

# 실험계획법에 의한 수직샤프트내 압력분포에 영향을 미치는 인자간 상관관계 분석

한 화 택<sup>†</sup>, 신 철 용<sup>\*</sup>

국민대학교 기계자동차공학부, \*국민대학교 기계공학과 대학원

## Correlation Analysis of Parameters affecting Pressure Distributions in Vertical Shafts by Design of Experiments

Hwataik Han<sup>†</sup>, Chulyong Shin<sup>\*</sup>

School of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

\*Graduate School of Mechanical Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

**ABSTRACT:** Various effluents generated in cooking processes contribute a great deal to indoor air pollution among many other indoor pollutants such as dusts from outdoor and carbon dioxide from human body. Kitchen exhaust hoods are not believed to exhaust indoor contaminants properly in many cases, while generating too much noise. Instead of focusing on individual products of kitchen hoods, we should address the problem by attacking the ventilation system as a whole including vertical shafts and building air-tightness. In this study, it is intended to investigate the pressure distribution along the vertical shaft depending on various system parameters, such as shaft size, concurrent hood usage rate, roof fan, inlet pressure loss, and outdoor temperature. The maximum static pressure in the vertical shaft has been obtained using the method of design of experiments and analyzed by the analysis of variance. The results can be used for the design of kitchen exhaust systems by analyzing the pressure distributions in vertical shafts.

**Key words:** Vertical shaft(수직샤프트), Design of experiments(실험계획법), Correlation(상관관계), Exhaust performance(배기성능), Ventilation(환기)

### 기 호 설 명

- A : 샤프트 단면적 [m<sup>2</sup>]
- $\Delta P$  : 압력차 [Pa]
- V : 샤프트내 풍속 [m/s]
- Q : 샤프트 풍량 [CMH]
- N : 공동주택 층수
- $\xi$  : 압력손실계수

### 1. 서 론

최근 환경에 대한 관심이 높아지면서 실내공기 질에 대한 관심도 높아지고 있다. 실내공기질을 저하시키는 요인에는 외부에서 유입되는 오염물질, 인체에서 배출되는 이산화탄소 등 여러 가지가 있으나 주방에서 조리시 발생하는 오염물질이 상당히 큰 비중을 차지한다. 조리시 발생하는 오염물질은 그 종류가 다양하며 발생량도 많을 뿐 아니라 실내의 습도 문제와 냄새 문제를 유발하기도 한다. 따라서 실내공기질의 유지를 위해서

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-2-910-4687; fax: +82-2-910-4839

E-mail address: hhan@kookmin.ac.kr

는 주방의 레인지 후드의 역할이 상당히 중요하다. 그럼에도 불구하고 아직까지 레인지 후드의 배기성능이 만족스럽지 못한 경우가 많고 소음발생이 크며, 비가동시 세대로의 역류가 발생하는 등의 문제점이 지적되어 왔다. 그동안 레인지 후드 및 옥상의 팬성능을 향상시키고 팬 제어방안에 관한 노력을 기울여 왔다. 이에 대한 연구로 Kim<sup>(1)</sup>은 주방의 강제배기 제어시스템의 기능개선을 위한 압력센서의 설치위치 및 세대환기 시스템과의 연동에 대한 연구를 수행하였고, Kwon<sup>(2)</sup>등은 수직샤프트 강제배기 시스템의 제어방안을 연구하였다. Lee<sup>(3)</sup>는 레인지 후드방식에 따른 성능변화에 대한 연구를 수행하였다. 그러나 레인지 후드의 배기성능은 팬성능 자체만으로 해결될 수 있는 문제가 아니라 건물의 기밀도와 수직샤프트 내 압력분포와 연계되어 있는 총체적인 문제이다. 따라서 본 연구에서는 주방후드의 배기성능에 영향을 미치는 인자들을 유도하고 이들이 수직샤프트내의 압력분포에 미치는 영향을 분석하여 주방배기 시스템의 설계 및 제어를 위한 기초자료를 제공하고 실험방법론을 제시하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 수치해석

