

Strainless steel strip 광휘어닐링로 내의 열전달 해석

유홍선* · 정연태**† · 장병록***

*중앙대학교 기계공학부

**대원대학 건축인테리어계열

***SAC 기술연구소

A Numerical Analysis of Heat Transfer in Bright Annealing Furnace of Strainless Steel Strip

H.S. Ryou*, Y.T. Jeong**†, B.L. Jang***

*Dept. of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

**School of Architecture and Interior design, Daewon University College

***SAC R&D Center

Abstract In order to predict the temperature distribution of stainless steel strip in Bright Annealing (BA) furnace, we performed the analysis of heat transfer and fluid flow using STAR-CCM+. The analysis model included unsteady fluid flow, heat transfer with radiation and moving grid. Two kinds of radiative properties, emissivity and reflectivity, were applied to the stainless steel strip, one is constant and the other is variable with time. As we call, the BA furnaces of stainless steel strip have two different types, muffle and no-muffle. The using of muffle type has been faced with some problems such as rising in material price and shortening of life cycle, etc. So the development of no-muffle type BA furnace is very important in order to save energy cost, lower environmental load and increase the productivity. The designed (or expected) temperature of stainless steel strip coming out of BA furnace was about 1065°C while the environment temperature maintains around 1100°C. The result of our calculation was very close (or similar) to design temperature, and the application of radiative properties variable with time produced more accurate result than applying constant ones.

(Received July 16, 2009; Accepted July 22, 2009)

Key words: Bright annealing furnace, Radiation heat transfer, Moving grid, No-Muffle

1. 서 론

내식성이 우수하고 표면이 미려하여 용도와 생산이 지속적으로 증가하는 강종인 스테인리스강은 그러한 특성을 얻을 수 있도록 열처리 방법인 스트립(strip)의 광휘어닐링(Bright Annealing, BA) 공정이 필수적이다.

광휘어닐링은 이슬점(dew point)이 -40°C 에서 -60°C 사이인 H_2/N_2 환원성 분위기에서 수행되며 특수 냉연한 스트립을 재 산화방지 및 색상제거 없이 표면을 밝고 미려하게 유지하는 것으로, 광휘어닐링 온도는 오스테나이트계 스테인리스강은 $1,080\text{--}1150^{\circ}\text{C}$, 페라이트계 스테인리스강은 $780\text{--}870^{\circ}\text{C}$ 이다.

스트립의 어닐링 작업 후 냉각은 가열과 같이 재 산화방지 및 색상유지를 위해 분위기를 유지하면서 대류에 의해서만 이루어져야 함으로 이에 따른 열전달 및 유동 해석기술이 로 설계기술에 근간이 되는 기반기술이다. 따라서 고효율 광휘어닐링로 개발에 있어서 스트립의 변형과 표면의 열화를 완벽하게 억제하기 위한 가열부 및 냉각부의 주요 설계 인자 파악 및 열유동 해석 기술의 확보가 시급한 실정이다[1-3].

스테인리스강용 광휘어닐링로는 일반적으로 광폭의 경우 스트립의 손상을 막기 위해 수직형으로, 협폭(약 850 mm 이하)의 경우 수평형으로 제작되고 있다. 또한 가열방법에 따라서 두 그룹으로 분류할 수 있다. 그것은 전기히터의 복사열에 의한 직접가열 방

†E-mail : jyt0427@hanafos.com

식과 외부의 muffle을 가스버너로 가열하는 간접가열 방식이다.

국내의 스테인리스강 스트립의 광휘어닐링로는 대형 철강사의 경우에는 수직형, 중견 철강사와 대형 서비스업체에는 수평형이 설치되어 운영되고 있다. 대형의 경우는 muffle이 없는 형태이고 수평형은 모두 muffle 형태로 설치되어있다. Muffle형의 경우 에너지 원단의 상승과 muffle의 수명저하 및 muffle 소재가격 상승으로 큰 어려움에 직면하고 있다.

따라서 No-muffle 타입 광휘어닐링로의 개발은 에너지 절약, 환경부하 저감 및 생산성 증가를 위해서 중요하다.

