

## STS 304 중공 원통의 비정상 열전달 특성

이상철\* · 김영근\* · 심규진\* · 배강열\* · 정한식† · 정효민\*\*

### Characteristics on the Non-Steady Heat Transfer of the STS 304 Hollow Cylinder

Sang Chul Lee, Young Geun Kim, Kyu Jin Shim, Kang Youl Bae  
Han Shik Chung and Hyo Min Jeong

**Key Words:** Hollow Cylinder(중공 원통), Heat Conduction(열전도), Specific Heat(비열), Conductivity(전도율), STS 304(스테인레스 스틸 304)

#### Abstract

This paper introduced about characteristics on the non-steady heat transfer of STS 304 hollow cylinder. In the non-steady state, the specific heat and conductivity are depended on the temperature variations, and these properties affect to the governing equation on heat conduction. But the most of numerical analysis on heat conduction is assumed to constant properties which is conductivity and specific heat. Assuming that the properties are reacted sensitively, the numerical results can have the difference of between constant properties with non-constant properties. The main parameters are specific heat and conductivity. The temperature distributions of the STS 304 hollow cylinder became in steady state after 4 minutes in case of the constant properties. As the conductivity is varied with temperature, the temperature distributions became in steady state after 15 minutes. Therefore, a numerical analysis of the non-steady state heat transfer will has to apply that conductivity varied with temperature.

#### 기호설명

$T$  : 온도 [°C]  
 $T_c$  : 저열원 [°C]  
 $T_h$  : 고열원 [°C]  
 $D_1$  : 중공 원통의 내경 [m]  
 $D_2$  : 중공 원통의 외경 [m]  
 $S$  : 생성항  
 $\theta$  : 원주각 [rad.]

$t$  : 시간 [min.]  
 $r$  : 반경 [m]  
 $\rho$  : 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]  
 $c_p$  : 정압비열 [J/kg · K]  
 $k$  : 열전달계수 [W/m · K]

#### 1. 서론

일반적으로 물리적인 현상을 계산할 경우에 물성치의 값을 상수로 취급하여 계산하는 경우가 많다.<sup>1-5)</sup> 특히 열전달에 있어서 지배방정식에 사용되는 물성치들은 온도에 따라 변화하는 성질이 있다.<sup>6)</sup> 물론 온도에 대하여 모든 물성치의 값들이 많은 변화를 보이는 것은 아니다. 고체나 유체에 있어서 온도와 관계되는 물성치들을 일정한 상수로 가정한다면 그 계산 결과는 실제의 결과와 많은 차이를 가져올 수 있다. 1999년 Emery

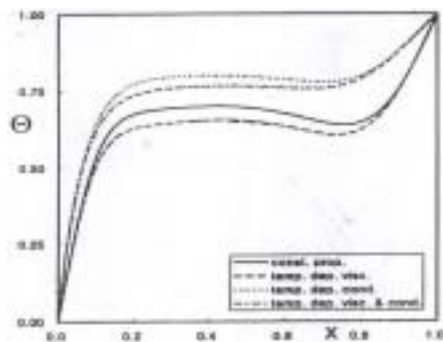
† 경상대학교 기계항공공학부 · 해양산업연구소  
 E-mail : hschung@nongae.gsnu.ac.kr  
 TEL : (055)646-4766 FAX : (055)640-3188

