

제연구역의 주요 매개 변수 및 누설 면적 변화를 고려한 차압 형성 관계 분석

유우준 · 고권현* · 사공성호** · 남준석** · 유홍선†

중앙대학교, *동양대학교, **한국소방산업기술원

An Analysis on the Major Parameter and the Relations of Pressure Difference Effect of Leakage Area in the Smoke-Control Zone

Woo Jun You · Gwon Hyun Ko* · Seong Ho Sakong** · Jun-Seok Nam** · Hong-Sun Ryou†

Dept. of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

*Dept. of Architecture & Fire Administration, Dongyang University

**Korea Fire Institute of Industrial & Technology

(Received November 27, 2012; Revised February 1, 2013; Accepted February 1, 2013)

요 약

본 연구에서 부속실 단독 가압 구조인 급기가압 제연설비의 성능 확보에 영향을 주는 주요 매개 변수를 분석하고 공급유량과 누설면적 변화에 따라서 풍도와 부속실 차압 형성 관계를 실험적으로 분석하였다. 이를 위해서 3층 규모의 총 10개의 구획공간으로 구성된 모형 구조물과 방화문의 개폐력 측정장치를 제작하였으며, 각 구획공간과 외기의 차압, 방연풍속을 측정하기 위한 제어·계측 장비를 구성하였다. 그 결과 댐퍼의 차압조절 범위가 45 Pa~55 Pa인 경우 공급유량과 부속실 차압 크기에 따라서 45 Pa 이하인 저압 영역, 45 Pa~55 Pa 구간인 차압조절 영역 그리고 55 Pa 이상인 과압 영역을 구분하였으며, 저압 영역에서는 부속실, 차압조절 영역에서는 부속실과 댐퍼 그리고 과압 영역에서는 댐퍼의 누설면적이 차압 형성에 중요한 관계를 갖고 있는 것을 확인하였다.

ABSTRACT

This study is experimentally analyzed to extract the major parameters affecting the performance of the smoke-control system and the relations of pressure difference between vestibule and supply air pressure zone effect of supply mass flow rate and leakage area in the smoke-control zone. To obtain this, the mock-up building of three-story scale with a total of 10 compartments was constructed, and several apparatus were also installed for in-situ measurement of the ventilation flow rate, pressure difference between compartments, smoke defensive air velocity, the opening-closing force of door, etc. This article show that pressure difference in the smoke-control zone is significantly related with leakage area of vestibule in low pressure region, leakage area of supply air pressure in over pressure region and both of them in pressure control region when the pressure control range of damper is 45 Pa~55 Pa.

Keywords : Smoke-control zone, Vestibule, Supply air zone, Effective leakage area, Opening area

1. 서 론

국내의 급기가압 제연시스템은 송풍기, 급기 덕트(풍도), 가압 공간 그리고 피난 계단 등으로 구성되어 있으며⁽¹⁾, 제연설비의 성능은 화재가 발생하여도 피난자의 동선에 연기의 유입을 원천적으로 차단하고 안전한 피난 활동을 확보하는데 목적이 있다^(2,4). 따라서 제연구역은 화재로 인한 열 및 연기의 유입을 차단하기 위해서 인접한 구획 공

간 보다 높은 압력을 유지해야 하고, 제연구역의 방화문은 피난자의 피난 흐름을 저해하지 않도록 설계되어야 한다⁽⁴⁾. 하지만, 가압을 위한 밀폐 공간 형성과 피난자의 원활한 출입을 위한 방화문의 개폐 조건이 상반된 관계를 갖고 있기 때문에 가압 특성과 개폐 조건 중 어느 한 쪽으로 치우친 설계 방식은 피난로의 연기 확산을 야기하거나 피난 활동을 저해하여 인명안전에 심각한 영향을 줄 수 있다^(2,3). 이러한 제연구역의 가압공간은 급기가압 방식으로 제연구

†Corresponding Author, E-Mail: cfdmec@cau.ac.kr
TEL: +82-2-820-5280, FAX: +82-1-813-3669

