

복합 건축물 연결 통로에서의 기류형성에 관한 수치적 해석 연구

전 병 진,¹ 장 병 윤,² 최 형 권^{*3}

A NUMERICAL STUDY ON FLOW PATTERN IN CONNECTING PASSAGEWAY OF A COMPOSITE BUILDING

B.J. Jeon,¹ B.Y. Jang² and H.G. Choi^{*3}

In this paper, a three-dimensional numerical study on flow pattern in winter along connecting passageway of a composite building was conducted using a commercial CFD package. The incompressible Navier-Stokes equation coupled was solved by using SIMPLE algorithm in order to find steady solutions. It was shown that a upward flow is generated inside the building in winter due to buoyancy effect and that the air inside connecting passageway flows from the shorter building to the taller one regardless of the slope of the passageway. Further, it was found that the magnitude of air velocity inside connecting passageway increases as the uphill slope to the taller building increases and decreases as the downhill slope to the taller one increases, although the variation in the magnitude of fluid velocity is not substantial. Lastly, it was shown that the maximum air velocity inside connecting passageway is less than the allowable limit for all the cases considered in this study.

Key Words : 전산유체역학(CFD), 연결통로(Connecting Passageway), 복합건축물(Composite Building), 부력효과(Buoyancy Effect)

1. 서 론

최근 건축물의 초고층화 복합화가 국내외에서 경쟁적으로 추진되고 있다. 초고층 건축물이 국가의 기술력을 포함한 각종 분야의 국가경쟁력에 대한 상징물이 되고 있다고 할 수 있다. 토지 이용의 효율성을 극대화시키기 위해, 국내에서도 151층의 610 m로 계획되는 송도인천타워, 112층의 555 m로 계획된 잠실 제2롯데월드 등 많은 초고층 복합건물이 건립 계획되고 있다. 이러한 초고층 건물의 구축은 기본계획에서 시공에 이르기까지 기술적, 재료적 측면뿐만 아니라 사회적, 경제적 뒷받침이 필요하며, 이를 극복하기 위해 독자적인 기술력의 개발과 이에 대한 연구개발 투자가 지속적으로 이루어

어져야만 한다. 다행히도 국내의 건설 기술진들은 국외에서 건설되는 초고층 건축물의 건설에 참여하여 초고층 건물의 시공관련 지식을 많이 보유한 상황이다.

초고층 건물의 건설에 있어서 우선적으로 디자인 분야가 중요하게 여겨지고 있으며, 그 다음으로 구조 및 시공 등 1차적 건설 분야가 중요시 되고 있는 것이 현실이다. 하지만 건축물의 최종 목적이 실내 거주자의 쾌적성의 확보라는 점을 감안할 때, 수치적으로 고밀도화 된 초고층의 복합건물에 있어서는 환기설비가 포함된 공조 설비, 급배수 위생설비, 전기 및 운송설비 분야에서 설계된 설비 시스템의 비중이 한층 더 강조되어지고 있다. 초고층 복합건물에 있어서 설비적 측면에서 한계성의 대표적인 사례가 바로 연돌 효과에 따른 기류 쏠림 및 불균형을 들 수 있다. 조재훈[1]과 김영돈[2]의 연구에서 연돌효과로 인한 문제점들에 대하여 발표한 것과 같이 엘리베이터 문의 오동작 및 소음발생, 출입문 개폐의 어려움, 침기와 누기에 의한 에너지손실 등 단순하게는 거주 쾌적성이 저하될 수도 있으며 더 나아가 환기 및 냉, 난방 등의 공조 설비의 운용효율을 급감시켜서 에너지 소비량의 증대를 초래하게 된다. 이러한 점은 현재 화두가 되고 있는 친환경적

접수일: 2010년 7월 23일, 수정일: 2010년 9월 9일,

게재확정일: 2010년 9월 17일

1 정희원, 서울산업대학교 에너지환경대학원 기계공학과

2 정희원, 서울산업대학교 산업대학원 기계공학과

3 정희원, 서울산업대학교 기계공학과

* Corresponding author, E-mail: hgchoi@snut.ac.kr

인 측면에 반하는 결과라고도 할 수 있다[3-5].

