

〈논 문〉

타원주격자를 사용한 고체면에서의 복사열전달의 방향제어 — 에너지 집중 방향제어 —

고 흥* · 増田英俊** · 조병수*** · 강영규****

(1995년 9월 13일 접수)

Directional Control of Radiation Heat Transfer from Solid Surface Using Grating Composed of Parallel Elliptical Cylinders — Directional Control of Energy Concentration —

Heung Kou, Hidetoshi Masuda, Byung Soo Cho and Yung Kyu Kang

Key Words: Thermal Radiation(열복사), Radiation Heat Transfer Control(복사열전달제어), Thermophysical Property(열물성), Directional Control(방향제어), Surface Radiation(표면복사), Specular Reflection(거울반사), Grating(격자)

Abstract

A grating composed of elliptical cylinders (GEC), specially designed, is applicable to control of radiation heat transfer from a heated surface, as reported in our previous work. In this study, an analysis of radiation heat transfer is performed for a physical model in which the GEC is placed in front of a heated black-base surface and the major axes of the elliptical cylinders are inclined at a certain angle from the normal to the row of elliptical cylinders. Numerical solutions are obtained. Variations of the direction and the radiative energy concentration with slant angle of the major axis are shown for some parameters. It is verified that the GEC is able to widely change the direction of radiation heat transfer from the heated surface.

기 호 설 명	
a : 타원의 단축 또는 장축의 절반량 (Fig. 2) b : 타원의 장축 또는 단축의 절반량 (Fig. 2) i : 타원주상의 i 번째 격자점(식 (16)) $I(\theta, \beta)$: 타원주 표면의 복사강도(Fig. 2) $I(\xi, \eta)$: 가상선의 복사강도(Fig. 2) I_{bc} : 온도 T_c 의 흑체 복사강도	I_{bw} : 온도 T_w 의 흑체 복사강도 n : 수치 계산 반복 횟수(식 (16)) T_c : 타원주 온도 T_w : 흑체 전열면의 온도 T_∞ : 주위 외계의 온도 x, y : 타원주의 직각 좌표(Fig. 2) x_0 : 타원주 중심간 거리 β : 타원주 표면의 접선에서 그은 수선과 이루는 각 β^+, β^- : 입사선의 상·하한 각(Fig. 2) γ_0 : 타원주의 타원축비= b/a δ : Dirac delta 함수 $\Delta\beta_1, \Delta\theta_1$: 분할각 크기

*회원, 대불대학교 기계공학과

**日本 東北大學 流體科學研究所

***회원, 전북대학교 대학원 기계공학과

****회원, 전북대학교 기계공학과

$\Delta\eta_L$: 평균 복사에너지 집중각(식 (24))
$\varepsilon(\xi, \eta)$: 겉보기 국소 지향방사율(식 (18))
$\varepsilon_a(\eta)$: 겉보기 지향방사율(식 (19))
$\varepsilon_{a,h}$: 겉보기 반구방사율(식 (20))
ε_c	: 타원주의 반구방사율(식 (3))
$\zeta(\theta, \beta)$: 무차원 복사강도(Fig. 2, 식 (5))
η	: 가상선의 수선과 이루는 각(Fig. 2)
η_0	: 에너지전달 중심방향의 각도(식 (21))
η_L	: 앞선 결과 ^(8,9) 의 에너지 집중각
η_L^+	: $\eta_0 \leq \eta \leq \pi/2$ 간의 에너지 집중각(식 (22), Fig. 3)
η_L^-	: $-\pi/2 \leq \eta \leq \eta_0$ 간의 에너지 집중각(식 (23), Fig. 3)
θ	: 타원주의 각좌표(Fig. 2)
ξ	: 무차원 좌표 $= x/a$
ξ_0	: 무차원 거리 $= x_0/a$
ρ_c	: 타원주의 반구방사율
ρ_c^d, ρ_c^s	: 타원주의 난반사율과 거울반사율
σ	: Stefan boltzmann 상수
τ	: 복사강도비 또는 온도비 $= T_c/T_w$ (식 (5))
ϕ	: 전열면에 수직인 선과 타원의 장축과 이루는 각도(Fig. 2)

하첨자

b	: 흑체
c	: 실린더
w	: 전열면 기판
∞	: 주위 외계
1, 2	: 타원주 1, 2

상첨자

d	: 난반사
s	: 거울반사

1. 서 론

최근 과학기술의 발전은 급속도로 변모하고 있다. 이 중에서 열전달제어라는 새로운 관점에서의 관심이 높아지고 있으며, 이 제어기술의 발전 경유에 대한 설명이 Aihara⁽¹⁾의 보고서에 상세히 쓰여져 있다. 여기에 발 맞추어 복사열전달제어 부문의 연구도 매우 흥미있는 분야이다.

복사열전달은 대류 열전달과 달리 몇 가지 독특한 특성을 가지고 있다. 예를 들면 파장 특성, 산란 또는 반사특성, 원거리 작용⁽²⁾ 등이며, 지금까

지 이들의 특성을 이용한 독특한 몇 편의 연구, 파장특성을 응용한 Hirano⁽³⁾의 열전달촉진, 산란 또는 원거리 작용을 이용한 Mori⁽⁴⁾의 관로내의 열전달촉진, Echigo⁽⁵⁾의 새로운 열교환기술, Masuda, ⁽⁶⁾ Black⁽⁷⁾에 의한 반사 특성을 이용한 복사열전달 제어법 등이 있다.

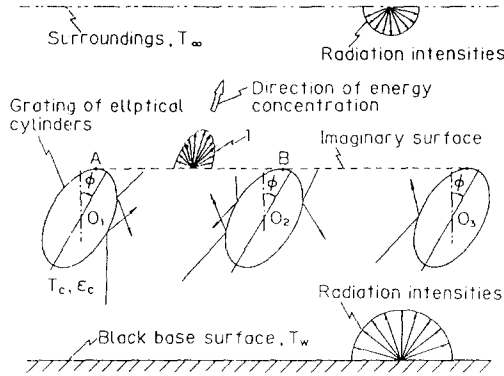
위의 반사 특성을 이용한 복사열전달의 연구는 전열면 표면에 V자 형의 적은 홈을 새겨 1열로 배열하고 이 홈의 측벽면의 거울반사를 이용, 복사에너지 전달방향을 변화시킨 것이다. 이는 복사열전달의 제어기법이라는 관점에서 매우 독특한 아이디어이지만 이 기구는 실용면에서 불편한 점이 많다.

본 연구에서는 이런 불편한 점을 개선한 복사열전달의 제어법에 관한 이론적 연구이다. 즉, 전열면과 일체로 된 열전달제어기구를 전열면에서 잘라 격자화한 제어판을 전열면 앞에 배치하여 복사열전달을 제어하려는 방법이다. 이는 전열면으로부터 나온 복사에너지가 임의의 방향으로 설치된 타원주 제어판을 통과할 때 타원주 표면의 거울반사에 의하여 특정방향으로 방향 전환될 것이 예상된다. 저자는 앞선 연구에서 전열면으로부터 분리한 격자상의 열전달제어기구를 사용하는 복사열전달제어법을 제안, 원주격자⁽⁸⁾와 타원주격자⁽⁹⁾에 관한 연구 결과를 보고하였다. 원주격자에서는 전열면 표면의 V자 홈 기구의 불편함을 개선하고, 보다 폭넓은 제어성이 있다는 것을 보였고, 후자에서는 전열면의 수직 전방방향의 에너지 집중을 다루어 에너지 집중도와 열전달 성능의 관점에서 원주격자보다 우수한 점을 밝혔다. 그러나 제어성이라는 관점에서 고려하면 임의의 방향으로 격자가 회전가능하다는 점은 매우 유리하며, 이 격자의 회전에 의하여 간단히 복사에너지의 전달방향을 바꿀 수 있다는 것은 매우 흥미가 있는 일이다.

