

特輯

고성능 슈퍼컴퓨팅 기술을 이용한 복합재료 구조물의 상세 구조해석

서울대학교 항공우주 구조연구실 : 국가지정 연구실
김승조*

ABSTRACT

서울대학교 항공우주 구조연구실은 1999년 국가지정연구실로 지정된 이후 인터넷 슈퍼컴퓨팅 기술을 이용하여 초대형/고정밀 구조해석 기술을 개발하고 있다. 개발된 기술의 응용 분야로서 항공 우주 구조물에 많이 사용되는 복합재료 구조물에 대한 구조해석을 수행하였다.

1. 서론

서울대학교 기계항공공학부 항공우주 구조연구실(<http://aeroguy.snu.ac.kr>)은 지난 1999년 국가지정연구실로 지정되었다. 본 연구실의 연구분야는 '초대형/고정밀 유한요소 구조해석 기법'에 관한 연구로서 인터넷 슈퍼 컴퓨팅 개념을 이용하여 구조 해석에 필수적인 선형정적해석 뿐만 아니라 비선형 구조해석 그리고 동적해석 기법등을 개발하고 최종적으로 1억 자유도의 구조해석을 목표로 하고 있다.

개발된 다양한 구조해석 기법을 바탕으로 인터넷 슈퍼컴퓨팅 기법의 응용분야로서 복합재료 구조물에 대한 연구를 수행하고 있다. 복합재료 구조물의 설계과정에서는 직교이방성 특성을 활용하기 위해 종래의 형상 설계에 덧붙여 적층 형태에 대한 설계를 추가하는 등 이방성 재료보다 많은 수치해석 부담이 들게 된다. 특히 복합재료의 일반적인 기계적 특성은 섬유와 기지의 개별 영향을 고려하기 보다는 homogenization을 통해 거시적인 관점에서 표현되게 되는데, 복합재료는 본질적으로 이종(異種)의 재료인 섬유와 기지로 구성되어 있으므로 각 구성요소를 개별적으로 다루었을 때 많은 현상들을 포착할 수 있다. 또한 적층형 복합재료 뿐만 아니라, 직물 복합재료의 경우 쓰임새가 상당히 많은 반면 수치해석 적용시 정밀 수치 모델이 필요하므로 많은 자유도를 가진 수치계산이 필요하다.

본 논문에서는 국가지정연구실로서 본 연구실에서 그동안 진행되어 온 복합재료 관련 연구 내용을 간략히 소개한다. 복합재료 구조물에 대해 수행한 대표적인 연구로는

가상 수치실험에 의한 직교 직물 복합재료의 물성치 예측 [1], 복합재료 구조물의 접착 체결부위의 특성 해석 및 설계 [2], 섬유와 기지에 대한 상세 모델링을 통해 복합재료 내부의 거동을 살펴보는 복합재료 DNS(Direct Numerical Simulation) [3], 복합재료 구조물의 손상 탐지 기법 개발 [4] 등이 있다. 그리고 교육적인 목적을 가진 연구로서 복합재료 적층판의 진동 모드 가시화에 관한 연구 [5]를 들 수 있다.

2. 직교직물 복합재료의 가상 수치실험

두꺼운 금속 재료를 대체하여 최근에 항공기 구조물에 이용되고 있는 3D 직교 이방성 직물 복합재료 (3D orthogonal woven composite)는 면내 하중뿐만 아니라 두께 방향 하중까지 전달하는 역할을 한다. 이때 3D 직교 이방성 직물 복합재료의 기계적 물성에 대한 실험적 연구는 비용이 많이 들고 모든 물성치를 구할 수 없기 때문에 단위 구조(unit cell)을 이용한 유한요소 모델링에 의한 해석이 많이 수행되고 있다 [6]. 그러나 이러한 단위 구조 접근 방식은 복잡한 하중 조건 하에서의 완전한 응력 해석을 수행하는 것이 불가능하다. 이런 접근 방식은 응력과 변형률에 대해 몇몇 가정이 도입되고, 기하학적 불규칙성이 물성에 미치는 영향이 충분히 고려되지 않을 수 있다.

