

[Research Paper]

제연구역의 압력변화에 따른 풍량제어 배출댐퍼 개발

이동명

경민대학교 소방안전관리학과 교수

The Development of Flow Control Ventilation Damper According to the Pressure Variation of Smoke Control Room

Dong-Myung Lee

Professor, Dept. of Fire Protection Safety Management Engineering, Kyungmin University

(Received June 11, 2018; Revised June 29, 2018; Accepted July 17, 2018)

요 약

본 연구에서는 기존 제연설비의 문제점 개선 및 제연설비의 성능극대화를 위해 제연구역의 압력변화에 따라 풍량 제어가 가능한 배출댐퍼를 개발하였으며, 개발 댐퍼의 효용성 검증과 상용화를 위해 성능시험을 실시하였다. 시험결과로부터 개발 배출댐퍼에 의해 급기량이 약 1 ~ 5% 정도 더 증가되는 것으로 나타났고, 제연구역에는 송풍기의 설계풍량 이상의 안정적인 풍량이 공급됨으로 풍량제어 배출댐퍼의 효용성이 입증되었다. 풍량제어 배출댐퍼의 원천 기술을 확보하였다.

ABSTRACT

This study developed a ventilation damper that can control flow rate according to pressure differential variation of the smoke control room in order to improve problems related to existing smoke management systems and maximizing performance of smoke management systems. The development damper was tested for verification of utility and performance. The supply flow of the developed ventilation damper was increased by about 1 to 5%. The results prove the effectiveness of the flow control ventilation damper by providing stable flow over the designed flow of the fan in the smoke control room. In addition, the study acquired the original technology for a flow control ventilation damper.

Keywords : Flow control, Ventilation damper, Pressure variation, Smoke control room, Smoke

1. 서 론

건축물의 화재안전 성능확보를 위해 화재 시 사람이 보다 안전하게 피난할 수 있는 공간적 대응과 화재감지 및 소화활동 등을 위한 설비적 대응으로 구성된다. 소방설비 중 제연설비는 재실자나 거주자의 피난안전성을 확보하는데 중요한 설비이다.

건축법과 소방법에서는 지하 3층 지상 11층 이상의 건축물에 제연구역(특별피난계단의 계단실, 부속실 및 비상용 승강기의 승강장)을 설치하고, NFSC 501A에서는 이들 구역에 제연설비를 설치하고 성능을 확보·유지하도록 규정

하고 있다⁽¹⁾. 제연설비의 성능(차압, 방연풍속, 과압방지, 출입문 개폐력 등)은 제연구역의 압력에 의해 결정되고, 압력은 제연구역으로 공급되는 풍량에 의해 결정되며, 풍량은 화재 시 재실자의 피난에 의한 출입문의 개폐여부에 따라 그 크기와 조건이 달라진다.

효율적인 풍량제어를 위한 유사 연구 중 소방분야에서는 재실자의 피난상황에 따라 화재모드와 피난모드로 구분하고 이들 모드에 따라 모터블롭댐퍼의 개구율을 조절하는 방식⁽²⁾과 건축설비분야에서는 실내 CO₂의 농도에 따라 적정 환기량을 얻기 위해 모터블롭댐퍼의 개구율을 조절하여 풍량을 제어하는 연구⁽³⁾가 수행되었다. 이들 연구는 댐퍼의

개구율에 따라 제어되는 풍량이 비례적이지 않기 때문에 제연설비의 성능이나 공조설비의 최적 풍량을 확보하고 실용화하는데 한계가 있다.

또한 기존 제연설비에서는 볼륨댐퍼와 자동차압댐퍼에 의한 풍량제어로 제연설비의 성능을 확보·유지하고 있지만, TAB 시 제연구역의 출입문이 닫힌 상태에서 댐퍼의 개구율을 평균 70% 정도 고정·사용하고 있기 때문에 송풍기의 설계풍량을 60~70% 정도만 사용하고 있다. 따라서 송풍기의 설치위치에 따라 제연구역의 허용차압(최소차압 40 Pa~개방력 110 N)이 과대(100 Pa 이상)하게 형성되거나 부족(10 Pa 정도)하게 형성되고 있고, 화재 시 재실자의 피난에 의한 제연구역 출입문의 일시적인 개방에 따라 화재층에 방연풍속(0.5~0.7 m/s)을 형성시키면 과압(60 Pa 이상)이 발생하거나 비개방층의 제연구역에는 차압(28 Pa)이 형성되지 않는 경우가 대부분이다⁽²⁾.

