

고층건물에서 연돌효과를 활용한 자연환기시스템 설계를 위한 이론적 고찰

윤성민*, 서정민*, 김양수*, 이종훈**, 송두삼***

*성균관대학교 대학원 건설환경시스템공학과(mynara563@skku.edu),

**삼성물산 기술연구소(jh6925@samsung.com),

***성균관대학교 건축공학과(dssong@skku.edu)

A Theoretical Study for Stack Effect driven Natural Ventilation System in High-rise Building

Yoon, Sung-Min*, Seo, Jung-Min*, Kim, Yang-Soo*, Lee, Joong-Hoon**, Song, Doosam***

*Dept. of Architecture, Graduate School, Sungkyunkwan University(mynara563@skku.edu),

**Samsung C&T Corp.(jh6925@samsung.com),

***Dept. of Architectural Eng., Sungkyunkwan University(dssong@skku.edu)

Abstract

In these days, the green building movement caused by the energy crisis is increasing, passive design is getting more and more attention as it provides many possibilities for energy conservation. Moreover, with the increasing social intention for healthy life, the demand for indoor air quality is increasing in Korea. As result, the ventilation system which can provide the sound outdoor air constantly has been obliged in Korea. So, the hybrid system which using natural power and mechanical power and makes up for the shortage of mechanical and natural ventilation attracts people's attention in Korea.

As a hybrid ventilation system, in this study, the stack effect driven hybrid ventilation system in high-rise residential building will be suggested. And in this paper, the theoretical review for hybrid ventilation system suggested in this study will be addressed. Especially, the characteristics of pressure distribution and airflow caused by stack effect in high-rise residential building and the possibility of natural ventilation as results of stack effect will be described.

Keywords : 이론적 고찰(Theoretical study), 자연 환기(Natural ventilation), 연돌효과(Stack effect), 덕트장치(Duct system)

기 호 설 명

A	: 개구부 면적 (m^2)	h	: 기준면으로부터 거리 (m)
g	: 중력가속도 (m/s^2)	p	: 관내의 정압 (Pa)

P	: 덕트 입출구의 외기압력 (Pa)
Δp_e	: 압력손실 (Pa)
ΔP	: 압력차 (Pa)
Q	: 환기량 (m^3/s)
v	: 유체의 속도 (m/s)
α	: 유량계수
ρ	: 공기밀도 (kg/m^3)

1. 서 론

최근 자원고갈 및 에너지 문제 등으로 인한 친환경 건축에 대한 요구가 증대되면서 자연 에너지를 활용하고자 하는 많은 시도가 이루어지고 있다. 한편 국내 공동주택의 기밀성능과 단열성능이 향상되면서 실내 공기질 문제가 사회적 이슈가 되고, 재실자의 건강에 대한 관심의 증가에 따라 100가구 이상의 공동주택에 대해 0.7회/h의 환기량 확보 및 환기시스템의 설치를 의무화하고 있다. 이에 따라, 실내외 온도차 및 풍력 등의 자연력과 기계력을 병용하는 하이브리드환기 방식은 쾌적한 온열환경을 제공하며, 환기시스템운영에 따른 소비에너지를 최소화 할 수 있다는 점에서 이에 대한 적용 및 연구가 활발히 진행되고 있다.

최근 국내외적으로 건물이 고층화 되면서 연돌효과는 환기를 위한 자연적인 구동력이 될 수 있으며, 건물 내외부의 압력분포 및 공기유동특성을 결정짓는 지배적 요인이라 할 수 있다. 그러나 일반적으로 환기시스템을 계획할 시, 연돌효과에 따른 건물 실내외 압력분포 및 공기유동특성이 고려되지 않기 때문에 계획된 환기성능이 확보되지 않거나, 세대 간에 환기불균형 등의 문제가 초래되고 있다. 이러한 문제는 건물이 고층화 될수록 심각해지기 때문에 고층건물에서 환기계획 시 이러한 연돌효과에 의한 건물내 압력분포 및 공기유동을 반드시 고려해야 한다.

따라서, 본 연구에서는 고층주거건물에서

연돌에 의한 건물내 압력분포 및 공기유동에 착안한 하이브리드 환기시스템을 제안하고, 기초적인 검토로써 하이브리드 환기시스템 설계를 위한 이론식을 정립하고, 여기에 근거하여 연돌효과에 의한 자연환기 가능성을 검토하였다.

