

## 노즐 축소부 수렴각이 고속 광섬유 피복유동에 미치는 영향

박 신, 김 경 진, 곽 호 상\*

금오공과대학교 기계시스템공학과

### EFFECTS OF CONVERGENT ANGLE OF NOZZLE CONTRACTION ON HIGH-SPEED OPTICAL FIBER COATING FLOW

S. Park, K. Kim and H.S. Kwak\*

Dept. of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology

*A numerical study is conducted on the optical fiber coating flow in a primary coating nozzle consisting of three major parts: a resin chamber, a contraction and a coating die of small diameter. The flow is driven by the optical fiber penetrating the center of the nozzle at a high speed. The axisymmetric two-dimensional flow and heat transfer induced by viscous heating are examined based on the laminar flow assumption. Numerical experiments are performed with varying the convergent angle of nozzle contraction and the optical fiber drawing speed. The numerical results show that for high drawing speed greater than 30 m/s, there is a transition in the essential flow features depending on the convergent angle. For a large convergent angle greater than 30°, unfavorable multicellular flow structures are monitored, which could be associated with wall boundary-layer separation. In the regime of small convergent angle, as the angle increases, the highest resin temperature at the exit of die and the coating thickness decrease but the sensitivity of coating thickness on drawing speed and the maximum shear strain of resin on the optical fiber increase. The effects of the convergent angle are discussed in view of compromise searching for an appropriate angle for high-speed optical fiber coating.*

**Key Words :** 광섬유 피복(Optical Fiber Coating), 피복노즐(Coating Nozzle), 수렴각(Convergent Angle), 점성발열(Viscous Heating), 피복공정(Coating Process), 열유동(Thermal Flow)

## 1. 서 론

정보의 생산과 교류가 활발해지고, 빅데이터를 활용하는 산업이 발전하면서 방대한 양의 정보 처리를 위한 고속 자료 전송이 증가하고 있다. 이에 따라 광대역 자료 전송에 적합한 광통신 섬유 수요는 지속적으로 증가하고 있다. 이러한 시장 상황에 따라 광섬유 양산을 담당하는 제조사들의 생산성 향상 경쟁은 더욱 치열해지고 있다.

광섬유 제조 공정은 실리카 모재를 만드는 전 공정과 모재로부터 광섬유를 인출하는 후 공정으로 나뉜다. 후 공정은 다시 모재를 가열·연화시켜 섬유형태로 뽑는 퍼니스 인출 공정

과 퍼니스에서 나온 고온 광섬유를 상온으로 식히는 냉각 공정, 광섬유의 손상 방지를 위하여 표면에 우레탄과 같은 수지를 입히는 피복 공정, 자외선을 쬐어 피복된 액상 수지를 경화시키는 UV 조사 공정, 마지막으로 광섬유를 스펀에 감는 권선 공정으로 구성된다[1]. 여러 개의 개별 공정으로 구성된 전 공정에서는 장비 추가로 모재의 증산이 용이하다. 그러나 수직으로 정렬된 일련의 연속공정으로 이루어진 후 공정은 높이가 20 m가 넘는 청정실을 필요로 하기 때문에 증설이 쉽지 않다. 따라서 광섬유 인출의 고속화가 기존 설비를 유지하면서 생산성 향상을 도모할 수 있는 일차적인 방안이다.

광섬유 인출속도의 고속화 시도는 후 공정에서 여러 가지 기술적인 문제를 야기하였고 이를 해결하기 위한 다양한 관점의 연구가 진행되고 있다. 인출속도가 높아지면 모재에서 인출되는 광섬유의 퍼니스 체류 시간이 줄어 광섬유 직경 조절에 문제가 생길 수 있다. Kim et al.[2,3]은 퍼니스의 가열부 온도 분포 조절을 통하여 원하는 직경의 광섬유를 인출할 수

Received: August 22, 2016, Revised: December 22, 2016,

Accepted: December 22, 2016.

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

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2016.21.4.011>

© KSCFE 2016

있는 조건을 연구하였다. 인출 고속화는 모재 사용 시간 단축과 모재 교체 빈도 증가에 따른 생산성 저하를 초래한다. 이에 대한 해결방안인 모재의 대형화를 위하여 고속 인출 퍼니스 설계 및 운영 조건을 찾는 후속연구도 이루어졌다[4,5].

인출속도의 상승은 광섬유의 냉각장치 체류 시간도 감소시켜 냉각장치 성능 향상이라는 또 다른 과제를 제기한다. 광섬유 냉각에는 폭발성이 있는 수소를 빼면 가장 열전도계수가 큰 기체인 고가의 헬륨이 주로 사용된다. Kim et al.[6]은 광섬유가 유입되는 입구에서의 공기 혼입현상을 규명하고 냉각장치 내부의 헬륨 분포가 냉각 성능에 결정적 영향을 미침을 보여주었다. 후속연구[7,8]는 이러한 연구성과를 바탕으로 광섬유 냉각성능 향상을 위한 다양한 냉각기 구조와 운전조건을 분석하였다.

광섬유 인출 고속화에 따른 민감한 문제의 발생 가능성이 큰 것은 광섬유에 피복재를 입히는 피복 공정이다. 피복 장치에서는 점성이 매우 큰 피복재가 채워진 직경 250 mm 내외의 피복 다이의 중심을 직경 125 mm의 광섬유가 30 m/s의 이상의 고속으로 통과한다. 이 때 발생하는 마찰열과 이로 인한 점성의 변화가 피복유동에 영향을 주기 때문이다[9,10].

