

연돌효과를 이용한 화장실 내 수직샤프트의 배연 타당성에 관한 연구

조성우[†] · 이병현^{*}

창원대 건축공학과 교수, * 김해대 소방안전관리과 교수

Exhaust Smoke Validity of Vertical Shaft in Restrooms using the Stack Effect

Sung-Woo Cho[†] · Byung-Hyun Lee^{*}

Professor, Dept. Architectural Engineering, Changwon Univ.,

* Professor, Dept. of Firefighting Safety Management, Gimhae Coll.

(Received November 09, 2022; Revised November 15, 2022; Accepted November 23, 2022)

요 약

본 연구는 화장실의 환기구 역할을 수행하는 수직샤프트에 대한 배연 타당성을 검토하기 위하여 NFSC 501 제 6조에서 제시한 연기발생량과 수직샤프트의 배연량에 대한 정량적인 관계를 파악하고자 한다. 수직샤프트를 통한 배연량은 초기유입온도와 배연온도를 근거로 하여 구할 수 있다. 수직샤프트를 통한 배연온도는 수직샤프트 내의 열평형식으로부터 예측할 수 있고, 중성대는 전체 높이의 46% 부근에서 발생하는 것으로 나타났다, 그리고 NFSC 501에서 제시하고 있는 최저배출량의 20% 이상은 배연되는 것으로 예측됨에 따라 수직샤프트를 통한 배연은 가능성이 있다고 판단된다.

ABSTRACT

This study is performed to validate a quantitative relationship between the exhaust rate through vertical shaft, which are used for restroom ventilation, and smoke generation based on NFSC 501. The exhaust rate is calculated using heat balance equations and is based on the input and exhaust air temperatures. The neutral plan in the vertical shaft was formed at approximately 46% of the total height. Because the smoke that is exhausted through the vertical shaft is more than 20% of the minimum smoke generation suggested by NFSC 501, the smoke exhaust through the vertical shaft is considered to be possible.

Keywords : Rest room, Vertical shaft, Stack effect, Exhaust rate, Exhaust air temperature

1. 연구배경 및 목적

공동주택에서 화재 발생에 따른 피난 형태는 세대 내의 화재발생실 → 현관(대피공간) → 제연 설비가 갖추어진 복도와 E/V홀로 이루어진다. 그러나 공동주택 세대는 방화구획으로 설정되어 화재로 인하여 발생하는 연기를 외부로 배연시킬 수 없는 상황으로 세대 내에서 질식사고는 빈번하게 발생되고 있다. 그러므로 기존 건축물에서 화장실의 환기(배기) 통로로 활용되고 있는 수직샤프트(참고, Figure 1 (붉은색 부분, 이하 수직샤프트라고 칭함))가 외기에 노출되어 있으므로, 화재 발생 시 세대 내의 배연구 역할이 가능할 것으로 판단된다(참고 Figure 2). 화재 발생에 따른 상부와 하부의 높은 온도 차이를

이용한 연돌효과로 인하여 수직샤프트를 통한 배연은 가능하다고 사료되며, 연기의 일부분을 외부로 배출시킴으로서 피난 안정성의 증대와 세대 내에서 발생하는 질식사고를 어느 정도 예방할 수 있을 것으로 판단된다.

고층 건축물에서 계단실과 부속실 및 E/V홀을 대상으로 연돌효과에 대하여 국내·외에서 많은 연구가 이루어지고 있다. 세대 내 연기 배출 방안에 대하여 Cho⁽¹⁾는 화장실 환기 통로 내에 부착된 fire damper (F.D)의 기존 개폐 방식과 다른 역(逆) 방식을 제안하여, 방화구획에 대한 법적 검토를 수행하였다. 또한 CFD를 활용하여 화장실 내의 환기 통로와 연결된 수직샤프트를 통하여 배연이 가능하다는 것으로 발표하였다. Lim 등⁽²⁾은 고층 건축물에 설치되어 있는 배연창에 대한 배연

[†] Corresponding Author, TEL: +82-55-213-3805, FAX: +82-55-213-3809, E-Mail: swcho@changwon.ac.kr

© 2022 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

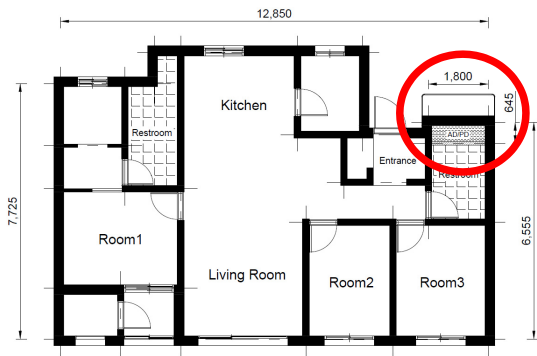


Figure 1. Plan and P/D area (floor area 94 m²).