본 연구에서는 제연설비의 성능을 확보·유지하기 위해 안정적인 풍량공급과 송풍기의 풍량을 효율적으로 사용(설계풍량 100%)할 수 있는 풍량제어 배출댐퍼(Flow control ventilation damper)를 제연구역의 압력변화에 따라 풍량을 조절할 수 있도록 개발하였고, 개발 댐퍼의 효용성 검증과 상용화를 위해 성능시험을 실시하였다.

2. 해석 및 설계

2.1 프로세스 및 알고리즘

제연구역 압력변화에 따른 풍량제어 배출댐퍼를 제연설비에 적용시킨 프로세스 및 알고리즘은 Figure 1과 같다. Figure 1에서 건물 임의의 층에 화재가 발생하여 재실자의 피난이 이루어지면 제연구역의 차압은 변하게 된다. 제연구역의 압력변화에 따라 풍량제어 배출댐퍼는 출입문의 개폐상태를 판단하게 되고, 배출댐퍼는 댐퍼날개를 조절하여 급기풍량을 조절하게 된다. 이때 각 제연구역 자동차압댐퍼는 풍량제어 배출댐퍼와 연동으로 제어되도록 하였고, 각 제연구역의 압력은 배출댐퍼의 컨트롤러로 보내져 압력변화를 연산하게 된다. 출입문이 닫혀져 연산된 압력변화가 40~60 Pa을 유지하게 되면 자동차압댐퍼의 날개를 닫고 해당 제연구역으로 공급되는 공기를 차단시킴과 동시에 배출댐퍼를 열리도록 하여 공급공기를 급기구축의 풍도로 되돌아가게 함으로써 공기의 손실을 줄이게 된다. 또한 연산된 압력변화가 40 Pa 이하로 급속하게 떨어지게 되면, 연기가 확산·침입되지 못하도록 배출댐퍼는 닫히고 송풍기의 공급공기는 각 제연구역으로 공급되어 방연풍속이 형성되고, 방연풍속 형성 후 일시적으로 열린 출입문이 닫힐 때 과압이 발생하면 빠르게 배출댐퍼를 열어 공급공기를 급기구축의 풍도로 배출시켜 과압을 방지하게 된다.

2.2 동작 메커니즘

배출댐퍼의 동작메커니즘⁽⁴⁾은 Figure 2와 같이 제연구역

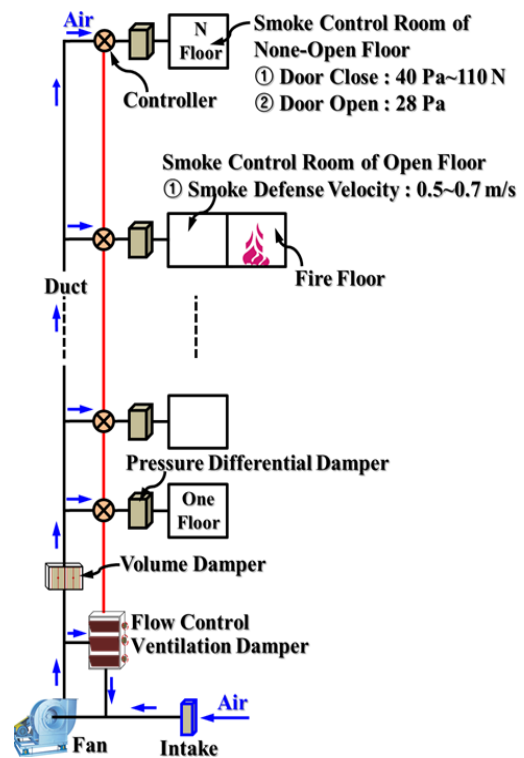


Figure 1. The process and algorithm of flow control ventilation damper.

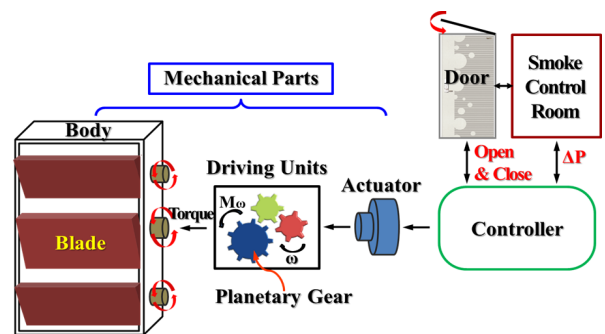


Figure 2. Action mechanism of flow control ventilation damper.

