

구분종좌표법 및 유한체적법을 이용한 장애물이 있는 원통형 밀폐공간에서의 복사열전달 해석

김성우* · 김일경* · 김우승**

Analysis of the Radiative Heat Transfer in a Cylindrical Enclosure with Obstacles Using the Discrete Ordinate and Finite Volume Method

Seong-Woo Kim, Il-Kyoung Kim and Woo-Seung Kim

Key Words : Axisymmetric Cylindrical Enclosure (축대칭 원통형 밀폐공간), Obstacles (장애물), Radiative Heat Transfer (복사열전달), Discrete Ordinate Method (구분종좌표법), Finite Volume Method (유한체적법)

Abstract

In the present study, DOM and FVM have been used to analyze the radiative heat transfer in an axisymmetric cylindrical enclosure with obstacles. Heat flux distributions on the wall of enclosure from DOM and FVM are compared to those from simplified zone analysis for a nonparticipating medium. The comparison of DOM and FVM is also presented. Results show that there is a good agreement between FVM and simplified zone analysis. In addition, the effect of the thickness of the obstacle on the results is considered. Heat flux distribution on the surface of the obstacle is also presented.

D_{ci}	: 기호설명 방향가중치	ΔA_i	: 제어체적 경계면의 면적
I	: 복사강도, $W/m^2 \cdot sr$	ΔV	: 제어체적
q	: 복사열유속, W/m^2	$\Delta \Omega^{mn}$: 제어각도 상첨자
κ_a	: 흡수계수, m^{-1}	'	: 입사방향
σ_s	: 산란계수, m^{-1}	m, n	: 복사방향 하첨자
β	: 소멸계수 $(\kappa_a + \sigma_s)$, m^{-1}	E, W, T, B	: 제어체적 P 주위의 격자점
ω	: 산란알베도 (σ_s / β)	e, w, t, b	: 제어체적 P 의 경계면
r, z	: 원통좌표계	P	: 격자점
μ, η, ξ	: 방향여현		
$\alpha_{mnz1/2}$: 방향미분항 계수		
ϵ_w	: 벽면 방사율		
θ, ϕ	: 극각과 방위각		
T	: 온도, K		
E_{bw}	: 벽면 흑체 방사력, W/m^2		

1. 서론

축대칭 원통형 밀폐공간(axisymmetric cylindrical enclosure)에서의 복사열전달 문제는 수치적, 실험적으로 많이 연구되어 왔으며, 다양한 근사해법이 시도되어 왔다. 지금까지 많은 연구자들에 의해서 다양한 복사열전달 해석방법이 제시되었지만, 해의 정확성과 계산시간의 효율성 등의 장점 때문에, 구분종좌표법(Discrete Ordinate Method, DOM)과 유

* 회원, 한양대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 한양대학교 기계공학과

한체적법(Finite Volume Method, FVM)이 널리 사용되고 있다.

Tsai와 Ozzik⁽¹⁾은 DOM을 이용하여 1차원 원통매체에 대해 복사열전달을 해석하였다. Jamaluddin과 Smith⁽²⁾, Li 등⁽³⁾과 Jendoubi 등⁽⁴⁾은 DOM을 이용하여 2차원 축대칭 원통좌표계에 대한 복사열전달 해석을 수행하였으며, 이때 Jendoubi 등⁽⁴⁾은 원통벽면과 위, 아래면의 열유속 분포를 제시하였다. Kim과 Back⁽⁵⁾은 FVM을 이용하여 원통형 밀폐공간에 대한 복사열전달을 해석하였으며, Dua와 Cheng⁽⁶⁾의 엄밀해와 P₃ 근사해법을 사용한 Menguc와 Viskanta⁽⁷⁾의 결과와 비교하였다. Sanchez와 Smith⁽⁸⁾는 DOM을 이용하여 비참여매체에 장애물을 포함하고 있는 사각형 밀폐공간에서의 복사열전달을 해석하였다. Coelho 등⁽⁹⁾은 FVM 등으로 두께가 없는 장애물(baffle)을 포함하고 있는 사각형 밀폐공간에서의 복사열전달을 해석한 바 있다.

