

방화문용 연기/열 차단시스템 개발에 관한 연구

이동명, 김엽래, 원희섭*
경민대학 소방과학과, *(주)새한공조

A Study on the Development of Smoke/Heat Interception Screen in Fire Door

Lee D. M., Kim Y. R., Won H. S.*
*Kyungmin College, *Saehan Co. Ltd.*

1. 서론

화재로 인한 인명안전의 영향에는 화재발생장소 부근에서의 화열에 의한 직접적인 영향뿐만 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 가장 중대한 원인이 되는 것은 화염에 비해 연기가 건물 내에서 확산되는 속도가 빠르기 때문이다.

이러한 현상을 전형적으로 보여주는 사례가 1980년 11월 미국 Las Vegas의 MGM Grand 호텔에서 발생한 화재사고이다. 화재는 1층에서 발생하였지만 그림 1과 같이 화재층이 아닌 곳에서 더 많은 사망자가 발생하였다. 심지어 최상층인 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.

전 세계적으로 유래 없이 인구밀도가 가장 높은 우리나라의 현실로 볼 때 건물의 고층화, 대형화, 복잡화, 다용도화는 어쩔 수 없는 것이라 보여 지지만, 이들 건물에서 화재에 따른 인명안전을 도모하기 위해 반드시 연기의 제어수단과 기술적 대책을 강구되어야만 한다. 그 기술적 대책 중의 하나로서 건축법과 소방법의 규정의해 특별피난계단, 피단계단 및 비상용 승강기 승강장에 사용되는 방화문이 그 일례라고 할 수 있다. 하지만 기존

의 방화문은 전실에 차압이 형성되면 차압에 의해 문이 열리고, 또 보건복지부법(장애인·노인·임상부 등의 편의증진보장에 관한 법)의해 설치한 경우 문턱을 제거하고 구조변경을 하지 않아 열과 연기가 건물의 바닥면과 제연문의 틈사이로 누출되는 등, 현재 사용되고 있는 제연문의 시공실태, 구조적 결함, 누설틈새, 폐쇄, 해정방법 등에 대한 문제점이 언론이나 TV를 통하여 수차례 지적된 바 있어 이에 대한 대책이 절실히 대두되고 있는 현실이다. 소방/방재 관련법에서는 건물에 화재가 발생할 경우 한결 같이 인명안전을 위해 화기와 연기가 다른 구역으로 누출되는 것을 방지하기 위하여 제연구역의 방화문에 대해 폐쇄 및 해정방법이나 연기의 누설 등을 엄격히 규정하고 있지만, 기존 방화문 제작업체들은 독자적인 노하우나 기술력이 아주 미약한 상태로 개발에는 거의 엄두를 내지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 관련법의 규정을 만족시키고, 기존 방화문의 문제를 해결할 수 있는 『방화문용 연기/열 차단시스템』을 개발함으로써 건물화재 시 화기나 연기가 다른 구역으로 누출되는 것을 방지할 수 있고, 이로 인해 화재로 인한 인명 및 물적 손실의 최소화 및 화재진압의 극대화, 소방기술의 기술력과 신뢰도 향상, 타 기술과의 synergy 효과, 수출증대 및 동종업계의 기술적 파급효과 증대, 국내 소방산업의 선진화를 위한 인프라 구축 등의 효과를 얻고자 함이다.

2. 차단 시스템 설계

2.1 시스템의 설계조건

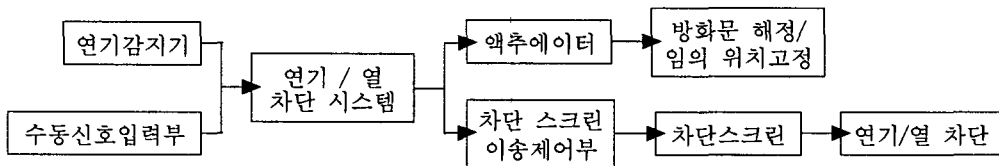
건축법, 소방법, 보건복지부법, NFPA 규정과 기타 기술적인 제반사항을 고려하여 차단 시스템의 설계조건을 표 1와 같이 설정하였다.