의 압력변화에 따라 컨트롤러가 액추에이터(Actuator)를 구동시키면, 회전력은 액추에이터로부터 구동장치(Driving units)의 회전체(Planetary gear)에 전달되고, 댐퍼날개는 회전체의 회전대우에 의해 개폐되도록 참고문헌 2를 인용하였다.

Figure 2에서 댐퍼의 동작시간 t 에 대해 댐퍼날개가 개폐되는 각도를 θ 라고 할 때, 구동장치와 댐퍼날개에 발생하는 각속도 ω (rad/s)라고 하면, 각운동량 M_ω (N-m)는 식(1)과 같다⁽⁵⁾. 식(1)에서 r 은 회전체의 반경(m), I 는 회전체의 관성모멘트(kg-m²)를 의미한다.

$$M_\omega = mr^2\omega = I\omega \tag{1}$$

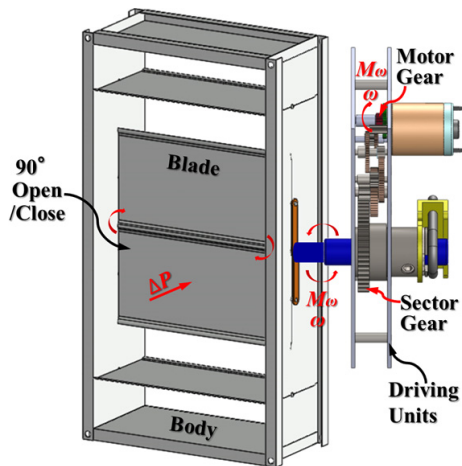


Figure 3. Modeling of flow control ventilation damper.

건축물 화재에서 연기의 침입·확산을 일으키는 연기이동력(굴뚝효과, 부력, 바람 등)에 의존되고, 일반적으로 연기를 이동시키는 힘은 건물의 실내와 온도차에 의한 굴뚝효과에 의한 압력(ΔP_{so})의 영향이 가장 크다^(6,7). 식(2)에서 ΔP_{so} = 실내와 실외와의 압력차(Pa), T_o = 실외온도(K), T_s = 실내온도(K), h = 중성면에서의 거리(m)를 의미한다.

$$\Delta P_{so} = 3,460 \left[\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_s} \right] h \quad (2)$$

식(2)의 압력(ΔP_{so})은 댐퍼날개에 작용하는 압력(ΔP)으로 작용하게 되고, 식(2)는 회전체의 각운동량 M_ω 을 결정하게 된다.

2.3 모델링 및 운동해석

배출댐퍼의 프로세스 및 알고리즘과 동작 메커니즘을 바탕으로 제연구역의 차압변화에 따라 풍량을 제어할 수 있고 배출댐퍼로서 기능과 역할을 할 수 있도록 Figure 3과 같이 모델링하였다.

댐퍼날개의 각운동량을 결정하기 위해 운동해석을 하였고, 운동해석은 Figure 3의 모델링을 이용하여 Solidwork⁽⁸⁾를 사용하였고, 해석조건은 Table 1과 같다. Figure 3의 댐퍼날개에 작용하는 댐퍼날개를 개폐할 때 작용하는 압력(ΔP)은 굴뚝효과에 의한 압력(ΔP_{so})과 송풍기의 압력(ΔP_f)을 합한 크기로 작용하게 된다.

굴뚝효과의 계산은 높이 185 m의 고층 건축물에서 겨울철에 화재가 발생하였다고 가정하였다. 외부 온도 $T_o = -18$ °C, 건물 계단실의 온도 $T_s = 2$ °C, 중성면(Neutral plane)을 건물의 중간 높이라고 가정하면, 최상층에 작용하는 굴뚝효과를 식(2)에 의해 계산하였고, 결과는 Table 1과 같다. 댐퍼날개의 개폐시간은 KS B 6266⁽⁹⁾에서 요구하는 동작시간을 고려하여 25 s로 제한하였으며, 이 시간을 운동해석시간으로 설정하였다.

