

## 광섬유 대량생산용 인출퍼니스 내 유리섬유 인출공정의 전산해석

김 경 진,<sup>1</sup> 곽 호 상,<sup>\*1</sup> 김 동 주<sup>2</sup>

<sup>1</sup>금오공과대학교 기계시스템공학과

<sup>2</sup>금오공과대학교 기계공학과

### COMPUTATIONAL STUDY OF GLASS FIBER DRAWING PROCESS IN A DRAW FURNACE OF OPTICAL FIBER MASS MANUFACTURING SYSTEM

K. Kim,<sup>1</sup> H.S. Kwak<sup>\*1</sup> and D. Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology

<sup>2</sup>Dept. of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology

*Mass manufacturing of optical fiber includes the process of very thin glass fiber drawing by heating and softening the high purity silica preform and applying the draw tension on the softened tip of preform neck-down profile in a draw furnace. In this computational study, this process is numerically modeled with simplified geometry of the draw furnace which is comprised of essential parts such as concentric graphite heater, muffle tube, and insulation surrounding the heater. The iterative computational scheme is employed between one-dimensional model of neck-down profile prediction and two-dimensional axisymmetric thermo-fluid CFD computation of radiative heating and working gas convection. The computational results show the experimentally observed neck-down profile in heated section of preform, while yielding the reasonable values of draw tension and heater wattage. Also, this study analyzes and discusses the effects of heating conditions such as heater length and temperature on several important aspects of glass fiber drawing process.*

**Key Words :** 광섬유 생산(Optical Fiber Manufacturing), 인출퍼니스(Draw Furnace), 유리섬유 인출(Glass Fiber Drawing), 실리카 모재(Silica Preform), 전산유체역학(CFD)

### 1. 서 론

광신호 형태의 정보를 유리 매질을 통하여 전달하는 광섬유는 매우 낮은 신호전송 손실, 뛰어난 정보 보안성, 경량 및 높은 유연성 등 여러 장점으로 통신분야를 비롯하여 광범위한 산업분야에 널리 쓰이고 있다. 실리카계 광섬유의 제조과정을 살펴보면 인출퍼니스(draw furnace) 내에서 고온도 실리카 재질의 원봉형 모재(preform)가 2000°C 정도의 고온으로 가열되어 연화된 후에 일정한 장력을 주어 매우 가는 유리섬유(glass fiber)가 인출이 된다. 이 유리섬유는 냉각장치를 통과하면서 상온에 가깝게 냉각되어진 후 피복장치를 통과하면서

유리섬유 표면 보호 및 기계적 강도 보존의 목적으로 액상의 폴리머계 피복재가 이중으로 코팅되어지고, 자외선 조사로 액상 피복재가 경화되어 최종적으로 완성된다[1].

이러한 광섬유 제조공정에서 앞서 언급된 실리카 모재로부터 유리섬유 인출공정이 이루어지는 인출퍼니스가 Fig. 1에 개략적으로 도시되어 있다. 퍼니스 내부로 서서히 공급되는 모재가 흑연저항 히터로 실리카의 연화점 이상으로 가열된 후 용융된 끝부분을 계속적으로 당겨져 늘어나며 유리섬유가 인출된다. 실제 광섬유 제조공정에서는 히터에 의한 직접적인 모재 가열보다는 대체적으로 원통형 머플튜브(muffle tube)를 모재와 히터 사이에 두는 간접적인 가열방식이 흔히 사용된다[2,3]. 유리섬유가 인출되는 공정에서 모재의 직경이 5~20 cm 정도에서 유리섬유의 산업표준 직경인 125  $\mu\text{m}$ 로 줄어들며 모재는 극심한 직경 변화를 겪으며 이를 넥다운 형상(neck-down profile)이라 한다. 퍼니스에서 인출되는 유리섬유의 품질이 광섬유의 최종적인 품질에 매우 큰 영향을 미치게

Received: November 18, 2013, Revised: December 9, 2013,  
Accepted: December 9, 2013.

