

부도체 방향복사면이 있는 무한 정사각관의 전도-복사열전달

변기홍[†] · 임문혁^{*}
 (2002년 1월 28일 접수, 2003년 1월 24일 심사완료)

Conductive-Radiative Heat Transfer in an Infinite Square Duct with Dielectric Directional Property Wall

Ki-Hong Byun and Moon Hyuk Im

Key Words: Directional(방향성), Hemispherical(방향평균), Participating(참여), Direct Discrete Ordinates Method(직접구분종좌법), Conductive-Radiative(전도-복사)

Abstract

The effects of a directionally emitting and reflecting dielectric surface on the wall heat flux and medium temperature distribution are studied. The system is an infinite square duct enclosing an absorbing and emitting medium. The emissivity and reflectivity of opaque and gray wall vary with direction. Combined effect of conductive and radiative heat transfer is analyzed using finite difference and the direct discrete-ordinates method. The parameters under study are conduction to radiation parameter, optical depth, refractive index ratio. The results with directional and diffuse properties deviate each other when the conduction to radiation parameter is less than around 0.01. The wall heat flux differs for optical thickness less than around 0.1. However, the medium temperature profiles differ for optical thickness greater than around 1. Deviations from diffuse property calculations are larger for hot wall with directional property than cold wall with directional property. As n increases from 1.5, the trend changes are observed for refractive index ratio about $n=6.10$

기호설명

G : 무차원 복사강도
 k : 열전도율, W/m-K
 M : 1사분면 당 종좌의 수
 \bar{N} : 전도-복사계수, $\frac{k\alpha}{4\sigma T_r^3}$
 n : 굴절률비, $\frac{n_2}{n_1}$
 Q, q : (무차원)열유속, $\frac{q}{\sigma T_r^4}$

T, T_r : (기준)온도, K
 X, Y : 무차원길이, $X = \frac{x}{L}$, $Y = \frac{y}{L}$

그리스문자

α : 흡수계수 (m^{-1})
 ϵ : 방사율
 θ : 면의 수직방향으로부터의 각도
 Θ : 무차원 온도, $\frac{T}{T_r}$
 σ : 스테판볼츠만 상수
 τ : 광학두께, aL
 ω_m : m 방향 종좌의 가중치

[†] 책임저자, 회원, 동국대학교 기계공학과

E-mail : khbyun@donguk.edu
 TEL : (02)2260-3701 FAX : (02)2263-9379
^{*} 회원, 계명대학교 기계자동차공학부
 E-mail : imoon@kmu.ac.kr
 TEL : (053)580-5346

첨자

m : 종좌의 방향
 N,S,E,W: 동,서,남,북쪽 면

p : 평행성분
v : 수직성분

1. 서론

복사 열전달이 있는 계의 경계면들의 대부분은 방향특성을 가진 실제 면이다. 이를 대체로 흑체, 난반사와 난방사하는 면, 정반사와 난방사하는 면으로 분류하여 해석하고 있다.⁽¹⁾ 표면 및 박막들에 대한 물성치들이 중요해짐에 따라, 이에 대한 연구들 또한 활발하게 진행되고 있다.⁽²⁾

전도-복사 열전달과 관련된 논문들은 대단히 많다. Yuen과 Takara⁽³⁾는 직사각형 계 안에 놓인 흡수와 방사를 하는 매질에 의한 전도-복사 열전달을 해석했다. 복사 흡수 항을 대수 합으로 표현하여 지배방정식에 대한 수치 해석을 했다. 김과 백⁽⁴⁾은 방사, 흡수와 산란을 하는 참여매질을 둘러싼 사각형 계의 전도와 복사열전달을 S-4 구분종좌법을 사용해서 해석했다. 변과 한⁽⁵⁾은 직접구분종좌법(Direct Discrete Ordinate Method: DS_N)^(6,7)으로 정반사면과 흡수방사 매질이 있는 무한 정사각형 계를 해석했다.

이 논문에서는 흡수 방사매질이 있는 정사각형 계의 전도복사 열전달에 방향복사면이 미치는 영향을 연구하고자 한다. 주요변수는 전도-복사비, 광학두께, 굴절률의 비 및 면의 복사특성이다.

2. 해석

2.1 계와 지배방정식

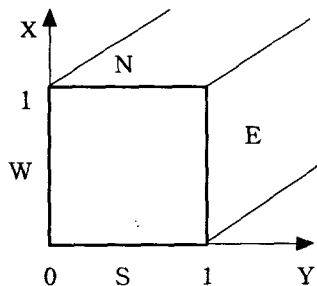


Fig. 1 System description

흡수와 방사를 하는 참여 매질로 채워진 계는 한 변의 길이가 L이고 단면이 정사각형인 무한관이며, Fig. 1과 같다. 매질의 굴절률은 $n_1=1$ 이다. 비투과 벽면은 방향복사를 하거나 난복사를 한다. 이 논문에서 “방향복사”란 방사율 및 반사율이 방향에 따라 변함을, “난복사”는 난반사와 난방사를 의미한다. 계 안에서는 복사와 전도 열전달이 복합적으로 일어난다. 복사-전도를 고려한 매질의 에너지 방정식은 참고문헌(5)에서와 같고, 전도항을 유한차분법, 복사항을 직접구분종좌법으로 이산화하면 식 (1)이 된다.

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} = \frac{\tau^2}{N} \left(\theta^4 - \frac{1}{4} \sum_{m=1}^{4M} \omega_m G_m \right) \quad (1)$$

X, Y는 무차원 x, y 좌표, τ 는 광학두께, \bar{N} 는 전도-복사 계수, θ 와 G 는 각각 무차원 온도와 무차원 복사강도이다. ω_m 은 m방향 직접구분종좌가중치이며, M은 1사분면 당 종좌의 수이다. 복사항을 직접구분종좌법으로 표현하는 과정과, 매질 및 경계면에서의 무차원 열유속 관련 식들은 참고문헌(5)에 발표되어 있다.