본 연구에서는 탄성학적인 물성치를 예측하기 위해 3D 직교 이방성 직물 복합재료의 가상 수치 실험을 수행하였

* 서울대학교 기계항공공학부, 교신저자(E-mail: sjkim@snu.ac.kr)

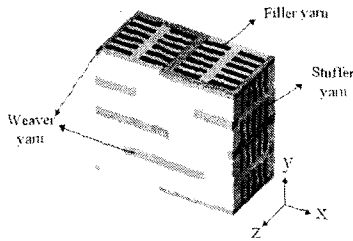


Fig. 1 단위 구조의 유한요소 모델.

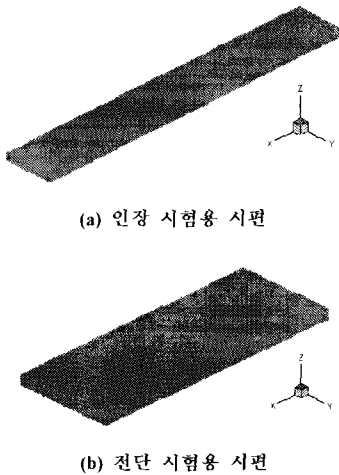


Fig. 2 가상 수치실험용 시편의 유한요소 모델.

다. Fig. 1과 같이 warp yarn, filler yarn, stuffer yarn 그리고 resin부분을 포함하는 단위구조를 구성하였다. 하나의 단위 구조의 절점 수는 13,200이고 요소 수는 11,520이다. 단위 구조를 x,y,z 방향으로 반복적으로 배치하여 가상 수치 실험용 시편을 구성하였다. 유한 요소 해석 코드를 이용하여 가상 수치 실험을 수행하기 위해서 병렬 다중 프린트 해법 [7]을 이용하고 계산된 탄성학적 물성치를 기존의 실험결과 등과 비교하였다.

Fig. 2에 가상 수치 실험용 시편을 나타내었다. 인장 시험에는 108(27×4×1)개의 단위 구조를 사용하였고 전단 시험에는 48(12×4×1)개의 단위구조를 사용하였으며, 전체 자유도 개수는 각각 2,671,534개와 1,789,488개이다. 가상 수치실험에 의해 예측된 기계적 물성치를 기존의 결과[8]와 비교하여 Table 1에 정리하였다. 기존의 단위 구조 모델링 접근 방식을 사용하여 예측한 탄성 계수는 실험 결과에 비

Table 1 직교직물 복합재료의 물성치 예측 결과

	E_1 (Gpa)	E_2 (Gpa)	ν_{12}
실험결과[8]	40.97	47.30	0.034
FEM[8]	52.76	60.25	0.035
Present	40.63	49.00	0.037

해 다소 크게 계산되고 있는 반면, 가상 수치실험의 경우 E_1 , E_2 , ν_{12} 에 대해 실험 결과와의 오차가 각각 0.9%, 3.5%, 5.4%로 상당히 근접한 결과를 얻었다.

3. Wavy-Lap Joint의 상세 응력해석

복합재료 구조물을 접합하거나 복합재료와 금속 재료를 접하는 것은 복합재료를 다루는데 있어서 기술적으로 중요한 문제라고 할 수 있다. 복합재료의 접합 방법 중 접착제에 의한 접합은 기계적인 조임에 비해 국부적 응력 집중을 감소시킬 뿐만 아니라 접합을 위해 구멍을 뚫는 등의 손상이 발생하지 않기 때문에 섬유강화 복합재료를 접합하는데 효과적으로 사용되고 있다. 일반적으로 single-lap 조인트, double-lap 조인트, scarf 조인트 그리고 step-lap 조인트가 사용되고 있으며, 특히 최근 새로운 wavy-lap 조인트가 제안되었다[9]. wavy-lap 조인트의 주요 설계 관점은 조인트의 접합부분에서 다른 접합 조인트에서 관찰되는 특이 인장 필 응력(singular tensile peel stress)뿐만 아니라 하중편심