ISSN: 1738-7167
DOI: http://dx.doi.org/10.7731/KIFSE.2013.27.1.020

역에 과압 배출 장치를 설치하는 방식과 자동차압·과압조절형댐퍼에 의해서 공급유량과 밀폐공간의 차압을 조절하는 방식으로 크게 구분할 수 있다⁽¹⁾. 전자의 경우 제연구역에 플랩댐퍼 등을 별도로 설치해야 하고 과압 배출 관로 등으로 인해서 공간 활용이 좁아지는 단점이 있지만 제연구역에 과압이 형성되어도 플랩댐퍼에 의해서 과잉 공기가 빠져나가기 때문에 가압 조건이 원활히 형성되는 이점이 있다. 따라서 출입문의 폐쇄조건 보다 피난자의 개방력이 중요한 요소라고 할 수 있으며 NFPA 92A, BS-EN12101-6에서는 제연구역의 개방력을 최대 110 N~130 N 이하로 규정하고 있다⁽²⁻⁴⁾. 후자의 경우 별도의 과압 배출 장치를 사용하지 않기 때문에 경제성과 공간의 활용이 높은 장점이 있지만 제연구역에 과잉 공기가 공급되는 경우 출입문이 닫히는 동안 밀폐 공간을 형성하기 위해서는 출입문의 폐쇄력이 증가하게 되어 개방력과 동시에 설계에 반영되어야 한다. 특히, 국내의 건축 구조물은 좁은 공간의 활용도를 높이기 위해서 제연구역을 부속실로 정하는 급기 가압 방식을 많이 사용하고 있지만 개방력과 폐쇄력을 동시에 고려해야 하기 때문에 설계를 위한 기초 실험 자료의 구축이 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 부속실 단독 가압 구조인 제연구역의 급기 가압 조건을 위한 안정성을 확보하기 위해서 주요 매개 변수를 구분하고 개방 및 폐쇄력을 결정해 주는 부속실의 차압형성과 누설량의 상관관계를 분석해 보고자 한다.

2. 본 론

2.1 실험장치 제작

Figure 1은 본 연구를 위해서 제작한 구조물의 형태를 보여주고 있다. 제연실비가 가동되는 동안 물리량을 측정하기 위해서 유량계 총 4개를 계단실과 각 층의 풍도실에 연결하였으며, 압력센서 총 10개를 각각의 구획공간에 설치하였다. 유량계는 직경/길이 비가 유동의 간섭을 받지 않도록 풍도(A)의 직경 0.2 m에 길이 5.0 m를 확보하여 설치하였다. 제연구역에 유량을 공급하기 위한 송풍기는 실로코 웬(Sirocco fan type)으로 5.45 kW에 회전비를 높여서 송풍량을 증가하였으며, 메인 제어부인 임베디드 컨트롤러(Model: NI PXI-8110)에서 모든 제어와 계측에 관한 지령을 담당하도록 구성하였다. 또한, 절연전류 신호 수집장치(Model: NI PXI-6224)에서 유량, 압력, 댐퍼와 자동폐쇄장치 등에 대한 통신을 전달하고 전류출력기(Model: NI PXI 6704)로부터 송풍기와 밸브의 제어가 가능하도록 설계하였다.

Figure 2는 방연풍속을 측정하기 위한 장치와 본 연구에서 사용한 댐퍼의 개략도를 보여주고 있다. Figure 2에서 나타냈듯이 방연풍속은 총 10개의 센서로 구성되어 위치의 이동이 가능하고 유속의 측정값은 절연전류 수집장치(Model: NI PXI-1042)에서 메인제어부로 실시간 통신에

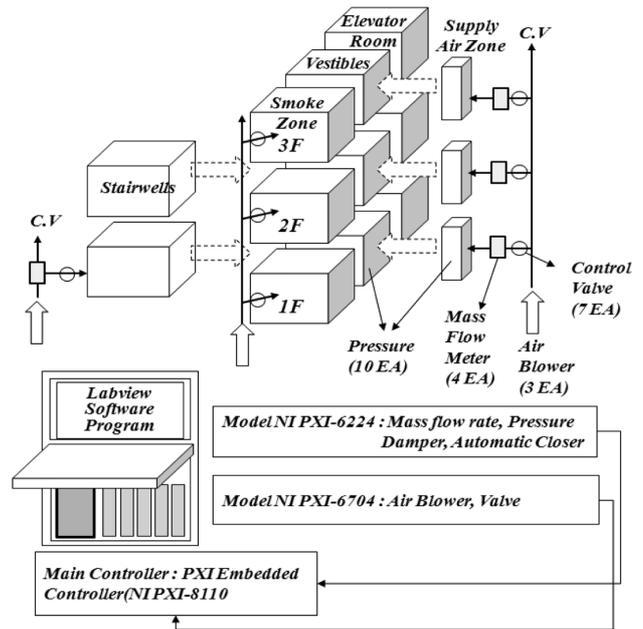


Figure 1. Schematic diagram of experiment apparatus and structure.