본 연구에서는 장애물이 있는 축대칭 원통형 밀폐공간에서의 복사열전달을 DOM과 FVM을 이용하여 해석하였다. 해석과정의 타당성 검토를 위하여 참여매체를 다룬 기존의 결과와 비참여매체를 다룬 단순영역해석법(Simplified Zone Analysis, SZA)⁽¹⁰⁾과의 비교를 수행하였다. 이때, 격자의존성 및 해석결과를 통해 DOM과 FVM의 특성을 파악하였다. 또한, 원판형 장애물을 배플로 고려하여, 원통 벽면 및 장애물 표면에서의 열유속 분포를 SZA의 결과와 비교하였다.

2. 이론

2.1 해석대상

해석에 사용된 기하학적 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 축대칭 원통형 밀폐공간의 중앙에 두께가 얇은 여러개의 원판형 장애물이 위치하고 있다. 이때, 모든 표면은 흑체(black body)로 가정하였다.

2.1.1 지배방정식 및 경계조건

흡수, 방사 및 산란하는 매체에서의 축대칭 원통좌표계에 대한 복사전달방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\mu}{r} \frac{\partial}{\partial r} [rI(\vec{r}, \vec{\Omega})] - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \phi} [\eta I(\vec{r}, \vec{\Omega})] + \xi \frac{\partial}{\partial z} [rI(\vec{r}, \vec{\Omega})] = -\beta(\vec{r})I(\vec{r}, \vec{\Omega}) + S_r(\vec{r}, \vec{\Omega}) \quad (1)$$

DOM과 FVM은 공간에서 제어체적에 대한 적분을 이용한다는 점에서는 매우 유사하다. 그러나, DOM은 각도에 대한 영향을 고려하기 위해서, 각도구역(μ_m, η_m, ξ_m) 및 가중치(w_m)를 이용하는 반면, FVM은 각도구역에 대해서도 직접 적분하는

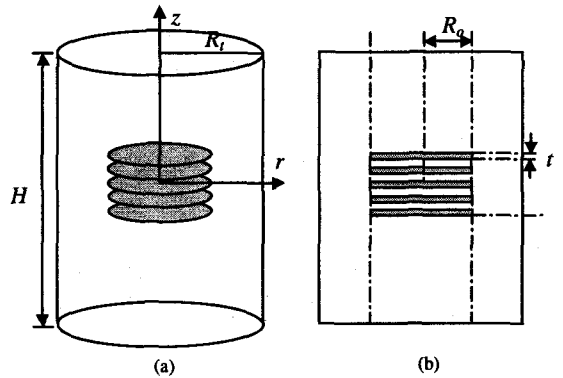


Fig. 1 (a) Schematic of the cylindrical enclosure with 5 thin obstacles and (b) the cross sections.

방법이다.

FVM에 의한 이산화방정식을 나타내면 다음과 같다. 이때 방향미분항(angular derivative)은 Carlson과 Lathrop⁽¹¹⁾의 직접차분 기법을 이용하였다.

$$\sum_{i=e,w,t,b} I_i^{mn} \Delta A_i D_{ci}^{mn} - \frac{\Delta V_p}{r_p} (\alpha_{mn+1/2} I_p^{mn+1/2} - \alpha_{mn-1/2} I_p^{mn-1/2}) + \beta_p I_p^{mn} \Delta V_p \Delta \Omega^{mn} = (S_R^{mn})_p \Delta V_p \Delta \Omega^{mn} \quad (2a)$$

여기서,

$$D_{ci}^{mn} = \int_{\phi_i^{m-}}^{\phi_i^{m+}} \int_{\theta_i^{n-}}^{\theta_i^{n+}} (\vec{s} \cdot \vec{n}_i) \sin \theta d\theta d\phi \quad (2b)$$

$$S_R^{mn} = \kappa_a I_b + \frac{\sigma_s}{4\pi} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{m-n}^{mn} \Phi_{m-n}^{mn} \Delta \Omega^{mn} \quad (2c)$$

$$\Delta \Omega^{mn} = \iint \sin \theta d\theta d\phi \quad (2d)$$

한편, 계수 $\alpha_{mn\pm 1/2}$ 는 식(2a)에서 모든 공간과 방향에 대하여 복사강도가 균일한 경우를 고려하여 계산할 수 있으며, 다음과 같은 순환식의 형태로 나타난다.

