[Research Paper]

공동주택 화재 시 부속실 가압 시스템의 방연풍속에 관한 수치해석적 연구

김병준 · 양 영 · 신원규^{*†}

충남대학교 기계공학과 대학원생, *충남대학교 기계공학과 교수

Numerical Study on Air Egress Velocity of Ancillary Room Pressurization Systems in Apartment Fires

Byeongjun Kim · Ying Yang · Weon Gyu Shin^{*†}

Graduate Student, Dept. of Mechanical Engineering, Chungnam National Univ.,

^{*}Professor, Dept. of Mechanical Engineering, Chungnam National Univ.

(Received May 20, 2020; Revised June 16, 2020; Accepted July 13, 2020)

요 약

본 연구에서는 공동주택 화재 시 부속실 가압 시스템의 방연풍속에 관하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석을 통해 댐퍼의 급기량과 방화문에서의 방연풍속의 관계식을 선형적으로 나타내었고 국가화재안전기준인 방연풍속 0.7 m/s를 만족하는 댐퍼의 최소유량을 선정할 수 있었다. 댐퍼의 최소유량을 적용하여 댐퍼의 급기 방향과 설치 높이에 따라 방연속도를 분석하였다. 댐퍼의 급기 방향이 상향인 경우와 댐퍼가 높게 설치되었을 때 댐퍼의 급기 방향이 하향인 경우보다 방화문 상부에서 더 큰 방연풍속을 나타내었고 누출된 연기 농도가 더 낮은 것을 확인할 수 있었다. 따라서 방화문 상부에서 큰 방연풍속을 확보하는 것이 제연에 더 효율적일 것으로 판단된다.

ABSTRACT

In this study, numerical simulations were performed on the air egress velocity of pressurization systems in an ancillary room when a fire occurred in an apartment house. The relationship between the air supply flow rate of a damper and air egress velocity at a fire door is predicted to be linear. Additionally, a minimum flow rate of the damper, which meets national fire safety standards for air egress velocity, i.e., 0.7 m/s can be estimated. Air egress velocity at the fire door is analyzed according to the supply air direction and installation height of the damper. When the damper has an upward supply air direction and is installed at a high level, the egress velocity at the top section of the fire door is larger, whereas the soot concentration at the ancillary room is lower than when the supply direction of the damper is downward. Therefore, it is found that increasing the air egress velocity at the top section of the fire door helps to efficiently prevent the inflow of smoke.

Keywords : Pressurization system, Air egress velocity, Ancillary room, Computational fluid dynamics

1. 서 론

여러 개의 구획공간으로 구성된 건축물에서의 화재로 인한 연기는 대피와 소방 활동에 악영향을 주는 요인 중 하나이다. 화재로 생성된 연기는 부력에 의해 천장으로 상승하게 되고 유동이 있는 연기층을 형성하게 되며 천장 급류 효과로 주위로 전파된다. 이 때 구획공간 사이의 압력차는 건물 내부의 연기 전파 특성에 큰 영향을 미친다. 화

재로 인해 생성된 연소생성물과 연기는 화재가 발생한 구획공간의 압력을 높이게 되며 상대적으로 낮은 압력을 유지하는 상층부 또는 주위의 구획공간으로 흐르게 된다⁽¹⁾. 이러한 연기의 거동은 건물의 피난 경로와 대피 공간의 안전성에 심각한 위협이 되며 대량의 인명 피해를 야기할 수 있다. 따라서 건축물 화재에서 연소 가스와 화재 연기로부터 피난 경로 및 공간을 보호함으로써 인명 피해를 최소화하기 위해 제연 및 방연 시스템의 성능 향상과 검증을 위

[†] Corresponding Author, TEL: +82-42-821-5647, FAX: +82-42-821-5642, E-Mail: wgshin@cnu.ac.kr

© 2020 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

해 다양한 연구와 기술개발이 이루어지고 있다⁽²⁻⁴⁾.