\* Corresponding author, E-mail: hskwak@kumoh.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2013.18.4.069>

© KSCFE 2013

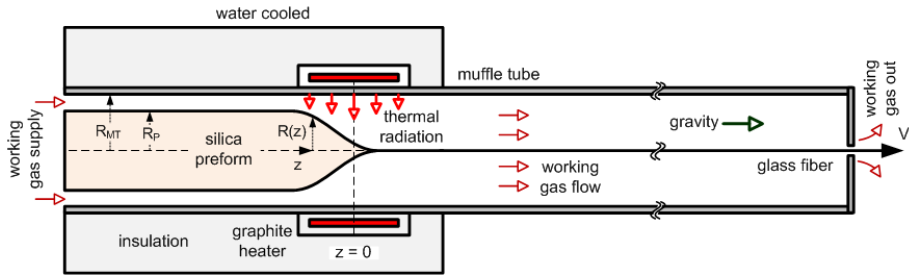


Fig. 1 Schematic of glass fiber drawing process in a simplified draw furnace geometry

되며 유리섬유의 균일한 직경, 인장강도, 광학적 성능 등은 모재의 넥다운 형상 및 인출장력에 의하여 큰 영향을 받게 된다고 알려져 있다[2,4].

광섬유의 대량 생산공정이 실현된 1970년대 후반 이후 모재 넥다운 형상 해석에 대하여 다양한 수치적 연구가 시도된 바 있다. Paek et al.[4,5]은 모재 열복사에 의한 실리카 점도의 국소적 변화를 고려한 1차원적 모재 인장모델을 개발하여 넥다운 형상을 예측하였다. 하지만 당시의 낮은 인출선속 조건 하에서 작동기체의 영향은 실험결과에서 추정된 대류열전달 계수를 일정하게 주어 간소화하여 처리하였다.

그 이후 여러 연구에서는 퍼니스 내부의 작동기체의 대류 열유동을 2차원 축대칭 계산영역에서 고려하여 히터의 열복사 가열과 더불어 모재 넥다운 형상 예측에 포함시켰으며, 모재 가열온도, 인출선속, 작동기체 성분비 등의 여러 공정인자가 유리섬유 인출에 미치는 영향이 분석된 바 있다[6-11]. 하지만 지금까지의 모든 관련 연구에서 머플튜브 내부만을 고려하는 등 실제 인출퍼니스 형상을 매우 간략화한 모델이 사용되었으며, 히터 가열을 모사하여 튜브 표면상의 온도를 가우시안 분포 등을 이용하여 임의로 주어 해석을 진행하였다.

본 연구에서는 광섬유 제조현장에서 채용되는 인출퍼니스의 형상을 고려하여 좀 더 실제적 모델을 수립하여 유리섬유 인출공정에 대한 복합열전달 현상 해석 및 모재 넥다운 형상 예측을 시도하며, 현재 광섬유 생산공정 조건에 맞추어 퍼니스 히터 형상 및 온도가 유리섬유 인출공정에 미치는 영향을 분석하려 한다.

## 2. 해석모델 및 해석방법

### 2.1 유리섬유 인출퍼니스 모델

광섬유 대량생산에서 채용되는 인출퍼니스의 구조는 부가 장치 등으로 실제로는 상당히 복잡하고 제조사에 따라 서로 차이가 있으나[12], 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 핵심적인 퍼니스 내 장치를 단순화하여 해석대상으로 삼았다. 머플튜브 내로 공급되는 모재는 바깥쪽에 위치한 환형 히터에 의하여 가열된다. 또한 히터 전력량 감소를 목적으로 하여 단열재가

히터 주변 부위와 머플튜브 상부를 감싸고 있다. 단열재와 히터 사이에는 약간의 간격이 존재한다.

