

# 표면 처리된 폴리우레탄 폼 샌드위치 구조의 접합 특성

이창섭\* · 임태성\* · 이대길\*\*

## Adhesion Characteristics of Surface Treated Polyurethane Foam Core Sandwich Structures

Chang Sup Lee, Tae Seong Lim and Dai Gil Lee

**Key Words :** Peel strength (박리 강도), Peel energy (박리 에너지), Surface treated foam (표면 처리된 폼), Sandwich (샌드위치), Composites (복합재료)

### Abstract

The interfacial adhesive joining characteristics of the foams are very important for the structural integrity of sandwich structures. Peel strength is one of the best criteria for the interfacial characteristics of the sandwich structures and peel energy is most commonly used for the interfacial characteristics. The peel strength is the first peak force per unit width of bond line required to produce progressive separation by the wedge or other crack opening type action of two adherends where one or both undergo significant bending and the peel energy is the surface active energy per unit width of bond line. In this work, to investigate the strengthening effect of resin treatment on the interfacial surface of foam material, peel strength and peel energy of epoxy resin treated polyurethane foam core sandwich structures were obtained by the cleavage peel tests and compared with those of non surface treated polyurethane foam core sandwich structures.

### 1. 서론

샌드위치 구조 (Sandwich Structure)는 면재 (Face)와 심재 (Core)로 이루어져 있으며 두 재료의 구조적인 장점을 이용하기 위하여 서로 접합된 형태로 되어있다. 면재는 일반적으로 얇고 강성 및 강도가 높은 재료를 사용하며 심재는 면재에 비하여 상대적으로 가볍고 두껍지만 강성 및 강도는 낮은 재료를 사용한다. 샌드위치 구조의 면재로는 강이나 알루미늄 판재 혹은 복합재료 (Composites)를 주로 사용하며, 심재로는 각종 폴리머 (Polymer) 재료를 발포 시킨 형태인 폼 (Foam)이나 발사 나무 (Balsa Wood)를 사용한다. 이와 같이 면재와 심재의 장점을 결합하여 만든 샌드위치 구조는 비강성 및 비강도가 높고 단열 및 차음 효과가 뛰어나며 높은 에너지 흡수율을 가지는 구조가 된다.<sup>(1)</sup>

일반적으로 샌드위치 구조의 파괴 모드 (Failure Mode)는 면재의 항복 (Yielding) 및 파괴 (Fracture), 심재의 전단 파괴 (Core Shear), 면재의 주름짐 (Face Wrinkling), 전체 좌굴 (Buckling) 등으로 구분되는데,<sup>(2)</sup> 이것은 모두 면재와 심재가 완전히 접합 (Perfect Bonding)되었다는 전제 조건 하에서 성립한다. 그러나, 심재와 면재의 접합 특성은 재료의 표면 상태나 접합 조건에 크게 좌우되므로 접합에 대한 연구가 선행되어야 한다.

샌드위치 구조에서 심재와 면재의 접합 특성은 주로 겹치기 전단 (Lap Shear)이나 박리 (Peel)의 방법으로 평가하지만 접착제 (Adhesive)는 일반적으로 전단 (Shear)에 강하도록 설계되어 있고 샌드위치 구조의 파괴 모드 형상은 박리와 밀접한 관계를 가지고 있다. 또한, 박리 강도 (Peel Strength)는 샌드위치 구조에서 계면 특성 (Interfacial Characteristics)을 나타내는데 적절한 기준이 되며, 박리 에너지 (Peel Energy)는 계면 특성을 나타내는데 가장 일반적으로 쓰이는 물성이다. 박리 강도는 힘-변위 선도 (Force-Displacement Graph)에서 최

\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\* 한국과학기술원 기계공학과 교수, 정회원

초로 나타나는 정점의 힘 (Peak Force)을 접착한 폭의 길이로 나눈 것으로 균열 (Crack)을 진전시키는데 필요한 최소 힘이고, 박리 에너지는 새로운 표면을 만들어 내는데 필요한 계면 활성화 에너지 (Surface Active Energy)를 의미하며, 단위 폭 당 에너지로 나타낸다. 박리 시험의 방법에는 T 자형 박리 시험, 롤러 (Roller) 또는 드럼 (Drum)형 박리 시험, 스트립핑 (Striping)형 박리 시험 그리고 벽개 (Cleavage) 박리 시험 등이 있으나, 구조용 샌드위치에는 강성이 높은 면재를 사용하므로 벽개 박리 시험을 수행하는 것이 가장 적당하다.<sup>(3-7)</sup>