\* 경상대학교 대학원 정밀기계공학과

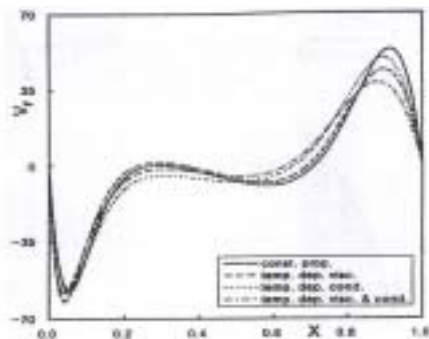
\*\* 경상대학교 기계항공공학부

& Lee<sup>7)</sup>는 사각밀폐공간내의 물성치 변화가 자연 대류에 미치는 영향에 대하여 연구하였으며, Fig. 1에 나타난 것과 같이 사각밀폐공간 내의 온도에 대해 일정한 물성치를 사용한 것과 온도와 함께 변화하는 물성치를 사용한 경우의 무차원 온도와 속도분포를 단면에서 비교하였다.  $\Theta$ 는 무차원 온도를 나타내며,  $V_z$ 는 단면에서의 수직방향의 속도를 나타내는 벡터다. 물성치가 일정한 경우보다 온도에 따라 변화하는 물성치를 사용한 경우가 단면에서 0.2정도의 높은 무차원 온도 분포를 보이고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 물리적인 현상을 계산적으로 규명함에 있어서 물성치의 특성에 따라 얻고자 하는 결과값이 매우 다르게 나타남을 보여주고 있는 것이다.

본 연구에서는 중공 원통의 열전도에 대하여 비열과 열전달율을 변수로 두어 온도에 따라 변화하는 물성치들을 사용했을 경우 열전도에 미치는 영향에 대하여 알아보려고 한다.



(a)



(b)

Fig. 1 Plots of (a) temperature and (b) vertical velocity profiles for  $Ra_0=10^5$  at  $Y=0.5$

## 2. 수치해석

### 2.1 수치해석 모델 및 경계조건

Fig. 2는 수치해석을 위한 모델의 개략도를 나타낸 그림이다. 수치해석에 사용된 중공 원통의 재질은 STS 304라고 가정하였으며, 내부에는 일정한 온도( $T_c = 0^\circ\text{C}$ )로 냉각되고, 외부에는 일정한 온도( $T_h = 20^\circ\text{C}$ )로 가열되고 있다고 가정하였다. 수치해석모델의 치수는  $D_1 = 0.2\text{m}$ ,  $D_2 = 0.4\text{m}$ 로 내부의 직경과 외부의 직경의 비가 1:2인 모델을 선택하였다.

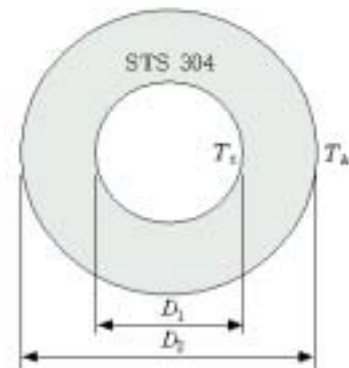


Fig. 2 Schematic diagram for numerical model of a hollow cylinder

### 2.2 지배방정식 및 수치해석 변수

수치해석에 사용된 지배방정식은 아래의 식(1)과 같이 2차원  $r-\theta$ 좌표계를 이용한 비정상상 열전도 방정식을 사용하였다.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( k \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + S \quad (1)$$

사용된 물성치는 비열과 열전도율이며 일정한 물성치의 조건은 300K일때의 물성치를 사용하였다.

$$\rho: 7900\text{kg/m}^3, c_p: 477\text{J/kg}\cdot\text{K}, k: 14.9\text{W/m}\cdot\text{K} \quad (2)$$

온도에 따라서 변화하는 물성치는 절대온도를 기준으로 하여 100K에서 1500K까지의 값을 이용하여 상관관계식을 구한 후 계산에 사용하였다.

Fig. 3은 절대온도의 변화에 따른 비열의 변화를 나타낸 그림이다. 점으로 표시된 것은 실제적인 비열의 값을 나타내고 있으며, 실선으로 표시된 것은 온도 변화에 따른 비열의 상관식을 다음과 같이 구하여 표시한 것이다.

$$c_p = 7.006 \times 10^{-13} T^6 - 3.380 \times 10^{-9} T^4 + 6.300 \times 10^{-6} T^3 - 5.657 \times 10^{-3} T^2 + 2.583 T + 64.877 \quad (3)$$