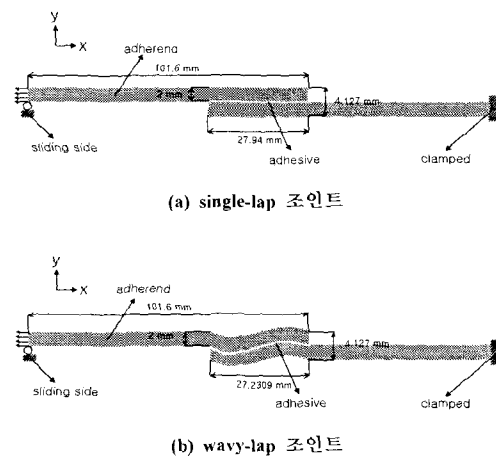


Fig. 3 조인트의 2차원적 구조.

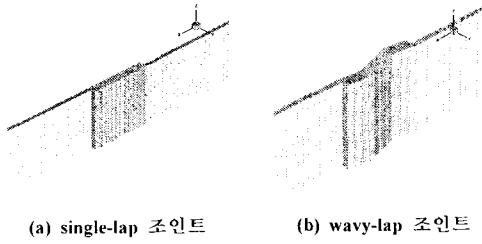
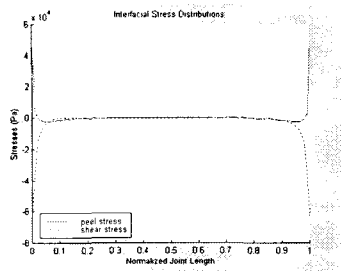
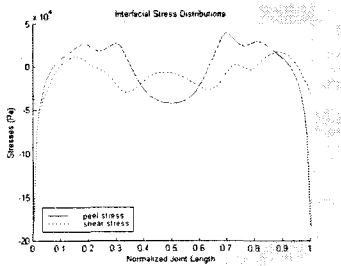


Fig. 4 유한요소 모델.



(a) single-lap 조인트의 응력 분포



(b) wavy-lap 조인트의 응력 분포

Fig. 5 조인트 접합부에서의 응력 분포.

(load eccentricity)까지 피함으로써 조인트의 접합 강도를 증가시키는 것이다. 본 연구에서는 3D 상세 응력 해석을 통해 single-lap 조인트와 wavy-lap 조인트의 응력 분포를 비교하였다.

Fig. 3과 같은 2차원적 구조를 가지며 z 방향 폭이 25.4mm인 single-lap 조인트와 wavy-lap 조인트를 8절점 3차원 유한요소를 사용하여 모델링하였다. Fig. 4에 수치해석에 사용된 유한요소모델을 나타내었다. Fig. 5에 접합 부분에서의 응력 분포를 나타내었다. Fig. 5(a)에서 single-lap 조인트의 접합부분의 양 끝단에서 큰 인장 필 응력이 관찰되

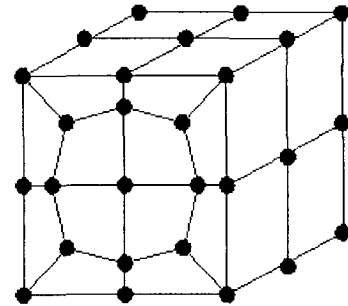
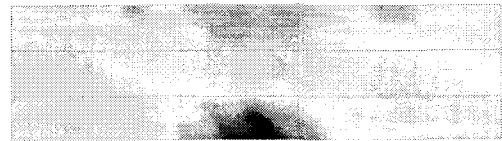
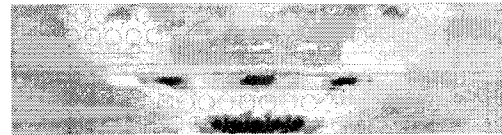


Fig. 6 DNS 해석 모델에서의 단위 셀 구조.