현재 광섬유의 광특성을 보호하기 위한 내피복과 기계적 보호기능을 하는 외피복을 연속으로 입히는 습식 이중피복 공정이 일반적으로 채용되고 있다. 피복 공정의 목표는 균일하고 안정된 피막을 형성하여 원하는 피복 두께를 확보하는 것임을 고려할 때 피복특성에 영향을 주는 피복 노즐 내부유동에 대한 분석과 이해는 필수적이다. 피복 노즐 내부의 유동은 기본적으로 노즐 중심을 관통하는 광섬유의 이동이 유발하는 전단유동과 노즐 가압에 의하여 압력구동 유동의 조합이다. Panoliaskos et al.[11]과 Yang et al.[12]은 1차 피복이 이루어지는 주피복관 종단에 위치한 직경이 일정한 다이를 통과하는 유동을 완전발달 쿠프레(Couette) 유동과 푸아죄유(Poiseuille) 유동의 조합으로 단순화하여 유량으로부터 피복 두께를 예측하였다. Kim et al.[13]은 습식 이중피복이 이루어지는 2차 피복다이에서의 유동 분석을 통하여 내피복 및 외피복 두께를 예측할 수 있는 모형을 제시하였다. 후속연구[14]는 피복재의 비뉴턴 유체의 성질이 피복두께에 미치는 영향을 추가적으로 고려하였다. 그러나 이러한 예측모델들은 고속 인출 조건에서 중요하게 고려해야 하는 점성발열의 영향은 제대로 반영하지 못하는 한계를 가지고 있다.

Yoo and Jaluria[15,16]는 실제 주피복관 내부 유동에 대한 전산해석을 통하여 일차원 유동모델이 설명하지 못한 노즐 내부 유동 특성을 분석하고 노즐 형상과 피복재 점도의 온도 의존성, 점성 발열이 피복 특성에 미치는 영향을 조사하였다. Park and Suh[17]는 이중 피복장치의 내부의 내피복재와 외피복재 이중유체의 유동에 대한 전산해석을 수행하였다. 그러나

이들 연구에서 실제 피복재보다 점성계수가 매우 작은 실험용 유체를 사용하였거나 최고 인출속도도 20 m/s 수준에 머물러 점성발열과 이로 인한 온도변동의 영향은 크게 부각되지 않았다. 그러나 실제 업계에서 사용되는 온도의존성이 강한 점성을 가지는 피복재와 40 m/s에 이르는 인출속도를 고려한 최근 연구[9,10,18,19]의 결과는 점성발열에 의한 온도상승과 이로 인한 점도 감소에 따른 유동 특성 변화에 따라 피복 두께가 공정조건에 따라 민감하게 반응함을 보여주었다.

저속 공정에서 피복 특성을 결정하는 주요소는 다이의 직경이고 다른 형상요소의 영향은 부차적이기 때문에 피복노즐의 형상에 대한 연구에서 주관심사는 주피복관의 다이 직경이었다[16]. 그러나 점성발열이 중요한 역할을 하는 고속 피복에서는 피복 다이 이외의 형상도 피복 특성에 상당한 영향을 줄 수 있다. 특히 피복재 챔버에서 다리로 연결되는 축소부의 형상은 다이 다음으로 중요한 고려 대상이다. 이 연구에서는 이 주피복 노즐의 축소부 수렴각이 피복유동에 미치는 영향을 전산유체역학적 방법으로 알아보고자 한다. 저속은 물론 고속 인출조건에서 축소부의 수렴각이 노즐 내부 유동과 피복 두께의 변화에 미치는 영향을 조사하고 안정된 피복공정에 적합한 형상조건이 무엇인지 탐색할 것이다.

## 2. 모 델

### 2.1 해석대상

Fig. 1은 이 연구에서 다루고자 하는 광섬유 피복 노즐의 구조를 보여주고 있다. 연구대상은 이중피복 공정에서 내피복재가 입혀지는 주피복 노즐이다. 노즐은 피복재가 채워지는 반경이  $R_c$ 인 챔버와 노즐 최종단에 위치한 반경이  $R_f$  길이가  $L$ 인 피복 다이 그리고 챔버와 다이를 연결하는 직경이 줄어드는 축소부로 구성된다. 반경이  $R_f$ 인 광섬유는 챔버의 좌측에서 유입되어 노즐의 중심을 관통한 후 다이의 출구를 통하여 2차 피복관으로 진행한다. 피복재는 챔버의 외곽에서 유입되어 피복다이 출구로 나가는데 유출 유량이 피복량 즉 피복두께를 결정한다.  $U$ 의 속도로 노즐을 관통하는 광섬유가 구동하는 점성전단 유동이 피복량을 결정하는 주 요소이다. 실제 공정에서는 피복재 유입구에 수 bar 정도의 압력을 가하여 피복량을 미세 조절한다. 여기서는 형상의 영향을 알아보는데 초점이 있으므로 비가압 공정( $P_{in} = 0$ )을 상정하였다.