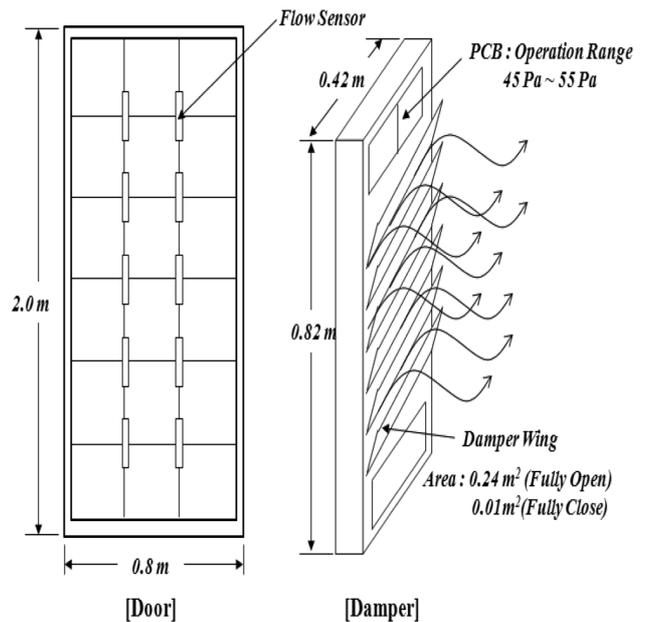


Figure 2. Schematic diagram of velocity sensor's position in a door and damper area.

의해서 저장 되도록 설계하였으며, 댐퍼의 차압조절범위는 45 Pa~55 Pa 그리고 댐퍼의 전체 날개 면적 0.24 m²인 시험용 댐퍼를 사용하였다. 본 연구에서 사용한 센서의 사양을 Table 1에 나타내었다.

2.2 유속과 압력의 상관관계 분석

풍도에 공급되는 유량은 부속실과 외기 등 각각의 구획 공간을 지나면서 질량 보존의 관계를 만족해야 한다. 또한,

Table 1. Specification of the Experiment Apparatus

Components	Model/ Company	Specification
Mass flow meter	640S Sierra	<ul style="list-style-type: none"> Range (0~150) m³/min Response Time 1s to 63 % of final velocity value Accuracy +/-1 % of reading +0.5 % of full scale
Air flow sensor	HD403TS/ Delta Ohm	<ul style="list-style-type: none"> Range (0.08~5.0) m/s Response Time 0.2 s Accuracy ±(0.2 m/s+3 %f.s.)
Pressure sensor	DPU/ Sensys	<ul style="list-style-type: none"> Range (0~1,000) Pa Response Time 0.2 s Accuracy ±(0.2 m/s+3 %f.s.)
Air blower	SH4SS Sam Hee	<ul style="list-style-type: none"> 192 m³/min 80 mmAq 5.45 kW

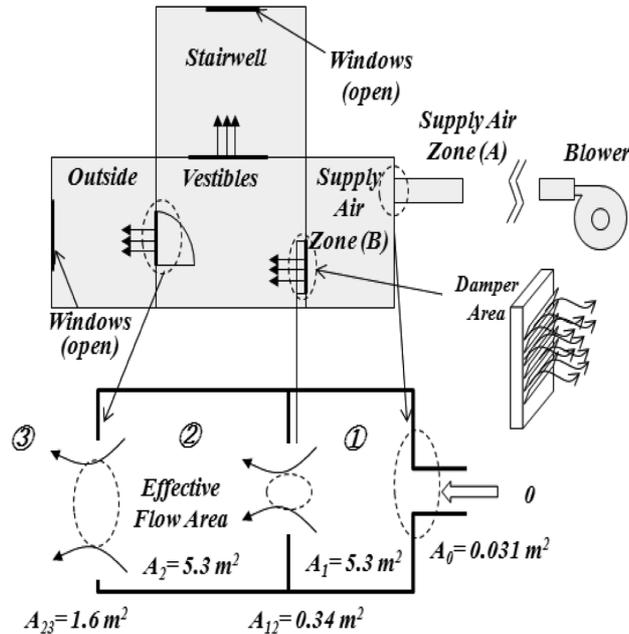


Figure 3. The characteristics of effective flow area with area ratio.