본 연구의 목적은 이렇게 타원주를 임의의 방향으로 회전시켜 방향제어가 얻어지는가를 수치해석을 통해 자세히 조사하고자 한다. 즉, 타원주격자에 의해 제어된 복사에너지의 겉보기 지향방사율을 구해 제어 특성으로 중요한 에너지전달 중심방향, 겉보기 반구방사율 및 복사에너지 집중각 등을 기하학적 인자를 통하여 밝히고자 한다.

2. 복사 전열계의 물리 모델

전열면에서 나오는 복사선을 타원주격자를 이용



1 Radiation intensities

Fig. 1 Physical model of radiation heat transfer control by a grating elliptical cylinders

하여 복사열전달의 방향제어에 대한 물리 모델을 Fig. 1에 보여 주고 있다. 각 타원주의 배열은 앞선 결과⁽⁹⁾와 같이 하였으며 다른 점은 각 타원의 장축(또는 단축)을 회전 가능하게 한 것이다. 즉 각 타원의 장축(이하에서는 타원축)을 같은 방향으로 회전각 ϕ 만큼 경사시킨 타원주 열과 흑체 기관으로 구성된 복사 전열계를 물리적 모델로 했다. 이와 같이 타원축을 경사지계함에 따라 가상선(점선) 위의 복사강도의 분포가 Fig. 1에 개략적으로 표시한 바와 같이 경사각 ϕ 의 영향으로 임의의 방향으로 강한 복사강도의 분포를 갖는 형태로 바뀌게 되어 복사에너지 집중의 방향이 변화될 수 있는 것이 본 모델의 특징이다.

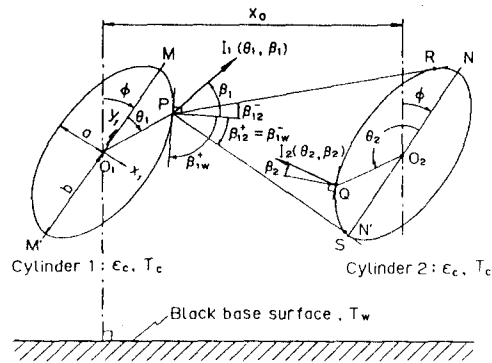
3. 해석

3.1 타원주 표면의 복사강도의 기초방정식

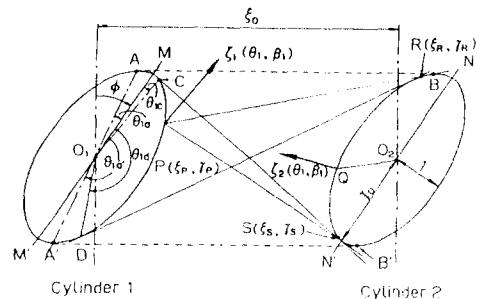
먼저 경사시킨 타원주격자 표면의 복사강도의 해석을 해야 하지만 기초방정식의 유도는 앞선 결과⁽⁹⁾와 비슷한 곳은 가능한 한 생략하고 간단히 서술하고자 한다.

Fig. 2에 좌표계와 기호를 보여주고 있다. 본 물리적 모델에서 타원주는 길이가 무한히 길고, 회색체로써 반구방사율 ϵ_c , 반사는 거울반사와 난반사의 두 성분($\rho = \rho_c^g + \rho_c^d$)으로 이루어지며, 계의 밖에서 입사 복사는 무시한다($T_\infty = 0K$ 으로 가정). 전열면의 표면온도는 T_w 모든 타원주의 표면온도는 T_c 로 하고, 이들의 관계는 $T_c \leq T_w$ 로 한다.

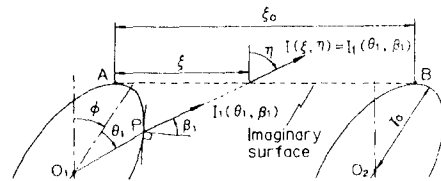
각 타원은 그 중심축을 중심으로 회전가능한 것으로 한다. Fig. 2에 보여주는 바와 같이 기관에



(a)



(b)



(c)

Fig. 2 Coordinate system and symbols for the analysis

수직한 선을 기준으로 회전한 타원축과 이 기준선과 이루는 각을 ϕ 로 한다. 모든 타원주의 ϕ 는 동일하며, 타원주 타원의 단축과 장축을 각각 $2a$ 와 $2b$ 로 하고 타원주의 중심간 거리를 x_0 로 한다.

본 물리적 모델에도 앞선 결과⁽⁹⁾와 같이 두 개의 타원주와 흑체 전열면의 해석을 행하면 되며, Fig. 2(a)와 같이 그 타원주를 1과 2, 그 중심을 각각 O_1 과 O_2 로 하고 이들에 해당하는 여러 물리량은 각각 하첨자 1과 2를 붙인다. 각좌표 θ_1, θ_2 는 Fig. 2(a)와 같이 타원축(직선 MM' 와 NN')을 기준으로 하고 시계방향을 정(+)으로 한다. 타원주 표면상의 방향을 나타내는 각도 β_1 과 β_2 는 앞선 결과^(6,9)의 경우와 같이 타원주의 점선에서 세운 법선을 기

준선으로 하여 쥘 각이며, 타원주 1의 중심 O_1 을 원점으로 단축방향을 x_1 축, 장축방향을 y_1 축으로 한다.

타원주 1상의 임의의 각 θ_1 의 점 P에서 각 β_1 방향의 복사강도 $I_1(\theta_1, \beta_1)$ 및 타원주 2상의 Q점의 복사강도 $I_2(\theta_2, \beta_2)$ 의 기초방정식은 다음 식이 된다. ^(10,11)

$$I_1(\theta_1, \beta_1) = \varepsilon_c I_{bc} + \frac{1}{2} \rho_c^{\text{eff}} \left[\int_{\beta_{1\bar{z}}}^{\beta_{1z}} I_2(\theta_2, \beta_2) \cos \beta_1' d\beta_1' \right. \\ \left. + I_{bw} (\sin \beta_{1w}^+ - \sin \beta_{1w}^-) \right] \\ + \rho_c^{\text{eff}} \left[\int_{\beta_{1\bar{z}}}^{\beta_{1z}} I_2(\theta_2, \beta_2) \delta(\beta_1' - \beta_1) d\beta_1' \right. \\ \left. + \int_{\beta_{1w}}^{\beta_{1\bar{w}}} I_{bw} \delta(\beta_1' - \beta_1) d\beta_1' \right] \quad (1)$$

$$I_2(\theta_2, \beta_2) = \varepsilon_c I_{bc} + \frac{1}{2} \rho_c^{\text{eff}} \left[\int_{\beta_{2\bar{z}}}^{\beta_{2z}} I_1(\theta_1, \beta_1) \cos \beta_2' d\beta_2' \right. \\ \left. + I_{bw} (\sin \beta_{2w}^+ - \sin \beta_{2w}^-) \right] \\ + \rho_c^{\text{eff}} \left[\int_{\beta_{2\bar{z}}}^{\beta_{2z}} I_1(\theta_1, \beta_1) \delta(\beta_2' - \beta_2) d\beta_2' \right. \\ \left. + \int_{\beta_{2w}}^{\beta_{2\bar{w}}} I_{bw} \delta(\beta_2' - \beta_2) d\beta_2' \right] \quad (2)$$

위의 식에서 β_{1z}^+ 와 $\beta_{1\bar{z}}$ 는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 타원주 2로부터 타원주 1의 P점으로 열복사선이 입사하는 상한과 하한을 나타내는 각도, 즉 접선 PR과 PS와 이루는 각이고, β_{1w}^+ 와 β_{1w}^- 는 기관에서 P점으로 입사하는 복사선의 상한과 하한을 나타내는 각이다. 또 그림에서는 생략하였으나 β_{2z}^+ 와 $\beta_{2\bar{z}}$ 및 β_{2w}^+ 와 β_{2w}^- 는 타원주 2상의 점 Q에 있어서 타원주 1 및 기관면에서 들어오는 입사선의 상한과 하한을 나타내는 각이다.