다양한 제연 및 방연 시스템 중 급기가압 제연설비는 피난 경로의 압력을 상승시켜 연기의 침투를 적극적으로 막는 방법이다⁽⁵⁾. 피난 경로 또는 대피 공간에 옥외의 신선한 공기를 공급하고 부속실과 옥내 사이에 50 Pa의 일정한 차압을 형성하여 연기의 누출을 막을 수 있다. 그리고 방화문이 열렸을 때 보충량이 추가되어 생성된 방연풍속은 연기와 연소생성물의 침투를 방지할 수 있다. 특히 화재 시 안전한 피난 경로 확보와 소방관의 소화 및 구조 활동의 편의성을 증가시키기 위해 계단실 및 부속실에 대한 제연설비의 적용이 반드시 필요하다. 따라서 급기가압 제연설비의 성능확보는 건축물의 화재 안전 및 피난 안전 측면에서 필수적인 요소로 인식되고 있다. 공동주택 내의 계단실 및 부속실에 대한 제연방식으로 사용될 경우 안전한 피난 경로 확보를 통한 인명 안전성 증대와 함께 소방관의 소화 및 구조 활동의 편의를 도모할 수 있어 적용이 확대되고 있다.

Ko⁽⁶⁾는 소방산업기술원의 누기율 시험 설비를 대상으로 급기가압 제연설비가 설치되었을 때 건물 내부 공기유동에 대한 수치해석을 수행하고 거실, 부속실 및 계단실 사이의 차압분포와 유동 특성을 분석하였다. 거실과 부속실 사이의 문에서 방연풍속은 국가화재안전기준을 만족하였으나 국부적으로 부속실로의 역류 현상을 확인하였고 제연설비의 성능 향상을 위해 국부적인 유동특성을 고려해야 하는 필요성을 나타내었다. 또한, Ko⁽⁷⁾는 동일 공간에 대한 화재 해석을 수행하여 가압 및 환기 조건에 따른 화재 연기의 유동특성을 분석하였다. 해석 결과 급기가압의 조건에서도 화재 연기가 문의 상충부를 통해 부속실로 유출되는 것을 보여주었다. 방연풍속을 만족하는 송풍량도 연기의 유출을 막기에 충분하지 않기 때문에 적절한 제연설비가 필요할 것으로 판단되었다. You 등⁽⁸⁾은 부속실이 단독으로 제연될 때 급기가압 제연설비의 성능확보에 영향을 주는 보충량 및 누설량, 누설면적과 같은 주요 변수들을 확인하고 부속실로의 공급유량과 누설면적 변화에 따른 풍도와 부속실 차압 형성 관계를 실험적으로 나타내었다. 부속실 누설면적과 차압관계를 분석한 결과 부속실의 차압은 저압 영역과 과압 영역 상관없이 부속실의 누설면적이 증가할수록 반비례하여 감소하는 것을 보여주었다. Seo와 Shin⁽⁹⁾의 논문에서는 2개의 출입문이 존재할 경우 균일한 방연풍속을 얻기 위한 댐퍼 위치와 급기 방향의 중요성을 나타내고 있다. 2개의 방화문의 중간에 댐퍼가 위치하는 경우 균일한 방연풍속을 얻을 수 있었고 상부에서 역류가 생성되지 않는 조건으로 댐퍼에서 하부로 공기가 유입 될 경우 2개의 출입문에서 균일한 방연풍속을 얻는 것을 보여주었다. 또한, Seo와 Shin⁽¹⁰⁾은 공동주택 화재 시 화재 크기 및 실내 개구부 크기가 화재풍속에 미치는 영향을 확인하기 위해 수치해석 연구를 수행하였다. 화재 크기가 커질수록, 개구부 크기가 작을수록 방화문 상부에서의 화재풍속이 커지는 것을 나타내었다.

기존의 연구 결과들은 국가화재안전기준⁽⁵⁾의 평균 방연풍속이 0.7 m/s를 충족하는지와 방화문 전체적으로 균일한 방연풍속을 확보하는 것에 대한 중요성을 나타내었다. 하지만, 화재 발생 시 연기는 부력으로 인해 상부로 상승하여 방화문 상부에서 빠른 속도로 연기가 누출된다. 그렇기 때문에 방화문 상부에서 더 큰 방연풍속이 확보되어야 하지만 이와 관련된 연구는 충분히 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 부속실 가압 시스템의 방연풍속 기준을 충족하는 최소유량을 수치 해석적으로 계산하고 화재 발생 시 댐퍼의 급기 방향, 유량 변화, 설치 높이가 방화문에서의 방연풍속에 미치는 영향에 대해 수치해석을 통하여 연구하고자 한다. 또한, 국부적으로 역류가 발생하지 않고 효율적으로 제연할 수 있는 방안에 대하여 검토해보고자 한다.