Thouless et al.<sup>(8)</sup>은 박리 시험 도중의 기하학적인 형상에 탄성 이론을 적용하였으며, Yang et al.<sup>(9)</sup>은 대칭형 90° 박리 시험에서 인장에 의한 소성 변형 (Plastic Deformation)을 해석하였다. 또한, Xie et al.<sup>(10)</sup>은 폴리머 복합재료 (Polymer Composites)와 콘크리트 (Concrete) 사이의 계면 특성을 연구하였고, 권 등<sup>(11)</sup>은 접착 조인트의 표면 조도 및 접착 두께의 영향에 관해 연구하였다.

일반적으로 폴리우레탄 폼 (Polyurethane Foam)은 밀도가 증가할수록 우수한 기계적 성질을 가진다.<sup>(12)</sup> 그러나, 샌드위치 구조의 계면 특성은 심재 및 면재의 표면 특성이나 표면 처리 방법에 따라 크게 달라질 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 에폭시 레진을 이용하여 표면 처리한 폴리우레탄 폼 샌드위치의 박리 강도와 박리 에너지에 대한 연구를 통해 표면 처리가 샌드위치 구조의 계면 특성에 미치는 영향에 대하여 알아보려고 한다. 우선, 심재로 사용된 폴리우레탄 폼의 계면 강도 (Interfacial Strength)를 높이기 위하여 에폭시 레진 (Epoxy Resin)을 표면에 도포하고 경화 시킨 후, 접착제를 이용해 면재와 접합하였다. 박리 시험 및 유한요소해석을 통하여 박리 강도 및 박리 에너지를 계산하고, 표면 처리된 폼 샌드위치 구조의 박리 시험 결과와 표면 처리되지 않은 폼 샌드위치 구조의 박리 시험결과를 비교하였다.

## 2. 박리 시험 및 박리 강도

샌드위치 (Sandwich) 시편을 제작하고 박리 시험 (Peel Test)을 통해 샌드위치 시편의 박리 강도 (Peel Strength)를 구하였으며, 시험으로부터 얻은 하중-변위 곡선 (Load-Displacement Curve)을 이용하여 박리 에너지 (Peel Energy)를 계산하였다.

박리 시험을 수행하기 위하여 폴리우레탄 폼 (Polyurethane Foam)을 심재 (Core)로 하고 유리섬

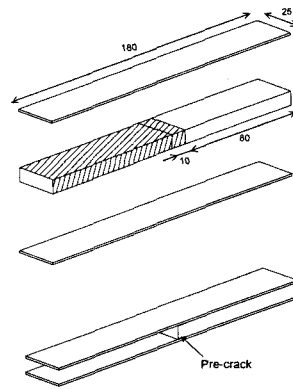


Fig. 1 Sandwich specimens.

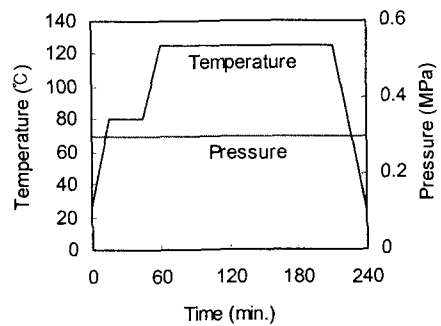


Fig. 2 Cure cycle for sandwich specimens and adhesives.

