



건물 구조체 내부 공기층의 발열 및 유로 형상에 따른 3차원 자연대류 열유동 해석 - 건물 구조체 3차원 열전달 해석을 위해 개발된 공기층 자연대류 열유동 코드 검증을 중심으로 -

3D Natural Convection Heat Flow Analysis Based on Surface Heat Flux and Flow Path Geometry of Internal Air Layers in Building Structures

- Focusing on the Validation of the Air Layer Natural Convection Heat Flow Solver Developed for the 3D Heat Transfer Analysis of Building Structures -

이주희* · 이용준** · 오은주***

Ju-hee Lee* · Yong-Jun Lee** · Eun-Joo Oh***

* Coauthor, Professor, Dept. of Automotive ICT Engineering, Hoseo Univ., Asan, South Korea (juheelee@hoseo.edu)

** Corresponding author, CEO, BEL Technology CO. Ltd., Seoul, South Korea (leeyj@beltec.co.kr)

*** Coauthor, Vice president, BEL Technology CO. Ltd., Seoul, South Korea (ohya@beltec.co.kr)

ABSTRACT

Purpose: Natural convection within the air layer of a building structure is an important factor affecting the thermal insulation performance of the building envelope. This study developed and verified a three-dimensional thermal flow solver to analyze natural convection and heat transfer between two heated solids. **Methods:** A numerical code capable of analyzing solid-fluid interaction was applied. The solid cubes were maintained at a constant temperature, and only the fluid domain around the solid interfaces was included in the calculation. The flow was assumed to be incompressible and laminar, and the SIMPLE method was used to resolve the pressure-velocity coupling in the momentum equations. **Results:** The results showed that natural convection was mainly governed by buoyancy-driven flow and the temperature difference between the solid surfaces and surrounding air. The lower cube showed relatively stable heat transfer under various arrangements, whereas the upper cube was strongly affected by the relative position of the two cubes. When the horizontal distance was small, a single integrated plume formed, restricting fluid inflow around the upper cube and reducing heat transfer. As the distance increased, the plumes separated, convective transport improved, and the heat transfer rate of the upper cube increased.

KEYWORD

자연대류
상호작용
육면체
수치해석

Natural Convection
Interference
Double Cube
Numerical Method

ACCEPTANCE INFO

Received Apr. 30, 2025

Final revision received Jul. 3, 2026

Accepted Jul. 9, 2026

© 2026. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

유체는 고체의 열에너지를 받아 주변으로 전달하는 좋은 매개 (medium)이지만 멈추어 있는 유체는 열에너지의 이동을 막는 좋은 단열재 역할을 하기도 한다. 그러므로 건축물의 외피 구성에 포함되어 있는 유체의 운동 상태는 구조체의 열성능에 중요 요소가 된다.

건축물 외피 구조체 내부의 공기층은 실내외 공조 조건에 따른 온도차에 의하여 자연대류가 발생되며, 일정 크기 이상의 공기층은 대류에 의한 열전달 비율이 높아 열유동 해석이 동반되어야 구조체의 열성능을 합리적으로 해석할 수 있다. 특히, 최근 건축물의 외피에 적용이 증가하고 있는 PV와 같이 공기층 내 국부적 표면 발열을 유발하는 구성물이 포함된 경우, 해당 공기층의 열유동 영향은 건물 구조체의 단열 성능뿐만 아니라 PV의 효율 판단에도 중요하다.

본 연구는 개발 중인 3차원 전열해석 프로그램[1]에 통합하기 위해 개발한 공기층 자연대류 열유동 솔버의 해석 결과를 분석, 검증하

는 것을 목적으로 하였다.

유체의 운동에너지는 외부 기기에 의해 공급받는 경우(강제대류, forced convection)와 그렇지 않은 경우(자연대류, natural convection)로 나누어진다. 자연대류는 팬과 같은 에너지 발생 장치 없이, 밀도 변화로 발생한 부력(buoyancy)이 대류를 만들어 에너지를 전달하게 된다[2]. 자연대류는 강제대류와 달리 회전 운동하는 기구가 없어 소음이 적고 건축, 기계, 원자력, 전자 분야에 다양하게 응용되며, 자연대류에 관한 연구는 주로 부력을 발생시키는 형상에 관하여 이루어지고 있다[3~8]. 일반적으로 건축분야에서 열유동 분석은 건축물 내부 거주 공간에 관해서 이루어지며, 자연대류는 주로 벽면의 온도를 일정하게 하고 닫힌 공간에 대하여 수행되고, 대부분 대공간 내에 벽체의 온도나 열전달에 의한 내부 유동 변화에 초점을 맞춰 수행된다.

이에 비하여 건축물의 구조체 내부에 포함되는 공기층과 같은 국소 부위에서의 자연 대류에 의한 열전달은 실험식에 근거한 유효열전도율 적용과 같이 개략적으로 분석하고 있다[9].

또한 국소 부위 공기층의 실제적인 자연 대류 메커니즘은 명확하게 밝혀지지 않은 상태이며, 규모, 구조, 위치의 차이로 인한 복잡도가 높아 열전달 해석에 적용하는데 어려움이 있고, 공기층 내부 3차

원 공간 상에 여러 개의 발열 조건이 반영되는 경우, 유동의 상호작용에 관한 기초적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 공기층 자연대류의 기초적인 연구를 위하여 표면에서 열을 발생시키는 두 물체 간의 거리 및 위치 변화에 따른 열적 상호작용에 관한 해석 결과의 분석을 수행하였다. 이를 위해 개발된 고체-유체 간(solid-fluid interaction)의 열전달 해석 코드[10,11]를 기반으로, 방열 및 냉각과 같이 열교환이 일어나는 시스템에서 고체-유체 간 상호작용에 의한 열에너지 전달 특성을 분석하였다.

본 연구에서 활용한 코드는 기 개발된 건축용 3차원 전열해석 프로그램에 통합하여 일정 범위 이상의 공기층에 대한 해석에 반영하고자 해석장에 대한 자체 해석 격자 생성 및 유동 해석이 가능한 코드로 구성되며, 고체-유체 간 열전달 해석을 통하여 기존 3차원 고체 전열해석 프로그램에 통합되도록 개발되었다.

1.2. 자연대류에 관한 수치적, 실험적 연구

고체 주변의 정체된 유체는 전도(conduction)을 통해 열에너지를 전달받고 이에 따라 유체의 온도는 올라가고 밀도는 낮아진다. 주변보다 낮은 밀도의 유체는 중력에 의한 부력이 발생하고 상승하는 자연대류(natural convection)에 의한 에너지 교환이 일어나게 된다. 고체 주변에는 부력과 점성이 동시에 작용하여 가속되며 고체로부터 멀어지면서 상승하는 속력이 줄어들게 된다. 에너지 교환을 목적으로 하는 열교환기가 아니어도 높은 온도의 고체 주변에서는 반드시 자연대류에 의한 열교환이 발생한다. 그러므로 대부분의 실제적인 문제에서는 한 개의 열원이 아니라 두 개 이상의 여러 개의 열원이 복합적으로 자연대류에 기여한다. 단일 열원인 경우와 다르게 여러 개의 열원이 존재하는 경우 상승하는 유체는 다른 열원 혹은 유체와 상호작용을 하며 한 개의 열원과는 다른 현상들을 보이게 된다[12].