2.2 경계조건

임의의 m 방향으로, 비투과 벽면을 떠나는 무차원 복사강도는 식 (2)와 같다.

$$G_{wall}^+ = \epsilon_m \frac{\theta_{wall}^4}{\pi} + (1 - \epsilon_m) G_m^- \quad (2)$$

여기서 ϵ_m 은 m 방향 벽면의 방사율이고, 벽면이 흑체이면 $\epsilon_m=1$ 이고 회체이면 $0 \leq \epsilon_m < 1$ 사이의 값을 갖고, 방향복사면인 경우 방향에 따라 값이 다르다. 이상적인 부도체의 방향당 값은 식 (3)의 굴절률의 비 n과 입사각 θ 의 함수로 표현된다.⁽¹⁾

$$n = \frac{n_2}{n_1} \quad (3)$$

n은 굴절률(refractive index)의 비이며, 1은 입사 매질, 2는 벽면의 굴절률이다. 반사율의 평행 및 수직성분은 다음과 같다.⁽¹⁾

$$\rho_p = \left[\frac{n^2 \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{n^2 \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \right]^2 \quad (4a)$$

$$\rho_v = \left[\frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} - \cos \theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} + \cos \theta} \right]^2 \quad (4b)$$

직접구분종좌법으로 m방향 방사율을 표현하면,

$$\epsilon_m = 1 - \frac{\rho_p(\theta_m) + \rho_v(\theta_m)}{2} \quad (5a)$$

$$\theta_m = \pi/2 - \phi_m \quad (5b)$$

m, ϕ_m 은 각각 m번째 종좌 및 종좌의 각도이다. 이 논문에서는 Sanchez 와 Smith⁽⁸⁾의 구분종좌의 가중치와 방향을 수정해서 사용했다.

이 논문에서 “전방”은 면에 수직한 방향부터 대략 60도까지의 방향을, “측방”은 나머지 방향을 의미한다. n=1.5인 경우, 면의 “전방” 방사율은 방향평균방사율(hemispherical emissivity) 보다 더 크다. 따라서, 면은 “측방”보다는 “전방”으로 더 방사 및 흡수를 한다. 이를 반사율로 표현하면, 면은 “전방”보다는 “측방”으로 더 반사한다. 그러나, n 이 증가하여 대략 n=6.1부터는 반대 경향을 보인다. 즉 면은 “전방”보다는 “측방”으로 더 방사 및 흡수를 한다. 또한, n이 증가함에 따라 평균방사율은 감소한다.

3. 결과 및 토의

광학두께, 전도-복사비, n등 무차원 변수와 면의 상태가 온도 및 열유속 분포에 미치는 영향을 계산했다. 결과에 사용된 조건은 별도의 언급이 없으면 다음과 같다. 계는 무한 정사각 단면판이며, 경계면의 온도는 $T_s=600K$, $T_N=T_E=T_W=300K$, 기준온도는 $T_r=600K$ 이다. N, S, E, W는 각각 북, 남, 동, 서 경계면을 표시한다. 북쪽 경계면 또는 남쪽경계면 외에는 모두 흑체인 비투과면이다. 계의 가로 세로를 각 100개로 등분했으며, 1 사분면당 직접구분종좌의 수는 M=64개이다.

그림들에서 방향복사면은 e, 난복사면은 h를 사용하여 결과를 구분했다. 난복사면의 방사율은 n값에 해당하는 방사율 분포를 방향평균한 값이

다. 예를 들어 n=1.5인 경우 방향평균방사율(hemispherical emissivity)은 $\epsilon=0.91$ 이다.

3.1 방향성 저온면

3.1.1 \bar{N} 의 영향

Fig. 2에는 $\bar{N}=0.01, 0.1, 1$ 에서 등온선들이 무차원 온도 0.1의 간격으로 발표되어 있다. 남쪽면의 무차원온도는 1이며, 나머지 면들의 무차원 온도는 0.5이다. 북쪽면 만이 n=1.5인 방향복사면(e) 또는 난복사면(h)이다. $\bar{N}=1, 0.1$ 인 경우, 전체열전달에 대한 복사열전달의 비중이 작아서, 두 경우에 대한 등온선이 거의 일치하므로, 방향복사면에 대한 결과만 발표했다. $\bar{N}=0.01$ 의 결과에서, 방향복사면인 경우 실선을, 난복사면인 경우 이점쇄선을 사용해서 등온선을 구분했다. $\Theta=0.6, 0.7$ 등온선에서 복사면의 특성 때문에 생긴 차이를 볼 수 있다. 방향복사면이 난복사면에 비해 입사에너지를 “전방”으로 적게 반사하므로, 북쪽면 근처의 매질이 덜 가열된다. 따라서, 실선이 이점쇄선보다 저온영역으로 덜 확장되어 있다.