타원주의 반구반사율 ρ_c 는 반구방사율 ε_c 와 다음과 같은 관계에 있다.

$$\rho_c = \rho_c^s + \rho_c^d = 1 - \varepsilon_c \quad (3)$$

흑체의 복사강도는 다음 식으로 정의 한다.

$$I_{bc} = \frac{\sigma T_c^4}{\pi}, \quad I_{bw} = \frac{\sigma T_w^4}{\pi} \quad (4)$$

식 (1)과 (2)를 무차원화하기 위하여 다음의 무차원량을 도입한다.

$$\zeta_1(\theta_1, \beta_1) = \frac{I_1(\theta_1, \beta_1)}{I_{bw}} \\ \zeta_2(\theta_2, \beta_2) = \frac{I_2(\theta_2, \beta_2)}{I_{bw}} \\ \tau = \left(\frac{I_{bc}}{I_{bw}} \right)^{1/4} = \frac{T_c}{T_w} \quad (5)$$

식 (5)를 식 (1)과 식 (2)에 대입하여 다음의 무차원 복사강도의 기초방정식을 얻는다.

$$\zeta_1(\theta_1, \beta_1) = \varepsilon_c \tau^4 + \frac{1}{2} \rho_c^{\text{eff}} \left[\int_{\beta_{1\bar{z}}}^{\beta_{1z}} \zeta_2(\theta_2, \beta_2) \cos \beta_1' d\beta_1' \right. \\ \left. + (\sin \beta_{1w}^+ - \sin \beta_{1w}^-) \right] \\ + \rho_c^s \int_{\beta_{1\bar{z}}}^{\beta_{1z}} \zeta_2(\theta_2, \beta_2) \delta(\beta_1' - \beta_1) d\beta_1' \\ + \int_{\beta_{1w}}^{\beta_{1\bar{w}}} \delta(\beta_1' - \beta_1) d\beta_1' \quad (6)$$

$$\zeta_2(\theta_2, \beta_2) = \varepsilon_c \tau^4 + \frac{1}{2} \rho_c^{\text{eff}} \left[\int_{\beta_{2\bar{z}}}^{\beta_{2z}} \zeta_1(\theta_1, \beta_1) \cos \beta_2' d\beta_2' \right. \\ \left. + (\sin \beta_{2w}^+ - \sin \beta_{2w}^-) \right] \\ + \rho_c^s \int_{\beta_{2\bar{z}}}^{\beta_{2z}} \zeta_1(\theta_1, \beta_1) \delta(\beta_2' - \beta_2) d\beta_2' \\ + \int_{\beta_{2w}}^{\beta_{2\bar{w}}} \delta(\beta_2' - \beta_2) d\beta_2' \quad (7)$$

이 기초방정식 $\zeta_1(\theta_1, \beta_1)$ 과 $\zeta_2(\theta_2, \beta_2)$ 의 유도는 거울반사 성분과 관한 Sparrow의 교환계수법⁽¹²⁾이나 Image법⁽¹³⁾을 쓰지 않고, Masuda법⁽¹⁴⁾을 취하면 매우 간편하다.

기초방정식 (6)과 (7)은 타원주 1과 2상의 복사강도가 대칭인 앞선 결과⁽⁹⁾와 달리 타원주가 비대칭이므로 $\zeta_1(\theta_1, \beta_1)$ 과 $\zeta_2(\theta_2, \beta_2)$ 를 미지 함수로 하는 연립 적분방정식이 된다.

3.2 기초방정식의 수치해법

식 (6)과 (7)의 연립 적분방정식의 해 $\zeta_1(\theta_1, \beta_1)$ 과 $\zeta_2(\theta_2, \beta_2)$, 즉 두 개의 타원주상의 무차원 복사강도의 수치해는 다음과 같이 구한다.

Fig. 2(b)에 보여주는 바와 같이 타원주 1과 2에 접하는 접선의 접점을 A, B 및 A', B'로 한다. 먼저 타원주 1을 생각, 타원축에서 점 A와 A'가 이루는 각을 각각 θ_{1a} 와 $\theta_{1a'}$ 로 할 때 해를 구해야 하는 범위는 $\theta_{1a} \leq \theta_1 \leq \theta_{1a'}$ 이고, 해를 구하는 방법은 뒤에 설명되는 반복법으로 구하였다.

기초방정식 (6)과 (7)의 각도 관계식 중에서 대표적인 것만을 기술하고자 한다. Fig. 2(b)에 보여주는 것처럼 타원주 1과 2에 접하는 타원주 1상의 접점을 C, D로 한다. 또 점 P에서 타원주 2에 당긴 접선의 접점을 R, S로 하고, 점 P, R, S의 위치를 각각 $P(\xi_P, \gamma_P)$, $R(\xi_R, \gamma_R)$, $S(\xi_S, \gamma_S)$ 로 한다. 타원축에서 선 O_1C , O_1D 와 이루는 각을 각각 θ_{1c} , θ_{1d} 로 하면, 예를들면, $\theta_{1c} \leq \theta_1 \leq \theta_{1d}$ 사이에서는 식 (6)과 (7)에 나타난 여러 각도 관계는 다음과 같다.

$$\beta_{12}^- = -\frac{\pi}{2} - \tan^{-1}\left(\frac{\gamma_R - \gamma_P}{\xi_R - \xi_P}\right) + q_1 \quad (8)$$

$$\beta_{12}^+ = -\frac{\pi}{2} - \tan^{-1}\left(\frac{\gamma_S - \gamma_P}{\xi_S - \xi_P}\right) + q_1 \quad (9)$$

$$\beta_{1w}^- = \beta_{12}^- \quad (10)$$

$$\beta_{1w}^+ = \frac{\pi}{2} \quad (11)$$

여기에서 q_1 은

$$\theta_{1a} \leq \theta_1 \leq \frac{\pi}{2} \text{에서 } q_1 = \pi - \tan^{-1}\left(\frac{\gamma_0^2 \xi_P}{\gamma_P}\right) \quad (12)$$

$$\frac{\pi}{2} < \theta_1 \leq \theta_{1a}' \text{에서 } q_1 = -\tan^{-1}\left(\frac{\gamma_0^2 \xi_P}{\gamma_P}\right) \quad (13)$$

이다. 또 θ_{1a} 와 θ_{1a}' 는 다음식으로 계산한다.

$$\theta_{1a} = \tan^{-1}\left(\frac{\tan \phi}{\gamma_0^2}\right) - \phi \quad (14)$$

$$\theta_{1a}' = \pi + \tan^{-1}\left(\frac{\tan \phi}{\gamma_0^2}\right) - \phi \quad (15)$$

반복법에 의한 기초방정식의 해법은, 먼저 식 (6)의 우변항 $\xi_2(\theta_2, \beta_2)$ 의 제0차 근사치를 적당하게 주어서, 식 (8)~(15)의 여러 각도 관계식을 이용, 동식의 우변을 계산하여 ξ_1 의 제1차 근사치를 얻는다. 다음에 ξ_1 의 제1차 근사치를 식 (7)의 우변에 대입하여 계산하면 ξ_2 의 제1차 근사치를 얻게 된다. 또 이 ξ_2 의 제1차 근사치를 다시 (6)식의 우변에 대입함으로써 제2차 근사치 ξ_1 을 구한다. 같은 방법으로 ξ_1 의 제2차 근사치를 사용 ξ_2 를 구한다. 이상과 같은 계산과정을 반복하여 앞선 결과⁽⁹⁾와 같은 다음의 수렴조건을 만족할 때까지 수치 계산을 반복하면 수치해 ξ_1 과 ξ_2 가 구하여진다.

$$\left| \frac{\xi_i^{(n+1)} - \xi_i^{(n)}}{\xi_i^{(n)}} \right| < 10^{-4} \quad (16)$$

단, $i=1, 2, \dots, n=0, 1, 2, \dots$

여기서, i 는 타원주상의 i 번째 격자점, n 은 수치 계산 반복횟수를 의미한다.