이 연구에서 표준적인 광섬유 제원과 선행 연구[9,18,19]에서 다룬 형상조건을 참고하여 노즐의 제원을 다음과 같이 설정하였다.  $R = 125$  mm,  $R_f = 62.5$  mm,  $R_c = 8$  mm,  $L = 0.5$  mm이고 전체 노즐의 총길이는 18 mm이다. 이 연구에서 관심이 있는 설계변수는 챔버에서 다리로 연결되는 축소부의

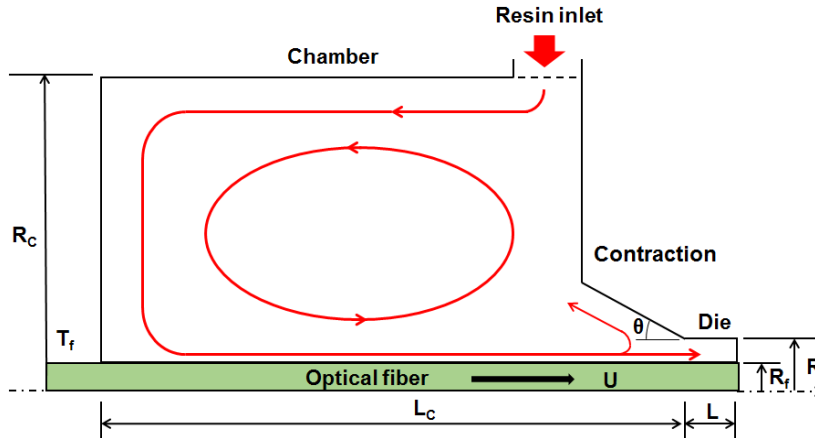


Fig. 1 Schematic illustration of the optical fiber coating nozzle consisting of resin chamber, contraction and coating die. An optical fiber penetrates through the nozzle with a speed  $U$

수렴각  $\theta$ 이다.

작동유체는 현업에서 많이 사용되는 피복재인 우레탄 아크릴레이트 수지(Desotech DeSolite 950-106)이며 뉴턴유체로 가정하였다. 온도에 매우 민감한 이 피복재의 점성계수는 알려진 데이터[20]를 이용하여 폴리머 물성치에 대한 표준적인 회귀곡선식을 다음과 같이 구하여 사용하였다.

$$\mu = \exp(9.024 - 2.3511 \times \ln(T)) \quad (1)$$

여기서 점성계수  $\mu$ 와 온도  $T$ 의 단위는 각각 Pa·s와  $^{\circ}\text{C}$ 이다. 점성계수 이외의 피복재 물성은 온도 의존성이 크지 않으므로 밀도는  $1010 \text{ kg/m}^3$ , 열전도율은  $0.176 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , 비열은  $2234 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ 로 일정하다고 설정하였다.

## 2.2 전산해석 모델

이 연구에서는 상용 CFD 패키지인 ANSYS Fluent 14.5를 사용하여 노즐 내부의 유동과 열전달을 해석하였다. 전산해석 방법은 선행연구[9,18,19]와 유사하다. 유동 계산영역은 Fig. 1에 도시된 피복재 영역이며 열전달 계산에는 움직이는 광섬유 영역도 포함시켜 광섬유 내부 열전도와 이송(advection)효과를 고려하였다. 노즐 내부 열유동은 축대칭 이차원 층류로 모델링하였고 점성에 의한 발열을 고려하였다. 식 (1)을 이용하여 점성계수를 온도의 함수로 계산하는 UDF를 만들어 연계하는 방식으로 피복재 점성계수의 온도 의존성을 고려하였다. 유동의 특성길이에 해당하는 다이의 유로폭  $62.5 \text{ mm}$ 와  $40 \text{ m/s}$ 의 인출속도, 상온에서의 점성계수를 적용하여 레이놀즈 수를 구하면 1.4에 불과하다. 발열에 의해 점성계수가 작아져도 레이놀즈 수는 1000을 넘지 않으므로 층류 가정은 적

절하다. 대류항의 공간차분을 이차 풍상차분을 사용하였으며, 속도-압력 연계 알고리즘은 SIMPLE를 사용하였다.

피복재 유입구와 출구에서는 모두 동일한 대기압 경계조건을 설정하였다. 따라서 외부의 가압에 의한 유동은 생기지 않으며 피복 유동은 오로지 광섬유의 이동에 의한 전단유동에 의해 발생한다. 광섬유와 피복재는  $300 \text{ K}$ 의 온도로 챔버로 들어온다. 노즐 내벽의 온도 경계조건은 단열조건으로 처리하였다. 실제 공정에서 노즐의 냉각이 용이하지 않고 피복재의 열전도계수가 낮아 노즐 벽면을 통한 열손실이 크지 않은 점을 반영한 것이다. 노즐 내부에서 점성 마찰에 의한 발열이 발생하며 이로 인해 피복재가 가열되어 출구로 배출된다.

계산영역에서 가장 중요한 부분은 발열에 의해 온도와 유동 분포가 급변하는 피복 다이와 그 인근 영역이다. 피복 다이의 피복재 영역을 반경방향으로 50, 100 및 200 등분한 격자를 만들어 계산결과를 비교해보니 100 등분 격자를 사용한 경우와 200 등분 격자를 사용한 경우의 온도와 속도분포가 1% 이내의 차이를 보였다. 모든 계산에는 다이의 피복재 영역을 반경방향으로 100 등분한 격자를 사용하였고 이 경우 총 계산세포의 수는 64,000개이다. 계산시간은 경우에 따라 다른데 상용 PC에서 3시간에서 10시간 정도 소요되었다.