2. 수치해석방법

본 연구에서는 수치해석을 위해 미국의 National Institute of Standards and Technology (NIST)에서 개발한 FDS Ver. 6.7.3 solver를 사용하였고, 전처리를 위하여 PyroSim 2016을 이용하였다. FDS는 화원에서 발생하는 저속(Low mach number)의 열과 연기의 해석이 가능하고 열유동은 Navier-Stokes 방정식을 기반으로 계산한다. 본 연구에서는 모델 격자 및 해석 시간 등을 고려하여 LES모델을 선택하고 연소 모델은 혼합분율 연소 모델(Mixture fraction combustion model)을 사용하여 해석을 수행하였다. Newtonian 유체에 대한 질량, 운동량 및 에너지 보존 방정식과 이상 기체 상태 방정식이 FDS 모델에 사용되었다.

본 연구에서는 기존 논문을 참조하여⁽¹⁰⁾ 공동주택의 실제 형상과 치수를 반영하여 해석을 수행하였으며, 해석영역은 Figure 1과 같다. Figure 1에서 방화문의 폭은 1.2 m이고 높이는 2.1 m이다. 거실의 창문의 경우의 경우 창문의 밑면이 바닥으로부터 높이가 1.5 m에 위치하도록 설정하였고, 창문의 면적은 0.09 m² (0.3 m × 0.3 m)이다. 창문은 열려있는 것으로 가정하여 화재발생공간이 밀폐되지 않도록 하였다. 벽의 두께는 0.3 m, 거실의 높이는 2.4 m 이다. 제연설비의 역할을 하는 댐퍼는 부속실 가운데 설치되었고 크기는 0.36 m² (0.6 m × 0.6 m)이다. 누설면적의 경우 실제 누설 위치를 정확히 파악하는 것이 어렵기 때문에 Ko 등의 논문을 참고하여 누설면적을 0.021 m² (0.01 m × 2.1 m)으로 계단실 문, 옆집 문, 엘리베이터 문, 방화문에 설정하였다⁽⁶⁾. 화재는 거실 중앙에서 발생하는 것으로 가정하였고 화원은 n-heptane을 적용하였으며 Pool fire를 가정하여 해석을 수행하였다. n-heptane의 경우 수많은 실험을 통해 검증된 연료로써 정확한 Soot yield를 적용하기 위해 사용되었다. 화재발생면적은 0.48 m² (0.6 m × 0.8 m)이고 최대 화재 크기는 1045 kW이며 Fire dynamics tools (FDT)를 이용하여 계산되었다⁽¹¹⁾. 화재는 t²에 따라 5 s 동안 성장하여 최대 화재 크기에 도달하도록 가정하였다. 해석에 적용된

Figure 1. Schematic on fire simulation domain and summary on simulation conditions.

Figure 2. Grid convergence analysis for different cell size in terms of v-velocity.

Soot yield는 0.037 kg/kg이다⁽¹³⁾. 화재 발생 후 제연설비가 작동되어 부속실과 화재실 사이에 50 Pa의 차압이 형성되어야 한다. 그렇기 때문에 방화문이 열리는 30 s 전까지 차압이 50 Pa를 유지하도록 댐퍼의 유량을 조절하여 해석을 수행하였다.

국가화재안전기준에서는 부속실 단독 제연일 경우 방화문 개방 시 0.7 m/s 이상의 방연풍속을 확보하도록 명시되어 있다. 방화문에서 0.7 m/s 이상의 방연풍속을 확보할 수 있는 댐퍼의 최소유량을 계산하기 위해 댐퍼에서의 유량을 달리 적용하여 해석을 수행하였다. 해석으로 계산된 댐퍼의 최소유량을 적용하고 댐퍼의 급기 방향을 수평 방향 및 수평 방향을 기준으로 상향 30°, 45°, 60° 하향 30°, 45°, 60°로 선정하여 방화문 높이에 따른 평균 방연풍속을 나타내었다. 그리고 상향 45°, 60°의 경우 최소유량보다 작은 유량을 적용했을 때의 평균 방연풍속과 댐퍼의 설치 위치를 0.6 m, 1.2 m, 1.8 m로 선정하였을 때 설치 높이에 따른 평균

방연풍속을 비교하였다. 화재 발생 시 댐퍼의 급기 방향, 유량 변화, 설치 위치에 따른 방화문에서의 풍속을 비교하였고 부속실로 누출된 연기농도를 계산하여 제연 성능을 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 격자 수렴성