계산상 분할각 크기 $\Delta\theta_1$ 와 $\Delta\beta_1$ 은 각각 $\Delta\theta_1 = \pi/200$, $\Delta\beta_1 = \pi/200$ 로 했다.

3.3 에너지 집중방향과 집중도

타원주격자를 통과하는 복사에너지 분포, 에너지 집중각 등은 앞선 결과⁽⁹⁾와 같이 흑체 전열면 기관에서 방사되어 간섭 없이 직접 격자의 사이를 통하여 빠져나가는 복사선과 타원주 표면의 간섭에 의하여 여러 번 반사한 후 통과하는 열복사선을 이용하여 다음과 같이 구한다. 단, 앞선 결과⁽⁹⁾와 다른

점은 타원주의 경사각 ϕ 에 대응하는 에너지 전달의 집중방향이 변하는 것에 주의를 요한다.

Fig. 2(c)와 같이 두 개의 타원주에 접하는 접선 AB로 나타낸 가상선(접선)을 생각한다. 이 가상선 AB를 지나는 복사선으로부터 다음에 정의되는 몇가지 물리량이 구하여진다. 점 A를 기점으로 접선 AB상에서 x 축을 잡고, AB간 거리(타원주 중심축간 거리)를 x_0 로 한다. 또한 타원주의 타원축 비를 γ_0 로 하고[Fig. 2(c)참조], 무차원량을 다음 식으로 정의한다.

$$\xi = \frac{x}{a}, \quad \xi_0 = \frac{x_0}{a}, \quad \gamma_0 = \frac{b}{a} \quad (17)$$

각도 η 는 가상선에 수직선을 세워 Fig. 2(c)와 같이 쥘 각좌표이다. 가상선을 횡단하는 임의의 복사선의 강도를 $I(\xi, \eta)$ 로 하면, 가상선상의 겉보기 국소 지향방사율 $\varepsilon(\xi, \eta)$ 는 앞선 결과⁽⁸⁾의 정의와 같이 다음 식으로 나타낸다.

$$\varepsilon(\xi, \eta) = \frac{I(\xi, \eta)}{I_{bw}} = \zeta(\xi, \eta) \quad (18)$$

또, 가상선상의 겉보기 지향방사율 $\varepsilon_a(\eta)$ 와 겉보기 반구방사율 $\varepsilon_{a,h}$ 를 다음 식으로 정의한다.

$$\varepsilon_a(\eta) = \frac{1}{\xi_0} \int_0^{\xi_0} \varepsilon(\xi, \eta) d\xi \quad (19)$$

$$\varepsilon_{a,h} = \frac{1}{2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \varepsilon_a(\eta) \cos \eta d\eta \quad (20)$$

타원주를 경사각 ϕ 만큼 경사시켰을 경우 복사에너지의 전달방향이 전열면 기관에 수직방향이 아니므로 전달방향을 검토하여, 에너지 집중각을 새롭게 정의하지 않으면 안된다. 먼저 Fig. 3에 보인 것과 같이 가상선을 빠져 나가는 복사에너지 전달

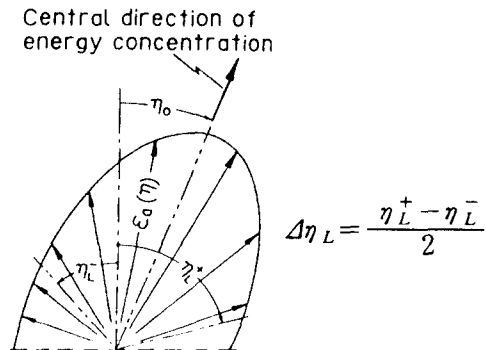


Fig. 3 Apparent direction emissivity $\varepsilon_a(\eta)$ and concentration angles

중심방향각 η_0 를 다음 식으로 정의한다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{a,h} &= \int_{-\pi/2}^{\eta_0} \varepsilon_a(\eta) \cos \eta \, d\eta \\ &= \int_{\eta_0}^{\pi/2} \varepsilon_a(\eta) \cos \eta \, d\eta \end{aligned} \quad (21)$$

η_0 는 $\phi > 0$ 이면 $\eta_0 > 0$ 이고, $\phi < 0$ 이면 $\eta_0 < 0$ 으로 된다. 또 $\phi = 0$ 인 앞선 결과⁽⁹⁾와는 달리, 본 연구에서는 $\varepsilon_a(\eta)$ 의 각도분포는 η_0 를 중심축으로 비대칭이므로 에너지 집중정도를 나타내는 각도 η_L^+ 와 η_L^- 를 다음 식으로 정의한다.

$$0.9\varepsilon_{a,h} = \int_{\eta_0}^{\eta_L^+} \varepsilon_a(\eta) \cos \eta \, d\eta \quad (22)$$

$$0.9\varepsilon_{a,h} = \int_{\eta_L^-}^{\eta_0} \varepsilon_a(\eta) \cos \eta \, d\eta \quad (23)$$

즉, 각도 $(\eta_L^+ - \eta_0)$ 는 η_0 에서 η 의 양(+)방향으로 켜 $\eta_0 \leq \eta \leq \pi/2$ 사이에 전달되는 에너지의 90% 또 각도 $(\eta_0 - \eta_L^-)$ 은 η_0 에서 η 의 음(-)방향으로 켜 $-\pi/2 \leq \eta \leq \eta_0$ 간에 전달되는 에너지의 90%를 포함하는 각도로 정의한다. η_0 , η_L^+ , η_L^- 는 $\varepsilon_{a,h}$ 가 계산된 후 식 (21), (22) 및 (23)에 의하여 수치 해석적으로 구해진다.

다음에 앞선 결과⁽⁹⁾의 에너지 집중각 η_L 과 비교하기 위하여 본 연구에서는 평균 복사에너지 집중각 $\Delta\eta_L$ 을 다음과 같이 정의한다.

$$\Delta\eta_L = \frac{(\eta_L^+ - \eta_0) + (\eta_0 - \eta_L^-)}{2} = \frac{\eta_L^+ - \eta_L^-}{2} \quad (24)$$

$\Delta\eta_L$ 은 η_0 를 중심으로 양(+)·음(-) 양측에서 켜 집중각의 평균치를 나타내고, 이 값은 물론 앞선 결과⁽⁹⁾의 η_L 과 같이 적을수록 에너지 집중도가 좋은 것을 의미한다.

4. 계산결과 및 고찰

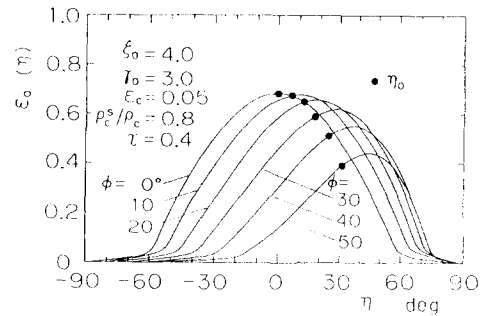
타원주격자에 의한 복사열전달세어에서는 그 특성에 영향을 주는 인자가 기하학적 인자와 물리학적 인자가 있다. 기하학적 인자로는 타원주간 무차원 거리 $\xi_0 (=x_0/a)$, 타원주의 타원축비 $\gamma_0 (=b/a)$ 및 경사각 ϕ 가 있고, 물리학적 인자는 타원주의 반구방사율 ε_c , 반사율비 ρ_c^s/ρ_c 및 온도비(복사강도비) $\tau (=T_c/T_w)$ 로 매우 많다. 따라서 이 영향들을 일일이 고찰한다는 것은 대단한 일이므로 여기서는 주로 기하학적 인자, 특히 ϕ 에 의한 영향을 중심으로 설명하려고 한다. 이 외 인자들의 영

향은 앞선 결과^(8,9)에 밝힌 것과 거의 유사하다고 생각해도 좋다. 그리고 제어기구조 타원주격자를 사용 할 때 기하학적 인자 중 ξ_0 와 γ_0 는 어느 정도의 크기가 좋은가를 고려하여 대표값으로 $\xi_0=4$, $\gamma_0=3$ 을 선택하였다. 또 물리적 인자에 대해서는 타원주의 반구방사율 ε_c 는 금속을 고도 연마^(15,16)한 지방사율을 참고로 한 값으로 $\varepsilon_c=0.05$ 를 이용하였고, ρ_c^s/ρ_c 의 값은 실용성을 고려한 추정값으로 $\rho_c^s/\rho_c=0.8$, 또 τ 는 앞선 결과⁽⁸⁾에서 에너지 집중에 유효한 값을 참고하여 $\tau=0.4$ 를 대표값으로 각각 하고, 결과 및 고찰을 이 인자들의 값으로 주로 논한 것을 미리 말해 둔다.

