

급기가압시스템에서의 차압과 문의 개폐력

김진수
벽산엔지니어링(주)

Pressure differential and door opening force in the pressurization systems

Jin-Soo Kim
Byucksan Engineering, Co., Ltd.

요 약

고층건물 피난경로의 제연시스템은 일반적으로 급기가압방식이 널리 쓰인다. 그러나 국내에서 널리 쓰이는 부속실 단독 가압방식은 공간용적이 너무 작아 차압을 형성하고 유지하는 문제와 방연풍속을 형성하는 문제 사이에 늘 불균형이 존재한다. 또한 거실 출입문을 여닫는 데 지장이 없는 차압 하에서도 계단실 출입문은 차압에 밀려 제대로 닫히지 않는 경우가 있을 수 있다. 이런 측면을 역학적으로 검토하고, 과압 해소방식을 제안한다.

1. 서 론

한국의 고층건물 피난경로의 제연시스템은 소방관련법규에 의해 급기가압방식을 적용하도록 지정되어 있다. 그 중 국내에서 가장 널리 쓰이는 방식은 특별피난계단 부속실 단독 가압방식인데, 이 방식에서는 부속실에서 거실로 향하는 출입문과 계단으로 나가는 출입문의 개폐가, 출입문 안팎의 압력차이에 따라 서로 다른 영향을 받는다. 따라서 이 방식의 제연시스템을 설계할 때에는 차압이 문 개폐에 미치는 영향을 고려하여야 하고, 특히 차압이 너무 커서 문제가 되는 경우에는 그 과압을 해소(배출)할 수 있는 적절한 대책이 마련되어야 한다.

2. 문의 개방에 영향을 미치는 요소

문을 여는데 필요한 힘은 도어 클로저의 폐쇄력(F_{dc})과 차압으로 인한 압력(F_p)을 극복하여야 하므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F = F_{dc} + \frac{WA\Delta P}{2(W-d)}$$

여기서 F = 문을 여는데 필요한 힘(N)

F_{dc} = 도어 클로저의 폐쇄력(N)

(도어 클로저의 닫힘 토크 때문에 문 손잡이 위치에 작용하는 힘)

W = 문의 폭(m), A = 문의 면적(m²)

$$F_p = \text{차압에 의한 저항력} = \frac{WA\Delta P}{2(W-d)}$$

ΔP = 문 안팎의 차압(Pa), d = 문 손잡이로부터 문 끝단까지의 거리(m)

그림 1에 문을 여는데 필요한 힘을 나타내었다.

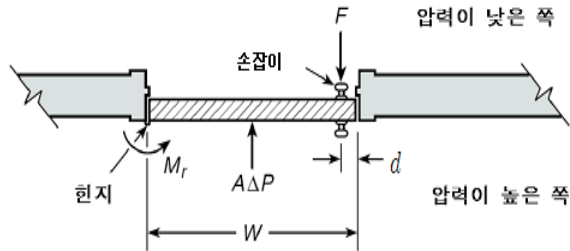


그림 1. 문 개방력의 도해

3. 도어클로저의 규격

‘KSF4505 도어 클로저’에 규정된 도어클로저의 규격은 아래 표와 같다.(단위 $N \cdot m$)

| 등급 | 개방력* | 폐쇄력** | 시험도어의 질량 |
|----|-------|-------|----------|
| 1호 | 22 > | > 7 | 25kg |
| 2호 | 32 > | > 10 | 40kg |
| 3호 | 60 > | > 17 | 60kg |
| 4호 | 80 > | > 27 | 80kg |
| 5호 | 100 > | > 37 | 100kg |

용어는 ‘KSF2806 플로어 힌지 및 도어 클로저의 여닫기 시험 방법’을 따름
 * 열리는 힘(opening force) : 완전히 닫힌 문을 여는데 필요한 힘(문이 열림각도 5도를 통과할 때의 힘)
 ** 닫히는 힘(closing force) : 문이 닫힐 때의 도어 클로저 힘(열림각도 20도에서부터 닫히기 시작하여 열림각도 5도를 통과할 때의 힘)

4. 차압과 도어 클로저의 회전력

도어 클로저와 문의 크기의 관계는 문의 닫힘 속도와 내구성 등 사용 편의성에 적합하게 조합된 것이므로, 한 단계 정도의 어긋남은 별로 문제 될 게 없으나 지나친 불균형은

중지 않다. 그러므로 위 표의 자료를 이용하여 표준크기의 출입문(2호, 900mm × 2100mm = 1.89m²)에 작용하는 힘들을 아래와 같이 검토한다.