인출퍼니스 모델은 실제 장치를 기준으로 하여 다음과 같은 사양을 대상으로 하였다. 내부직경 123 mm, 두께 3 mm인 흑연 재질 머플튜브의 상부 및 하부 길이는 히터 중심부를 원점으로 하여 각각 1 m와 2 m이다. 히터의 내부 직경 및 두께는 각각 137 mm와 5 mm이며, 그 길이는 기준형상인 경우 250 mm로 주었다. 단열재의 외부 직경과 길이는 각각 430 mm와 1.25 m이다. 인출퍼니스 내부로는 장치 표면의 산화 방지 및 열전달 촉진을 위하여 Fig. 1에서 묘사된 것처럼 동일 조성비의 헬륨과 아르곤 혼합기체가 퍼니스 내부로 공급되며, 그 공급량은 10 LPM으로 고정하였다. 공급된 작동기체는 10 mm 직경의 유리섬유 출구부에서 유리섬유와 함께 퍼니스를 빠져나간다. 모재에 작용하는 중력장의 방향은 유리섬유 인출 방향과 동일하다.

### 2.2 유리섬유 인출공정 전산해석

전산해석의 단순화를 위하여 반경 방향으로의 모재의 속도 및 온도의 변화를 무시하여 1차원적 해석으로 모재의 넥다운 형상을 구하였다. 인출방향 관성력, 점성력, 중력을 고려하면 모재 및 인출 유리섬유 인장 현상에 대한 다음과 같은 운동량방정식이 성립되며, 이를 유리섬유 인출이 이루어지는 모재의 넥다운 형상을 해석할 지배방정식으로 사용하였다[4,13].

$$\rho \frac{d}{dz}(R^2 v^2) = \frac{d}{dz} \left( 3R^2 \mu(T) \frac{dv}{dz} \right) + \rho g R^2 \quad (1)$$

위의 식에서  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $g$ 는 각각 실리카 모재의 질량밀도, 점도, 그리고 중력가속도이며,  $R(z)$ ,  $v(z)$  및  $T(z)$ 는 변화하는 모재의 반경, 그리고 모재의 축방향 속도 및 온도이다. 점성력의 영향이 지배적이기에 모재 표면에서의 표면장력은 무시하였다. 모재의 반경과 축방향 속도는 공정인자로 주어지는 인출 유리섬유의 목표 반경( $R_f$ ) 및 인출속도( $V_f$ )에 따라 질량보존에 의한 다음의 관계를 가진다[13].

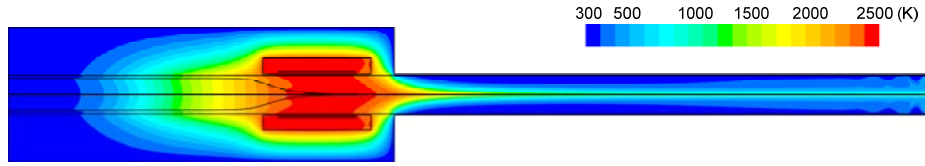


Fig. 2 Temperature distribution in glass fiber drawing furnace ( $V_f = 30$  m/s,  $T_H = 2400$  K,  $W_H = 250$  mm)

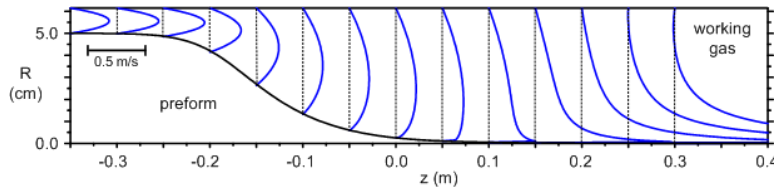


Fig. 3 Axial velocity profiles of working gas around the neck-down region of heated preform ( $V_f = 30$  m/s,  $T_H = 2400$  K,  $W_H = 250$  mm)

