

위상 최적화 기법을 이용한 FED 용 스페이서의 배치 설계

정태은*

Design of the Spacers Arrangement for Field Emission Displays using Topology Optimization Technique

Tae Eun Chung*

ABSTRACT

A field emission display has spacers separating the emitting base and display face. The arrangement of the spacer is important for maintenance of required clearance, endurance of bending stresses, and efficient vacuum sealing. Topology optimization technique with material density was introduced to select the best position of the spacers from the available positions. The displacement and Von Mises stress distribution of the panels with optimal spacers were calculated by finite element method. Also the design guide for adding or eliminating spacers was proposed.

Key Words : Field Emission Display (전계 방출 디스플레이), Spacer (스페이서), Topology Optimization Technique (위상 최적화 기법), Finite Element Method (유한 요소법), Vacuum Sealing (진공 밀봉)

1. 서론

현재 개발되고 있는 평판 디스플레이들 가운데 전계 방출 디스플레이라고 부르는 FED(field emission display)는 음극판 패널과 양극판 패널로 구성되어 있고, 음극판에서 방출된 전자가 양극판의 형광체에 부딪혀 영상을 나타낸다. 이러한 FED는 진공 소자로서 진공 패키징 기술이 필요하다. 아울러 진공 패널을 제작할 때에, 두 유리판 사이의 간극을 일정하게 유지시켜 주면서, 압력차에 의해 유리판이 파단되는 것을 방지하기 위해, 스페이서(spacer)를 얇은 유리판 사이에 설치하게 된다. 진공 패널의 크기가 작은 경우나, 유리판의 두께가 두꺼운 경우에는 스페이서를 설치하지 않아도 되지만, 대화면의 경량 디스플레이의 개발에

따라, 스페이서의 중요성이 증대되고 있다.^(1,2)

스페이서를 배치할 때 그 길이, 위치, 개수를 고려하여야 한다. 스페이서의 길이나 놓여질 수 있는 위치는 FED의 형상, 에미터(emitter)의 위치 등에 의해 제한적으로 결정이 되며, 소자 내부로 고진공으로 배기시키기 위해서는 스페이서의 개수를 줄여주는 것이 중요하다. 위상 최적화 기법에 대해 많은 논문들이 최근에 소개되고 있으나 주로 간단한 형상의 모델에 대해 균질화법을 이용한 최적 설계 결과를 보여주고 있다.^(3,4,5) 본 연구에서는 위상 최적 설계의 개념을 도입하여 스페이서가 위치할 수 있는 후보의 지점들 중에서 최소의 개수로서 주어진 역할을 수행할 수 있는 배치 방법을 제시하였으며, 변위 및 응력 분포를 유한 요소법으로 계산함으로써 스페이서의 배치가 효율

* 인덕대학 메카트로닉스과

적으로 이루어졌는지를 살펴보았다. 또한 스페이서의 개수를 늘리거나 줄일 경우에, 어느 위치에 배치해야 효과적인지에 대한 설계 지침을 제시하였다.

2. 진공 패널의 모델

2.1 구성도

진공 패널의 개략적인 구성을 살펴보면 다음과 같다. Fig.1 에서와 같이 에미터에서 방출된 전자는 진공을 지나 형광체로 날아간다. 기초면(base face)과 표시면(display face)은 유리를 사용하고 이 사이에 스페이서를 설치한다.

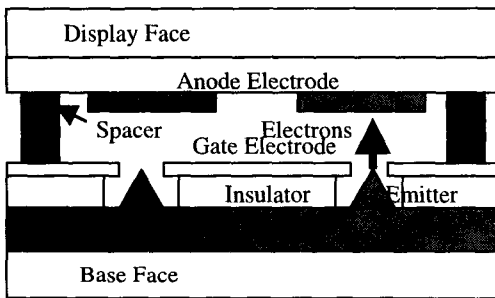


Fig. 1 Schematic diagram of field emission display

진공 패널의 내부는 고진공으로 유지하고 모서리 부분은 밀봉 처리한다. 따라서 Fig.1 의 기초면과 표시면의 유리판에는 내부의 고진공 상태와 외부의 대기 상태에 대한 압력 차이에 의해 평판 전체에 균일한 압력을 받게 된다. 두 유리판 사이에는 스페이서(spacer)라는 기둥을 바둑판식으로 배열한다. 이때에 스페이서의 형상을 원기둥 또는 구 모양으로 만들어 배기 시에 가스 분자들이 스페이서들과 충돌하는 횟수를 줄이는 것이 배기를 쉽게 하는 방법이다.^(6,7)