[표 1] 차단시스템의 설계조건

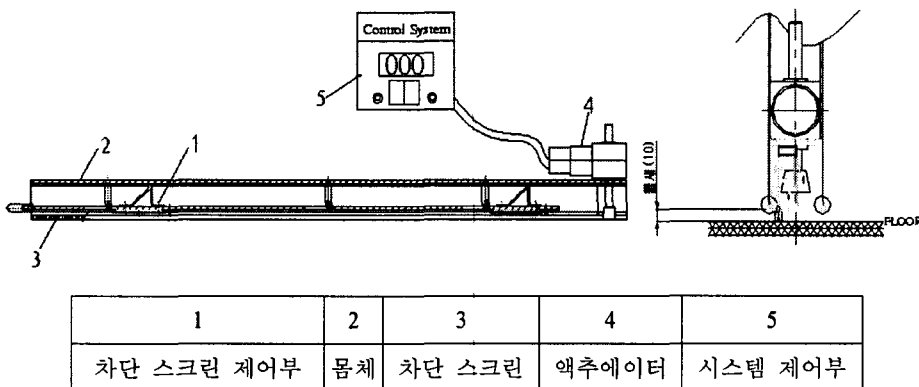
항 목	설 계 기 준	비 고
용 도	방화문과 바닥면의 틈새제거 및 방화문 자동개폐	
틈새크기	틈새= 0mm	건축법, 소방법
방화문 해정방식	연기감지기에 의한 자동 및 원격제어방식 또는 수동신호 입력부에 의한 임의 위치고정	건축법, 소방법
차 압	50Pa	소방법, NFPA
방화문 개폐력	13.6kgf/cm ² (133N)	소방법, NFPA
방화문 개폐방식	액추에이터(Motor & Gear)	
차단스크린 구동방식	무동력 메커니즘 방식	
틈새마감 재질	불연재료(연기의 온도 평균 400℃ 정도)	소방법

2.2 시스템의 알고리즘 및 메커니즘

화재가 발생하여 연기감지기로부터 연기가 감지되면 그 감지신호에 의해 차단시스템의 액추에이터가 작동되어 일시적 개방이나 완전 개방된 방화문을 자동으로 해제할 수 있도록 하였고, 방화문을 고임목이나 기타 버팀물로 방화문을 고정시키지 않아도 임의 위치에 고정이 가능하도록 하였으며, 문턱제거로 생긴 건물의 바닥면과 방화문 사이의 틈새와 방화문 설치 시 바닥면과 방화문 사이에 발생한 틈새를 구조변경 없이 개발 시스템을 방화문의 하단부에 설치함으로써 틈새를 막을 수 있도록 하였고, 방화문을 열고 닫을 때 시스템으로 인한 불편함과 시스템의 불확실 운동을 해소하였고, 차단스크린을 무동력으로 작동되도록 함으로서 반영구적으로 사용할 수 있도록 하였다. 시스템의 알고리즘은 그림 1 과 같고, 시스템의 메커니즘은 설계조건과 알고리즘으로부터 그림 2와 같다.



[그림 1] 연기/열 차단 시스템의 알고리즘



[그림 2] 연기/열 차단 시스템의 메커니즘

2.3 시스템의 변위-열응력 해석

차단 시스템은 차압이나 유체부력에 의해 발생하는 역학적인 힘과 열기류로부터 견뎌 내야 하므로, 차단 시스템에 작용하는 퍼텐셜 에너지를 π_p 라고 하면, $\pi_p = \pi - W_p$ 로 정의할 수 있다. π 는 차단막의 변형을 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.

$$\delta\pi_P(u, v, w) = \delta\pi(u, v, w) - \delta W_P(u, v, w) = 0 \quad (1)$$

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.

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

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

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

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

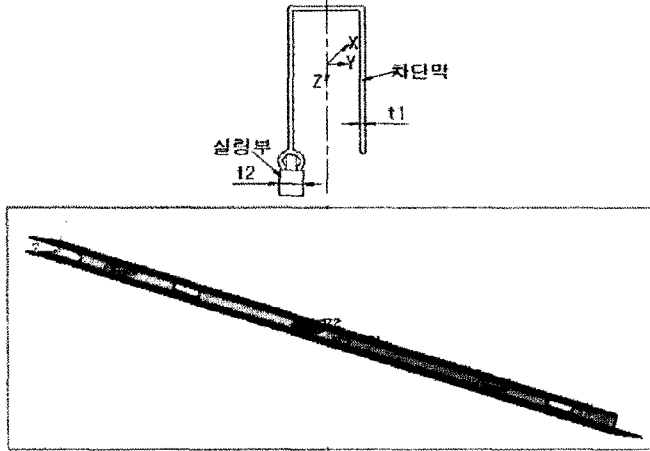
식 (3)에서 $[D]$ 차단 시스템의 탄성행렬, $\{\epsilon_T\}$ 는 연기의 열기류에 의한 열변형률 벡터를 의미하고, 식(4)에서 α, T, T_0 는 열팽창 계수, 최종온도, 초기온도를 의미한다. 식(5)에서 $[K]$ 는 차단 시스템의 탄성행렬을 의미한다.