기존 고층 주거건물에서의 연돌효과에 관한 조재훈[6]등의 연구결과에 의하면 일반적으로 연돌 효과 문제는 과도한 압력 차 문제점을 중심으로 100 m 이상의 고층건물에서 빈번하게 발생하는 것으로 알려져 있다. 최근에는 백화점, 쇼핑몰과 같은 복합 건축물에서의 대형 판매시설 건축물들이 점차 대형화되고 복합용도로 지어지면서 국내 건축법에 규정된 “실내허용 환경조건”에서의 실내기류속도 기준은 0.5 m/s 이하로 제한[7]되고 있으며 국내 참고문헌[8]에서는 쾌적한 환경을 만들기 위하여 27℃에서는 0.5 m/s, 26℃에서는 0.35 m/s 정도가 바람직하다고 제한하고 있다. 국외 연구[9,10]에 따르면 0.8 m/s 이상의 실내기류는 종이와 머리카락을 날리게 하거나 가벼운 물체를 움직이게 할 수 있음을 지적하고 있다. 또 다른 국외기준으로 미국 냉동공조학회(ASHRAE Standard)[11]와 국제표준기구(ISO Standard)[12]는 평균 기류속도를 겨울철에는 0.15 m/s이하로, 여름철에는 0.25 m/s이하로 제한하여 보다 엄격하게 제한하고 있다. 판매시설의 건축물들은 저층부의 많은 출입구로 인한 다량의 공기가 유입 되고, 에스컬레이터, 무빙워크 라는 수직 상승통로로 인하여 저층의 높이에도 불구하고 연돌 효과 문제가 심각하게 발생하고 있다.

따라서 본 연구에서는 규모가 다른 각각의 판매시설을 하나의 건물로 사용하기 위하여 여러 층에 연결통로를 설치할 때, 기류 쏠림 현상을 연결통로의 경사로, 위치, 등을 고려하여 연결통로 내에서의 기류의 이동방향 및 풍속 등을 수치해석을 통해서 고찰하고자 한다.

2. 수치해석방법

2.1 지배방정식 및 사용코드

연구에서는 건물 내의 연돌효과가 층간 높이가 다른 두 건물 사이의 연결 통로의 기류에 미치는 영향을 수치 해석적으로 고찰하고자 한다.

실제 현장에서는 인구 밀도 및 냉난방 시스템에 의한 다양한 조건이 고려되어지나, 본 연구에서는 겨울에 난방 시스템이 작동하는 경우에 건물 사이의 연결 통로의 기류를 3차원 수치해석을 통하여 고찰하고자 한다.

비압축성 3차원 유동장을 기술하는 지배방정식은 다음과 같다. 난류 유동장의 해석은 표준 $k-\epsilon$ 모델을 적용하여 해석하였으며, 정상 상태의 해를 구하고자 한다.

연속방정식

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \tag{1}$$

운동량 방정식

$$\rho(\vec{u} \cdot \nabla)\vec{u} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \rho g \beta (T - T_c) \tag{2}$$

난류 방정식

$$\begin{aligned} (\vec{u} \cdot \nabla)k &= \nabla \cdot \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] - \epsilon + G \\ (\vec{u} \cdot \nabla)\epsilon &= \nabla \cdot \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} G - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \tag{3}$$