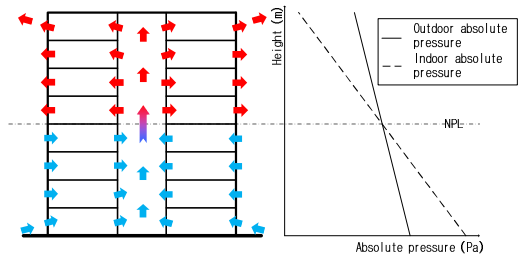
2. 하이브리드 환기시스템의 개요

본 연구에서 제안하는 하이브리드 환기시스템은 연돌효과를 발생시키는 건물내부와 외기 간의 압력차 및 건물높이에 따른 공기의 부력을 주요 환기구동력으로 활용하여 자연환기를 실시하며, 자연환기의 구동력이 부족할 경우에는 급기팬 및 배기팬을 보조적으로 가동하여 각 세대에 항상 일정한 환기가 확보되도록 운전된다. 이로써 종래의 환기시스템의 문제점으로 지적되고 있는 세대간 환기불균형문제, 환기에 따른 에너지 소비의 문제가 모두 해결될 수 있다.

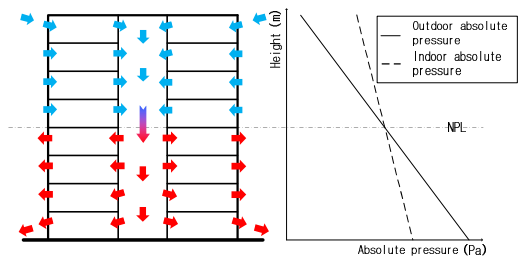
그림 1은 계절구분에 따른 건물의 압력분포 및 공기유동특성을 나타내며, 그림 2는 환기시스템의 개요를 나타낸다.

2.1 환기시스템의 특징

고층주거건물의 환기성능을 최적화하고 연돌효과를 환기구동력으로써 효과적으로 이용하기 위해서는 그림 1과 같이 계절구분에 따른 실내외 압력분포와 공기유동특성을 고려해야 한다. 따라서 본 연구에서 제안하는 하이브리드 환기시스템에서는 그림 2와 같이 연돌효과에 의한 실내외 압력분포를 고려하여 외기의 도입구 및 실내공기의 배출구 위치를 결정하고, 연돌효과에 의한 건물내부의 공기유동을 고려하여 중성대를 기준으로 설치위치가 결정된 건물내부의 급기구 및 배기구를 덕트와 직접 연결한다. 이러한 방식은 압력차를 최대로 확보하여 가능한 한 많은 세대에서 자연적인 급기 및 배기를 가능하게 하며, 실내의 공기유동경로와 급배기방향



(a) 연돌효과 발생 시기



(b) 역 연돌효과 발생 시기

그림 1. 계절구분에 따른 압력분포 및 공기 유동 특성

일치하므로 실내의 환기효율을 향상시킬 수 있다. 또한, 덕트의 열교환을 통하여 공기의 부력효과를 증가시킬 수 있으며, 동시에 환기에 따른 냉난방부하 증가를 최소화하는 것이 가능하다.

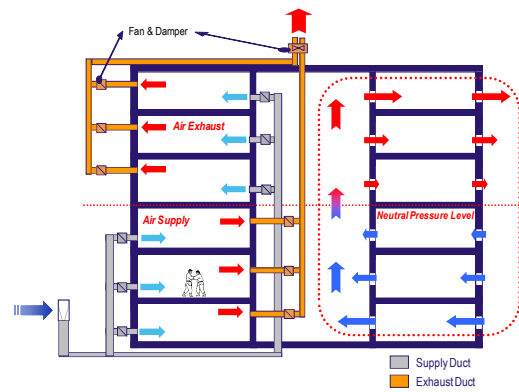
본 환기시스템에서는 연돌효과에 의한 압력분포 및 공기유동특성 등을 고려한 덕트설계를 통하여 각 세대의 적정환기량을 만족시킬 수 있는 정량적 계획환기가 가능함에 따라 환기불균형문제를 해결할 수 있다. 아울러 본 환기시스템은 덕트를 이용하여 중성대를 기준으로 독립된 급배기 계통이 설치되기 때문에 고층주거건물의 중성대 상층부 세대에서 연돌현상에 의해 발생할 수 있는 실내를 경유한 used-air가 유입되는 현상, 즉 환기에 따른 2차 오염을 최소화할 수 있다.