$$R(z) = R_f \sqrt{V_f / v(z)} \tag{2}$$

모재 넥다운 형상 지배방정식인 식 (1)의 해석을 위한 경계조건은 인출퍼니스 입구와 출구에서의 모재 및 인출섬유 속도로 결정된다. 다만 경계치 문제 형태인 이 지배방정식의 해석에는 모재의 축방향 온도 변화가 필요하다. 이를 위하여 인출퍼니스 내 모재의 복사 가열 및 내부 열전도, 그리고 작동기체 유동에 의한 대류열전달 효과 등을 고려한 2차원적 축대칭 열유동 해석에 상용 CFD 패키지인 FLUENT가 이용되었다. 작동기체 유동은 층류로 가정하였으며, 장치 내부 온도변화가 극심하기에 혼합기체의 물성치는 온도의 함수로 주었다.

또한 1차원적 모재 넥다운 형상 해석모델 및 2차원적 열유동 해석모델이 상호 반복계산방식으로 연동되는 해석기법이 적용되었으며, 그 자세한 계산방법은 이전 연구[11]에 자세히 설명되어있다. 실리카 모재의 투명도로 인한 모재 내 복사에너지 투과 및 흡수효과는 Rosseland 근사 모델을 이용하여 실리카 열전도도(2.88 W/m·K)에 더하여 유효 열전도도로 환산하였다[4,10].

### 3. 해석결과 및 토론

실제 광섬유 생산현장의 유리섬유 인출공정의 사례를 모사하여 본 연구에서는 인출퍼니스 내 모재의 기본 가열조건으로서 히터의 온도 및 히터 길이를  $T_H = 2400$  K 및  $W_H = 250$  mm로 주었다. 공급되는 모재의 직경은 10 cm이며, 출구에서의 유리섬유 직경은 125  $\mu$ m이다. 유리섬유 인출속도는 최근의 국내 광섬유 생산속도에 해당하는  $V_f = 30$  m/s 또는 1800 rpm으로 하여 전산해석을 진행하였다.

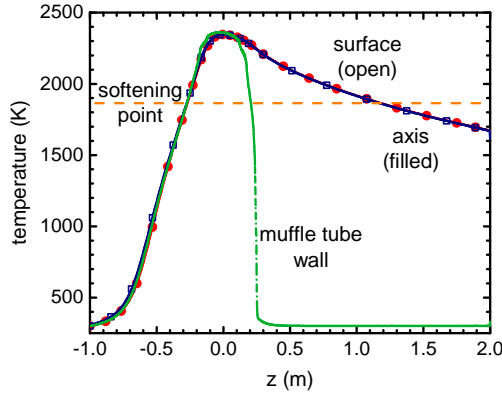
모재 및 작동기체 공급온도, 그리고 수냉 적용 장치 외벽 온도는 모두 상온인 300 K로 설정하였다. 머플튜브 및 단열

재의 열전도도는 각각 16.3과 1 W/m·K이며, 유리섬유 표면 방사율은 0.885로 일정하게 주었다. 모재 재질인 비결정질 퓨즈 실리카(fused silica)는 1600°C 정도에서 연화가 시작되며 온도가 증가함에 따라 매우 큰 점도의 변화를 보여, 가열되는 모재가 인장되면서 넥다운 형상을 형성하도록 한다. 본 연구의 1차원적 예측모델에서 사용되는 실리카 모재 및 인출 유리섬유의 점도는 온도(K 단위)의 함수로서 다음과 같은 실험적 근사식을 이용하였으며 그 단위는 Pa·s이다[10].