Figure 3에서 나타낸 것처럼 본 실험 장치는 풍도(A), 개구부, 부속실 그리고 방화문을 지나면서 수축과 확산이 급격하게 이루어지는 구조로 단면적의 비에 따라서 식(1)과 같이 손실계수가 결정된다⁽⁷⁾.

$$H_{lm} = K \frac{u^2}{2} \rho \tag{1}$$

여기서 H_{lm} (Pa), K , u (m/s) 그리고 ρ (m³/s)는 각각 부속실의 압력, 단면적 비로 결정되는 손실계수, 단면적이 작은 지점에서의 유속 그리고 공기의 밀도를 의미한다. 특히, 본 연구를 위해서 제작한 구조물은 풍도(A)와 풍도(B) 그

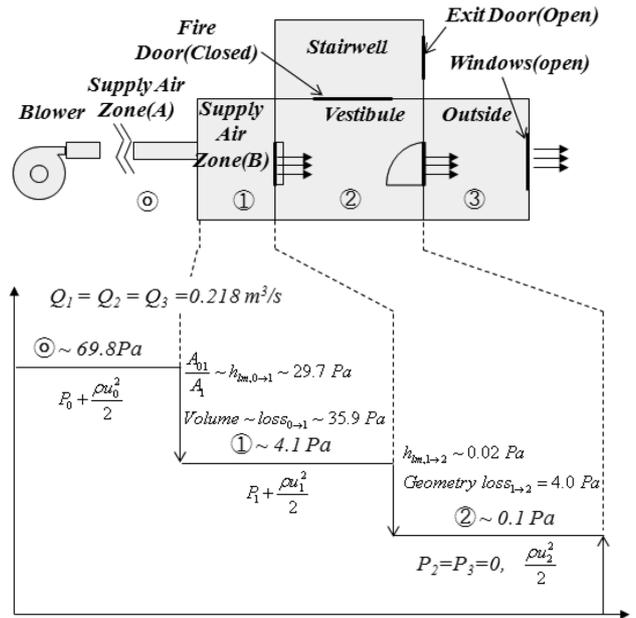


Figure 4. Loss of stagnation pressure according to duct, supply air zone and vestibule.

리고 부속실을 지나면서 급격한 수축에 의해서 유효 면적이 발생하는 것을 알 수 있으며⁽⁷⁾, 유동의 흐름에 따라서 압력 관계를 분석하였다.

Figure 4는 공기의 유입 관로의 직경 0.2 m, 풍도(B) · 부속실 면적 5.3 m² 그리고 개구부 면적 0.34 m²인 구획공간에서 풍도(A)의 압력 측정 결과를 보여주고 있으며, 전체 압력은 식(2)와 같이 구할 수 있다.

$$P_{ti} = P_i + \frac{1}{2} \rho_i u_i^2 \tag{2}$$

여기서 P_{ti} (Pa) 그리고 P_i (Pa)는 각각 i 점에서의 전압과 정압을 의미하며, 풍도(A)에서 13.1 m³/min의 체적유량이 공급되는 경우 69.8 Pa의 전압이 형성된다. 또한, Figure 4에서 나타냈듯이 풍도(A)에서 풍도(B)를 지나면서 면적이 급격히 증가하여 손실계수 K 는 약 0.99 정도의 값을 갖게 되어 식(1)에서 부속실(H_{lm})은 29.7 Pa 정도가 된다. 그 이후 풍도(B)와 개구부 사이에 수축과 확산이 반복되고 개구부와 부속실의 면적비와 체적공간의 기하학적 형상으로 약 35.9 Pa 정도의 손실이 발생하는 것을 실험적으로 구할 수 있다. 그 결과 풍도에서의 정압은 3.8 Pa 그리고 유속에 의한 동압은 약 0.3 Pa 정도 감소하고 개구부에서 부속실을 지나면서 다시 면적이 확산되어 유동에 의한 정압은 사라지고 평균 유속 약 0.14 m/s 정도에 해당하는 동압이 존재하게 된다.

2.3 주요 매개 변수 분석

제연설비의 구조는 Figure 5와 같이 가압 공간이 개방된 상태와 밀폐된 상태에 따라서 유량과 압력 관계를 구분할

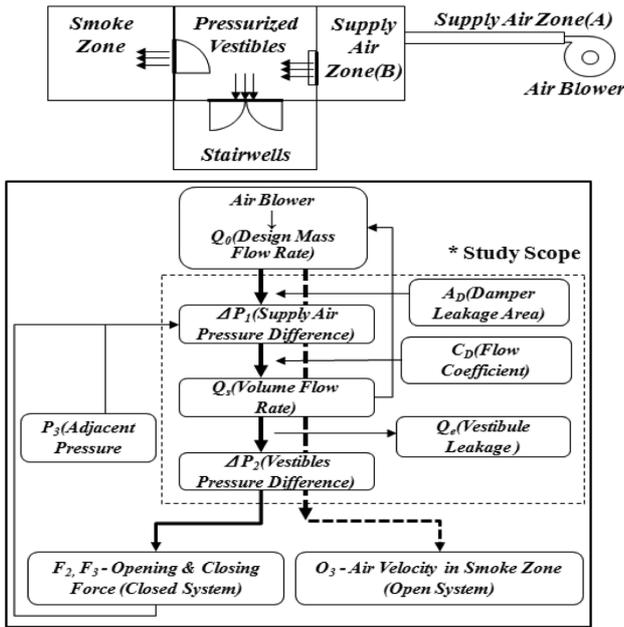


Figure 5. Major parameters of smoke-control system considering the flow phenomena.

