

광섬유 고속인출공정용 유리섬유 냉각장치 내 공기유입에 의한 내부헬륨농도 저하현상 연구

김경진¹, 김동주¹, 곽호상¹, 박상희^{*1}, 송시호²

HELIUM CONCENTRATION DECREASE DUE TO AIR ENTRAINMENT INTO GLASS FIBER COOLING UNIT IN A HIGH SPEED OPTICAL FIBER DRAWING PROCESS

K. Kim,¹ D. Kim,¹ H.S. Kwak,¹ S.H. Park^{*1} and S.H. Song²

In a modern high speed drawing process of optical fibers, it is necessary to use helium as a cooling gas in a glass fiber cooling unit in order to sufficiently cool down the fast moving glass fiber freshly drawn from the heated silica preform in the furnace. Since the air is entrained unavoidably when the glass fiber passes through the cooling unit, the helium is needed to be injected constantly into the cooling unit. The present numerical study investigates and analyzes the air entrainment using an axisymmetric geometry of glass fiber cooling unit. The effects of helium injection rate and direction on the air entrainment rate are discussed in terms of helium purity of cooling gas inside the cooling unit. For a given rate of helium injection, it is found that there exists a certain drawing speed that results in sudden increase in the air entrainment rate, which leads to the decreasing helium purity and therefore the cooling performance of the glass fiber cooling unit. Also, the helium injection in aiding direction is found to be more advantageous than the injection in opposing direction.

Key Words : 광섬유 인출(Optical Fiber Drawing), 유리섬유 냉각장치(Glass Fiber Cooling Unit), 공기유입(Air Entrainment), 헬륨주입 (Helium Injection), 전산유체역학(CFD)

1. 서 론

대용량의 정보를 광신호 형태로 전달하는 매체인 광섬유는 구리와 같은 전통적인 금속선을 이용한 전기적 신호 전달방식에 비하여 신호전송에 따른 정보 손실이 매우 작으면서도 가볍고 유연성 및 안전성이 높아 1950년대에 개발된 이후로 정보통신 분야를 중심으로 하여 광범위한 산업분야에 널리 쓰이고 있다. 광섬유는 그 재질에 따라서 여러 종류로 구분되나 석영계 광섬유가 전 세계 통신시장의 다수를 점유하고 있다[1].

Fig. 1에 보이는 바와 같은 석영계 광섬유의 제조과정을 보면, 먼저 고순도 석영 재질의 모재가 2000°C 정도로 흑연 퍼니스 내에서 가열되어 연화된 후 125 μm 지름의 매우 가는 유리섬유가 인출이 된다. 이 유리섬유는 상온에 가깝게 냉각되어진 후 피복장치를 통과하면서 유리섬유 표면 보호 및 강도 보존의 목적으로 액상의 피복재가 이중으로 코팅되어지고, 자외선 조사를 이용하여 표면의 피복재가 경화되어 최종적으로 스펀에 감겨져 완성된다.

유리섬유에 피복재를 코팅할 때, 냉각이 제대로 안되어 광섬유의 온도가 너무 높으면 광섬유 단선 등 제조공정에 문제점이 발생하며 피복재 코팅 품질에도 악영향을 주어 광섬유의 강도 및 광학적 성능의 저하 등의 문제점이 나타난다[2-4]. 따라서 인출된 유리섬유가 피복장치에 들어가기 전에 약 40°C 이하의 온도까지 충분한 냉각을 해주어야 한다.

1990년대 이전 광섬유의 인출속도가 수십 또는 수백 m/min 정도로 상당히 낮았을 때는 유리섬유가 일정 구간의 공기를

접수일: 2010년 11월 5일, 수정일: 2010년 12월 15일,
게재확정일 : 2010년 12월 17일.