\bar{N} 가 감소할수록 고온의 영역이 더 저온영역으로 확장되어 있음을 Fig. 2에서 볼 수 있다.⁽⁵⁾

Fig. 3에는 북쪽면의 무차원 전체(Total) 및 복사(Radiative) 열유속에 \bar{N} 가 미치는 영향이 발표

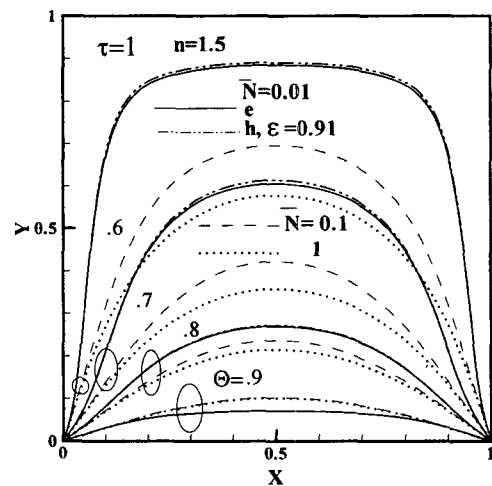


Fig. 2 Effects of \bar{N} on dimensionless temperature at diffuse(h) or directional(e) north wall

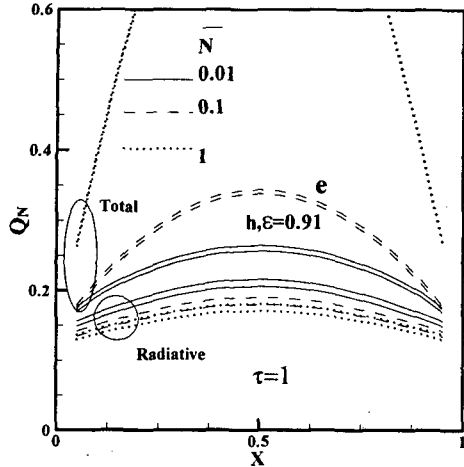


Fig. 3 Effects of \bar{N} on diffuse(h) or directional(e) north wall heat flux

되어 있다. 전체 열유속은 전도와 복사 열유속의 합이다. 열유속의 부호규약은 유입량이 유출량보다 크면 +이다. $\bar{N}=1.0$ (점선), 0.1(일점쇄선), 0.01(실선)이고 $\tau=1$ 이다. 동일 선형(예를 들어 실선)을 사용하여 4개의 서로 다른 결과가 발표되어 있으며, 위의 두 개는 전체 열유속을 아래의 두 개는 복사 열유속을 나타내며, 전체 또는 복사 열유속에서 위의 방향 아래는 난복사에 대한 결과이다. 따라서, 위로부터 전체-방향, 전체-난, 복사-방향, 복사-난의 순서로 결과가 발표되어 있다. \bar{N} 가 감소할수록 복사 열유속이 전체 열유속에 차지하는 비율이 증가하며, 방향복사면과 난복사면에 대한 차이 또한 증가하고 있다. 난복사면 열유속을 기준으로 한 차이의 최대값을 비교해 보면, $\bar{N}=1, 0.1, 0.01$ 에서 전체 열유속은 각각 약 2.2, 3.5, 3.8%, 복사 열유속은 약 5.6, 5.5, 5.0% 방향복사면인 경우가 크다. 북쪽면이 방향복사면이면 “전방” 방사율(=흡수율)이 방향평균방사율 보다 크고, 따라서, 이 경우 복사 열유속은 북쪽면이 난복사면(현의 방사율=방향평균방사율)인 경우보다 크게 된다.

Fig. 3의 조건에서, 동쪽면의 무차원 전체 및 복사 열유속을 Fig. 4에 비교했다. $\tau=1$, $\bar{N}=1.0, 0.1, 0.01$ 이며, 북쪽면이 방향복사면(e), 난복사면

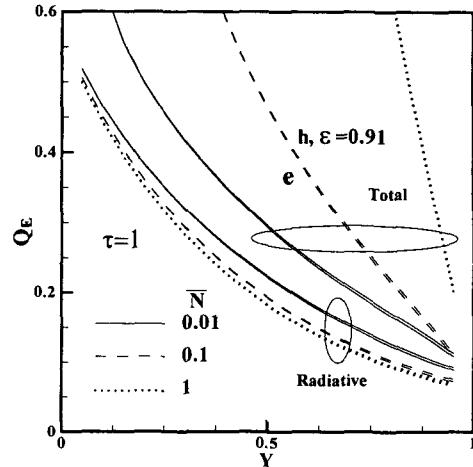


Fig. 4 Effects of \bar{N} on east wall heat flux at diffuse(h) or directional(e) north wall

($h, \epsilon=0.91$)인 경우가 비교되어 있다. 대칭성에 의해서 서쪽면과 동쪽면에서의 결과는 같다. 동일한 선형에서 위에서부터 전체-난, 전체-방향, 복사-난, 복사-방향의 순서로 결과가 그려져 있다. 점선의 경우 전체-난, 전체-방향이 거의 중첩되어 있다. \bar{N} 가 감소할수록 전체 열유속은 감소하고 복사 열유속은 증가하여, 그 차이가 감소하고 있다. 북쪽면 근처의 열유속은 난복사면의 경우가 방향복사면보다 컸으나, 남쪽면 근처에서는 차이가 없었으며, \bar{N} 가 증가할수록 차이가 줄어들고 있다. 난복사면 열유속을 기준으로 한 차이의 최대값을 비교해 보면, $\bar{N}=0.01, 0.1, 1$ 에서 전체 열유속은 각각 약 3.8, 3.9, 2.1%, 복사 열유속은 약 3.9, 4.5, 4.7% 정도이며, 난복사면인 경우가 크다.

