

방화문용 연기/열 차단막의 변위-열응력 해석에 관한 연구 A Study on the Displacements-Thermal Stress Analysis of Smoke/Heat Interception Screen in Fire Door

이 동 명[†]

Dong-Myung Lee[†]

경민대학 소방학과
(2004. 5. 7. 접수/2004. 6. 4. 채택)

요 약

본 연구는 화재가 발생할 때 방화문과 바닥 면의 하부 틈새를 막아 연기와 열의 누설 또는 확산을 막을 수 있는 연기/열 차단막에 대하여 연구하였다. 본 연구에서는 제연구역의 차압과 화재발생 시 발생하는 연기의 유체부력에 의한 역학적 힘과 열기류를 고려하여 유한요소 해석코드인 ANSYS[®]을 이용하여 해석하였다. 연구결과로부터 하중조건을 최소화할 수 있는 연기/열 차단막의 최적설계의 방향을 제시하였고, 연기/열 차단막의 형상설계에 활용함으로써 연기/열 차단 시스템의 엔지니어링 데이터를 구축하는데 도움이 되었다.

ABSTRACT

This study investigated about smoke/heat interception screen that can protect underneath of fire door and floor when occur fire, and keep out leakage or diffusion of smoke/heat. In this study, to considered differential pressure form smoke control area and mechanical force by fluid buoyancy of smoke when occur fire and stream of heat, are analyzed to used ANSYS[®] of finite element analysis code. It presented direction of optimal design of smoke/heat interception screens that can minimize loading condition from study results, and helped that construct basic engineering data of smoke/heat interception systems as that utilize its shape design of smoke/heat interception screens.

Keywords : Smoke, Heat, Displacement, Thermal stress, Interception screen, Finite element analysis

1. 서 론

화재로 인한 인명안전의 영향에는 화재발생장소 부근에서의 화열에 의한 직접적인 영향 뿐만 아니라 화재기류에 의해 운반되어 건물 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 가

장 중대한 원인이 되는 것은 화염에 비해 연기가 건물 내에서 확산되는 속도가 매우 빠르기 때문이다.

이러한 현상을 전형적으로 보여주는 사례가 1980년 11월 미국 Las Vegas의 MGM Grand 호텔에서 발생한 화재사고이다. 화재는 1층에서 발생하였지만 화재 층이 아닌 최상층 24층에서도 사망자가 발생하였다. 이러한 사실은 화재발생 후 빠르게 확산된 독성과 질식성의 연기에 기인한 것으로 조사결과 밝혀졌다. 우리나라의 경우도 연기에 의한 사망 비율이 45% 이상을 차지하고 있음을 매스컴으로부터 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.

[†] E-mail: ldong@kyungmin.ac.kr

따라서 연기의 제어수단과 기술적 대책을 강구하는 것이 건물화재에서 인명안전을 도모하기 위해 반드시 필요하다. 연기제어의 기술적 대책 중의 하나가 건축법과 소방법에 의한 특별피난계단, 피난계단 및 비상용 승강기 승강장에 사용되는 방화문이 그 일례라고 할 수 있다. 방화문은 건물에 화재가 발생할 경우 한결 같이 인명안전을 위해 화기와 연기가 다른 구역으로 누출되는 것을 방지하기 위하여 폐쇄 및 해정방법이나 연기의 누설·확산 등을 관련법규에서 엄격히 규정하고 있지만 전혀 그렇지 못한 실정이다. 특히 우리나라 주거생활의 약 80% 이상이 아파트라는 점을 감안할 때 아파트 화재 시 방화문에 대한 연기대책은 그 무엇보다 시급하다.

본 연구에서는 방화문과 바닥면의 틈새를 막고 연기와 열의 누설·확산을 막을 수 있는 연기/열 차단 시스템을 개발하는 것이 최종목표이다. 차단시스템을 개발하기에 앞서 연기/열 차단 시스템의 가장 중요한 부품 중의 하나인 차단막을 제연구역으로부터 발생하는 차압과 차압으로 발생하는 공기의 유체부력에 의한 역학적인 힘과 연기 속의 열기류에 의한 열변형 등을 유한요소 범용 해석코드인 ANSYS®을 이용하여 해석하였고, 이들 결과로부터 역학적인 힘과 열변형을 최소화하는 최적화된 차단막 설계의 방향을 제시하였으며, 차단막의 형상설계에 활용하였다.