Figure 2는 격자 수렴성을 확인하기 위해 0.075, 0.1, 0.15 m의 격자 크기를 적용하였고 부속실의 댐퍼와 거실의 화재를 고려하여 해석을 수행하였다. 화재모델링에서 일반적으로 격자 크기는 특성 화재직경(Characteristics fire diameter, D^*)⁽¹²⁾ 내부에 4~16개의 격자가 설정되었을 때 결과의 타당성을 확보할 수 있다고 알려져 있다⁽¹⁴⁾. 본 연구에 적용된 화재의 $\dot{Q}_{max}$ 는 1045 kW이고 D^* 는 0.976 m로 계산된다. 본 연구에서는 방화문에서 예측되는 속도가 중요하기 때문에 방화문의 0.8, 1.0, 1.8, 2.0 m 높이에서 10 s 동안의 평균 속도로 격자 수렴성을 확인하였다. 3가지 격자 크기는 D^*/dx 를 계산했을 때 기준에 적합하지만, 격자 크기가 0.15 m인 경우에는 다른 격자 크기의 결과보다 속도가 상대적으로 크게 예측되었다. 격자 크기가 0.1 m 이하에서는 비슷한 속도를 예측하기 때문에 계산의 효율성을 고려하여 0.1 m 격자 크기로 해석을 수행하였다. 이는 D^* 내에 약 9.7개의 격자가 포함된 것으로 총 격자 수는 약 34만 개이다.

3.2 방연풍속을 위한 댐퍼 급기량 계산

일정한 누설 틈새를 가지는 부속실에서 방화문이 열렸을 때 방연풍속 0.7 m/s 이상을 확보할 수 있는 최소유량을 계산하기 위해 댐퍼에서의 유량을 변화시켜 해석을 수행하였다. Figure 3은 댐퍼에서의 유량을 2.0-3.5 m³/s로 적용하였을 때 방화문을 통과하는 유량을 시간에 따라 나타낸 것이다. 방화문이 열려있을 때 부속실에서의 총 누설 틈새가 0.063 m²로 고정되어 있기 때문에 약 2초 후에는 방화문을 통과하는 유량이 일정해진다. 댐퍼에서의 유량은 2.0 m³/s에서 0.5 m³/s씩 증가시켰을 때 방화문을 통과하는 유량은 약 0.3 m³/s로 증가하는 것을 볼 수 있다.

Figure 4는 Figure 3의 방화문에서의 유량을 방연풍속으로 계산하여 댐퍼의 급기량(Q)과 방연풍속(V)의 관계식을 나타낸 것이다. 해석에서 적용한 각각의 유량과 방화문에서의 평균 방연풍속은 선형적으로 표현되고 평균 방연풍속 0.7 m/s 이상을 확보할 수 있는 댐퍼에서의 유량을 계산할 수 있다. 이론적으로 방화문의 면적이 2.52 m²이기 때문에 0.7 m/s 이상의 방연풍속을 확보하기 위해 방화문에서는 1.764 m³/s 이상의 유량이 흘러야 한다. 하지만, Figure 5와 같이 댐퍼에서 나오는 유량은 재순환되고 누설 틈새로 유량이 빠져나가기 때문에 댐퍼에서 공급된 유량이 그대로 방화문으로 흐르지 않는다. 그렇기 때문에 평균 방연풍속을 확보하기 위한

Figure 3. Volume flow rate through fire door.

Figure 4. Correlation between volume flow rate and v-velocity at fire door.

Figure 5. Velocity magnitude at A-A' section of Figure 1.

댐퍼에서의 급기량은 더 클 필요가 있다. Figure 4의 관계식을 통해 0.7 m/s 이상의 방연풍속을 확보하기 위해 계산된 유량은 약 2.88 m³/s이며 수치해석에서는 3.0 m³/s 을 적용하여 해석을 수행하였다. 또한, 상향 45°, 60°의 경우 관계

Figure 6. Average v-velocity without damper at fire door in case of fire.

식을 통해 계산된 최소유량보다 작은 2.6 m³/s의 유량을 추가로 적용하여 방연풍속 및 연기농도를 비교하였다.