4.1 거실-부속실 출입문

1) 50Pa의 차압이 문에 작용할 때의 도어 클로저 선정

50Pa의 차압이 표준 크기(2호, 900mm × 2100mm = 1.89m²)의 문을 누르는 힘은

$$\Delta P \times A = 50\text{Pa} \times 1.89\text{m}^2 = 94.5\text{N}$$

이 힘으로 도어 힌지에 작용하는 회전력 : $94.5\text{N} \times 0.45\text{m} = 47.25\text{N} \cdot \text{m}$

이 회전력을 상쇄하기 위해 문 손잡이에 가해야 하는 힘 : $47.25\text{N} \cdot \text{m} / 0.84\text{m} = 56.25\text{N}$

위 계산에서 손잡이에서 힌지까지의 거리($W-d$)를 0.84m로 보았다.

일반 피난도어의 경우 문을 여는데 필요한 힘이 손잡이에서 최대 110N으로 규정되어 있으므로, 도어 클로저에 의해 부가되는 저항력은 다음과 같이 손잡이에서 53.75N까지 용인 된다.

$$F_{dc} = 110\text{N} - 56.25\text{N} = 53.75\text{N}$$

이 힘으로 도어 힌지에 작용하는 회전력은 $53.75\text{N} \times 0.84\text{m} = 45.15\text{N} \cdot \text{m}$

이 회전력은 용인할 수 있는 최대 규격이므로 도어 클로저는 위 표의 2호(열리는 힘 32 이하)를 쓰는 것이 바람직하다.

2) 도어 클로저 2호를 사용할 때의 차압 한계

표준크기의 도어(0.9m×2.1m)를 여는데 필요한 힘 110N으로 힌지에 작용하는 회전력은

$$110\text{N} \times 0.84\text{m} = 92.4\text{N} \cdot \text{m} \text{이다.}$$

도어클로저 2호(열리는 힘 32 이하)를 쓰는 경우 차압에 의한 회전력의 한계는 다음과 같다.

$$M = 92.4\text{N} \cdot \text{m} - 32\text{N} \cdot \text{m} = 60.4\text{N} \cdot \text{m}$$

이때의 차압 허용한계는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta P = M/d/A = 60.4\text{N} \cdot \text{m} / 0.45\text{m} / 1.89\text{m}^2 = 71\text{Pa}$$

그러므로 출입문 차압은 약 70Pa 정도까지 허용가능하다.

3) 도어 클로저 3호를 사용할 때의 차압 한계

만일 도어클로저 3호(열리는 힘 60 이하)를 표준크기의 문에 사용한다면, 그 때의 허용 최대차압은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F = F_{dc} + \frac{WA\Delta P}{2(W-d)} \text{에서 } F_{dc} = 60\text{N} \cdot \text{m} / 0.84\text{m} = 71.4\text{N} \text{이므로}$$

$$\Delta P = \frac{2(F - F_{dc})(W-d)}{WA} = \frac{2(110 - 71.4)(0.9 - 0.06)}{0.9 \times 1.89} = 38 \text{ Pa}$$

도어클로저 3호는 열리는 힘이 도어클로저 2호의 두 배 가까이 되므로 허용 최대차압이 크게 달라진다. 이 정도의 차압으로 화재시 연기의 침투를 완전히 막기에는 불안하며, 현행 화재안전기준으로도 스프링클러가 없는 경우에는 쓸 수가 없다.

역으로 도어 클로저 3호를 쓰면서 차압 50Pa을 가하면 그 때의 문 개방력은 다음과 같이 된다.

$$F = F_{dc} + \frac{WA\Delta P}{2(W-d)} = 71.4 + \frac{0.9 \times 1.89 \times 50}{2(0.9-0.06)} = 122 \text{ Pa}$$

미국의 기준인 133N에는 미달하므로 실용상 지장은 없으나, 우리 화재안전기준에는 맞지 않고 노약자들이 쓰기에는 조금 불편할 수 있다.