수직샤프트 내 압력분포를 해석하기 위하여 각 층별 노드를 설정하고 각 노드에서의 압력과 풍량에 대한 관계식을 유도하였다. Fig. 1에서 질량보존식으로부터 각 층 상단의 출구풍량은 바로 전 하부층의 출구풍량과 세대에서 배기되는 풍량( $Q_{E,i}$ )의 합으로 나타낼 수 있다.

$$Q_{i+1} = Q_i + Q_{E,i} \quad (1)$$

각 층의 압력은 바로 전 하부층의 압력에 부력에 의한 영향을 고려하고 합류, 마찰, 형상에 대한 손실을 감안하여 산정한다.

$$P_{i+1} = P_i + \Delta P_B - (\Delta P_{fr} + \Delta P_{fo} + \Delta P_{jo}) \quad (2)$$

여기서  $\Delta P_B$ 는 외기온도와 각 층간 샤프트내의 온도차에 의해 발생하는 부력에 의한 압력을 말

하며,  $\Delta P_{fr}$ 는 마찰손실로서 벽체의 거칠기에 의하여 발생하는 압력손실이다. 또한  $\Delta P_{jo}$ 은 합류손실로서 각층의 배기덕트와 합류될 때 샤프트풍량과 배기풍량의 비에 의하여 결정되는 압력손실이며,  $\Delta P_{fo}$ 은 형상손실로서 합류되는 관의 접속형상에 의하여 결정되는 손실압력을 말한다. 합류, 마찰, 형상에 의한 손실계수는 Murakami 등<sup>(4)</sup>이 제시한 실험식을 사용하였다.

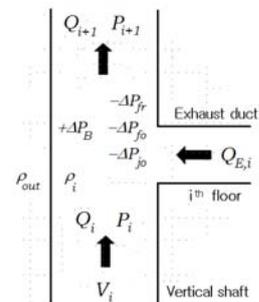


Fig. 1 Schematic diagram explaining balance equations.

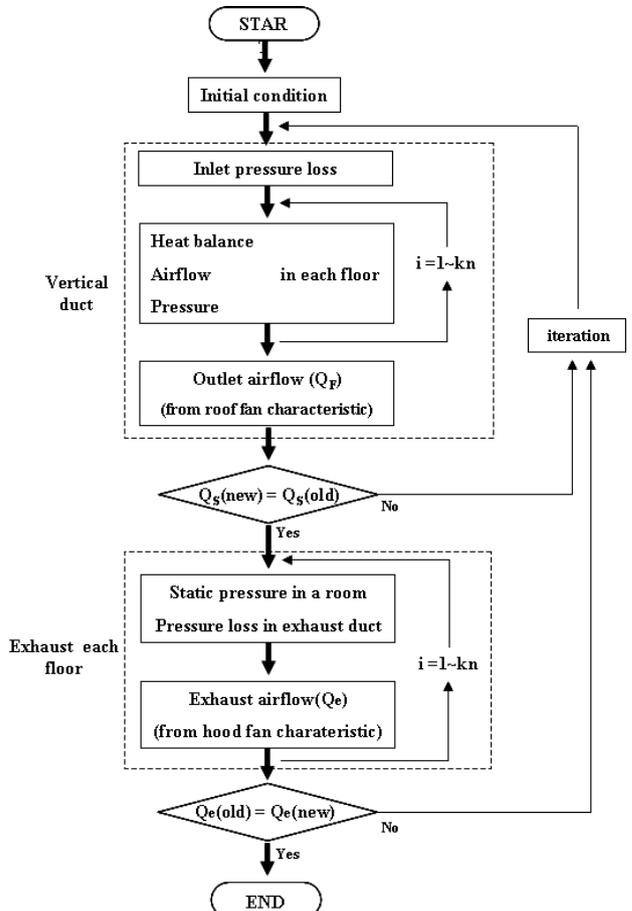


Fig. 2 Flow chart of the vertical shaft program.