3.3 화재 시 댐퍼가 없는 경우 방화문에서의 풍속

Figure 6은 댐퍼가 없는 경우 화재 발생 후 30 s 후에 대피를 가정하여 방화문이 열렸을 때 방화문의 높이에 따라 10 s 동안의 평균풍속을 나타낸 것이다. 대피를 가정하고 있기 때문에 열린 직후의 속도가 중요하다고 판단되어 10 초 동안의 평균값을 계산하였다. 각 높이에서의 속도는 방화문을 수직인 방향으로 통과하는 속도(v-velocity)를 예측하였고 방화문 각 높이에서의 수평방향 0.2 m 간격으로 6 개를 설치하여 평균값으로 계산하였다. 속도의 (+) 부호는 부속실에서 거실로의 방향을 의미한다. 부력 효과에 의해 연기는 천장으로 상승하게 되고 천장 급류(Ceiling jet) 효과에 의해 주위로 전파된다. 천장을 타고 흐르는 연기는 방화문 개방 시 방화문 상부로 흐르게 되기 때문에 방화문 상부에서 속도가 큰 것을 볼 수 있다. 거실 내부와 부속실 사이의 압력차에 의해 상부에서는 부속실 방향으로 연기가 흐르게 되고 하부에서는 거실 방향으로 유동이 흐르게 된다. 그렇기 때문에 댐퍼가 작동되었을 때 연기가 누출되는 것을 효율적으로 막기 위해 방화문 상부에서 큰 풍속이 확보될 필요가 있다.

3.4 댐퍼의 급기 방향에 따른 방화문에서의 방연풍속

방화문에서 평균 방연풍속을 확보하더라도 국부적으로 역류가 발생할 수 있고 이를 최소화하기 위하여 댐퍼의 급기 방향에 따라 방화문에서의 방연풍속을 확인할 필요가 있다^(6,9). Figure 7은 화재가 없을 때 급기 방향을 달리하여 방화문의 높이에 따라 방화문에서 10 s 동안의 평균 방연풍속을 나타낸 것이다. 예측 위치는 Figure 6에서 예측한 위치와 같다. 급기 방향이 하향인 경우 방화문 하부에서는 약 1.4 m/s의 속도를 보여주고 있고 방화문 상부보다는 하부에서 더 큰 방연풍속을 나타내고 있다. 하향 60°부터 각

Figure 7. Average v-velocity according to the angle of damper in the absence of fire:(a) Downward and horizontal, (b) Upward.

Figure 8. Average v-velocity according to height of damper in the absence of fire:(a) 45° and (b) 60°.

도가 점점 작아질수록 방화문 상부에서의 속도가 커지게 된다. 급기 방향이 수평인 경우에는 방화문 상부보다는 하부에서 더 큰 풍속을 보여준다. 급기 방향이 상향일 경우 방화문 상부의 여러 높이에서 0.7 m/s 이상의 방연풍속을 보여주고 있고 상향 45°인 경우에 방화문 상부에서 약 1 m/s의 가장 큰 속도를 나타낸다. 2.6 m³/s의 급기 유량을 적용한 상향 45°와 60°의 경우 기존보다 유량을 감소시켰기 때문에 방화문의 모든 높이에서 속도가 감소되었다.

댐퍼의 급기 방향이 상향 45°와 60°에 대해 방화문 설치 높이에 따른 방연풍속을 Figure 8에 나타내었다. 댐퍼가 더 높게 설치될수록 방화문 상부에서의 최대 방연풍속은 45°의 경우 약 1.3 m/s, 60°의 경우 약 1.4 m/s까지 상승하였고 1.4 m 이상의 높이에서 설치 높이가 높아질수록 방연풍속이 커지는 것을 볼 수 있다. 예측된 결과에서는 급기 방향이 상향인 경우에 방화문 상부에서 큰 방연풍속을 확보할 수 있다. 또한, 댐퍼의 설치 높이가 높을수록 방화문 상

부에서 큰 방연풍속을 확보하고 있기 때문에 더 효과적으로 제한할 것으로 예측되고 3.6절에서 부속실로 누출되는 연기농도에 대해 고찰하고자 한다.

모든 급기 방향, 유량 변화와 설치 높이에 따른 평균 방연풍속을 Table 1에 나타내었다. 방화문 면적을 흐르는 유량으로 계산된 방연풍속은 3.2절에서 확인한 바와 같이 0.7 m/s 이상을 나타내지만, Table 1의 평균 방연풍속은 급기 방향이 상향과 하향인 경우에 따라 크게 달라지는 것을 볼 수 있다. 급기 방향이 하향인 경우와 댐퍼의 급기량을 감소시킨 평균 방연풍속이 비슷하거나 더 작게 예측되었고 높이에 따라서는 큰 차이를 나타내지 않았다. 각 조건에 따른 평균 방연풍속이 다르게 계산되었는데, 예측된 속도는 방화문에 수직한 방향으로의 속도벡터이기 때문에 유량으로 계산된 속도와 비교했을 때 차이가 발생하는 것으로 판단된다. 또한, 댐퍼에서 동일한 유량을 급기하지만 댐퍼의 급기 방향에 따라 부속실에서 재순환 되는 유동 방향이 달라

