

광섬유 냉각장치의 헬륨 주입기 설계를 위한 전산열유동해석

박신*, 김경진*, 김동주**, 박준영***, 곽호상#

(*,#금오공과대학교 기계시스템학과, **금오공과대학교 기계공학과, ***금오공과대학교 기계설계공학과)

Computational Thermo-Fluid Analysis for the Effects of Helium Injection Methods on Glass Fiber Cooling Process in an Optical Fiber Manufacturing System

Shin Park*, Kyoungjin Kim*, Dongjoo Kim**, Junyoung Park***, Ho Sang Kwak#

(Received xx April 2014; received in revised form xx April 2014; accepted xx April 2014)

ABSTRACT

In a mass manufacturing system of optical fibers, the sufficient cooling of glass fibers freshly drawn from a draw furnace is essential, as inadequately cooled glass fibers can lead to poor resin coating on the fiber surface and possibly fiber breakage during the process. In order to improve fiber cooling at a high drawing speed, it is common to use a helium injection into a glass fiber cooling unit in spite of the high cost of the helium supply. The present numerical analysis carried out three-dimensional thermo-fluid computations of the cooling gas flow and heat transfer on moving glass fiber to determine the cooling performance of glass fiber cooling depending on the method of helium injection. The results showed that a front injection of helium is most effective compared to a uniform or rear injection for reducing air entrainment into the unit and thus cooling the glass fibers at a high fiber drawing speed. However, above a certain amount of injected helium, there was no more increase of the cooling effect regardless of the helium injection method.

Key Words : Optical Fiber Manufacturing(광섬유 생산), Glass Fiber Cooling(유리섬유 냉각), Helium Injection Cooling(헬륨 주입냉각), CFD(전산유체역학)

1. 서 론

광섬유는 광신호가 전송되는 고순도 실리카 재질의 유리섬유와 표면 보호 및 강도 보존 역할의 복층 피복재로 구성되는데, 그 생산공정을 살펴보면 먼저 원봉 형태의 실리카 모재가 인출퍼니스 내부에서 국부적으로 가열되어 연화된 후에 적당한 장력으로 당겨 주어 매우 가는 유리섬유가 계속적으로 인출이 된다. 이렇게 인출된 유리섬유는 피복장치를 통과하면서 액상의 복층 피복재가 피복되어지며, 마지막으로 자외선 조사를 통하여 피복재가 경화되면서 광섬유가 완성된다.

* Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology.

** Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology.

*** Department of Mechanical Design Engineering, Kumoh National Institute of Technology.

Corresponding Author :
Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology.

E-mail : hskwak@kumoh.ac.kr

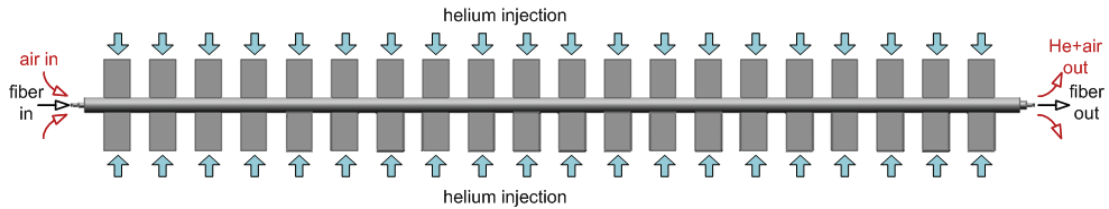


Fig. 1 Schematic diagram of glass fiber cooling unit with 40 helium injection ports.

인출퍼니스에서 인출되는 유리섬유는 퍼니스를 떠나기 전에 어느 정도 냉각되어 다시 경화되긴 하지만 아직도 상당한 고온으로 피복장치에 유입되기 전에 상온에 가깝게 냉각해야 한다. 유리섬유의 냉각이 충분하지 않아 고온의 유리섬유가 피복장치에 이르면 균일한 액상 피복이 제대로 되지 않거나 유리섬유 단선의 원인이 되는 등의 여러 공정상 문제점이 발생한다^[1-3]. 1980년대 광섬유의 인출속도가 수백 m/min 정도로 매우 낮았을 때는 유리섬유가 일정 구간의 외부공기를 통과하며 얻어지는 자연 냉각으로도 충분하였지만, 광섬유 인출속도가 지속적으로 높아지며 현재 2000 m/min 정도의 고속인출에 이르게 되면서 한정된 냉각영역에서의 유리섬유 체류시간이 줄어들게 되어 그 냉각효과가 충분하지 않게 되었다. 따라서 현재의 광섬유 고속인출에 상응하는 효과적인 냉각성능의 유리섬유 냉각장치 및 관련기술이 필요하다.