2. 차단막의 형상설정

차단막은 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. 차단막의 크기는 방화문의 가장 대표적인 크기인 2100×900 mm을 기준으로 하고 방화문 하부에 설치되도록 Fig. 1과 같은 형상으로 1차 형상설계가 이루어졌다. Fig. 1에서 “A” 부위는 차단 시스템을 방화문에 설치해서 문의 열고 닫힐 때 차단막이 상하운동을 자유로이 할 수 있도록 하기위해 안내 축이 삽입되는 부분이고, “B” 부위는 화재 시 발생하는 차압과 연기의 부력

을 최대한으로 줄이기 위해 차단막의 윗부분을 잘라낸 것이며, 틈새를 차단 실링부는 열기류의 평균온도(약 500°C)와 바닥면의 밀착성을 고려하여 유연하고 열기류의 온도에도 견딜 수 있도록 재질을 선정하고 형상을 설정하였다.¹⁾

3. 수치해석

3.1 지배방정식

차압이나 유체부력에 의해 발생하는 역학적인 힘과 열기류로 인해 차단막에 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 식 (1)과 같이 주어진다.^{2,3)}

$$\delta\pi_p(u, v, w) = \delta\pi(u, v, w) - \delta W_p(u, v, w) = 0 \quad (1)$$

식 (1)에서 변형률 에너지 $\delta\pi$ 는 응력(σ)과 변형률(ϵ), 외부에서 가해지는 힘 δW_p 는 힘(f)과 변위(u)의 관계를 이용하여 행렬식으로 표시하면 식 (2)~(5)와 같다.

$$\delta\pi_p(u, v, w) = \{\delta\epsilon\}^T \{\sigma\} - \{\delta u\}^T \{f\} = 0 \quad (2)$$

$$\{\sigma\} = [D] \{\epsilon\} - \{\epsilon_T\} \quad (3)$$

$$\{\epsilon_T\} = \alpha(T - T_0) \quad (4)$$

$$\{f\} = [K] \{u\} \quad (5)$$

식 (3)에서 [D] 차단막의 탄성행렬, $\{\epsilon_T\}$ 는 연기의 열기류에 의한 열변형률 벡터를 의미하고, 식 (4)에서 α, T, T_0 는 열팽창 계수, 최종온도, 초기온도를 의미한다. 식 (5)에서 [K]는 차단막의 탄성행렬을 의미한다.

연기에 포함된 열기류가 실링부를 통하여 정상 상태로 차단막에 열전달이 이루어진다고 가정하면, 전도와

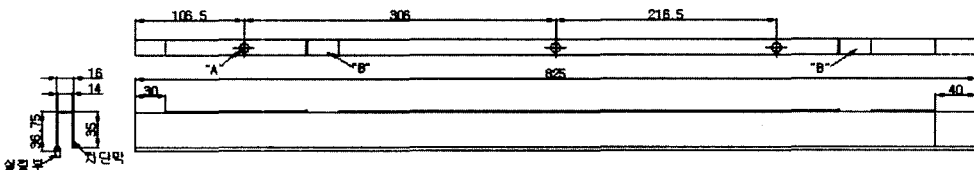


Fig. 1. Shape of smoke/heat interception screen.

대류의 열유속 q 은 동일한 값을 가지게 된다. 차단막에 가해지는 열유속은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있고, 식 (6)에서 dT 는 각 절점에서의 변화온도, dx 는 변화거리, k 는 열전도 계수, h 는 대류열전달 계수, T_w 는 열기류의 온도, T_∞ 는 대기온도가 된다. 식 (6)을 행렬형태로 바꾸면 식 (7)과 같이 쓸 수 있다.^{2,3)}

$$q = -k \frac{dT}{dx} = h(T_w - T_\infty) \quad (6)$$

$$[K_h]\{T\} = \{Q\} \quad (7)$$

식 (7)에서 $[K_h]$ 는 열전도와 대류열전달의 행렬, $\{Q\}$ 는 열유속 벡터, $\{T\}$ 는 실링부에서 차단막으로 전달되는 각 절점에서의 온도로 식 (4)의 최종온도 T 에 대입된다.