Table 1. Average v-velocity at Fire Door

Supply Direction	Flow Rate of Damper (m ³ /s)	Average v-velocity (m/s)	Height of Damper (Angle of Damper)	Flow Rate of Damper (m ³ /s)	Average v-velocity (m/s)
Downward 60°	3.0	0.71	0.6 m (upward 45°)	3.0	0.82
Downward 45°	3.0	0.71	1.2 m (upward 45°)	3.0	0.82
Downward 30°	3.0	0.71	1.8 m (upward 45°)	3.0	0.81
Horizontal	3.0	0.79	0.6 m (upward 60°)	3.0	0.78
Upward 30°	3.0	0.78	1.2 m (upward 60°)	3.0	0.81
Upward 45°	2.6	0.71	1.8 m (upward 60°)	3.0	0.80
Upward 45°	3.0	0.82			
Upward 60°	2.6	0.67			
Upward 60°	3.0	0.79

Figure 9. Average v-velocity according to the angle of damper in case of fire:(a) Downward and horizontal, (b) Upward.

지기 때문에 방화문에서의 수직한 방향 속도는 달라지게 되는 것으로 보인다.

3.5 화재 시 댐퍼가 있는 경우 방화문에서의 풍속

Figure 9, 10은 화재가 발생하고 30 s 후에 방화문이 열렸을 때 10 s 동안 방화문에서의 평균풍속을 예측한 것이다. 예측 위치는 Figure 6에서 예측한 위치와 같다. 급기 방향이 하향인 경우와 수평, 상향 30°의 경우에 방화문 상부에서 음의 풍속이 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한, 모든 하향 각도에서 약 1.5 m의 방화문 높이까지 음의 풍속을 나타내고 있다. 음의 풍속은 부속실 방향으로 유동이 흐르는 것을 의미하며 연기가 부속실로 누출된다는 것을 의미한다. 급기 방향이 상향인 경우 거의 모든 방화문 높이에서 양의 풍속을 나타내고 있다. 댐퍼의 설치 위치에 따른 풍속도 양

의 풍속을 보여준다. 방화문 상부에서 화재로 인한 풍속 때문에 속도가 감소되었지만 방화문 대부분의 높이에서 0보다 큰 속도를 나타내고 있기 때문에 제연에 효과적일 것으로 예측된다.

Figure 11은 화재 발생 시 댐퍼가 없는 경우와 댐퍼의 급기 방향이 하향 30, 45°인 경우, 상향 45° 일 때 설치 높이에 따른 v-velocity 분포를 벡터와 함께 나타낸 것이다. (+) 부호는 거실에서 부속실로의 속도를 의미하고 (-) 부호는 부속실에서 거실로의 속도를 의미한다. 댐퍼가 없는 경우 방화문 상부에서는 부속실로 속도를 나타내며 연기가 부속실로 흐르는 것을 보여준다. 급기 방향이 하향인 경우에는 천장 부근에서 (+)부호를, 바닥 부근에서는 (-)부호를 나타내면서 반시계 방향으로 회전하는 유동이 발생한다. 거실 천장을 타고 흐르는 연기가 누출되는 것을 도와주는 방향

Figure 10. Average v-velocity according to the angle of damper in case of fire: (a) 45° and (b) 60°.

Figure 11. V-velocity distribution with vector according to angle of damper (B-B' section of Figure 1).

으로 흐르게 되어 결과적으로 연기를 효과적으로 제연하기 어려울 것으로 판단된다. 반대로 댐퍼의 각도가 상향 45°인 경우에는 부속실 천장 부근에서 (-)부호를, 바닥 부근에서는 (+)부호를 나타내면서 시계방향으로 회전하는 유동이 발생하게 된다. 또한, 높이에 따른 속도 분포는 모두 부속실 상부에서 거실 하부로 흐르는 것을 보여준다. 이러한 유동은 거실에서 천장을 타고 흐르는 연기를 효율적으로 막을 수 있을 것으로 보인다.