$$\nu_T = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

$$C_1 = 1.44, \sigma_k = 1.0, C_2 = 1.92, \sigma_\epsilon = 1.3, C_\mu = 0.09$$

여기서 $G = \nu_T \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$

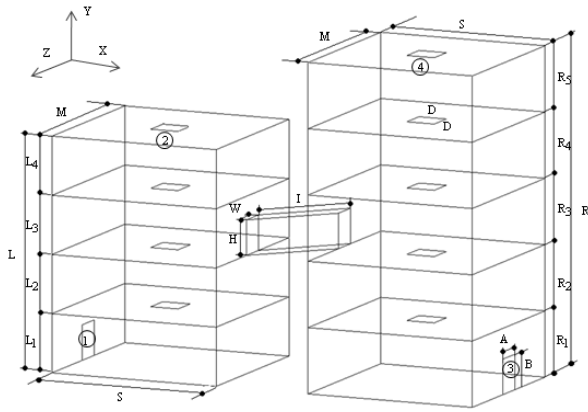
위의 식에서 μ 는 유체의 점성계수, ρ 는 유체의 밀도, g 는 중력 가속도, β 는 열 팽창 계수를 나타낸다. 수치해석은 상용코드인 ANSYS-Fluent을 사용하여 수행하였다. 비압축성 유동장의 해석을 위한 알고리즘으로 SIMPLE을 사용하였으며, 운동량 방정식과 난류 방정식의 도식을 위하여 일차 상류도식(first order upwind)을 적용하였다.

2.2 계산영역 및 부하조건

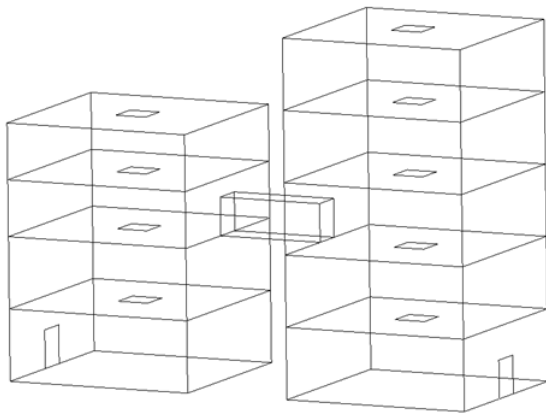
본 연구에서는 연결통로로 연결된 크기가 다른 두 건물 1층 출입구(1, 3지역)와 지붕 개구부(2, 4지역)를 형성하고, 층간 기류의 이동 통로를 설정 하였다. Fig. 1은 다양한 해석 모델의 개략도를 나타낸다. 연결통로의 기울기는 3가지 경우를 사용하였으며 외기온도와 실내온도는 겨울의 평균 난방조건을 고려하여 지정하였다. Table 1은 해석 모델에 대한 각 위치에서의 길이를 나타낸 것이다.

Table 1 Dimensions of computational domain (m)

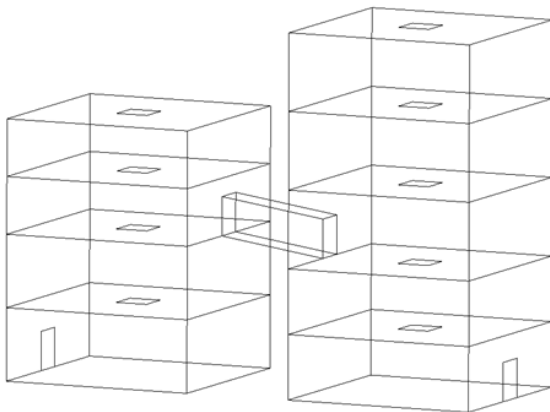
	Case1	Case2	Case3
A, D, W	2.5		
B, H	3		
I	8.48	8.4	8.48
M, S	15		
L1, L2	5	5.6	5.6
L3, L4	5	4.4	4.4
R1, R2	5.6	5.6	5
R3, R4, R5	5.6	5.6	6