1 정회원, 금오공과대학교 기계공학부

2 삼성광통신 광통신연구소

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

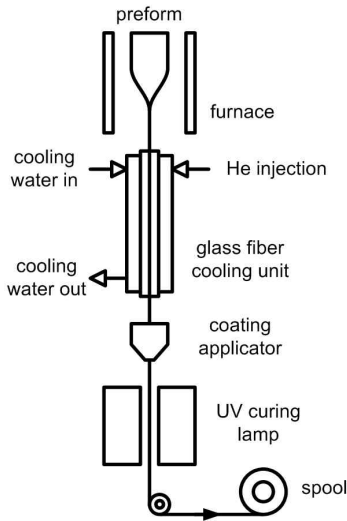


Fig. 1 Illustrative overview of optical fiber manufacturing process

통과하며 얻어지는 자연 냉각으로도 충분하였으나, 퍼니스 모재 인출이나 피복재 코팅 등 관련 공정기술의 발전에 따라 광섬유 인출속도가 높아지면서 이에 상응하는 특별한 냉각기술이 필요하게 되었다. 현재 일반적인 광섬유 인출속도는 1500~2000 m/min 정도이며, 이 인출속도가 광섬유 생산성에 직결되는 만큼 인출속도를 높이기 위한 지속적인 연구개발이 국내외적으로 진행되고 있다.

현재 광섬유 고속인출공정에서 가장 보편적으로 사용되는 유리섬유 냉각방식은 헬륨 주입을 이용한 냉각장치를 이용하는 것이다[5]. 광섬유 인출공정의 특성상 인출되는 유리섬유가 흔들리면 단선되기 쉬운 문제로 강한 유속을 이용한 강제대류 냉각이 곤란하며, 또한 냉각기체의 온도를 상온보다 너무 낮추게 되면 수증기 응결로 인하여 유리섬유 표면 오염이 문제가 된다. 이러한 제약조건에서 공기보다 5배 이상 높은 열전도도를 지닌 헬륨이 고가임에도 불구하고 냉각기체로 쓰이고 있다. 실제로 전 세계 헬륨 생산량 중, 광섬유 제조공정이 상당한 부분을 소비하고 있다[6].

유리섬유가 출입하는 부분에서 냉각장치가 완전히 밀폐되어 장치 내의 기체가 순수한 헬륨만이라면 냉각적 측면에서 이상적이다. 하지만 유리섬유가 출입하는 냉각장치 입출구 구경이 유리섬유의 어느 정도의 흔들림에 대비하여 광섬유 자체의 직경보다는 커야하므로 이로 인한 외부공기의 유입이 있으며, 공기의 유입량이 높아질수록 냉각장치 내 냉각기체의 헬륨순도 및 평균 열전도도가 떨어져 결과적으로 냉각장치의 전체적 냉각능력이 저하된다. 따라서 냉각장치 내 기체의 헬륨 농도를 일정량 이상 유지하려면 지속적인 헬륨의 주입이 필요하다. 또한 광섬유 인출속도가 높아질수록 공기의 유입량

이 늘어 필요한 헬륨 주입량 역시 늘어나, 고가의 헬륨 사용량을 낮추면서 광섬유 고속인출 시 냉각장치의 성능을 유지할 수 있는 기술적 노력이 필요하다.

현재까지 헬륨을 이용한 유리섬유 냉각장치에 대하여 냉각기체의 유동장 및 유리섬유 냉각에 대한 여러 번의 해석적 연구가 시도가 된 바가 있으나 [7-11], 외부에서의 공기유입을 고려하지 않고 일정한 조성비의 헬륨 공급만을 계산에 포함하였다.

이에 본 연구에서는 헬륨 주입을 이용한 광섬유 생산용 유리섬유 냉각장치에서 헬륨의 주입량 및 공급방향과 같은 공정인자에 따른 냉각장치 내 냉각기체의 유동을 수치해석적으로 연구하였다. 그리고 광섬유 고속인출에 따른 외부공기의 유입량 변화 및 냉각장치 내 헬륨 농도를 분석하여 향후의 좀 더 실제적인 유리섬유 냉각모델 연구와 궁극적으로는 광섬유 생산현장이 필요로 하는 유리섬유 냉각장치 설계에 도움을 주고자 한다.

2. 수치해석 모델 및 방법

현재 고속도 광섬유 생산공정에서 사용되는 유리섬유 냉각장치는 헬륨주입으로 인한 냉각유체의 열전달 성능향상 뿐만 아니라 유리섬유 표면에서의 강제대류 냉각효과를 증대하기 위하여 다수의 분사장치를 두어 헬륨을 이동하는 유리섬유 표면에 분사를 하는 등[10,11], 그 내부구조가 광섬유 생산업체 마다 다르며 상당히 복잡할 수 있다. 하지만, 본 연구에서는 유리섬유 유입과 함께 발생하는 외부공기의 유입에 따른 헬륨농도 저하현상에 초점이 맞추어져 있으며 강제대류효과 증대를 위한 부가적인 장치는 고려하지 않았다.