냉각기체의 온도가 상온보다 너무 낮으면 수증기 응결로 인하여 공정 오염이 문제가 되며, 냉각기체의 강한 유속을 이용한 강제대류 방식은 단선 위험성이 있는 등 유리섬유 냉각에 여러 기술적 제약조건이 있다. 이에 따라 현재 광섬유 고속 생산공정에서는 유리섬유가 통과하는 냉각장치에 헬륨을 주입하여 유리섬유를 냉각하는 방식이 일반적이다^[4]. 헬륨은 높은 열전도도를 가지고 있어 고가임에도 불구하고 유리섬유 냉각기체로 쓰이고 있다. 따라서 국내외 광섬유 생산현장에서는 광섬유 고속 인출공정에서 효율적인 헬륨 사용을 통하여 충분한 유리섬유 냉각성능을 얻으면서도 광섬유 제조원가를 절감하는 것이 중요 관심사이다.

헬륨 주입방식의 유리섬유 냉각장치에 대한 해석적 연구가 시도가 된 바 있다. Vaskopoulos 등^[5,6]

은 700 m/min 정도의 인출속도에서 유리섬유 냉각장치를 대상으로 2차원 전산해석을 수행하였으며, Tschümperlé 등^[7-9]도 상대적으로 낮은 인출속도에서 헬륨 분사식 냉각장치에 대하여 3차원 전산해석을 수행하였다. 하지만 이러한 연구에서는 외부로부터의 공기 유입을 고려하지 않고 헬륨의 단일 기체만을 냉각기체로 설정하였다.

최근 들어 Kim 등^[10]은 고속 인출되는 유리섬유 냉각공정에 대하여 헬륨 주입식 유리섬유 냉각장치 내로의 외부공기 유입 및 헬륨농도 저하 현상을 2차원 유동해석을 통하여 연구하였으며, 그 후속 연구에서는 유사한 헬륨 주입식 유리섬유 냉각공정에 대하여 유리섬유 냉각을 포함하여 2차원 및 3차원 전산해석을 수행하여 고속인출 시 헬륨 주입에 의한 외부공기 유입 억제가 유리섬유 냉각 정도에 큰 영향을 미침을 보였다^[11-13].

본 연구에서는 광섬유 생산공정용 유리섬유 냉각장치에서 헬륨 주입방식이 유리섬유 냉각에 미치는 영향을 장치 내 냉각기체 유동 및 열전달 현상, 그리고 외부공기 유입을 고려하여 전산해석적으로 분석하여 동일 량의 헬륨 사용에도 가장 효과적인 헬륨 주입냉각 방법을 제시하였다.

2. 장치 모델 및 전산해석 방법

2.1 유리섬유 냉각장치

본 연구의 해석대상인 유리섬유 냉각장치의 간략화된 구조가 Fig. 1과 Fig. 2에 도시되어 있다. 인출퍼니스 내의 모재에서 인출된 고온의 유리섬유가 통과하는 냉각장치의 주 냉각관은 길이 1 m, 직경 10 mm인 매우 가늘고 긴 원통 형상이며, 주

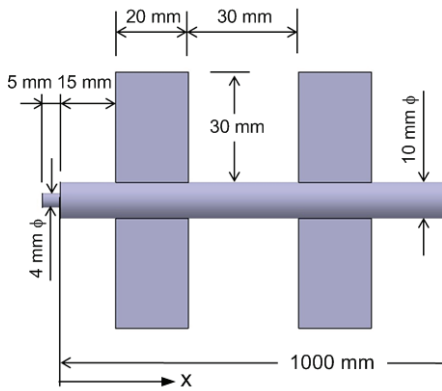


Fig. 2 Detailed structure and dimensions of glass fiber cooling unit with helium injection.

위 공기 유입을 줄이기 위하여 길이 5 mm, 직경 4 mm의 짧은 원형관이 입구 및 출구에 각각 부착되어 있다. 냉각기체인 헬륨이 주 냉각관으로 주입되는 통로인 직사각형 단면의 주입구들은 Fig. 2과 같이 유리섬유의 인출방향과 수직하게 설치되어 있다.