Table 1. Conditions of Motion Analysis

Contents	Values
Time of Motion Analysis (t)	25 s
Pressure for Stack Effect (ΔP_{so})	91.3 Pa
Pressure of Fan (ΔP_f)	700.0 Pa
Open Angle of Damper Blade	0~90°
Acting Pressure of Damper Blade (ΔP)	791.3 Pa
Damper Area A	0.4 m ²
Motor Rpm n	7,500 rpm

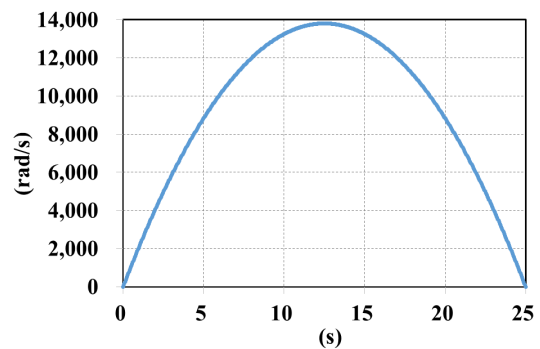


Figure 4. Angular velocity of motor gear.

배출댐퍼의 동적 시뮬레이션을 통해 각 요소의 기구적인 간섭을 해소하였고, 구동장치에서 선정된 유성기어의 적정성을 검토하였다. 댐퍼날개에 Table 1의 압력 ΔP 가 작용하고 배출댐퍼의 날개가 개폐될 때, 유성기어(Planetary gear)의 각속도(ω)와 각운동량(M_ω)을 계산하였고, 이들 결과로부터 DC 모터의 회전력을 결정하였다. 시뮬레이션 결과는 구동장치의 유성기어 모두 동일한 양상을 나타내기 때문에 유성기어 중 Figure 3의 모터기어(Motor gear)와 댐퍼날개를 개폐하는 섹터기어(Sector gear)의 결과만을 제시하였다.

Figure 4와 Figure 5는 액추에이터로부터 동력이 전달되어 댐퍼날개를 개폐시킬 때 모터기어와 섹터기어의 각속도를 나타낸 것이며, 댐퍼가 열리는 데 걸리는 시간은 12.5 s이고 닫히는 데 걸리는 시간도 12.5 s이다. 모터기어의 최대 각속도는 12.5 s에서 약 13,804 rad/s이고 섹터기어가 90° 회전하는 데 최대 각속도는 5.4 rad/s이다. 즉, 각속도 5.4 rad/s가 되면 댐퍼날개도 90° 회전하여 열리게 된다. 따라서 댐퍼는 모터보다 약 2,563배 감속되어 열리고 닫힌다.

Figure 6과 Figure 7은 모터기어와 섹터기어의 각운동량을 나타낸 것이며, 이들 기어의 각운동량의 크기는 액추에이터(모터)의 정격부하 토크를 결정하는데 사용된다. 유성기어의 각운동량의 크기는 회전체 반경에 따라 각운동량의 크기가 다르다. 모터기어와 섹터기어의 최대 각운동량은 댐퍼날개도 90° 회전하여 열리 때로 각 약 600 N·m와 5,034.5 N·m로 계산되었다.

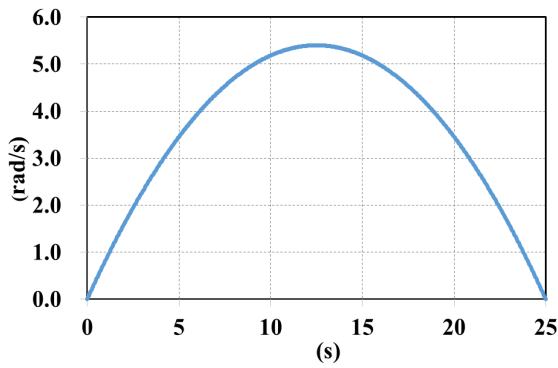


Figure 5. Angular velocity of sector gear.

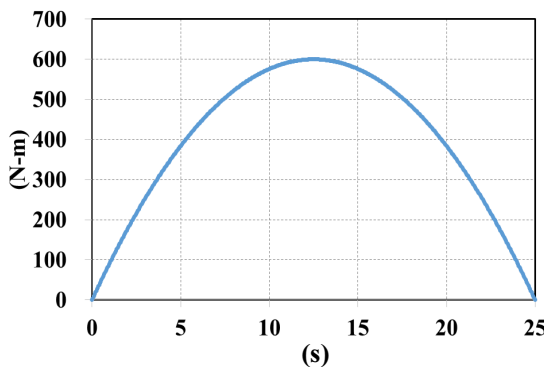


Figure 6. Angular momentum of motor gear.