$$\alpha_{mn+1/2} - \alpha_{mn-1/2} = \frac{\Delta V_p}{r_p} \sum_{i=e,w,t,b} \Delta A_i D_{ci}^{mn} \quad (3)$$

이때, 초기값 $\alpha_{mN+1/2} = 0$ 으로 한다.

또한, 제어체적 경계면에 대한 복사강도는 다음과 같이 계단차분법을 이용하여 계산하였다.

$$I_i^{mn} D_{ci}^{mn} = I_p^{mn} \max(D_{ci}^{mn}, 0) - I_p^{mn} \max(-D_{ci}^{mn}, 0) \quad (4)$$

여기서, 첨자 p_i 는 격자점 P 의 이웃 격자점이며, 첨자 i 는 경계면을 나타낸다.

따라서, 최종적인 이산화 방정식은 다음과 같다.

$$\left(\sum_{i=e,w,t,b} \max(\Delta A_i D_{ci}^{mn}, 0) + \beta_p \Delta V_p \Delta \Omega^{mn} + \frac{\Delta V_p}{r_p} \alpha_{mn-1/2} \right) I_p^{mn} = \sum_{i=e,w,t,b} \max(-\Delta A_i D_{ci}^{mn}, 0) I_p^{mn} + \beta_p^{mn} \quad (5a)$$

여기서,

$$b_p^{mn} = (S_R^{mn})_p \Delta V_p \Delta \Omega^{mn} + \frac{\Delta V_p}{r_p} \alpha_{\tau, mn+1/2} I_p^{mn+1/2} \quad (5b)$$

밀폐공간의 벽면이나 장애물의 표면과 같이 확산반사하는 표면에서의 복사강도는 다음과 같다.

$$I_w^{mn} = \varepsilon_w I_{bw} + \frac{1 - \varepsilon_w}{\pi} \sum_{D_{cw}^{mn} > 0} I_w^{m'n'} D_{cw}^{m'n'}, \quad D_{cw}^{mn} < 0 \quad (6)$$

또한, 대칭 경계면에 대한 조건은 다음과 같다.

$$I_w^{mn} = I_w^{m'n'}, \quad D_{cw}^{m'n'} < 0, D_{cw}^{mn} > 0 \quad (7)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 참여매체에서의 복사열전달

본 연구에 적용한 수치해석 방법의 검증을 위해 참여매체로 차 있는 원통형 밀폐공간에 대해 DOM 및 FVM 으로 복사열전달 해석을 수행하였다.

저온의 원통형 밀폐공간 내에 흡수 및 방사하는 고온의 매체가 존재할 때의 복사열전달 해석을 수행하였다.⁽⁵⁾ 이때, 원통의 높이는 2m, 반경은 1m 이다. DOM 에 대해서는 S_{14} 의 종좌표(ordinate)와 $(N_r \times N_z) = (15 \times 30)$ 의 격자계를 사용하였고, FVM 에 대해서는 $(N_r \times N_z) = (16 \times 12)$ 의 각도구역과 (15×30) 의 격자계를 사용하였다.

다양한 광학두께에 대한 원통 벽면의 반경방향의 무차원 열유속 분포를 Fig. 2 에 나타내었다. DOM 및 FVM 의 결과 모두 광학두께가 커질수록 벽면에서의 열유속이 커지는 결과를 나타내었으며, 이 결과는 Dua 와 Cheng⁽⁶⁾의 엄밀해와 P_3 근사해법을 사용한 Menguc 와 Viskanta⁽⁷⁾의 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

원통의 벽면(tube)이 고온($E_{bw} = 1$)으로 유지되고,

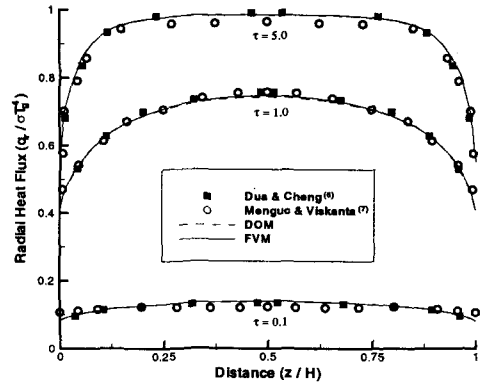


Fig. 2 Nondimensional radial heat flux distribution at the side wall with an absorbing, emitting and nonscattering medium.