각 헬륨 주입구의 단면 크기는 2 mm × 20 mm이며, 길이는 30 mm로 충분히 주었다. 총 20쌍의 헬륨 주입구가 30 mm의 일정 간격으로 주 냉각관 표면에 좌우대칭으로 배치되었다. 냉각장치를 통과하는 유리섬유 직경은 광섬유 산업표준인 125 μm이며, 유리섬유 인출속도는 30 m/s 또는 1800 m/min을 기준으로 하여 해석을 진행하였다.

2.2 전산해석 방법

본 연구에서는 유리섬유 냉각장치의 유리섬유 냉각성능을 해석하기 위하여 상용 CFD 패키지인 ANSYS FLUENT 13을 사용하여 3차원적 전산해석을 수행하였다. 냉각장치 내부의 냉각기체 유동장과 냉각기체 및 유리섬유의 온도장 해석에는 약 160만 개의 3차원 정렬격자가 계산에 사용되었다. 유리섬유와 주 냉각관의 직경이 매우 작기 때문에 냉각기체가 층류 정상유동이라고 가정하였다.

이전 연구^[11-13]에 밝힌 바처럼 냉각장치 입구에서 유리섬유와 함께 유입되는 외부공기로 인해 장

치 내부에서 냉각기체의 헬륨 농도가 저하되는데, 공기와 헬륨간의 질량확산을 고려하여 각 기체성분의 질량분율에 대한 스칼라수송방정식도 해석에 포함하였다. 냉각기체 내 변화하는 헬륨농도로 인한 냉각기체의 점도와 열전도도는 기체분자 운동론을 기반으로 예측하였으며, 질량확산계수와 열확산계수의 계산에도 기체분자 운동론이 사용되었다. 온도에 따른 기체 물성치의 변화 역시 해석에 포함하였으며, 고온의 유리섬유로 인한 온도구배가 유리섬유 표면상에서 상당하므로 이에 따른 열확산 효과를 고려하였다.

운동량방정식에서 대류항의 공간차분으로 2차 상류도식을 사용하였고, 유속과 압력의 연계를 위해 SIMPLE 알고리즘이 이용되었다. 냉각장치의 입구와 출구는 외부 공기의 유입을 고려하기 위하여 대기압 경계조건을 주었다. 주어진 인출속도로 측 방향으로 이동하는 유리섬유 역시 해석대상에 포함하여 냉각기체와의 대류열전달에 의한 유리섬유의 온도 강하를 해석하였으며, 이때 복사열전달 효과는 고려하지 않았다.

3. 해석결과 및 토론

본 연구의 유리섬유 냉각 효과 해석에서는 냉각장치로 들어가는 유리섬유의 유입온도로 500°C를 기준으로 하였다. 실제 유리섬유 냉각장치는 외벽의 냉각수 순환으로 그 벽면이 일정한 온도로 유지되는데, 이에 따라 여기서는 냉각장치 벽면의 온도조건을 10°C로 균일하게 주었으며, 헬륨의 공급 온도 역시 10°C로 주었다. 외부에서 유입되는 공기의 온도는 20°C 상온이다.

헬륨 주입구 배치의 영향을 알아보기 위하여 동일 헬륨 주입량에 대하여 Fig. 3에 도식된 바와 같이 세 가지 주입방법에 대한 해석을 진행하였다. 먼저 이전 연구^[11]와 동일하게 총 40개의 헬륨 주입구에 균등하게 배분하여 주입하는 경우(uniform injection)를 비교대상으로 삼았다. 이와 더불어 동일 헬륨 주입량을 전면의 20개 주입구에만 공급하거나(front injection), 또는 반대로 후면의 20개 주입구에만 공급하는 경우(rear injection)를 전산해석하여 유리섬유 냉각효과를 균등 주입 경우와 비교하