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

Fig. 1 Schematic of composite buildings

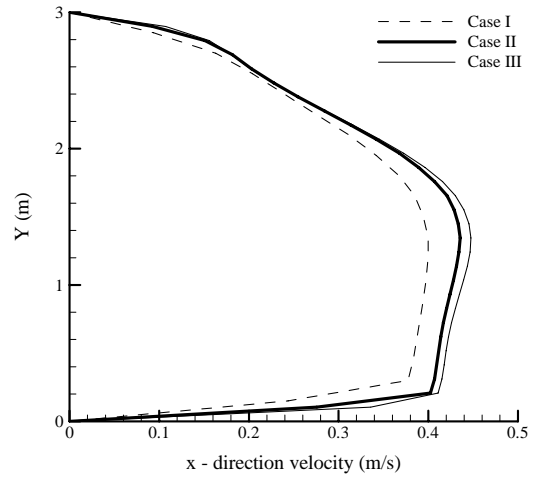


Fig. 2 Velocity profiles for various grid resolutions

2.3 격자 및 경계조건

사용된 격자는 육면체 격자로서, 격자생성 전용 프로그램인 ICEM-CFD를 이용하여 생성하였다. 계산에 사용될 격자계를 결정하기 위해 격자계 검증 실험을 실시하였다. 연결통로 기울기가 12°일 경우, 격자수가 약 50만(Grid I), 170만(Grid II), 300만(Grid III) 일 경우에 연결 통로 중심에서의 속도분포를 비교하였다. Fig. 2는 서로 다른 3가지 격자계를 사용한 경우에 연결 통로 중심에서의 주유동방향의 속도분포를 나타낸다. Grid II와 Grid III에 대한 최대 속도의 오차는 약 3%이며, 속도분포가 수렴하는 경향이 나타났다. 본 연구에서는 모든 경우에 대하여 Grid II를 사용하여 수치해석을 수행하였다. Fig. 3과 Fig. 4는 Grid II의 전체 격자계와 연결통로 단면에서의 격자계를 나타낸다.

Table 2에서 본 연구에서 사용한 외기온도와 실내 평균온도 및 3가지 연결통로의 기울기를 나타낸다. 외기 온도는 일정한 온도조건을 주었으며, 실내의 온도는 상부로 올라갈수록 온도가 증가하여 약 4°C의 온도차를 유지한다. Fig. 3에서 건물의 벽과 지면은 벽으로 처리하여 부착 (no slip) 조건 및 단열 조건을 부여하였으며, 외부 공기가 유입 또는 유출되는

Table 2 Temperature distribution and three slopes of connecting passageway of composite building

	Outdoor temperature	Indoor temperature	slopes of connecting passageway
Case 1	-12°C	20°C	12°
Case 2	-12°C	20°C	0°
Case 3	-12°C	20°C	-8°

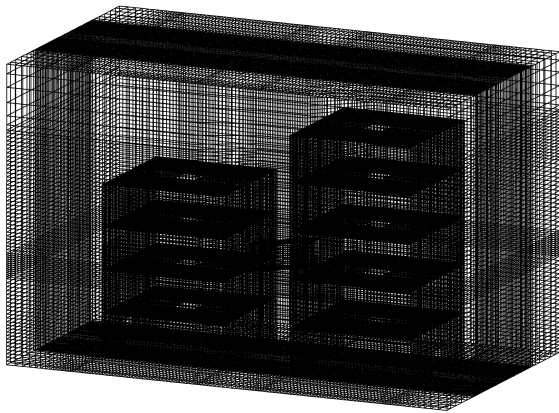


Fig. 3 Non-uniform mesh for computational domain

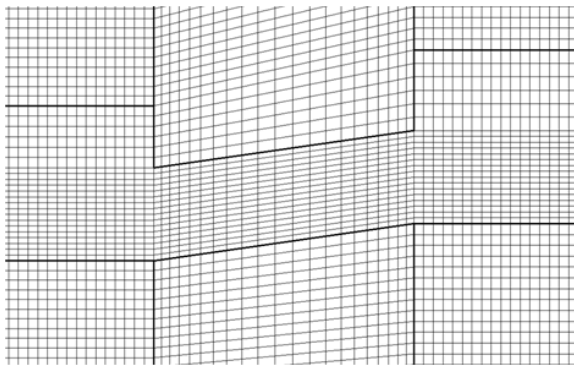


Fig. 4 Non-uniform mesh around connecting passageway

면에서는 기준압력을 지정하고, 무응력 (traction-free) 조건을 부여하였다. Fig. 5는 건물외부와 실내의 온도분포를 나타낸 것이다. 건물 외부에는 일정 온도를 가정하였으며, 실내에서의 난방기에 의한 기류형성은 고려하지 않았다. 건물의 외벽에서의 누기는 없는 것으로 가정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 건물전체 기류 분포