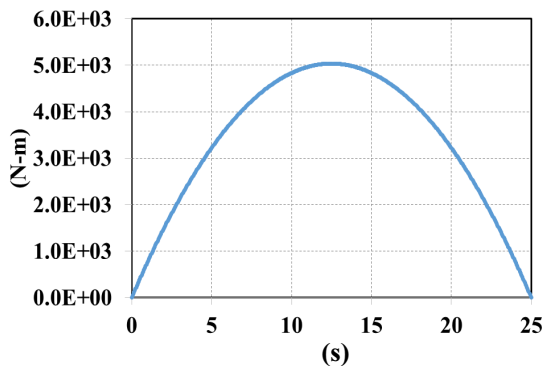


Figure 7. Angular momentum of sector gear.

해석결과에서 알 수 있듯이 유성기어로 감속시키면 모터의 작은 운동량으로 약 9배 정도의 큰 운동량을 낼 수 있음을 알 수 있다. 즉, 압력 $\Delta P = 791.3$ Pa이 작용하는 댐퍼를 개방하는 데 필요한 토크는 5,034.5 N-m이지만 회전력을 부가시키는 모터의 토크는 600 N-m 이 됨을 알 수 있다. 또한 Figure 2의 모터 축 지름을 고려하면, 모터의 실제 토크는 계산된 토크보다 훨씬 작은 값이라도 굴뚝효과와 송풍기의 압력을 극복할 수 있을 것으로 본다.

운동해석결과를 정리하면 Table 2와 같고, 이들 결과는 풍량제어 배출댐퍼의 각 구성요소들의 최적설계인자를 결정하는데 사용된다.

Table 2. Motion Analysis Results of Ventilation Damper

Contents		Values
Angular Velocity	Motor Gear	13,804 rad/s
	Sector Gear	5.4 rad/s
Angular Momentum	Motor Gear	600 N-m
	Sector Gear	5,034.5 N-m
Actuator Torque	DC Motor	About 600 N-m

Table 3. Conditions of Performance Test

Contents	Values
Smoke Control Room	2.1 m × 2.1 m
Fan	Q = 20,000 m ³ /hr P = 700 Pa
FCVD	A = 0.4 m ² Open angle = 0°~90°
MVD	A = 0.4 m ² Fully open
APDD	A = 0.225 m ² Fully open
Air	T = 20 °C, ρ = 1.2 kg/m ³
Torque (Unload State)	50 N-m
Operating Time	25 s

3. 성능시험 및 고찰

프로세스 및 알고리즘, 동작 메커니즘과 운동해석에서 도출된 Table 2의 엔지니어링 데이터를 근거로 Figure 3의 모델링과 동일하게 풍량제어 배출댐퍼의 모형을 제작하였고, 제작된 배출댐퍼의 효율성 검증과 상용화를 위해 성능시험을 하였다. 제연구역의 압력변화에 대한 풍량은 배출댐퍼의 개방각도에 대해 측정하였다. 배출댐퍼의 개방각도에 따른 제연구역의 압력 및 유량변화, 배출댐퍼의 동작시간과 회전력 등을 시험하였고, 시험조건 및 방법 등은 KS B 6266-2010⁹⁾과 자동차압압조절형댐퍼의 성능시험 기술기준¹⁰⁾에 따라 실시하였으며, 시험조건은 Table 3과 같다.

Figure 8은 배출댐퍼의 성능시험 계통과 장치구성을 나타낸 것이며, Table 3과 Figure 8에서 flow control ventilation damper (FCVD)는 유량제어 배출댐퍼, motored volume damper (MVD)는 모터볼륨댐퍼, auto pressure differential damper (APDD)는 자동차압댐퍼를 의미한다.

배출댐퍼의 개방각도에 따른 제연구역의 압력변화는 NFSC 501A에서 요구하는 허용차압 40 Pa과 110 N (60 Pa)을 기준으로 시험하였고, Dwyer Co.의 차압계(0~100 kPa)를 이용하여 제연구역과 옥내와의 압력차를 측정하였다. 시험결과는 Figure 9와 같다.