따라서 본 연구에서는 주어진 분위기 온도에서 열처리로 내의 시편(test plate)의 이송 속도에 따른 열전달 현상과 복사 상태량의 변화가 시편의 온도변화에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 복사열전달과 이동격자계를 적용하여 광휘어닐링로 가열로 내의 3차원 열유동 해석을 수행하고자 한다. 그리고 수행한 결과값과 설계값을 비교하여 설계의 타당성을 검증하고자 한다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식

본 해석에서 사용된 지배방정식들은 다음과 같다[4]. 연속방정식과 운동량방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = s_m \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + s_i \quad (2)$$

구성방정식

$$\tau_{ij} = 2\mu_{ij} - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (3)$$

변형률 텐서

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

부력에 대한 소스항

$$s_i = g_i(\rho_i - \rho_0) \quad (5)$$

엔탈피 보존방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho h u_j + F_{h,j}) = \\ \frac{\partial p}{\partial t} + u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + s_h \end{aligned} \quad (6)$$

(6) 식에서 h 는 정적 엔탈피로 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} h \equiv \bar{c}_p T - c_p^0 T_0 + \sum Y_m H_m \\ = h_t + \sum Y_m H_m \end{aligned} \quad (7)$$

확산유량 관계식은 시간평균된 난류유동에 대하여 다음과 같다.

$$F_{h,j} \equiv -k \frac{\partial T}{\partial x_j} + \bar{\rho} \overline{u'_j h'} + \sum_m \bar{h}_m \rho V_{m,j} \quad (8)$$

전도와 열전달이 동시에 일어나는 경우 (6)식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + s_e \quad (9)$$

여기서, $e \equiv c_v T$

그리고 해석에 사용한 난류모델은 기본 $\kappa-\epsilon$ 모델을 사용하였다.

특정파장 λ 에 대한 복사강도에 대한 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{d\lambda}{ds} = -(k_{a\lambda} + k_{s\lambda} + k_{p\lambda}) + I_\lambda + k_{a\lambda} I_{b\lambda} + k_{p\lambda} I_{p\lambda} + \\ \frac{k_{s\lambda}}{4\pi} \int_{4\pi} I_\lambda(\Omega) d\Omega \end{aligned} \quad (10)$$

여기서

I_λ 파장 λ 에서 복사강도

$k_{a\lambda}$ 파장 λ 에서 흡수계수

$k_{p\lambda}$ 파장 λ 에서 등가입자 흡수계수

$k_{s\lambda}$ 파장 λ 에서 산란계수

$I_{b\lambda}$ 파장 λ 에서 흑체강도

$I_{p\lambda}$ 파장 λ 와 현재 입자 온도에서 흑체강도

Ω 입체각

$$I_{b\lambda} = \frac{2C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)}$$

여기서

$$C_1 = 0.595522 \times 10^{-16} Wm^2/s$$

$$C_2 = 0.01439mK$$

2.2 수치해석 방법

광휘어널링로 내의 열전달을 해석하기 위한 기하학적 형상은 Fig. 1과 같으며, 열처리 대상 재료는 SUS302이다. 열처리로, 시편의 치수 및 상태량은 Table 1 및 Table 2와 같다.

외부벽면에서는 비 미끄러짐 경계조건 및 단열조건을 사용하였다. 그리고 로 내의 열처리재료와 분위기와의 열전달 현상을 고려하기 위하여 전도와 복사가 결합된 열전달모형을 사용하였으며, 열처리재료의 시간에 따른 이동을 고려하기 위하여 이동격자계를 사용하였다. 복사모형은 Participating Media Radiation (DOM)[5] 모형을 사용하였으며, 재료 표면에서의 방사율은 재료의 전 영역에 대하여 일정한 경우와 시간에 따라 변화되는 두 가지 경우를 적용하였다. 이

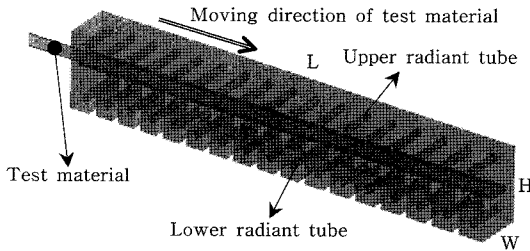


Fig. 1. Physical Model of BA furnace.