높이가 서로 다른 두 개의 건물에서 온도 조건에 따라 외부공기가 실내로 유입되고 유출되는 방향과 실내로 유입된 기류의 수직 이동방향 및 연결통로에서의 기류형성을 다음과 같이 고찰 하였다. Fig. 6은 전체 기류 분포를 나타낸 것이다. 건물 외부의 공기가 차갑고, 내부가 더운 공기로 이루어져 건물 내의 더운 공기가 위로 상승하면서 아래쪽인 1번 지역과 3번 지역에서 건물 외부에서 내부로 기류가 유입되고 건물

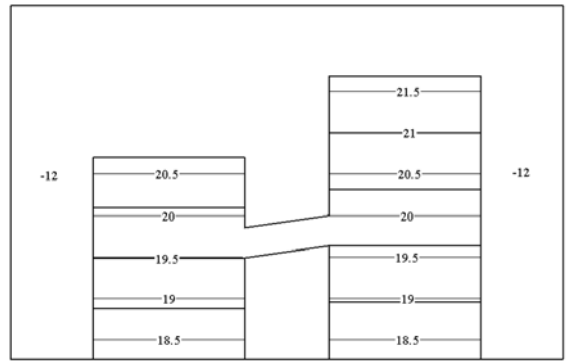


Fig. 5 Temperature distribution of a composite building

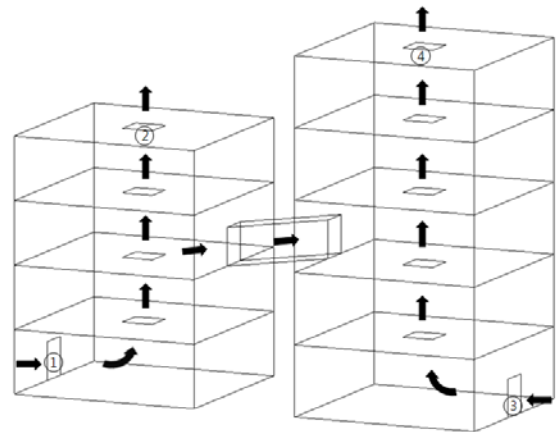


Fig. 6 Air current distribution of a composite building

상부인 2번 지역과 4번 지역으로 유출되는 것을 나타내고 있다. 두 건물이 연결된 통로를 통해 낮은 건물에서 높은 건물로 공기가 이동하는 현상을 알 수 있다.

Table 3은 3가지 경우에 대해 건물내부로 공기가 유입되는 지역과 유출되는 지역의 각각 위치별 질량 유동률을 수치해석을 통하여 얻고 이를 비교한 것이다. 통로의 경사 기울기가 12°(Case 1) 일 때 -8°(Case 3) 보다 공기의 유동률이 약 1 kg/s 정도 더 많은 것을 확인하였다.

Table 3 Mass flow rate(kg/s) at various position

	No.1 area	No.2 area	No.3 area	No.4 area
Case 1	20.3501	17.1977	20.6884	23.8407
Case 2	19.7653	16.4383	19.8745	23.2015
Case 3	19.7473	16.4915	19.6928	22.9486