3.1.2 τ 의 영향

Fig. 5에 광학두께가 매질의 온도분포에 미치는 영향이 발표되어 있다. 북쪽면만이 $n=1.5$ 인 방향복사면이고, 나머지 면들은 흑체이며, $\bar{N}=0.01, \tau=1, 0.1, 0.01$ 이다. 광학두께 $\tau=1$ 에서, 매질의 흡수 방사에 의해서 고온 영역의 확장이 두드러진 것을 볼 수 있다. 난복사면에 대한 등온선을 그리지 않았으나, $\tau=1$ 인 경우(Fig. 8)를 제

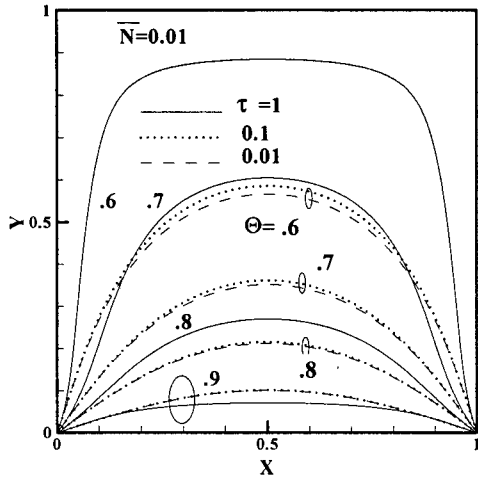


Fig. 5 Effects of τ on dimensionless temperature contours at directional(e) north wall

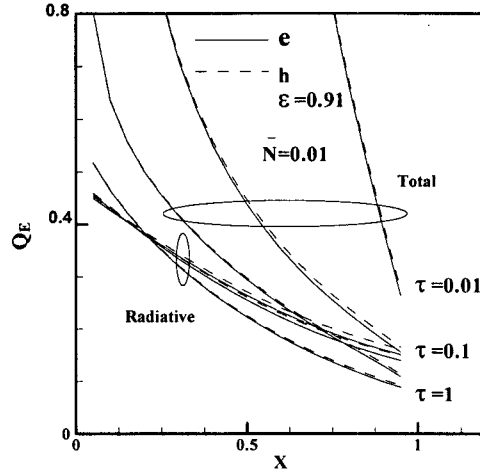


Fig. 7 Effects of τ on east wall heat flux at diffuse(h) or directional(e) north wall

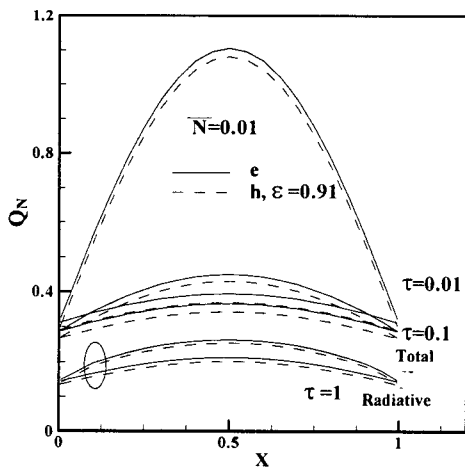


Fig. 6 Effects of τ on diffuse(h) or directional(e) north wall heat flux

외하고는 차이가 작았다.

Fig. 6에는 Fig. 5의 조건에서 북쪽면의 무차원 전체 및 복사열유속에 광학두께가 미치는 영향이 발표되어 있다. $\bar{N}=0.01$ 에서 $\tau=1.0, 0.1, 0.01$ 이며, 북쪽면이 방향복사면(실선), 난복사면(쇄선)인 경우가 비교되어 있다. 복사열유속은 τ 가 감소할수록 투과율의 증가로 증가하고 있다. 복

사열유속이 전체열유속에 차지하는 비율은 광학 두께가 감소할수록 감소하고 있다. 방사율이 같으면, 정반사 북쪽면과 난반사 북쪽면의 열유속은 같다.⁽⁵⁾ 그러나, 방향복사면인 경우의 열유속은 난복사면에 비해 크다. $n=1.5$ 인 방향복사면은 난복사면에 비해 “전방”으로 더 많이 흡수하기 때문이다. 난복사면 열유속을 기준으로 한 차이의 최대값을 비교해 보면, 광학두께 0.01, 0.1, 1에서 전체열유속은 각각 약 3.8, 5.0, 4.1%, 복사열유속은 약 5.7, 5.7, 5.0% 정도 방향복사면인 경우가 크다.

Fig. 7은 Fig. 6의 조건에서, 동쪽면에 유입되는 무차원 전체 및 복사열유속을 비교한 결과이다. 대칭성에 의해, 서쪽면에서의 결과는 동쪽면에서와 같다. $\bar{N}=0.01$ 에서 $\tau=1.0, 0.1, 0.01$ 인 경우이며, 북쪽면이 방향복사면(실선)인 경우가 난복사면(쇄선)인 경우와 비교되어 있다. 전체 및 복사열유속은 광학두께가 감소할수록 투과율의 증가로 증가하고 있으며, 전체에 대한 복사열유속의 비율이 또한 증가하고 있다. 북쪽면 근처에서는 난복사면의 열유속이 방향복사면에 비해 컸으나, 남쪽면 근처로 갈수록 차이가 없어진다. 광학 두께가 두꺼워질수록 차이가 시작하는 점이 북쪽면 근처로 접근해 가고 있다. 난복사면 열유속을 기준으로 한 차이의 최대값을 비교해 보면, 광학

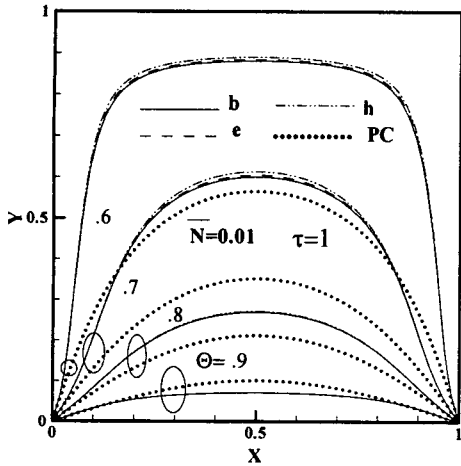


Fig. 8 Dimensionless temperature contours of pure conduction(PC) and conduction-radiation at black(b), diffuse(h), directional(e) north wall

두께 0.01, 0.1, 1에서 전체열유속은 각각 약 3.7, 5.9, 3.8%, 복사열유속은 약 6.3, 6.1, 3.9% 정도로 난복사면인 경우가 크다.