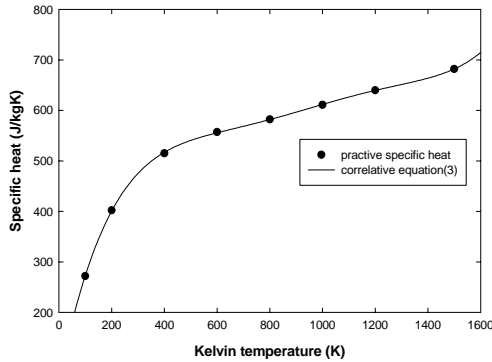


Fig. 3 Specific heat distribution with temperature variations for the STS 304 hollow cylinder

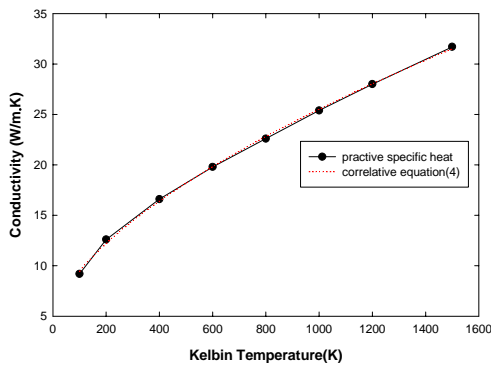


Fig. 4 Conductivity distribution with temperature variations for the STS 304 hollow cylinder

Fig. 4는 온도의 변화에 따른 열전도율의 변화를 나타낸 것이다. 위의 값을 이용하여 온도에 따른 열전도율의 상관식은 아래의 식(4)과 같이 구하였다.

$$k = 0.314 T^{0.611} + 4.264 \quad (4)$$

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 등온선 분포

##### 3.1.1 일정 물성치

일정한 물성치는 위에서 제시된 300K일때의 물성치를 이용하여 계산을 수행하였으며, 시간이 경과함에 따라 정상상태에 도달할 때까지의 등온선 분포를 Fig. 5에 나타내었다.

1분 후에는 등온선이 내부와 외부로 밀집되어 있어 가열부의 온도가 냉각부로 완전히 전도가 되지

않은 상태를 보여 주고 있다. 그러나 약 4분 후에는 전체적인 영역으로 등온선분포가 균일하게 분포되어 정상상태에 도달한 것을 확인 할 수 있다.

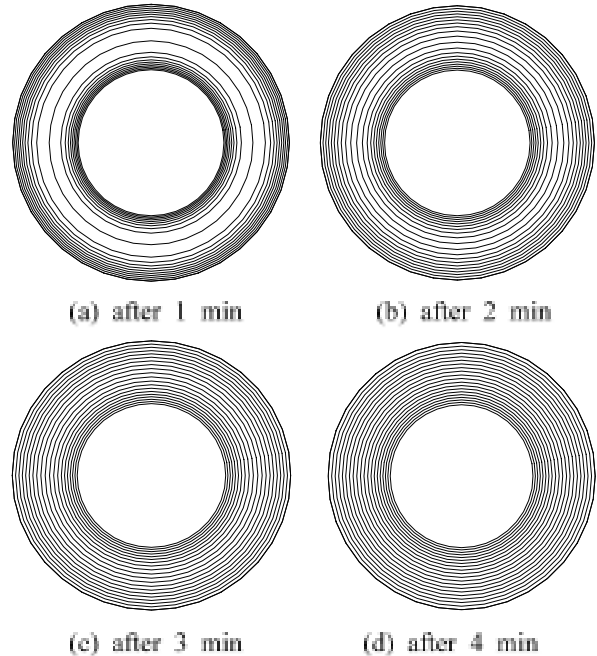


Fig. 5 Temperature contours by time variation with constant properties for the STS 304 hollow cylinder