## 3. 결과 및 토론

노즐 축소부의 수렴각이 피복유동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 수렴각을  $10^{\circ}$ 에서  $45^{\circ}$ 까지  $5^{\circ}$  간격으로 변화시킨 8가지 형상의 노즐에 대하여 인출 속도가 10, 20, 30, 40 m/s인 경우에 대한 전산해석을 실시하였다.

광섬유 피복 노즐 축소부의 수렴각의 영향을 조사하기에

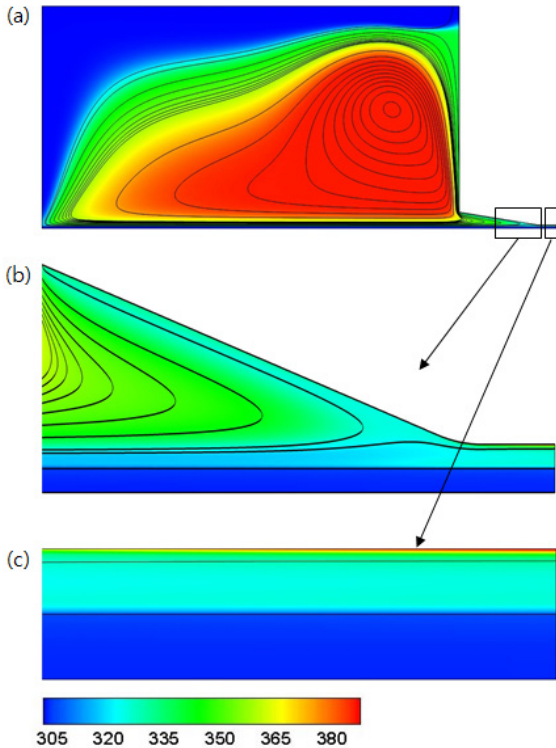


Fig. 2 Streamlines and color contour plots showing the flow and temperature fields in a nozzle having a contraction part with  $\theta = 10^\circ$ . (b) and (c) provide the enlarged views near the contraction and the exit of coating die, respectively. The optical fiber drawing speed is  $U = 40$  m/s. The temperature is in unit of K

앞서 이해의 기초를 마련하기 위하여 고속인출 조건에서 나타나는 피복 열유동의 특성을 알아보기로 한다. Fig. 2는 수렴각이  $\theta = 10^\circ$ 인 노즐 중심을 40 m/s의 고속으로 광섬유가 통과할 때 생기는 유동을 우선으로, 온도장을 색깔로 가시화한 것이다. Fig. 2(a)에서 유입구로 들어온 피복재는 챔버 벽을 따라 광섬유 쪽으로 흐른 후 이동하는 광섬유로부터 전단력을 받아 출구 쪽으로 향한다. 이 때 Fig. 2(b)에서 볼 수 있듯이 챔버 안에서 광섬유에 의해 구동된 전단유동의 유량을 직경이 매우 작은 피복 다이에서의 꾸에트 유동이 모두 수용할 수 없어 일부 유체가 챔버 쪽으로 되돌아간다. 결과적으로 노즐 내부에는 커다란 재순환 유동이 형성되는데 광섬유 피복 노즐에서 나타나는 전형적인 유동 형태이다[9,15-19].

Fig. 2의 온도장에서 Kim et al.[9]이 보고한 점성발열에 의한 피복재 온도 상승을 확인할 수 있다. 온도는 재순환 영역의 중심부에서 높은 것으로 나타나는데 이 부분의 발열이 커서 가 아니라 노즐이 단열되어 있고 피복재와 광섬유의 열전도 계수가 작아 발열의 영향이 내부에 축적되어 생길 현상으

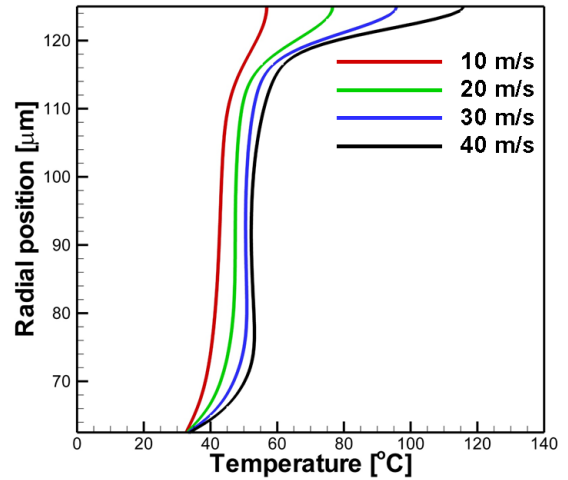


Fig. 3 Temperature profile at the exit of coating die.  $\theta = 10^\circ$ . The legends for fiber drawing speed are given in the frame

로 추정된다. 피복의 관점에서 보다 의미있는 온도변화는 강력한 전단유동이 발생하는 피복 다이에서의 온도상승이다. Fig. 2(c)에서 피복 다이의 노즐벽 인근에 온도가 매우 높게 나타나는데 실제로 피복재 온도는 이 지점에서 최고값을 가진다.