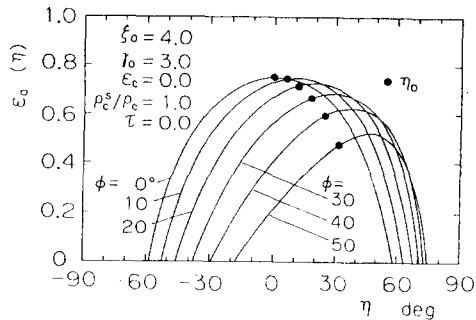
4.1 겹보기 지향방사율 $\varepsilon_a(\eta)$ 의 변화

타원주격자를 경사각 ϕ 만큼 기울였을 때에 제어 효과가 어느 정도 일어날 것인가를 검토하는 경우에 겹보기 지향방사율 $\varepsilon_a(\eta)$ 의 분포경향을 고찰하는 것은 중요하다. Fig. 4(a), (b)에는 대표적인 $\varepsilon_a(\eta)$ 의 변화를 보였다.

Fig. 4(a)는 $\varepsilon_a(\eta)$ 의 각도 분포를 경사각 ϕ 에 의한 영향을 보인 것이다. 각각의 인자값들은 대표값(실용치라 칭함) $\xi_0=4.0$, $\gamma_0=3.0$, $\varepsilon_c=0.05$,



(a) $\varepsilon_c=0.05$, $\rho_c^s/\rho_c=0.8$, $\tau=0.4$



(b) $\varepsilon_c=0$, $\rho_c^s/\rho_c=1.0$, $\tau=0.0$

Fig. 4 $\varepsilon_a(\eta)$ vs. η curves for slant angles ϕ

$\rho_c^s/\rho_c=0.8$, $\tau=0.4$ 에 대하여 나타낸 결과이다. Figure 중의 진한 원형기호(●기호)는 η_0 를 나타낸다. 이 그림에서 명확하게 보여 주는 것은 각 곡선이 앞선 결과⁽⁹⁾ $\phi=0$ 인 경우와 같이 어느 각도 η 에서 최대값을 갖는 형태로 되지만, ϕ 의 증가와 더불어 대칭성이 크게 무너져 가고, 곡선의 최대값과 η_0 의 값은 η 가 큰쪽, 즉 우측방향으로 이동되어진다. 이는 방향제어성 관점에서 유리함을 시사하고 있다. 그러나 곡선 전체는 ϕ 의 증가와 더불어 저하한다. 이는 η_0 에는 유리하지만 $\epsilon_{a,h}$ 가 감소함을 암시하고 있으므로 ϕ 를 0~50°까지만 해석한 이유이다. Fig. 4(a)의 물리적 인자값을 이상치 $\epsilon_c=0$, $\rho_c^s/\rho_c=1.0$, $\tau=0$ 로 바꾸어 계산한 결과를 Fig. 4(b)에 보여주고 있다. 각 곡선은 Fig. 4(a)와 비교하면 알 수 있듯이 곡선의 초기 증가가 급격히 상승하고 또 최대치가 높다. 이것은 ϵ_c 가 0에 가깝고 또 ρ_c^s/ρ_c 가 1에 가까울수록 $\epsilon_{a,h}$ 가 크고 $\Delta\eta_L$ 이 적게 되는 것을 의미하고 있다. 즉, 격자를 통과하는 에너지가 크고, 에너지의 집중이 좋다는 것을 의미한다. 그러나 에너지전달 중심방향각 η_0 는 이 물리적 인자값의 영향을 거의 받지 않음을 알았다.

4.2 에너지전달 중심방향각 η_0 와 경사각 ϕ 의 관계

타원주격자에 의한 복사열전달제어의 제일 큰 관심은 전달에너지의 방향전환이 과연 어느 정도 가능할 것인가이다. 이 의미로 에너지 전달방향을 나타내는 η_0 와 타원주의 경사각 ϕ 관계는 중요하다.

Fig. 5는 η_0 와 ϕ 관계를 ξ_0 에 의한 변화를 보인 것이다. 각 곡선에 나타난 바와 같이 η_0 는 ϕ 의 증가와 더불어 $\phi=40^\circ$ 까지는 거의 직선적으로 증가

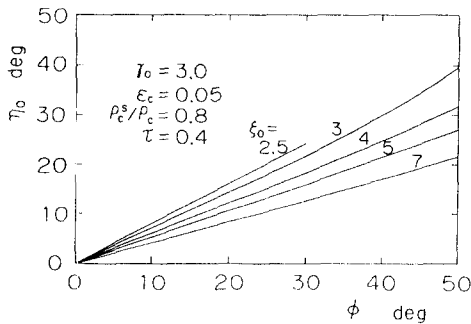


Fig. 5 Variation of energy concentration center angle η_0 with ϕ

하고 있는 것을 알았다. 이는 본 연구가 에너지전달방향제어에 유효한 것을 시사하고 있다. 증가율은 $\xi_0 \leq 7$ 의 범위에서는 ξ_0 가 적을수록 크다. 또 $\xi_0 = 2.5$ 경우 $\phi \approx 30^\circ$ 에서 타원주가 서로 겹치므로 $\phi > 30^\circ$ 의 η_0 는 없다. 또 횡축의 범위를 $\phi=0\sim 50^\circ$ 로 하고 있는 이유는 $\phi > 50^\circ$ 에서 $\epsilon_{a,h}$ 가 너무 작거나 또는 $\Delta\eta_L$ 이 너무 과대하여 제어성을 잃기 때문이다.

4.3 평균 복사에너지 집중각 $\Delta\eta_L$ 과 겹보기 반구 방사율 $\epsilon_{a,h}$ 의 변화

본 연구에 있어서 앞에서 언급한 기본적인 물리량인 $\epsilon_a(\eta)$ 의 변화가 중요하지만 실질적인 제어효과 또는 제어성이라는 관점에서 보면 지난 연구^(8,9)에서도 강조한 바와 같이 에너지 집중도를 나타내는 $\Delta\eta_L$ 과 전달에너지에 해당하는 $\epsilon_{a,h}$ 의 관계가 매우 중요하다. 전술한 바와 같이 본 연구의 인자(기하학적, 물리학적)가 매우 많으므로 대표적인 것만 설명하고자 한다.