또한 연기에 포함된 열기류가 실링부를 통하여 정상상태로 차단 스크린에 열전달이 이루어진다고 가정하면, 전도와 대류의 열유속 q 은 동일한 값을 가지게 된다. 차단 시스템에 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. 식 (7)에서 $[K_h]$ 는 열전도와 대류열전달의 행렬, $\{Q\}$ 는 열유속 벡터, $\{T\}$ 는 실링부에서 차단 시스템으로 전달되는 각 절점에서의 온도로 식 (4)의 최종온도 T 에 대입된다.

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

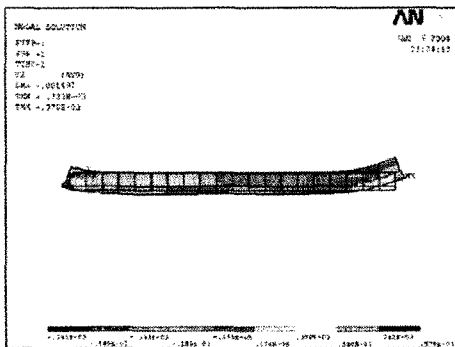
$$[K_h] \{T\} = \{Q\} \quad (7)$$

차단 시스템에서 유체부력과 열기류는 차단 스크린에 의해 차단하므로 변위와 열응력의 변화가 가장 심한 부분이다. 따라서 이 부분에 대한 유체부력과 열기류에 대한 유한요소 해석을 살펴보면, 차단 스크린은 실제 작동상태와 조립형태를 고려하여 그림 3과 같이 모델링하고, 차단 스크린의 유한요소 모델링에 사용된 유한요소는 차단 스크린의 길이에 비해 두께가 얇기 때문에 ANSYS®의 3차원 셸(shell 157)요소를 사용하였다. 차단 스크린은 연기에 포함된 열기류에 의한 열특성과 변형을 연성으로 해석해야 하므로, 수치해석의 조건으로 제연구역의 차압 50Pa과 연기에 포함된 열기류의 온도 약 500°C을 하중으로 부가시켰다. 차단 스크린의 두께(t_1)가 1~3mm로 변할 때, 실링부의 두께(t_2)를 1.5~5mm로 변화시키면서 각 두께의 변화에 대한 차단막의 변위와 열응력을 시뮬레이션하였다.

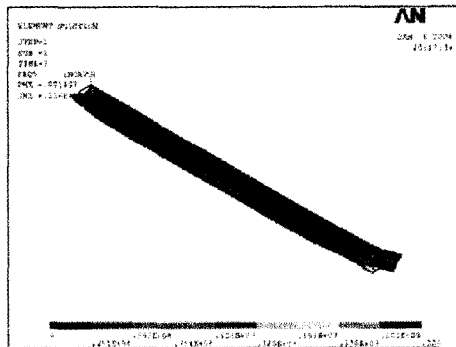


[그림 3] 연기/열 차단 스크린의 수치해석 모델

차단 스크린의 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. 그림 4는 차압에 의한 유체부력과 열기류가 차단 스크린으로 전달될 때 각 방향의 변위를 수치해석한 결과로서 x방향의 변위 등고선을 나타낸 것이고, 그림 5는 각 방향의 따른 열응력의 등고선을 나타낸 것이다. 이들 수치해석 결과로부터 차단 스크린의 경우 스크린 자체의 두께에 따른 강도측면보다 강성적인(휨 특성) 측면을 더 중요함을 알 수 있었다.



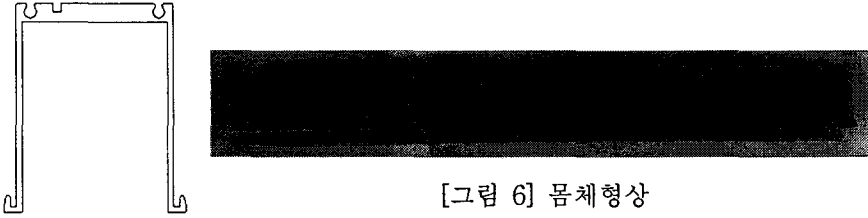
[그림 4] x방향의 변위 등고선
($t_1=1.0\text{mm}$, $t_2=1.5\text{mm}$)



[그림 5] 열응력 등고선
($t_1=1.0\text{mm}$, $t_2=1.5\text{mm}$)