3.2 유한요소 모델링 및 수치해석 조건

차단막은 실제 작동상태와 조립형태를 고려하고 1차 설계된 형상 Fig. 1로부터 Fig. 2와 같이 모델링하였고, 차단막의 유한요소 모델링에 사용된 유한요소는 차단막의 길이에 비해 두께가 얇기 때문에 ANSYS®의 3차원 쉘(shell 157)요소를 사용하였다.⁴⁾ 그리고 차단막은 연기에 포함된 열기류에 의한 열특성과 변형을 연성으로 해석해야 하므로, 수치해석의 조건으로 제연구역의 차압 50 Pa과 연기에 포함된 열기류의 온도 약 500°C을 하중으로 부가시켰다.^{5,6)} Fig. 2의 그림에 나타난 바와 같이 차단막의 두께(t_1)가 1~3 mm로 변할 때, 실링부의 두께(t_2)를 1.5~5 mm로 변화시키면서 각 두께의 변화에 대한 차단막의 변위와 열응력을 시뮬레이션하였다.

차단막은 휨 강성, 제작과 제품의 가격적인 측면을

Table 1. Physical characteristics of smoke/heat interception screen

차단막		실링부	
재질	Al5052 계열	재질	Teflon
탄성계수	70 GPa	탄성계수	0.5 GPa
허용응력	0.48 GPa	허용응력	1.0 GPa
열팽창계수	$1.15 \times 10^{-5} / ^\circ C$	열팽창계수	$8 \times 10^{-5} / ^\circ C$
열전도율	204 W/mK	열전도율	0.25 W/mK
크기	$850 \times 35 \times 16 \times t_1$	크기	$850 \times 10 \times t_2$

고려하여 두랄루민의 재질을 선택하고, 실링부는 불연재의 조건과 밀착성을 고려하여 테플론으로 선정하였다. 차단막과 실링부의 물리적 특성은 Table 1과 같다.⁷⁾

4. 해석결과 및 고찰

유한요소 모델링과 수치해석 조건으로부터 차압과 열기류에 의한 하중조건과 설치에 따른 경계조건을 유한요소 모델링에 적용하면 Fig. 3과 같다. Fig. 3은 차단막 횡방향의 하중조건과 경계조건을 나타낸 것이다.

차단막의 변위-열응력은 지배방정식과 수치해석조건을 바탕으로 열기류에 의한 온도분포와 함께 유한요소 범용해석 코드인 ANSYS®을 이용하여 연성으로 계산하였다. 즉, 실링부에서 차단막으로 열이 전달될 때 정상상태로 가정하고 각 절점에서의 온도를 식 (6)과 (7)로부터 계산한 후 이들 온도를 식 (3)~(5)에 대입하여 계산하게 된다. Fig. 4는 열기류가 실링부로부터 차단막으로 전달될 때 온도분포를 나타낸 것이다.

Fig. 4는 차단막의 두께 $t_1=1.0$ mm일 때 실링부의 두께 $t_2=1.5$ mm인 경우 열기류에 의한 온도분포를 나타

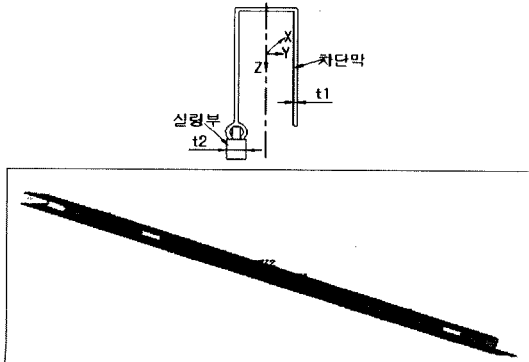


Fig. 2. Numerical modelling of smoke/heat interception screen.