이에 따라 본 연구의 대상이 되는 헬륨 주입을 이용한 유리섬유 냉각장치의 구조는 Fig. 2에 나타난 바와 같은 매우 간단한 기본구조를 채용하였다. 돌출되어 있는 입출구부를 제외한 냉각장치의 내부의 구조는 매우 길고 가는 원형관 형태로서, 전체 내부길이는 50 cm이며 내부직경은 10 mm이다. 전 단계 공정에서 모재로부터 뽑아진 고온의 유리섬유가 냉각장치로 들어가고 나가는 입구 및 출구부의 직경과 길이는 각각 4 mm와 5 mm로 실제 냉각장치의 해당구조의 크기를 따랐다. 헬륨의 순방향 및 역방향 주입구는 Fig. 2에서 보이는 바와 같이 각각 입출구부 근처에서 내외직경이 8 mm와 10 mm인 동심원으로 모델링 되었으며, 들어오는 헬륨주입량에 따른 헬륨유속이 주입구 표면에서 균일하다고 가정하였다. 유리섬유의 직경은 산업 표준인 125 μm이다.

Fig. 2에 보이는 바와 같은 축대칭 동심관 내의 헬륨 및 공기의 혼합기체인 작동유체의 거동은 정상 비압축성유동으로 단순화 하였으며, 유리섬유 및 원형관의 직경이 매우 작은

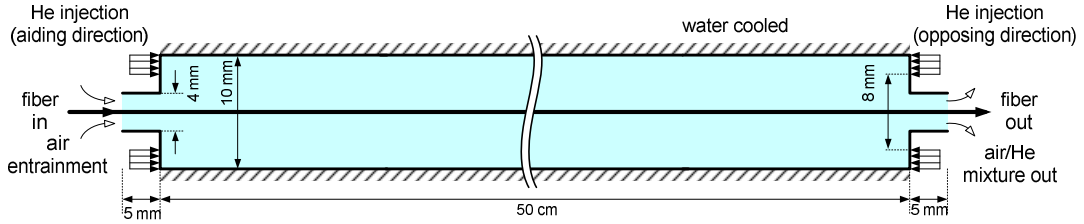


Fig. 2 Schematic diagram of the glass fiber cooling unit with helium injection

관개로 층류 유동을 가정하였다. 유동해석을 위하여 다음과 같이 연속방정식 및 운동량방정식이 지배방정식으로 사용되었다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\tau) \tag{2}$$

작동유체의 공기 및 헬륨성분의 분포를 모사하기 위하여 해석에 포함된 각 기체의 질량분율에 대한 스칼라수송방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial (\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i \tag{3}$$

위의 방정식에서 헬륨과 공기사이의 질량확산은 고려되었으나 서로간의 화학반응은 무시되었다. 공기 및 헬륨의 혼합기체의 점도는 다음과 같이 각 기체성분의 질량분율로 계산되었다.

$$\mu = \sum_i Y_i \mu_i = Y_{air} \mu_{air} + Y_{He} \mu_{He} \tag{4}$$

본 연구에서는 범용 CFD 패키지인 FLUENT 6.3을 이용하였으며, 상기의 지배방정식들은 미소 제어체적방법을 기반으로 하여 이산화 되었으며, 운동량방정식 내 대류항의 차분처리에는 1차 상류도식이 사용되었다. 또한 유속과 압력의 연계는 SIMPLE 알고리즘을 채용하였다.