(a) 균일화된 모델의 응력 분포



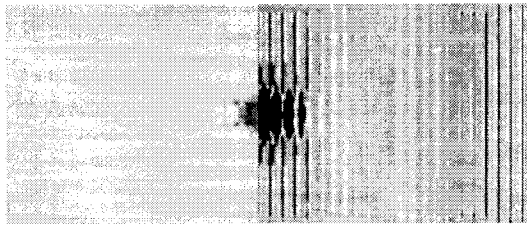
(b) DNS 모델의 응력 분포

Fig. 7 저속 충격시의 두께방향 응력 분포.

며 이로 인해 양 끝단에서부터 파괴가 시작됨을 예상할 수 있다. 이와 반대로 Fig. 5(b)에서 보는 바와 같이 wavy-lap 조인트는 양 끝단에서 압축 필 응력이 발생하며 특히, 접합부분의 가운데에서도 single-lap 조인트와는 달리 압축 필 응력이 발생한다. 이로 인해 wavy-lap 조인트는 single-lap 조인트에 비해 더 큰 접합 강도를 갖게 된다.

4. 적층 복합재료 평판의 저속충격 거동의 미소기계학적 해석

적층 복합재료 평판에 대한 저속충격 현상은 기지재료의 균열이나 층간분리 현상의 주요 원인이 되고 있으며 적층각의 배향이나 두께의 변화, 충격체의 질량 및 속도에 따라 그 현상은 다양한 변화를 보이는 것으로 알려져 있다 [10]. 저속 충격 현상에 대한 대부분의 수치해석적인 연구



(a) 균질화된 모델 (b) DNS 모델

Fig. 8 지속 충격시 면내 응력 분포.

는 복합재료의 적층이론에 기반하여 물성치를 균질화(homogenization)시켜 계산하기 때문에 복합재료 평판의 거시적인 거동에 국한되고 있고 이에 기반하여 손상 예측이 이루어지고 있기 때문에 정확한 손상예측이 쉽지 않다. 이는 지속충격에 따른 복합재료의 손상이 매우 국부적인 영역에서 나타나고 따라서 복합재료의 섬유와 기지를 직접적으로 고려하지 않고 균질화된 물성치로 대체하여 계산하는 것에 기인하는 것으로 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 균질화된 재료로서의 복합재료를 다루는 것이 아니라 직접 섬유와 기지를 따로 분리하여 고려함으로써 지속충격에 대한 섬유와 기지사이의 상호 영향을 고려할 수 있도록 하였으며 이를 복합재료의 직접 수치모사(Direct Numerical Simulation, DNS)[11]라 명명하였다.

Fig. 6은 이러한 복합재료의 DNS 해석을 단위 셀 유한요소 모델을 보여주고 있다. 전체 모델은 단위 셀 모델을 쌓아서 구성하게 된다. Fig. 7에서 보이는 것처럼 DNS 모델과 균질화된 물성치를 갖는 경우의 지속충격 거동의 차이는 섬유와 기지가 받는 거동을 분명히 구별하여 보여주고 있다. 이는 복합재료 특성상 섬유와 기지의 강성도 차이가 매우 크기 때문에 지속충격과 같은 국부적으로 발생하는 현상에는 미소기계학적인 접근이 필수적임을 보여준다. 지속 충격시의 DNS 모델을 이용한 응력 분포 해석 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

5. 타격음을 이용한 NDE 기법의 개발

속련된 검사자는 구조물을 타격한 뒤 발생하는 타격음을 들어봄으로써 구조물 내부의 손상을 감지할 수 있다. 이러한 방법은 종래의 NDE 기법에 비해 간편하나 검사결과가 검사자의 주관적인 경험에 의존한다. 본 연구에서는 이러한 검사자의 경험에 의한 손상판단 과정을 객관화할

수 있는 기법으로서 Tapping Sound Analysis(TSA)를 개발하고 있다. TSA는 실제 검사 대상 구조물에 대한 타격음 데이터와 고정밀 수치해석으로부터 계산된 건강한 구조물의 타격음 데이터를 비교함으로써 구조물의 손상여부를 판정하는 방법이다. 타격음 데이터가 확보되면 타격음 데이터로부터 특징 데이터를 추출한다. 특히 건강한 구조물의 타격음 특징 데이터를 성문(聲紋: Soundprint)으로 정의한다 [4].