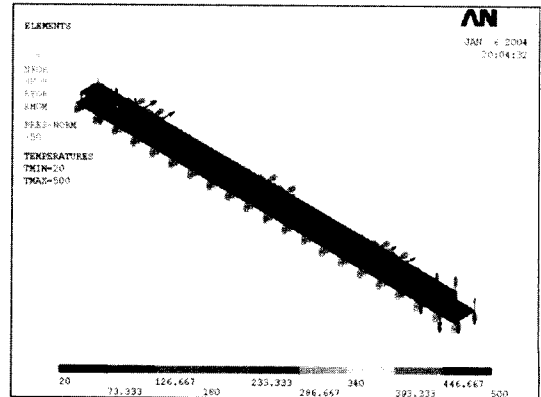


Fig. 3. Load and boundary conditions.

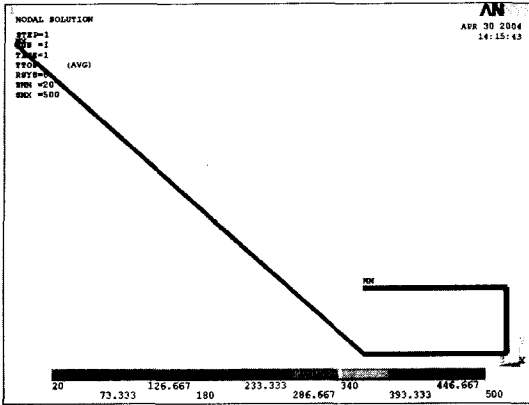


Fig. 4. Temperature distribution of smoke/heat interception screen.

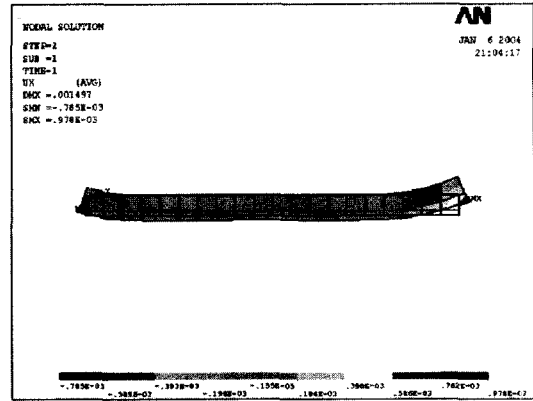


Fig. 5. Displacements of x-direction (For $t_1=1.0$ mm, $t_2=1.5$ mm).

낸 것이고, 차단막의 두께변화($t_1=1\sim 3$ mm)에 따른 실링부의 두께변화($t_2=1.5\sim 5$ mm)에 대한 온도분포도의 양상이 Fig. 4와 같게 나타나 두께변화에 따른 온도분포도를 생략하였다. Fig. 4의 경우를 살펴보면 열기류(500°C)가 실링부로부터 전달될 때 차단막은 20°C 로 전혀 열전달이 이루어지지 않고 있음을 알 수 있고, 본 연구에서 선정된 재질(테플론)을 사용해도 문제가 없을 의미한다.

Fig. 5~7은 차단막의 두께 $t_1=1.0$ mm일 때 실링부의 두께 $t_2=1.5$ mm인 경우 열기류가 차단막으로 열전달될 때 x, y, z 방향의 변위를 수치해석한 결과이며, 각 방향의 변위 등고선을 나타낸 것이다. 또한 차단막의 두께변화($t_1=1\sim 3$ mm)에 따른 실링부의 두께변화($t_2=1.5\sim 5$ mm)에 대한 변위분포도의 양상이 Fig. 5~7과 같게 나타나 두께변화에 따른 변위분포도를 생략하였다.

Fig. 5~7에서 각 방향의 변위분포를 살펴보면 차단막의 x방향인 길이방향으로 0.9 mm, y방향으로 0.09 mm, z방향으로 0.4 mm정도 휘어지는 것으로 나타났다.