유동 해석에는 2차원적 축대칭 계산영역에 대하여 정렬격자계가 사용되었으며 모든 경우에 대하여 총 격자수는 약 50,000 개이다. 고속의 광섬유 인출속도로 이동하는 유리섬유 표면상의 속도분포가 매우 급격하므로 유리섬유 표면 위에 격자를 충분히 주었다. 냉각장치의 입구부 및 출구부에서는

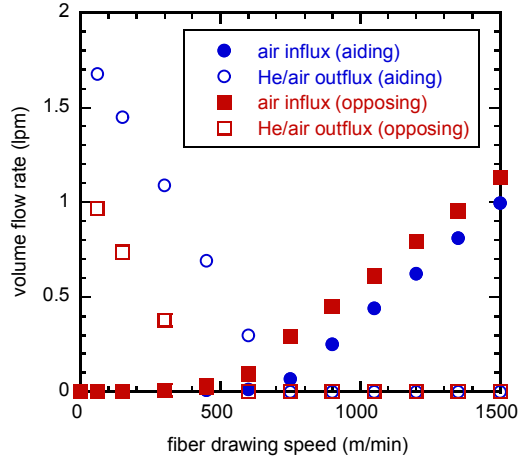


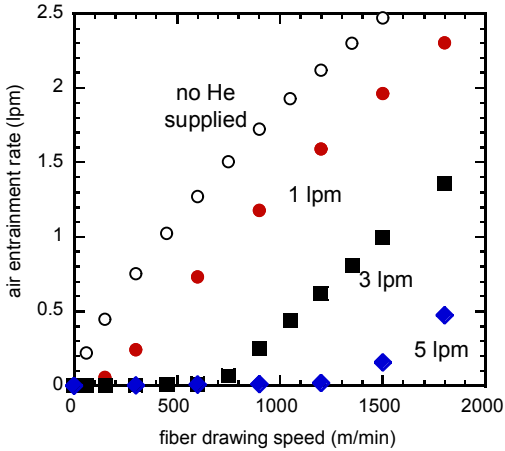
Fig. 3 Comparison of air entrainment rate and inner gas outflux at the inlet with helium injection of 3 lpm in aiding and opposing directions

대기압 경계조건을 주어 공기유입을 고려하였다.

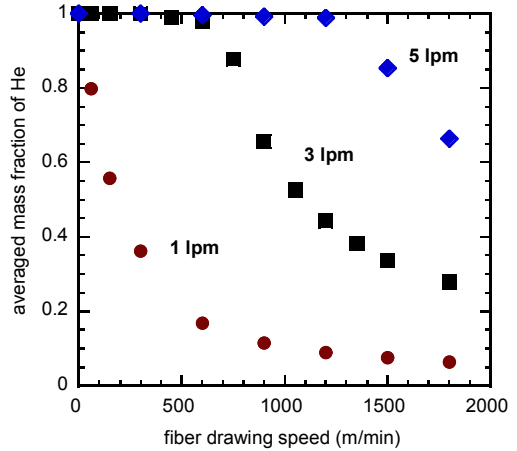
3. 해석 결과 및 토론

본 연구에서는 헬륨의 주입량 및 주입방향, 그리고 유리섬유 인출속도와 같은 핵심적인 공정변수가 냉각장치 내부로의 외부공기 유입량 및 이에 따른 냉각장치 내 헬륨 농도 저하에 미치는 영향을 중점적으로 분석하였다. 앞서 언급한 형상의 냉각장치로의 헬륨의 주입량은 1, 3, 5 lpm이 헬륨주입이 없는 경우와 함께 고려되었으며, 헬륨 주입방향의 영향을 알아보기 위하여 유리섬유의 인출방향을 기준으로 순방향 및 역방향으로 일정량의 헬륨이 각각 입구부 및 출구부 근처에서 냉각장치 내로 주입되도록 하였다. 유리섬유 인출속도는 100 m/min의 저속에서 시작하여 2000 m/min 정도의 고속까지 해석에 포함되었다.

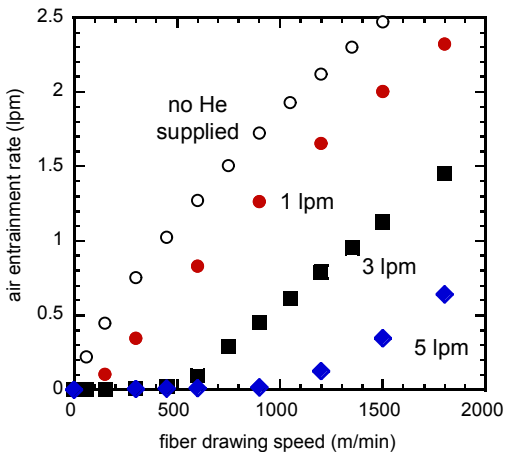
Fig. 3에는 순방향 또는 역방향으로 3 lpm의 헬륨을 주입하는 경우, 유리섬유 인출속도가 1500 m/min까지 증가할 때 유리섬유가 들어가는 4 mm 직경의 입구부에서 유리섬유와 더