3.6 댐퍼 설치 조건에 따른 연기농도

Table 2는 댐퍼가 없는 경우와 댐퍼의 급기 방향 및 유량에 따라 부속실에서의 연기농도를 비교한 것이다. 연기농도 예측 위치는 방화문 중심에서 수평 방향으로 0.6 m 떨어진 곳부터 0.6 m 간격으로 3개를 설치하였고 천장으로부터 0.3 m 간격으로 높이에 따라 총 24개가 설치되었다 (Figure 1C). 연기농도는 방화문이 열린 후 10 s 동안의 평균값을 나타내었다. 댐퍼가 없는 경우 연기는 거실 천장을

흘러 방화문 상부로 흐르게 되고 그 결과 예측한 높이 중 가장 높은 곳에서 가장 큰 농도인 약 $16 \times 10^{-5} \text{ kg/kg}$ 가 예측되었다. 같은 2.4 m 높이에서 댐퍼가 적용된 시나리오의 농도와 비교했을 때 최소 약 13배에서 최대 약 330배 이상 차이가 발생하는 것으로 보아 댐퍼에 의한 제연 효과를 확인할 수 있다. 댐퍼의 급기 방향에 따라 평균적으로 연기농도가 가장 작은 경우는 댐퍼의 각도가 상향 45°일 때가 $0.056 \times 10^{-5} \text{ kg/kg}$ 로 가장 낮았다. 가장 큰 경우는 하향 30°인 경우이며 상향 45°인 경우와 비교했을 때 약 26배 차이를 나타내고 있다. 또한, Table 1에서 급기방향이 하향인 경우와 급기량을 감소시킨 상향 45°, 60°의 경우의 평균 방연풍속이 유사하거나 상향 60°에서 더 작게 예측되었지만, 평균 연기농도는 급기량이 작은 경우에 약 7 배 더 작게 예측된 것을 볼 수 있다. 댐퍼의 급기량이 작아졌지만 방화문 상부에서 더 큰 방연풍속을 확보하였기 때문에 연기 누출량이 작아진 것으로 보이고 방화문 전체의 방연풍속보다는 방화문 상부에서의 방연풍속 크기가 중요하다는 결론에 도

Table 2. Soot Concentration at Ancillary Room According to Angle of Damper (C section of Figure 1).

Supply Direction	Flow Rate of Damper (m ³ /s)	Height (m)								
		2.4	2.1	1.8	1.5	1.2	0.9	0.6	0.3	Avg.
		Soot Mass Fraction ($\times 10^{-5}$)								
Downward 60°	3.0	1.295	3.119	2.137	1.177	0.853	0.837	0.963	0.808	1.399
Downward 45°	3.0	1.024	3.194	2.010	1.129	1.018	0.991	1.022	0.740	1.391
Downward 30°	3.0	0.309	2.552	3.101	1.840	1.343	1.076	0.990	0.698	1.489
Horizontal	3.0	0.301	1.074	0.998	0.744	0.413	0.157	0.116	0.073	0.484
Upward 30°	3.0	0.005	0.013	0.090	0.157	0.194	0.134	0.118	0.124	0.105
Upward 45°	2.6	0.015	0.012	0.013	0.023	0.042	0.081	0.117	0.147	0.130
Upward 45°	3.0	0.024	0.020	0.025	0.118	0.148	0.187	0.257	0.258	0.056
Upward 60°	2.6	0.024	0.075	0.152	0.269	0.309	0.239	0.208	0.184	0.263
Upward 60°	3.0	0.011	0.086	0.383	0.521	0.455	0.364	0.181	0.100	0.182
W/o damper	N/A	16.772	14.358	9.546	5.472	2.027	0.925	0.201	0.021	6.165

Figure 12. Soot concentration at ancillary room according to height of damper.

달할 수 있다.

Figure 12는 댐퍼의 높이에 따라 부속실에서의 평균 연기농도를 비교한 것이다. 상향 45°와 60° 모두 댐퍼의 설치 높이가 0.6 m 보다 높은 경우에 평균 연기농도가 감소하였고 상향 45°에서는 댐퍼의 설치 높이가 높아지면서 약 3배 감소한 것을 볼 수 있다. Figure 8에서 댐퍼의 설치 높이가 높을수록 방화문 상부에서의 방연풍속이 더 커졌고 그에 따라 연기 누출량이 감소된 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 공동주택 화재 시 부속실 가압 시스템의 방연풍속에 관하여 수치해석적으로 연구를 수행하였다. 누설틈새를 고려한 시뮬레이션에서 방화문이 열렸을 때 댐퍼의 급기량에 따른 방연풍속은 부속실 댐퍼의 유량과 선형적인 관계를 나타내었고 국가화재안전기준인 0.7 m/s 이상

