광섬유 생산공정용 퍼니스 내의 모재 가열 및 유리섬유 인출에 대한 열전달 해석

김 경 진[1], 김 동 주[2], 곽 호 상[*1]

HEAT TRANSFER ANALYSIS ON THE PREFORM HEATING AND THE GLASS FIBER DRAWING IN A GRAPHITE FURNACE FOR OPTICAL FIBER MANUFACTURING PROCESS

K. Kim, D. Kim, and H.S. Kwak

Glass fiber drawing from a silica preform is one of the most important processes in optical fiber manufacturing. High purity silica preform of cylindrical shape is fed into the graphite furnace, and then a very thin glass fiber of 125 micron diameter is drawn from the softened and heated preform. A computational analysis is performed to investigate the heat transfer characteristics of preform heating and the glass fiber drawing in the furnace. In addition to the dominant radiative heating of preform by the heating element in the furnace, present analysis also includes the convective heat transport by the gas flowing around the preform that experiences neck-down profile and the freshly drawn glass fiber at high fiber drawing speed. The computational results present the effects of gas flow on the temperature of preform and glass fiber as well as the neck-down profile of preform.

Key Words : 광섬유(Optical Fiber), 유리섬유 인출(Glass Fiber Drawing), 실리카 모재(Silica Preform), 열전달해석(Heat Transfer Analysis)

1. 서 론

광섬유의 일반적인 제조과정은 먼저 고순도 실리카 재질의 모재(preform)가 퍼니스 내에서 고온으로 가열되어 연화된 후 매우 가는 유리섬유(glass fiber)가 인출되는 공정으로 시작된다. 이 유리섬유는 헬륨주입 냉각장치에서 상온에 가깝게 냉각되어진 후 피복장치를 통과하면서 유리섬유 표면에 액상의 피복재가 코팅되어지며, 자외선 조사를 이용하여 표면의 피복재가 경화되면서 완성된다[1].

Fig. 1에는 가열된 모재로부터의 유리섬유 인출공정이 이루어지는 퍼니스(furnace)의 개략적 구조가 그려져 있다. 퍼니스에서 흑연 히터로 원봉형의 모재를 실리카의 연화점까지 가열한 후 일정한 장력을 주어 계속해서 당겨져 늘어나면서 유리섬유가 인출된다. 유리섬유는 그 후 적정한 냉각을 통하여 다시 경화된다. 유리섬유 인출공정에서 모재는 원래 직경인 5~15 cm 정도에서 유리섬유의 산업표준 직경인 125 μm로 줄어들며 극심한 형상 변화를 겪는데, 이런 모재 직경의 변화를 넥다운(neck-down) 형상이라 한다.

그동안 유리섬유 인출공정에 대한 연구가 여러 번 시도된 바 있으나, 당시의 낮은 인출속도를 기준으로 하였다[2-7]. 하지만 생산성에 직결되는 광섬유 인출속도가 해마다 높아지면서 현재 국내에서도 2000 m/min 정도에까지 이르러, 이러한 고속 인출속도에서의 유리섬유 인출공정에 대한 연구가 필요하다. 또한 유리섬유의 직경 균일도, 인장강도, 광학적 특성 등 유리섬유의 전반적 품질이 모재의 넥다운 형상 및 인출장력에 의하여 큰 영향을 받는다고 알려져 있다[1,2].

본 연구에서는 광섬유 생산공정용 퍼니스 내의 모재 가열 및 유리섬유 인출, 그리고 내부기체 유동에 대한 복사 및 대류 열전달 모델링 및 전산해석을 수행하여 가열되는 모재의 온도분포 및 넥다운 형상 등 전반적인 유리섬유 인출현상을 분석하였다.

1 정회원, 금오공과대학교 기계시스템공학과
2 정회원, 금오공과대학교 기계공학과
* TEL : 054) 478-7300
* Corresponding author, E-mail: hskwak@kumoh.ac.kr

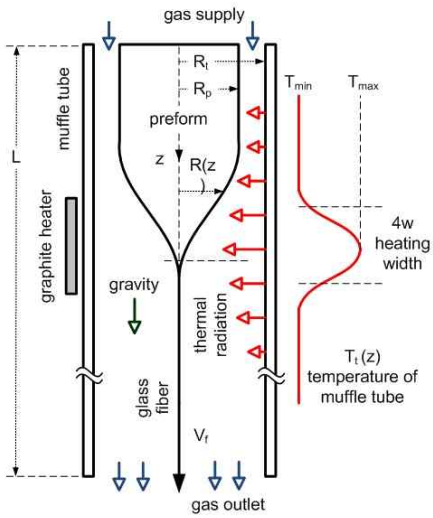

Fig. 1 Schematic diagram of glass fiber drawing in the furnace.