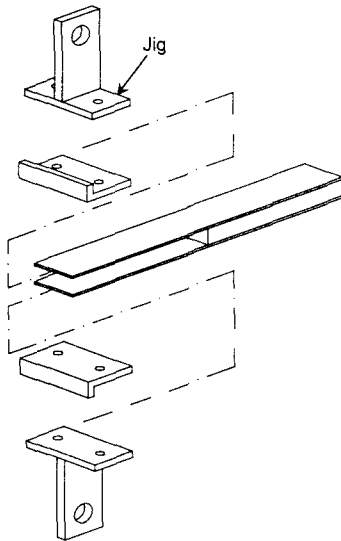
유 에폭시 복합재료를 면재 (Face)로 하는 샌드위치 시편을 제작하였다. 시편의 크기 Fig. 1에 나타내었다. 면재는 유리섬유 직조 (Fabric) 프리프레그 (Prepreg)와 일방향 유리섬유 프리프레그를 이용하여 대칭 적층한 후, Fig. 2에 나타난 경화사이클을 이용하여 오토클레이브 진공백 성형법으로 0.3 MPa의 기압 하에서 경화시켰다. 가운데 일방향 유리섬유 프리프레그를 10장 적층하고 맨 아래와 맨 위에 유리섬유 직조 프리프레그를 적층하여 면재가 길이 방향으로 쪼개지는 것을 방지하였다. 밀도가 각각 80과 190 kg/m<sup>3</sup>인 두 종류의 폴리우레탄 폼을 준비하였다. 또한, 밀도가 80 kg/m<sup>3</sup>인 폴리우레탄 폼의 표면에 구조용 에폭시 레진을 도포하여 상온에서 경화시키는 방식으로 표면처리하여 밀도가 155 kg/m<sup>3</sup>인 폴리우레탄 폼을 준비하였다. 세 종류의 폴리우레탄 폼의 표면을 #150인 사포로 표면을 처리한 후 에폭시 필름 접착제로 면재를 접합한 후, Fig. 2의 경화사이클을 이용하여 경화시켰다. 세 종류의 폴리우레탄 폼을 사포로 표면 처리한 후의 표면 조도는 Table 1에 나

**Table 1** Surface roughness of the foam materials.

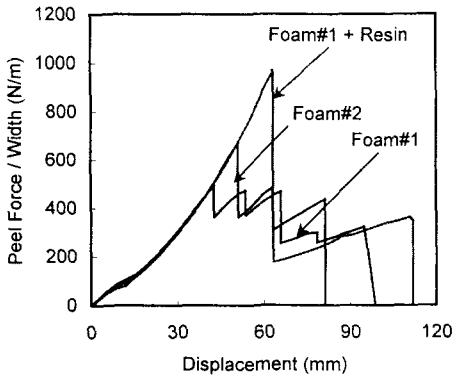
	Foam #1	Foam #1 +Resin	Foam #2
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	80	155	190
$R_a$ ( $\mu$ m)	35.8	4.9	30.1
$R_{max}$ ( $\mu$ m)	241.0	44.1	229.2

타내었다. 접착 도중에 샌드위치 시편의 면재가 파손되는 것을 방지하기 위해 스페이스 (Spacer)를 면재 사이에 끼우고, 박리 시험 시 균열이 면재와 심재의 경계면에서 시작되도록 10 mm 길이의 전치 균열 (Pre-Crack)을 만들었다.

Fig. 3 에 나타난 것과 같은 지그를 제작하여

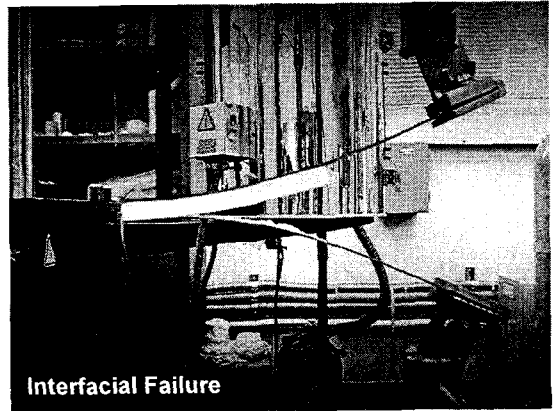


**Fig. 3** Cleavage peel test jig by tension loading.



**Fig. 4** Peel force - displacement curves.

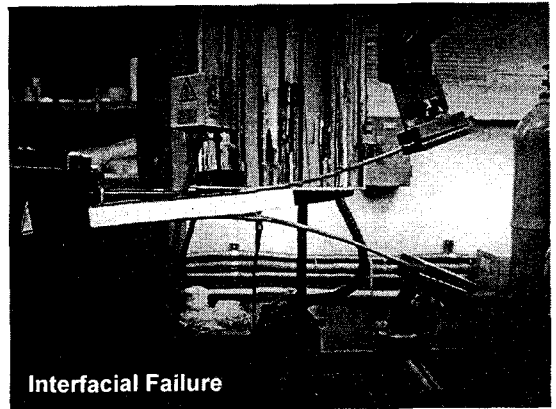
INSTRON (Static 4206, Canton, MA, USA)에서 인장을 가하여 박리 시험을 수행하였다. 시험 속도는 10 mm/min 이었으며 하중-변위 곡선을 Fig. 4 에 나타내었다. 하중-변위 곡선을 살펴보면 변위가