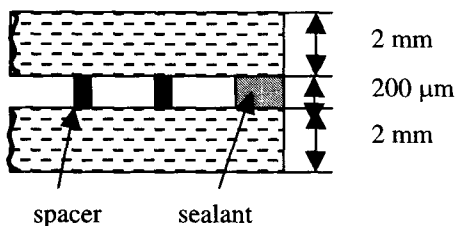


Fig. 2 Dimension of FED at side view

진공 패널의 크기는 여러 가지가 있을 수 있으나, 본 연구에서는 스페이서의 배치 방법을 제시하기 위해 가로 145 mm, 세로 145 mm, 두께 2 mm 인 2 개의 유리 평판이 200 μm 간격으로 떨어져 있는 진공 패널을 대상으로 선정하였다. Fig.2 는 이러한 진공 패널의 두께 방향의 길이를 나타내고 있다.

2.2 유한 요소 모델

내부와 외부의 압력 차이에 의한 진공 패널의 변형과 응력을 계산하기 위해서, 진공 패널 및 스페이서를 유한 요소(finite elements)로 모델링하였다. 이때 기본 가정은 다음과 같다.

- (1) 스페이서의 최적 배치를 구하는 것이 목적이므로 원형 스페이서의 단면을 정사각형 단면으로 가정하여 미소 단면에 대한 모델링을 용이하게 하였다.
- (2) 바둑판식으로 배열될 수 있는 스페이서의 후보 위치를 선정하기 위해서는 에미터의 위치 결정이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 스페이서가 놓여질 수 있는 자리의 간격을 9 mm로 설정하였다.
- (3) 진공 패널의 모서리는 일정 두께만큼 밀봉 처리되므로 진공 패널은 완전 고정된 것으로 가정한다.

이상의 가정에 의해 주어진 진공 패널을 8 mm×8 mm×2 mm, 1 mm×8 mm×2 mm 또는 8 mm×1 mm×2 mm 등의 기본 요소로 분할하였고, 스페이서는 단면이 1 mm×1 mm×0.2 mm 의 사각 기둥으로 모델화하였다. Fig.3 은 이러한 유한 요소 모델의 모서리 부분을 확대해서 본 것이다.

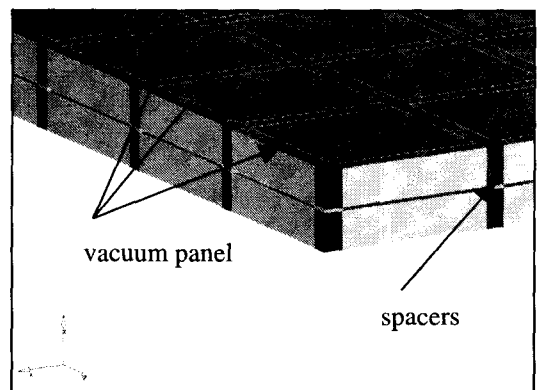


Fig. 3 Finite element model of the field emission display

스페이서의 후보 위치를 Fig.4 와 같이 진공 패널에 대해 행과 열을 정하기로 한다. 진공 패널의 중심점에 대해 대칭으로 배열이 되어 있으므로 모서리부(1 행 1 열에 해당)에서 중심점(9 행 9 열에 해당)까지 행과 열을 부여하여 스페이서의 위치를 나타내는데 사용하기로 한다. 1 행과 1 열 부분은 밀봉이 되는 부분으로 완전 고정되므로 실제로는 스페이서의 역할을 못하며 모델화의 편의상 모서리 부분에도 스페이서의 형상과 동일하게 요소를 분할하였다. 한편 격자 모양으로 배치한 스페이서의 후보 위치는 Fig.5 와 같다.

