

연기/열 차단스크린의 최적설계에 관한 연구

이동명, 김엽래
경민대학 소방과학과

A Study on the Optimal Design of Smoke/Heat Interception Screen

Lee D. M., Kim Y. R.
Kyungmin College

1. 서 론

화재로 인한 인명안전의 영향에는 화재발생장소 부근에서의 화열에 의한 직접적인 영향 뿐만 아니라 화재기류에 의해 운반되어 건축물 내에 확산되는 연기의 영향을 무시할 수 없다. 고층 또는 대규모 건축물의 화재에서 수많은 희생자가 나올 때는 반드시라고 해도 좋을 만큼 연기가 주요원인이다. 건물의 화재로부터 발생하는 연기가 인명안전에 매우 위험한 요소로 작용하는 근본적인 이유는 연기는 연소가스가 유통과정에서 혼합되는 공기에 의해 희석된 것으로 화염이나 연소직후의 가스보다 위험도는 낮지만, 연기가 인명위험의 가장 중대한 원인이 되는 것은 화염에 비해 연기가 건물 내에서 확산되는 속도가 매우 빠르기 때문이다.

우리나라도 연기에 의한 사망 비율이 45% 이상을 차지하고 있음을 마스크로부터 보도된 바 있다. 특히, 1999년 6월 경기도 화성 씨랜드나 10월 인천 노래방, 2003년 대구지하철, 울산, 청주의 아파트와 같은 대형화재의 경우에서도 연기로 인해 사망·사고를 더욱 더 가중시켰다. 우리나라 주거생활의 약 80% 이상이 아파트라는 점을 감안할 때 아파트 화재 시 연기에 대한 대책이 그 무엇보다 시급하며, 인명안전을 도모하기 위해 연기의 제어수단과 기술적 대책을 강구하는 것이 건축물 화재에서 반드시 필요하다.

본 연구에서는 건축물 화재에서 방화문과 바닥면의 틈새를 막고 연기와 열의 누설·확산을 막을 수 있는 차단시스템을 개발하고자 한다. 차단시스템을 개발하기에 앞서 차단시스템 중 가장 핵심부품인 차단스크린의 설계기술을 소개하고자 한다. 첫째, 화재 시 차단스크린의 표면온도상승에 의한 여러 가지 불안정한 특성(열변형, 열균열, 부력현상 등)을 해결하기 위한 해석적 이론을 제시하고, 둘째, 이들 특성 즉, 제연구역으로부터 발생하는 차압과 차압으로 발생하는 공기의 유체부력에 의한 역학적인 힘과 연기류 등에 의한 열변형을 최소화할 수 있는 차단스크린의 최적설계 알고리즘과 유한요소 범용 해석코드인 ANSYS®와 함께 활용할 수 있는 해석기법을 제시하며, 셋째, 알고리즘과 해석기법을 바

탕으로 열기류에 의한 열변형의 최소화와 열부하를 최대한 흡수할 수 있도록 열용량이 증대될 수 있는 최적점을 제시함과 동시에 중량 최소화를 이룰 수 있도록 최적 해를 구하였다.

2. 차단스크린의 열변형 해석

차단스크린은 화재발생 시 방화문과 바닥면 사이의 틈새를 막는 것은 물론 제연구역에 형성되는 차압이나 화재구역의 유체부력에 의해 발생하는 역학적인 힘과 열기류에 의한 열변형에도 견뎌낼 수 있어야 한다. 차단스크린은 방화문의 가장 대표적인 크기인 2100×900mm을 기준으로 크기를 정하고 방화문 하부에 설치되도록 Fig. 1과 같이 형상을 설정하였다. 방화문과 바닥면 사이의 틈새를 차단 실링부는 열기류의 평균온도(약 500℃)와 바닥면의 밀착성을 고려하여 유연하고 열기류의 온도에도 견딜 수 있도록 재질을 선정하고 형상을 설정하였다.^{1,2)}

