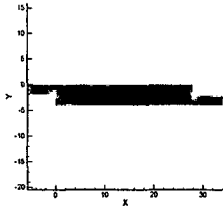
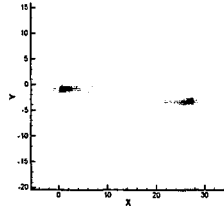


Fig. 6 Interfacial stress distributions of  $[90/0/90/0]_{2s}$  single-lap joint

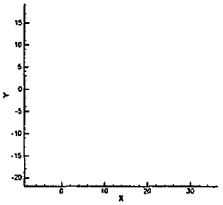


(a)  $\sigma_{yy}$  distribution of  $[0/90/0/90]_{2s}$  single-lap joint

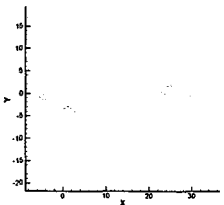


(b)  $\sigma_{xy}$  distribution of  $[0/90/0/90]_{2s}$  single-lap joint

Fig. 7. Stress distributions of  $[0/90/0/90]_{2s}$  single-lap joint

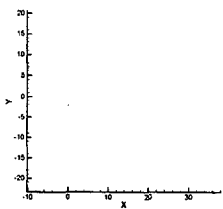


(a)  $\sigma_{yy}$  distribution of  $[90/0/90/0]_{2s}$  wavy-lap joint

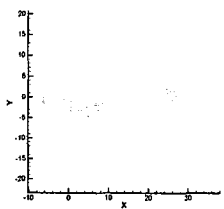


(b)  $\sigma_{xy}$  distribution of  $[90/0/90/0]_{2s}$  wavy-lap joint

Fig. 9. Stress distributions of  $[90/0/90/0]_{2s}$  wavy-lap joint



(a)  $\sigma_{yy}$  distribution of  $[0/90/0/90]_{2s}$  wavy-lap joint



(b)  $\sigma_{xy}$  distribution of  $[0/90/0/90]_{2s}$  wavy-lap joint

Fig. 11. Stress distributions of  $[0/90/0/90]_{2s}$  wavy-lap joint

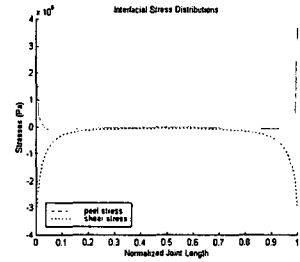


Fig. 8 Interfacial stress distributions of  $[0/90/0/90]_{2s}$  single-lap joint

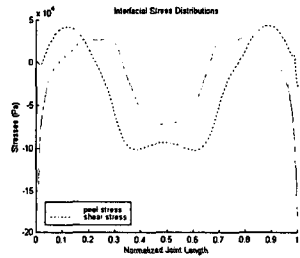


Fig. 10 Interfacial stress distributions of  $[90/0/90/0]_{2s}$  wavy-lap joint

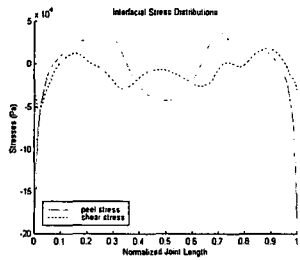


Fig. 12 Interfacial stress distributions of  $[0/90/0/90]_{2s}$  wavy-lap joint