Fig. 3는  $\theta = 10^\circ$ 인 노즐 다이 출구에서의 인출속도 변화에 따른 피복재 온도 분포의 변화를 보여준다. 고속으로 이동하는 광섬유는 노즐 체류시간이 짧아 유입 온도를 거의 그대로 유지하고 있다. 점성 발열에 의한 피복재의 온도 상승은 노즐벽 근처에서 국소적으로 강하게 나타난다. 광섬유 인출속도가 커지면 피복재의 온도상승 폭도 커져  $U = 40$  m/s의 고속 인출조건에서는 최고 온도가  $120^\circ\text{C}$  이상 올라간다.

노즐 출구에서 피복재 온도는 낮은 것이 좋다. 주피복 노즐에서 피복재 온도가 지나치게 상승하여 점성이 낮아지면 저온의 고점성 외피복재와 만나는 이차 피복장치에서 계면 불안정성이 발현될 수 있기 때문이다. Fig. 4는 축소부 수렴각과 인출속도에 따라 변화하는 다이 출구에서의 피복재 최고 온도를 정리한 것이다.  $U = 20$  m/s 이하의 저속 인출에서 최고온도는  $\theta = 10^\circ$ 의 경우에 가장 크고 수렴각이 커질수록 단조 감소한다. 수렴각이 커질수록 다이로 유입되는 축소유에서의 속도구배가 작아져 점성발열에 의한 온도상승이 감소한 것으로 볼 수 있다. 그러나  $U = 30$  m/s 이상의 고속인출에서는 상이한 현상이 발견된다. 수렴각이 작은 영역에서 최고온도가 수렴각 증가에 따라 약간 감소하다가  $\theta = 30^\circ$ 에서 최대값을 가진 후 다시 감소한다. 수렴각  $30^\circ$  전후로 현상이 달라지기 때문에 유동현상의 전환이 일어나는 수렴각  $30^\circ$  근처는 피해야 할 것으로 판단된다.

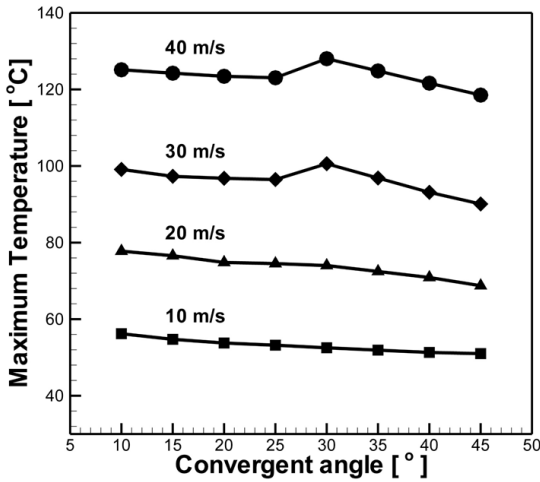


Fig. 4 Maximum temperature of resin at the exit of coating die vs. convergent angle of the nozzle contraction. The value of optical fiber drawing speed is given in the frame

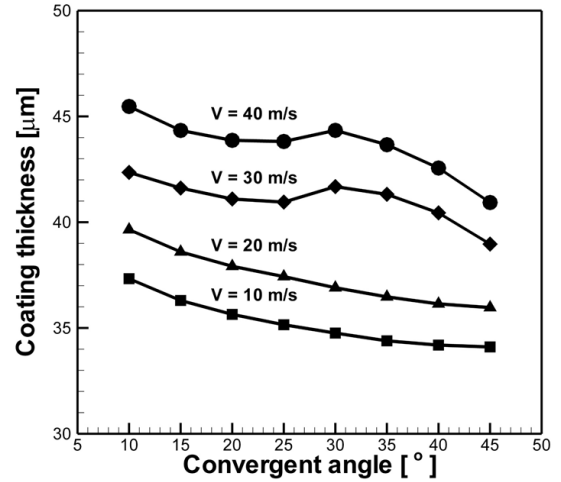


Fig. 6 Coating thickness estimated from the flow rate at the die exit vs. convergent angle of the nozzle contraction. The value of optical fiber drawing speed is given in the frame

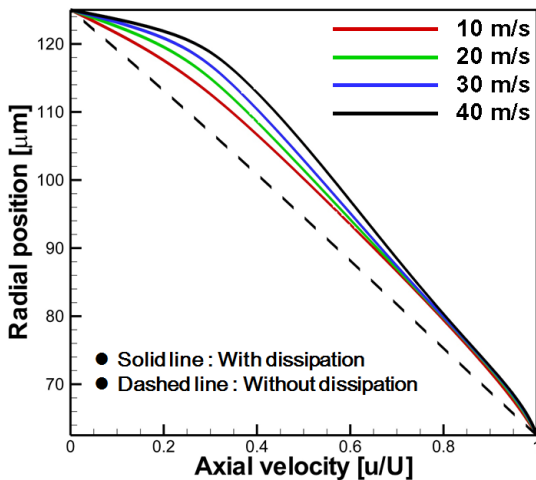


Fig. 5 Radial variation of the axial velocity at the exit of coating die.  $\theta = 10^\circ$ . The dashed line shows the reference profile obtained from the theoretical prediction disregarding viscous heating

Fig. 3에 나타난 피복 다이 출구의 피복재 온도분포는 피복유동에 바로 영향을 준다. Fig. 5는  $\theta = 10^\circ$ 인 노즐 출구에서 광섬유 인출속도에 따라 피복재 유출 속도분포의 변화를 그린 것이다. 광섬유 인출속도가 증가하면 노즐 벽에 가까운 외곽부의 유속이 증가하여 유속 곡선이 부풀어 오른 듯한 형상을 가진다. 노즐 내벽 부근 온도상승으로 점성계수가 감소하면 반경 방향의 전단응력 균형을 맞추기 위하여 전단변형률이 커져야 하므로 이와 같은 속도분포가 형성되는데 그 결

과는 유출 유량 즉 피복두께의 증가로 나타난다. 이상의 논의는 선행연구[9]에서 확인한 인출속도 증가에 따른 피복두께 증가현상을 열유동 현상의 관점에서 설명한 것이다.