이들 휨의 크기는 화재 시 차압에 의한 유체부력과 열기류에 의해 차단막이 각 방향으로 바닥면과의 틈새(들뜸)를 의미하며, 차단막의 길이방향 양끝부분에서 가장 큰 틈새를 보여주고 있다. 차단막의 두께 t_1 과 실링부 두께 t_2 의 변화에 대한 차단막 x, y, z방향의 최대 변위는 Fig. 8~10과 같다. Fig. 8~10에 나타낸 바와 같이 실링부의 두께 t_2 가 두꺼워지면 질수록 최대 변위가 커지는 것으로 나타났다. 이것은 실링부의 두께가 두꺼워지면 질수록 강체로 변하여 차압이나 열기류가 차단막으로 더 크게 작용함을 의미한다. 또한 차단막과 실링부의 두께가 비슷할 경우 각 방향의 변위 값의 폭이 그다지 크지 않음을 알 수 있다. 따라서 차단막

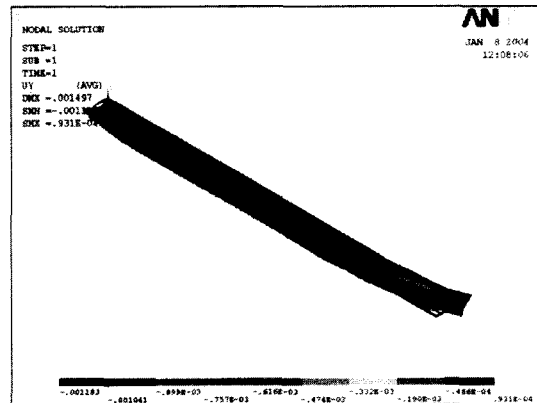


Fig. 6. Displacements of y-direction (For $t_1=1.0$ mm, $t_2=1.5$ mm).

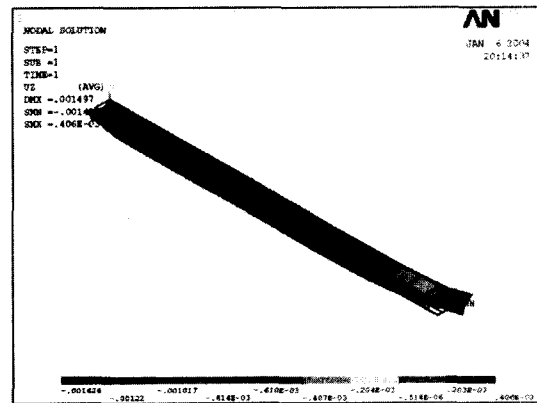


Fig. 7. Displacements of z-direction (For $t_1=1.0$ mm, $t_2=1.5$ mm).

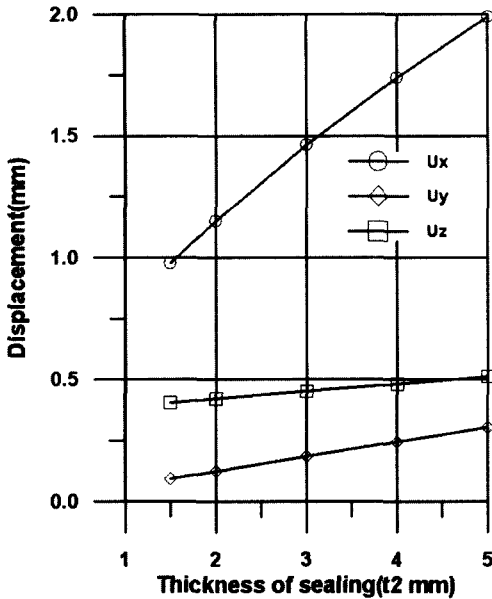


Fig. 8. Displacement of interception screen (Thickness t1=1.0 mm).

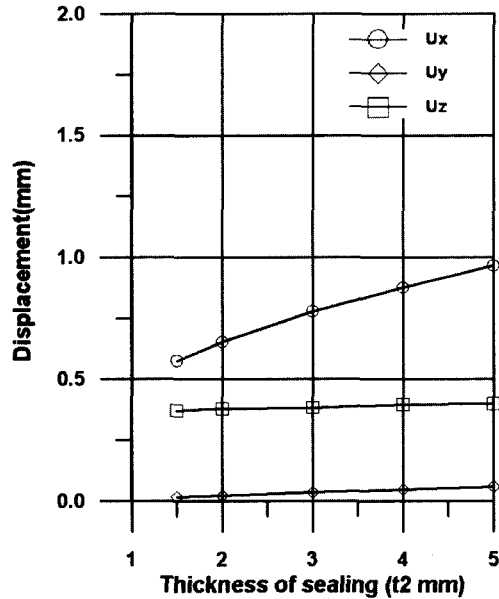


Fig. 10. Displacement of interception screen (Thickness t1=3.0 mm).