(a) Specimen #1 (Foam #1)



(b) Specimen #2 (Foam #1 + Resin)



(c) Specimen #3 (Foam #2)

**Fig. 5** Failure modes of the sandwich specimens.

증가할수록 하중이 증가하다가 첫번째 정점 (Peak)이 나타난 후, 하중의 증가와 감소를 반복하였다.

서로 다른 밀도의 폼 세 종류에 대한 박리 시험 결과 사진을 Fig. 5 에 나타내었다. 시험 결과, 레진으로 표면 처리되지 않은 폼을 사용한 샌드위치 시편에서는 계면 파괴 (Interfacial Failure)가 발생하였으며, 레진으로 표면 처리된 폼을 사용한 샌드위치 시편에서는 응집 파괴 (Cohesive Failure)가 발생하였다. 시험 결과는 Table 2 에 나타내었으며, 박리 강도는 하중-변위 곡선에서 나타난 하중의 첫번째 정점 (Peak)의 값을 샌드위치 시편의 폭으로 나누어 구하였다. 레진으로 표면 처리된 폼을 사용한 샌드위치 시편의 박리 강도가 가장 높게 나타났고 레진으로 표면 처리되지 않은 폼을 사용한 샌드위치 시편의 경우, 밀도가 증가할수록 박리 강도가 높게 나타났다. 레진으로 표면 처리되지 않은 폼을 사용한 샌드위치 시편의 박리 강도를 이용하여 선형 보간으로 밀도 155 kg/m<sup>3</sup>의 폼을 사용한 샌드위치 시편의 박리 강도를 유추해 볼 때, 레진으로 표면 처리된 폼을 사용한 샌드위치 시편의 박리 강도는 레진으로 표면 처리되지 않은 폼을 사용한 샌드위치 시편의 박리 강도에 비해 57 % 향상되었다. Table 1 에 나타난 폼의 표

면 조도와 비교해 보았을 때, 박리 강도는 표면 조도와 반비례하였다. 이것은 레진으로 표면 처리된 폼을 사용한 경우, 표면의 강도 및 경도가 증가하여 균열이 더 이상 계면을 따라 진전하지 못하고 폼 내부 방향으로 진전한 것으로 사료되며, 최 등<sup>(13)</sup>의 연구 결과와 일치하는 경향을 나타내었다.

### 3. 유한요소해석 및 박리 에너지

샌드위치 시편에 하중을 가하였을 때 응력 분포를 살펴보고, 박리 시험에서 얻은 하중-변위 곡선을 이용하여 박리 에너지를 계산하고 시험 결과와 비교하기 위하여 유한요소해석을 수행하였다.

샌드위치 시편은 상하가 대칭형이고 폭 방향으로 일정하다고 가정하여 ANSYS (Canonsburg, PA, USA)의 2D 구조용 평면 요소 (2D Structural Plane Element)를 사용하여 모델링하였다.<sup>(14)</sup>

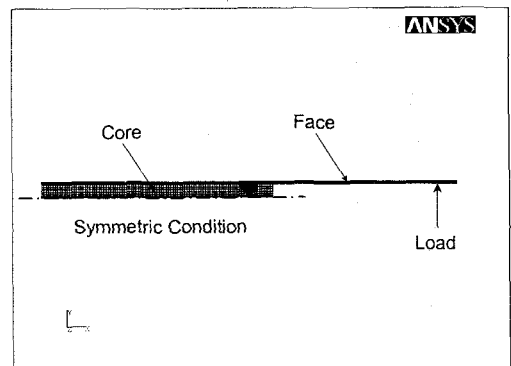
샌드위치 시편의 유한요소모델은 Fig. 6 에 나타내었다. 대칭면은 변위를 구속하여 대칭 조건으로