자연대류에 관한 연구는 한 개 혹은 두 개로 이루어진 원형에 집중되어 있다[12~15]. Lieberman와 Gebhart[15]는 여러 개의 원형 기둥(wire)의 설치 각도와 간격에 따른 자연대류에 의한 열전달을 실험적인 방법으로 연구하였다. 실린더 주변의 간섭무늬와 플럼(plume)을 통하여 온도와 유동장을 관찰하였다. 원형기둥 간의 거리가 지름의 37.5배 떨어진 충분히 먼 경우라 할지라도 이들 간에 상호작용이 일어나는 것을 관찰하였다. 플럼의 형태는 원형 기둥 간의 거리와 각도에 영향을 받으며 특정 거리에서는 각각의 실린더에서 발생하는 플럼이 아니라 하나의 큰 플럼이 발생하는 것을 확인하였다. 또 최대 Nu수는 원형 기둥 간격이 지름의 75배였으며 설치 각도가 60도일 때 발생한다고 하였다.

원형 형상이 아닌 공동에 관한 연구로 Lee와 Lee[10]는 건식 외장재 시스템(Unitary Envelope System)에 적용할 수 있는 유체와 고체가 공존하는 구성부에 열전달 해석을 수행할 수 있는 유한체적법을 기반으로 프로그램을 개발하였다. 이를 중공층(air cavity)에 적용하여 기울기에 따른 내부 유동과 열전달에 관하여 연구를 수행하였다. 중공층의 형상 때문에 양의 방향으로 기울어지는 경우 급격한 유속과 열전달이 감소하는 것을 관찰하였다. 그러나 각도가 10도 이내로 작은 경우 열전달은 거의 영향을 받지 않는다고 하였다.

기술자가 현장에서 마주하는 열원의 형태는 원형보다는 제작이나 설치의 관점에서 사각형(2차원)이거나 육면체(3차원)인 경우

가 많이 있다. 이러한 육면체의 연구는 제한적으로 이루어졌다 [11,16,17]. Cha와 Cha[17]는 일정한 온도로 유지되는 2개의 육면체가 중심이 엇갈린 상태로 $H/\sqrt{2}=1.25$ 떨어져 있을 때 이들 간의 열전달을 연구하였다. 결과를 실험(홀로그래프 간섭무늬)과 비교하였다. 각 면의 평균 Nu수를 단일 육면체와 비교하고 육면체 주변의 온도와 속도분포를 표시하였으나 자세한 물리적인 현상 특히 상호작용에 관해서는 고찰하지는 않았다. 가열된 두 개의 육면체는 상호작용을 하게 되면 이에 따라 복잡한 유동 현상과 온도 분포를 하게 되어 열전달이 변하게 된다. 특히 육면체가 수평이나 수직으로 놓이지 않고 엇갈린 형태는 많은 공학적인 문제에서 발생하며 중요한 위치를 차지한다.

2. 수치해석의 이론과 검증

2.1. 방법론

본 연구에서 사용한 수치모델의 적정성을 확인하기 위하여 실험 결과와 비교하였으며 격자 개수에 따른 의존성을 확인하였다. 검증을 위한 모델은 1개의 육면체를 가진 경우에 관하여 수행하였다. 이후 본 연구의 대상이 되는 2개의 육면체를 가진 모델에 관하여 격자 의존성을 추가로 수행하여 연구에 적절한 격자의 분포와 개수를 결정하였다. 유체는 비압축성의 공기로 가정하였으며 부력은 Boussinesq 수식을 사용하였다. 1개의 육면체와 다르게 2개인 경우 상승하는 기류와 육면체가 서로 작용하게 되므로 육면체 간 거리뿐 아니라 높이에 대해서도 많은 영향을 받게 된다. 그러므로 본 연구에서는 두 육면체의 거리와 높이에 대하여 열전달을 비교하여 열전달의 변화를 상세히 고찰하였다. 본 연구에서 고려한 유체는 공기로 물성치는 다음과 같다. Table 1.에서 ρ , C_p , k , g , β , α , μ , L , ΔT , Pr는 밀도, 정압비열, 열전도계수, 중력가속도, 열팽창계수, 열확산계수, 점성계수, 참고 길이(육면체의 한면의 길이), 육면체와 유체의 온도차, Prandtl수를 나타낸다.

2.2. 전산역학 모델: 유동방정식과 유한체적법

유체의 속력은 낮아 압축되지 않는다고 가정하여 비압축성, 층류, 뉴턴유체로 생각하였으며 다음의 연속, N-S, 에너지 방정식을 사용하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} = \rho \vec{g} - \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}_{ij} \quad (\text{Eq. 2})$$

Table 1. Properties of fluid

Properties	Values	Properties	Values
$\rho [kg/m^3]$	1.20	$\alpha [m^2/s]$	2.14×10^{-5}
$C_p [J/kg \cdot K]$	1.00×10^3	$\mu [kg/m \cdot s]$	1.82×10^{-5}
$k [W/m \cdot K]$	2.57×10^{-2}	$L [m]$	0.04
$g [m/s^2]$	9.81	$\Delta T [-]$	1.60
$\beta [K^{-1}]$	3.43×10^{-3}	Pr[-]	0.71

$$\frac{d}{dt}(\rho c_p T) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi + \dot{s} \quad (\text{Eq. 3})$$

t 시간(sec), ρ 밀도, $\vec{v}$ 속도, $\vec{g}$ 중력가속도, p 압력, $\vec{\tau}_{i,j}$ 2차응력텐서, T 온도, c_p 정압비열, k 열전도계수, Φ 점성소산항, $\dot{s}$ 에너지 생성항을 나타낸다.

본 연구에서는 비압축성 유체로 에너지 방정식은 온도로 표현하였다. 에너지 방정식은 여러 가지 형태가 가능하지만, 온도(T)로 나타내면 모든 항이 미지수 온도로 나타나 편리하다. 비압축인 경우 식 (1)의 시간 항이 없어지므로 이를 극복하기 위하여 전처리(preconditioning) [18] 혹은 가상압축성(artificial compressibility) [19]을 사용할 수 있지만 본 연구에서는 SIMPLE방법[20]을 사용하였으며 차분화는 보존식에 적합한 유한체적법(FVM, finite volume method)을 사용하였다. 부력은 Boussinesq 근사(Boussinesq approximation) [21]를 사용하였다. 수치적 방법에 대한 자세한 내용은 참고 문헌[10]을 참고하였다.