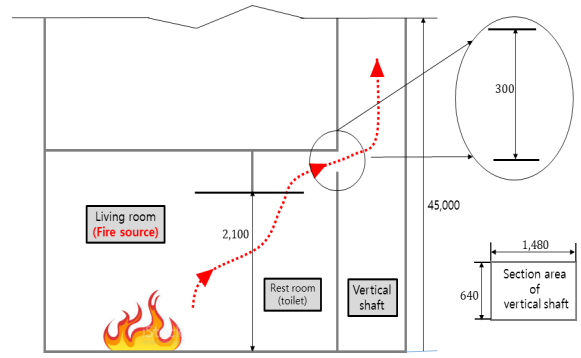


Figure 2. Section detail of Figure 1 red circle (unit : mm).

성능은 외기 풍속에 큰 영향을 받는 것으로 발표하고 있다. Kim 등⁽³⁾은 CONTAMW 시뮬레이션을 통하여 화재 시에는 압력 차이가 크게 발생할 수 있다는 것을 확인하기 위하여 방화문, 일반 세대문, 엘리베이터문과 같이 다양한 변수를 적용하였다고 발표하고 있다.

Klote^(4,5)는 다수의 개구부로 둘러싸인 공간에서 중성대 위치는 온도차이 보다 개구부 크기에 큰 영향을 받고, 연돌효과로 야기되는 질량유량은 온도와 강한 함수관계라고 발표하였다. Ding 등⁽⁶⁾은 태양열 굴뚝(solar chimney)이 설치된 8층 규모의 아트리움을 대상으로 한 배연 실험 결과에서 유출구 면적이 유입구 면적의 2배 이상인 경우, 화재 발생에 따른 중성대는 굴뚝 내부에 있으므로 인접 공간으로 침투되는 연기를 방지할 수 있다고 보고하였다. Huang 등⁽⁷⁾는 계단실에 설치된 창은 연돌효과로 인하여 공기 온도의 상승을 초래하므로, 연돌효과로 인한 피해를 줄일 수 있는 방안으로 계단실 창의 개수 조절과 야간에는 각층 계단실 창문을 닫음으로서 연돌효과에 의한 피해를 효과적으로 막을 수 있다⁽⁸⁾고 보고하였다.

이와 같이 연돌효과에 대한 주된 연구는 외기풍속 및 주변 개구부의 개수 등과 같이 외부 영향에 노출된 계단실 또는 E/V (홀)의 수직통로를 주 대상으로 하고 있다. 그리고 질량유량은 연기의 밀도 차이에 의하여 발생하는 부력(buoyancy) 즉 온도와 밀접한 관계를 가지며, 이와 동시에 개구부의 면적 및 유입구와 유출구의 면적에 대한 내용도 제안되고 있다.

본 연구에서는 세대 내 질식사고를 줄이기 위한 방안으로 수직샤프트를 대상으로 하고자 한다. 수직샤프트로의 배연은 연돌효과를 이용한다는 측면에서 계단실 또는 E/V (홀)과 비교하여 외부 영향은 작다고 판단되어 유리한 면은 있다고 볼 수 있다. 그러나 기 연구결과에서 질량유량과 관계가 깊은 개구부 면적에 대해서는 다소 불리한 측면이 있으나, 세대 내에서 유일한 배연 통로로서 가능성은 있다고 판단된다. 그러므로 수직샤프트에 대한 배연 타당성을 검토하기 위한 기초적인 연구로서 NFSC 501 제 6조⁽⁹⁾에서 제시한 연기발생량과 수직샤프트의 배연량에 대한 정량적인 관계를 파악하고자 한다.