2.2 환기시스템의 구현을 위한 전제조건

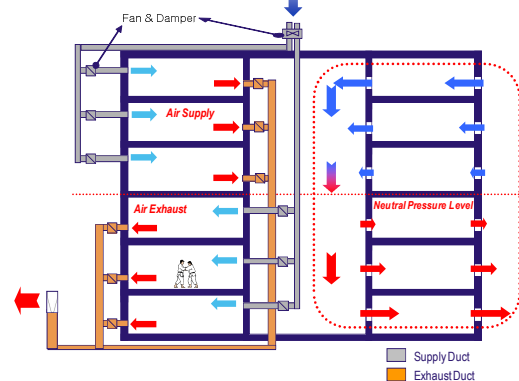
본 연구에서 제안하는 하이브리드 환기시스템에서는 건물내부와 외기 간의 압력차 및 덕트내부 공기의 부력조건에 근거하여 적정

한 급기량 및 배기량이 확보될 수 있도록 덕트의 규격 및 수량이 결정된다. 여기서, 환기 대상공간에 대한 급기량과 배기량이 동일하지 않으면 환기에 의해 해당공간의 실내 절대압력이 변화하며, 결국 건물전체 중성대가 이동하면서 대상건물전체에 대한 원래의 압력분포가 변화하게 되고 계획했던 급기 및 배기가 불가능하게 된다.

따라서, 각각의 환기 대상공간에 대한 급기량과 배기량을 동일하게 설정해야하며, 이를 위해서는 이론적인 검토를 통해 적정환기량이 확보될 수 있도록 급기, 배기경로의 설정과 급,배기덕트의 설계가 이루어져야 한다.



(a) 연돌효과 발생시기



(b) 역 연돌효과 발생 시기

그림 2. 하이브리드 환기시스템 개요

3. 자연환기 설계를 위한 이론적 고찰

3.1 기본개념

고층주거건물에서 각 세대의 환기량을 정량적으로 설계하기 위해서는 공기유동에 관한 기본식인 식(1)에서 압력차(ΔP)를 알아야 한다.

$$Q = \alpha A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (1)$$

이때, 본 연구에서 제안하는 하이브리드 환기시스템은 외기와 실내를 덕트로 연결하는 방식이므로 단순 개구부에서의 압력차와 구별할 필요가 있다. 이를 위해 유체역학의 기본법칙인 베르누이의 방정식을 압력차원으로 표현하면 식(2)와 같다.

$$p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 = p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2 + \Delta p_e \quad (2)$$

만약 관내의 1지점에서 2지점으로 공기유동이 발생할 때, 덕트의 직경이 일정하고 덕트의 높이차가 존재하는 상황에서 덕트 입출구 근처의 외부압력을 고려해 볼 때, 1지점 외부에는 절대압력 P_1 , 풍속 $v=0$ 가 되며, 2지점 외부에는 절대압력 P_2 , 평균풍속 v_2 가 존재하므로 식(3)과 같이 표현된다. 여기서, 덕트 양단의 압력차를 식으로 표현하면 식(4)와 같다.

$$P_1 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2 + \Delta p_e \quad (3)$$

$$P_1 - P_2 + \rho g (h_1 - h_2) = \frac{\rho v_2^2}{2} + \Delta p_e$$

$$\Delta P = P_1 - P_2 + \rho g (h_1 - h_2) \quad (4)$$

이는 단순 개구부에서 개구부 전후의 압력차와 달리, 본 환기시스템의 환기구동력이 되는 압력차이다.