Table 1. Dimension of the BA furnace and SUS302

Furnace	$L \times W \times H$ [mm]	13,500×1,550×1,650
Material	$W_p \times l_p$ [mm]	620×0.4

Table 2. Properties of Material

Material(SUS302)		
k [W/m K] (Thermal Conductivity)	ρ [kg/m ³] (Density)	C_p [J/kg K] (Specific Heat)
15.1	3055.0	480.0

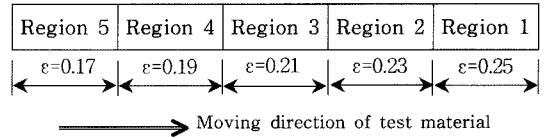


Fig. 2. Variation of emissivity with time in each region.

때 시간에 따른 복사상태량의 변화는 열처리재료를 5개의 영역으로 분할한 후 시간의 경과에 따른 위치 및 온도변화에 따라 각 영역에 복사상태량을 적용하였으며, 초기 방사율값은 표준상태에서의 값을 사용하였고[2] 개념도는 Fig. 2와 같다.

가열부로 장입되는 재료의 초기온도는 20°C이며, 0.2812 m/s의 속도로 48초 동안 가열로를 통과하며, 가열로의 분위기 온도를 제어하기위하여 복사관 (radiant tube) 표면온도는 1100°C로 일정하게 부여하였다.

해석에 사용된 소프트웨어는 범용 열유동해석 프로그램인 STAR-CCM+을 사용하였으며, 재료의 이동 및 처짐을 방지하기 위하여 설치된 물러는 해석 영역에서 무시하였다. 그리고 상하에 설치된 복사관의 개수는 각각 17개로 수평방향으로 같은 위치에 위치한다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 시편의 복사상태량이 최종 열처리 온도에 미치는 영향을 고찰하기위하여 재료의 방사율이 전 영역에 대하여 일정한 경우와 온도 및 시간에 따라 변화하는 경우에 대하여 이동격자계를 적용하여 해석을 수행하였다.

Fig. 3은 재료의 전 영역에 대하여 방사율이 0.15, 0.2로 일정한 경우와 시간 및 온도에 대하여 방사율의 변화가 있는 경우에 대한 속도분포를 나타낸다. 각 경우에 대하여 속도분포는 유사한 형태를 보여주고 있으며 속도의 크기는 미약함을 알 수 있다. 그리고 시편을 경계로 유동이 상하로 분리되며, 하부 복사관을 격리시킨 블록의 영향으로 인하여 부분적으로 블록과 블록 사이에 와류영역이 생성됨을 볼 수 있다. 상부영역에서는 복사관과 복사관 사이에 대칭의 유동이 생성됨을 볼 수 있으며 복사관 하부면에서 시편의 축방향을 따라 유동이 발달하여 서로 충돌

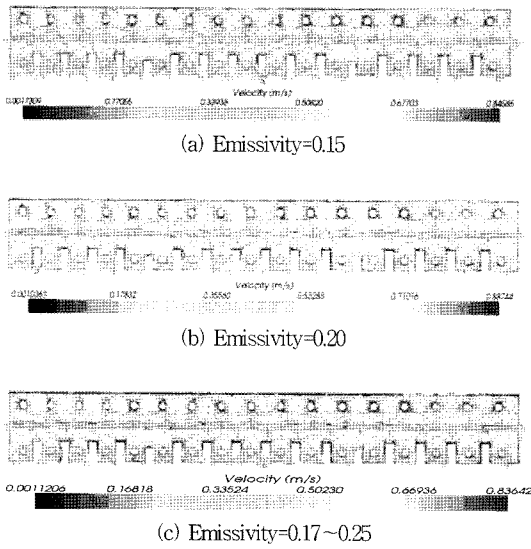


Fig. 3. Velocity distribution of BA furnace at time = 48 sec.

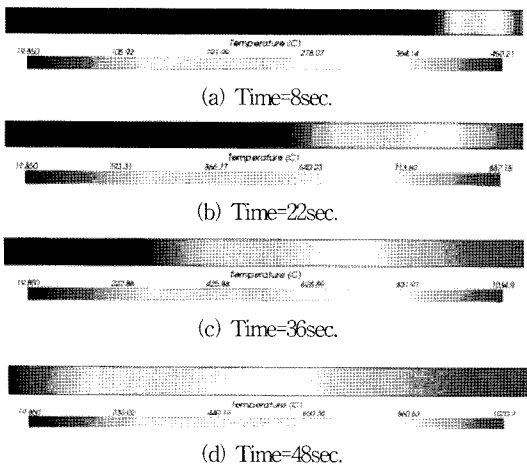


Fig. 4. Temperature distribution of BA furnace in case of constant emissivity ($\epsilon = 0.15$).