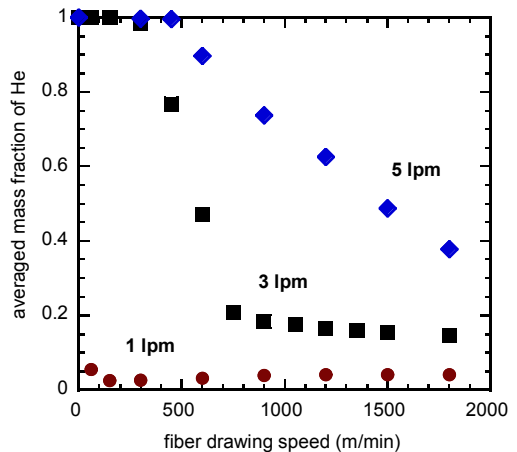
(a) Helium injection in aiding direction



(a) Helium injection in aiding direction



(b) Helium injection in opposing direction



(b) Helium injection in opposing direction

Fig. 4 Air entrainment rate at the glass fiber inlet with three levels of the helium injection rate

Fig.5 Averaged mass fraction of helium to the gas inside the cooling unit with three levels of the helium injection rate

불어 공기가 유입되는 유량과 헬륨 및 공기 혼합의 내부기체가 역류하여 나가는 유량의 변화가 나타나 있다. 헬륨의 순방향 및 역방향 주입 경우 모두, 인출속도가 낮을 때는 공급된 헬륨 유량 상당 부분이 냉각장치 출구뿐만 아니라 입구로도 빠져나가며, 그 유량은 인출속도가 증가함에 따라 감소한다. 인출속도가 낮을 때, 공기 유입량은 매우 작기는 하지만 인출속도의 증가에 따라 약간씩 증가한다.

하지만 인출속도가 높아지면서 순방향 주입의 경우, 인출속도 약 750 m/min, 역방향 주입의 경우, 인출속도 약 450 m/min를 분기점으로 하여 내부기체의 입구부로의 역류가 사라지고 외부 공기만이 들어오며 그 공기유입량이 대폭적으로 늘어나는 현상을 보인다. 이 인출속도를 지나면 유리섬유가 도입하는 점성력이 충분히 커져 입구부에서는 헬륨/공기 내부

기체의 역류를 억제하여 외부 공기의 유입량은 인출속도가 증가함에 따라 급격하게 늘어난다. 따라서 이러한 분기 인출속도 이후의 유리섬유 인출속도에서는 냉각장치 내 혼합기체 중 공기가 차지하는 비중이 급격히 증가하며, 이로 인하여 냉각성능이 급격히 떨어질 것으로 예상된다. 또한, 역방향 헬륨 주입의 경우가 순방향 주입에 비하여 분기 인출속도가 낮으며, 분기 인출속도 이후에는 공기 유입량이 상대적으로 많음을 알 수 있다. 이에 따라 같은 유량의 헬륨을 주입하는 경우, 순방향 주입이 역방향 주입보다는 냉각장치 내 헬륨 농도를 높게 유지하는데 유리한 것으로 파악된다.

Fig. 4에서는 순방향 및 역방향의 헬륨주입에 대하여 주입량을 1, 3, 5 lpm으로 하여 헬륨 주입량의 변화에 따른 공기 유입량 변화를 살펴보았다. 헬륨 주입량이 늘면서 공기 유입