2.1 온도분포 해석

차단스크린의 온도분포를 해석하기 위해서는 화재구역에서 발생하는 열기류와 제연구역의 냉각층의 열전달 경계조건을 알아야 한다. 화재에 의한 열전달은 일반적으로 비정상 상태이지만 열기류의 온도변화에 비해 차단스크린의 온도변화는 비교적 작고, 냉각층에서의 온도변화는 무시할 수 있는 정도라고 하면 차단스크린의 열전달 현상은 정상상태로 가정할 수 있다. 일반적인 정상상태의 열전도 방정식과 경계조건은 열원이 없는 경우에 식(1)과 같이 표현할 수 있다³⁾.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0$$

$$\Gamma_h : q = h(T - T_\infty) \quad (1)$$

$$\Gamma_q : q = q_0$$

$$\Gamma_T : T = T_0$$

여기서 T 와 k 는 온도와 열전도도(thermal conductivity), Γ_h , Γ_q , Γ_T 는 각각 대류, 열속, 온도 경계조건이 주어진 경계, h 와 T_∞ 는 대류 열전달계수와 화재 시 주위온도, q 는 스크린의 표면에 수직인 방향의 열속(heat flux), T_0 와 q_0 는 경계에서 주어진 온도와 열속을 각각 나타낸다. 열전도수 해석을 위한 다른 경계조건으로 복사 열전달을 들 수 있으며, 차단스크린에 가해지는 복사 열전달은 연기나 CO₂와 같은 연소가스 등의 열기류로부터 복사에너지의 합으로 이루어진다.

따라서 차단스크린의 온도분포를 유한요소법으로 해석하기 위해서는 차단스크린의 각 위치에서 대류, 열속, 온도경계조건 중에서 한 가지의 경계조건이 주어져야 한다. 온도경

계조건을 사용하려면 차단스크린의 상당히 많은 위치에서 온도가 측정되거나 보간법에 의해 온도를 계산한 후 온도경계조건으로 사용할 수 있다. 열속 경계조건을 사용하려면 앞서 측정된 두 위치의 온도로부터 식(2)을 사용하여 열속을 계산하여 경계조건으로 사용할 수도 있다.

$$q = -k \frac{T_2 - T_1}{\Delta s} \quad (2)$$

여기서 Δs 는 차단스크린의 두께이고, T_2 와 T_1 은 각 위치에서 측정된 온도를 나타낸다. 이 방법은 차단스크린의 온도를 직접 측정해야하는 어려움과 보간법에 의한 오차로 인해 정확도가 떨어진다는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 차단스크린의 온도분포해석을 위하여 대류 경계조건을 적용하고자 한다. 이를 위해 식(1)에 나타난 바와 같이 대류 열전달계수 h 와 차단스크린을 둘러싼 유체의 주위온도 T_∞ 가 필요하다. 차단스크린에서 대류열전달이 이루어지는 경계면은 Fig. 1과 같이 두 부분(경계구역 I : 화재구역, 경계구역 II : 비 화재구역)으로 나눌 수 있다.

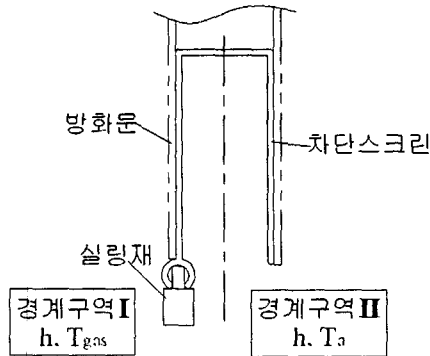


Fig. 1 Convection boundary condition applied to interception screen

열전달계수 h 는 차단스크린의 재질에 따라 정의되고, 주위온도 T_∞ 는 Fig. 1에 표시된 바와 같이 차단스크린의 두 경계구역(T_{gas} : 화재에 의한 열기류 온도, T_a : 비 화재구역의 온도)별로 정의할 수 있다. 화재에 의한 열기류 온도 T_{gas} 는 800℃, 비 화재구역의 온도 T_a 는 20℃로 설정하였다.