3.1.3 매질의 온도분포

Fig. 8에 북쪽 면의 복사특성이 매질의 온도분포에 미치는 영향이 $\bar{N}=0.01$, $\tau=1$, $n=1.5$ 에서 비교되어 있다. 북쪽면이 흑체(실선), 방향복사면(쇄선), 난복사면(이점쇄선, $\epsilon=0.9$) 인 경우와 순수 전도(점선)에 대한 무차원 등온선이 0.1 간격으로 그려져 있다. 순수 전도(PC)인 경우에 비해, 전도-복사에 대한 등온선들이 저온 면 쪽으로 더 확장되어 있다. 방향복사면의 등온선은 흑체와 난복사면에 대한 등온선 사이에 위치하고 있다. 난복사면의 등온선이 방향복사면의 등온선보다 저온면 쪽으로 더 확장되어 있다. 난복사 또는 방향복사면은 받은 복사에너지를 매질로 되돌려 보내기 때문에 북쪽면 근처의 매질의 온도가 흑체인 경우보다 높아지게 된다. 방향복사면은 난복사면에 비해 “전방”으로 더 흡수하고 덜 반사하므로, 난복사면인 경우의 매질의 온도가 방향복사면보다 크다. 이 경우에 대한 북쪽면 열유속 결과는 Fig. 3, 6에, 동쪽면 열유속 결과는 Fig. 4, 7에 비교되어 있다.

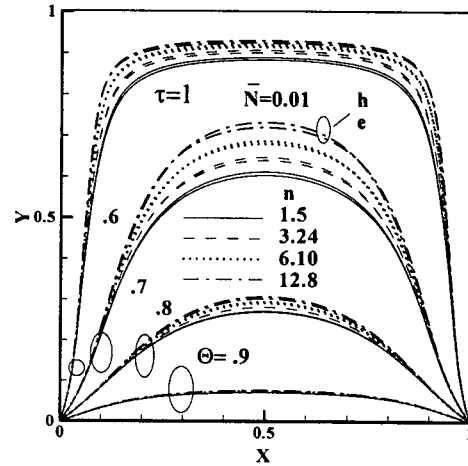


Fig. 9 Dimensionless temperature contours at diffuse (h) or directional(e) north wall for various n

3.1.4 n 값의 영향

부도체인 면의 n값은 방사율과 반사율에 영향을 미친다. $n=3.24$ 이면 방향평균방사율은 $\epsilon=0.7$, $n=6.10$ 이면 $\epsilon=0.5$, $n=12.8$ 이면 $\epsilon=0.3$ 이다.

Fig. 9에는 n이 매질의 온도분포에 미치는 영향이 $\bar{N}=0.01$, $\tau=1$ 조건에서 발표되어 있다. n값이 커질수록 북쪽면에서의 방사량은 줄지만, 반사량은 증가한다. 따라서, n값이 증가할수록 고온영역이 더 확장되었다. 대체로 난복사인 경우가 방향복사인 경우에 비해서 고온영역이 더 확장되었다. $n=1.5$ 이면, 흡수되지 않은 입사량을 “측방”으로 반사하는 경향이 크므로 저온벽 근처의 온도는 난복사인 경우가 크다. 그러나 확대해서 보면, $n=12.8$ 의 등온선 0.8, 0.9가 난복사에 비해 조금 더 확장되어 있다. n 값이 약 6.10 이상이 되면 방향면의 방사 경향이 “전방”에서 “측방”으로 천이되어 “전방”으로 더 반사하기 때문이다.

Fig. 10은 Fig. 9의 조건에서 n값이 북쪽면의 전체열유속에 미치는 영향에 대한 결과이다. 방향복사면은 실선으로 난복사면은 쇄선으로 표시하였다. n 값이 증가하면 흡수율은 감소하고 반사율은 증가한다. 따라서, n 값이 커질수록 북쪽면의 열유속은 감소한다. 약 $n=6.10$ 보다 작으면 방향면의 “전방” 방사 경향으로 북쪽면 열유속은 방향복사면이 난복사면보다 크나, 약 $n=6.10$ 보다

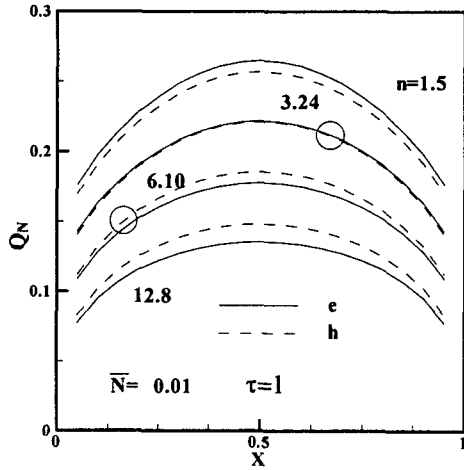


Fig. 10 Effects of n on diffuse(h) or directional(e) north wall total heat flux

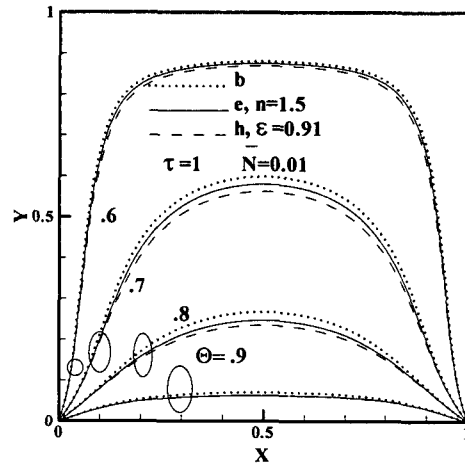


Fig. 12 Dimensionless temperature contours at black (b), diffuse(h), directional(e) hot south wall