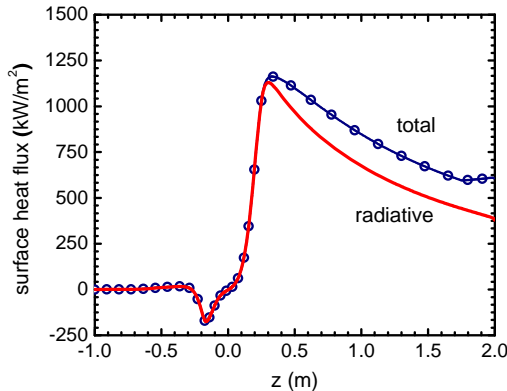
$$\mu(T) = 0.1 \exp(-14.368 + 61939.54/T) \tag{3}$$

앞서 언급한 1차원적 넥다운 형상 예측모델과 2차원적 열유동 해석간의 연동해석은 약 10회 내외의 상호 반복계산으로 수렴이 이루어졌다. 이런 반복계산에서 최초 모재 넥다운 형상은 어느 정도 임의로 주더라도 수렴성은 문제없이 유지되었다. 2차원 열유동 해석 시에 모재를 유체유동으로 취급하여 계산하였는데, 이 경우 모재 점도를 실제 값이 아닌 임의의 큰 값을 주었으며 반경방향으로의 속도변화가 매우 작기에 최종 계산결과에는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

위의 기본 인출조건에 대한 해석결과로 인출퍼니스 전체 영역상의 온도분포가 Fig. 2에 나타나 있다. 실제공정에서 관찰되는 모재의 넥다운 형상이 히터가 설치된 가열영역 위쪽에서부터 가열영역 중간위치까지 분포되며, 넥다운 형상 영역 및 그 인근의 모재 내 반경방향 온도분포가 매우 균일함을 볼 수 있다. Fig. 3에서는 모재 넥다운 형상 부근에서 작동기체의 축방향 속도분포가 나타나있다. 작동기체 유동은 전체적으로 상당히 낮은 속도를 보이며 특히 넥다운 형상의 표면에서도 유동박리 없이 안정적인 층류유동 형태를 이루고 있다. 유리섬유가 인출되는 모재 넥다운 형상 끝부분부터는 유리섬유 표면속도의 증가에 따라 작동기체 역시 Couette 유동 형태를 나타낸다. 한편 매우 작은 유리섬유 출구부로 인하여 인근



(a) Axial temperature of silica preform and muffle tube wall



(b) Total and radiative surface heat flux on preform

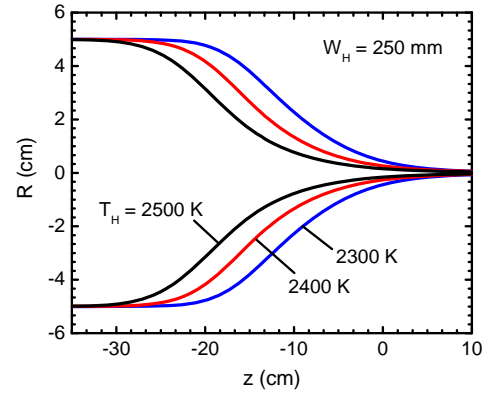
Fig. 4 Surface heat flux and temperatures of silica preform and muffle tube inner wall in axial direction for the base case ( $V_f = 30$  m/s,  $T_H = 2400$  K,  $W_H = 250$  mm)

에서 작동기체 재순환 영역이 발생하나 유리섬유 인출에 미치는 영향은 극히 적다.

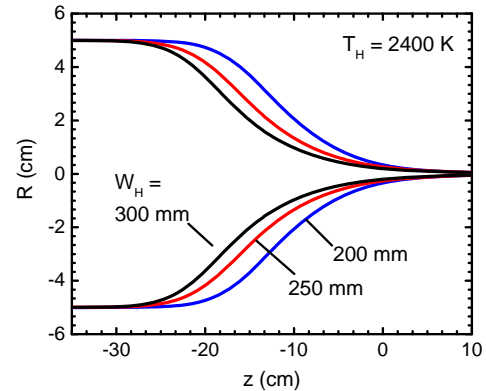
Fig. 4(a)는 인출퍼니스 내 모재 및 인출 유리섬유의 축방향 온도분포를 머플튜브 내벽온도와 함께 보여준다. 모재의 표면온도가 중심축에서의 온도가 거의 일치함을 볼 때 반경방향으로의 모재 온도분포를 무시한 1차원적 넥다운 형상 예측모델의 가정에 문제가 없음이 확인된다. 또한 넥다운 형상이 끝나는 영역까지는 모재 온도가 머플튜브의 온도를 그대로 반영하고 있다. 모재 및 유리섬유 표면에서의 열유속을 Fig. 4(b)에서 관찰하면 모재의 가열은 머플튜브 온도분포에 따른 열복사가 지배적이며, 머플튜브 후반부에서의 유리섬유의 고속이동에 따라 강제대류 냉각효과가 어느 정도 나타남을 볼 수 있다.