돌함을 알 수 있다.

Fig. 4는 재료의 전 영역에 대하여 방사율이 0.15로 일정한 경우에 대한 시간별 온도분포를 나타낸다. 그림에서 보여주는 바와 같이 시편이 열처리로 내로 장입됨에 따라 온도가 상승하며 시간이 8초 경과하였을 때 시편내의 최고온도가 약 450°C가 됨을 알 수 있다. 처음 장입된 시편이 로 내를 완전히 통과하여 반출되는 시간은 48초가 소요되며 이 때 시편의 반출온도는 약 1070°C임을 알 수 있다.

Fig. 5는 재료의 전 영역에 대하여 방사율이 0.2로

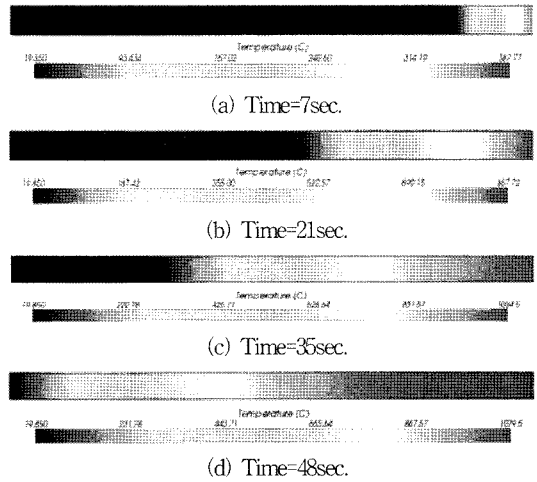


Fig. 5. Temperature distribution of BA furnace in case of constant emissivity ($\epsilon = 0.2$).

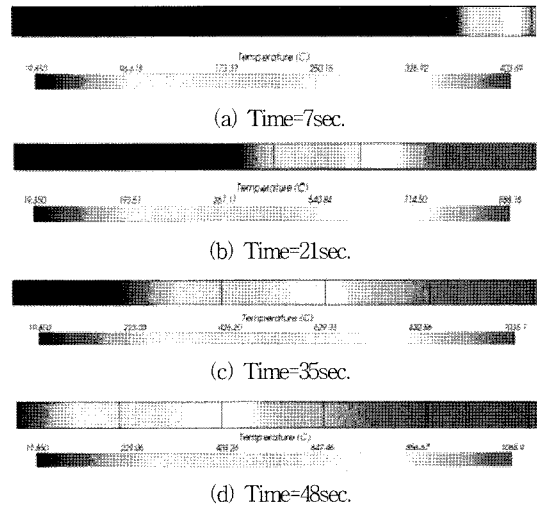
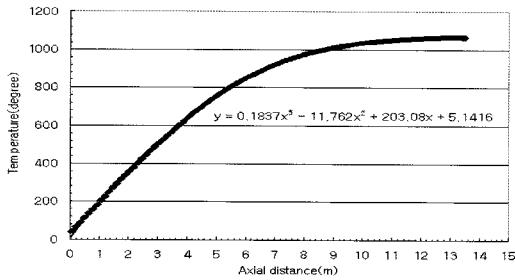


Fig. 6. Temperature distribution of BA furnace in case of variable emissivity ($\epsilon = 0.17 \sim 0.25$).

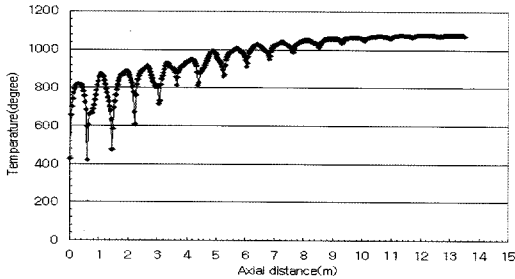
일정한 경우에 대한 시간별 온도분포를 나타낸다.

시간이 경과함에 따라 시편의 온도는 상승하며 시편내의 최고온도는 시간이 7초 일 때 약 388°C, 21초 일 때 약 858°C로 방사율이 0.15일 때와 비교하여 유사한 시간대에서 최고온도의 차이를 보이지 않으나, 시간이 더 경과하여 36초 부근에서는 차이를 보이지 않음을 알 수 있다. 이 경우 시편의 반출온도는 1079.5°C로 앞의 경우와 약 10°C의 온도차를 보여준다.