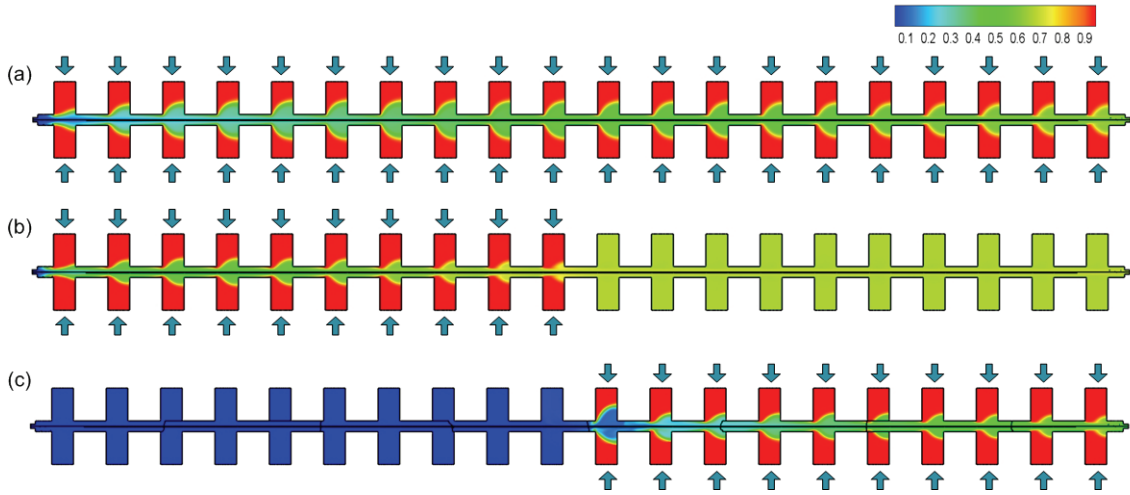


Fig. 3 Spatial distribution of helium mass fraction in glass fiber cooling unit at fiber drawing speed of 30 m/s and helium injection rate of 7 LPM: (a) uniform injection; (b) front injection; (c) rear injection.

였다. 참고로 전면 주입 및 후면 주입의 경우에 헬륨이 공급되지 않는 주입구는 해석 시에 그 형상을 보존하며 다만 주입구를 벽면 조건으로 처리하였다. 각 헬륨 주입방법에 대하여 총 헬륨 주입량은 0~15 LPM의 범위에서 해석이 진행되었다. 여기서 헬륨 주입량이 0 LPM인 경우는 헬륨을 사용하지 않고 냉각기체가 공기만인 상황을 나타내며, 이때 모든 주입구에 벽면 조건을 주었다.

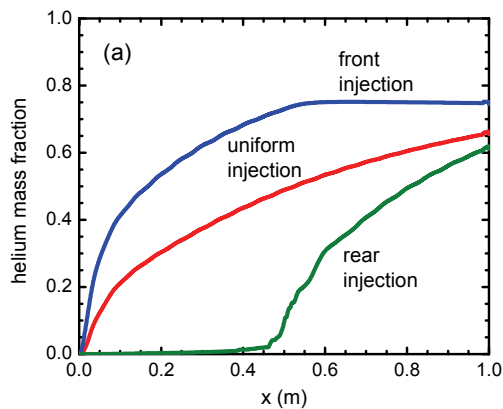
Fig. 3에는 유리섬유 냉각장치의 3차원 내부공간에서 헬륨 주입구 중심부를 기준으로 하는 단면상의 냉각기체 헬륨 질량분율을 분포를 세 가지 헬륨 주입방법 별로 보여준다. 총 헬륨 주입량은 모두 7 LPM으로 동일하며 인출속도는 30 m/s이다. 각 헬륨 주입방법에 대하여 외부공기 유입에 따른 헬륨 농도의 변화 현상을 관찰하여보면, 균일 주입 및 전면 주입과 비교하여 후면 주입의 경우가 장치 전면부에서 헬륨 농도 저하현상이 두드러지게 나타남을 볼 수 있음을 알 수 있다.

이러한 현상은 Fig. 4에 표현되는 유리섬유 표면상의 냉각기체 내 헬륨 질량분율의 축방향 분포에서도 보인다. 냉각장치 입구에서 유리섬유 표면의 냉각기체는 순수 공기이므로 헬륨의 질량분율은 0으로 시작하며, 주 냉각관에 배열된 주입구로 공급되는 헬륨에 의해 헬륨 농도가 축방향을 따라가며

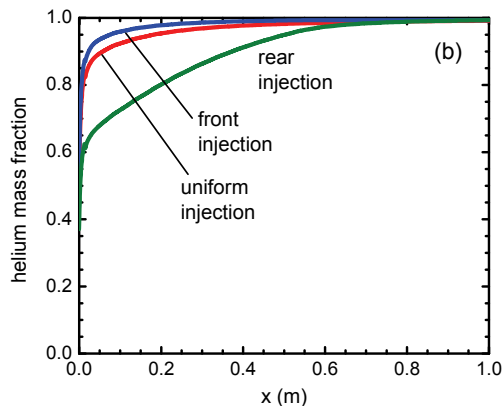
증가하게 된다.