2. 해석모델 및 해석방법

2.1 모재 넥다운 해석모델

광섬유 생산현장의 실제 퍼니스의 구조는 상당히 복잡하나 본 연구에서는 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 단순화하였다. 연화되는 모재의 유동은 비압축성 층류 정상유동으로 가정하고 반경방향의 모재의 속도 변화를 무시한다면 1차원적 해석이 가능하다. 이에 다음의 운동량방정식이 성립되며, 이를 모재의 넥다운 형상을 해석할 지배방정식으로 사용하였다[2,7].

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

여기서 ρ, μ는 각각 실리카 모재의 질량밀도 및 점도이다. 중력가속도 g의 방향은 유리섬유의 인출방향과 동일하다. $R(z)$, $v(z)$는 변화하는 모재의 반경과 축방향 속도인데, 질량보존에 따라 공정인자로 주어지는 인출 유리섬유의 목표 반경(R_f) 및 인출속도(V_f)와 다음의 관계를 가진다.

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

경계값 문제인 식(1)에 대한 해석영역은 $z=0\sim L$로서 영역의 양 끝단에서의 경계조건은 다음과 같이 주어진다.

$$z=0,\ v=V_p,\ R=R_p \quad (3)$$

$$z=L,\ v=V_f,\ R=R_f \quad (4)$$

모재 공급속도(V_p)는 넥다운 이전의 모재 반경(R_p) 및 유리섬유 인출조건과의 질량보존 관계에 의하여 쉽게 구해진다.

2.2 실리카 모재의 물성치

모재의 재질인 실리카는 온도가 증가함에 따라 점도가 매우 크게 감소한다. 본 연구에서는 다음과 같은 점도 근사식을 이용하였으며 그 단위는 Pa·s이다[7].

$$\mu(T) = 0.1\exp(-14.368 + 61939.54/T) \quad (5)$$

실리카 모재의 투명도로 인한 매질 내 복사에너지 투과 및 흡수를 다음과 같은 Rosseland 근사모델을 이용하여 열전도도로 환산하였다[2,8].

$$k_r(T) = \frac{16n^2\sigma T^3}{3\gamma} = 1.54\times10^{-9}T^3 \quad (6)$$

식 (6)에서 n과 γ는 각각 실리카의 굴절률(1.42) 및 평균흡수계수(4 cm^{-1})이다. 모재의 유효 열전도도는 전통적 의미의 열전도도(k_m = 2.68 W/m·K)와 Rosseland 유효 열전도도의 합으로 계산되었다. 모재 표면의 방사율은 0.885이며, 흑연 재질의 머플튜브 표면은 흑체라고 가정하였다. 실리카 모재의 질량밀도 및 비열은 2200 kg/m^3과 1350 J/kg·K로 일정하게 주었다.

2.3 해석방법

모재 넥다운 형상을 결정하는 1차원적 지배방정식 (1)의 해석에는 모재의 축방향 온도 및 점도 분포가 필요한데, 머플튜브 내부의 모재 및 내부기체의 2차원적 축대칭 열유동 해석과 연동되어 그 계산이 진행되었다. 먼저 모재 온도에 대한 초기 가정값을 이용하여 식 (1)의 해석에서 넥다운 형상을 구하며, 이를 이용하여 FLUENT 상용패키지를 사용한 2차원적 해석으로 모재의 온도분포를 구하고 다시 넥다운 형상을 보정하여 2차원 계산을 하는 방식으로 반복계산을 수행하였다.

머플튜브와 모재 표면 사이의 복사열전달이 고려되었으며 내부기체에 의한 기체복사 효과는 무시되었다. 복사열전달이 모재의 가열 및 연화에 지배적인 열전달 방식이나[9], 내부기체에 의한 대류열전달 효과도 해석에 포함되어 유리섬유 인출에 미치는 영향을 분석하였다. 내부기체의 유동은 층류로 가정하였으며 기체의 물성치는 온도의 함수로 주었다.

모재의 가열은 원통형 머플튜브를 모재와 흑연 히터 사이에 두는 간접적인 가열방식이 일반적이며 히터에서 발생되는 주울열 머플튜브를 거쳐 모재에 전달된다. 하지만 이 과정을 생략하고 머플튜브 표면의 온도분포 $T_t(z)$를 다음과 같은 정상분포를 이용하여 모사하였다.

$$\frac{T_t(z)-T_{\min}}{T_{\max}-T_{\min}} = \exp\left[-\frac{(z-z_{\max})^2}{2w^2}\right] \quad (7)$$

이러한 머플튜브 상의 온도분포는 최대온도($T_{\max}$), 최소온도($T_{\min}$) 및 온도분포폭($4w$)로 표현된다.