윗면과 아래면이 저온($E_{bw} = 0$)인 밀폐공간 내에, 저온($E_b = 0$)의 순수산란($\omega = 1.0$) 매체가 존재하는 경우에 대해 해석을 수행하였다.⁽⁴⁾ 해석대상의 형상과 수치해석 방법은 앞의 경우와 같다.

등방산란(isotropic scattering)에 대한 튜브벽면에서의 반경방향 무차원 열유속 분포를 Fig. 3(a)에 나타내었다. 저온의 윗면과 아래면에 인접한 튜브의 벽면에서 열유속이 크게 나타남을 볼 수 있으며, 이것은 복사열전달이 잘 일어남을 의미한다. 본 연구에서 사용한 DOM 의 결과는 DOM 을 사용한 Jendoubi 등⁽⁴⁾의 결과와 정확히 일치함을 알 수 있고, FVM 의 결과 또한 DOM 의 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

원통의 윗면에서의 축방향 무차원 열유속 분포를 Fig. 3(b)에 나타내었다. 고온으로 유지된 튜브벽면의 영향으로 튜브에 가까워질수록 윗면에서의 열유속이 증가함을 볼 수 있다. 또한 대칭선($r = 0$) 근방에서는 최소의 열유속이 나타남을 알

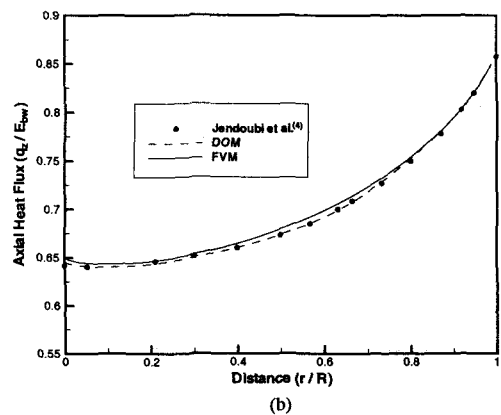
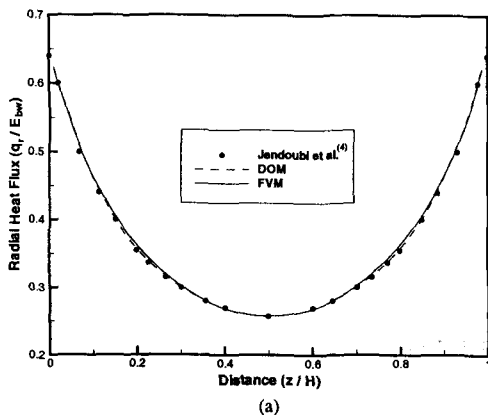


Fig. 3 Nondimensional heat flux distribution: (a) Radial heat flux at side wall and (b) Axial heat flux at top wall.

Table 1 Dimensions and properties of cylindrical enclosure and obstacle.

Dimension	Value
Height of tube (H)	800 mm
Radius of tube (R)	200 mm
Radius of obstacle (R_o)	100 mm
Thickness of obstacle (t)	1 mm
Property	Value
Temperature of side wall	800 K
Temperature of other walls and obstacles	300 K

수 있다. Fig. 3(a)의 경우와 마찬가지로 DOM 및 FVM의 결과는 Jendoubi 등⁽⁴⁾의 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

3.2 비참여매체에서의 복사열전달

해석대상은 Fig. 1에 나타난 것과 같고, 자세한 길이차원 및 물성치를 Table 1에 나타내었다. 원통형 밀폐공간 내에 장애물이 없는 경우와 있는 경우로 구분하여 복사열전달을 해석하였다. 원통형 밀폐공간에 장애물이 존재하는 경우에 대해서는 기존에 발표된 결과가 없기 때문에, 본 연구에서는 Kim과 Kim⁽¹⁰⁾이 사용한 SZA에 의한 결과와 비교하였으며, 이를 위해서 비참여매체에 대하여 복사열전달 해석을 수행하였다.