먼저 Fig. 4(a)의 헬륨 주입량 7 LPM 경우의 해석결과를 관찰하여 보면, 균일 주입과 비교하여 동일 헬륨량이 주입되더라도 헬륨의 전면 주입이 외부공기 유입을 좀 더 방지하여 헬륨농도를 높게 유지시켜주는 것에 유리함을 알 수 있다. 이와는 반대로 후면 주입의 경우에는 균일 주입의 경우와 비교하여 외부공기 유입이 상승하여 장치 내부 헬륨농도가 상당히 감소하였다. Fig. 4(b)에서는 헬륨의 총주입량을 10 LPM으로 늘려 해석한 결과를 헬륨농도 분포로 보여준다. 앞서의 7 LPM 주입과는 달리 헬륨 주입량이 이 정도로 충분하다면 주입방법과 크게 상관없이 외부공기의 유입이 크게 줄어 내부의 헬륨농도가 상대적으로 높게 유지되었다.

냉각장치 내 유리섬유 냉각에서 대류효과가 크지 않은 상황에서 유리섬유 표면상의 열전달계수는 냉각기체의 헬륨농도 및 이에 따른 열전도도에 의하여 주로 결정되어진다. 따라서 외부공기 유입에 의한 장치 내부의 헬륨농도 저하가 냉각성능에 결정적인 영향을 미친다. 이는 Fig. 5의 축방향 열전달계수 분포에서 확인할 수 있으며, 여기서도 낮은 헬륨 공급량에서는 전면 주입방법이 유리섬유 냉각에 유리함을 알 수 있으며, 헬륨 공급량이 총



(a) helium injection of 7 LPM

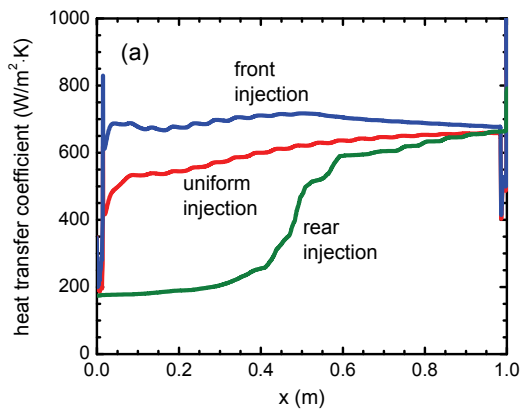


(b) helium injection of 10 LPM

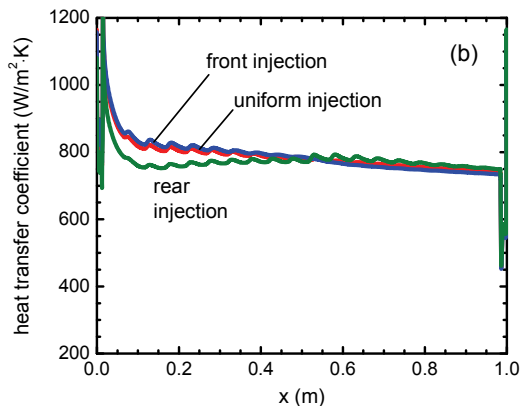
Fig. 4 Effects of helium injection methods on the axial distribution of helium mass fraction in the cooling gas on the glass fiber surface (fiber drawing speed of 30 m/s).

분히 높으면 주입방법이 유리섬유 냉각에 큰 차이를 주지 않음을 다시 확인할 수 있다.

Fig. 5(b)의 10 LPM 헬륨 주입 경우를 보면 열전달 계수가 축방향을 따라 주기적으로 증가 및 감소하는 현상이 관찰되는데, 이는 헬륨 주입구에서의 헬륨 분사에 의한 국부적 대류열전달 증가효과로 보인다. 장치 내 유리섬유의 흔들림 및 단선 위험성을 방지하기 위하여 헬륨이 좌우 대칭적으로 공급되는데, 유리섬유 표면상의 냉각에는 헬륨 분사



(a) helium injection of 7 LPM



(b) helium injection of 10 LPM

Fig. 5 Effects of helium injection methods on the axial distribution of convective heat transfer coefficient on the glass fiber surface (fiber drawing speed of 30 m/s).