수치해석은 수직샤프트에 대한 해석과 세대배기덕트에 대한 해석으로 나누어진다. 먼저 수직샤프트에 대한 해석은 초기조건에서 샤프트하부 유입풍량( $Q_s$ )을 가정하고 세대에서 유입되는 열량과 공기밀도를 고려하여 각 층에 해당하는 수직샤프트 내 정압을 계산한다. 그리고 가장 상층부에서 계산된 정압과 풍량값을 이용하여 옥상팬의 P-Q곡선과 비교한다. 팬특성곡선으로부터 계산된 풍량이 상층부 풍량과 일치하지 않을 경우 계산된 팬풍량을 다시 초기조건으로 사용하여 반복계산한다. 세대배기덕트에 대한 해석은 초기조건에서 가정한 세대배기풍량( $Q_e$ )을 이용하여 각 세대배기덕트에서 정압을 계산한다. 구해진 압력값을 이용하여 세대배기팬의 P-Q곡선을 이용하여 팬풍량을 계산한다. 마찬가지로, 계산된 팬풍량과 초기에 가정한 세대배기풍량을 비교하여 일치하지 않을 경우 계산된 팬풍량값을 초기조건으로 사용하여 반복계산한다. 프로그램의 흐름도는 Fig. 2에 보인다.

## 2.2 해석조건

최근 주거용 아파트로 많이 지어지고 있는 25층 건물을 기준으로 하고, 수직샤프트는 배기성능향상을 위하여 건식덕트가 설치되는 추세이므로 원형 건식덕트를 기준으로 하였다. 세대배기덕트의 직경은 150mm라고 가정하고 옥상팬과 각 세대배기팬의 팬특성은 Fig 3에 있는 P-Q곡선을 사용하였다. 동시사용세대는 최대정압이 가장 큰 경우인 하부에 밀집되어있는 경우만을 고려하였다. 위와 같은 기준조건 하에 샤프트직경, 동시사용율, 옥상팬, 외기온도, 하부입구손실계수 5가지 인자에 대한 영향을 분석하였다. 각 인자에 대한 수준의 수는 3으로 하였다. 수준의 수가

Table 1 Parameters and their levels

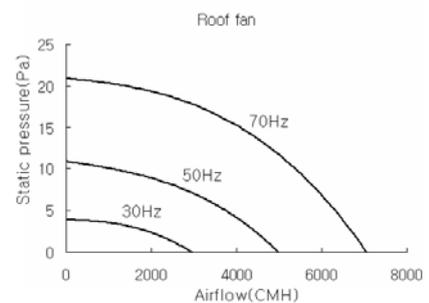
	Parameter	Level
A	Shaft diameter(mm)	450, 550, 650
B	Concurrent hood usage rate(%)	32, 40, 48
C	Roof fan(Hz)	30, 50, 70
D	Outdoor temperature(°C)	0, 15, 30
E	Inlet pressure loss coefficient	1, 10, 100

2인 경우에는 수준변화에 따른 결과가 직선분포인지 곡선분포인지 알 수가 없고 수준의 수가 4일 경우는 분석이 지나치게 복잡해지기 때문이다. 인자의 수준은 Table 1에 보인다.

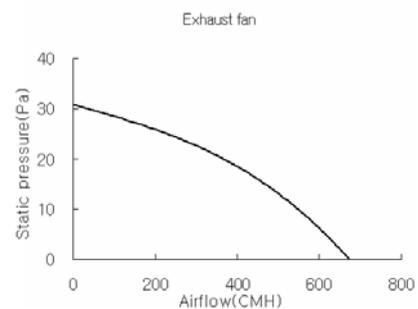
## 2.3 해석방법

5개 인자에 3수준일 경우 총 실험회수는 3<sup>5</sup>개가 발생하는데 이를 모두 수행할 경우 많은 시간과 비용이 소요된다. 따라서 실험계획법을 이용하여 27개의 Case를 선정하였다. 실험계획법은 실험이나 시뮬레이션을 수행함에 있어 최소한의 회수로 목적하는 정보를 신속히 얻고자 하는 방법이다. 본 연구에서는 실험계획법 중 Taguchi 방법<sup>(2)</sup>을 사용하였다.