Fig. 6는 축소부 수렴각과 인출속도에 따라 피복두께가 어떻게 달라지는지 보여주고 있다. 전체적인 경향은 피복재 최고온도의 거동과 유사하다. 저속 인출에서는 수렴각이 증가하면 피복두께는 단조 감소한다. 인출속도가 30 m/s 이상인 경우, 수렴각에 따라 피복두께가 감소하다가 증가하여 30°에서 극대값을 가진 후 다시 감소한다. 피복 두께는 인출속도에 민감하지 않은 것이 유리하다. 인출 공정은 정지상태에서 정상상태까지 광섬유 인출속도를 단계적으로 상승시키는 과도거동을 포함하기 때문에 인출속도에 따른 피복량 변화가 작아야 작업의 용이성과 안정성이 높아지기 때문이다. 이를 고려할 때 전체적으로 수렴각이 작은 경우가 인출속도 변화에 따른 피복두께의 변동이 작아 공정 관리의 측면에서 유리하며 30° 이상이 되면 인출속도에 증가에 따른 피복량의 변화가 크게 나타나므로 공정제어의 관점에서 불리할 것이다.

피복 유동에서 반드시 점검해보아야 할 물리량은 광섬유 표면의 전단변형률이다. 광섬유 표면의 과도한 전단변형이 광섬유의 단선을 유발할 수 있기 때문이다[20]. Fig. 7은 수렴각과 인출속도에 따라 광섬유 표면에서 전단변형률의 최대값이 어떻게 변화하는지 보여준다. 전단변형률의 최대값은 수렴각이 커지면 증가하는데 인출속도가 커질수록 각도 증가에 따른 전단변형률 최대값의 증가도 커진다. 전단변형 역제의 관점에서 보면 수렴각이 작은 노즐이 유리하다.

지금까지 논의된 유동분석 결과를 보면 고속인출 조건에서

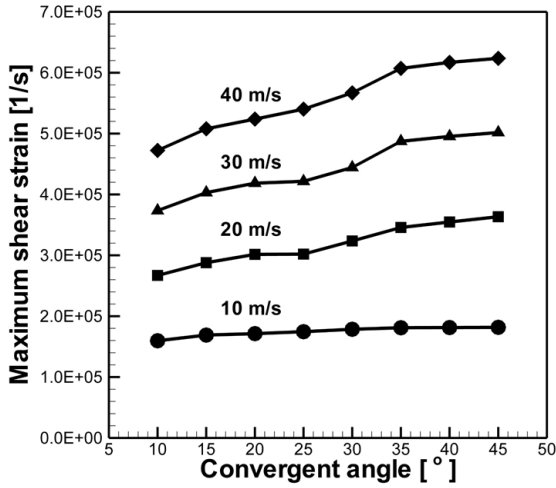


Fig. 7 Maximum shear strain found on the optical fiber vs. convergent angle of the nozzle contraction. The value of fiber drawing speed is given in the frame.

$\theta = 30^\circ$ 를 기점으로 유동특성이 달라짐을 알 수 있다. 그 원인을 규명하기 위하여  $U = 40 \text{ m/s}$ 의 인출 조건에서 수렴각에 따라 노즐 축소부를 중심으로 내부의 유동과 온도장이 어떻게 변화하는지 Fig. 8에 정리하였다.

유동 강도의 차이는 있으나 수렴각이  $\theta = 25^\circ$  이하인 경우, 유동의 기본 구조는 동일하다. 노즐 내부에 전체적으로 단순하고 안정된 재순환 유동 구조를 가진다. 그러나 수렴각이  $\theta = 30^\circ$  이상이 되면 이와 다른 유동특성이 나타나는데 축소부에서 챔버로 되돌아오는 유체가 벽을 따라 흘러가는 것이 아니라 마치 체트처럼 분사되는 듯한 유동 구조를 보인다. 이 때 재순환 유동은 여러 개의 핵을 가지는 다중세포 구조를 가진다. 이런 유동구조는 다음과 같은 기구에 의해 발생된다고 추정된다. 챔버와 피복 다이를 연결하는 부분은 광섬유 유동방향을 기준으로 하면 축소부이지만 광섬유에 의해 구동된 흐름 중 피복 다이로 들어가지 못하고 노즐 벽을 타고 되돌아가는 유체의 관점에서 보면 확대부이다. 확대유로에서 확대각이 너무 크면 벽면에서 유동의 박리가 발생하는데 축소부의 노즐 벽면에서 나타나는 유동의 구조가 이와 유사하다. 유동의 불안정성을 유발하는 이러한 유동형태는 바람직하지 않기 때문에 수렴각이 큰 노즐은 피복장치용으로 적절하지 못하다.