3.2.1 장애물이 없는 경우

비참여매체 및 장애물이 없는 경우에 대해서 DOM과 FVM을 이용하여 복사열전달 해석을 수행하였다. DOM과 FVM은 (10×40)의 동일한 격자계를 사용하고, S_{14} 의 종좌표와 (16×12)의 각도구역을 각각 사용하였다.

튜브벽면에서 반경방향의 열유속 분포를 Fig. 4에 나타내었다. 여기서, 열유속의 값이 음의 부호

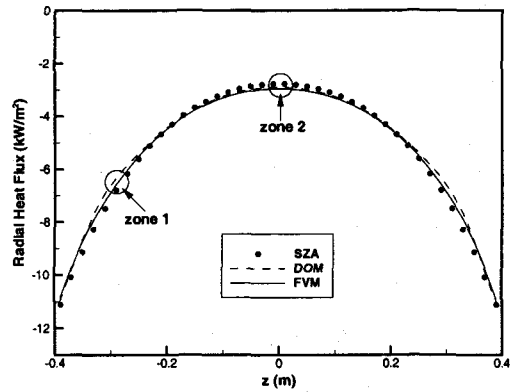


Fig. 4 Radial heat flux distribution at the side wall in the case of nonparticipating medium.

(-)를 갖는 것은 튜브가 열을 빼앗김을 의미한다. 저온의 윗면과 아래면에 인접한 튜브의 벽면에서 중앙 부분보다 복사열전달이 활발하게 일어남을 볼 수 있으며, 이 결과는 Fig. 3(a)에서 살펴본 참여매체의 결과와 유사하다. 마찬가지로 DOM 및 FVM 모두 SZA와 잘 일치하는 결과를 나타낸다. 영역 1과 2에서 DOM 및 FVM 모두 SZA의 결과와 약간의 차이를 보이는데, 이는 각도구역과 격자에 의한 영향으로 판단된다.

3.2.2 장애물이 있는 경우

Table 1에 나타난 반경과 두께를 가지는 1개의 장애물이 밀폐공간의 중앙($z=0$)에 있는 경우에 대해 복사열전달을 해석하였다. 격자의존성을 살펴보기 위해 (10×33)의 성긴격자와 (10×121)의 밀집격자를 사용하고, DOM은 S_{14} 의 종좌표를, FVM은 (12×12)와 (24×24)의 각도구역을 사용하였다.

각각의 격자에 대한 반경방향 열유속 분포를 Fig. 5(a)와 (b)에 나타내었다. Fig. 4와 비교해 볼

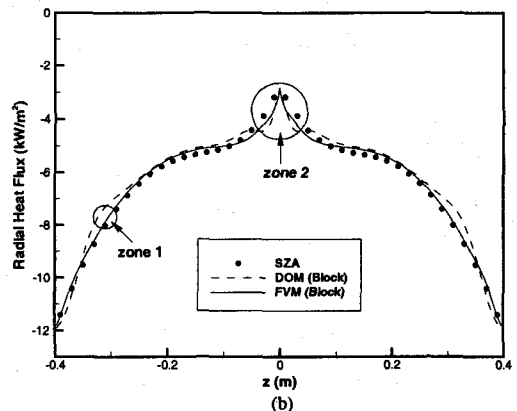
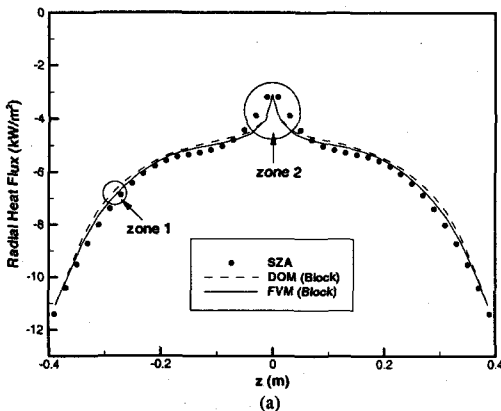


Fig. 5 Effect of one obstacle in the enclosure on the radial heat flux distribution at the side wall: (a) sparse grid (10×33) and (b) dense grid (10×121).