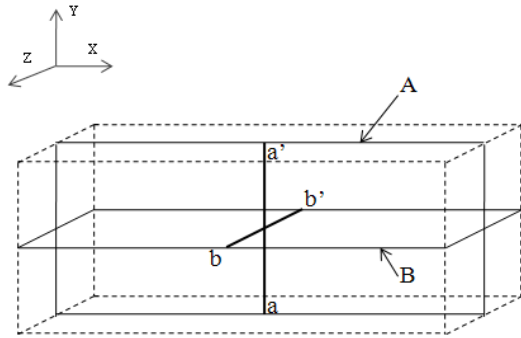


Fig. 7 Schematic of connecting passageway

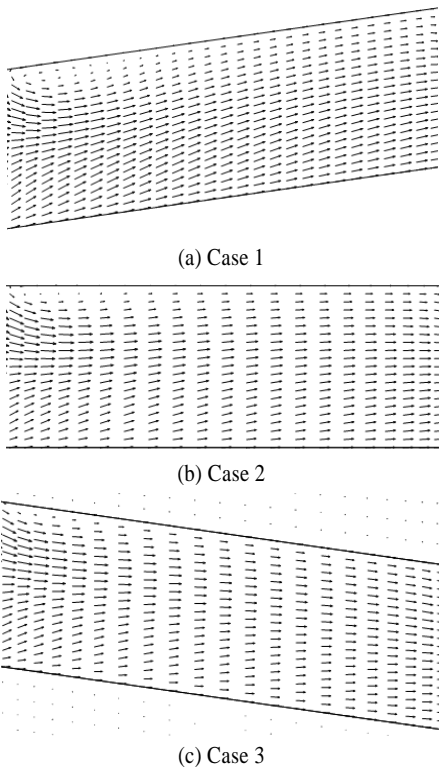


Fig. 8 Velocity vector fields in connecting passageway

3.2 연결통로에서의 기류 분포

이 절에서는 수치해석을 통하여 얻은 속도장을 3가지의 연결통로에 대하여 비교하여 고찰하고자 한다. Fig. 7은 3가지의 경우의 연결통로에서 속도를 비교하고자 하는 단면과 선을 나타낸다. Fig. 8은 연결통로의 A 단면에서 각 경우별 속도장을 나타낸 그림이다.

경사도를 달리한 3가지 경우 모두 낮은 건물에서 높은 건

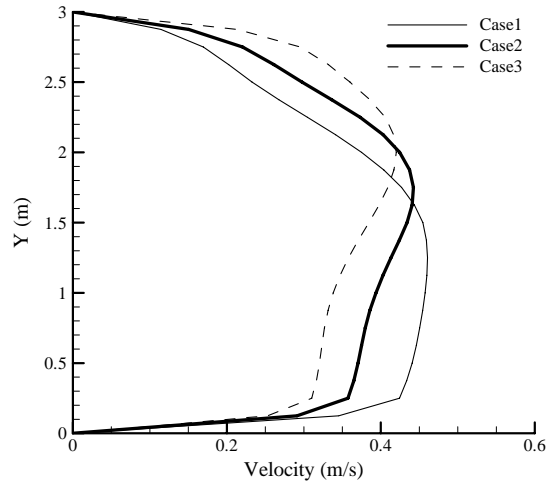


Fig. 9 Velocity distribution along a-a' for three different connecting passageways

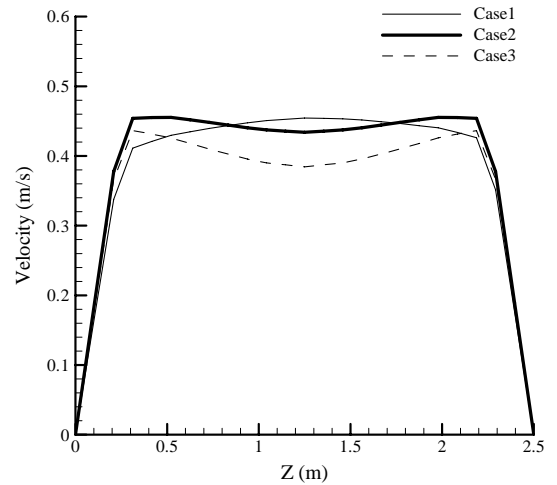


Fig. 10 Velocity distribution along b-b' for three different connecting passageways

물로 공기가 이동하고 왼쪽 천정 부근에서 약간의 와류 분포가 나타나는 것을 볼 수 있다. 즉, 연결통로에서의 사람은 낮은 건물에서 높은 건물로 바람이 부는 것을 느낄 수 있다. Fig. 9는 3가지 계산경우에 대하여 연결통로 중심 단면에서 높이방향(a-a')을 따르는 주유동방향의 속도 크기를 비교하고 있다. Case 1에서의 최대 속도는 약 0.46 m/s이며 연결통로의 낮은 높이에서 속도가 높은 것을 알 수 있다. Case 2에서는 최대 속도가 약 0.44 m/s이며 연결통로의 높은 높이에서 속도가 높은 것을 볼 수 있다. Case 3은 Case 2와 마찬가지로 높은 높이에서 속도가 높으며 최대 속도는 약 0.42 m/s이다. 각