2.3. 수치모델 검증(Validation)

자연대류에 있어서 부력에 의한 상승효과를 적절하게 묘사하는지 확인하기 위하여 계산 영역에 한 개의 일정한 온도로 유지되는 고체가 있는 유동을 계산하고 같은 형상에 대하여 실험[13]과 계산[16]을 수행한 연구 결과와 비교하였다. 계산 영역은 Fig. 1.과 같다. 중력은 $-z$ 방향으로 작용하며 윗면과 아랫면은 유체가 부력에 의해 자연스럽

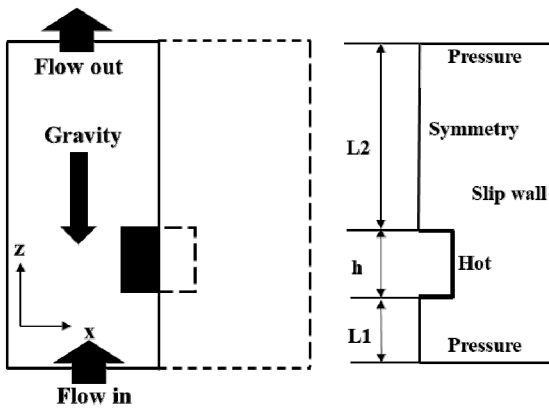


Fig. 1. Computational domain and boundary conditions around isothermal cube

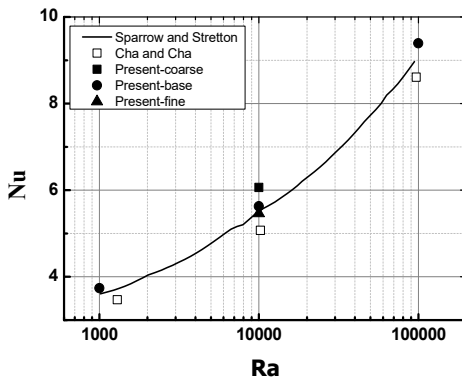


Fig. 2. Comparison of Nu number according to Ra number

게 들어오고 나갈 수 있도록 압력 경계(pressure boundary)를 사용하였다. 계산 영역은 $h=0.04\text{m}$, $L1=0.1\text{m}$, $L2=0.46\text{m}$ 을 사용하였으며, 유동 공간의 대칭성을 고려하여 전체 영역의 1/4만을 사용하였다.

Sparrow and Stretton[6]의 실험과 Cha and Cha[16]의 수치 계산한 결과를 Fig. 2.에 표시하였다. 무차원 수인 Ra수(Rayleigh number)와 Nu 수(average nusselt number)는 다음과 같다.

$$Ra = \frac{g\beta L^3 (T_h - T_c)}{\nu\alpha} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$Nu = \frac{1}{L(T_h - T_c)} \int_0^L \frac{\Delta T}{\Delta n} \bigg|_{wall} dS \quad (\text{Eq. 5})$$

여기서 g , β , ν , α 는 중력가속도, 열팽창계수, 동점성계수, 열확산계수를 나타낸다. L , T_h , T_c , Δn 은 대표길이, 고온 면의 온도, 저온 면의 온도, 경계면에서 수직거리를 나타낸다. Nu수는 평균 Nu수를 나타낸다. Nu수는 벽면에서 열전달량에 대한 전도의 비율로 자연대류에서는 대류에 의해 표면을 통해 나가는 전열량이 된다. 즉 대류에 의해 어느 정도 높은 열전달이 이루어졌는지를 나타낸 척도가 된다.

검증을 위하여 사용한 격자의 수는 약 1.6만, 3.1만, 5.6만 개로 바꾸어 가며 계산을 수행하였으며 이에 따라 해가 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 또한 본 연구의 결과가 전체적으로 Sparrow and Stretton의 실험과 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

3. 계산 결과 및 분석

3.1. 수치해석

계산 영역은 Fig. 3.에 나타내었으며, y 방향으로 대칭성을 고려하여 계산 영역의 반만을 계산 영역에 포함했고 대칭면은 대칭 조건을 사용하였다. 본 연구에서 사용한 코드는 유체와 고체를 동시에 해석할 수 있도록 개발[10]되었으나 고체(cube, 육면체)가 일정한 온도로 고정되었다고 생각하여 고체 부분은 계산에서 제외하고 유체 부분만을 계산하였다. 계산 영역의 상부와 하부는 내부의 육면체에 의해 부력이 발생하고 이에 따라 유입과 유출이 일어날 수 있도록 압력

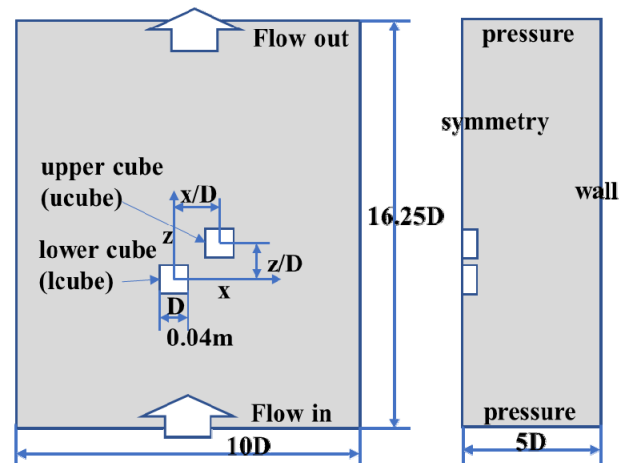


Fig. 3. Computational domain and Boundary

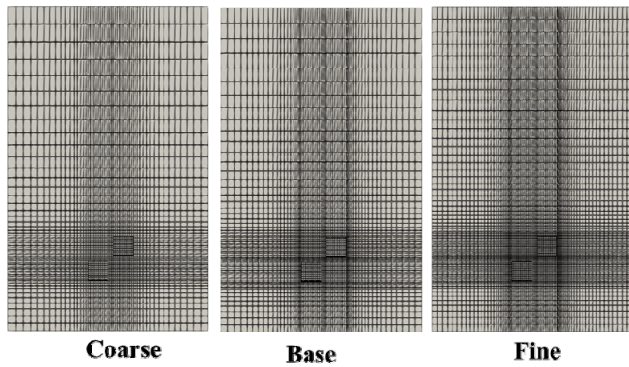


Fig. 4. Non-uniform distribution grid for mesh dependency test

Table 2. Case names according to distance between two cubes

x/D \ z/D	0.00	1.00	1.25	1.50	1.75	0.00-1.75
0.00	x	x	c0002	c0003	c0004	c000x
1.00	x	x	c0102	c0103	c0104	c010x
1.25	c0200	c0201	c0202	c0203	c0204	c020x
1.50	c0300	c0301	c0302	c0303	c0304	c030x
0.00-1.50	c0x00	c0x01	c0x02	c0x03	c0x04	

조건을 사용하였다. 그 외의 영역은 육면체와 상호작용이 적다고 생각하여 또 유동의 안정성을 고려하여 일정한 온도로 유지되는 벽면 (wall, slip)조건을 사용하였다.

격자는 Fig. 4와 같이 계산 효율을 높이기 위하여 육면체 주변은 조밀한 격자를 사용하였으며 그 외의 영역은 비교적 큰 격자를 사용하였다. 격자의 개수는 약 62k (coarse), 98k (base), 180k개(fine)를 사용하여 격자 의존성(mesh dependency test)을 확인하였다. 유체는 공기의 물성을 사용하였으며 $Ra = 1 \times 10^4$ 이다. 조밀한 격자(fine mesh)에 대한 상대오차는 1.71% (coarse), 0.74% (base)를 나타냈다. 계산 시간은 single cpu (Xeon® W-2133, 3.60GHz)로 약 2시간 소요되었으며 이후 계산은 모두 base와 같은 격자 분포를 이용하여 진행하였다.

수치해석을 수행한 16가지 경우에 대하여 설명의 편의를 위해 이름을 붙였으며 Table 2.에 나타내었다. 왼쪽 육면체(lower cube, lcube)를 원점으로 생각하고 오른쪽 육면체(upper cube, ucube)의 위치에 따라 이름을 나타낸 것이며, “x”로 표시한 것은 형상이 서로 겹쳐 계산에서 제외된 경우이며 “c000x”와 같이 표시한 것은 $x/D=0.00$ 인 모든 경우를 나타낸다.