하지만 화재에 의한 열기류의 온도는 압력과의 관계가 있기 때문에 식(3)의 폴리트릭 변화에 의해 구해야 정상이다. 식(3)에서 T_i 는 초기 온도이고, p_i 는 초기 압력이며, n 은 폴리트릭 지수를 의미한다. 본 연구에서는 계산의 단순화를 위해 이 과정은 생략하였다.

$$T = T_i \left(\frac{p_i}{P_i} \right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (3)$$

2.2 열변형 해석

차단스크린은 차압이나 유체부력에 의해 발생하는 역학적인 힘과 열기류로부터 견뎌내야 하므로 차단스크린에 작용하는 퍼텐셜 에너지를 π_p 라고 하면, $\pi_p = \pi - W_p$ 로 정의할 수 있다. π 는 차단막의 변형률 에너지가 되고, W_p 는 차단막에 가해지는 외부에서 가해진 힘을 의미한다. 만일 퍼텐셜 에너지 π_p 가 각 방향의 변위 u, v, w 의 함수라고 가정하면, 최소 퍼텐셜 에너지 원리로부터 평형상태식은 응력(σ)과 변형률(ϵ), 힘(f)과 변위(u)의 관계를 이용하여 식(2)~(5)와 같이 나타낼 수 있다²⁾.

$$[\sigma] = [D] (\{\epsilon\} - \{\epsilon_T\}) \quad (4)$$

$$\{\epsilon_T\} = \alpha (T - T_0) \quad (5)$$

$$\{f\} = [K] \{u\} \quad (6)$$

식(4)에서 $[D]$ 는 차단스크린의 탄성행렬, $\{\epsilon\}$ 는 차압이나 유체부력에 의해 발생하는 변형률 벡터, $\{\epsilon_T\}$ 는 열기류에 의한 열변형률 벡터를 의미하고, 식(5)에서 α , T , T_0 는 열팽창 계수, 최종온도, 초기온도를 의미한다. 식(6)에서 $[K]$ 는 차단스크린의 탄성행렬을 의미한다. 또한 화재구역의 열기류가 정상상태로 차단 스크린에 열전달이 이루어진다고 가정하면, 차단스크린의 각 위치에서 발생하는 열속과 온도 T 는 식(1)의 대류 경계조건으로부터 구할 수 있다. 온도 T 로부터 식(5)의 열변형률 벡터 $\{\epsilon_T\}$ 가 구해지고, $\{\epsilon\}$ 가 식(6)으로부터 구해지면 열변형을 구할 수 있고 열변형으로부터 열응력을 구할 수 있다.

3. 차단스크린의 최적설계

3.1 최적설계의 수식화

유한차원의 최적설계 문제는 목적함수 $f(x,p)$ 와 제한조건 함수 $g(x,p)$ 로 구성되며 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Minimize } f(x,p) \quad i=1, 2, \dots, I \quad (7)$$

$$\text{Subject to } g(x,p) \geq 0 \quad j=1, 2, \dots, J \quad (8)$$

$$x_l \leq x \leq x_u \quad (9)$$

여기서 x 는 n 개의 설계변수 벡터이고 p 는 m 개의 시스템변수 벡터이고 I 는 목적함수의 개수를 J 는 제한조건의 개수를 의미한다.

차단스크린의 열변형 최적설계를 위해서는 식(10)과 같이 최대 열변형 PYD와 총 중량 PYW 2가지의 값을 목적함수로 선정하였으며 최대 열변형과 총 중량의 초기 값을 2가지의 제한조건으로 고려하여 최적설계 수식화를 하였다.

여기서 아래첨자 MAX는 단일 목적함수의 최적설계 결과로부터 구한 최대값을 의미하며, MIN은 단일 목적함수로부터 구한 최소값을 의미하며, 위첨자 T 는 2가지 제한조건의 목표값을 의미하며 본 연구에서는 초기값을 적용하였다. 2가지 목적함수는 각각의 목적함수의 최대값과 최소값을 사용하여 식(10)과 같이 정규화한 후에 최적설계를 수행하였다.

$$\text{Minimize } \left[\frac{(\mu_{PYD})_{MAX} - \mu_{PYD}}{(\mu_{PYD})_{MAX} - (\mu_{PYD})_{MIN}} \times \frac{(\mu_{PYW})_{MAX} - \mu_{PYW}}{(\mu_{PYW})_{MAX} - (\mu_{PYW})_{MIN}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{Subject to } g(\mu_{PYD}) \geq \mu^T_{PYD} \quad (10)$$

$$g(\mu_{PYW}) \geq \mu^T_{PYW}$$

식(10)과 같이 제한조건이 있는 비선형 최적설계 문제를 해결하는 방법은 여러 가지가 있지만 본 연구에서는 ANSYS에 의한 차단스크린의 해석결과로부터 얻어진 최대 열변형 및 총 무게에 SQP(sequential quadratic programming)의 최적설계기법 알고리즘을 적용하여 최적설계를 수행하였다⁴⁾.