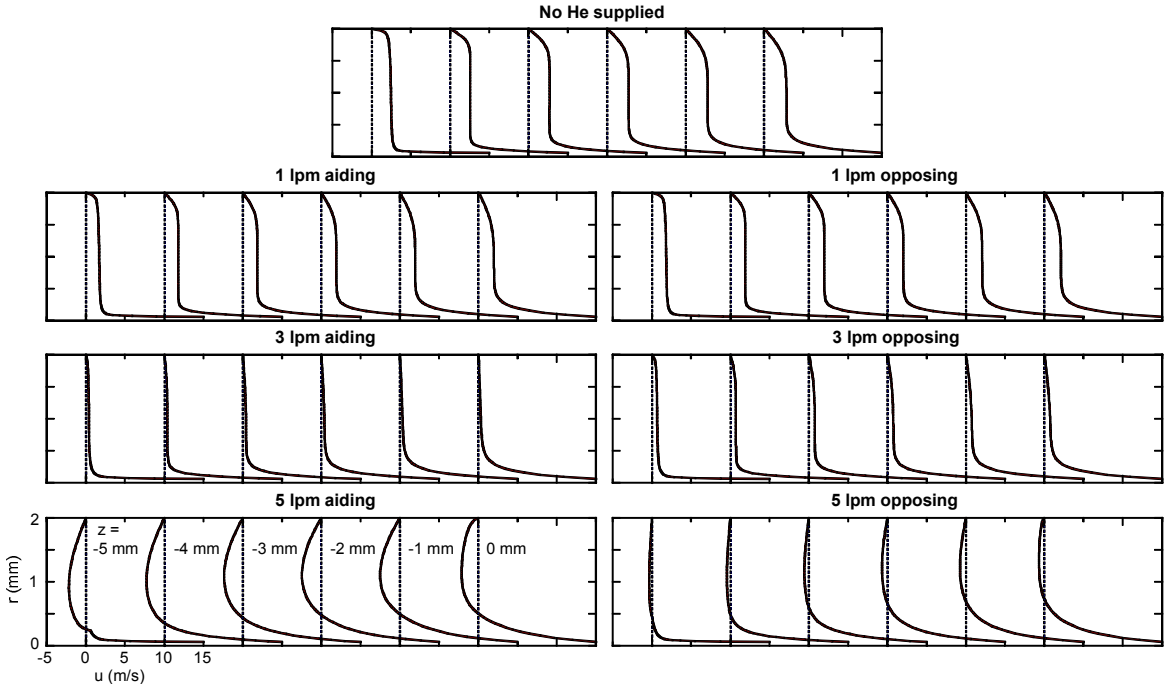


Fig. 6 Flow velocity profiles along the inlet duct of 4 mm diameters for the cases of helium injection in aiding and opposing directions as well as the case of no helium supply (900 m/min of fiber drawing speed)

량이 큰 폭으로 감소하여 냉각장치의 유리섬유 냉각성능이 높아질 것으로 예상된다. 또한 공기 유입량이 급격히 증가하기 시작하는 분기 인출속도 역시 증가하고 있다. Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 순방향 주입의 경우, 1, 3, 5 lpm의 헬륨 주입량에 대하여 그 분기 인출속도는 약 200, 750, 1200 m/min 정도로 증가하였다.

이번에는 헬륨 주입방향을 역방향으로 바꾸어 그 영향을 순방향의 경우와 비교해보았다. Fig. 4(b)에 나타난 바와 같이 역방향 헬륨 주입의 경우도 비슷한 경향을 보이고 있지만, 같은 헬륨 주입량 및 인출속도에서는 순방향의 경우 보다 공기 유입량이 많았으며 그 차이는 헬륨 주입량이 많을 때, 더 두드러져 보였다. 분기 인출속도도 순방향 주입에 비하여 낮은 인출속도에서 나타나, 분기 인출속도가 각각 150, 450, 900 m/min 정도이다.

다음으로 Fig. 4에 나타나는 순방향 및 역방향 헬륨 주입 경우에 대하여 냉각장치 내부의 평균적 헬륨 질량비를 조사해보았으며, 그 결과는 Fig. 5에 보인다. 여기서도 앞서 언급한 바 있는 분기 인출속도가 잘 나타난다. 또한, 분기속도 이후에는 인출속도가 증가함에 따라 헬륨의 농도가 큰 폭으로 감소함을 볼 수 있다.