3.2. 결과 및 분석

Fig. 5는 두 육면체의 Nu값을 단일 육면체(single cube)의 값과 함께 나타내었다. 대체로 x/D , z/D 가 커짐에 따라 Nu값이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 육면체 간에 거리가 멀어지면 간섭이 감소하고 단일 육면체와 비슷해짐을 의미한다. 유동을 유도하는 힘은 고체 주위의 뜨거운 공기가 부력에 의해 올라가면서 입구로 새로운 찬 유체를 흡입하게 된다. 입구로 들어온 유체는 낮은 온도의 유체로 열전달이 활발하게 일어난다. 반면에 고체 주위의 공기는 부력에 의해 가속되지만, 유체의 온도가 높아 열전달에는 불리하다. 입구로 들어오

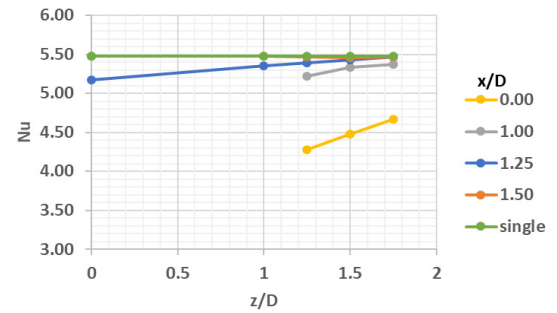


Fig. 5. Nu variations according to distance between two cubes

는 차가운 유체에 직접 노출되는 lcube는 x/D , z/D 변화에 열전달 (Nu)의 변화가 작지만, lcube를 거쳐온 유체에 주로 노출되는 ucube는 열전달의 변화가 매우 크다. 열전달에 영향을 주는 중요한 요소는 부력에 의해 가속된 유체에 의한 강제대류(forced convection)와 온도차(temperature difference)[2]로 생각할 수 있다.

$x/D=0$ 는 두 개의 육면체가 수직(vertical alignment)으로 놓이는 경우로 다른 경우(horizontal, staggered alignment)에 비하여 열전달이 매우 작은 것을 알 수 있다. 이는 lcube로부터 올라오는 유체는 이미 충분히 가열된 뜨거운 유체로 ucube와 온도 차이가 작아서 대류에 의한 효과가 감소한다. 다른 한편 $x/D=1.5$ 인 경우를 보면 단일 육면체와 비슷한 Nu값을 가지고 있다. 이는 $Ra=1e4$ 의 경우, 육면체 사이의 거리가 1.5D 정도 되면 두 육면체 사이로, 외부로부터 들어오는 차가운 유체가 통과할 만한 간격을 가지고 있어 두 육면체는 두 개의 단일 육면체가 있는 것과 비슷한 효과를 가진다. 이후에 보겠지만 흥미롭게도 이는 모든 면에서 상호 간에 영향이 없는 것이 아니라 서로 상쇄되는 상호작용에 의한 것이다.

$x/D=1$ 의 경우에는 ucube 왼쪽 면과 lcube의 오른쪽 면이 서로 수직선 위에 있어 lcube가 유동을 방해하므로 ucube로 올라오는 유동이 원활하지 않다. 그러므로 엇갈린 경우보다는 낮은 Nu값을 나타낸다. 이에 반하여 $x/D=1.5$, $z/D=0$ 인 경우 $x/D=1.25$ 와 비슷한 배치지만 열전달과 유동은 상당히 다른 양상을 보인다. 두 육면체 간에 거리가 충분히 확보되어 상호작용이 감소하고 두 개의 육면체의 열분포는 독립된 단일 육면체에 가까운 양상을 보였다. 특히하게 $x/D=1.5$ 에서 $z/D=1.5$ 가 오히려 $z/D=1.75$ 보다 약간 감소하는 경향을 보인다. 또 $x/D=1.25$ 도 $z/D=1.75$ 에서 다른 경우보다 더 큰 값을 보인다. 열전달 현상을 lcube와 ucube로 나누어 보면 더 분명하게 확인할 수 있다.

ucube와 lcube의 위치에 따른 Nu값을 나누어 Fig. 6.에 나타내었다. lcube는 수직($z/D=0$)인 경우와 수평($x/D=0$)을 제외하고 거의 단일 육면체와 비슷한 값을 나타낸다. 이에 반하여 ucube의 경우는 $x/D=1.5$ 인 경우를 제외하고 lcube로부터 올라오는 뜨거운 플룸(plume)으로 인하여 매우 낮은 값을 나타낸다. lcube의 경우도 $x/D=0$ 인 경우는 다른 경우에 비하여 낮은 값을 보인다. 이는 lcube의 상부와 ucube의 아래면 사이에 정체 공간이 발생하고 이 영역에서 열전달이 급격히 감소하기 때문이다. 두 육면체의 거리가 멀어짐 (z/D)에 따라 정체 공간으로 유입되는 유체가 증가하면서 열전달이 개선되는 것을 확인할 수 있다. 또 ucube는 전체가 lcube에서 올라

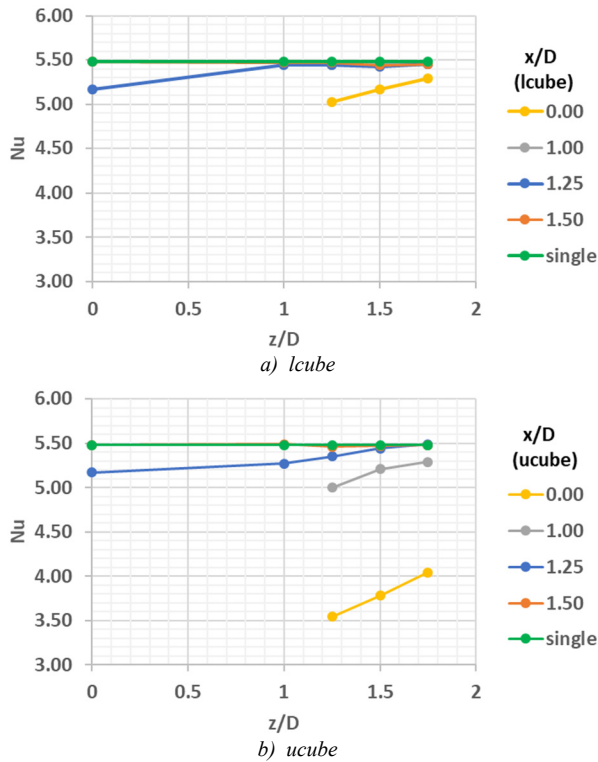


Fig. 6. Comparison of Nu

오는 고온의 플럼 속에 놓이게 되므로 모든 면에서 열전달이 감소하기 때문에 열전달이 매우 낮아진다. 이에 반하여 $x/D=1.0$ 의 경우는 상대적으로 열전달이 크게 나타난다. 입구로 들어온 가열되지 않은 찬 유체에 부분적으로 노출되기 때문에 $x/D=0$ 에 비하여 큰 열전달을 확인할 수 있다. $x/D=1.25$ 인 *ucube*의 경우 높이에 따라 선형적으로 Nu수가 증가하고 있다. $x/D=1.5$ 에서는 거의 모든 높이에서 단일 육면체와 비슷한 값을 나타낸다.