4.2 부속실-계단실 출입문

부속실에서 계단실로 나가는 문은 도어 클로저의 닫히는 힘과 부속실 차압이 반대로 작용하여 차압이 문의 닫힘을 방해한다. 계단실만을 가압하거나 계단실과 부속실을 동시 가압하여 계단실-부속실의 차압을 최소한으로 줄이면 별 문제 없겠으나, 부속실을 단독 가압할 때의 문 닫힘에 대해 검토해 본다. 이 때 힘의 평형관계는 다음과 같다.

$$F_{dc} = \frac{WA\Delta P}{2(W-d)} \quad \text{이므로} \quad 2F_{dc}(W-d) = WA\Delta P$$

위 식의 $F_{dc}(W-d)$ 는 도어 클로저 규격상의 닫히는 힘으로서, 기호 Fd 로 나타내면

$$2Fd = WA\Delta P$$

표준 크기의 문 규격을 위 식에 대입하여 정리하면, 허용 차압은 다음과 같이 된다.

$$\Delta P = \frac{2Fd}{WA} = 1.18Fd$$

따라서 도어클로저 2호를 적용하면 닫히는 힘이 $10N \cdot m$ 이므로, $\Delta P = 11.8Pa$ 이 되고, 도어클로저 3호를 적용하면 $\Delta P = 20Pa$ 이 된다.

즉 차압이 20Pa을 넘는 경우에는 도어클로저 3호를 써도 한번 열렸던 문은 완전히 닫히지 않을 것으로 생각된다. 문이 덜 닫힌 상태에서는 부속실 압력이 설계값보다 낮을 것이므로 문은 닫힘 방향으로 움직이지만, 문이 닫히면서 누설틈새면적이 작아짐에 따라 차압이 높아져서 차압과 누설틈새가 평형을 이루는 어느 점에서 문은 정지할 것이다.

그러나 이러한 틈새를 예측하는 것이 어렵고 그에 따른 누설량의 예측도 어려워지므로 정량적인 설계가 곤란해진다. 정상적인 건축물에서 표준규격의 문에는 일반적으로 도어클로저 2호를 쓰게 되므로 계단실과 부속실 사이의 차압은 12Pa 이내로 조성하여야 하는데, 차압을 줄이는 방법으로는 계단실의 압력을 높여서 차압을 줄이는 것이 바람직하다.

즉 부속실 단독 가압보다는 계단실과 부속실 동시 가압방식이나 계단실 단독 가압방식이 유리하다. 계단실 단독 가압방식에서는 앞에서 검토한 바와 같이 차압을 약 70Pa 정도까지 올려도 문제가 없다.

5. 제연구역의 급기 및 과압 배출

5.1 계단실 가압 방식

계단실 가압방식에서, 피난이 시작되면 여러 개의 피난문들이 무작위적으로 열리고 닫히기 때문에 계단실의 압력은 상실과 회복이 반복된다. 예측 불가능한 문의 개폐에도 불구하고 압력을 항상 일정하게 유지하도록 하는 것은 불가능하므로, 건물 내 모든 피난인원을 감당해야 하는 최종피난문 하나만이 항상 열리는 것으로 하고 다른 층의 출입문은 일시적인 개폐라고 가정하여 송풍기 용량을 구하는 것이 합리적인 것으로 판단된다. 이러한 경우 계단실 목표압력을 40Pa로 하고 공기 유출 속도를 대략 5m/s로 보면, 계단실 급기량은 대략 $5\text{m/s} \times 1.89\text{m}^2 = 9.45\text{m}^3/\text{s} = 34,000\text{CMH}$ 가 된다.

그러나 이런 대량의 급기 상황에서, 피난이 개시되지 않아 아직 문이 안 열리는 초기 단계의 경우 또는 피난 도중 모든 문이 일시 닫힌 경우에는 누설이 아주 적으므로 송풍기의 체절압력에 가까운 압력이 계단실에 가해지게 된다. 혹한기 연돌효과로 인한 상층부의 과압에 송풍기 체절압력까지 가해지면 계단실과 부속실 사이의 차압은 수백 Pa까지 오를 수 있다.

이런 경우를 고려하여 계단실 최상부에는 과압 배출 댐퍼를 설치하고, 그 크기는 목표 차압 하에서 최대 급기량 전부를 배출할 수 있는 크기로 하여야 한다.