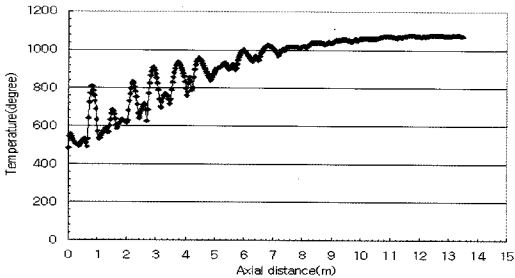
Fig. 6은 시편의 영역을 분할하여 각 영역에 온도



(a) Temperature along the mid-line of test plate



(b) Fluid temperature next to test plate along the mid-line (lower region)



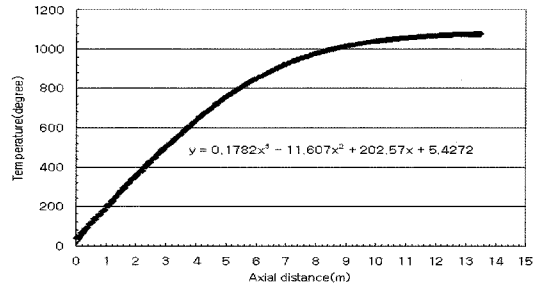
(c) Fluid temperature next to cell of test plate along the mid-line (upper region)

Fig. 7. Temperature of the test material along the x-direction in case of constant emissivity ($\epsilon = 0.15$).

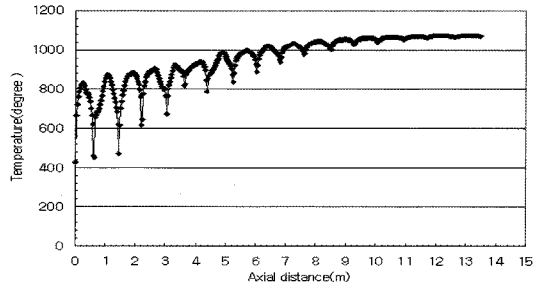
에 따라 변화된 방사율값을 적용한 경우의 온도분포를 나타낸다.

시간이 7초 일 때 시편내의 최고온도는 약 404°C로 방사율이 0.15일 때와 약 46°C, 0.2일 때와는 약 16°C의 차이를 보임을 알 수 있다. 시간이 경과하여 약 21초 이 후부터는 각 영역에서의 온도값은 방사율이 0.15일 때와 유사한 값을 보여주고 있다. 방사율이 0.2일 경우는 시간이 7초에서의 온도값에서는 차이를 보이지만 이후에서는 유사한 온도값을 나타냄을 알 수 있다.

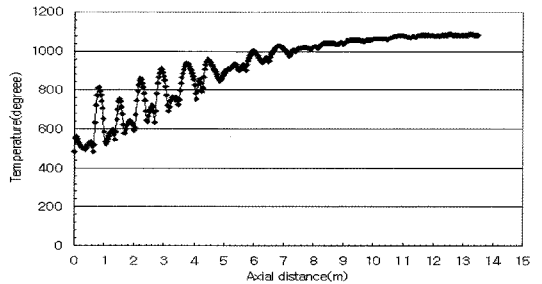
Fig. 7부터 Fig. 9까지는 축방향을 따라 시편 중심부분의 온도와 시편 표면에 인접한 격자에서의 유체



(a) Temperature along the mid-line of test plate



(b) Fluid temperature next to test plate along the mid-line (lower region)



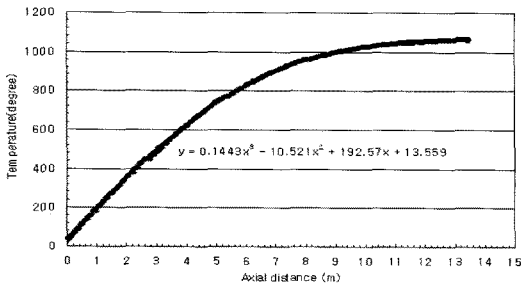
(c) Fluid temperature next to cell of test plate along the mid-line (upper region)

Fig. 8. Temperature of the test material along the x-direction in case of constant emissivity ($\epsilon = 0.20$).