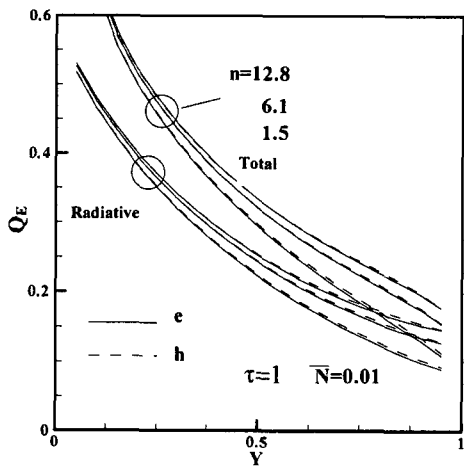


Fig. 11 Effects of n on east wall heat flux at diffuse(h) or directional(e) north wall

커지면 방향면의 “측방” 방사 경향 때문에 난복사면이 커지게 된다.

Fig. 11은 Fig. 9, 10의 조건에서, 동쪽면에 유입되는 무차원 전체 및 복사열유속을 $n=1.5, 6.10, 12.8$ 에서 비교한 결과이다. n 값이 증가할수록 북쪽면에서 반사되어 측면인 동쪽면으로 유입되는 양이 증가하므로, 북쪽면 근처의 동쪽면에

서의 열유속의 크기는 증가하고 있다. n 값이 커질수록 측면열유속에서 방향복사면과 난복사면의 차이가 줄어들고 있다.

3.2 방향성 고온면

\bar{N} , τ 영향은 북쪽면이 방향성 저온면인 경우와 정성적으로 동일한 경향을 보이므로, 발표를 생략한다. 방향복사면과 난복사면이 매질의 온도분포와 열유속에 미치는 영향 및 n 값의 영향을 발표한다.

Fig. 12는 $\bar{N}=0.01$, $\tau=1.0$, $n=1.5$ 에서, 북쪽면 대신 남쪽면이 방향성 고온 면이고 나머지 모든 면이 흑체인 경우에 대한 매질의 온도 분포이다. 경계면에서의 온도는 $T_S=600K$, $T_N=T_E=T_W=300K$ 이고, 기준온도는 $T_r=600K$ 이다. 동일 등온선은 b(흑체), e(방향), h(난) 순으로 남쪽 면으로부터 먼 곳에 위치하고 있다. 남쪽면의 방사율은 흑체인 경우가 가장크고, 동일한 방사율에서 방향복사면이 난복사면에 비해 “전방”으로 방사하는 경향이 크기 때문이다. 방향복사면에 대한 등온선은 난복사와 흑체로 계산한 등온선 사이에 존재하고 있다. 동일 등온선 값이 방향복사면에서 먼 순서로 정리하면 방향복사면이 고온면이든 저온면(Fig. 8)이든, b, e, h이다. 등온선 값이 0.7인 경우, 방향성의 영향이 가장 컸으며, 이때

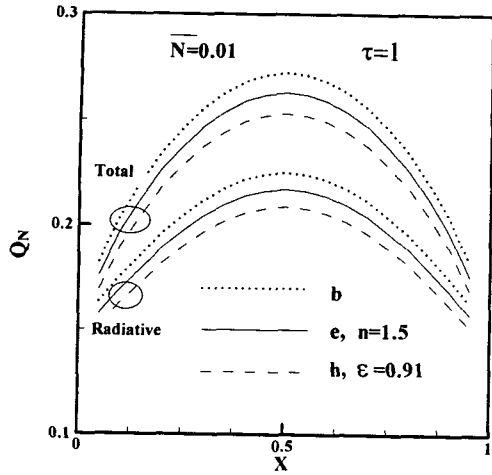


Fig. 13 Dimensionless north wall heat flux at black (b), diffuse(h), directional(e) hot south wall

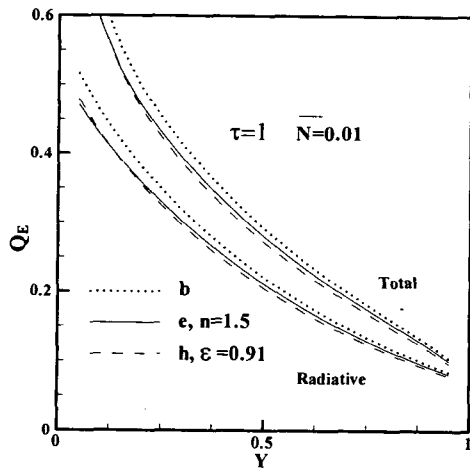


Fig. 14 Dimensionless east wall heat flux at black (b), diffuse(h), directional(e) hot south wall

밀면으로부터의 광학두께는 대략 0.5이다.

Fig. 13 은, Fig. 12의 조건에서, 북쪽면에서의 무차원 전체 및 복사열유속을 비교한 결과이다. $\bar{N}=0.01$, $\tau=1.0$, $n=1.5$ 인 조건에서, 남쪽면이 흑체(점선), 방향복사(실선), 난복사(쇄선)인 경우가 비교되어 있다. 북쪽면 열유속이 큰 순서로 나열하면, 흑체, 방향복사, 난복사면이다. 즉 북쪽면

열유속은, 고온면의 방사율이 클수록 크며, 고온 방향복사면인 경우가 고온 난복사면인 경우에 비해 컸다. 방향복사면이 “측방”보다는 “전방”으로 방사하기 때문이다. 난복사면 열유속에 대한 두 열유속 차이의 최대값을 비교해보면, 방향복사면이 전체열유속에서 약 4.0%, 복사열유속에서 약 4.0% 정도 난복사면에 비해크다.