이러한 댐퍼는 외벽에 설치하는 것이 불가피한데, 외풍의 압력에 의해 닫히게 되면 그 기능이 상실되므로, 마주보는 양방향에 설치하여 한쪽 댐퍼가 바람 때문에 닫혀도 다른 쪽은 열려 있도록 하는 것이 안전하다. 계단실의 일반적인 구조상 양쪽 벽에 설치하는 것은 어렵지 않다.

계단실 가압방식에서는 공간의 용적이 커서 공간 내 압력변화의 탄력성 또한 크므로 과압형성이 크리 큰 문제가 되지 않을 수 있다. 또한 공간 구조상 대형 댐퍼를 이용하여 과압을 어느 한 곳에서만 배출하는 방식으로 처리할 수 있어 과압의 처리가 용이하다. 그러나 초고층의 경우 겨울철 계단실 내에 발생하는 연돌효과 때문에 계단실의 바닥과 꼭대기의 출입문에 발생하는 차압에 차이가 커지기도 한다.

연돌효과에 의한 계단실 상부의 과압을 배출하는 것까지 감안하여 송풍기의 용량을 구하면, 송풍기의 용량은 앞에서 계산한 것의 두 배 가까운 대용량이 되는데, 이런 대용량에서는 계단실의 구조에 의한 압력손실 때문에 계단실 상하부 사이의 차압 편차가 상당부분 해소될 수 있다.

국내 화재안전기준과 NFPA92A, 그리고 EN12101-P6에서 모두 계단실 가압은 전 구간 3개층 이내로 급기구를 배치하여 균등 급기토록 하고 있으나, 그런 방식으로는 초고층 계단실의 연돌효과가 해소되지 않는다. 오히려 계단실 하부에서의 대용량 급기가 바람직하다.

5.2 부속실 가압 방식

부속실 급기방식에서는 모든 부속실마다 고른 차압을 조성하기가 어렵고, 또한 급기량의 자그마한 불균형도 부속실 압력을 지나치게 높여 출입문 개방을 어렵게 만들 수 있다. 그러나 부속실 내부에서는 연돌효과가 발생하지 않기 때문에, 부속실 내의 과압을 해결할 수 있으면 오히려 계단실 가압방식보다 유리할 수도 있다. 그러므로 부속실에 과압 배출 장치의 설치는 필수적이다. 이것은 제연구역 안팎의 차압에 따라 조절되는 자동식 압력조절댐퍼를 쓰는 경우에도 마찬가지이다. 부속실 가압방식에서는 부속실마다 모두 개별적으

로 과압을 처리하여야 하는데, 부속실의 용적이 작으므로 공간 내 압력의 탄력성이 작아서 댐퍼의 미세누설로도 과압이 쉽게 형성될 뿐 아니라 배출 장치가 압력변화에 극히 민감하게 응답하여야 하는 문제가 있다. 또한 부속실의 용적이 작으므로 과압배출 장치의 크기도 작아져야 한다. 그러나 일반적으로 알려져 있는 플랩댐퍼형 압력배출 댐퍼는 댐퍼의 작동 각도에 따라 반응압력이 급변하므로 댐퍼의 작동 각도가 10° 내외의 극히 좁은 범위로 제한되고, 그에 따라 유효개구면적이 작아서 댐퍼의 크기가 너무 커지게 되므로 현실적으로 거의 사용되지 못하고 있는 실정이다.

그림 2와 그림 3에 일반형 플랩댐퍼의 역학적 구조를 도해한다.