$x/D=1$ 에서 두 육면체의 합이 단일 육면체보다 작은 Nu를 가지나 *ucube*과 *lcube*으로 나누어 보면 Fig. 6. a)에 보는 것처럼, $z/D=0$ 인 경우를 제외하고 $x/D \geq 1$ 에서 *lcube*는 거의 단일 육면체와 비슷한 Nu를 가지는 것을 볼 수 있다. 비압축성 유동의 특성상 모든 방향으로 교란이 전파되지만, 주 유동의 방향이 +z 방향이므로 *ucube*가 *lcube*에 미치는 영향은 미미하다고 생각할 수 있다. 또 두 육면체가 나란히 놓이는 $x/D=1.25, z/D=0$ 인 육면체는 거리가 가까워 마치 1개의 긴 육면체와 비슷한 효과가 있으며 Nu가 급격히 떨어지는 것을 볼 수 있다. 그러나 $x/D=1.5, z/D=0$ 의 경우는 $x/D=1.25$ 와 다르게 두 개의 단일 육면체에 가까운 열전달을 보인다. $x/D=1.5$ 에서는 높이에 무관하게 단일 육면체와 비슷한 Nu값을 보인다.

$x/D=1.25$ 의 경우, *lcube*는 높이가 높아짐에 따라 미미하긴 하지만 *lcube*와 *ucube*의 Nu수가 역전되는 특이한 현상을 보인다. 이러한 Nu의 역전 현상은 $x/D=1.5$ 에서도 나타난다. 이러한 현상을 확인하기 위하여 Fig. 7.에 $x/D=1.25$ 의 Nu수를 확대하여 나타내었다. $z/D=0$ 은 거리가 가까워 상호작용으로 인해 낮은 값을 보고 있으나 $z/D=1.5, 1.75$ 에서 *ucube*가 급격히 열전달이 증가하며 *lcube*보다 더 큰 값을 보인다. *ucube*의 열전달은 *lcube*의 강제대류와 상승

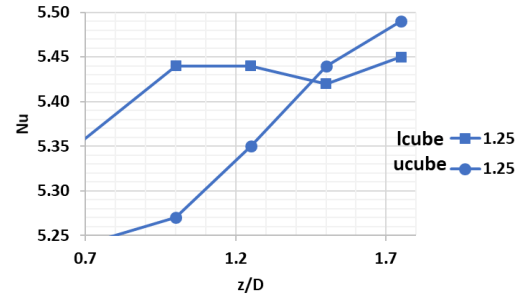


Fig. 7. Nu of $x/d=1.25$ in detail between $z/d=1.0$ to 1.75

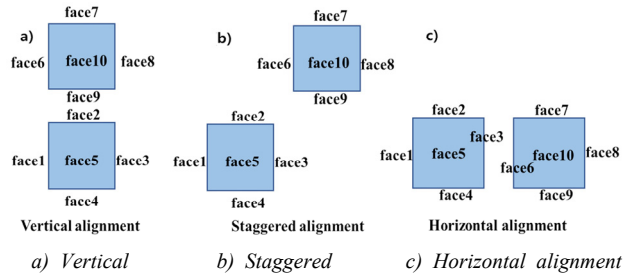


Fig. 8. Face names of cubes

하는 유체의 온도에 의해 영향을 받는다. 아래에서 올라오는 유체는 강제대류와 비슷한 효과를 나타내나 유체와 육면체 간의 온도 차가 감소하게 되므로 열전달은 감소하는 효과를 가진다[12,13]. Sparrow와 Niethammer[13]은 단면이 육면체가 아닌 이차원 원형 단면에 관하여 연구를 수행하였다. 원형 단면인 경우는 표면을 따라 흐르는 유동으로 인해 원의 상부에서 플럼(plume)이 발생하나 본 연구의 사각 단면은 유동 박리가 양쪽 모서리에서 발생하므로 원형 단면과는 다른 특성을 보인다. 육면체의 경우 영향을 많이 받는 부분은 *lcube*는 오른쪽과 상부면, *ucube*는 왼쪽과 아랫면이다.

높이에 따른 *lcube*의 급격한 Nu수의 증가는 육면체 사이의 거리가 멀어지면서 아래 입구로 들어온 낮은 온도의 유체가 육면체 사이를 통과해 *ucube*의 왼쪽 면을 통과하게 되므로 강제대류에 의한 효과가 크고 온도 또한 *ucube*의 아랫면으로 상승하는 기류로 인해 낮은 편이다. 즉 *ucube*의 아랫면과 왼쪽 면의 강제대류 효과가 증가하면서 높이에 따라 지속적으로 열전달이 증가한다. $z/D=1.5$ 에서 *lcube*의 감소 현상은 *ucube*의 영향이라기보다는 *lcube*의 옆면을 통과하면서 온도가 올라간 유체가 윗면에 영향을 주었기 때문이다.

자세한 열전달 분석을 위해 면 단위로 Nu를 확인하였으며 각 면의 이름은 Fig. 8.에, Nu수는 Fig. 9.에 나타내었다. 수직으로 놓인 두 육면체(c000x, 수직)는 거리가 가까워짐에 따라 열전도가 급격히 낮아진다(Fig. 9. a), Fig. 8. a)). 기존 연구의 단일 원형 단면과 비교해 보면 아래 원형 단면의 유동 박리는 상부 정점 근방에서 발생하며 두 원형 사이의 정체 공간은 매우 작아 주변의 유체가 잘 유입된다. 그러므로 아래 원형 단면은 위 원형과 거리에 무관하게 거의 일정한 값을 보이고 상부 원형만 거리에 영향을 받는다. 원형과 다르게 나란한 육면체는 윗면의 양 끝단(corner)에서 유동 박리가 생기고 두 육면체 사이에는 거리에 무관하게 정체 공간이 발생한다. 정체 공간 내에 있는 *lcube*는 윗면(face2)과 *ucube*의 아랫면(face9)은 $z/D=1.25$

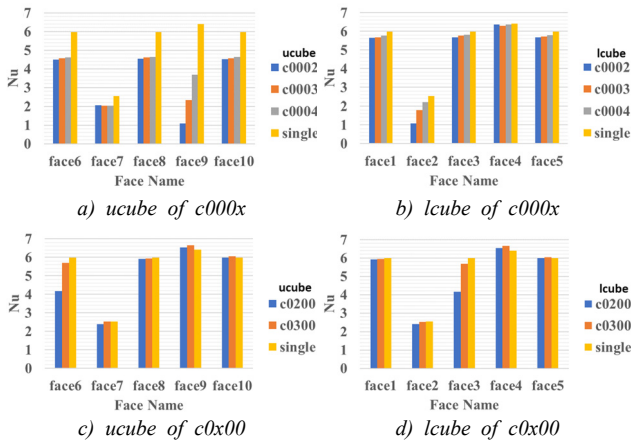


Fig. 9. Nu on each side of horizontal and vertical alignment

일 때 비슷한 성향을 보이거나 입구로부터 들어온 찬 유체의 영향을 좀 더 받는 ucube의 아랫면은 높이에 따라 급격하게 열전도가 높아진다. ucube의 상면(face7)은 높이에 무관하게 폴럼 내에 항상 존재하기 때문에 높이에 따라 영향을 받지 않는다(Fig. 8. a), face7).