Fig. 14에서는 Fig. 12의 조건에서, 동쪽면에서의 무차원 전체와 복사열유속을 비교했다. 대칭성에 의해서 서쪽면과 동쪽면에서의 결과는 같다. $\bar{N}=0.01$ 에서 $\tau=1.0$ 인 경우이며 남쪽면이 흑체(점선), 방향복사면(실선), 난복사면(쇄선)인 경우가 비교되어 있다. 흑체, 방향, 난복사면의 순서로 전체열유속의 크기가 크다. 흑체면의 방사량이 다른 경우에 비해서 가장 크다. 남쪽 벽면 근처 외에서는, 흑체, 방향, 난복사면의 순서로 복사열유속의 크기가 크다. $n=1.5$ 에서 방향복사면인 남쪽면의 “전방” 방사율이 방향평균방사율보다 크기 때문이다. 그러나, 남쪽면 근처의 동쪽면에서는 난복사면의 복사열유속의 크기가 방향복사면에 비해서 컸다. $n=1.5$ 에서 방향복사면의 “측방” 방사율이 방향평균방사율보다 작기 때문이다. 난복사면인 경우에 대한 열유속을 기준으로 한 방향복사면과 난복사면의 열유속 차이의 최대값을 비교해 보면, 방향복사면인 경우가 전체열유속에서 약 3.7%, 복사열유속에서 약 3.7% 정도 크다. 남쪽벽면 근처에서는 전체열유속에서 약 0.9%, 복사열유속에서 약 1.6% 정도 난복사면인 경우가 크다.

Figs. 15-16에는, 남쪽면이 방향성 고온면인 경우, n 값이 무차원 전체 및 복사열유속에 미치는 영향이 $\bar{N}=0.01$, $\tau=0.01$ 인 조건에서 발표되어 있다. $T_S=600K$, $T_N=T_E=T_W=300K$ 이고, 기준온도는 $T_r=600K$ 이다. 남쪽면 이외에는 모두 비투과성 흑체면이다. n 값에 관계없이, 방향복사면과 난복사면에 대한 매질의 온도분포가 거의 일치하므로, 발표를 생략한다.

Fig. 15에는 위의 조건에서 n 값이 북쪽면의 무차원 열유속에 미치는 영향이 발표되어 있다. $n=1.5, 6.10, 12.8$ 이며, 이에 대응하는 난방사율은 각각 $\epsilon=0.91, 0.5, 0.3$ 이다. 실선은 남쪽면이 방향복사면인 경우를, 쇄선은 난복사면인 경우를 나타낸다. n 값이 증가하면, 남쪽면의 방사율이

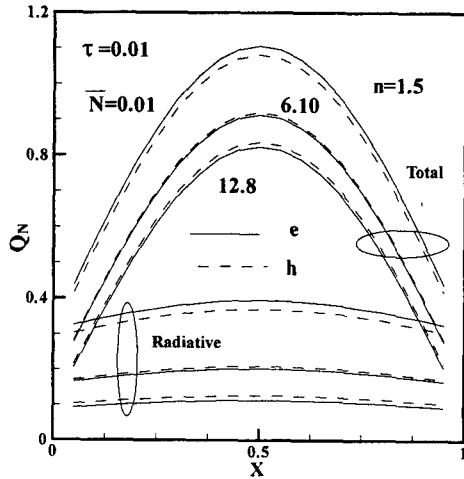


Fig. 15 Effects of n on north wall heat flux at diffuse(h) or directional(e) hot south wall

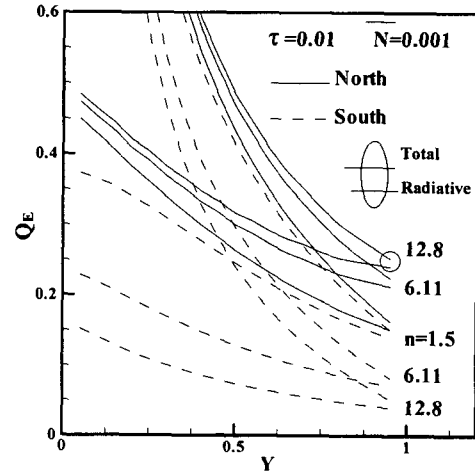


Fig. 17 Dimensionless total and radiative east wall heat flux at directional(e) north or south wall

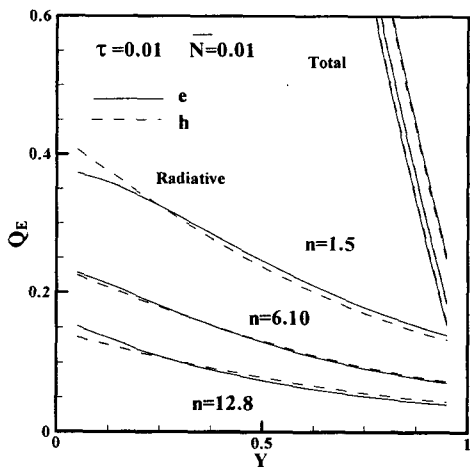


Fig. 16 Effects of n on east wall heat flux at diffuse(h) or directional(e) hot south wall

감소하므로 북쪽면으로 유입되는 열유속은 감소하고 있다. n 이 6.10보다 크면, 남쪽면이 방향복사면인 경우 북쪽면으로 유입되는 열유속은 난복사면인 경우보다 작아지게 된다. n 이 6.10보다 크면 방향복사면의 “전방” 방사율이 방향평균방사율(난방사)보다 작기 때문이다.