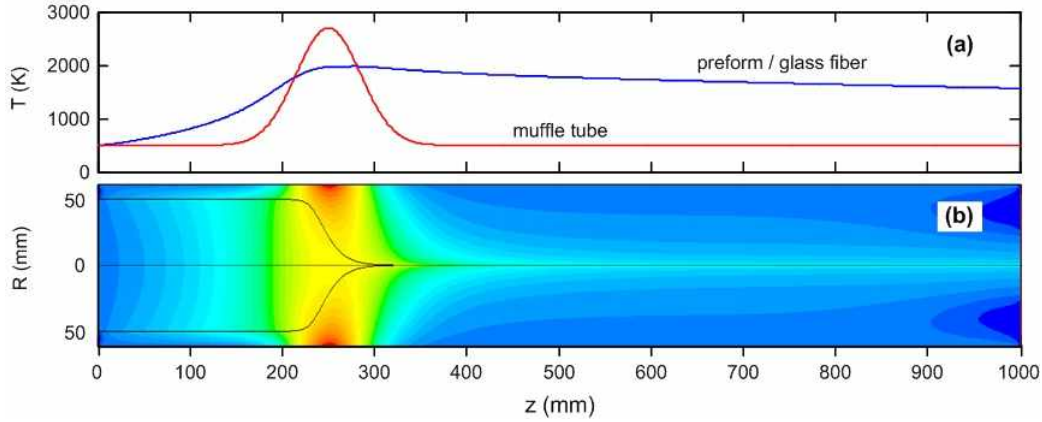

Fig. 2 Axial centerline temperature of preform and glass fiber (a) and preform neck-down profile with spatial temperature distributions (b) for the helium gas supply of 5 LPM at fiber drawing speed of 30 m/s.

3. 해석 결과 및 토론

본 연구가 다루고 있는 유리섬유 인출공정의 수치적 해석에서 기본 공정조건으로서 실리카 모재의 연화 전 반경(R_p)은 50 mm, 그리고 머플튜브의 반경(R_t)은 61.5 mm이며, 모재의 공급온도는 500 K로 주었다. 모재에서 인출되어 충분한 냉각으로 경화되었을 때의 유리섬유의 목표 반경(R_f)은 산업표준인 62.5 μm이다. 유리섬유 인출속도(V_f)는 현재 광섬유 생산현장의 개략적 인출속도인 1800 m/min 또는 30 m/s가 기본값으로 이용되었다. 퍼니스 내 모재 가열조건인 머플튜브 표면의 온도분포에 대하여 $T_{\max}$와 $T_{\min}$은 각각 2700 K 및 500 K, 그리고 온도분포폭은 14 cm로 주어졌다. 축방향 계산영역의 길이는 1000 mm로 주었는데, 머플튜브 온도분포의 최대값이 위치하는 지점은 $z_{\max}$ = 250 mm이다. 퍼니스 내부 기체는 순수 헬륨으로 5 LPM의 유량이 모재가 머플튜브 내로 들어가는 상부에서 공급됨을 기본으로 하였다.

이러한 기본 공정조건에 대한 1차원적 모재 형상 해석 및 2차원적 퍼니스 내 온도분포 해석 간의 반복 계산에 대한 결과가 머플튜브 표면에서 주어진 온도분포와 함께 Fig. 2에 나타나 있다. 1차원적 모재 형상 해석을 위한 모델링에서 모재의 반경방향 온도 변화가 축방향 온도변화에 비교하여 무시할 만큼 매우 작다는 가정이 전제조건이었다. 모재 형상 해석에 필요한 모재의 1차원적 축방향 온도는 Fig. 2(b)에서 보이는 2차원적 온도장 해석의 결과에서 모재의 중심축 온도가 사용되었다. 모재의 2차원적 온도분포를 살펴보면 반경방향의 온도가 상당히 일정함을 보여주고 있어 앞서 설명된 가정이 유효함을 알 수 있다.