시뮬레이션 결과로부터 주효과를 나타내는 5가지 인자에 대한 영향을 분석하고, 분산분석을 통하여 주효과 및 교호작용 등의 요인효과가 오차에 대한 유의 여부를 검정하였다. 교호작용 인자의 선정기준은 유의도 5%이내로 하였다. 주효과 인자와 선정된 교호작용 인자들로부터 수직샤프트 내의 최대정압을 목적함수로 하는 일반 선형 모형 관계식을 도출하였다.



(a) Roof fan



(b) Exhaust hood fan

Fig. 3 Fan characteristic curves.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 프로그램 검증

본 연구에서 사용한 프로그램을 검증하기 위하여 Murakami<sup>(4)</sup>의 연구결과와 비교하였다. Fig 4는 사각 샤프트 600×600mm, 동시사용율 32%(하부 8개층), 외기온도 0℃일 때 부력의 유무에 대하여 하부입구손실계수 1과 10일 때를 나타내고 있다. 세대배기가 일어나는 세대는 모두 하층에 밀집되어 있다고 가정하였다. 점선 원으로 표시된 부분은 부력이 있는 경우이고, 실선 원으로 표시된 부분은 부력이 없는 경우이다. 그림에서 보듯이 결과는 매우 잘 일치하고 있다.

#### 3.2 인자별 영향

인자들의 독립적인 영향을 파악하기 위하여 기준이 되는 조건을 설정하였다. 기준조건은 수직

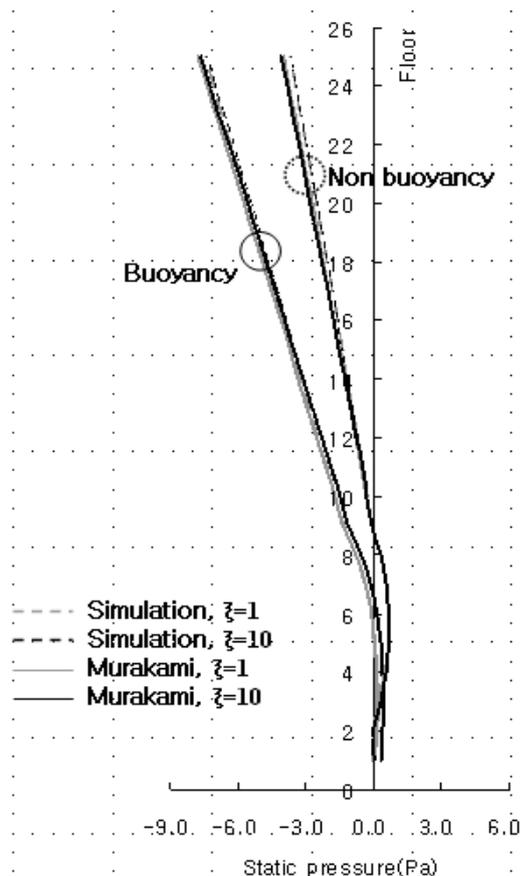


Fig. 4 Verification of the simulation results.

샤프트 직경 550mm, 동시사용율 32%, 옥상팬 50Hz, 외기온도 15℃, 하부입구손실계수 1로 하였다.

Fig. 5는 수직샤프트 직경에 따른 층별 정압분포를 나타내고 있다. 수직샤프트 직경이 커질수록 곡선이 완만해 지는데 이는 세대배기량이 일정할 때 수직샤프트의 체적이 증가하고 마찰 손실이 감소함으로 세대배기가 일어나는 부분의 수직샤프트 내 압력구배가 작아지는 것이다.

동시사용율에 대한 영향은 직관적으로 알 수 있듯이 동시사용율이 증가할수록 수직샤프트 내 정압이 높아진다. 이런 영향은 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 옥상팬의 용량을 높이더라도 해결되지 않는다.