수 있다. 가압 공간인 부속실의 방화문(거실)이 개방된 상태에서는 공급유량이 방화문에서 연기의 유입을 차단할 수 있는 방연풍속에 해당하는 보충량을 형성해 주어야 한다. 부속실이 밀폐된 상태에서는 풍도(B)와 부속실 사이에 설치된 댐퍼의 날개가 닫히면서 틈새로 공급되는 누설량이 부속실을 설계 차압으로 가압하면서 부속실의 틈새로 빠져나가야 한다. 따라서 부속실 단독 가압구조에서 식(3)과 같이 방화문에서 작용하는 힘은 계단실과 외기의 압력 뿐만 아니라 댐퍼의 날개 저항, 댐퍼와 부속실의 누설면적 그리고 보충량과 누설량에 따라서 달라진다⁽⁴⁾.

$$F_{r,3} = \Delta P_{23} \times A_{door} / 2 \tag{3}$$

여기서 F (Pa), ΔP (Pa), A (m^2)은 각각 폐쇄력, 차압, 면적을 그리고 식(3)의 하첨자는 왼쪽에서부터 방화문 손잡이의 위치, 부속실과 외기 그리고 방화문의 면적을 각각 의미한다. 본 연구에서는 보충량과 누설량 그리고 제연구역의 유량손실계수와 누설면적, 풍도(B)와 부속실의 차압을 제연구역의 개방 및 폐쇄조건을 위한 주요 인자로 구분하였다.

기존의 연구사례에 따르면 Ryou et al.⁽²⁾은 풍도와 부속실의 압력차와 누설량의 상관관계를 식(4)와 같이 표현하였다.

$$Q = C_d (\Delta P_{12})^n \tag{4}$$

여기서 Q (m^3/s) C_d , ΔP_{12} (Pa) 그리고 n 은 부속실로 공급되는 누설량, 댐퍼 날개의 형상과 각도에 의한 유량손실계수, 풍도(B)와 부속실의 압력차 그리고 댐퍼의 누설 면적에 영향을 받는 지수로 본 연구에서 사용한 댐퍼의 경우

날개가 완전히 닫힌 상태에서 C_d 와 n 은 *R-square* 0.95의 오차범위 안에서 0.86과 0.56의 값을 갖는다. 댐퍼와 부속실의 유효 누설면적은 베르누이 방정식(Bernoulli Equation)을 사용하여 식(5)와 같이 구할 수 있다.

$$A = Q_i / \sqrt{2 \Delta P_{ij} / \rho} \tag{5}$$

여기서 A 와 ΔP_{ij} 는 각각 유효 누설면적, 인접 공간 i 와 j 의 차압을 의미한다.

2.3.1 공급유량과 보충량 및 누설량 관계

Figure 6은 부속실이 개방된 상태의 공급유량(Q_s)과 부속실이 밀폐된 상태에서 댐퍼의 누설면적을 통하여 부속실에 공급되는 누설량(Q)의 관계를 보여주고 있다. 보충량은 공급유량이 방연풍속에 해당하는 값으로 본 연구에서는 다양한 유량 범위에서 차압 형성의 관계를 분석하였으며, Figure 6에서 공급유량이 증가함에 따라서 누설량의 기울기가 크게 세 단계로 구분이 되는 것을 확인할 수 있다. 점선으로 표시된 공급유량과 근접한 값을 갖고 있는 첫 번째 영역은 누설량에 비해서 부속실의 차압이 낮은 조건으로 댐퍼의 날개가 완전히 열려 있는 상태에 해당한다($\theta \sim$ fully open). 이 경우 댐퍼의 누설면적은 $0.24 m^2$ 이고 공급유량과 누설량의 차이만큼 부속실에 차압이 형성된다. 기울기의 변화가 다양한 두 번째 영역은 부속실의 차압이 댐퍼의 차압 조절 범위에 있는 조건을 의미하며, 이 구간에서 누설량은 댐퍼의 날개 각도에 따라서 변하게 된다($\theta \sim$ change). 그 이후 공급유량을 더욱 높여 주게 되면 댐퍼의 날개가 완전히 닫힌 상태가 되고 누설량이 증가하여 부속실에 과압이 발생