3.2 자연급배기 영향요소

베르누이 방정식을 통해 정리한 압력차를 본 환기시스템에 적용시켜 자연급배기에 관한 영향요소를 그림 3과 같이 급기측, 배기측에 대하여 도출하고, 급,배기 압력차를 유도했다. 이때, 식(4)에서 $\rho g (h_1 - h_2)$ 를 m 으로 정의하여 덕트내부의 공기부력을 자연급배기에 관한 영향요소로 표현하였다. 또한, $\Delta P > 0$ 을 만족할 때 급기덕트에서는 자연급기가 가능하고, 배기덕트에서는 자연배기가 가능하므로 $\Delta P > 0$ 를 자연급배기 가능조건으로 설정하였다.

$$(1) \text{ 급기측} : \Delta P = P_{s2} - P_{s1} + m_s > 0 \quad (5)$$

$$(2) \text{ 배기측} : \Delta P = P_{e1} - P_{e2} + m_e > 0 \quad (6)$$

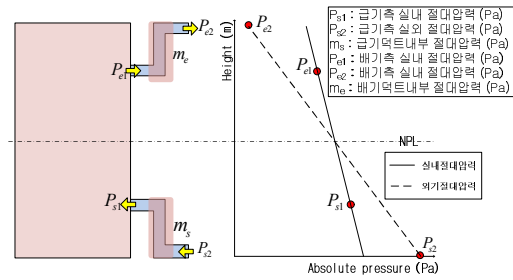


그림 3. 자연급배기 영향요소

급배기 각각에 대하여 정의된 압력차를 바탕으로 본 환기시스템의 목적에 맞게 연돌효과에 따른 압력분포를 고려해 볼 때, 자연급배기 영향요소로 구성된 ΔP 를 최대로 확보하기 위해서는 외기의 도입구를 건물의 최저부분으로 설정하고, 실내공기의 배출구를 최고부분으로 설정한다. 이를 통해 P_{s2}, P_{e2} 값을 최대로 확보하여 압력차에 의한 환기구동력을 극대화할 수 있다. P_{s1}, P_{e1} 값은 실내 압력분포로 대상공간의 온도 및 높이에 따라 정해진다. 또한, m 값은 덕트 입출구의 높이차와 덕트내부의 공기밀도에 따라 정해진다. 이때, 덕트내의 기류방향을 고려하여 덕트내부 공기온도는 실내외 온도 사이에서 결정된다고 가정하였다.