에 의한 대류적 영향은 상대적으로 작으며, 헬륨 공급량 및 이에 따른 외부공기 유입량 감소로 결정되는 냉각기체의 헬륨 농도가 냉각성능에 주요 역할을 한다.

마지막으로 Fig. 6에는 세 가지 헬륨 주입방법에 대하여 15 LPM까지 헬륨 주입량을 증가시키며 수행한 전산해석의 결과가 냉각장치 출구에서의 유리섬유 온도로 정리되어 있다. 헬륨 주입이 없는 0 LPM인 경우, 유리섬유 유입온도인 500℃에 비하여

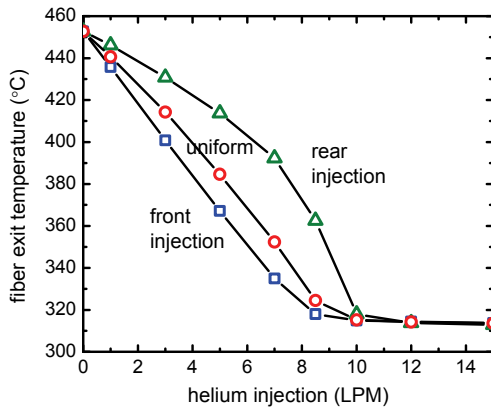


Fig. 6 Effects of helium injection rate on the glass fiber temperature at cooling unit exit for three different helium injection methods (fiber drawing speed of 30 m/s).

출구온도가 450°C 정도로 냉각효과가 크게 없으며, 헬륨 주입량의 증가에 따라 냉각효과가 크게 증가한다. 여기서 앞서 언급한 바와 같이 동일한 총 헬륨 공급량에도 전면 주입방법이 가장 높은 냉각효과를 보여주며, 후면 주입방법이 냉각에 가장 불리함을 다시 볼 수 있다. 다만 헬륨 주입량이 10 LPM 정도 이상으로 충분히 높은 경우에는 유리섬유 출구온도가 더 이상 감소하지 않고 주입방법별로도 차이를 보이지 않는다.

이전 연구^[10-13]에서 동일 헬륨 주입량에 대하여 급격한 공기 유입량 증가 및 헬륨 농도 감소가 나타나는 분기 인출속도에 대한 연구가 진행된 바 있다. 본 연구에서도 이러한 현상과 비슷하게 동일 인출속도에서 헬륨 주입량을 증가시키게 되면 공기 유입량 및 헬륨 농도 감소가 계속적으로 진행되다가 일정한 헬륨 주입량 이상에서는 헬륨 농도 감소가 한계에 이르면서 냉각 효과 증대에는 더 이상의 효과가 없어짐을 볼 수 있다. 여기서는 그러한 분기 헬륨 주입량이 전면 주입의 경우는 약 8 LPM, 그리고 후면 주입의 경우는 10 LPM 정도로 보인다. 따라서 헬륨 공급량의 증가가 계속적인 냉각 효과 증대로 이어지는 것이 아님을 알 수 있으며, 이는 광섬유 생산공정에서 헬륨 사용량 절감

에 중요한 고려사항이 될 수 있다.

광섬유 생산성 향상을 위해서는 인출속도가 계속적으로 높아지고 있는 상황이며, 이러한 고속의 광섬유 인출에서는 유리섬유 냉각공정에서 냉각시간 감소뿐만 아니라 외부공기 유입 증가에 의한 내부 헬륨 농도의 감소에 따라 유리섬유의 냉각효과가 대폭적으로 저하되어 더 많은 헬륨 사용이 요구된다. 따라서 헬륨 사용이 불가피한 유리섬유 냉각장치에서 외부공기 유입을 최대한 억제하여 냉각기체의 헬륨 농도를 유지할 수 있는 헬륨 주입방법에 따른 냉각장치 구성 및 설계가 요구된다.

4. 결론

광섬유 생산공정에서 인출퍼니스에서 인출되는 고온의 유리섬유를 냉각할 필요성이 있으며, 헬륨 주입을 이용하는 냉각장치가 일반적으로 사용된다. 본 연구에서는 광섬유 고속 인출공정용 유리섬유 냉각장치에서 헬륨 주입방식이 유리섬유 냉각성능에 미치는 영향을 알아보기 위하여 헬륨 주입과 외부공기 유입, 그리고 유리섬유의 대류냉각 등을 고려한 3차원 전산열유동해석을 수행하였다.