Fig. 6은 ξ_0 가 비교적 유효하다고 생각되는 값, $\xi_0=4.0$ 에 대하여 $\Delta\eta_L$ 과 ϕ 의 관계를 $\gamma_0=1\sim 7$ 까지

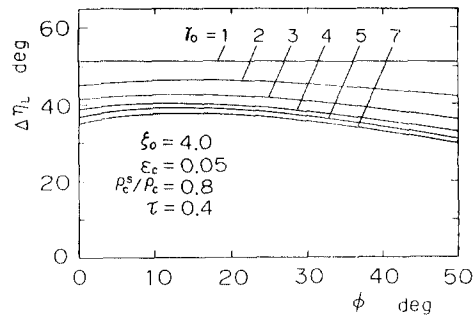


Fig. 6 Relation between average limiting angle $\Delta\eta_L$ and ϕ

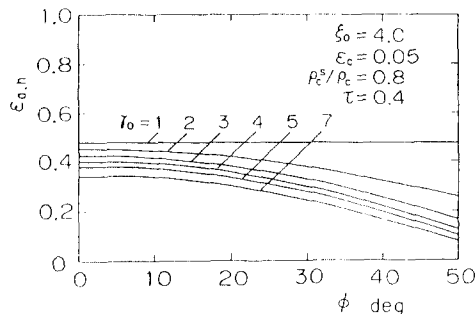


Fig. 7 Variation of emissivity $\epsilon_{a,h}$ with ϕ

변화시켜가며 나타낸 것이다. $\Delta\eta_L$ 은 ϕ 의 영향을 비교적 적게 받는다. 그러나 γ_0 가 클수록 $\Delta\eta_L$ 적어져 에너지 집중은 좋지만 감소율은 떨어진다.

Fig. 7은 $\epsilon_{a,h}$ 와 ϕ 의 관계를 위의 그림과 같은 인자 조건으로 구한 것이다. $\epsilon_{a,h}$ 는 ϕ 가 증가하면 감소됨을 알 수 있다. 또 앞선 결과⁽⁶⁾와 유사하게 임의의 경사각 ϕ 를 고정하고 γ_0 를 증가시키면 $\epsilon_{a,h}$ 는 감소하며 전달에너지가 감소함을 알 수 있다. $\gamma_0 > 7$ 에서는 $\epsilon_{a,h}$ 가 상당히 감소하여 $\gamma_0 \leq 7$ 의 범위에서 수치 계산한 결과만 나타내었다.

또한 그림은 생략하였지만, (4.4절에 설명), 물리적 인자값을 이상치($\epsilon_c=0$, $\rho_c^s/\rho_c=1$, $\tau=0$)에 가깝게 하면 $\epsilon_{a,h}$ 는 상당히 증가하여 좋은 제어효과가 기대된다.

4.4 $\eta_0 - \epsilon_{a,h}$ 및 $\Delta\eta_L - \epsilon_{a,h}$ 의 상호관계

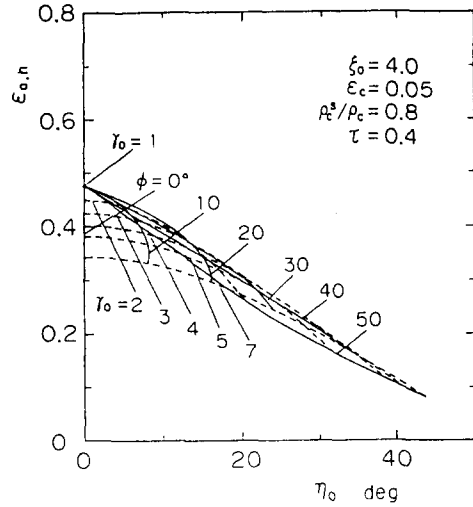
타원주격자를 경사각 ϕ 만큼 경사지게 한 경우 복사열전달제어에서는 에너지전달이 임의의 방향으로 전환될 때 에너지전달 중심방향각 η_0 와 $\epsilon_{a,h}$ 의 관계와 평균 에너지 집중각 $\Delta\eta_L$ 과 $\epsilon_{a,h}$ 의 관계가 중요하다. 여기서는 특히 유용하다고 생각되는 인자값에 대한 관계를 보여 본 제어계의 설계 자료로 쓰일 수 있도록 하고 싶다.

4.4.1 η_0 와 $\epsilon_{a,h}$ 의 관계

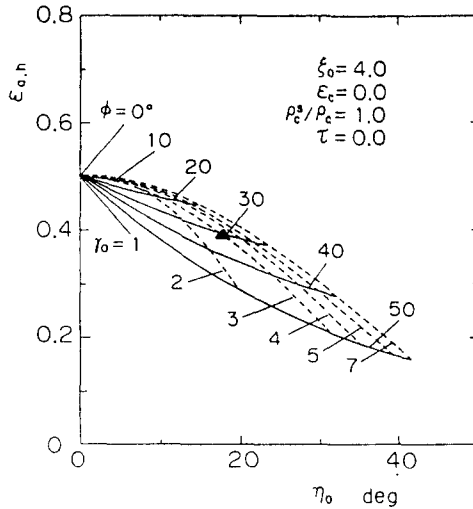
먼저 η_0 와 $\epsilon_{a,h}$ 의 관계의 관계를 살펴보자. 그림 8~10은 각각 임의의 기하학적 인자값에 대한 η_0 와 $\epsilon_{a,h}$ 의 변화 경향을 알 수 있다.

Fig. 8(a), (b) 경우 $\xi_0=4.0$ 로 고정하고 $\gamma_0=1 \sim 7$ (점선), $\phi=0 \sim 50^\circ$ (실선)로 변화시켜 가면서 계산한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 8(a), (b)의 차이점은 물리적 인자값이다. 이 두 그림으로 물리적 인자값의 변화에 의한 η_0 와 $\epsilon_{a,h}$ 의 변화 경향을 알 수 있다. (a)는 물리적 인자의 대표값(실용치) $\epsilon_c=0.05$, $\rho_c^s/\rho_c=0.8$, $\tau=0.4$ 과 (b)는 극한값(이상치) $\epsilon_c=0$, $\rho_c^s/\rho_c=1.0$, $\tau=0$ 에 대한 계산 결과 그림이다. $\phi=0$ 일 때 $\gamma_0 \leq 7$ 범위에서, (a)의 경우 $\eta_0=0$ 로 모두 같고 $\epsilon_{a,h}$ 의 변화는 γ_0 가 증가하면 감소한다. 그러나 (b)의 경우 (a)와 동일하게 $\eta_0=0$ 이지만 $\epsilon_{a,h}$ 는 γ_0 가 증가하여도 한점에 있다. 또 동일한 기하학적 인자값에서 η_0 의 주는 물리적 인자값의 영향력은 거의 없지만 $\epsilon_{a,h}$ 는 (b)가 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 타원축비 γ_0 가 유용한 것으로 생각되는



(a) $\epsilon_c=0.05$, $\rho_c^s/\rho_c=0.8$, $\tau=0.4$



(b) $\epsilon_c=0$, $\rho_c^s/\rho_c=1.0$, $\tau=0$

Fig. 8 Variation of $\epsilon_{a,h}$ with η_0 (Relation between ϕ and γ_0)

값 $\gamma_0=3.0$ 을 택하여 $\xi_0=2.5 \sim 7$ (점선), $\phi \leq 50^\circ$ (실선) 범위 안에서 구한 결과를 나타낸 그림이다. 여기서 ξ_0 와 ϕ 가 정해지면 $\epsilon_{a,h}$ 와 η_0 의 값을 읽을 수 있다. 중요한 것은 경사각 ϕ 를 증가시키면 에너지 전달 중심방향각 η_0 가 증가하여 본 연구의 유용함을 보이고 있다. 다른 연구와 비교하기 위하여 비대칭 V자 홈의 결과⁽⁶⁾를 진한 원형기호(●기호)로 기입하였다. 이 값은 V자 홈 벽의 반구방사율을 $\epsilon=0.1$, 또 거울반사율 $\rho^s/\rho=1$ 로 한 계산 결과이다. V자 홈의 결과를 보면 $\epsilon_{a,h}$ 값은 상당히 높으나 η_0