#### 3.1.2 비열의 변화

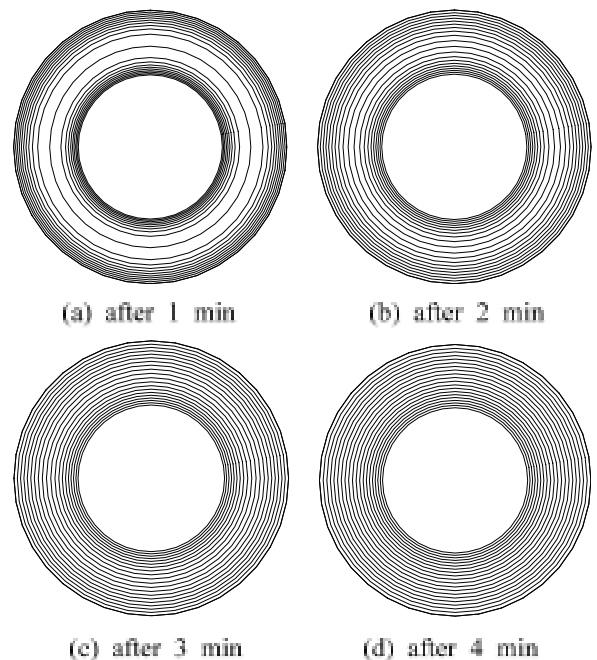


Fig. 6 Temperature contours by time variation with temperature-dependent specific heat for the STS 304 hollow cylinder

밀도와 열전도율은 300K일 때의 일정한 물성치를 사용하였으며 비열의 경우에만 온도에 대하여 변화하는 상관식을 이용하여 계산하였다.

Fig. 6은 온도에 따른 비열의 변화에 대하여 비정상상태의 계산결과에 대한 등온선 분포를 나타낸 것이다. 비열을 온도에 따라 변화시켰을 경우에도 4분이 경과하게 되면 온도분포가 정상상태에 도달하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과가 나타나는 것은 지배방정식을 최종적으로 이산화시킨 식에서 밀도와 비열의 경우에는 직접 계산 결과값에 영향을 주는 것이 아니라 시간항에 영향을 미치기 때문에 열전도에 큰 영향을 주지 못한 결과이다.

### 3.1.3 열전도율의 변화

밀도와 비열은 300K일 때의 일정한 물성치를 사용하고, 열전도율을 온도에 따라 변화하는 상관식을 이용하여 열전도율의 변화에 대한 영향을 알아보려고 한다.

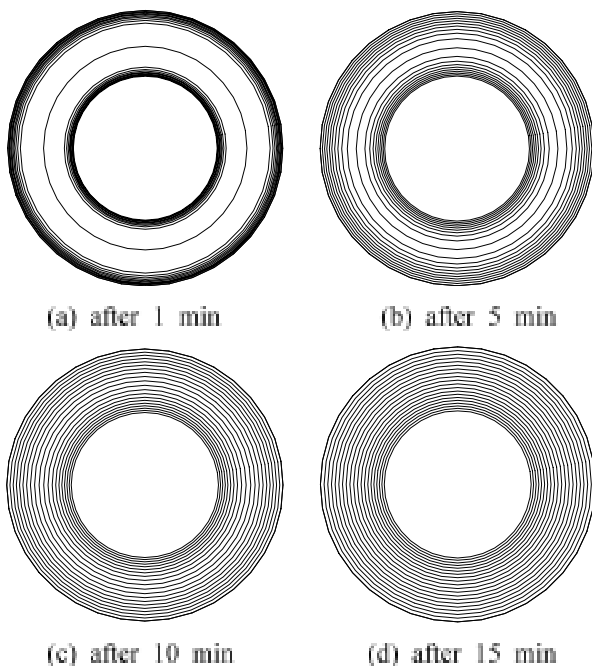


Fig. 7 Temperature contours by time variation with temperature-dependent conductivity for the STS 304 hollow cylinder

Fig. 7은 온도에 따라 변화하는 열전도율의 상관식을 이용하여 계산한 등온선 분포를 나타낸 것이다. 이전의 일정한 물성치와 온도에 따라 변화하는 비열의 경우에는 등온선의 분포가 4분 후에는 정상상태에 도달하는 것이 확인되었지만,

온도에 따른 열전도율의 상관식을 적용한 경우에는 15분 이후가 되어야 정상상태에 도달하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 비열이 온도장을 결정하는 계수에 영향을 주지 못하고, 열전도율은 최종적인 이산화식에서 온도장을 계산하는 계수에 직접적으로 영향을 주기 때문에 실제적인 결과값에 많은 영향을 미치는 것이다.