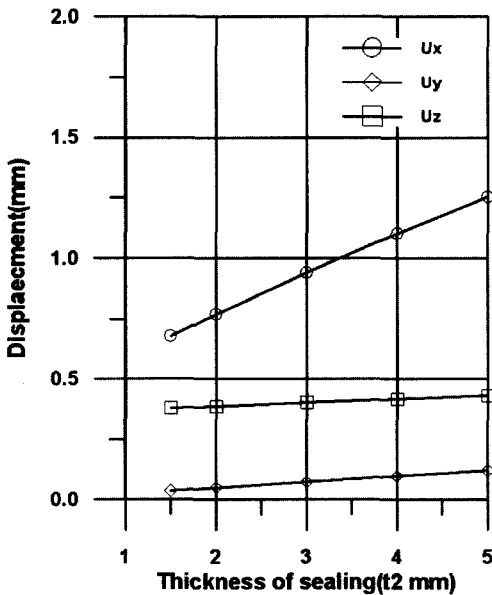


Fig. 9. Displacement of interception screen (Thickness t1=2.0 mm).

은 강도측면보다 강성적인 측면을 더 고려해야 할 것으로 본다.

수치해석결과 차단막의 두께에 대한 실링부의 두께

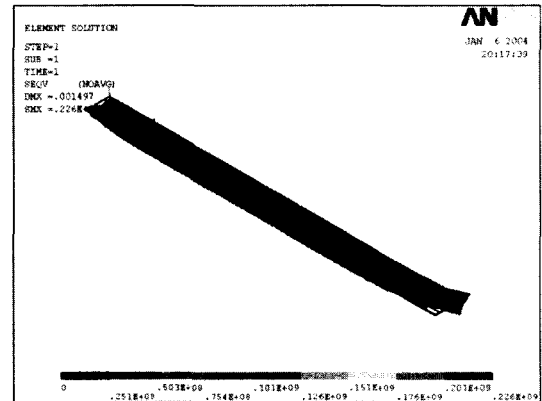


Fig. 11. Thermal stress (For t1=1.0 mm, t2=1.5 mm).

변화에 따른 열응력 분포양상 역시 변위분포에서처럼 똑같이 나타나 본 논문에서는 차단막의 두께 t1=1.0 mm 일 때 실링부의 두께 t2=1.5 mm인 경우만을 Fig. 11에 제시하였다. Fig. 11은 차단막의 열응력의 등고선 분포를 나타낸 것이다. Fig. 11의 경우 열응력 또한 변위가 가장 큰 차단막의 양끝부분에서 $\sigma=0.186$ GPa로 가장 크게 나타났다. 차단막의 양끝부분은 1차 설계에서 유체의 부력을 감소시키기 위해 잘라낸 "B" 부분에 응력집중 현상이 생긴 것이다. 차단막의 두께 t1과 실링부 두께 t2의 변화에 대한 차단막 각 방향의 최대 열

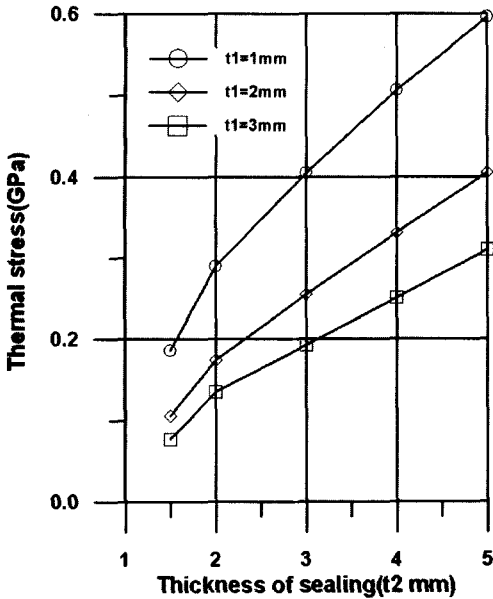


Fig. 12. Thermal stress of smoke/heat interception screen.