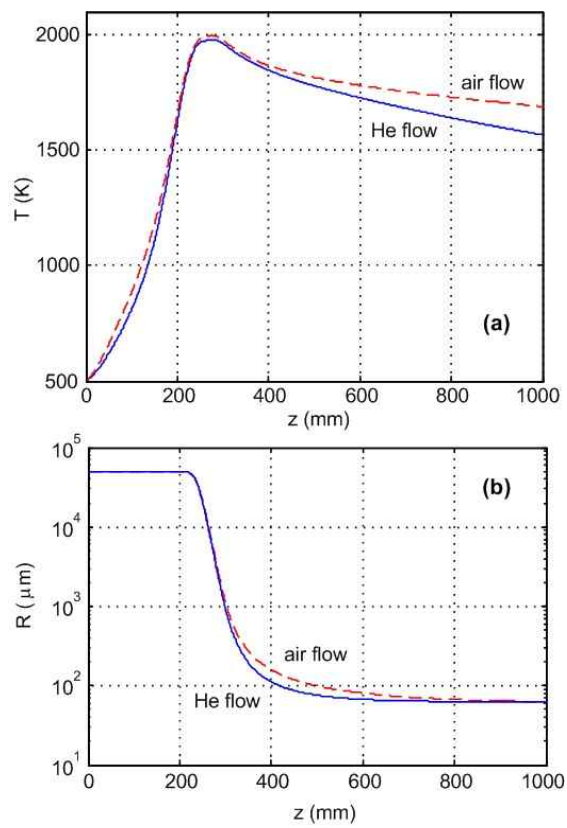

Fig. 3 Effects of helium and air gas flows on the preform and glass fiber temperature (a) and preform neck-down profile (b) for the gas supply of 5 LPM at fiber drawing speed of 30 m/s.

모재의 넥다운 형상을 관찰하면 머플튜브 상 최대온도 위치를 중심으로 하여 약 220~300 mm의 축방향 영역에서 예상되어진 형상을 갖추고 발생함을 볼 수 있다. 모재의 온도분포와 모재 넥다운 형상을 비교하여 보았을 때, 모재의 넥다운 형상이 본격적으로 시작되는 개략적인 위치인 z = 220 mm에서 모재의 계산 온도가 퓨즈 실리카의 연화온도인 1800 K 정도와 일치하고 있다.

다음으로 앞서의 공정 기본조건에서 내부기체가 헬륨이 아닌 공기로 대체하고 나머지 조건은 동일하게 주어 앞서와 같은 방식으로 해석을 수행하였다. 광섬유 생산공정에서는 고가의 헬륨이 퍼니스 내부만 아니라 타 세부공정에서 흔히 쓰이는데, 여기서는 헬륨 기체유동이 유리섬유 인출공정에 미치는 영향을 분석하고자 같은 유량의 공기가 공급되는 경우와 비교분석하였다. Fig. 3에는 헬륨 또는 공기가 상부에서 5 LPM의 유량으로 공급되었을 때 넥다운 형상을 거치는 모재의 축방향 온도분포 및 형상 변화를 보여준다.

두 기체 경우 모두 모재 넥다운 형상 인근의 모재 최대온도는 약 2000 K로 비슷한데, 이 지역은 머플튜브로부터의 복사열전달이 지배적인 구간으로 대류열전달 효과가 상대적으로 미약하다. 이에 비하여 넥다운 형상의 전후 구간에서는 내부기체의 대류효과가 나타남을 Fig. 3(a)에서 볼 수 있다. 특히 갓 인출된 유리섬유가 냉각되는 머플튜브 후반부 구간에서는 기체의 종류가 유리섬유의 온도하강에 큰 영향을 미치고 있다. 머플튜브 하단에서 나가는 유리섬유의 최종온도는 헬륨이 쓰였을 때는 1570 K이며, 공기의 경우는 1690 K로서 100도 이상 온도차가 났다. 이와는 대조적으로 Fig. 3(b)에서 모재의 넥다운 형상을 보면 기체 종류가 넥다운 형상에 결정적인 영향을 미치지 못하며, 넥다운 형상이 마무리되는 부근에서 약간의 차이를 보여준다. 따라서 퍼니스 내 유리섬유 인출공정에서 헬륨의 주된 역할은 모재 넥다운 형상에서 인출되어져 나오는 유리섬유의 냉각이라고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 광섬유 생산단계인 퍼니스 내 유리섬유 인출공정을 전산해석 하였다. 퍼니스의 머플튜브 내부에서 국부적으로 가열되어 연화되는 실리카 모재에서 유리섬유가 인출되는 현상을 1차원적 모재 운동량방정식의 모델링과 2차원적 복사 및 대류 열전달 해석을 통하여 모재의 넥다운 형상 및 인출 유리섬유의 온도 변화가 분석되었다. 퍼니스 내에 공급되는 내부기체가 헬륨과 공기인 경우를 비교 분석한 결과로 내부기체가 모재 넥다운 형성 및 인출되는 유리섬유 냉각에 미치는 영향을 파악하였다.

후 기

본 연구는 삼성광통신의 2010년도 산업체 연구개발과제 지원에 의하여 수행되었다.

참고문헌

[1] 1997, Makinen, M., "A Test Facility for Enhanced Fiber Drawing Process Development," in Harmer, A.L. (ed.), *Communications Cabling*, IOP Press, pp.65-71.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 2004, Lyytikäinen, K.J., "Control of Complex Structural Geometry in Optical Fibre Drawing," Ph.D Dissertation, University of Sydney.

[9] 2011, Kim, K., Kim, D., and H.S. Kwak, "Radiative Heat Transfer Analysis of Glass Fiber Drawing in Optical Fiber Manufacturing," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol.16, No.1, pp.22-29.