2. 연구방법

세대 내 수직샤프트에 대한 배연량 예측은 온도 차이에서 야기되는 연돌효과와 깊은 관계가 있다. 연기발생량은 실질적으로 측정이 어려운 관계로 문헌으로부터 발생량을 조사하고, 연기이동경로에서 수직샤프트를 통하여 외기로의 배연량에 대한 예측과 실내에서 발생하는 연기배출량과 비교하고자 한다.

이를 위하여 먼저 세대 내의 연기 배출량은 NFSC 501 제 6조⁽⁹⁾를 근거로 하고, 다음으로 수직샤프트에서 배연되는 공기 온도는 수직샤프트를 통하여 유입되는 고온의 공기와 수직샤프트의 차가운 벽면과의 열교환이 발생됨에 따라 열평형식을 도출하여 배연되는 공기 온도를 예측한다. 끝으로 연돌효과에 의한 배연량 예측을 근거로 하여, 화재실에서의 연기배출량과 비교하여 배연 타당성을 알아보고자 한다.

3. 이론적 고찰

3.1 수직샤프트의 열교환을 통하여 배연되는 공기온도 예측

수직샤프트를 통한 배연 온도 예측을 위한 열이동과 열평형에 대한 개념도는 Figure 3과 같고, 고온의 연기와 벽체 사이에서 열평형식은 식(1)과 같다. Figure 3에서 고온의 화원으로부터 얻은 열량과 비교하여 샤프트 내부와 실내와의 샤프트 벽체를 통한 전도에 의한 열손실은 매우 적으므로 이를 무시

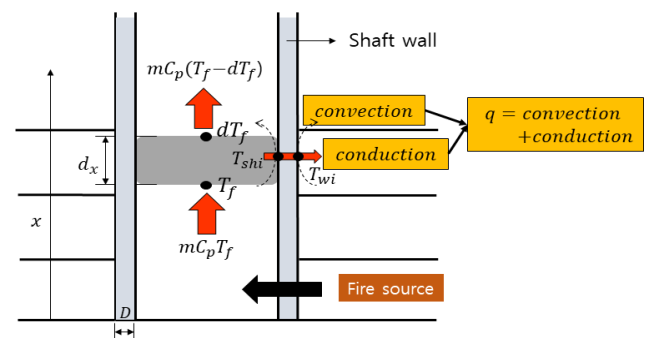


Figure 3. The concept of heat balance equation in vertical shaft.

할 수 있다고 보고하고 있다⁽¹⁰⁾. 이를 적용하여 다시 정리하면 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$mC_p T_f = mC_p(T_f - dT_f) + (\dot{Q}_c - \dot{Q}_d) \quad (1)$$

$$mC_p dT_f = h_c(T_f - T_{shi})dA_{sh} \quad (2)$$

여기서, m 은 질량유량(kg/s), C_p 는 공기밀도(kg/m³), h_c 는 대류열전달계수(W/m²°K), T_f 는 수직샤프트 내부 온도(°K), T_{shi} 는 수직샤프트 내부 벽면온도(°K), \dot{Q}_c , \dot{Q}_d 는 각각 대류와 전도에 의한 열량(W), $dA_{sh} = P_{sh}dx$ 로 하고, 연기온도 변화를 $dT_f = -d(T_f - T_{shi})$ 로 두면 미분방정식은 식(3)과 같다.

그리고, x, H = 각각 수직샤프트의 대상 높이와 수직샤프트 전체 높이(m)라고 하면, $\int_0^H x dx$ 이므로, $x=0$ 이면, T_f 는 유입온도(T_{in}) 즉 화재실 온도이고, $x=H$ 이면 T_f 는 샤프트를 통하여 외기로 배연되는 유출온도(T_{out})로 볼 수 있다. 식(3)에서 대류열전달계수(h_c)⁽¹¹⁾는 기체 속성, 온도, 유속과 표면특성으로 결정되며, Prandtl 수(Pr)와 Grashof 수(Gr)의 함수로서 구할 수 있으며 식(4)와 같다. 끝으로 미분방정식인 식(4)을 풀게 되면, 수직샤프트를 통한 배연 연기의 최종온도(T_{out})는 식(5)로부터 구할 수 있다.

$$\ln \frac{T_{out} - T_{shi}}{T_{in} - T_{shi}} = - \frac{h_c A}{m C_p} \quad (3)$$

$$h_c = 0.13 \frac{k}{H} (Gr Pr)^{1/3} \quad (4)$$

$$T_{out} = T_{shi} + (T_{in} - T_{shi})e^{-h_c A / m C_p} \quad (5)$$

3.2 화장실에서 수직샤프트로의 배연량 예측

세대 내에서 발생하는 연기는 Figure 3 (검은색 화살표)에서 보듯이 화장실 환기구→수직샤프트→외부로 배연되며, 배연량은 식(6)의 베르누이정리와 식(7)의 연속식으로부터 구할 수 있다.