3.2 유한요소 모델링 및 수치해석 조건

차단스크린은 유한요소해석을 Fig. 2와 같이 모델링하였고, 차단막의 유한요소 모델링에 사용된 유한요소는 차단막의 길이에 비해 두께가 얇기 때문에 ANSYS®의 3차원 셀(shell)요소를 사용하였다⁵⁾. 하중조건으로 제연구역의 차압 40Pa과 연기에 포함된 열기류의 온도 약 500℃을 부가시켰다.

차단스크린의 최적설계는 연기에 포함된 열기류에 의한 열특성과 중량의 경계조건으로부터 열변형을 최소화하는 것이므로, 열변형과 중량 최적화를 위하여 Fig. 2의 그림에 나타낸 바와 같이 차단스크린의 두께(t_1)가 1~3 mm로 변화시키면서 실링재의 두께(t_2)를 1.5~5 mm로 변화시켰다. 차단스크린은 휨 강성, 제작과 제품의 가격적인 측면을 고려하여 두랄루민의 재질을 선택하고, 실링재는 불연재의 조건과 밀착성을 고려하여 테플론으로 선정하였다. 차단스크린과 실링재의 물리적 특성은 Table 1과 같다.

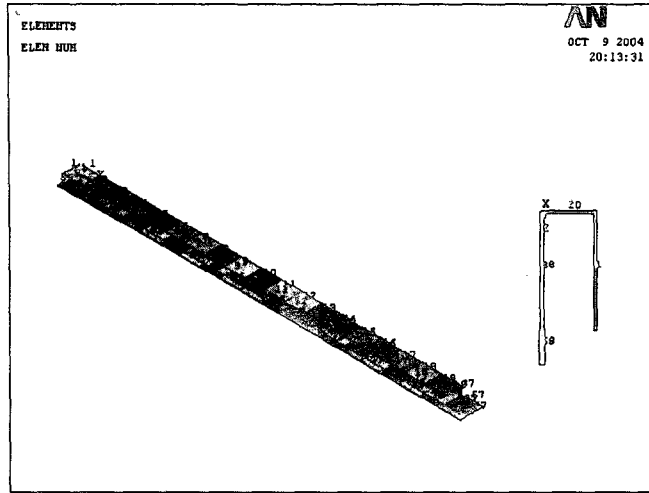


Fig. 2 Finite elements model of interception screen

Table 1. Physical characteristics of interception screen

차 단 막		실 링 재	
재 질	Al5052 계열	재 질	Teflon
탄성계수	70GPa	탄성계수	0.5GPa
허용응력	0.48GPa	허용응력	1.0GPa
열팽창계수	$1.15 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$	열팽창계수	$8 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$
열전도율	204W/mK	열전도율	0.25W/mK
크 기	850×35×16×t1	크 기	850×10×t2

4. 수치해석 및 최적화

차단스크린의 열변형과 중량이 최소화되기 위해서는 식(10)의 제한조건인 열변형 PYD와 총 중량 PYW 값이 최소화되어야 하므로, 차단스크린의 두께(t1)와 실링재의 두께(t2)를 최소화하면 최적화가 이루어진다.

차단스크린의 최적화는 첫째, 두께(t1)와 실링재의 두께(t2)가 변화될 때 열기류에 의한 온도분포를 ANSYS®로부터 계산하고, 둘째 계산된 온도와 차압으로부터 열변형을 다시 ANSYS®로 계산하고, 셋째 SQP 최적화 알고리즘을 이용하여 식(10)의 목적함수와 제한조건을 적용시켜 최적화점을 찾는다.