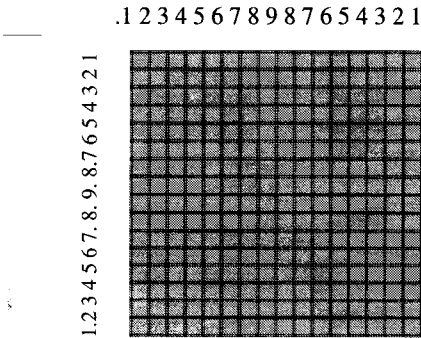


Fig. 4 Array of available spacers

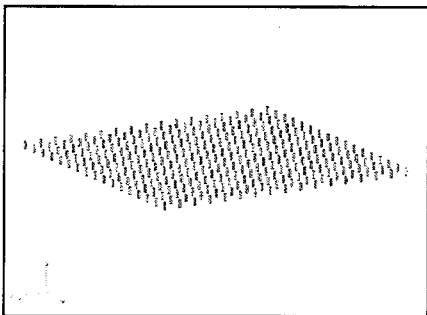


Fig. 5 Positions of available spacers

3. 위상 최적화 설계

3.1 기본 이론

위상 최적화 설계의 기본적인 이론은 최대의

구조 강성(structural rigidity)을 갖도록 재료를 배치하는 것이다. 따라서 해당 구조물에 대해 목표 질량을 만족하도록 컴플라이언스 지수(compliance index)를 최소화하게 된다. 컴플라이언스 지수는 식 (1)과 같이 계산된다.⁽³⁾

$$S = \sum W_i C_i \quad (1)$$

where W_i : weight for subcase i

C_i : compliance for subcase i

각 경우(subcase)에 대한 컴플라이언스는 식 (2)와 같이 얻어진다.

$$C_i = U_i^T K_i U_i \quad (2)$$

where U_i : displacement vector for subcase i

K_i : stiffness matrix related to subcase i

초기에 설정된 동일 격자 간격의 모든 스페이서의 후보에 대해서 구조 해석을 수행하고, 수렴할 때까지 반복 계산을 한다. 이때 스페이서로 모델화된 각 입체 요소들(solid elements)의 재료 밀도(material density)가 스페이서의 존재 유무를 결정하는 인자가 된다. 여기서 사용하는 재료 밀도는 사용 재질인 유리의 물리적 밀도를 뜻하는 것이 아니고, 모델화된 요소 또는 공간이 채워져 있어야 하느냐 비워 있느냐를 나타내는 지수이다. 즉 재료 밀도가 1 이면 딱 채워져 있는 요소이고, 재료 밀도가 0 이면 비워져 있는 공간을 의미한다. Fig.6 은 입체 요소의 재료 밀도와 관련한 설계 변수들(a, b, c)을 나타내고 있다.

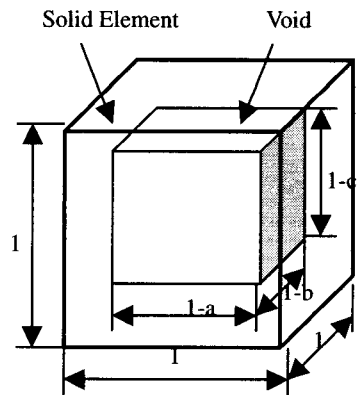


Fig. 6 Design variables a, b, and c for a solid element

이때에 입체 요소의 재료 밀도는 식 (3)과 같이 얻어진다.

$$\rho_{MAT} = 1 - (1-a)(1-b)(1-c) \quad (3)$$

식 (3)의 항은 최적화 과정에서 변하면서 컴플라이언스 지수가 최소가 될 때 수렴하게 된다. 재료 밀도가 1 이면 공간이 없다는 것을 뜻하며, 재료 밀도가 0 이면 입체 요소가 존재하지 않다는 것을 의미한다.

3.2 해석

본 연구에서는 위상 최적화 설계 개념을 도입하여, 격자 배치를 한 스페이서의 모든 후보 위치에 대해 컴플라이언스 지수를 최소화하도록 최적화하였다. 사용한 프로그램은 Altair사에서 만든 "Optistruct"라는 위상 최적화 계산 전용 소프트웨어이다.⁽⁸⁾ 유한 요소 해석에 사용된 모델의 총 절점 수는 4624 개, 입체 요소로 사용된 Hexa 요소의 수는 2467 개였다. 패널을 구성하는 유리판 및 스페이서의 재질은 소다 유리(sodalime glass)이며 물리적 특성은 Table 1 과 같다.⁽⁹⁾

Table 1 Physical properties of sodalime glass

Divisions	Properties
Annealing point	520 °C
Density	2.5 g/cm ³
Strength	50 MPa
Young's modulus	72 GPa
Poisson's ratio	0.25

식 (1)에 나와있는 컴플라이언스 지수는 20 번의 반복 수행을 한 결과, 그 값이 24.7 로 수렴하였다. Fig.7 은 반복 수행 횟수에 따른 질량과 컴플라이언스의 곱, 즉 컴플라이언스 지수의 변화를 보여주고 있다.