Table 1 Effects of heater temperature on the glass fiber drawing process in draw furnace ( $W_H = 250$  mm)

heater temperature $T_H$	$T_{max}$ (K)	$T_{exit}$ (K)	$F_T$ (g)	heater wattage (kW)
2300 K	2245	1632	245.7	23.2
2400 K	2346	1671	62.5	25.7
2500 K	2444	1707	21.1	28.6



(a) Effects of heater temperature



(b) Effects of heater length

Fig. 5 Effects of heating conditions on the formation of neck-down profile in heated silica preform

다음으로 인출퍼니스 가열조건이 유리섬유 인출공정에 미치는 영향을 전반적으로 알아보았다. 히터의 가열온도( $T_H$ ) 및 히터 길이( $W_H$ ) 변화에 따른 넥다운 형상이 Fig. 5에 나타나 있으며, Table 1과 2에는 가열되는 모재의 최고온도( $T_{max}$ ), 유리섬유의 출구온도( $T_{exit}$ ), 유리섬유 인출장력( $F_T$ ), 그리고 히터 전력소모량이 각 가열조건에 따라 정리되어 있다. 전력소모량은 히터 표면의 열유속을 적분하여 구하였으며, 점성력 성분이 지배적인 유리섬유 인출장력은 다음과 같이 계산된다[7,9].

$$F_T = 3\pi\mu R^2 \frac{dv}{dz} + \pi\rho \int_z^L R^2 v \frac{dv}{dz} dz - \pi\rho g \int_z^L R^2 dz \quad (4)$$

Table 2 Effects of heater length on the glass fiber drawing process in draw furnace ( $T_H = 2400$  K)

heater length $W_H$	$T_{max}$ (K)	$T_{exit}$ (K)	$F_T$ (g)	heater wattage (kW)
200 mm	2330	1660	92.6	23.2
250 mm	2346	1671	62.5	25.7
300 mm	2357	1678	52.6	28.7

기본 가열조건(2400 K 및 250 mm)에서는 실제 광섬유 생산공정에서 보고되는 바[12]와 유사하게 20 kW 대의 히터 전력소모량과 100 g 대의 인출장력이 계산되어 본 해석방법의 타당성을 보여준다. 또한 유리섬유의 출구온도가 연화점 이하로 나타나 유리섬유가 머플튜브 후반부를 지나며 충분히 냉각되며 출구에서 재경화됨이 확인된다.