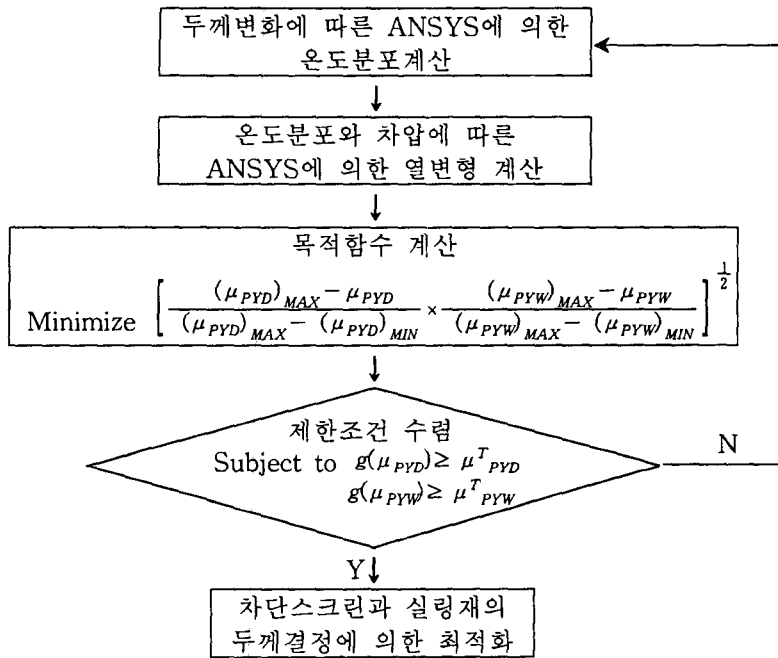


Fig. 3 Procedure of optimal design

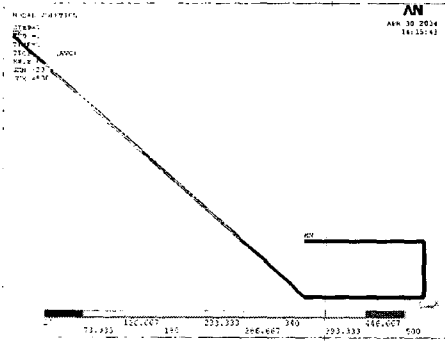


Fig. 4 Temperature distribution of interception screen

Fig. 4는 열기류가 실링재로부터 차단스크린으로 전달될 때 온도분포를 나타낸 것이며, 열기류가 실링재로부터 차단스크린으로 전달될 때 사실상 차단스크린의 두께에 따라 Fig. 4와 같이 온도변화가 거의 같게 나타났다.

Table 2~4는 차단스크린의 두께변화에 따라 Fig. 4에서와 같이 계산된 차단스크린의 온도분포와 차압으로부터 ANSYS®로 계산된 차단스크린의 최대 열변형을 나타낸 것이다. 이들 변형의 크기는 화재 시 차압에 의한 유체부력과 열기류에 의해 차단스크린이 각 방향으로 바닥

면과의 틈새(들뜸)를 의미하며, 차단스크린의 길이방향 양끝부분에서 가장 큰 틈새를 보여주고 있다. Table 2~4에 나타낸 바와 같이 실링재의 두께(t2)가 두꺼워지면 질수록 최대 열변형이 커지는 것으로 나타났다. 이것은 실링재의 두께가 두꺼워지면 질수록 강체로 변하여 차압이나 열기류가 차단스크린에 더 크게 작용함을 의미한다. 또한 차단스크린과 실링재의 두께가 비슷할 경우 각 방향의 변위 값의 폭이 그다지 크지 않음을 알 수 있다. 즉, 차단스크린은 강도측면보다 강성적인 측면을 더 고려해야 함을 의미한다.

Table 2 Thermal displacements of interception screen(For t1=1mm)

t2(mm)		1.5	2.0	3.0	4.0	5.0
최대 열변형(mm)	u _x	0.978	1.149	1.461	1.739	1.989
	u _y	0.0931	0.1247	0.185	0.245	0.304
	u _z	0.406	0.422	0.452	0.483	0.513
중량(kgf)		0.293				

Table 3 Thermal displacements of interception screen(For t1=2mm)

t2(mm)		1.5	2.0	3.0	4.0	5.0
최대 열변형(mm)	u _x	0.679	0.769	0.941	1.102	1.252
	u _y	0.0367	0.0489	0.0732	0.0974	0.121
	u _z	0.380	0.387	0.402	0.416	0.430
중량(kgf)		0.390				