구조물의 타격음을 계산하기 위한 과정은 구조물의 타격과정과 타격음의 생성과정으로 나눌 수 있으며 각각 동적접촉특성을 고려한 유한요소구조해석과 경계요소법에 의한 진동표면의 방사음향해석과정으로 모사하였다. 타격음으로부터 특징 데이터를 추출하는 방법으로 wavelet packet transform [12]에 기반을 둔 특성추출법을 제시하였다.

TSA의 타당성을 조사하기 위한 실험을 수행하였다. 15×15cm USN125BX [0_s/90_s]_s 복합재료 적층판을 제작하였다. 본 연구에서 복합재료 적층판의 내부 손상형태로 초기 층간분리를 가정하였으며, 실험 시편 제작시, 캡톤테이프를 이용하여 제작된 삽입물을 삽입하여 층간분리를 구현하였다. Fig. 9에 전체 실험 장치를 나타내었다. Fig. 10과 같이 다섯 군데의 측정점에 대한 비교 실험을 수행하였다. Fig. 11에 제 1 측정점에서 측정된 타격음을 비교하여 도시하였다. 측정된 타격음 데이터로부터 특성 데이터를 추출한 뒤 특성데이터를 이용하여 손상의 유무를 판단한다. 건강한 구조물의 특성데이터와 손상이 의심되는 구조물의 특성데이터의 내적을 특성지수(feature index)로 정의하였다. 손상이 없을 경우 특성지수는 1에 가까운 값을 나타내고 손상이 있을 경우 1보다 작은 값을 나타내게 된다. Table 2에 다섯개의 측정점에 대한 특성지수를 표시하였다. Table 2에서 보듯이 특성지수로부터 복합재료 적층판 내부의 층간 분리 손상의 유무를 판단할 수 있다.

Table 2 손상 예측 결과

test point	손상지수
1	0.7113
2	0.8503
3	0.8419
4	0.9684
5	0.9633

6. 복합재료 평판의 진동모드 가시화

일반적으로 구조물의 진동에 관한 연구는 구조물의 고유진동수나 고유모드등에 대한 이해를 바탕으로 한다. 이와 같은 진동 특성에 대한 이해는 이론적 바탕도 중요하지만, 현상의 가시화를 통한 방법 또한 필요하다.

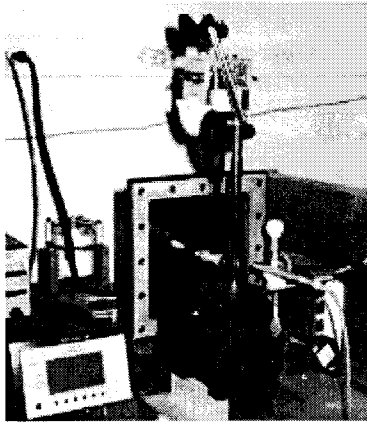


Fig. 9 Tapping Sound Analysis 실험 장치.

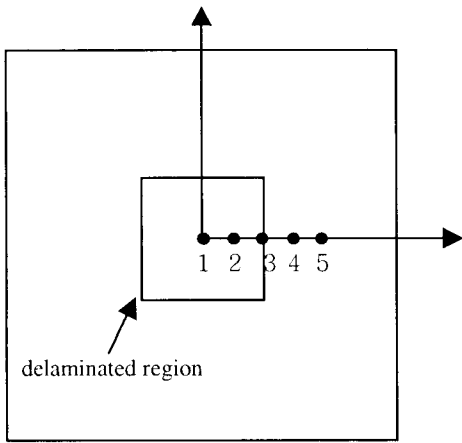


Fig. 10 타격음 측정을 위한 측정점.