### 3.1.4 비열과 열전도율의 변화

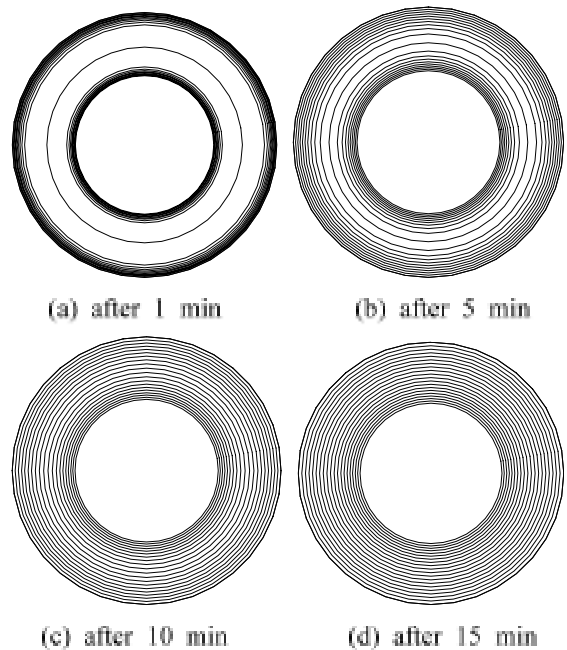


Fig. 8 Temperature contours by time variation with temperature-dependent specific heat and conductivity for the STS 304 hollow cylinder

Fig. 8은 비열과 열전도율에 대해서 온도에 관한 상관식을 이용하여 계산한 결과이다. 비열과 열전도율을 동시에 변화시켰을 경우 열전도율만을 변화시킨 경우와 거의 동일한 등온선 분포를 보이고 있으며, 정상상태에 도달하는 시간도 동일하게 나타났다. 따라서 비열의 변화는 전도의 계산에 있어서 거의 영향을 미치지 못함을 알 수 있었다.

### 3.2 단면의 온도분포

등온선 분포의 결과에서 알 수 있듯이 열전도율을 변화시켰을 경우가 비열을 변화시킨 경우보다 열전도의 계산에 더욱더 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 단면에서의 정량적인 차이를 확인하기 위하여 단면의 온도분포를 확인하고자 한다.

### 3.2.1 일정 물성치

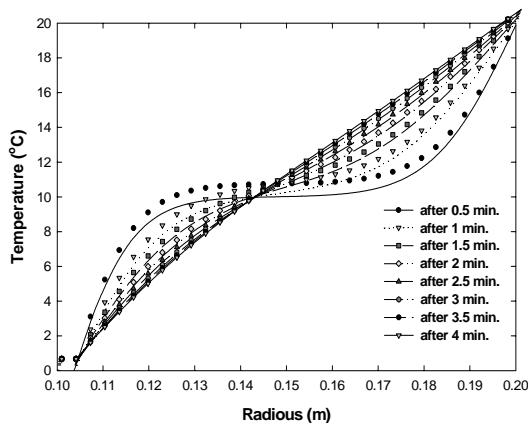


Fig. 9 Temperature distributions by time variation with constant properties at cross section for the STS 304 hollow cylinder

Fig. 9는 일정한 물성치를 사용하였을 경우에 대한 횡단면에서의 온도분포를 시간변화에 대하여 나타낸 것이다. 반경 0.15m를 기준으로 하여 하부 단면에서는 시간 경과에 따라서 온도가 낮아지고, 상부단면에서는 시간분포에 따라 온도가 상승하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상이 나타나는 것은 초기조건을 가열온도와 냉각온도의 평균온도를 인가하였기 때문이다. 시간이 4분 경과 후 단면에서의 온도 분포를 가열부와 냉각부를 기점으로 하여 1차원적인 직선의 형태를 보이고 있으므로, 4분 이후에는 온도분포가 정상상태에 도달했음을 나타내어 주는 것이다.