때, 장애물의 영향으로 인해, 장애물에 근접해 있는 튜브의 중앙부근에서 열유속의 절대값이 증가된 모습을 보이고 있다. 이것은 저온으로 유지된 두께가 얇은 장애물의 윗면과 아래면에 의한 영향으로, 장애물의 표면과 인접한 튜브의 중앙부근에서 많은 복사열전달이 일어남을 의미한다.

Fig. 5 를 살펴보면, 성긴격자 및 밀집격자 모두에서 DOM 및 FVM 이 SZA 의 결과와 유사하게 장애물의 영향을 받고 있음을 볼 수 있다. 그러나, FVM 의 경우 격자가 밀집될수록 SZA 의 결과에 근접해 가는 반면, DOM 의 경우에는 영역 1 및 2 에서 SZA 의 결과와 차이가 남을 볼 수 있다. 이는 FVM 은 연속적인 각도구역을 사용하는 반면, DOM 은 단속적인 종좌표를 사용함으로써 인해서 레이효과(ray effect)가 나타나는 것으로 판단된다. 결과적으로 장애물과 인접한 영역 2 뿐만 아니라 영역 1 에서도 레이효과에 의한 그늘짐 현상(shadowing)이 나타남을 볼 수 있다.

3.3 장애물 처리방법에 의한 영향

비교적 두께가 얇은 장애물에 대해서는 두께를 고려하지 않고 복사열전달 해석을 수행할 수 있다.⁹⁾ 이처럼 장애물을 두께가 없는 배플로 고려할 경우, 장애물의 개수가 증가할 때, 장애물의 두께로 인한 격자수의 증가를 방지하고, 계산시간을 단축하기에 용이하다. 따라서, 본 연구에서는 5 개의 장애물이 밀폐공간의 중앙에 위치할 때의 복사열전달 해석을 두께가 있는 경우(block)와 배플로 다루었을 경우에 대해 수행하였다.

배플의 경우, FVM 으로 각도구역 및 격자에 대해 (16×12), (10×32)의 성긴격자와 (24×24), (10×160)의 밀집격자를 사용하였고, 블록(block)에 대해서는 (16×12), (10×37)의 성긴격자와 (24×24), (10×165)

의 밀집격자를 사용하였다. 또한, $z=0$ 에서 대칭인 점을 고려하여, 대칭면을 기준으로 원통의 아래부분($z \leq 0$)의 열유속 분포만을 나타내었다.

각각의 격자에 대한 반경방향 열유속 분포를 Fig. 6(a)와 (b)에 나타내었다. 앞에서와 마찬가지로 Figs. 4, 5 와 비교해 볼 때, 장애물의 영향으로 인해 장애물에 근접해 있는 튜브 부근에서 열유속의 절대값이 더욱 증가된 모습을 보이고 있다. 이것은 장애물의 윗면과 아래면의 영향 때문이다.

Fig. 6(a)를 살펴보면, 블록과 배플 모두 성긴격자에서도 비교적 SZA 의 결과와 유사하게 장애물의 영향을 나타내고 있다. 그러나, 블록에 비해 배플은 영역 1 과 2 에서 SZA 의 결과와 많은 차이를 보인다. 이것은 성긴격자에서는 장애물의 두께에 의한 영향을 많이 받기 때문이며, 두께를 고려하지 않는 배플의 결과는 블록에 비해 만족스러운 결과를 얻을 수 없다는 것을 보여준다. 그러나 Fig. 6(b)에서는 밀집격자의 경우 블록과 배플 모두 SZA 의 결과에 잘 일치하고 있다. 이때, 블록의 결과에 대해 배플의 결과의 오차는 1% 이내이다.