**Table 2** Peel strengths with respect to the foam density.

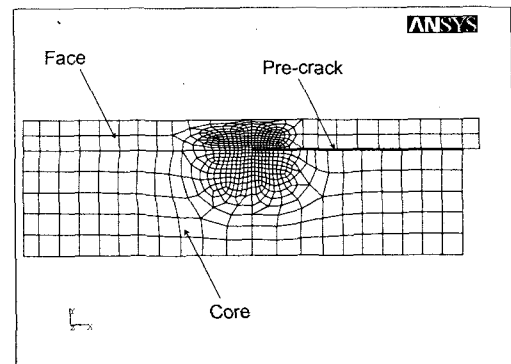
	Foam Density (kg/m <sup>3</sup> )	Peel Strength (N/m)
Specimen #1 (Foam #1)	80	493
Specimen #2 (Foam #1+Resin)	155	968
Specimen #3 (Foam #2)	190	671

**Table 3** Peel energies with respect to the foam density.

	Foam Density (kg/m <sup>3</sup> )	Peel Energy (J/m)
Specimen #1 (Foam #1)	80	319
Specimen #2 (Foam #1+Resin)	155	329
Specimen #3 (Foam #2)	190	345



(a) Finite element model



(b) Pre-cracked region

**Fig. 6** Finite element model

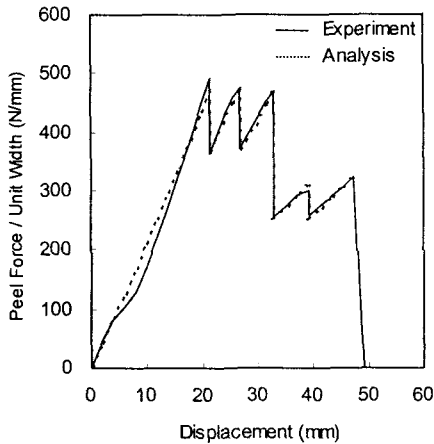


Fig. 7 Peel force - displacement curves (experiment vs. analysis).

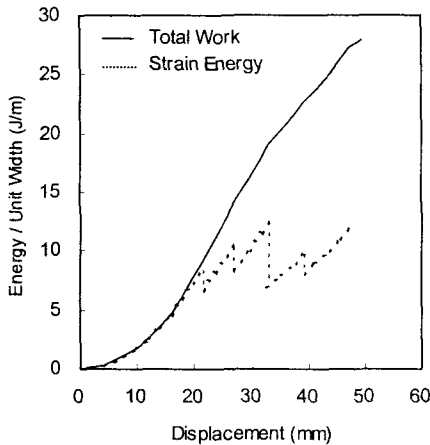


Fig. 8 Energy - displacement curves (total work vs. strain energy).

설정하였고, 면재와 심재 사이의 경계면에 분포한 절점 (Node)의 변위를 커플링 (Coupling)하여 접촉된 것으로 가정하였다. 면재의 끝단에 하중을 가하고 그 때의 변위와 변형률 에너지를 구하였다. 또한, 박리 시험과 일치하는 결과를 얻기 위하여 하중이 정점에 도달하면 균열을 진전시키고 다시 하중이 정점에 도달하면 균열을 진전시키는 반복 계산을 통하여 박리 시험을 모사하였다. 박리 시험을 모사한 결과 Fig. 7에 나타난 것처럼 비교적 정확한 하중-변위 곡선을 얻을 수 있었다. 레진으로 표면 처리되지 않은 폼을 사용한 샌드위치 시편과 레진으로 표면 처리된 폼을 사용한 샌드위치

시편 각각의 경우에 대해 계산한 박리 에너지를 Table 3에 나타내었다. Fig. 8에 나타난 것과 같이, 박리 에너지는 박리 시험에서 얻은 하중-변위 곡선을 변위에 따라 적분한 값을 계산한 후, 변위에 따른 변형률 에너지를 유한요소해석을 이용하여 박리 시험을 모사한 결과에서 구한다. 하중-변위 곡선을 적분한 값은 시편에 해준 전체 일이 되며, 아래와 같은 관계식 (1)에 의해 박리 에너지는 전체 일과 변형률 에너지의 차로 나타낼 수 있다.