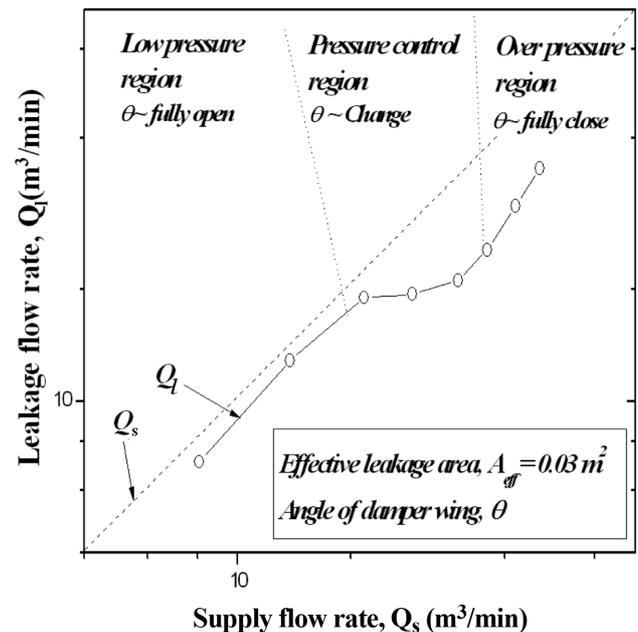


Figure 6. Classification of pressure region with increase Q_s .

하는 조건이 형성된다(0~fully close).

2.3.2 부속실 누설면적과 차압관계 분석

Figure 7은 부속실의 누설면적 증가에 따라서 부속실 차압을 측정된 결과이다. 그림에서 누설량과 부속실의 차압이 비례하여 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 본 연구에서는 사용한 댐퍼의 차압 조절 범위(45 Pa~55 Pa)를 기준으로 하여 부속실의 차압 크기에 따라서 저압(45 Pa 이하) · 차압조절(45 Pa~55 Pa) · 과압 영역(55 Pa 이상)으로 구분

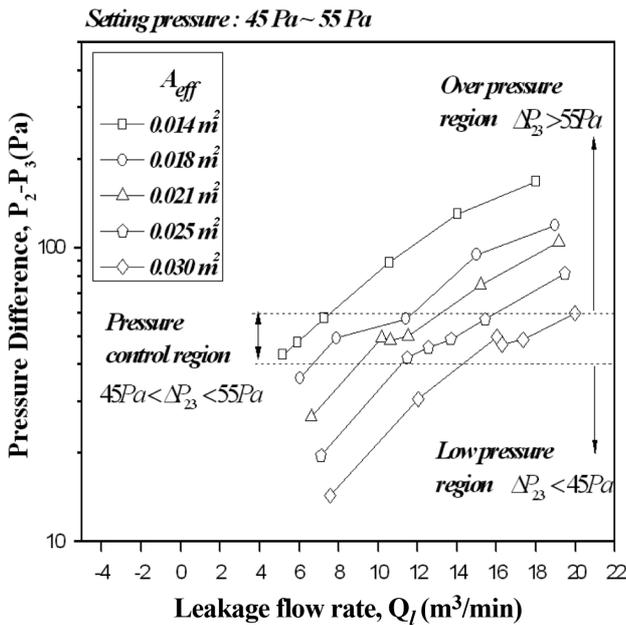


Figure 7. Comparison of ΔP_{23} and Q_l with increase A_{eff} .

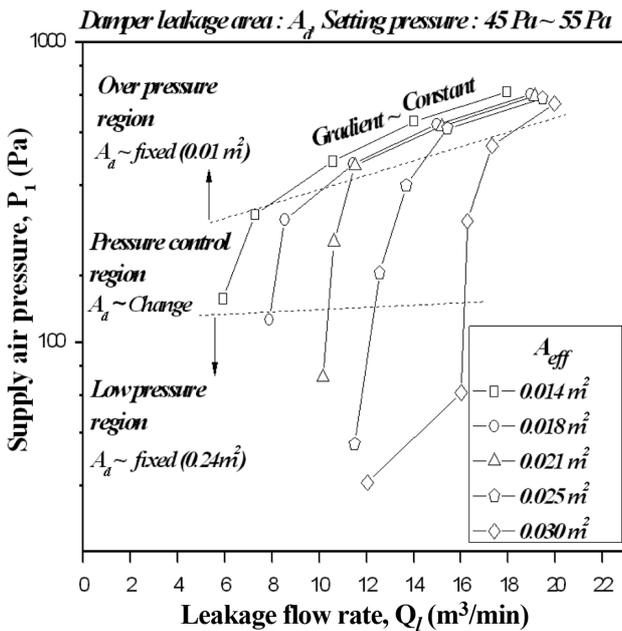


Figure 8. Comparison of ΔP_{13} and Q_l with increase A_{eff} .