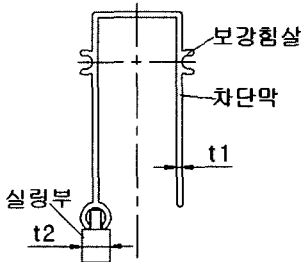


Fig. 13. Optimal design of smoke/heat interception screen.

응력은 Fig. 12와 같다.

Fig. 12에서 최대응력의 분포를 살펴보면 실링부의 두께 t_2 가 두꺼워지면 질수록 커지는 것으로 나타났다. 이것은 변위분포에서와 마찬가지로 실링부의 두께가 두꺼워지면 질수록 강체로 변하여 차압이나 열기류가 차단막에 더 큰 저항이 작용함을 의미하고, 또 차단막과 실링부의 두께가 같거나 두꺼워질수록 최대 열응력이 차단막 재질의 허용응력 0.48 GPa 보다 모두 작음을 알 수 있다. 따라서 차단막이 하중조건을 만족하려면 두께 t_1 을 두껍게 해야 함을 알 수 있다.

이상의 수치해석 결과로부터 차단막은 차단막 자체의 두께에 따른 강도측면보다 강성적인 측면을 더 고려해야 할 것으로 본다. 이러한 특성과 차단막의 재료비와 가공성을 고려하여 차단막의 형상을 Fig. 13과 같이 최적설계를 하였다. Fig. 13에서와 같이 차단막의

두께 $t_1=1$ mm로 설정하고 양끝부분의 발생하는 응력 집중 현상을 막기 위해 차단막의 양쪽 측면에 보강침살을 붙이는 것으로 형상 최적화를 하였다. 또한 실링부는 차단막에 변위와 열응력을 가장 작게 영향을 주는 두께 $t_2=1.5$ mm로 선택하여 설계하였다. Fig. 13과 같은 형상을 모델링하고 수치해석한 결과 변위-열응력 분포가 균일하게 나타났으며, 각 방향의 변위는 0.05 mm 이하의 아주 미미한 값으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 연기/열 차단막을 개발하기 위해 차단막과 실링부의 두께변화에 따른 변위-열응력 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 하중조건(차압과 열기류)에 의한 차단막은 방화문의 길이방향으로 많은 변형과 응력집중 현상이 발생하였다.
2. 차단막은 방화문의 크기에 따라 길이가 커지게 됨으로 강도적인 측면보다 강성적인 측면에서 형상설계가 이루어져야 할 것으로 본다.
3. 차압과 화재 시 발생하는 유체부력에 의해 발생할 수 있는 역학적인 힘과 열기류로부터 발생하는 하중조건을 최소화할 수 있는 최적화된 차단막의 설계방향을 제시하였고, 차단막의 형상설계에 활용함으로써 연기/열 차단 시스템의 엔지니어링 데이터를 구축하는데 도움이 되었다.

참고문헌

1. 이동명, 원희섭, 김엽래, “방화문용 연기 차단막의 응력 해석에 관한 연구”, 학술발표대회 논문집, 한국방재학회, pp.439-444(2004).
2. S. S. Rao, The Finite Element Method in Engineering, San Diego University, pp.303-332(1982).
3. I. H. Shames and C. L. Dym, Energy and Finite Element Method in Structural Mechanics, Hemisphere Publishing Co., pp.457-614(1993).
4. ANSYS, Inc. Co., ANSYS(R) Release 5.7 and Manual, All(2000).
5. NFPA 92A, “Recommended Practice for Smoke-control System”, All(1993).
6. 행자부 고시 제2001-21호, “특수 장소에 부설된 특별피난계단 및 비상용승강기의 승강장의 제연설비설치에 관한 기술기준”, All(2001).
7. 기계설계 도표편람 편집회, 기계설계 도표편람, 대광서림, pp.3a-1~3a-103(1979).