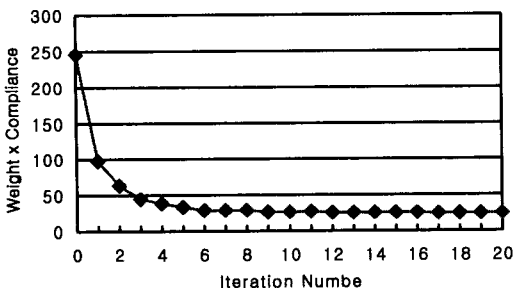


Fig. 7 Iteration number versus compliance index

최적설계과정에서 초기 상태는 Fig.5 와 같이 모든 격자 부분에 밀도가 1 인 스페이서가 설치되어 있을 경우로 설정하였다. 이때 변위분포는 Fig.8 에 나와있으며, 최대 변형값은 모서리부(2 행 2 열의 위치)에서 $6.22 \times 10^{-2} \mu\text{m}$ 를 나타내었고, 최대 Von Mises 응력값은 중앙 내부의 위치에서 11 MPa 을 나타내었다. 이상의 결과를 보면 모든 격자 부분에 스페이서를 설치한 것은 과도하게 배치된 것임을 알 수 있다.

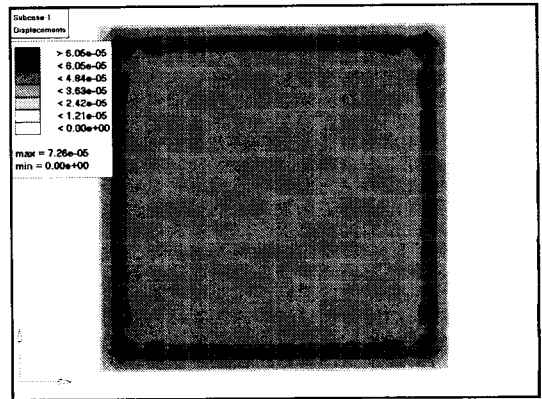


Fig. 8 Displacement of FED at initial state

반복 수행 결과로 얻어진 스페이서 모델의 밀도 분포가 Fig.9 에 나와있다. 이러한 결과를 보다 확실히 살펴 보기 위하여, 최종 상태에 대해 밀도값이 0.9 이상인 경우만을 Fig.10 에 나타내었다. 스페이서의 개수를 늘리거나 줄일 필요가 있을 때 Fig.10 의 결과와 같이 밀도가 큰 요소의 위치부터 스페이서를 배치하는 것이 보다 효과적인 설계 방법임을 알 수 있다.

한편 최적화 계산을 최종적으로 수행한 후의 변형 모습은 Fig.11 에서 보는 바와 같다. 이 경우에는 스페이서 모델의 밀도 분포가 Fig.9 와 Fig.10 에서 볼 수 있는 바와 같이 중앙 부위와 모서리에 인접한 사각 테두리를 중심으로 밀도가 높게 나오므로, 진공 패널의 모서리와 외곽 스페이서(3 열 3 행에 해당하는 부분) 사이의 네 구석에서 변형값이 최대를 나타내는 것을 알 수 있다. 이때 최대 변형값이 $3.77 \mu\text{m}$ 로 나타나서 수 μm 범위로 변위가 제한되어야 하는 FED 의 설계조건을 만족하면서 스페이서의 개수를 줄인 효과를 보았다는 것을 알 수 있다.