c0x00의 경우 수평(horizontal alignment)으로 두 개의 육면체가 나란히 놓인 경우로 $x/D=1.5$ 에서 평균적인 열전달(Nu)은 단일 육면체와 비슷한 값을 보인다(Fig. 5.). 이것은 $x/D=1.5$ 에서 완전히 두 개의 육면체가 영향을 미치지 않는 것이 아니라는 것을 Fig. 9. c)와 Fig. 9. d)에서 확인할 수 있다. 두 육면체 간의 영향은 줄어들었으나 여전히 영향을 주고 있으며 열전달에 있어 양의 효과와 부의 효과가 서로 상쇄되어 단일 육면체와 비슷한 값을 가지게 된다. 육면체의 아래 면(Fig. 8. c)의 face4, face9)은 입구로 들어오는 찬 유체에 의한 양(positive)의 효과를 가지며 마주 보는 면(Fig. 8. c)의 face3, face6)은 면으로부터 전달된 열에 의해 유체의 온도가 올라가 부(negative)의 효과를 가진다. 거리가 조금 더 가까운 $x/D=1.25$ 의 경우에는 공간이 충분하지 않아 유량이 감소하고 통과하는 유체의 온도는 상대적으로 높아 열전달이 낮아지게 된다. 가장 영향을 적게 받는 face5, face10, face8, face1)은 단일 육면체와 같은 값을 보인다. $x/D=1.25$ 의 경우 두 육면체 간의 거리가 가까워 사이로 지나가는 유량이 충분하지 않아 한 개의 긴 육면체에 가까운 온도분포를 보이지만 $x/D=1.5$ 의 경우, 두 육면체 사이의 공간이 커 충분한 양의 유량이 통과하게 되며 두 개의 육면체에 가까운 온도 분포를 나타낸다.

Fig. 10.은 엇갈린 육면체에 대한 각 면에서의 Nu를 나타낸다. 대체로 ucube의 아랫면(face9)은 다른 면에 비하여 lcube에서 발생한 폴럼의 영향을 직접적으로 받는 부분이다. ucube의 아래 면(face9)은 lcube에 의해 열전달이 향상되기도 하고 줄어들기도 한다. ucube의 왼쪽 면인 face6은 상승하는 유체의 영향을 받는 면으로 Fig. 10. a), Fig. 10. c), Fig. 10. e)에 보듯이 거리가 멀어짐에 따라 강제대류 효과에 의한 열전달이 증가하고 있다. 그러나 여전히 단일 육면체보다 작은 값을 보이는데 이는 lcube에서 데워진 유체에 의한 온도 차 효과 때문이다. 모든 엇갈린 형태의 육면체는 ucube의 좌측면(face6)은 여러 면 중 높이에 따라 Nu의 변화가 가장 큰 면이다. 특히 Fig. 10. a)에서 $x/D=1.25$ 에서 face6에서 가장 빠르게 Nu수가 증가하는 것을 확인할 수 있다. ucube의 높이에 따라 lcube에서 올

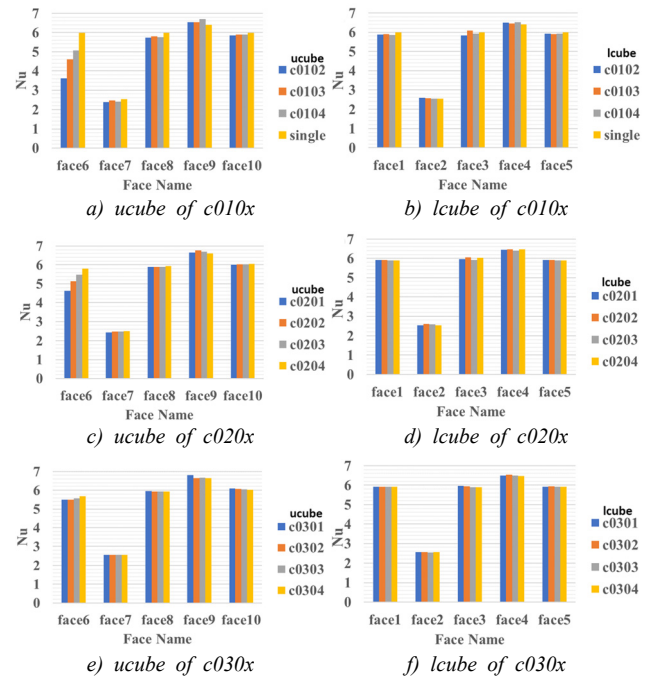


Fig. 10. Nu of staggered alignment

라오는 폴럼과 입구로 들어온 두 유체의 영향을 직접 받기 때문이다. 이 면은 x/D 가 가까울수록 Nu값이 작고 변화 폭이 크다. lcube의 같은 면인 face1은 폴럼에 노출되지 않기 때문에 거의 변화가 없고 단일 육면체와 비슷한 열전달을 보인다.

c010x에서 ucube와 lcube의 좁은 면을 지나가게 되므로 아래면(face9)에서 강제대류 효과로 인해 높이에 따라 열전달이 증가하는 것을 볼 수 있다(Fig. 10. a)와 Fig. 10. b)). 이러한 경향은 두 육면체 사이의 수평거리($x/D=1.25, 1.5$)가 멀어질수록 감소한다. lcube의 face3은 c0103에서 가장 큰 값을 나타내고 있다. c010x의 경우 두 육면체의 거리가 가까워 강제대류 효과는 증가하고 유동의 방향이 변하게 되어 face4와 face2은 미미하게 증가하고 face3는 감소하는 경향을 보인다.

Fig. 10. e)와 Fig. 10. f)에서 $x/D=1.5$ 의 경우 전체적으로 $x/D=1.0, 1.25$ 보다 각 면에서 단일 육면체와 비슷한 결과를 보인다. face4와 face3을 보면 단일 육면체의 같은 면보다 face4는 약간 큰 값을 반대로 face3는 약간 작은 값을 가지면서 이 두 값은 서로 상쇄되어 전체적으로 단일 육면체와 비슷한 값을 가진다. Fig. 5.에서 평균적인 Nu은 단일 육면체와 비슷한데 두 육면체가 떨어져서 서로 영향을 주지 않는 것으로 생각할 수 있으나 실제로는 영향을 미치고 있으며 face3와 face4의 효과가 서로 상쇄되어 전체적으로는 단일 육면체와 비슷한 Nu값을 보인다. 특히 face6은 lcube에서 올라오는 폴럼의 영향 내에 있어 값이 비교적 작은 값을 나타내며 가장 높은 경우(c0304, $z/D=1.75$)에도 약간 작은 값을 나타내고 있다. 또 높이가 높아짐에 따라 값이 증가하고 있는 것을 알 수 있다. Ucube의 아랫면(face9)은 강제대류의 효과가 커 lcube와 가까이 있는 경우 큰 값을 보인다.