Fig. 16에는, Fig. 15의 조건에서 n 값이 동쪽면에서의 전체 및 복사열유속에 미치는 영향이 발

표되어 있다. $n=1.5, 6.10, 12.8$ 의 경우에서, 실선은 방향복사면을, 쇄선은 난복사면을 나타낸다. n 값이 증가하면, 방사율이 감소하므로 열유속은 감소하고 있다. 전체열유속의 경우 난복사면으로 가정하여 구한 값은 방향복사면에 대한 값과 차이가 적었다. 그러나 복사열유속은 다음의 경향을 보인다. 약 $n=6.10$ 보다 크면, 방향복사면의 “전방” 방사율이 방향평균방사율(난방사)보다 작으나 “측방” 방사율이 방향평균방사율에 비해 크므로, 고온면인 남쪽면 근처의 측벽에서는 방향복사면의 복사열유속이 난복사면인 경우보다 크고, 남쪽면으로부터 먼 곳에서는 난복사면인 경우가 크다. $n=1.5$ 인 경우, 복사열유속은 $n=6.10$ 보다 큰 경우에서의 경향과 반대 경향을 보인다.

Fig. 17은 $\bar{N}=0.001, \tau=0.01$ 에서 북, 남쪽면 중 하나가 방향복사면일 때 동쪽면의 전체 및 복사열유속을 비교했다. $T_s=600K, T_N=T_E=T_W=300K$ 이다. 동일 선형 및 n 에서 위와 아래 결과는 각각 무차원 전체열유속과 복사열유속이다. 방향복사면이 북쪽면인 경우에는 실선으로 남쪽면인 경우에는 쇄선으로 표시하였다. 방향복사면 이외의 모든 면은 흑체이다. 동쪽면 열유속은 북쪽면이 방향복사면인 경우가 남쪽면이 방향복사면인 경우에 비해 크다. 북쪽면이 방향복사면인 경우는 n 값이 증가하면 방사율이 증가하여 동쪽면 열유

속이 증가하는 반면, 남쪽면이 방향복사면인 경우는 남쪽면의 n 값이 증가하면 방사율이 감소하여 동쪽면 열유속이 감소하고 있다.

4. 결론

참여매질을 가진 무한 정사각형계의 전도-복사 열전달에 방향복사면이 미치는 영향을 직접구분 중좌법을 사용하여 계산했으며, 발표된 조건에서 결과를 요약하면 다음과 같다.

방향복사면의 평균방사 및 반사율을 사용한 난복사 계산이 방향복사면의 열전달 현상을 비교적 잘 대표한다. \bar{N} 가 0.01 보다 작아야 복사면에 따른 차이가 나타나며, \bar{N} 가 작을수록 차이가 증가했다. 대략 $\tau=0.1$ 보다 작으면 경계면 열유속에서, $\tau=1$ 보다 크면 매질의 온도 분포에서 차이가 있었다. $n=1.5$ 인 경우, 방향복사면에 대한 등온선은 난복사면에 대한 등온선에 비해 방향복사면으로부터 거리가 먼 곳에 등온선이 위치했다. 그리고, 열유속은 방향복사면인 경우가 크나, 북쪽면이 방향복사면인 경우 동쪽면에서, 남쪽면이 방향복사 고온면인 경우 인접 측벽에서 난복사면인 경우가 크다. n 값이 대략 6.10 보다 크면 경향이 바뀌어서, 난복사면에 대한 등온선이 더 저온영역으로 확장되어 있다. 또, 난복사면에 대한 열유속이 방향복사면인 경우보다 크나, 남쪽면이 방향복사 고온면인 경우 인접 측벽에서 경향이 역전되었다.

후 기

이 논문은 1999년 한국학술진흥재단의 학술연구비(KRF-99-041-E00006)에 의해서 지원되었으며, 저자는 지원에 대해서 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Siegel, R., and Howell, J. R., 1993, *Thermal Radiation Heat Transfer*, Hemisphere Publishing Co., Washington D. C.
- (2) Kim, E. Y., Park, S. C., Kim, B. M., and Lee, D. B., 1999, "The Measurement Method of Thermal Conductivity and Diffusivity of Thin Paint Layer Sprayed on Solid Surface," *Trans. of KSME(B)*, Vol. 23, No. 3, pp. 311~319.
- (3) Yuen, W. and Takara, E. E., 1988, "Analysis of Combined Conductive-Radiative Heat Transfer in a Two-dimensional Rectangular Enclosure With a Gray Medium," *J. of Heat Transfer*, Vol. 110, pp. 468~474.
- (4) Kim, T. Y. and Baek, S. W., 1991, "Analysis of Combined Conductive and Radiative Heat Transfer in a Two-Dimensional Rectangular Enclosure Using the Discrete Ordinate Method," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 34, No. 9, pp. 2265~2273.
- (5) Byun, K. H. and Han D. C., 2001, "Effects of a Specularly Reflecting Wall in an Infinite Square Duct on Conductive- Radiative Heat Transfer," *Trans. of KSME (B)*, Vol. 25, No. 10, pp. 1451~1458.
- (6) Byun, K. H., Smith, T. F. and Sanchez, A., 1997, "View Factors for Infinite Rectangular Duct Enclosing a Transparent Medium by the Discrete Ordinates Method," *KSME Int. Journal*, Vol. 11, No. 3, pp. 331~338.
- (7) Byun, K. H. and Smith, T. F., 1997, "View Factors for Rectangular Enclosures Using the Direct Discrete-Ordinates Method," *J. of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 11, No.4, pp. 593~595.
- (8) Sanchez, A. and Smith, T. F., 1992, "Surface Radiation Exchange for Two - Dimensional Rectangular Enclosures Using the Discrete ordinates Method," *J. of Heat Transfer*, Vol. 114, pp. 465~472.

(1) Siegel, R., and Howell, J. R., 1993, *Thermal*