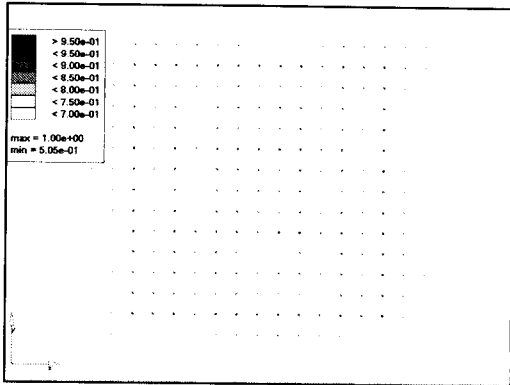


Fig. 9 Density plot of spacers at final state

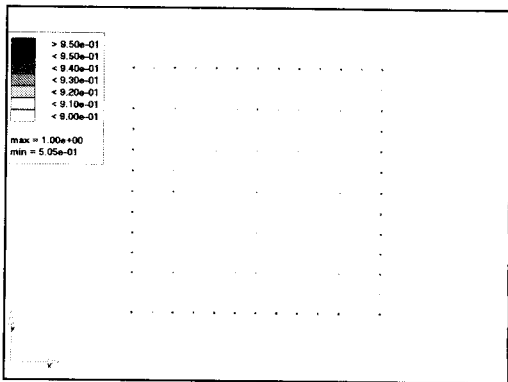


Fig. 10 Density plot of spacers over 90%

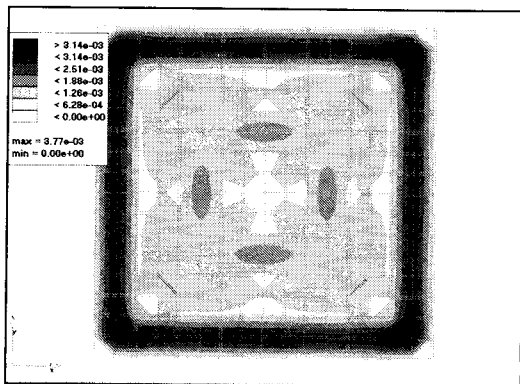


Fig. 11 Displacement of FED at final state

다음은 최종 상태에서의 Von Mises 응력의 분포를 유리판과 스페이서에 대해 알아 보기로 한다. 최종 상태에서의 Von Mises 응력을 진공 패널의 측면에서 보면 Fig.12와 같다. 여기서 z 방향에서의 중간점(패널 두께 방향에서의 중간점) n1, n2, n3로 형성되는 자르는 면(cutting plane)으로 모델을

절단하여 내부를 살펴보면 스페이서 부위의 응력 분포를 알 수 있다.

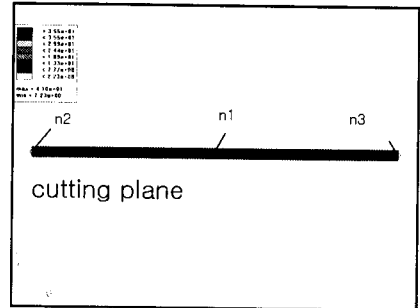


Fig. 12 Side view with cutting plane by n1, n2 and n3

먼저 기초 면과 디스플레이 면에 해당하는 유리판의 Von Mises 응력 분포를 보면, Fig.13 에서와 같이 각 모서리에 응력이 집중되고 최대값은 10 MPa 가량 되는 것을 알 수 있다.

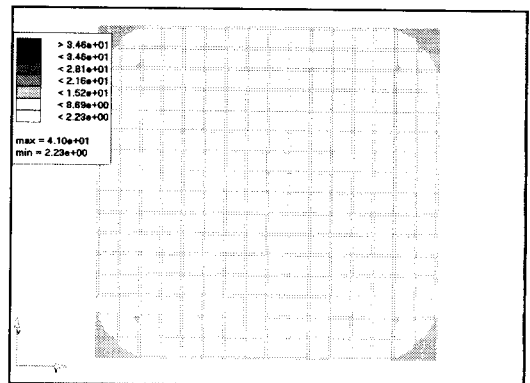


Fig. 13 Distribution of Von Mises stress of base and display face

진공 패널 내부에 있는 스페이서의 응력 분포를 보기 위해서는 Fig.12에서 정의한 자르는 면에 의해 패널을 잘라서 볼 수 있다. Fig.14는 이렇게 하여 얻어진 스페이서 부위의 Von Mises 응력 분포를 나타낸다. 최종 상태에서의 Von Mises 응력의 최대값은 41 MPa로서, 패널 외부에서는 볼 수 없었으나, Fig.14에서와 같이 패널 내부, 즉 3열 3행에 해당하는 스페이서 위치에서 발생하는 것을 알 수 있다. 최대 응력 41 MPa은 소다 유리의 파단 강도(fracture strength)인 50 MPa의 82%에