이상의 논의를 종합하여 피복유동에 적절한 수렴각을 찾아보기로 하자. 먼저 불안정한 유동구조가 나타나는  $30^\circ$  이상의 수렴각을 배제한다. 이 조건에서 고속 피복 조건에서 피복재 최고온도는 수렴각이 클수록 감소한다. 반대로 광섬유 표면의 최대 전단변형률은 수렴각이 커지면 감소한다. 피복두께의 인

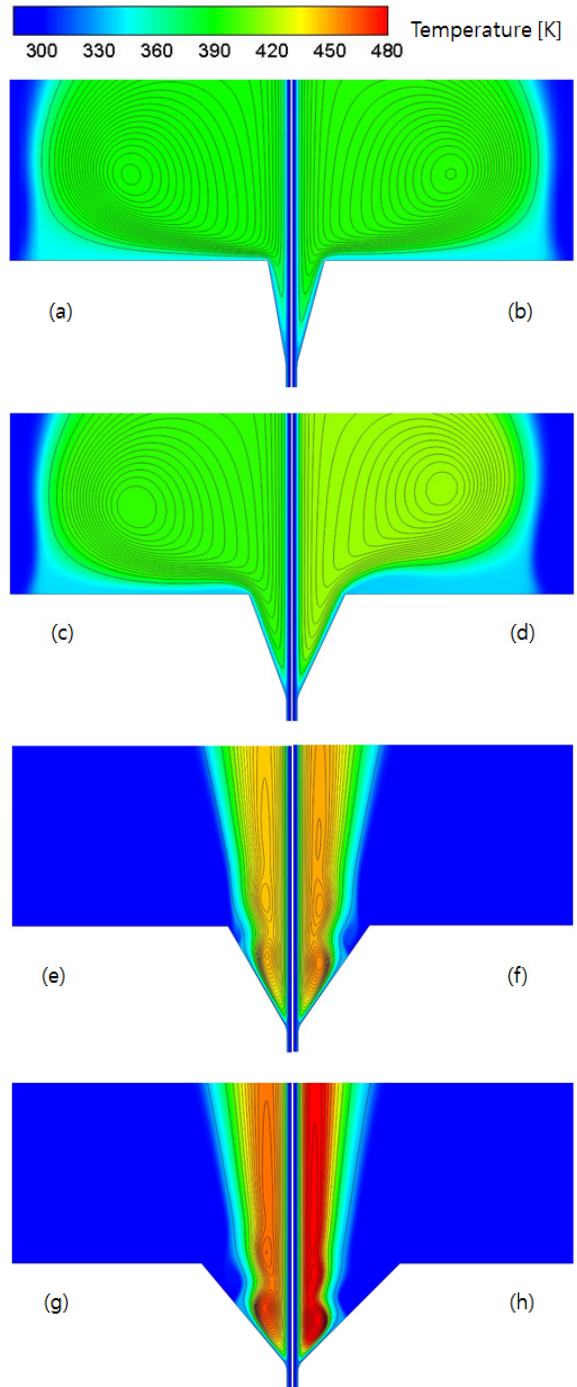


Fig. 8 Effects of convergent angle of the nozzle contraction on flow patterns and temperature distribution: (a)  $\theta = 10^\circ$ ; (b)  $\theta = 15^\circ$ ; (c)  $\theta = 20^\circ$ ; (d)  $\theta = 25^\circ$ ; (e)  $\theta = 30^\circ$ ; (f)  $\theta = 35^\circ$ ; (g)  $\theta = 40^\circ$ ; (h)  $\theta = 45^\circ$ . The lines represent streamlines and the color legends for temperature are given in the frame



출속도에 대한 민감도는 수렴각이 커지면 다소 커지지만 그 차이는 크지 않다. 피복의 안정성을 보장을 위한 여러 가지 상반되는 조건을 동시에 만족시키는 것은 어려우며 재순환 유동구조의 안정성, 인출속도에 대한 민감도와 전단변형률 제약을 종합적으로 고려한 절충설계가 필요하다.

#### 4. 결 론

이 연구에서는 광섬유의 고속 피복에 적합한 마이크로 노즐 형상을 찾기 위하여 10 ~ 45°의 노즐 축소부의 수렴각을 가지는 피복 노즐 내부의 열유동을 전산해석적 방법으로 분석하였다. 주피복 다이출구에서의 피복재의 온도 상승 최소화, 광섬유 인출속도의 증가에 따른 피복두께 변화의 최소화, 광섬유 표면의 전단변형률 최소화, 유동 구조의 단순화 및 안정화라는 기준을 토대로 수렴각에 따른 열유동 특성을 조사하였다. 전산해석 결과는 노즐 내부에 형성되는 재순환 유동의 안정성을 위해서는 수렴각을 25° 이하로 유지하여야 함을 제시하였다. 이 영역안에서 수렴각이 작아지면 출구 피복재 온도 상승이 커지고 수렴각이 커지면 광섬유 표면 전단 변형률이 커지고 인출속도에 따른 피복두께의 변화량이 작아진다. 그동안 사용하던 피복 노즐의 기본 구조로는 피복유동이 요구하는 이상적인 조건을 모두 만족시킬 수 없다. 따라서 동시에 만족시키기 어려운 설계요구 조건을 절충한 최적설계를 수행하거나 아니면 전혀 새로운 구조를 구상하는 것이 선택가능한 방안이다.