식(6)의 3항은 위치에너지이므로 화장실 환기구와 수직샤프트로의 배연은 동일 높이에 존재하고, 유입과 유출구 면적 $A_2 \ll A_1$ 면, 무시할 수 있다. 식(6)과 식(7)로부터 식(8)과 같이 유속(V)은 압력차이(ΔP)와 밀도(ρ)의 함수로서 나타난다. 수직샤프트로의 유입량(Q_{in})은 유속과 면적 및 배출계수 곱이며, 식(9)와 같고, 배출계수(c_d)는 가열에 의한 경우이므로, $c_d = 0.0835 (\Delta T / T)^{1/3}$ ⁽¹²⁾로 부터 구할 수 있다.

$$P_1 + \frac{\rho V_1^2}{2} + \rho g h_1 = P_2 + \frac{\rho V_2^2}{2} + \rho g h_2 \quad (6)$$

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (7)$$

$$V_2 = \sqrt{2\Delta P / \rho} \quad (8)$$

$$Q_{in} = c_d A V \quad (9)$$

3.3 연돌효과에 의한 배연량 예측

연돌효과에 의하여 수직샤프트를 통과하는 배연량을 예측하기 위한 개념은 Figure 4와 같다. 수직덕트에서 어떤 높이(h_1, h_2)에 대한 실내(P_{h1}, P_{h2})와 실외(P_{out})의 압력의 차이는 식(10), 식(11)과 같다.

$$P_{h1} = P_{out} - \rho_{in} g h_1 \quad (10)$$

$$P_{h2} = P_{out} - \rho_{in} g h_2 \quad (11)$$

여기서, $P_{out} = \rho_{out} g h_1$ (h_1 지점), $P_{out} = \rho_{out} g h_2$ (h_2 지점)

식(10)과 식(11)에서 h_1 과 h_2 를 대신하여 중성대를 나타내는 h_{NPL} 과 어떤 지점의 높이 h 를 대입하면, 압력 차이는 식(12)와 같다. 공기밀도는 온도(T)와 압력(P)과의 함수관계이고, 이를 이상기체로 가정하여 식(12)에 대입하면, 수직샤프트 내의 연돌효과에 의한 압력 차이는 식(13)과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta P = (\rho_{out} - \rho_{in})g(h_{NPL} - h) \quad (12)$$

여기서, $\rho_{in} = P / RT_{in}$, $\rho_{out} = P / RT_{out}$

$$\Delta P = \rho_{in} (h_{NPL} - h)g (T_{in} - T_{out}) / T_{out} \quad (13)$$

여기서, 수직샤프트의 중성대⁽⁵⁾는 $\frac{h_{NPL}}{h} = \frac{1}{1 + (T_{in} / T_{out})^{1/3}}$ 로부터 구할 수 있다.

온도함수로서 표현된 식(13)을 식(9)에 대입하면 수직샤프트를 통한 배연량(Q_{out})은 식(14)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 Δh_{NPL} 의 부호에 따라 유입과 유출을 예측할 수 있다.

$$Q_{out} = c_d A_1 \sqrt{2 \Delta h_{NPL} g ((T_{in} - T_{out}) / T_{out})} \quad (14)$$

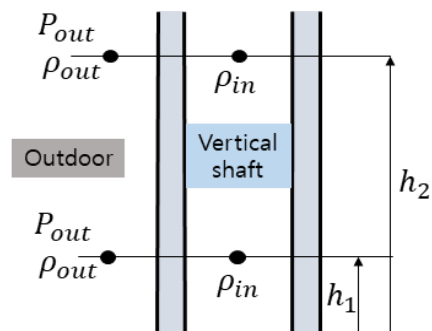


Figure 4. The concept of pressure distribution in vertical shaft.