의 방연풍속을 만족할 수 있는 최소유량을 계산할 수 있었다. 댐퍼의 급기 방향이 상향인 경우 부속실에서는 시계방향으로 재순환되는 유동을 보이며 방화문 상부에서 큰 방연풍속을 나타내었다. 또한, 댐퍼의 설치 높이가 높아질수록 방화문 상부에서 더 큰 방연풍속을 얻을 수 있었다. 댐퍼의 급기 방향 및 높이에 따른 부속실에서의 연기농도 비교를 통해 방화문 상부에서 큰 방연풍속을 나타낸 조건에서 더 효율적으로 제연되는 것을 확인하였다. 그리고 급기 방향이 상향이고 댐퍼의 급기량이 작아진 경우는 급기 방향이 하향인 경우보다 연기농도가 낮게 예측되었다. 따라서 효율적인 제연을 위해 방화문 상부에서 큰 방연풍속을 확보하는 것을 중요하게 고려될 필요가 있다.

후 기

본 연구는 충남대학교의 지원을 받아 수행되었으며 관계제위에 감사드립니다.

References

1. J. G. Quintiere, "Fundamentals of Fire Phenomena", JohnWiley, & Sons Ltd., Chichester, UK (2006).
2. M. J. Lee, N. I. Kim and H. S. Ryou, "Air Tightness Measurement with Transient Methods using Sudden Expansion from a Compressed Chamber", Building and Environment, Vol. 46, No. 10, pp. 1937-1945 (2011).
3. H. J. Moon, G. H. Ko and H. S. Ryou, "Numerical Study on the Effect of Damper Position on Characteristics of Thermal Flow at the Vestibules and Fire Door", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 27, No. 1, pp. 31-38 (2013).
4. J. Y. Kim and C. S. Ahn, "Case Study of a Field Test for

- a Smoke Control System Using Sandwich Pressurization”, Fire Science and Engineering, Vol. 30, No. 5, pp. 87-92 (2016).
5. 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).
 6. G. H. Ko, “Numerical Simulation on Smoke Movement in Multi-Compartment Enclosure Fires under Pressurized Air Supply Conditions”, Fire Science and Engineering, Vol. 32, No. 6, pp. 15-21 (2018).
 7. G. H. Ko, “Numerical Analysis on Flow Characteristics in the Pressurized Air Supply Smoke Control System”, Fire Science and Engineering, Vol. 31, No. 4, pp. 52-58 (2017).
 8. W. J. You, G. H. Ko, S. H. SaKong, J. S. Nam and H. S. Ryou, “An Analysis on the Major Parameter and the Relations of Pressure Difference Effect of Leakage Area in the Smoke-Control Zone”, Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 27, No. 1, pp. 20-25 (2013).
 9. C. W. Seo and W. G. Shin, “Numerical Study on Air Egress Velocity in Vestibule Pressurization System: Damper Location for Uniform Air Egress Velocity in the case of Two Fire Doors”, Fire Science and Engineering, Vol. 28, No. 6, pp. 1-7 (2014).
 10. C. W. Seo and W. G. Shin, “Numerical Study on the Effect of Heat Release Rate and Interior Opening on Fire Flow Velocity in the Case of Interior Fire in an Apartment Building”, Fire Science and Engineering, Vol. 28, No. 5, pp. 37-43 (2014).
 11. N. Iqbal, M. H. Salley and S. Weerakkody, “Fire Dynamics Tools (FDTs): Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the US Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program”, United States Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research (2004).
 12. A. Bounagui, N. Benichou, C. McCartney and A. Kashef, “Optimizing the Grid Size Used in CFD Simulations to Evaluate Fire Safety in Houses”, In: 3rd NRC Symposium on Computational Fluid Dynamics, High Performance Computing and Virtual Reality, Ottawa, pp. 1-8 (2003).
 13. M. J. Hurley, D. T. Gottuk, J. R. Hall Jr., K. Harada, E.D. Kuligowski, M. Puchovsky, A. Atreya, V. Babrauskas, et al., “SFPE Handbook of Fire Protection Engineering”, Springer (2015).
 14. U.S. NRC and EPRI, “Nuclear Power Plant Fire Modeling Analysis Guidelines”, NUREG-1934 and EPRI 1023259, Final Report (2012).