Fig. 7에는 옥상팬의 영향을 보인다. 옥상팬의 용량을 높이면 상층부에서의 음압이 커지고 층별 세대에 양압이 발생하는 경우가 줄어든다. 그러나 적절하지 못한 팬용량의 증가는 과도한 음압이 발생하여 레인지후드를 작동시키지 않아도 배기가 일어나게 된다. 여름철의 경우 상층부에서 겨울철 비해 더 많은 음압이 발생하게 되는데 이는 연돌효과의 영향을 받기 때문이다.

Fig. 8은 계절별 하부입구손실계수의 영향을 보인다. 여름철에는 영향이 나타나나, 겨울철에는

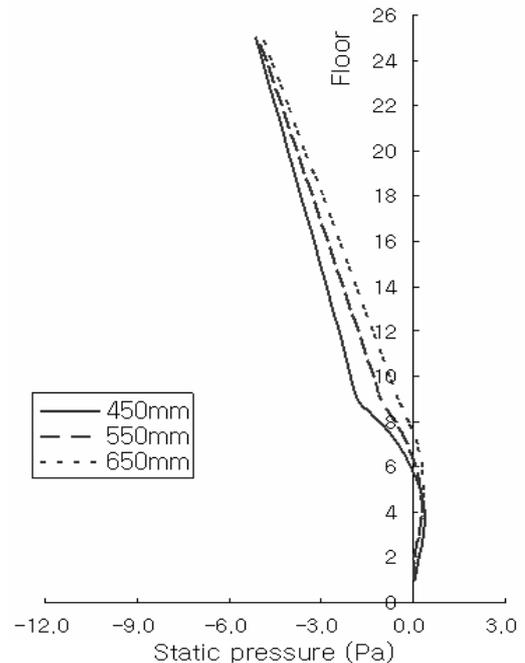


Fig. 5 Effect of shaft diameter on pressure distribution in the shaft.

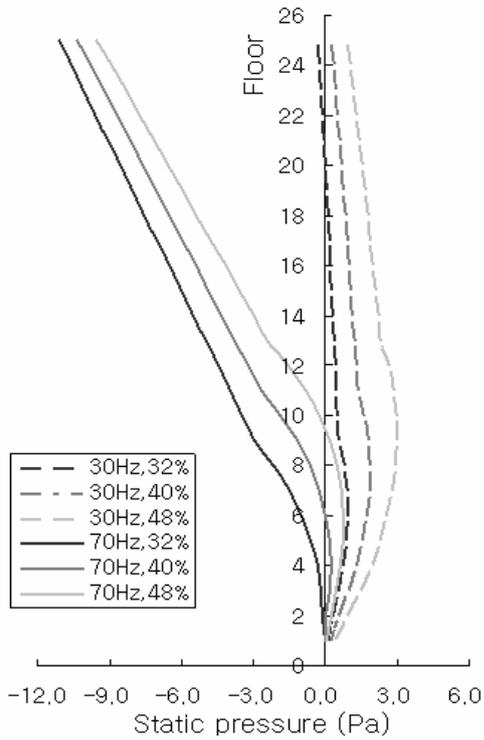


Fig. 6 Effect of concurrent usage rate and roof fan characteristics.

영향이 거의 나타나지 않는다. 여름철의 경우 하부입구손실계수가 커질수록 세대배기가 일어나는 하층부의 정압이 증가한다. 이 변화는 선형적이지 않고 하부입구손실계수가 10(면적비 30% 축소에 해당)까지는 별 변화가 없고 100(면적비 10% 축소에 해당)으로 증가할 경우 정압이 증가하였다. 이 결과로 보아 하부입구가 일정이상 개방되면 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