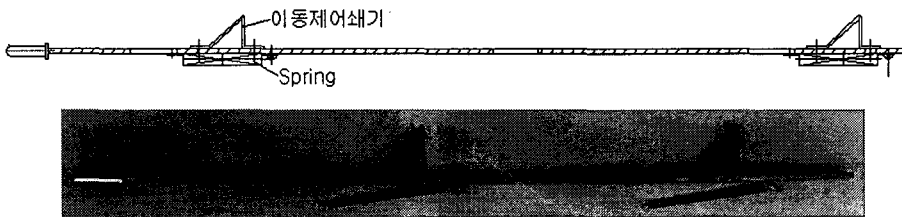
2.4 시스템의 세부설계

1) 몸체



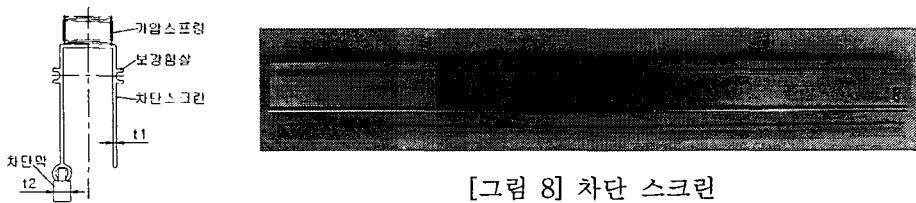
[그림 6] 몸체형상

2) 차단 스크린 제어부



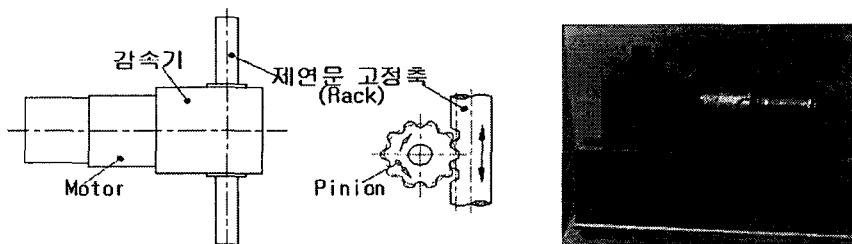
[그림 7] 차단 스크린 제어부

3) 차단 스크린



[그림 8] 차단 스크린

4) 액추에이터



[그림 9] 액추에이터

3. 방화문용 연기/열 차단 시스템의 prototype

『방화문용 연기/열 차단시스템』의 prototype은 알고리즘, 메커니즘과 설계를 바탕으로 그림 10과 같이 제작하였다.



[그림 10] 방화문용 연기/열 차단 시스템

4. 결 론

『방화문용 연기/열 차단시스템』의 개발로 인해 차단시스템의 이론 및 메커니즘을 정립하고, 설계 및 엔지니어링 데이터를 마련하였으며, 이를 바탕으로 prototype을 제작하였다. 본 연구를 통해 고(高)기능의 연기 및 열 차단시스템을 개발함으로써 기존 방화문의 구조적인 결함해소와 누설틈새의 차단, 방화문의 폐쇄 및 해정방법 등을 개선하였고, 건물화재 시 화기나 연기가 다른 구역으로 침입·확산방지로 인명과 재산피해의 최소화는 물론 화재진압의 극대화를 이룰 수 있다. 본 연구에서 개발된 차단시스템은 다음과 같은 특징을 갖는다.

- ① 본 연구에서 개발된 『방화문용 연기/열 차단시스템』은 화기나 연기가 다른 구역으로 누출되는 것을 방지하는 최첨단 방재설비이다.
- ② 개발시스템은 기존의 방화문의 문제점을 해소하고, 연기감지기에 의해 연기 및 열 차단은 물론 제연문의 자동폐쇄기능을 겸할 수 있다.
- ③ 보건복지부법(장애인·노인·임산부 등의 편의증진보장에 관한 법)의 규정에 따라 바닥에 문턱을 설치하지 않으므로 피난의 장애를 줄일 수 있다.
- ④ 제연구역의 적정 차압($P=50\text{Pa}$)을 유지함으로써 연기 및 열의 확산을 방지하고 인명피해를 최소화할 수 있다.

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” 한국화재·소방학회, 6월호 게재 예정(2004)
3. S. S. Rao, The Finite Element Method in Engineering, San Diego University, pp.303~332(1982)
4. I. H. Shames and C. L. Dym, Energy and Finite Element Method in Structural Mechanics, Hemisphere Publishing Co., pp.457~614 (1993)
5. ANSYS, Inc. Co., ANSYS(R) Release 5.7 and Manual, all(2000)
6. NFPA 92A, "Recommended practice for smoke-control system", all(1993)
7. 행자부 고시 제2001-21호, “특수 장소에 부설된 특별피난계단 및 비상용승강기의 승강장의 제연설비설치에 관한 기술기준”, all(2001)
8. 기계설계 도표편람 편집회, 기계설계 도표편람, 대광서림, pp.3a-1~3a-103 (1979)

본 연구는 2003년 “경기지방 중기청 산·학·연 컨소시엄 공동기술 개발사업”으로 이루어진 것이며, 이에 감사드립니다.