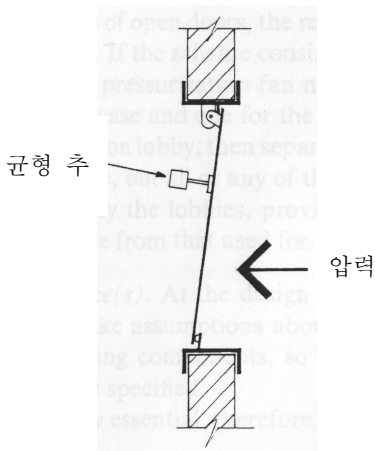


그림 2. 릴리프 댐퍼의 일반적 모양

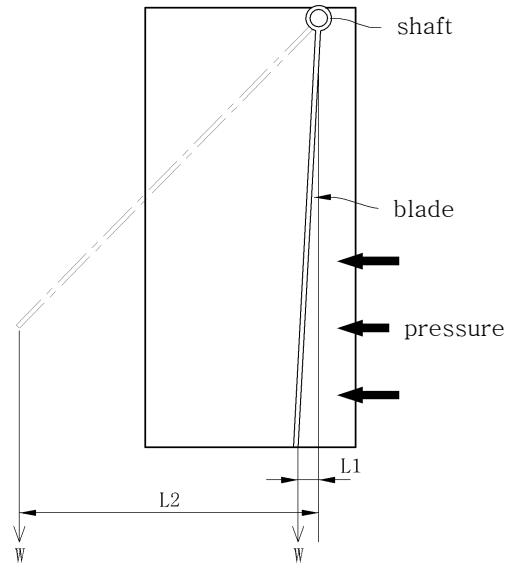


그림 3. 댐퍼 개방력의 도해

6. 댐퍼의 기능과 구조

출입문을 여는데 필요한 힘은 논리적으로 피난에 절대적 영향을 주기 때문에 차압의 상한을 지키는 것은 대단히 중요하다. 또한 연기의 틈새누설을 막기 위한 기본 차압은 급기 가압 제연시스템의 핵심이므로, 이러한 차압범위를 벗어나지 않도록 하기 위해서는 시스템 설계의 성능 검증이 필수적이다. 그러나 계절별 기온 변화와 화재실 주변의 온도 압력 상태를 정확히 예측할 수 없으므로 정확한 성능검증 또한 어려운 과제이다. 고도의 엔지니어링 분석에 의해 설계가 이루어진 경우에도 단말기구인 댐퍼의 기계적 성능에 따라 시스템의 신뢰성은 극도로 달라질 수 있다. 그러므로 부득이한 경우가 아니면 댐퍼류는 순기계적 작동에 의하는 것이 좋다. 전기구동식 혹은 전자식 댐퍼는 구동장치의 고장이나 전자식 압력계의 고장 등을 항상 정확히 파악할 수 없으며 경년변화에 의한 열화에 취약

하다는 문제가 있다. 또한 동력공급과 전자식 제어를 위한 복잡한 회로 구성이 필요하고, 그에 따라 늘어나는 감시항목이 관리에 큰 부담을 주게 된다. 고압배출 댐퍼는 순 기계적 작동에 의하는 방식으로 신뢰성이 높고, 유효개방면적이 커서 소형으로도 공기의 다량 배출이 가능하여야 한다.

그림 4에 예시한 개량형 과압배출댐퍼는 최대허용 차압에서의 유효개방률이 50%에 달한다.

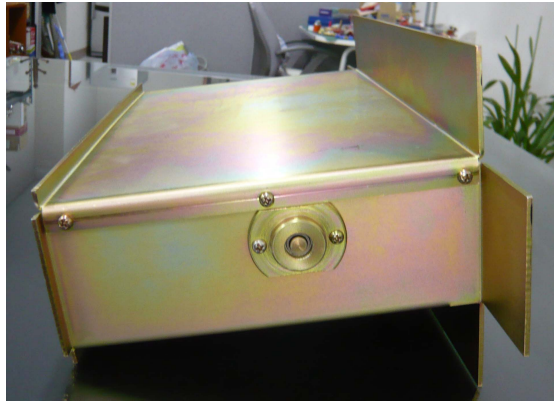


그림 4. 개량형 과압배출 댐퍼

7. 결론

모든 출입문의 도어 클로저는 건축시설의 사용자가 쓰기 편하도록 문의 크기와 무게에 맞는 적당한 정도의 개방력과 폐쇄력을 갖도록 설계되었다. 제연시스템의 설계 때문에 이러한 정상시의 사용성이 침해되지 않도록 면밀한 배려가 필요하다. 부속실 단독 가압방식에서도 계단실을 보조가압함으로써 도어클로저의 정상적 개폐력을 저해하지 않는 설계가 가능하며, 부속실 과압을 해소하는 것도 실용적으로 가능하다.

참고문헌

1. NFPA 92A, Standard for Smoke-Control Systems Utilizing Barriers and Pressure Differences, 2006
2. NFPA 101, Life Safety Code, 2006
3. EN 12101 Smoke and Heat control systems, 2005, Part 6. Specification for pressure differential systems - Kits
4. KSF3109 문세트
5. KSF4505 도어 클로저
6. 건축물의 피난방화구조 등의 기준에 관한 규칙
7. J. H. Klote & J. A. Milke, Principles of Smoke Management, ASHRAE, 2002