본 연구에서는 진동현상의 이해를 돕기 위한 교육적 목적을 가지고서 진동 현상을 가시화 할 수 있는 과학완구 (scientific toy)를 제작하고, 이에 대한 실험을 수행하였다. 실험 결과의 이론적 바탕을 위해 수치해석을 수행하여 그 결과를 실험 결과와 비교하였다.

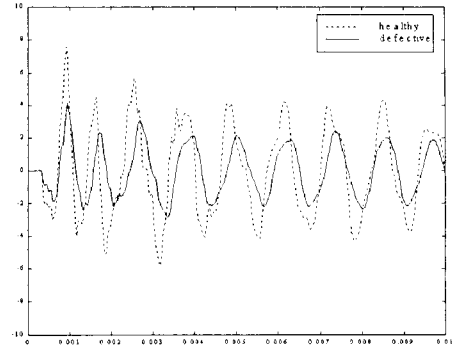


Fig. 11 중앙점에서의 타격음의 비교.

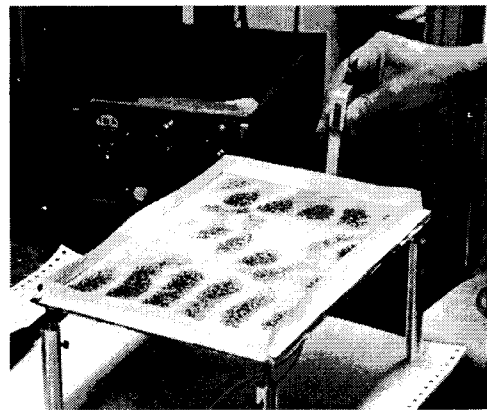


Fig. 12 진동 모드 가시화 실험 과정.

구조물의 진동모드 가시화의 원리는 진동하는 구조물의 표면에 설탕이나 고운 모래등의 입자를 뿌리면 상대적으로 변위가 작은 영역인 모달 라인 근처에 입자들이 모이게 되는 현상을 이용하였다. 구조물을 가진시키기 위한 방법으로 구조물의 특정 영역을 현악기의 활에 의한 마찰력을 이용하여 가진하였다. Fig. 12에 본 연구에서의 실험과정을 나타내었다. 한편 유한요소법과 고유치 해석을 이용하여 수치해석에 의한 진동모드를 얻었다. Kirchhoff 판 요소를 이용하였으며 최대 수직변위의 5% 이하의 영역을 모달라인으로 정의하였다.

320×220cm USN125BX [0°/90°/0°/90°/0°]_s의 복합재료 적층판을 제작하고 네 모서리를 리벳팅하여 지지하였다. 실험으로 얻어진 진동모드와 수치해석에 의해 얻어진 진동모드를 Fig. 13에 비교하였다.

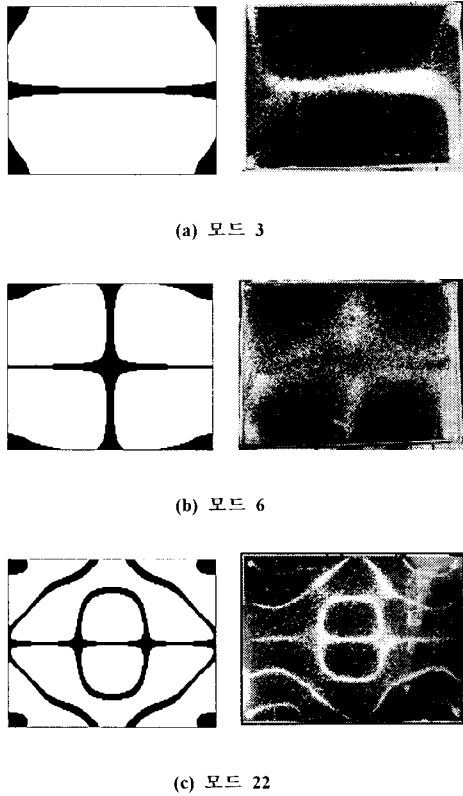


Fig. 13 진동모드 가시화 결과의 비교.