히터 가열온도의 변화에 따라 예상대로 모재의 온도 및 벡다운 형상에 상당히 큰 영향을 미침을 볼 수 있다. 특히 광섬유 생산공정에서 100 g 정도로 권장되는 인출장력이 가열온도에 따라 매우 민감하게 변하게 된다. 이에 비하여 Table 2에 나타난 바처럼 히터 길이의 영향은 상대적으로 작아 유리섬유 인출장력이 크게 변하지 않았으며, 인출퍼니스 출구에서의 유리섬유 온도에도 큰 영향이 없었다. 유리섬유 인출공정에서는 적절한 인출장력 및 벡다운 형상 유지를 비롯하여 유리섬유 냉각 정도 등을 다각도로 고려해주어야 하는데, 본 연구에서는 히터 가열온도나 히터 형상의 조정을 통하여 이를 수 있음을 보여준다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 광섬유 제조공정에서 가열 및 연화되는 실리카 모재로부터 매우 가는 유리섬유가 인출되는 세부공정을 전산해석하였다. 머플튜브, 히터, 단열재 등으로 구성되는 인출퍼니스를 실제 장치에 가깝게 모델링하였으며, 장치 내부로 공급되는 작동기체 유동 역시 해석에 포함되었다. 전산해석은 1차원적 모재 벡다운 형상 예측모델과 2차원적 축대칭 열유동 시뮬레이션간의 반복계산으로 진행되었다. 실제 공정에 해당하는 인출퍼니스 가열조건에 따른 해석결과로 실험적으로 관찰되는 모재 벡다운 형상을 보여주었으며, 생산현장에서 보고된 값과 유사한 인출장력 및 히터 전력소모량이 예측되었다. 또한 유리섬유 인출장력 및 유리섬유의 퍼니스 출구 온도 등 중요 공정인자의 조정을 위하여 히터 온도 및 길이와 같은 가열조건에 대한 영향도 조사되었다.

#### 후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문이다.

#### References

- [1] 1996, Murata, H., *Handbook of Optical Fibers and Cables*, Marcel Dekker, Inc., New York, USA.
- [2] 1997, Makinen, M., "A Test Facility for Enhanced Fiber Drawing Process Development," in Harmer, A.L. (ed.), *Communications Cabling*, IOP Press, pp.65-71.
- [3] 1989, Imoto, K., Sumi, M., Toda, G. and Suganuma, T., "Optical Fiber Drawing Method with Gas Flow Controlling System," *Journal of Lightwave Technology*, Vol.7, No.1, pp.115-121.
- [4] 1999, Paek, U.C., "Free Drawing and Polymer Coating of Silica Glass Optical Fibers," *Journal of Heat Transfer*, Vol.121, No.4, pp.774-788.
- [5] 1978, Paek, U.C. and Runk, R.B. "Physical Behavior of the Neck Down Region during Furnace Drawing of Silica Fibers," *Journal of Applied Physics*, Vol.49, No.8, pp.4417-4422.
- [6] 1997, Lee, S.H.-K. and Jaluria, Y., "Simulation of the Transport Processes in the Neck-Down Region of a Furnace Drawn Optical Fiber," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.40, No.4, pp.843-856.
- [7] 1998, Choudhury, S.R. and Jaluria, Y., "Practical Aspects in the Drawing of an Optical Fiber," *Journal of Materials Research*, Vol.13, No.2, pp.483-493.
- [8] 2000, Yin, Z. and Jaluria, Y., "Neck Down and Thermally Induced Defects in High-Speed Optical Fiber Drawing," *Journal of Heat Transfer*, Vol.122, No.2, pp.351-362.
- [9] 2005, Cheng, X. and Jaluria, Y., "Optimization of a Thermal Manufacturing Process: Drawing of Optical Fibers," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.48, No.17, pp.3560-3573.
- [10] 2006, Lee, K.-M., Wei, Z., Zhou, Z. and Hong, S.-P., "Computational Thermal Models for Design of a Modern Fiber Draw Process," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Vol.3, No.1, pp.108-118.
- [11] 2012, Kim, K., Kwak, H.S. and Kim, D., "The Role of Helium/Argon Gas Flow in a Glass Fiber Drawing Furnace," *Computational Thermal Sciences*, Vol.4, No.2, pp.263-270.
- [12] 2012, Kim, K., "Heat Transfer Analysis of Silica Glass Fiber Drawing Process in a Draw Furnace of Optical Fiber Manufacturing System," *Proceedings of the 8th International Symposium on Heat Transfer*, Beijing, China.
- [13] 2011, Kim, K., Kim, D. and Kwak, H.S., "Radiative Heat Transfer Analysis of Glass Fiber Drawing in Optical Fiber Manufacturing," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol.16, No.1, pp.22-29.