### 3.3 인자 간 상관관계

시뮬레이션 결과를 바탕으로 목적함수인 수직샤프트 내 최대정압에 대한 인자의 상관관계를 분석하였다. Fig 9는 5개의 주효과를 분석한 결과로 각 인자의 수준에 대한 목적함수의 평균값을 그래프로 나타내었다. 수직샤프트 직경이 커질수록 최대정압이 낮아지고 옥상팬 또한 용량이 커질수록 최대정압이 낮아진다. 수직샤프트 직경과 옥상팬은 수준이 높아질수록 배기성능의 향상에 기여한다는 것을 알 수 있다. 동시사용율과 입구손실계수는 증가할수록 최대정압 역시 증가하는데 이는 배기성능이 저하되는 요인임을 알

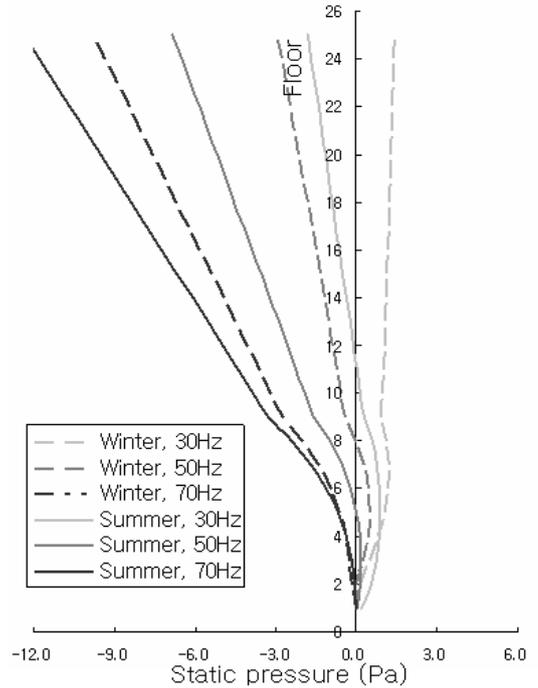


Fig. 7 Effect of roof fan characteristics for winter and summer conditions.

수 있다. 외기온도는 0°C와 15°C일 경우는 별 변화가 없으나 30°C일 경우는 최대정압이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 연돌효과의 영향으로 판단된다.

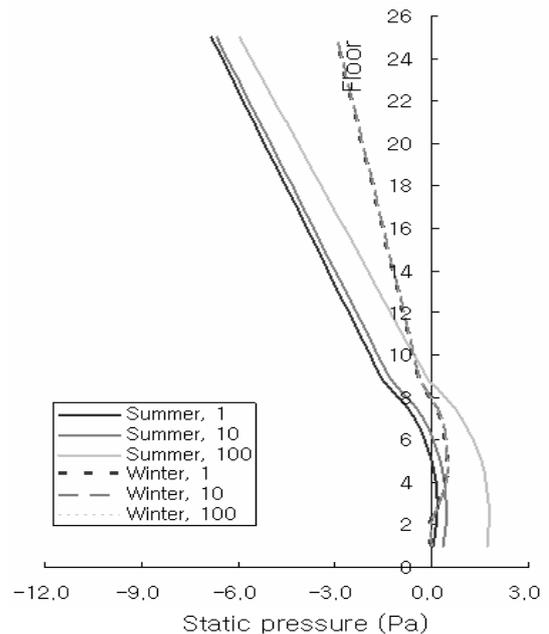


Fig. 8 Effect of inlet pressure loss coeff for winter and summer conditions.

교호작용선정은 총 5개의 인자 중 2인자의 상호작용만을 고려하였다. 2인자 교호작용의 조합은 여기 기술하지는 않았으나 10개의 조합 중 교호작용이 없는 A\*E, B\*E, C\*E를 제외하고 7개의 조합에 대한 유의도를 평가하여 유의하지 않은 A\*C, B\*D, C\*D를 제외하였다.