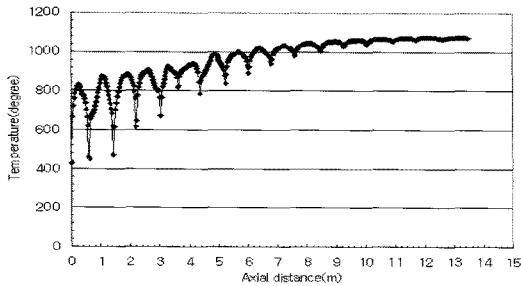
의 온도분포를 나타낸 것이다.

축방향의 시편 중심부의 온도변화는 3경우 모두 일정한 형태로 상승됨을 보여주고 있으며 48초 후 반출되는 시편의 온도는 앞의 결과에서 보여주는 바와 같이 1070.7°C, 1079.5°C와 1065.9°C를 나타내고 있다.

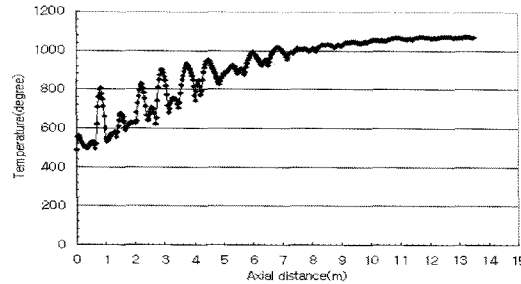
그러나 열전달이 발생하는 시편의 인접면에서의 온도는 3가지 경우 모두에서 일정한 주기로 상승과 하강을 반복하면서 증가하는 형태를 보여주고 있다. 이는 앞의 유동결과에서 보여주는 바와 같이 일정한 간격으로 배열된 복사관의 기하학적 형상과 온도차에



(a) Temperature along the mid-line of test plate



(b) Fluid temperature next to test plate along the mid-line (lower region)



(c) Fluid temperature next to cell of test plate along the mid-line (upper region)

Fig. 9. Temperature of the test material along the x-direction in case of variable emissivity ($\epsilon = 0.17 \sim 0.25$).

의한 자연대류에 의하여 발생된 유동이 시편면에서 충돌하여 발달하면서 이 영역에 국부적인 재순환 영역을 만들어 열원의 공급을 차단하기 때문이라고 사료된다. 그러나 시편에서의 온도분포가 일정한 형태로 상승하는 것은 시편내의 전도로 인하여 온도분포가 균일하여졌기 때문으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 시편의 복사상태량이 광휘어닐링로 내를 통과하는 시편의 반출온도에 미치는 영향을 고

찰하기 위하여 재료의 방사량을 변경시키면서 이동격자계를 적용하여 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 시편의 표면에 일정한 방사량을 적용하였을 때 방사량이 0.15, 0.2인 경우에 대하여 시편의 최종 반출온도는 1070.7°C와 1079.5°C의 값을 얻었으며, 시편의 방사량을 온도변화를 고려하여 0.17~0.25의 5단계로 조절하여 적용했을 때 최종 반출온도는 1065.5°C의 온도값을 얻을 수 있었다.
2. 일정한 복사상태량을 적용한 경우보다 온도변화를 고려하여 복사상태량을 변경시키면서 적용한 경우가 설계값(1060±10°C)에 가장 근접한 값을 얻을 수 있었다.
3. 열전달에 중요한 영향을 미치는 시편 주위의 온도는 복사관의 배열에 따라 상하의 큰 변화를 가지며, 이 영역에서 온도편차를 줄일 수 있는 최적의 배열이 필요하다.
4. 복사상태량이 열전달 현상에 미치는 더 정확한 현상을 파악하기 위하여 다양한 두께 및 시편에 대하여 해석할 필요가 있다.

후 기

본 논문은 에너지관리공단의 지원으로 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다.

참고문헌

1. 김영득, 강덕홍, 김승우 : "간접 가열방식의 연속식 열처리로내 판(plate) 온도해석에 관한 연구" 대한기계학회논문집 B권, 30(6) (2006) 514-522.
2. R. Siegel and John R. Howell : "Thermal Radiation Heat Transfer" Third Edition Hemisphere Publishing Corp (1992).
3. J. P. Holman : "Heat Transfer", Eighth SI Metric Edition, McGraw Hill (2001).
4. STAR-CCM+ Manual.
5. Modest, M. F. : "Radiative Heat Transfer." McGraw-Hill, New York (1993).