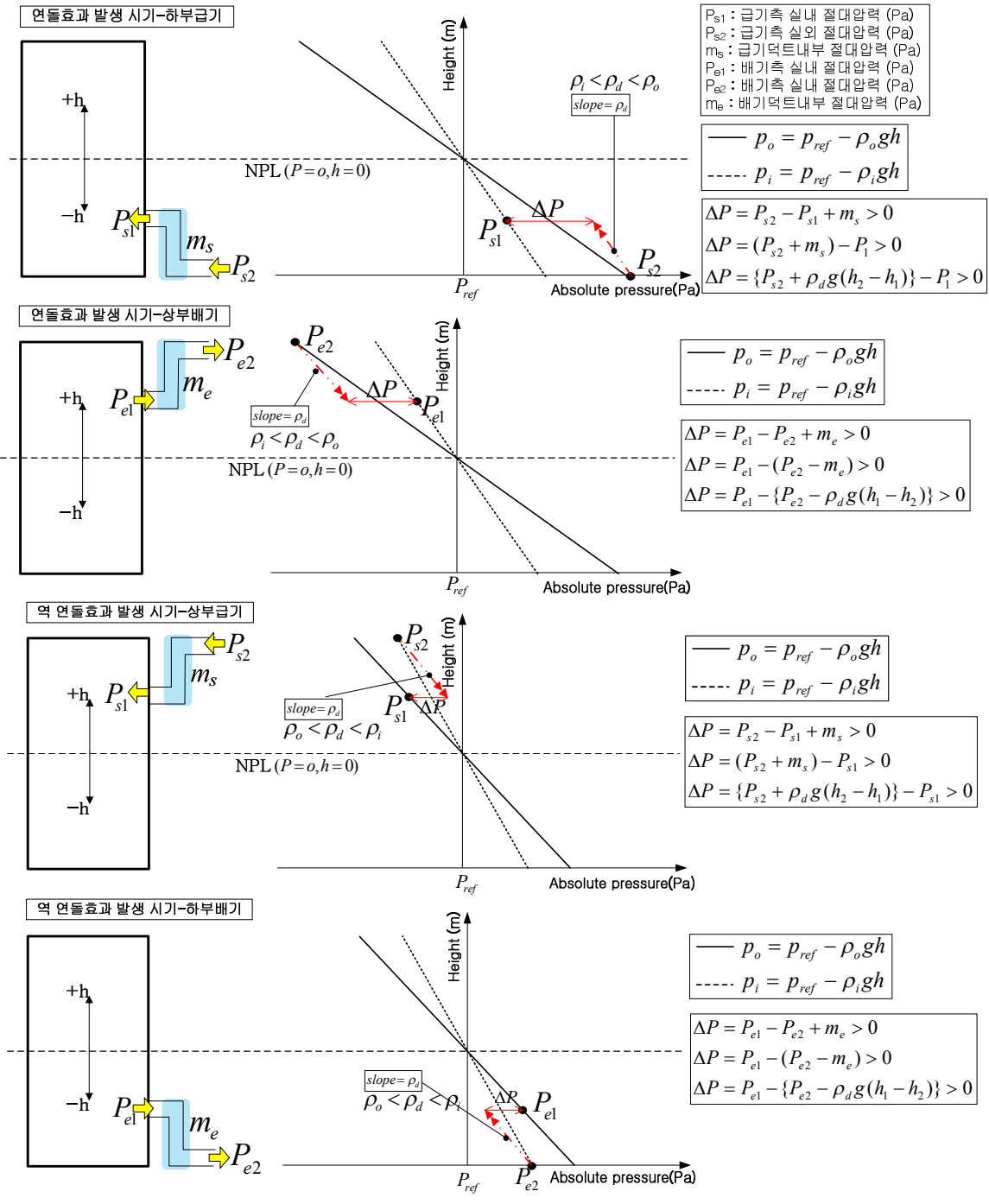


그림 4. 자연급배기 가능성 검토

표 1. 자연급배기 가능성 검토 결과

계절구분	공기유동	급배기방식	환기성립조건	층구분 별 자연 급배기 가능성	
				층구분	자연 급배기 가능성 및 가능조건
연돌시기	상승류	하부급기	$\Delta P = P_{s2} - P_{s1} + m_s > 0$	중성대 상부	$\Delta P > 0$ 을 만족시키는 덕트내부온도조건에서 급기가능
				중성대 하부	모든 조건에서 급기가능
	상부배기	$\Delta P = P_{e1} - P_{e2} + m_e > 0$	중성대 상부	모든 조건에서 배기가능	
			중성대 하부	$\Delta P > 0$ 을 만족시키는 덕트내부온도조건에서 배기가능	
역연돌시기	하강류	상부급기	$\Delta P = P_{s2} - P_{s1} + m_s > 0$	중성대 상부	모든 조건에서 급기가능
				중성대 하부	$\Delta P > 0$ 을 만족시키는 덕트내부온도조건에서 급기가능
	하부배기	$\Delta P = P_{e1} - P_{e2} + m_e > 0$	중성대 상부	$\Delta P > 0$ 을 만족시키는 덕트내부온도조건에서 배기가능	
			중성대 하부	모든 조건에서 배기가능	

3.3 자연급배기 가능성 검토

고층 주거건물의 각 세대에 적정량의 급배기를 실시하고 외기조건에 따른 환기방식(자연환기 또는 기계환기)을 선택하기 위해서는 건물전체를 대상으로 자연급배기 가능성을 검토해야하며, 가능한 범위 내에서 적정환기량을 만족하기 위해 덕트설계가 진행되어야 한다. 따라서, 본 절에서는 건물전체를 대상으로 영향요소에 따른 자연급배기 가능성에 대하여 검토하고 있다. 그림 4는 계절구분에 따른 자연급배기 가능성에 대한 검토내용이다. 표 1은 그림 4에서 검토한 결과를 바탕으로 계절구분에 따른 환기시스템의 자연급배기 가능성 및 가능 조건을 나타낸다.

(1) 연돌효과 발생 시기

연돌효과 발생 시기의 실내외 압력분포를 살펴보면, 중성대 하부에서는 외기가 실내로 유입되고 중성대 상부에서는 실내공기가 외부로 유출되는 것을 알 수 있다. 즉, 외벽의 단순 개구부를 통해 온도차 환기를 실시할

경우 중성대를 기준으로 자연급배기가 불가능한 높이가 발생하게 된다. 본 환기시스템에서는 건물의 연돌효과와 덕트내부 공기의 부력 환기구동력으로 활용하기 때문에 중성대를 기준으로 자연급배기 가능영역을 검토할 필요가 있다.