육면체가 수직, 수평으로 놓이는 경우의 온도 분포를 Fig. 11.에 나타내었다. 먼저 수직인 두 경우는 중심과 중심의 거리가

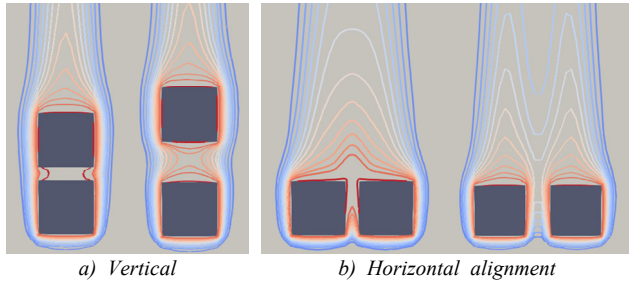


Fig. 11. Temperature contours

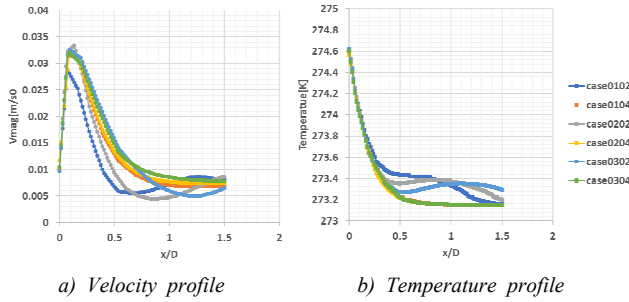


Fig. 12. a) Velocity and b) temperature profiles along the x-coordinate at the upper-right corner of the lcube

$z/D=1.25, 1.75$ 로 두 육면체의 공간 간격은 각각 $0.25D, 0.5D$ 이다. 박리는 lcube 상부의 두 모서리에서 발생하기 때문에 ucube와 lcube 사이의 공간은 주변의 찬 유체가 유입되기 어려워 대류 효과는 거의 없다. 거리가 떨어진 $z/D=1.75$ 의 경우는 외부로부터 옆면을 통해 유입되는 유체가 있어 정체에 의한 효과가 다소 줄어들고 열전달이 향상된다. 이런 점에서 기존 연구의 원형과는 확연한 차이를 보인다. Fig. 5와 Fig. 6에서 높이에 따른 급격한 열전달의 증가는 이러한 원인 때문이다. 또 수평인 경우는 $x/D=1.25, 1.5$ 의 경우를 Fig. 11. b)에 나타내었다. $x/D=1.25$ 의 경우 두 육면체가 마주 보는 면 사이 벤츄리 효과에 의해 최고 속도(peak velocity)은 0.031m/s 이며, $x/D=1.5$ 는 0.03m/s 로 약간 작은 값을 보이지만 두 면 사이의 거리가 가까워 경계층이 서로 연결되어 있다. 두 육면체 사이로 들어온 유체는 경계층의 열전달로 인하여 가열이 되고 육면체를 빠져나가기 전에 높은 온도가 된다. 이에 따라 열전달이 급격하게 감소한다. 또한 2개의 육면체는 서로 연결된 한 개의 육면체와 같은 온도 분포를 보인다. 그래서 풀럼의 형태도 두 개가 아니라 마치 한 개의 풀럼처럼 보인다. 그러나 $x/D=1.5$ 의 경우는 육면체 사이로 들어온 유체는 충분한 공간이 있어 유체가 가열되기 전에 빠져나가며 온도 분포를 보면 약간의 상호작용이 있지만 별개의 두 개의 육면체로 작용하는 것을 확인할 수 있다. 풀럼도 선명하지는 않지만, 두 개의 풀럼 형태를 보인다.

lcube는 ucube가 직접적으로 영향을 주는 수평, 수직(c000x, c0x00) 형태를 제외하고는 단일 육면체와 비슷한 Nu 값을 갖는다. 그러나 ucube는 lcube에 의해 생성된 풀럼의 영향을 받게 되므로 ucube로 들어가는 유체의 영향을 보기 위하여 lcube의 오른쪽 상단 모서리에서 x축을 따라 온도와 속도를 Fig. 12.에 나타내었다. $x/D=0$ 는 lcube의 오른쪽 상단 모서리를 의미한다. 우선 Fig. 12. a)의 속도분포를 보면 점성과 부력이 모두 영향을 주는 영역으로, 선형

Table 3. Velocity and thermal deviation (ΔT) from ambient at the peak-velocity and ambient-temperature locations

Case	z/D	at $v_{\max}$			at $T_{\text{environment}}$		
		x/D [-]	Vel. [m/s]	Tem. [K]	x/D [-]	Vel. [m/s]	Tem. [K]
c0102		0.69	0.0287	1.01	16.80	0.00736	0.00
c0204		0.79	0.0316	0.95	10.00	0.00692	0.00
c0202		1.05	0.0330	0.19	20.25	0.00740	0.00
c0204		1.05	0.0319	0.81	10.50	0.00742	0.00
c0302		0.79	0.0326	0.93	21.00	0.00827	0.00
c0304		0.83	0.0320	0.90	11.83	0.00796	0.00

으로 가속되는 구간과 이후 온도 차가 낮아지면서 부력의 효과가 감소하고 속도가 감소하는 구간으로 나누어진다. 이 선형 구간의 온도는 급격하게 감소한다. 또 ucube와 lcube사이 거리가 가까운 c0x02의 경우 ucube의 영향을 받아 속도가 감소와 증가하는 현상을 볼 수 있으며 온도도 비슷한 감소와 증가하는 현상을 볼 수 있다. 속도와 온도 $z/D=1.25$ 와 $z/D=1.75$ 인 경우 비슷한 특성을 보인다. 세부적인 값의 비교를 위해 Table 3.에는 육면체와의 상대적 거리에 따른 최대 속도 발생 위치와 주변 온도에 도달하는 지점에서의 속도 및 온도 차이를 제시하였다.

c0102, c0202, c0302를 비교해 보면 3가지 모두 $z/D=1.25$ 이지만 두 육면체 사이의 거리는 각각 $1.60D, 1.77D, 1.95D$ 이다. c0202에서 가장 큰 정점 속도(peak velocity)를 나타내며 이는 두 육면체 사이의 벤츄리 효과(Venturi effect)에 의한 것으로 생각된다. 벤츄리 효과는 ucube의 아래면(Fig. 8. b), face9)의 열전달을 증가시킨다. 벤츄리 효과로 인해 주변의 유체가 모여들고 유량 증가는 Nu증가를 가져온다. Fig. 12.에서 실제 ucube에 영향을 주는 영역은 c010x의 경우는 $x/D \geq 0$, c020x의 경우 $x/D \geq 0.25$, c030x의 경우 $x/D \geq 0.5$ 로 각각 생각할 수 있다. c0102에 대해서 생각해 보면 속도는 비교적 높은 편으로 유리하나 육면체 사이의 공간이 적어 유량이 적고 유체의 온도가 높아 매우 불리하다. c0304의 경우 c010x와 반대의 경향을 보이며 속도와 온도가 다른 경우에 비하여 낮다. 온도는 열전달에 유리하지만, 유속이 낮아 대류 효과가 감소한다. c0204의 경우, 속력은 c0104와 c0304의 중간 정도의 크기를 가지며 온도는 c0304에 가까운 분포를 보인다. 이는 Fig. 7.과 같은 $z/D=1.75$ 에서의 Nu의 역전을 가져온 원인으로 생각된다. 즉 적절한 강제대류와 낮은 온도로 오히려 c0304보다 더 높은 열전달을 보인다.