3.4 장애물 표면에서의 열유속 분포

이상의 결과를 토대로 장애물 표면에서의 열유속 분포를 계산하였다. 계산시간과 정확성을 고려하여, FVM 으로 각도구역과 격자에 대해, (12×12)와 (100×400)을 사용하였으며, 장애물은 배플로 처리하였다.

5 개의 배플에 대해서, 각 배플의 아래면에서의 축방향 열유속 분포를 Fig. 7 에 나타내었으며, 첫 번째 배플(1st baffle)은 튜브의 바닥면에 가장 가까운 배플을 나타낸다. 이때 고온으로 유지된 튜브 벽면의 영향으로, 5 개의 배플 모두 튜브벽면에 가까워질수록 배플 표면의 열유속의 절대값이 증가

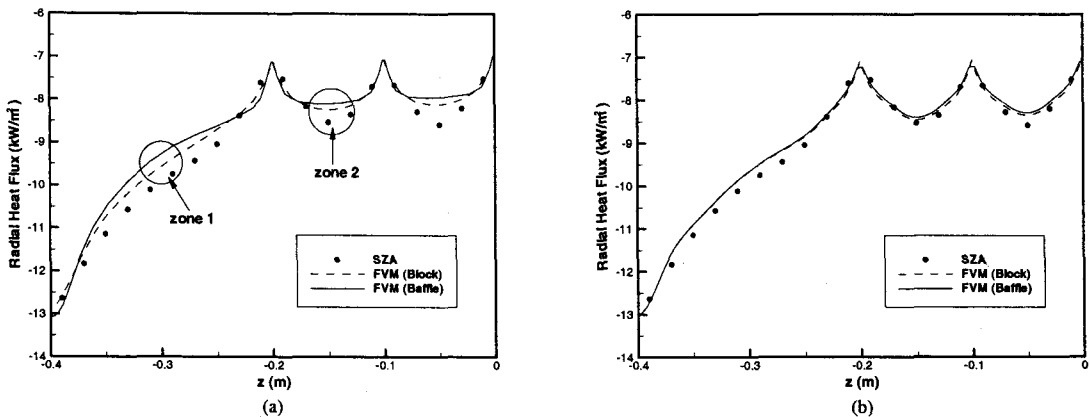


Fig. 6 The effect of 5 obstacles in the enclosure on the radial heat flux distribution at side wall. (a) sparse grid (10×32, 10×37) and (b) dense grid (10×160, 10×165).

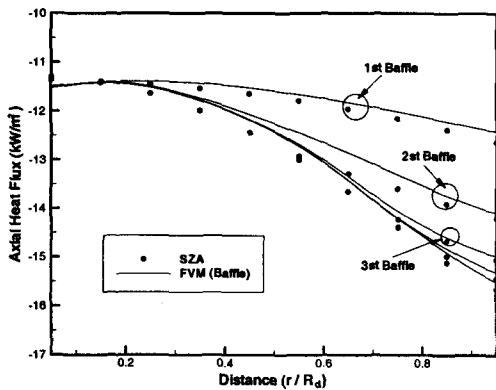


Fig. 7 Axial heat flux distribution at bottom surfaces of 5 obstacles.

함을 볼 수 있다. 또한, 대칭선 근방에서는 최소의 열전달이 나타남을 알 수 있다. 이 결과는 Fig. 3(b)에서 살펴 본 결과와 유사하다.

각 배플 표면의 열유속은 고온의 튜브벽면과 저온의 원통 윗면과 아래면, 그리고 다른 장애물의 표면에 의해 영향을 받게 된다. 대체적으로 배플의 끝단에서 많은 열교환이 일어나며 첫번째 배플의 아래면은 저온의 원통 아래면의 영향으로 중앙과 끝단의 열유속차가 다른 것에 비해 크지 않음을 볼 수 있다. 각 배플 표면에서의 열유속은 SZA의 결과보다 열유속의 절대값이 전체적으로 작은 값을 나타내고 있으나 정성적인 거동은 SZA의 결과와 유사함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 장애물을 포함하고 있는 축대칭 원통형 밀폐공간에서의 복사열전달 해석을 수행하였다.