그림 4와 같이 식(5)와 식(6)의 항을 교환하여 압력차(ΔP)를 구해보면 환기 대상공간의 높이에서의 실내외 압력차와의 비교가 가능하다. 이때, 실내외 온도사이로 결정된 덕트내부의 공기밀도로 외기압력선이 환기 대상공간의 높이까지 그려지며, 이 밀도는 외기의 밀도보다 작기 때문에 해당높이에서의 압력차는 증가한다. 따라서 덕트내부의 공기밀도를 조정하여 모든 높이에서 급기측 및 배기측의 $\Delta P > 0$ 를 만족할 수 있다. 즉, 덕트내부온도조건에 의해 모든 건물의 높이에 대해서 자연급배기가 가능하다는 것을 의미한다.

(2) 역 연돌효과 발생 시기

역 연돌효과가 주로 발생하는 여름철의 실내외 압력분포를 살펴보면, 연돌발생 시기와 마찬가지로 외벽의 단순 개구부를 통한 온도차 환기를 실시할 경우 중성대를 기준으로 자연급배기가 불가능한 높이가 발생하는 것을 알 수 있다.

역 연돌효과 발생 시기에는 연돌효과 발생 시기와 다르게 역 연돌효과에 따른 기류특성에 따라 상부에서 급기하고 하부에서 배기를 실시하기 때문에 그림 4에서 연돌시기와 다른 압력분포를 나타낸다. 이를 고려하여 정의된 압력차(ΔP)를 바탕으로 환기 대상공간의 높이에서의 실내외 압력차와의 비교가 가능하다. 이때, 실내외 온도사이로 결정된 덕트내부의 공기밀도는 외기의 밀도보다 크기 때문에 해당높이까지 새롭게 그려지는 외기압력선을 통해 구한 압력차(ΔP)는 증가하게 된다. 이를 통해 역 연돌효과 발생 시기에 도 덕트내부의 공기밀도를 통해 모든 층에서 $\Delta P > 0$ 를 만족할 수 있다.

5. 결론

이상으로 본 연구에서는 고층주거건물에서 연돌효과를 활용한 하이브리드 환기시스템을 제안했으며, 향후 환기시스템 설계를 위한 기초적인 단계로써 이론적인 검토를 수행했다. 주요한 검토내용은 아래와 같다.

- (1) 본 연구에서는 연돌효과를 활용한 고층 주거건물용 하이브리드 환기시스템을 제안했다.
- (2) 본 환기시스템에 대한 자연급배기 영향요소를 도출했으며, 자연급배기를 성립시킬 수 있는 조건을 정리했다.
- (3) 계절구분에 따른 연돌시기와 역 연돌시기에 건물전체를 대상으로 자연급배기 가능성 및 가능요구조건을 검토했다.
- (4) 향후, 본 연구에서 제안한 하이브리드 환기시스템의 목적과 특징에 따라 구체적인 시스템설계방안에 대하여 순차적으로 보

고할 예정이다.

참 고 문 헌

1. 서정민 외, 고층 주거건물의 압력분포 특성을 고려한 환기계획 방안, 대한건축학회 학술발표대회, 제29권, 제1호, pp.717-720, 2009
2. 서정민 외, 연돌효과에 의한 주거용 건물의 압력분포 특성에 관한 연구, 한국건축친환경설비학회 추계학술발표대회 논문집, pp. 129-133, 2008
3. 이중훈, 초고층 특성을 고려한 하이브리드환기의 개발 및 적용, 대한건축학회, 학술저널, 제51권, 제10호, pp66-69, 2007
4. ASHRAE, 2005 ASHRAE Handbook Fundamentals, Inc., Chapter 35, 2005.
5. 설비공학회, 설비공학편람, 제1권 기초, 금문당, 2001
6. 조재훈, 고층 주거건물에서 연돌효과로 인한 압력분포 예측 및 평가, 박사학위논문, 서울대학교 대학원, 2005
7. Tamura, G. T., Smoke movement and control in high-rise buildings, National Fire Protection Association, 1994.
8. Hayakawa, S. and Togari, S., Study on the stack effect of tall office building(part1), Journal of Architectural Institute of Japan, Vol. 387, 1988.