### 3.2.2 비열의 변화

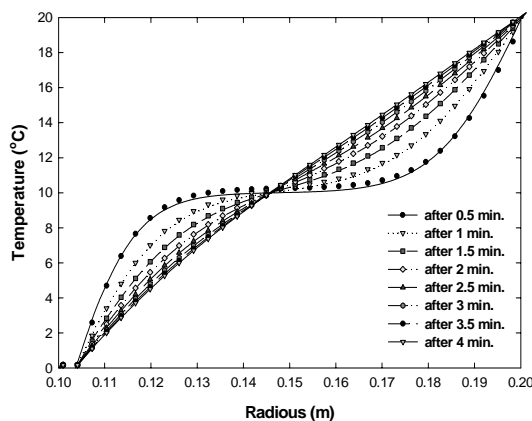


Fig. 10 Temperature distributions by time variation with temperature-dependent specific heat at cross section for the STS 304 hollow cylinder

Fig. 10은 사용된 물성치 중에서 비열만을 온도에 관한 상관식을 적용하여 계산한 단면에서의 온도 분포를 나타낸 것이다. 일정한 물성치를 사용한 경우의 온도분포와 거의 동일한 분포를 보이고 있으며, 정상상태에 도달하는 시간도 동일하다. 이러한 결과로 알 수 있는 것은 비열의 변화는 직접적으로 온도분포에 영향을 주지 않고 시간함에만 영향을 주고 있다는 것을 의미한다.

따라서 비정상상태의 열전도방정식에 있어서 비열의 값은 온도에 관한 상관식을 적용하지 않더라도 거의 동일한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있는 것이다.

### 3.2.3 열전도율의 변화

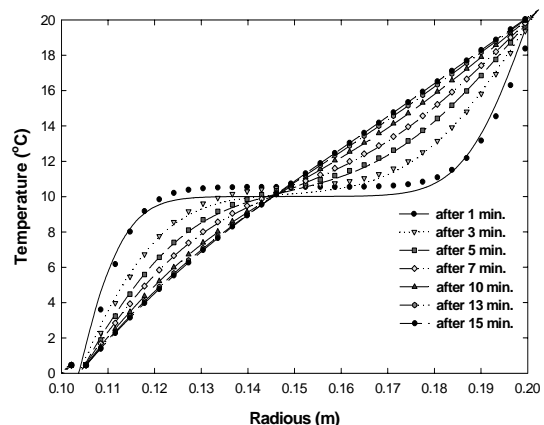


Fig. 11 Temperature distributions by time variation with temperature-dependent conductivity at cross section for the STS 304 hollow cylinder

Fig. 11은 물성치 중에서 열전도율을 온도에 관한 상관식을 이용하여 계산하였을 경우에 대한 단면에서의 온도 분포를 나타낸 것이다. 물성치가 일정한 경우와 비열을 변화시켰을 경우를 비교하여 보면, 이전의 결과들은 중앙부분에서 온도분포가 어느 정도의 기울기를 가지고 분포되었지만 열전도율의 변화에서는 시간이 1분이 경과하기 전까지는 중앙부분에서의 온도분포의 기울기는 거의 0이 됨을 알 수 있다. 이러한 결과가 나타나는 것은 STS 304의 경우 온도가 증가함에 따라 열전도율도 증가하는 현상을 보이고 있는데, 중앙단면에서는 외부에서의 온도기울기가 초기에는 거의 생기지 않기 때문에 온도기울기가 거의 0으로 나타나는 현상을 보이는 것이다.

열전도율을 변화시킨 경우 이전의 경우와 비교하여 정상상태에 도달하는 시간이 약 4배정도 길

게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 이것으로 열전도 방정식의 계산에 있어 열전도율을 일정하게 하였을 경우보다는 온도에 관한 상관식을 이용하여 계산을 수행함으로써 물리적으로 접근된 계산결과를 얻을 수 있을 것이다.