4. 수직샤프트를 통한 배연 타당성 검토

수직샤프트를 통한 배연은 화재실인 거실에서 화장실을 거쳐 수직샤프트를 통하여 외기로 배출됨에 따라 화장실을 예상제연 구역으로 볼 수 있으며, 바닥면적은 50 m² 미만이므로 연기의 배출량은 NFSC 501 제 6조 1항의 2에서 최저 25,000 m³/h로 규정하고 있으므로 이를 근거로 타당성을 검토하고자 한다.

배연타당성 고찰을 위하여 15층 공동주택을 대상으로 전체 압력분포와 배연연기 최종온도 예측을 위하여 1층을 화재실로 가정하였다. 화장실에서 수직샤프트로의 유입구 면적은 Figure 2와 같이 300 mm (H)와 1,480 mm (W)이며, 배연구로 활용되는 수직샤프트(Figure 1의 붉은색 부분) 단면적은 두께 25 A 단열재로 감싼 100 A의 수직관 4개가 설치되며, Figure 2의 단면 상세도를 가진 세대를 대상으로 하였다. 연기층의 온도는 화재 초기 천장에 도달하는 온도는 285 °C 이상이 많으므로⁹⁾, 본 연구에서는 초기온도가 300 °C, 500 °C인 경우로 가정하여 수직샤프트 내의 수직온도분포와 압력분포, 수직샤프트를 통과하는 연기의 최종온도와 수직샤프트와 화장실과의 압력차 및 수직샤프트와 외기와의 압력차를 알아보고자 한다.

수직샤프트 내에서 중성대는 20.7~20.9 m의 범위에 있으며, 이는 수직샤프트의 전체 높이인 45 m의 약 46.0~46.4%에 해당되는 것으로 나타났다. 이는 정상적인 연돌효과에서는 전체 높이의 1/2 아래에 존재한다는 내용과 일치하고 있다¹³⁾. 수직샤프트 내의 수직온도분포는 초기온도가 300 °C와 500 °C

에 대하여 Figure 5와 같고, 수직샤프트를 통하여 배연되는 최종 온도는 각각 105.1 °C와 208.9 °C로 예측되었다.

수직샤프트 내 상하의 압력분포는 각각의 초기온도에 대하여 Figure 6과 같은 분포를 보이며, 초기온도 300 °C에서 수직샤프트 내의 상하압력차이는 183.4 Pa이고, 500 °C에서는 251.9 Pa로 예측되었다. 그리고 수직샤프트와 실내(화장실)와의 압력차이와 수직샤프트와 외기와의 압력차이는 Figure 7과 같다. 전자의 경우에는 -63.7 Pa~121.1 Pa이며, 후자의 경우는 -89.7 Pa~143.8 Pa의 범위로 예측되었다.

NFSC 501 제 6조에서 최저 배출량은 25,000 m³/h로 제시하고 있으므로, 이를 근거로 식(14)로부터 수직샤프트 통한 배연량에 대한 계산 결과는 Figure 8과 같다. 초기온도 300 °C인 경우, 배연량은 5,299 m³/h로 21.2%, 초기온도 500 °C인 경우, 배연량은 6,491 m³/h로 26%에 해당되는 것으로 나타났다. 각각의 초기온도에 대하여 최저배출량의 20% 이상은 수직샤프트를 통하여 배출되는 것으로 예측할 수 있다.

기존 계단실이나 E/V홀과 달리 외기나 개구부와 창호 개폐 여부 등과 같은 외부적인 영향은 적게 받는다고 할 수 있으므로, 수직샤프트 활용은 기존 수직통로로 활용되고 있는 요소들과 비교하여 연돌효과에 의한 피해를 막을 수 있을 것으로 판단된다⁷⁾. 그리고 화장실에서 수직샤프트로 유입되는 유입구 면적과 수직샤프트의 면적에 대한 설계적인 요소가 확보^{4,5)}가 된다면 세대 내에서 어느 정도의 안정적인 피난시간 확보와 질식사를 예방할 수 있을 것으로 판단된다.