$$W_{total} = E_{strain} + E_{peel} \quad (1)$$

박리 에너지를 계산한 결과, 세 경우 모두 10% 이내의 유사한 박리 에너지가 필요한 것을 알 수 있었으며, 폴리우레탄 폼의 밀도가 증가할수록 박리 에너지가 약간 증가하였다. 이것은 박리 에너지는 계면 활성 에너지로, 폴리우레탄 폼의 물성이 밀도에 따라 증가하는 경향이 있기 때문에 폼의 물성이 증가함에 따라 전체의 평균값으로 표현되는 박리 에너지는 증가하는 경향으로 나타난 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구에서, 에폭시 레진을 이용하여 표면 처리한 폴리우레탄 폼 샌드위치의 박리 강도와 박리 에너지에 대한 연구를 통해 표면 처리가 샌드위치 구조의 계면 특성에 미치는 영향에 대하여 알아본 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

폴리우레탄 폼에 에폭시 레진을 도포하고 상온에서 경화시켜 레진으로 표면 처리된 폴리우레탄 폼을 제작하였다. 레진으로 표면 처리된 폼과 레진으로 표면 처리되지 않은 폴리우레탄 폼을 사용하여 샌드위치 박리 시편을 제작하였고, 박리 시험을 수행하였다. 박리 시험을 통해 박리 강도를 구한 결과, 레진으로 표면 처리된 폼을 사용한 샌드위치 시편의 박리 강도가 가장 높게 나타났으며, 레진으로 표면 처리되지 않은 폼을 사용한 샌드위치 시편의 박리 강도에 비해 57% 향상되었다.

또한, 유한요소해석을 통하여 박리 시험을 모사하고 박리 에너지를 계산하였다. 박리 에너지를 계산한 결과, 샌드위치 시편에 사용한 폼의 밀도가 증가할수록 박리 에너지가 높게 나타나는 경향을 보였으며, 레진 처리는 박리 에너지 향상에 기여하지 못하는 것으로 나타났다.

## 후 기

본 연구는 과기부 국가지정연구실 프로젝트 및 교육부 BK21 프로젝트의 지원을 받아 수행된 것으로 관계기관에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Zenkert, D., 1997, *An Introduction to Sandwich Construction*, EMAS Publishing.
- (2) Vinson, J. R., 1999, *The Behavior of Sandwich Structures of Isotropic and Composite Materials*, TECHNOMIC Publishing Co., Inc.
- (3) ASTM D1876 - 95, "Standard Test Method for Peel Resistance of Adhesives (T-Peel Test)."
- (4) ASTM D3167 - 93, "Standard Test Method for Floating Roller Peel Resistance of Adhesives."
- (5) ASTM D1781 - 93, "Standard Test Method for Climbing Drum Peel for Adhesives."
- (6) ASTM D903 - 93, "Standard Test Method for Peel or Stripping Strength of Adhesive Bonds."
- (7) ASTM D3807 - 93, "Standard Test Method for Strength Properties of Adhesives in Cleavage Peel by Tension Loading (Engineering Plastics-to-Engineering Plastics)."
- (8) Thouless, M. D., and Jensen, H. M., 1992, "Elastic Fracture Mechanics of the Peel-Test Geometry," *J. Adhesion*, Vol. 38, pp. 185-197.
- (9) Yang, Q. D., Thouless, M. D., and Ward, S. M., 2000, "Analysis of the Symmetrical 90°-peel Test with Extensive Plastic Deformation," *J. Adhesion*, Vol. 72, pp. 115-132.
- (10) Xie, M., and Karbhari, V. M., 1998, "Peel Test for Characterization of Polymer Composite/Concrete Interface," *J. Comp. Mater.*, Vol. 32, pp. 1894-1913.
- (11) 권재욱, 이대길, 2000, "비틀림 접착 조인트의 피로 수명에 대한 표면 조도와 접착 두께의 영향," *대한기계학회논문집*, 제 24 권, pp. 2022-2031.
- (12) Szycher, M., 1999, *Handbook of Polyurethanes*, CRC Press.
- (13) 최진호, 이대길, 1992, "접착제의 두께와 열응력에 따른 조인트의 토크 특성," *대한기계학회논문집*, 제 16 권, pp. 1841-1853.
- (14) ANSYS, Inc., 1995, *User's Manual Revision 5.2*.