#### 후 기

이 연구는 연구재단 일반연구지원사업(과제번호 2012R1A1A2002177)의 지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

#### References

- [1] 1980, Blyler Jr., L.L. and Dimarcello, F., "Fiber Drawing, Coating, and Jacketing," *Proc. IEEE*, Vol.68, No.10, pp.1194-1198.
- [2] 2011, Kim, K., Kim, D. and Kwak, H.S., "Radiative Heat Transfer Analysis of Glass Fiber Drawing in Optical Fiber Manufacturing," (in Korean) *J. Comput. Fluids Eng.*, Vol.16, No.1, pp.22-29.
- [3] 2012, Kim, K., Kwak, H.S. and Kim, D., "The Role of Helium/Argon Gas Flow in a Glass Fiber Drawing Furnace," *Comput. Thermal Sci.*, Vol.4, No.3, pp.263-270.
- [4] 2012, Kwak, H.S., Kim, D. and Kim, K., "High-Speed Glass Fiber Drawing from Heated and Softened Silica Preform in an Optical Fiber Draw Furnace," *Adv. Sci. Lett.*, Vol.8, No.1, pp.439-444.
- [5] 2013, Kim, K., Kwak, H.S. and Kim, D., "Computational Study on Fiber Drawing Process in a Draw Furnace of Optical Fiber Mass Manufacturing System," (in Korean) *J. Comput. Fluids Eng.*, Vol.18, No.4, pp.69-73.
- [6] 2010, 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," (in Korean) *J. Comput. Fluids Eng.*, Vol.15, No.4, pp.92-98.
- [7] 2011, 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," (in Korean) *J. Comput. Fluids Eng.*, Vol.16, No.4, pp.110-115.
- [8] 2014, Park, S., Kim, K., Kim, D., Park, J.Y. and Kwak, H.S., "Computational Thermo-fluid Analysis for the Effects of Helium Injection Methods on Glass Fiber Cooling Process in an Optical Fiber Manufacturing System," (in Korean) *J. Korean Soc. Manufac. Proc. Eng.*, Vol.13, No.2 pp.124-130.
- [9] 2012, Kim, J., Kwak, H.S. and Choi, J.S., "A Computational Investigation of Thermal Effects on Resin Flows in an Optical Fiber Drawing System," *Appl. Mech. Mater.*, Vol.110-116, pp.1080-1086.
- [10] 2011, Kim, K., "Analysis of Capillary Coating Die Flow in an Optical Fiber Coating Applicator." *World Acad. Sci. Eng. Technol.*, Vol.5, No.7, pp.291-295.
- [11] 1985, Panoliaskos, A., Hallet, W.L.H. and Garis, I., "Prediction of Optical Fiber Coating Thickness," *J. Appl. Optics.*, Vol.24, No.15, pp.2309-2312.
- [12] 2008, Yang, A., Tao, X.M. and Cheng, X.Y., "Prediction of Fiber Coating Thickness via Liquid-Phase Process," *J. Mater. Process. Technol.*, Vol.202, No.1-3, pp.365-373.
- [13] 2011, Kim, K., Kwak, H.S., Park, S.H. and Lee, Y.S., "Theoretical Prediction of Double Layer Coating in Wet-on-Wet Optical Fiber Coating Process," *J. Coat. Technol. Res.*, Vol.8, No.1, pp.35-44.
- [14] 2012, Kim, K. and Kwak, H.S., "Analytic Study of Non-newtorian Double Layer Coating Liquid Flows in Optical Fiber Manufacturing," *Appl. Mech. Mater.*, Vol.224,

- pp.260-263.
- [15] 2006, Yoo, S.Y. and Jaluria, Y., "Isothermal Flow in an Optical Fiber Coating Applicator and Die System," *J. Lightwave Technol.*, Vol.24, No.1, pp.449-463.
- [16] 2007, Yoo, S.Y. and Jaluria, Y., "Fluid Flow and Heat Transfer in an Optical Fiber Coating Process," *Int. J. Heat Mass Transfer.*, Vol.50, No.5-6, pp.1176-1185.
- [17] 1998, Park, T.S. and Suh, J.-S., "An Analysis of Flows of Coating Materials in an Optical Fiber Coating Applicator," (in Korean) *Proc. KSCFE Autumn Meeting*, pp.102-107.
- [18] 2010, Choi, J.S., Kwak, H.S. and Kim, K., "Numerical Simulation of Flow and Heat Transfer in an Optical Fiber Coating Applicator," (in Korean) *Proc. 2010 KSCFE Fall Meeting*, pp.209-211.
- [19] 2011, Choi, J.S., Kwak, H.S. and Kim, K., "Numerical Simulation of the Effects of Resin Supply Temperature on Optical Fiber Coating Thickness," (in Korean) *Proc. 2010 KSCFE Spring Meeting*, pp.96-99.
- [20] "Product data, DeSolite 950-106," DSM Desotech. Inc.
- [21] 2009, Orita, N., Hasloev, P. and Pedersen, F., "Optical Fiber Manufacturing Method and Optical Fiber Manufacturing Apparatus," *U.S. Patent Pub.*, No. US2009/0145168.