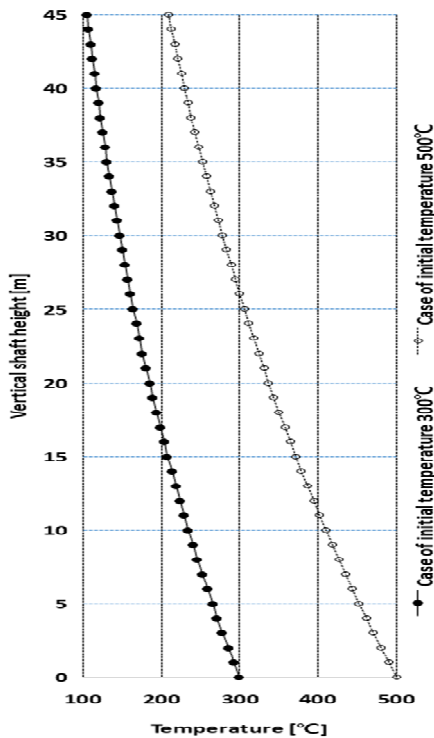


Figure 5. Temperature distribution in vertical shaft on smoke layer 300 °C and 500 °C.

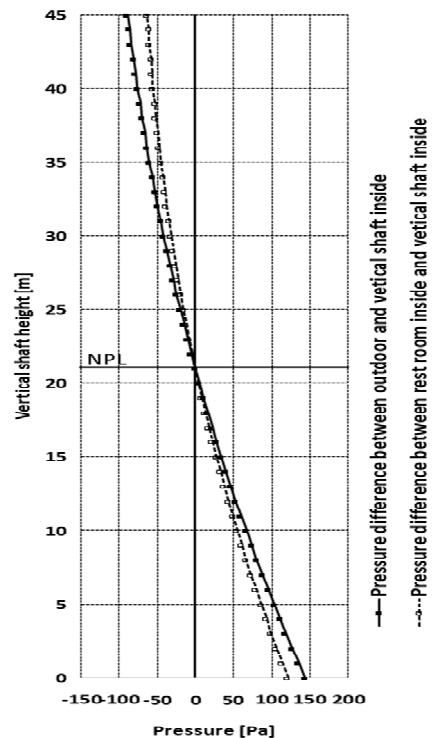


Figure 6. Pressure distribution in vertical shaft on smoke layer 300 °C and 500 °C.

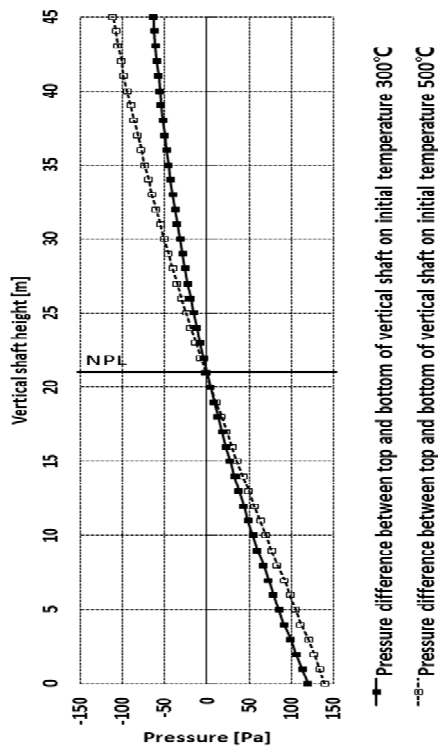


Figure 7. Pressure difference between vertical shaft and rest room/outdoor on smoke layer 300 °C.

5. 결론

화재발생 시, 세대 내에서 화장실의 환기구 역할을 수행하는 수직샤프트를 이용한 배연에 대하여 기초적인 이론을 토대로 이에 대한 타당성을 검토하였으며, 결과는 아래와 같이 정리할 수 있다.

- (1) 수직샤프트를 통한 배연량을 구하기 위하여 수직샤프트로 유입되는 초기온도와 상부를 통하여 배출되는 배연온도를 이용하였으며, 수직샤프트 내의 중성대는 전체 높이의 46% 정도에 해당됨에 따라 기존 연구 결과와 일치하는 것으로 나타났다.
- (2) 수직샤프트를 통하여 NFSC 501에서 제시하고 있는 최저배출량의 20% 이상은 배연되는 것으로 예측됨에 따라 충분한 가능성이 있다고 판단된다. 또한 기존 계단실이나 E/V홀과 비교하여 외부적인 요인이 적으므로 연돌효과에 의한 피해를 줄일 수 있을 것으로 판단된다⁽⁷⁾.
- (3) 그러나 충분한 배연량을 확보하기 위해서는 건축계획이나 설계단계에서 화장실에서 수직샤프트로 유입되는 유입구 면적과 수직샤프트의 단면적에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.
- (4) 향후에는 공동주택 전반에 대한 배연 타당성을 검토를 위하여 다양한 공동주택 평면형태와 구조를 대상으로 연구를 수행할 필요가 있다고 판단된다.