Figure 9에서 알 수 있듯이 배출댐퍼의 개방각도가 커짐에 따라 급기구축으로 바이 패스되는 공기량이 많아짐으로

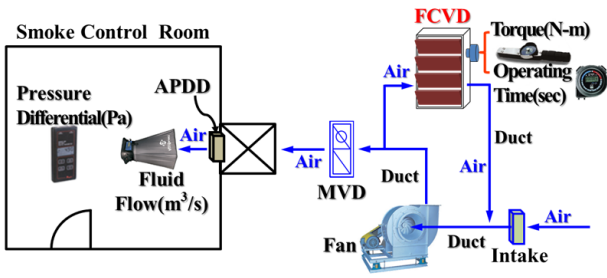


Figure 8. Performance test of ventilation damper.

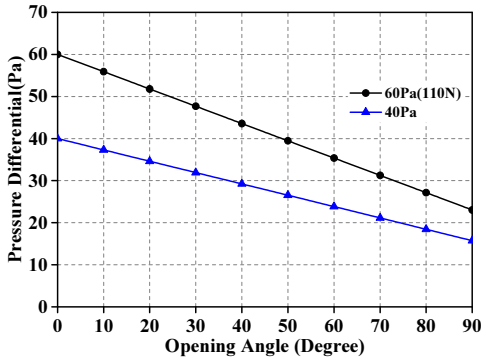


Figure 9. Pressure variation for open angle of damper.

써 압력차는 현격하게 줄어들음을 알 수 있다. 배출댐퍼가 90° 완전 개방되면 초기 설정압력 60 Pa와 40 Pa일 때 약 61% 줄어든 23 Pa와 16 Pa이 된다.

배출댐퍼의 개방각도에 따른 제연구역의 유량변화는 TSI Co.의 후드 유량계(5~3,500 CMS)를 이용하여 제연구역과 옥내와의 압력차가 500 Pa와 300 Pa일 때 급기량을 제연구역에서 측정하였으며, Figure 10 및 11과 같이 결과를 얻었다.

제연구역의 유량변화 역시 압력변화와 마찬가지로 배출댐퍼의 개방각도에 따라 줄어들게 되고, 유량변화는 기존 송풍기 유량과 비교해보면 압력차 500 Pa일 때는 약 3~5% (596~906 CMH), 300 Pa일 때는 약 2.3~2.5% (453~682 CMH) 정도 줄어들게 된다.

송풍기의 유량은 배출댐퍼의 풍도를 급기구측으로 바이패스시켰기 때문에 Figure 11과 같이 Figure 10의 유량변화만큼 늘어나게 된다. 즉, 압력차 500 Pa일 때는 약 1~5% (20,000~21,072 CMH), 300 Pa일 때는 약 1~2.5% (20,000~20,848 CMH) 더 늘어나게 된다.

Figure 11의 효과는 송풍기를 병렬로 설치할 때와 같이 풍량을 늘리는 효과가 있으며, 송풍기의 용량을 변경하지 않고도 송풍기의 설계풍량만으로도 충분하기 때문에 차압, 방연풍속 및 비개방층의 차압을 안정적으로 유지할 수 있고, 과압방지조치가 가능할 것으로 본다.

배출댐퍼의 동작시간은 댐퍼날개가 90° 개폐될 때 소요되는 시간으로 Casio Co.의 초시계(0.01 s, 0~10 hr)를 이용하여 측정하였으며, Figure 12와 같이 결과를 얻었다. 측정

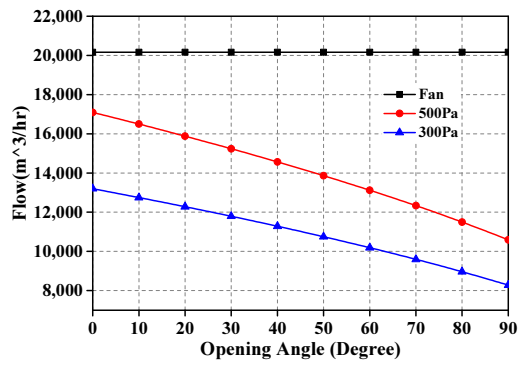


Figure 10. Flow variation for open angle of damper.

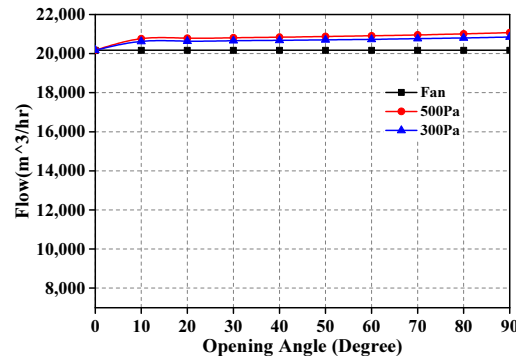


Figure 11. Fan applied flow for open angle of damper.