해석방법의 검증을 위해 참여매체로 차 있는 밀폐공간에 대한 해석을 수행하였으며 기존의 결과와 잘 일치하는 결과를 얻었다. 그리고 원통형 밀폐공간에 장애물이 있는 경우 단순영역해석에 의한 결과와 비교하기 위해 비참여매체에 대해서 수행하였다. 이때 비참여매체에 장애물이 없는 경우에 구분종좌표법과 유한체적법 모두 단순영역해석에 의한 결과와 잘 일치하는 결과를 보였다. 그러나 비참여매체에 장애물이 있는 경우에는 유한체적법은 단순영역해석과 잘 일치하는 결과를 보인 반면, 구분종좌표법은 레이효과에 의한 그늘집 현상이 발생하여 만족스럽지 못한 결과를 나타내었다. 또한 장애물의 두께가 얇은 경우, 계산량 및 계산시간을 줄이기 위해 장애물의 두께를 무시한

해석법의 사용이 가능하다는 것을 알 수 있었다. 한편 유한체적법을 이용하고 장애물을 배플로 처리하여 장애물 표면의 열유속 분포를 얻을 수 있었으며, 이때 단순영역해석에 의한 결과보다 전체적으로 작은 값을 나타내었지만, 정성적인 거동은 유사한 결과를 얻었다.

참고문헌

- (1) Tsai, J. R., and Ozisik, M. N., 1990, "Radiation in Cylindrical Symmetry With Anisotropic Scattering and Variable Properties," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.33, No.12, pp.2651-2658.
- (2) Jamaluddin, A. S., and Smith, P. J., 1988, "Predicting Radiative Transfer in Axisymmetric Cylindrical Enclosures Using the Discrete Ordinates Method," *Combustion Sciencd and Technology*, Vol.62, pp.173-186.
- (3) Li, H. Y., Ozisik, M. N., and Tsai, J. R., 1992, "Two-Dimensional Radiation in a Cylinder with Spatially Varying Albedo," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol.6, No.1, pp.180-182.
- (4) Jendoubi, S., Lee, H. S., and Kim, T. K., 1993, "Discrete Ordinates Solutions for Radiatively Participating Media in a Cylindrical Enclosure," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol.7, No.2, pp.213-219.
- (5) Kim, M. Y., and Baek, S. W., 1997, "Analysis of Radiative Transfer in Cylindrical Enclosures Using the Finite Volume Method," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol.11, No.2, pp.246-252.
- (6) Dua, S. S., and Cheng, P., 1975, "Multi-Dimensional Radiative Transfer in Non-Isothermal Cylindrical Media with Non-Isothermal Bounding Walls," *Int. J. Heat Transfer*, Vol.18, pp.245-259.
- (7) Menguc, M. P., and Viskanta, R., 1986, "Radiative Transfer in Axisymmetric, Finite Cylindrical Enclosures," *Journal of Heat Transfer*, Vol.108, pp.271-276.
- (8) Sanchez, A., and Smith, T. F., 1992, "Surface Radiation Exchange for Two-Dimensional Rectangular Enclosures Using the Discrete-Ordinates Method," *Journal of Heat Transfer*, Vol.114, pp.465-472.
- (9) Coelho, P. J., Concalves, J. M., Carvalho, M. G., and Trivic, D. N., 1998, "Modelling of Radiative Heat Transfer in Enclosures with Obstacles," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.41, pp.745-756.
- (10) Kim, I. K., and Kim, W. S., 1999, "Theoretical Analysis of Wafer Temperature Dynamics in a Low Pressure Chemical Vapor Deposition Reactor," *Int. J. Heat Transfer*, Vol.42, pp.4131-4142.
- (11) Carlson, B. G., and Lathrop, K. D., 1968, "Transport Theory - The Method of Discrete Ordinates," *Computing Methods in Reactor Physics*, edited by H. Greenspan, C. N. Kelber, and D. Okrent, Gordon & Breach, New York, pp.165-266.