해당한다. 해석 결과를 살펴보면, 압력에 의해 지지부인 3행 3열의 스페이서가 압축 응력을 받으면서 최대 응력값을 나타냈음을 알 수 있다. 또한 Fig.14의 응력 분포와 Fig.11의 변위 분포를 살펴보면, 스페이서 모델의 밀도가 높은 곳에서 진공패널의 변위가 적고, 스페이서와 스페이서 또는 스페이서와 고정 모서리 사이에서 응력이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

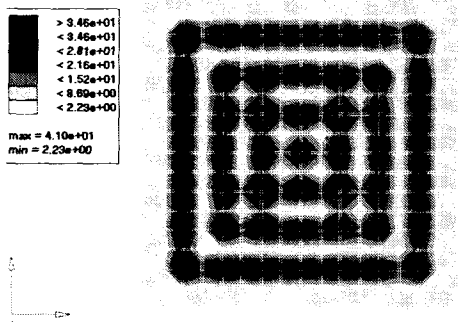


Fig. 14 Distribution of Von Mises stress of spacers

4. 결론

진공 패널에서 격자 배열로 스페이서를 설치할 경우에 모든 격자 부분에 스페이서를 배열하는 것은 비효율적이다. 구조물이 최대의 강성을 갖도록 하는 위상 최적화 설계 기법을 이용하면 격자 위치 중 최적의 스페이서 배치 방법을 찾을 수 있다. 본 문제에서는 다음과 같은 최적의 배치 방법을 얻었다.

- (1) 스페이서 모델의 입체 요소의 밀도는 스페이서의 배열을 결정하는 매개 변수(parameter)로 이용할 수 있다. 밀도값이 0.9 이상 나오는 부분을 선택할 경우, 스페이서를 격자 후보 위치의 모두에 설치하는 것보다 하나씩 건너 뛴 위치(본 문제에서는 3, 5, 7 행과 3, 5, 7 열과 중앙 위치)에 설치하는 것이 바람직하다.
- (2) 스페이서의 개수를 늘이거나 줄일 경우에는 밀도의 하한값을 높이거나 줄였을 때 나타나는 스페이서 모델의 입체 요소에 대한 밀도 분포에 따라 배치하는 것이 효율적이다.
- (3) 위상 최적화 설계는 상세 설계를 하기 전의

개념 설계 단계에서 수행되는 것이므로 최종적인 변형과 응력값을 정하기 위해서는 실제 형상의 스페이서를 모델화하여야 할 것이다. 스페이서의 초기 배치 단계에서는 위상 최적화 기법의 결과를 적용하는 것이 효과적인 방법이다.

후기

본 연구는 인덕대학 학술연구비의 일부 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. Tannas, L.E., "Flat-panel displays and CRTs," Van Nostrand Reinhold Company, New York, pp. 188, 1985.
2. 조용래, 문제도, 오재열, "평판 디스플레이용 진공 패키징 기술," Advance, 제 3 권, 제 4 호, pp. 2-11, 1995.
3. Min, S. and Kikuchi, N., "Optimal Design of Reinforced Structures Under Buckling Loads using the Homogenization Design Method," Third APC on Computational Mechanics, pp. 643-648, 1996.
4. Sasaki, Y. and Mikami, T., "Structural Reinforcement Optimization Using a Material Distribution Approach," Third APC on Computational Mechanics, pp. 637-642, 1996.
5. Bendsoe, M.P. and Kikuchi, N., "Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method," Comp. Mech. Appl. Mechs. Engng., pp. 197-224, 1988.
6. Brodie, I., Gernick, H.R., Holland, C.E. and Moessner, H.A., "Field Emission Cathode Based Flat Panel Displays Having Polyimide Spacers," United States Patents, No. 5063327, 1991.
7. 김희수, 조영래, 문제도, 오재열, 정태은, 정효수, "평판 디스플레이용 진공 패널에서 유리 기판이 받는 응력 및 변위 분포에 관한 연구," 한국재료학회지, 제 8 권, 제 12 호, pp. 1121-1126, 1998.
8. "OptiStruct User's Manual," Altair Computing, Inc., 1998.
9. Dowling, N.E., "Mechanical Behavior of Materials," Prentice Hall, New Jersey, pp. 80, 1993.