결과 동작시간은 평균 23.42 s로 성능시험조건과 비교해보면 1.58 s 짧게 측정되었다. 시험결과가 성능시험조건보다 짧기 때문에 화재 시 댐퍼의 동작시간을 앞당겨 줌으로 댐퍼의 기능측면에서는 오히려 더 좋은 결과라고 할 수 있다.

배출댐퍼가 90° 개폐될 때의 회전력은 무부하 상태에서 구동장치에 발생하는 토크⁽⁹⁾로 Snap-On Co.의 토크 미터(0~1,000 N-m)를 이용하여 측정하였으며, Figure 13과 같이 결과를 얻었다. 측정결과 토크는 평균 49.97 N-m이고 성능시험조건과 비교해보면 0.06% (0.03 N-m)의 오차로 거의 무시할 정도이며 시험조건에 만족한다. 이 결과로부터 Table 2에서 선정된 모터의 토크는 굴뚝효과 송풍기의 압력을 받는 댐퍼를 개폐하는 데 문제가 없을 것으로 본다.

4. 결론

제연설비의 성능을 확보·유지하기 위해 안정적인 풍량공급과 송풍기의 풍량을 효율적으로 사용(설계풍량 100%)할 수 있는 풍량제어 배출댐퍼를 제연구역의 압력변화에 따라 풍량을 조절할 수 있도록 개발하였으며, 개발 댐퍼의 효용성 검증과 상용화를 위해 성능시험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 풍량제어 배출댐퍼의 프로세스 및 알고리즘, 동작 메커니즘, 모델링 및 운동해석, 성능시험방법 등을 정립함으로써 댐퍼개발의 원천기술을 확보하였다.

2) 배출댐퍼의 개방각도가 커짐에 따라 압력변화는 댐퍼가 90° 완전 개방되면 초기 설정압력보다 약 61% 줄어드는 것으로 나타났다.

3) 송풍기의 풍량은 약 2~5% 정도 줄어들지만, 배출댐퍼에 의한 전체 급기량은 약 1~5% 정도 더 증가되는 것으로 나타났다.

4) 제연구역에 송풍기 설계풍량 100% 이상의 안정적인 풍량공급으로 풍량제어 배출댐퍼의 효용성을 입증하였다.

5) 배출댐퍼가 상용화된다면 제연설비의 성능 극대화 가능할 것으로 보며, 연기의 침입·확산을 방지하여 피난안전성을 확보하고 인명과 재산피해를 최소화할 수 있을 것으로 본다.

References

1. NFSC 501A, "National Fire Safety Code of Stair Cases of Specific fire Escape Stairs and Smoke Control Systems of Ancillary Rooms", MPSS (2016).
2. D. M. Lee, "A Study on the Development of Dual Mode Damper for Flow Control of Smoke Control Room", Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 17, No. 4, pp. 181-187 (2017).
3. D. W. Yoon and B. W. Ahn, "The Evaluation on the Control Characteristics of Air Volume According to the Stroke Ratio of Damper Blade in Demand Controlled Ventilation (DCV) System", Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, Vol. 20, No. 9, pp. 281-288 (2004).
4. D. M. Lee and B. G. Yoo, "A Basic Study on the Pressure Controlled Ventilation Damper for Performance Improvements of Smoke Control Systems", Proceedings of 2017 Autumn Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 203-204 (2017).
5. M. S. Kang and M. H. Son, "Mechanism Engineering", pp. 15-94 (1981).
6. G. T. Tamura, "Smoke Movement and Control in High-Rise Buildings", National Fire Protection Association, pp. 41-96 (1994).
7. D. M. Lee, "Smoke Management Engineering", Donhaw Pub., pp. 137-166 (2017).
8. Matt Lombard, "Solidworks 2010 Bible", Wiley Publishing Inc. (2010).
9. KATS, "KS B 6266 : Test Methods of Smoke and Heat Control Systems-Part 3: Smoke Dampers" (2010).
10. KFI, "Performance Test Technical Standard of Auto Pressure Differential and Over Pressure Control Type Damper" (2015).