### 3.2.3 열전도율과 비열의 변화

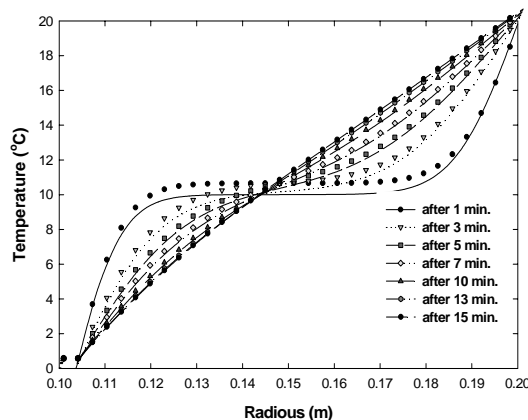


Fig. 12 Temperature distributions by time variation with temperature-dependent specific heat and conductivity at cross section for the STS 304 hollow cylinder

Fig. 12는 비열과 열전도율을 동시에 변화시켰을 경우 단면에서의 온도분포를 나타낸 것이다. 비열과 열전도율을 동시에 변화시킨 것과 열전도율만을 변화시킨 것의 결과를 비교해 보면 거의 동일한 결과를 보이고 있다. 따라서 열전도방정식의 계산에서 비열의 변화는 계산결과에 거의 영향을 미치지 못함을 확실하게 나타내고 있는 것이다.

## 4. 결 론

STS 중공 원통에 대하여 각 물성치를 온도의 함수로 두었을 경우에 대하여 수치해석을 수행하였다.

1) 밀도와 비열, 열전도율을 일정한 물성치 값으로 사용했을 경우 약 4분 정도에 정상상태에 도달하였다.

2) 밀도와 비열을 일정하게 두고 열전도율을 온도에 따라 변화하는 물성치로 사용했을 경우에는 약 15분 정도에 정상상태에 도달하였다.

3) 온도에 따라 변화하는 물성치 중 결과값에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 열전도율인 것으로 나타났으며, 비열의 변화는 온도장의 결과값

에 거의 영향을 미치지 못함을 알 수 있었다.

4) 비정상상태 열전도 방정식의 해석에서 열전도율은 온도에 관한 함수를 적용해야 물리적으로 근접된 값을 얻을 수 있음을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 제 11차 산학연 컨소시엄 연구비와 경상대학교 BK21 지역대학육성 사업단의 지원에 의하여 연구되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참고문헌

- (1) SANG BONG LEE, EUK SOO LEE AND SI YEOUNG KIM, 2001, "Wall Heat Conduction and Convection Heat Transfer from a Cylinder in Cross Flow," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol.15, No.3, pp.1-8.
- (2) D.S. Kim, P.S. Jung, Y.D. Choi and J.K. Hong, 1991, "Analysis of Thermal Conduction in Piston of Gasoline Engine by Boundary Element Method," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol.15, No.4, pp.1290-1300.
- (3) G.H. Lee and Y.D. Choi, 1990, "Analysis of the Steady and Unsteady Heat Conduction in the Cylinder Block Attached with Rectangular Fin," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol.14, No.5, pp.1254-1263.
- (4) C.H. Bai and M. Chung, 1998, "Transient Heat Transfer in Thin Films," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, Vol.14, No.22, pp.1-11.
- (5) S.C. Lee, C.S. Kim, K.Y. Bae, K.P. Choi, H.S. Chung and H.M. Jeong, 2003, "Heat Transfer Characteristics on the Protection Material of Lng Transport Pipe," *The Journal of KASBIR*, Vol.3, No.4, pp.53-60.
- (6) FRANK P. INCROPERA, DAVID P. DeWITT, 1990, "INTRODUCTION TO HEAT TRANSFER", PJohn Wiley & Sons, pp.727-751.
- (7) A.F. Emery and J.E. Lee, 1999, "The Effects of Property Variations on Natural Convection in a Square Enclosure," *Journal of Heat Transfer*, ASME, Vol.121, pp.57-61.