해석모델인 유리섬유 냉각장치에는 총 20쌍의 헬륨 주입구가 주냉각관에 부착되어 있으며, 해석결과로 동일 헬륨 주입량에서 균일 주입방법과 비교하여 장치 내부의 헬륨 농도 및 열전달계수 분포를 볼 때 전면 주입이 유리함을 볼 수 있다. 이에 비하여 헬륨의 후면 주입은 유리섬유의 냉각효과가 감소하였다. 또한 헬륨 주입량의 증가는 외부공기유입의 억제로 이어져 헬륨 농도 및 유리섬유 냉각효과가 증가하나, 일정 이상의 헬륨 주입량에서는 더 이상의 냉각효과 증대가 없으며 주입방식 간에도 그 냉각효과의 차이가 미미하였다.

후 기

“이 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문이다.

REFERENCES

- (1) Paek, U.C., "Free Drawing and Polymer Coating of Silica Glass Optical Fibers," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 121, No. 4, pp. 774-788, 1999.
- (2) Paek, U.C. and Schroeder, C.M., "Forced Convective Cooling of Optical Fibers in High-Speed Coating," *Journal of Applied Physics*, Vol. 50, No. 13, pp. 6144-6148, 1979.
- (3) Paek, U.C. and Schroeder, C.M., "High Speed Coating of Optical Fibers with UV Curable Materials at a Rate of Greater Than 5 m/sec," *Applied Optics*, Vol. 20, No. 23, pp. 4028-4034, 1981.
- (4) Jochem, C.M.G. and Van der Ligt, J.W.C., "Cooling and Bubble-Free Coating of Optical Fibers at a High Drawing Rate," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. LT-4, No. 7, pp. 739-742, 1986.
- (5) Vaskopoulos, T., Polymeropoulos, C. and Zebib, A., "Heat Transfer from Optical Fiber During the Draw Process," *Journal of Materials Processing and Manufacturing Science*, Vol. 1, No. 3, pp. 261-271, 1993.
- (6) Vaskopoulos, T., Polymeropoulos, C. and Zebib, A., "Cooling of Optical Fiber in Aiding and Opposing Forced Gas Flow," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, No. 11, pp. 1933-1944, 1995.
- (7) Tschümperlé, D. and Nicolardot, M., "Fiber Cooling Modelisation During Draw Using CFD," *ASME CFD Symposium: 3rd International Symposium on Computational Technologies for Fluid/Thermal/Chemical Systems with Industrial Applications*, Atlanta, GA, 2001.
- (8) Tschümperlé, D., Bourhis, J.F., Dubois, S. and Léon, A., "Study of Cooling Tubes for Fiber Drawing Using CFD," *50th IWCS Conference*, Lake Buena Vista, FL, 2001.
- (9) Tschümperlé, D. and Léon, A., "Design of an Efficient Cooling Tube for Optical Fiber Manufacturing at High Draw Speeds," *51th IWCS Conference*, Lake Buena Vista, FL, 2002.
- (10) Kim, K., Kim, D., Kwak, H.S., Park, S.H. and Song, S.H., "Helium Concentration Decrease Due to Air Entrainment into Glass Fiber Cooling Unit in a High-Speed Optical Fiber Drawing Process," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 92-98, 2010.
- (11) Oh, I.-S., Kim, D., Umarov, A., Kwak, H.S., and Kim, K., "Computational Analysis on the Cooling Performance of Glass Fiber Cooling Unit with Helium Gas Injection," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 110-115, 2011.
- (12) Kim, D., Oh, I.-S., Kwak, H.S., and Kim, K., "Effects of Air Entrainment on Glass Fiber Cooling with Helium Injection in Optical Fiber Drawing," *Advanced Science Letters*, Vol. 19, No. 8, pp. 2215-2219, 2013.
- (13) Park, S., Kwak, H.S., Kim, D., and Kim, K., "CFD Investigation of the Effects of Helium Injection Port Locations on Glass Fiber Cooling in Optical Fiber Manufacturing System," *2013 Autumn Conference of KSCFE*, Seoul, Korea, 2013.