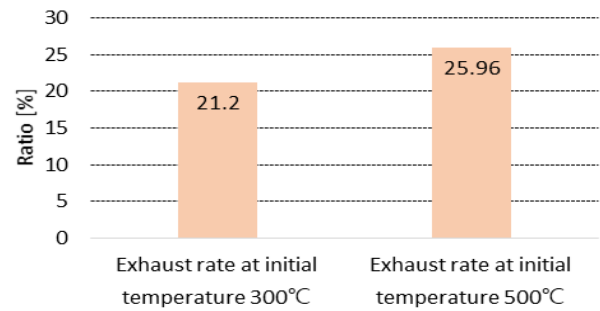


Figure 8. Exhaust rate ratio on minimum smoke generation rate 25,000 m³/h by NFSC 501.

후 기

본 연구의 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구의 일부임(No. 2021R1A2C005179).

References

1. S. W. Cho, "A Study on the Availability of the Toilet Exhaust Port in Apartment Households for Smoke Exhaust", *Fire Science and Engineering*, Vol. 36, No. 2, pp. 25-32 (2022). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.b7fd71fc>.
2. C. H. Lim, B. G. Kim and Y. H. Park, "Mass Flow Rates and Performance of Natural Smoke Ventilators in High-rise Buildings", *Fire Science and Engineering*, Vol. 23, No. 6, pp. 91-97 (2009).
3. H. W. Kim, I. H. Koo, Y. S. Kim, B. H. Lee, S. H. Jin and Y. J. Kwon, "A Study on the Analysis of Pressure Difference According to the Stack Effect of High-Rise Buildings during Fire", *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 21, No. 1, pp. 161-168 (2021). <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2021.21.1.161>.
4. J. H. Klote, "A General Routine for Analysis of Stack Effect", *NISTIR 4588*, p. 1 (1991).
5. J. H. Klote, "Consideration of Stack Effect in Building Fires", *NISTIR 89-4035*, p. 69 (1989).
6. W. Ding, Y. Minegishi, Y. Hasemi and T. Yamada, "Smoke Control based on a Solar-assisted Natural Ventilation System", *Building and Environment*, Vol. 39, No. 7, pp. 775-776 (2004). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.01.002>.
7. H. S. Huang, C. Y. Lin, S. C. Wang, C. H. Su and L. P. Chen, "Stack Effects in Tall Building Fires: A Case Study of Taiwan Old Apartment Fire", *Scientific Reports 12*, Article Number: 8963 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13118-z>.
8. T. T. Lie and J. H. McGuire, "Control of Smoke in High-Rise Buildings", *National Fire Protection Association's*

- First European Fire Conference in Geneva, Switzerland, pp. 5-6 (1973).
9. National Fire Safety Code, Article 501, "Smoke Control" (2019).
 10. J. A. He, X. Y. Huang, X. Y. Ning, T. N. Zhou, J. A. Wang and R. K. K. Yuen, "Modelling Fire Smoke Dynamics in a Stairwell of High-rise Building: Effect of Ambient Pressure", *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 32, pp. 6-10 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101907>.
 11. X. Q. Sun, L. H. Hu, W. K. Chow, Y. Xu and F. Li. "A Theoretical Model to Predict Plume Rise in Shaft Generated by Growing Compartment Fire", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, No. 4, pp. 910-920 (2011). <http://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.10.012>.
 12. F. Allard, "Natural Ventilation in Buildings", James & Kames, UK, pp. 100-101 (1998).
 13. J. Y. Zhang, W. Z. Lu, R. Huo and R. Feng, "A New Model for Determining Neutral-plane Position in Shaft Space of a Building under Fire Situation", *Building and Environment*, Vol. 43, No.6, pp. 1101-1102 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.02.004>.