경우를 비교해 보았을 때, 속도의 차이는 작으나 작은 건물에서 큰 건물로 연결되는 통로의 기울기가 높아지면서 속도가 조금씩 상승하는 것을 볼 수 있다. Fig. 10은 연결통로 중심단면에서 폭 방향(b-b')을 따르는 주유동방향의 속도 크기를 비교한 그림이다. Case1에서의 최대 속도는 약 0.46 m/s이며 중심에서 가장 높은 속도 분포가 나타나는 것을 볼 수 있다. Case2에서는 최대 속도가 약 0.46 m/s이고 Case1과 유사한 속도분포를 나타내는 것을 볼 수 있다. Case3에서의 최대 속도는 약 0.44 m/s이며 벽면 부근에서 속도가 가장 높은 것을 확인할 수 있다

4. 결 론

본 논문에서는 저층 건물과 고층 건물의 연결통로의 기울기 변화에 따른 기류속도의 변화를 수치해석을 통하여 고찰하였다. 저층 건물과 고층 건물의 연결통로의 기울기 변화에 따른 기류속도의 변화에 대한 수치해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론들을 유도하였다.

(1) 겨울에 실내와 외부의 온도차에 의한 부력에 의하여 건물 아래쪽에서 외부의 차가운 공기가 유입되어 건물내부에서 수직상승 기류가 형성되어 상부로 유출되는 것을 확인하였다.

(2) 연결통로에서 기류는 연결통로의 기울기에 무관하게 모두 낮은 건물에서 높은 건물로 공기가 흘러가는 것을 확인하였다.

(3) 연결통로에서의 속도 분포는 연결통로의 기울기에 따라 변화가 있음을 확인하였다. 작은 건물에서 큰 건물로 연결되는 통로의 기울기가 커지면서 공기의 유동률이 증가하고 속도의 크기가 커지는 것을 알 수 있었다. 하지만, 그 차이는 비교적 크지 않음을 발견하였다.

(4) 3차원 전산유체역학 해석을 통하여 본 연구에서 사용한 복합건축물의 경우 연결통로에서의 최대 유속이 약 0.46m/s로 국내 건축법에 규정된 “실내허용 환경조건”에서의

실내기류속도 기준(0.5 m/s 이하)을 만족함을 확인하였다.

참고문헌

- [1] 2005, 조재훈, “고층 주거건물에서 연돌효과로 인한 압력 분포 예측 및 평가,” *박사학위논문*, 서울대학교, 서울.
- [2] 2004, 김영돈, “고층 주거용 건물의 적정 배기 시스템 계획에 관한 연구,” *박사학위논문*, 서울대학교, 서울.
- [3] 2000, 김광우 외 2인, “수원 화성 관망탑의 연돌효과에 의한 영향 분석,” *건축환경계획연구실*, 서울대학교, 서울.
- [4] 1993, ASHRAE, "Field verification of problems caused by stack effect in tall building," *ASHRAE Research Project 661*, pp.4-5.
- [5] 1988, Hayakawa, S. and Togari, S., "Study on the stack effect of tall office building(part1)," *Journal of Architectural Institute of Japan*, Vol.387, pp.42-52.
- [6] 2000, 조재훈 외 3인, "A Study on the Stack Effect in High-rise Building," *대한건축학회 추계학술발표대회 논문집*, Vol.20, pp.769-772.
- [7] 2001, 대한설비공학회, *설비공학편람 공기조화*, Vol.2, pp.1-4.
- [8] 2003, 금종석 외 2인, *백만인 속백만인의 공기조화*, 태훈출판사, p.261.
- [9] 2002, Kreider, J.F. et al., *Heating and Cooling of Buildings*, McGraw-Hill, p.156.
- [10] 1991, Awbi, H.B., *Ventilation of Buildings*, E&FN SPON, pp.8-22.
- [11] 1981, ASHRAE, *Thermal environmental conditions for human occupancy*, American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- [12] 1984, ISO, *Moderate thermal Environments-Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort*, ISO.