7. 결론

서울대학교 항공우주 구조연구실에서 수행되어온 복합재료 관련 연구 내용을 소개하였다. 국가지정연구실로서 본 연구실의 핵심 기술인 인터넷 슈퍼컴퓨팅은 초대형/고정밀 구조해석을 위해 필수적인 기술이다. 특히 복합재료는 재료의 특성상 상세모델링이 필요하므로 인터넷 슈퍼컴퓨팅 기술의 활용도가 더욱 크다고 할 수 있다. 지속적인 연구로서 복합재료 DNS 모델링의 개선, 다양한 환경하에서의 가상실험의 구현, 고정밀 해석에 의한 복합재료 구조물의 비파괴검사법의 확립등의 연구를 진행할 계획이다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실(00-N-NL-01-C-026) 사업에 의해 지원되었습니다.

참고문헌

- 1) 이창성, 신현, 김승조, "직교 직물 복합재료 물성치 예측을 위한 가상 수치 실험," *복합재료 학회 춘계학술대회 논문집*, 2001년 5월 4일, 한국기계연구원.
- 2) 신현, 이창성, 김승조, 김위대, "복합재료 Wavy-Lap Joint의 3-D 상세 응력 해석," *복합재료 학회 춘계학술대회 논문집*, 2001년 5월 4일, 한국기계연구원.
- 3) S. J. Kim, K. H. Ji, N. S. Goo, "Low-Velocity Impact Characterization of Composite Plate by Direct Numerical Simulation(DNS)," *2nd Asian-Australasian Conference on Composite Materials*, Kyongju, Korea, 18-20 August, 2000.
- 4) Kim, S. J. and Hwang, J. S., "New Nondestructive Evaluation Method of Laminated Composite Structures by Tapping Sound Analysis," *SPIE's 6th Annual International Symposium on NDE for Health Monitoring and Diagnostics*, Newport Beach, California, U.S.A, March, 2001.
- 5) 김승조, 황준석, 김도년, 진호, "국부 마찰 진동에 의한 복합재료 평판의 진동 모드 해석 및 실험," *복합재료 학회 추계학술대회논문집*, 2001년, 서울대학교.
- 6) Tan P, Tong L, Steven GP., "Modeling approaches for 3D orthogonal woven composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 17, No. 6, 1998, pp. 545-577.
- 7) Seung Jo Kim, Chang Sung Lee and Jeong Ho Kim, "Large-scale Structural Analysis by Parallel Multifrontal Solver Through Internet PCs," *41st AIAA/ASME/ASCE/AH S/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit*, The Westin Peachtree Plaza Atlanta, Atlanta, GA, 3-6, April, 2000.
- 8) B. N. Cox and M. S. Dadkhah, "The Macroscopic Elasticity of 3D Woven Composites," *J. Comp. Mater.*, Vol. 29, 1995, pp. 795-819.
- 9) Q. Zeng, C. T. Sun, "A New Bonded Composite Wavy-Lap Joint," *AIAA*, 2000, pp. 1484.
- 10) Abrate, S., "Impact on laminated composite materials," *Appl. Mech. Rev.*, Vol. 44, No. 4, 1991, pp. 155-190.
- 11) Seung Jo Kim, Jin Yeon Cho and Jeong Ho Kim, "Finite Element Modeling and Analysis of Composite Structures," *Proceeding of the First Korea-U.S. Workshop on Composite Material*, 1998.
- 12) Coifman, R. and Wickerhauser, M., "Entropy-based algorithms for best basis selection," *IEEE Transaction on information theory*, Vol. 38, No. 2, 1992, pp. 713-718.