4. 결론

건축물의 구조체 내 공기층에 두 개의 열원이 존재할 때 이들의 거리에 따른 자연대류 현상과 상호작용에 관하여 개발된 열유동 코드를 활용하여 수치적 연구를 수행하였다. 건축물의 외피 내부에 다양한 열 발생원이 존재하면, 이러한 열원 사이의 상호작용은 성능에 큰 영향을 미친다. 두 개의 육면체는 기존 연구에서 수행한 원형과는 다르게 유동 박리가 육면체의 상부 모서리 두 군데에서 발생하게 되므로 상호작용으로 ucube 뿐 아니라 lcube도 거리에 따라 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 상호작용은 강제대류와 온도 차를 이용하여 설명이 가능하였다. 다만 이러한 상호작용은 원형과 다르

게 수직으로 놓이는 경우 거리에 민감하게 증가하였으나 그 값의 크기가 매우 작았다. 수평으로 놓이는 경우는 두 육면체의 중심 거리가 1.25D인 경우와 1.5D인 경우 다르게 나타났으며 1.25D의 한 개의 큰 풀림을 형성하는 반면에 1.5D의 경우는 상호 영향이 감소하고 두 개의 풀림을 형성하였다. 이는 서로 간의 영향이 없는 것을 의미하는 것은 아니며 이는 양(+)과 부(-) 효과의 상호작용으로 인한 상쇄 현상으로 해석된다. 엇갈린 형태의 육면체는 강제대류와 온도 차에 의한 효과가 크게 나타났으며 $x/D=1.25$, $z/D=1.75$ 에서 $ucube$ 와 $lcube$ 의 열전달이 서로 역전되는 현상을 관찰할 수 있었다. 상호작용은 열에너지 전달체계에서 중요한 역할을 할 것으로 판단되며, 해당 현상에 대하여 개발된 코드가 타당하게 영향을 해석할 수 있음을 확인하였다. 또한 본 해석을 통해 제한된 공간에서 다중 열원이 충분히 거리를 두지 않더라도 엇갈린 배열을 적용할 경우, 상승기류인 대류에 의한 열전달이 발생하고 이에 따라 대류에 의한 효과가 강화되는 것을 확인하였다. 향후 공기층의 규모, 위치, 다중 열원간 거리 및 가로-세로 비율 변수 등을 체계적으로 분석하여 공기층의 열전달 특성에 대한 지속적인 연구를 수행할 필요가 있으며, 개발된 해석 기능을 통합하여 건물 외피 전체의 열성능에서 공기층의 자연대류가 미치는 영향에 대한 정량적 연구를 수행하고자 한다.

Acknowledgement

본 연구는 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(20202020800030, 제로에너지건축물 구현을 위한 스마트 외장재·설비 융복합 기술개발 및 성능평가 체계 구축, 실증)으로 이루어졌습니다.

References

- [1] 이용준, [특집] 건물의 결로 방지 성능 평가를 위한 국산 3차원 열전달 해석 프로그램의 개발, 건축(대한건축학회지), 제62권 제5호, 2018.05, pp.42-45. // (Y.J. Lee, [Special Feature] Development of 3D heat transfer analysis program for evaluation of condensation prevention performance of buildings, Review of Architecture and Building Science, 62(5), 2018.05, pp.42-45.)
- [2] T.L. Bergman et al., Fundamentals of heat and mass transfer, 7th ed., Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.
- [3] W.J. Hiller et al., Onset of natural convection in a cube, International Journal of Heat and Mass Transfer, 36(13), 1993, pp.3251-3263.
- [4] S. Sadrabadi Haghighi, H.R. Goshayeshi, M.R. Safaei, Natural convection heat transfer enhancement in new designs of plate-fin based heat sinks, International Journal of Heat and Mass Transfer, 125, 2018, pp.640-647.
- [5] H. Welhezi, N. Ben-Cheikh, B. Ben-Beya, Numerical analysis of natural convection between a heated cube and its spherical enclosure, International Journal of Thermal Sciences, 150, 2020, 105828.
- [6] E.M. Sparrow, A.J. Stretton, Natural convection from variously oriented cubes and from other bodies of unity aspect ratio, International Journal of Heat and Mass Transfer, 28(4), 1985, pp.741-752.
- [7] E. Bilgen, H. Oztup, Natural convection heat transfer in partially open inclined square cavities, International Journal of Heat and Mass Transfer, 48(8), 2005, pp.1470-1479.
- [8] I.V. Miroshnichenko, M.A. Sheremet, Turbulent natural convection heat transfer in rectangular enclosures using experimental and numerical approaches: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82(1), 2018, pp.40-59.
- [9] International Organization for Standardization, Thermal performance of

- windows, doors and shading devices — Detailed calculations, ISO 15099:2003, 2003.
- [10] 이주희, 이용준, 벽면 온도차가 있는 공기층의 경사각에 따른 자연대류 열유동, KIEAE Journal, 제24권 제1호, 2024.02, pp.91-98. // (J.H. Lee, Y.J. Lee, Natural convection heat flow according to inclination angle of air layer with wall temperature difference, KIEAE Journal, 24(1), 2024.02, pp.91-98.)
 - [11] 이주희, 이용준, 전도체 주변 자연대류 현상 모사를 위한 복합열전달 수치해석 방법 개발, 한국건축환경설비학회 논문집, 제17권 제1호, 2023.02, pp.15-27. // (J.H. Lee, Y.J. Lee, Methodology of a numerical analysis method for natural convection with conjugate heat transfer, Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, 17(1), 2023.02, pp.15-27.)
 - [12] J. Liu et al., Numerical investigation of the laminar natural convection heat transfer from two horizontally attached horizontal cylinders, International Journal of Heat and Mass Transfer, 104, 2017, pp.517-532.
 - [13] E.M. Sparrow, J.E. Niethammer, Effect of vertical separation distance and cylinder-to-cylinder temperature imbalance on natural convection for a pair of horizontal cylinders, Journal of Heat Transfer, 103(4), 1981, pp.638-644.
 - [14] O. Reymond, D.B. Murray, T.S. O'Donovan, Natural convection heat transfer from two horizontal cylinders, Experimental Thermal and Fluid Science, 32(8), 2008, pp.1702-1709.
 - [15] J. Lieberman, B. Gebhart, Interactions in natural convection from an array of heated elements, experimental, International Journal of Heat and Mass Transfer, 12(11), 1969, pp.1385-1396.
 - [16] D.J. Cha, S.S. Cha, Three-dimensional natural convection flow around an isothermal cube, International Communications in Heat and Mass Transfer, 20(5), 1993, pp.619-630.
 - [17] D.J. Cha, S.S. Cha, Three-dimensional natural convection flow around two interacting isothermal cubes, International Journal of Heat and Mass Transfer, 38(13), 1995, pp.2343-2352.
 - [18] E. Turkel, Review of preconditioning methods for fluid dynamics, Applied Numerical Mathematics, 12(1-3), 1993, pp.257-284.
 - [19] M.M. Hafez, J.C. South, E.M. Murman, Artificial compressibility methods for numerical solution of transonic full potential equation, AIAA Journal, 17(8), 1979, pp.838-844.
 - [20] S.V. Patankar, D.B. Spalding, A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows, International Journal of Heat and Mass Transfer, 15(10), 1972, pp.1787-1806.
 - [21] J.H. Ferziger, M. Perić, Computational methods for fluid dynamics, 3rd ed., Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2002.