5개의 주효과 인자 및 선정된 4개의 교호작용 인자와 목적함수인 수직샤프트 내 최대정압(Y)의 상관식은 식(3)과 같다.

$$Y = -54.3 + 125A + 1.51B - 0.399C + 0.0982D - 0.00591E - 3.04A*B - 0.185A*D + 0.00725B*C + 0.000637D*E \quad (3)$$

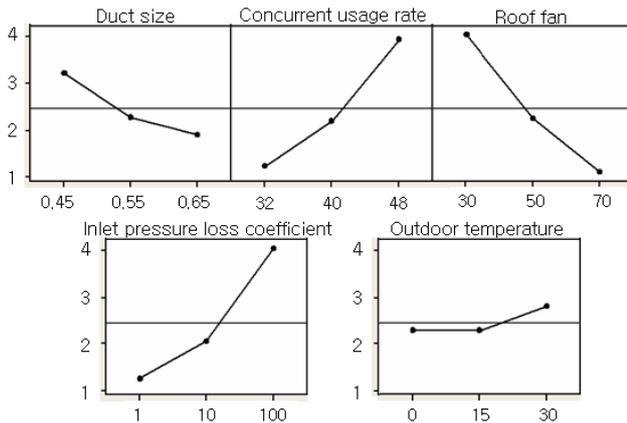


Fig. 9 Effects of main parameters.

## 5. 결론

지금까지 실험계획법을 이용하여 샤프트 직경, 동시사용율, 옥상팬, 외기온도, 하부입구손실계수가 수직샤프트내 압력분포에 미치는 영향에 관하여 살펴보고 수직샤프트 내 최대정압을 목적함수로 하는 상관관계를 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

(1) 수직샤프트 직경과 옥상팬의 용량이 증가할수록 수직샤프트 내 최대정압이 낮아지며, 동시사용율과 하부입구손실계수는 증가할수록 최대정압은 높아진다. 하부입구손실계수의 영향은 여름철에 두드러지게 나타났는데 이는 배기가 일어나는 세대가 하부에 밀집되어 있어 연돌효과의 영향을 받았기 때문으로 판단된다.

(2) 교호작용은 수직샤프트 직경과 동시사용율, 수직샤프트 직경과 외기온도, 동시사용율과 옥상

팬, 외기온도와 하부입구손실계수의 조합이 수직샤프트 내 최대정압에 영향을 미치는 것으로 나타난다.

(3) 수직샤프트 내 정압분포를 해석한 결과를 회귀분석하여 수직샤프트 내 최대정압을 나타내는 상관관계식을 도출하였다. 이 상관관계식은 주방배기 시스템을 설계하거나 제어 알고리즘을 설계하는 기초자료로 사용할 수 있을 것으로 생각된다.

(4) 실제 건축물에서의 환기문제와 같이 관련 인자가 많은 경우 실험계획법을 이용하여 각 인자의 영향을 비교적 용이하게 파악할 수 있다. 향후 좀 더 넓은 인자 범위에 대한 수직샤프트에 관한 연구가 진행되어야 할 것이다.

## 참고문헌

- Kim, J. H., 2006, A study on the improvement of the standing Duct Mechanical Ventilation System for Kitchen Ventilation in High-rise Apartment, MS thesis, Chung-Ang University, Seoul, Korea.
- Kwon, Y. I., Ahn, J. H., 2007, Intelligent Exhaust Control System used in High Riser for elevating Exhaust Efficiency of Toilet and Cooking Place, SAREK '07 Summer Annual Conference, pp. 565-571.
- Lee, S. H., 1999, A case Study on the Ventilation System of kitchen, SAREK '99 Summer Annual Conference, pp. 355-364.
- Murakami, S., Yoshno, H., Mizutani, K., Akabayashi, S., hasegawa, K., 1990, Ventilating Performance of Vertical Exhaust Duct in a Multi-story House, SHASE.
- Taguchi, G., 1987, System of Experimental design, UNIPUB.
- Kim, Y. D., 2004, A Study on the Planning of Optimum Exhaust System in High-rise Apartment Buildings, Ph.D. thesis, Seoul National University, Seoul, Korea.
- Nakazato, H., Kawazaki, K., Hiraguri, N., Ohtaki, N., 1993, Design of experiment text for production management, JUSE Press., Japan.