하였다. 그 결과 부속실의 차압은 영역의 구분과 상관없이 부속실의 누설면적이 증가할수록 반비례하여 감소하는 것을 확인하였다. 특히, 동일 누설량 조건에서 누설면적이 작을수록 과압 영역에 빠르게 도달하기 때문에 폐쇄력이 증가하게 되고 차압조절영역을 유지하기 위한 공급유량이 작아져서 방연풍속에 해당하는 보충량을 형성하기가 어려울 것으로 판단된다.

Figure 8은 부속실의 누설면적과 누설량 증가에 따라서 풍도(B)의 차압을 측정된 결과이다. 부속실의 차압 크기에 따라서 저압영역과 과압 영역의 경계를 점선으로 나타내었으며, 누설면적이 증가할수록 부속실에서 외기로 나가는 양이 많아지므로 동일 누설량 조건에서 풍도(B)의 차압도 반비례하여 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 각각의 누설면적에 대해서 과압 조건이 형성된 이후 기울기가 일정해지는 것을 확인할 수 있는데 그 이유는 부속실의 차압이 댐퍼의 작동 범위를 초과하면서 댐퍼의 날개가 완전히 닫힌 상태가 되기 때문이다. 따라서 이러한 과압 영역의 범위를 감소시키기 위해서는 댐퍼의 날개가 완전히 닫힌 상태의 누설면적을 최소화해야 할 것으로 사료된다.

Figure 9는 댐퍼의 차압 조절 범위(45 Pa~55 Pa)를 기준으로 하여 저압 · 차압조절 · 과압 영역 각각에 대해서 풍도(B)와 부속실의 압력차와 누설량의 관계를 분석한 결과이다. Figure 9의 저압영역에서 댐퍼의 날개는 항상 완전히 열려 있기 때문에 동일 누설량 조건에서 부속실의 누설면적의 크기를 감소하여 저압영역에서 차압조절영역으로 부속실의 가압조건을 형성할 수 있다. 또한, 차압조절영역에서 댐퍼의 날개가 작동하면서 댐퍼의 누설면적이 실시간 변하기 때문에 부속실의 누설면적뿐만 아니라 댐퍼의 누설면적도 동시에 고려하여 차압을 유지해야 할 것으로 판

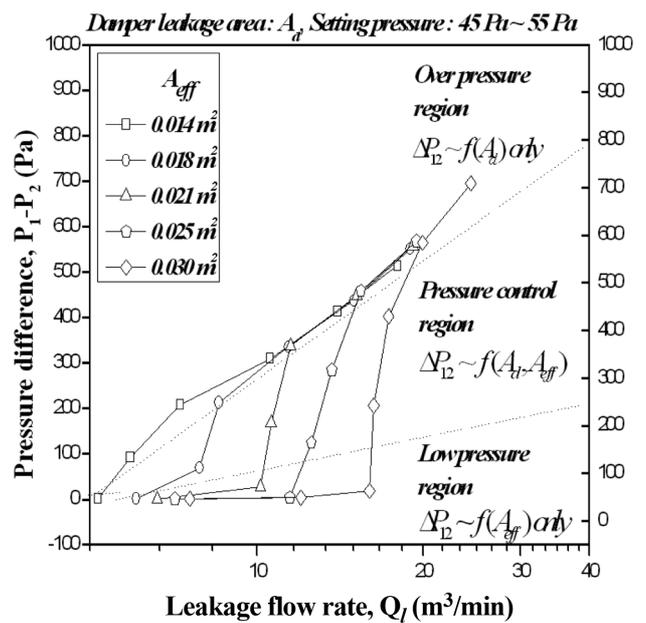


Figure 9. Comparison of ΔP_{12} and Q_l with increase A_{eff} .