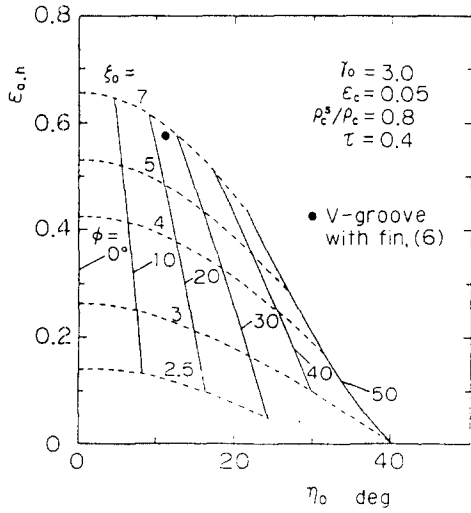


Fig. 9 Variation of $\epsilon_{a,h}$ with η_0 (Relation between ϕ and ξ_0)

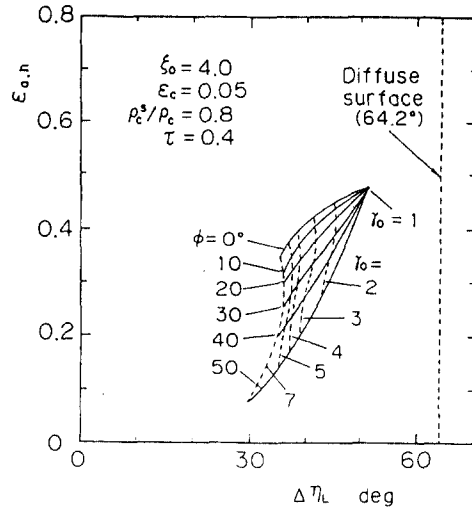


Fig. 11 Variation of $\epsilon_{a,h}$ with $\Delta\eta_L$ (Relation between ϕ and γ_0)

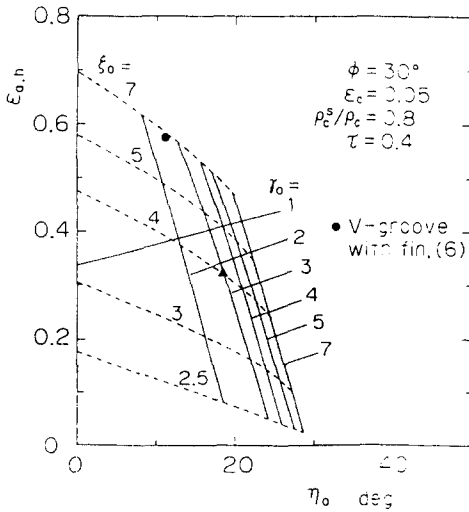


Fig. 10 Variation of $\epsilon_{a,h}$ with η_0 (Relation between ξ_0 and γ_0)

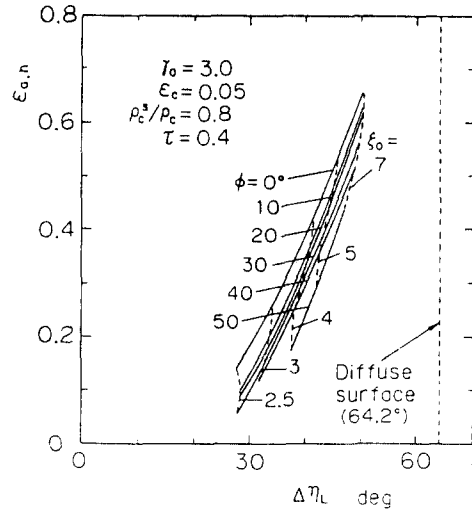


Fig. 12 Variation of $\epsilon_{a,h}$ with $\Delta\eta_L$ (Relation between ϕ and ξ_0)

는 본 연구의 결과와 비교할 때 상당히 적다. 이 그림에서 알 수 있는 또 하나의 결과는 Fig. 5의 설명에서 언급한 바 있는 $\phi > 50^\circ$ 일 때 $\epsilon_{a,h}$ 가 적게 됨을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 경사각 ϕ 를 30° 로 고정하고 $\xi_0 = 2.5 \sim 7$ (점선), $\gamma_0 = 1 \sim 7$ (실선)까지 변화시켜 수치계산한 결과이다. γ_0 가 증가하면 η_0 도 증가하는 것을 보이고 있다. Fig. 10과 Fig. 8(b)에 기입된 진한 삼각형 기호(▲기호)는 $\gamma_0 = 3.0$, $\xi_0 = 4.0$, $\phi = 30^\circ$ 일 때

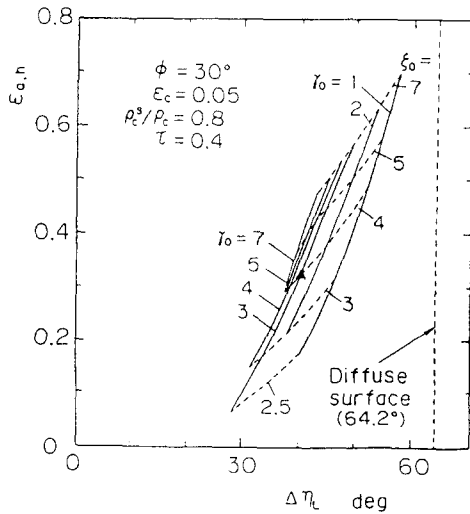
물리적 인자의 영향을 비교한 것이다. Fig. 10에서는 $\eta_0 = 18.0^\circ$, $\epsilon_{a,h} = 0.330$ 이며, Fig. 8(b)에서는 $\eta_0 = 18.0^\circ$, $\epsilon_{a,h} = 0.392$ 이다. 이것의 의미는 η_0 가 물리적 인자의 영향을 적게 받는다는 것이다. 또 $\epsilon_{a,h}$ 는 실용치보다 이상치($\epsilon_c = 0$, $\rho_c^s/\rho_c = 1.0$, $\tau = 0$)가 큰 값을 갖는 것을 알 수 있는데, 이는 에너지 전달량의 관점에서 이상치가 우수함을 나타내고 있다. 한편 다른 연구와 비교를 위하여 Masuda의 비대칭 V자 홈⁽⁶⁾의 결과(●기호)를 기입하였다.

결과는 V자 홈에서 $\epsilon_{a,h}$ 는 상당히 높은 값을 얻지만 η_0 는 적다. 이는 에너지전달 방향의 제어에 유효함을 나타내고 있다.

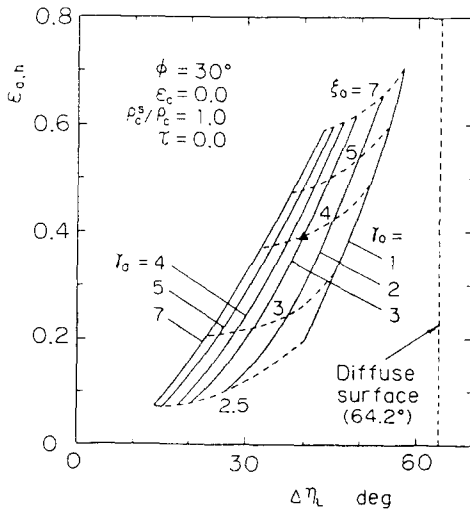
4.4.2 $\epsilon_{a,h}$ 와 $\Delta\eta_L$ 의 관계

앞의 Figs. 8~10은 임의의 ξ_0 , ϕ , γ_0 가 정하여졌을 때 $\epsilon_{a,h}$ - η_0 의 관계를 얻었지만, Figs. 11~13은 어느 정도의 $\epsilon_{a,h}$ - $\Delta\eta_L$ 이 얻어지는가를 알 수 있다.