Table 4 Thermal displacements of interception screen(For t1=3mm)

t2(mm)		1.5	2.0	3.0	4.0	5.0
최대 열변형(mm)	u _x	0.575	0.652	0.750	0.878	0.965
	u _y	0.0176	0.0230	0.0353	0.0469	0.0586
	u _z	0.372	0.379	0.384	0.397	0.401
중량(kgf)		0.585				

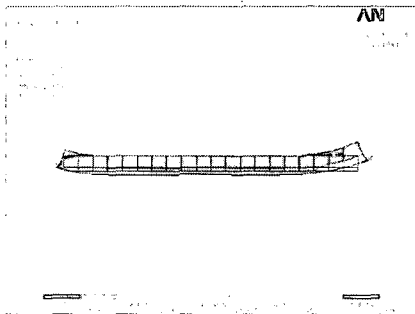


Fig. 5 Thermal displacements of x-direction

Fig. 3의 최적설계 절차에 따라 Table 2~4에 계산된 열변형과 중량을 최소화할 수 있는 최적점을 SQP 최적화 알고리즘을 이용하여 차단스크린의 두께 t1=1.0mm, 실링재 두께 t2=1.5mm의 최적점을 찾았다. 최적화된 차단스크린에 차압과 열기류가 전달될 때 x, y, z 방향의 열변형을 나타내면 Fig. 5~7과 같다.

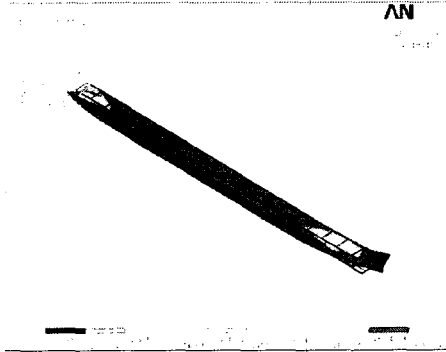


Fig. 6 Thermal displacements of y-direction

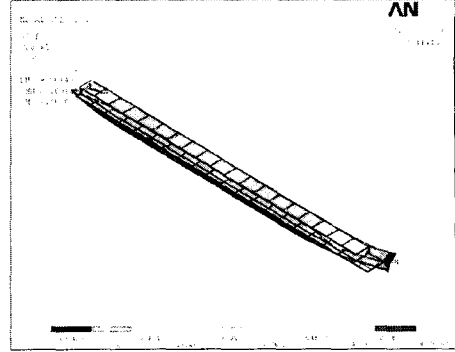


Fig. 7 Thermal displacements of z-direction

5. 결 론

본 연구에서는 화재시 연기와 열을 차단할 수 있는 차단스크린의 최적설계(열변형과 중량 최적화)를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 차단스크린의 열변형과 중량을 최적화할 수 있는 최적설계 알고리즘과 기법을 제시하였다.
2. 차단스크린은 방화문의 크기에 따라 길이가 커지게 됨으로 강도적인 측면보다 강성적인 측면에서 최적설계가 이루어져야 할 것으로 본다.
3. 차압과 화재 시 발생하는 유체부력에 의해 발생할 수 있는 역학적인 힘과 열부하로부터 발생하는 하중조건을 최소화할 수 있는 차단스크린의 최적설계방향을 제시하였고, 차단스크린의 형상설계에 활용함으로써 연기/열 차단 시스템의 엔지니어링 데이터를 구축하는데 도움이 되었다.

참고문헌

1. 이동명, 원희섭, 김엽래, “방화문용 연기 차단막의 응력해석에 관한 연구”, 학술발표대회 논문집, 한국방재학회, pp.439~444(2004)
2. 이동명, “방화문용 연기/열 차단막의 변위-열응력 해석에 관한 연구”, 한국화재소방학회, 제8권 제3호, pp.73~78(2004)
3. J.P. Holman, Heat Transfer, 4th ed., McGraw-Hill, 1976.
4. J.S. Arora, Introduction to Optimum Design, McGraw-Hill, 1989.
5. ANSYS, Inc. Co., ANSYS(R) Release 5.7 and Manual, all(2000)