단된다. 특히, 부속실에 과압이 발생하는 영역에서는 부속실의 누설면적 크기와 상관없이 누설량에 비례하여 풍도(B)와 부속실의 압력차가 동일하게 증가하는데 이러한 결과는 과압이 발생하는 영역에서 댐퍼의 날개가 완전히 닫힌 상태이기 때문에 댐퍼의 누설면적이 압력차를 형성하는데 지배적임을 설명해 주고 있다. 즉, 풍도(B)와 부속실의 차압형성과 누설량을 결정하기 위한 주요 매개 변수의 상관관계가 영역에 따라서 각각 다른 함수 형태인 것을 알 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 풍도(A, B), 부속실, 거실 그리고 계단실로 구성된 구조물에서 댐퍼의 개구부 면적이 동일한 경우 제연구역의 누설면적 크기를 증가함에 따라서 공급유량과 차압형성 관계를 분석하였다. 이를 위해서 3층 규모의 총 10개로 구성된 구획 공간과 방화문의 개폐력 측정 장치를 제작하였으며, 계단실과 각 층의 풍도실 공급유량, 각각의 구획 공간 압력 그리고 방연풍속을 실시간 측정하기 위한 제어·계측 장비를 구성하였고 다음과 같은 결과를 도출하였다.

첫째, 풍도(A)에서 풍도(B) 그리고 부속실로 공급되는 유량과 압력 손실 관계를 분석한 결과 전압이 69.8 Pa인 경우 풍도(B)에서 단면적이 급격히 확산되어 부속실 약 29.7 Pa 정도가 발생하였고 풍도와 개구부 사이에서 급격한 수축 이후 개구부와 부속실에서 다시 확산되어 약 35.9 Pa 정도의 손실이 추가적으로 발생하였다. 이러한 결과는 풍도(A)와 풍도(B)를 연결하는 부분에서 부속실을 줄이기 위한 설계의 중요성을 의미하는 것으로 효율적인 송풍기의 풍량을 확보하기 위한 설계의 검증 방안으로 적용이 가능할 것으로 판단된다.

둘째, 부속실 누설면적이 0.03 m²으로 일정한 경우 부속실이 개방된 상태에서의 공급유량과 부속실이 밀폐된 상태에서 댐퍼의 누설면적으로 공급되는 누설량을 비교하였으며, 댐퍼의 차압 조절 범위(45 Pa~55 Pa)를 기준으로 하여 댐퍼와 부속실의 누설면적에 따라서 저압·차압조절·과압 영역이 존재하는 것을 확인하였다.

셋째, 저압·차압조절·과압 영역 각각에 대해서 누설면적과 누설량 증가에 따라서 부속실과 풍도(B)의 차압 형성

관계를 분석하였다. 그 결과 부속실의 차압은 누설면적의 크기가 증가할수록 감소하였으며, 과압영역에서 풍도(B)의 차압은 부속실의 누설면적 크기와 상관없이 댐퍼의 누설면적에 따라서 기울기가 동일하게 증가하는 것을 확인하였다. 특히, 동일 누설량이 부속실에 공급되는 경우 저압영역에서는 부속실의 누설면적을 그리고 과압영역에서는 댐퍼의 누설면적을 최소화하여야 하며, 차압조절영역에서는 댐퍼의 누설면적과 부속실의 누설면적을 동시에 고려하여야 적정 방연풍속을 유지하면서 부속실의 차압이 폐쇄력을 증가시키지 않을 것으로 판단된다. 이러한 결과는 급기가압 공간에서 주요 매개 변수의 상관관계가 영역에 따라서 각각 다른 함수 형태로 표현이 가능함을 보여주고 있으며, 제연구역의 안전성을 구현하기 위한 실험 자료로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. NEMA, "National Fire Safety Code, NFSC 501A of Stair Cases of Specific Fire Escape Stairs and Smoke Control Systems of Ancillary Rooms", Administrator at National Emergency Management Agency (2012).
2. Y. M. Yun, M. J. Lee, N. I. Kim, and H. S. Ryou, "Basic Study on the Performance of a Pressure-difference Control Damper Affected by Flow Disturbance in a Wind Tunnel", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 23, No. 6, pp. 16-23 (2009).
3. Y. H. Park and B. G. Kim, "The Influence of Stairway Pressurization Conditions on the Stack Effect in Supertall Buildings", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 24, No. 4, pp. 109-115 (2010).
4. W. J. You, J. S. Nam, and H. S. Ryou, "An Analysis of the Opening and Closing Condition with Various Fire Door Size in the Pressurized Room", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 25, No. 2, pp. 132-137 (2011).
5. NFPA 92A, "Standard for Smoke-Control Systems Utilizing Barriers and Pressure Differences" (2009).
6. EN 12101-6, "Smoke and heat control systems - Part 6: Specification for pressure differential systems" (2005).
7. R. W. Fox and A. T. McDonald, "Introduction to Fluid Mechanics", 5th edition (2005).