Fig. 11는 ξ_0 를 고정하고 $\phi \leq 50^\circ$ (실선)와 $\gamma_0 =$



(a) $\epsilon_c=0.05, \rho_c^3/\rho_c=0.8, \tau=0.4$



(b) $\epsilon_c=0, \rho_c^3/\rho_c=1.0, \tau=0$

Fig. 13 Variation of $\epsilon_{a,h}$ with $\Delta\eta_L$ (Relation between ξ_0 and γ_0)

1~7(점선)의 관계에서 $\epsilon_{a,h}$ 와 $\Delta\eta_L$ 를 찾을 수 있다. 또한 Figs. 6, 7의 결과를 한 눈에 알아볼 수 있다. 즉 임의의 γ_0 에 대하여 ϕ 가 증가하면 $\epsilon_{a,h}$ 는 감소하고 $\Delta\eta_L$ 의 변화는 거의 없음을 보여주고 있다. 그러나 γ_0 가 커지면 $\Delta\eta_L$ 은 약간 증가한 후 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 임의의 ϕ 에 있어서 γ_0 가 증가할 때 $\epsilon_{a,h}$ 과 $\Delta\eta_L$ 은 감소함을 알 수 있다.

Fig. 12는 γ_0 를 고정하고 $\phi \leq 50^\circ$ (실선), $\xi_0 = 2.5 \sim 7$ (점선)까지 변화시켰을 때 $\epsilon_{a,h}$ 와 $\Delta\eta_L$ 의 관계를 보였다. ξ_0 가 증가하면 $\epsilon_{a,h}$ 와 $\Delta\eta_L$ 은 같이 증가한다. ϕ 가 증가하면 $\epsilon_{a,h}$ 는 감소하고 $\Delta\eta_L$ 의 변화는 거의 없음을 알 수 있다. 이는 ϕ 가 에너지 집중에 크게 기여하지 못함을 의미한다.

Fig. 13(a), (b)는 $\phi=30^\circ$ 일 때 $\gamma_0 \geq 7$ (실선), $\xi_0 = 2.5 \sim 7$ 범위내에서 물리적 인자값을 실용치와 이상치를 주었을 경우의 결과이다. (a)가 (b)에 비하여 임의의 γ_0 에서 ξ_0 가 큰 곳에서는 $\epsilon_{a,h}$ 와 $\Delta\eta_L$ 의 차가 크다. 임의의 ξ_0 에 대하여 앞선 결과⁽⁹⁾와 같이 γ_0 가 커지면 곡선은 좌측으로 이동하고 $\gamma_0 \approx 7$ 이상에서 이동이 멈추는 경향을 같았다. Fig. 13(a), (b)에서 $\gamma_0=3.0$, $\xi_0=4.0$ 의 계산결과를 진한 삼각형기호(▲기호)로 표시해 비교하여 보았다. (a)에서는 $\Delta\eta_L=41.4^\circ$, $\epsilon_{a,h}=0.330$ 이고 (b)는 $\Delta\eta_L=39.2^\circ$, $\epsilon_{a,h}=0.392$ 이었다. 여기서, $\epsilon_{a,h}$ 값은 크게 다르지만 $\Delta\eta_L$ 의 값은 그다지 차이가 없다. 물리적 인자에 관하여 비교하여 보면 이상치에 가까우면 $\gamma_0=3.0 \sim 7.0$ 의 범위에서 $\Delta\eta_L$ 은 보다 적은값, $\epsilon_{a,h}$ 는 보다 큰 값이 얻어짐을 알 수 있었다.

5. 결 론

타원주격자를 이용한 복사열전달을 제어할 때 더욱 제어성을 갖게하기 위하여 경사각 ϕ 를 주어 여러 특성이 여러 인자의 값의 변화에 따라 어느 정도 변화하는가를 수치해석하여 아래와 같은 결과를 얻었다.

(1) 겉보기 지향방사율 $\epsilon_a(\eta)$ 의 각도 분포곡선의 ϕ 에 의한 변화는, $\phi < 50^\circ$ 의 범위에서 ϕ 의 증가와 더불어 곡선의 최대값은 η 의 큰 방향으로 이동하며 곡선형 전체는 축소하여 간다.

(2) 에너지전달 중심방향각 η_0 는 타원주 중심간 거리 ξ_0 가 7.0 이하에서 γ_0 가 클수록 크며 ϕ 가 50° 이하에서 ϕ 의 증가와 더불어 η_0 는 증가한다.

(3) 평균 복사에너지 집중각 $\Delta\eta_L$ 이 γ_0 의 증가와 더불어 감소, ξ_0 의 증가와 더불어 증가하는 관계를 밝혔다.

(4) 절노기 반구방사율 $\varepsilon_{a,h}$ 가 ϕ 의 증가 및 γ_0 의 증가와 더불어 감소하는 관계, 또 ξ_0 의 증가와 더불어 증가해가는 관계를 각각 밝혔다.

(5) 본 제어계를 사용하고자 할 때 참고자료를 제공하기 위해 $\eta_0 - \varepsilon_{a,h}$ 및 $\Delta\eta_L - \varepsilon_{a,h}$ 관계를 그림으로 도시했다.

(6) 본 타원주격자에 의한 복사열전달의 방향 제어가 유효한 것을 확인하였다.

참고문헌

(1) Aihara, T., 1992, Heat-Transfer Control : Principle Focus on Japanese Research, *Applied Mechanics Reviews*, 45-4, p. 129.

(2) 越後, 1986, 高性能高温가스輻射傳熱技術, 日本エネルギー資源, 7-4, p.342.

(3) 平野, 宮内, 森, 1986, ぶく射性ガスの非灰色性質を利用した射傳熱促進 (第1報, 非流動系における炭酸가스および水蒸氣), 日本機械學會論文集, 52-473, B, p. 190.

(4) 森, 平, 渡邊, 1977, 固體ぶく射を利用した傳熱特性向上法の研究 (第1報, 管内流), 日本機械學會論文集, 43-37, p. 2670.

(5) 谷川, 花村, 越後, 富村, 1991, 多孔質ぶく射變換體を用いた效果的熱交換法に関する基礎的研究, 日本機械學會論文集, 57-533, p. 302.

(6) Masuda, H., 1980, Directional Control of Radiation Heat Transfer by V-Groove Cavities Collimation of Energy in Direction Normal to Cavity Opening, *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, 102-3, p. 563.

(7) Black, W. Z., 1973, Optimization of the Direc-

tional Emission from V-Groove and Rectangular Cavities, *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, 95-1, p. 31.

(8) 増田英俊, 高興, 水田郁久, 1993, 圓柱狀格子による固體面からのぶく射傳熱制御, 日本機械學會論文集, 59-560, B, p. 1330.

(9) 高興, 増田英俊, 1994, だ圓柱格子による固體面からのぶく射傳熱制御 (傳熱面に垂直方向へのエネルギー集中), 日本機械學會論文集, 60-575, B, p. 2524.

(10) 増田英俊, 1977, 鏡面および亂反射する固體面間のぶく射傳熱, 日本機械學會論文集, 43-373, B, p. 3357.

(11) Masuda, H., 1976, Radiation Heat Transfer Between Specularly and Diffusely Reflecting Surfaces, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, Vol. 16, p. 997 (Printed in Great Britain).

(12) Sparrow, E. M. and Lin, S. H., 1965, Radiation Heat Transfer at a Surface Having Both Specular and Diffuse Reflectance Components, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 8-5, p. 769.

(13) Sparrow, E. M., Eckert, E. R. G. and Jonsson, V. K., 1962, An Enclosure Theory for Radiative Exchange Between Specularly and Diffusely Reflecting Surfaces, *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, 84-4, p. 294.

(14) 増田英俊, 1978, 鏡面および亂反射する曲面を持つ壁面間のぶく射傳熱の解析, 日本機械學會論文集, 44-383, B, p. 2402.

(15) 日本機械學會編, 1993, 傳熱ハンドブック, 日本機械學會, p. 238.

(16) 増田英俊・日向野三雄, 1987, 金屬細線の全半球ぶく射率の非定常測定法, 日本機械學會論文集, 53-486, B, p. 573.