순방향과 역방향의 헬륨 주입 경우를 비교하여 보면, 분기

인출속도 이후의 평균 헬륨 질량비가 순방향 주입의 경우가 훨씬 높음을 알 수 있어, 순방향 주입이 역방향 주입보다 냉각장치 내 헬륨 농도를 높게 유지하는데 유리함을 다시 확인하였다. 헬륨의 주입량이 5 lpm이 되더라도 헬륨의 주입에 의한 냉각관 내의 헬륨 유속은 평균 약 1 m/s 정도로서 유리섬유 인출속도에 비하여 그다지 높지 않아, 헬륨 주입에 따른 직접적인 강제대류 냉각효과는 무시할 만하다고 판단된다. 따라서 효과적인 헬륨 주입량의 결정은 냉각장치 내부의 헬륨 농도를 높게 유지하여 냉각기체의 열전도도를 높게 유지하는 것으로 판단되어야 할 것이다. 그 예로, 1200 m/min의 인출속도에 대하여 헬륨을 순방향으로 주입하는 경우, 5 lpm의 헬륨 주입량으로 냉각장치 내 헬륨의 평균적 순도가 거의 100%에 이르러, 더 이상의 주입량 증가로 인한 냉각효과 증대는 거의 없을 것으로 고찰된다. 따라서 헬륨주입을 이용한 유리섬유 냉각장치의 설계 및 운용에서는 외부로부터의 공기유입을 최대한 억제하는 것이 냉각장치의 성능 및 헬륨 사용량의 절감에 가장 큰 관건이 될 것이다.

냉각장치 입구부에서의 공기유입과 내부기체 역류현상을 자세히 살펴보기 위하여 입구에 돌출된 4 mm 직경과 5 mm 길이의 입구부에서의 유속분포가 헬륨주입이 없는 경우를 비롯하여 순방향 및 역방향 헬륨주입의 경우에 대하여 Fig. 6에

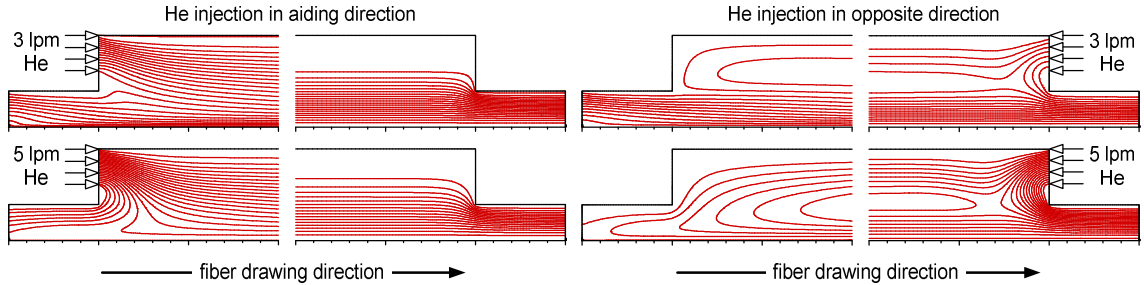
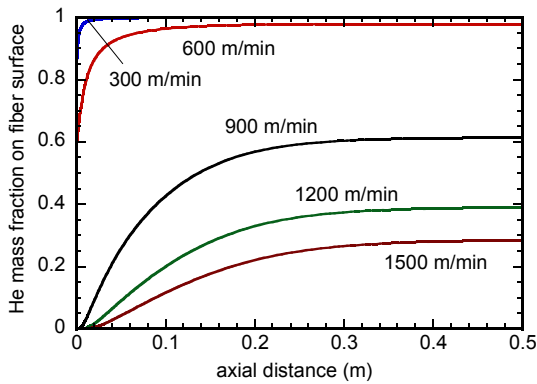
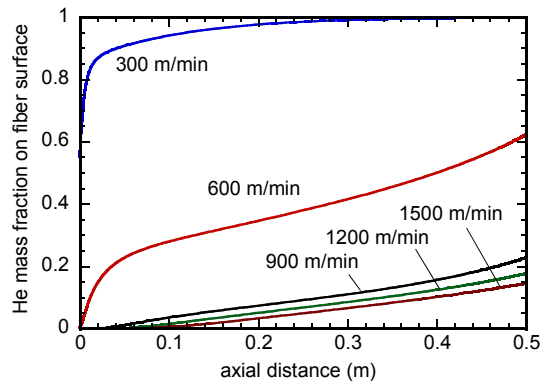


Fig. 7 Streamlines near the inlet and outlet for the cases of helium injection in aiding and opposing directions (900 m/min of fiber drawing speed)



(a) helium injection in aiding direction



(b) helium injection in opposing direction

Fig. 8 Local mass fraction of helium to the gas mixture on the glass fiber surface at the helium injection rate of 3 lpm

그러져 있다. 참고로 그림에서 $z = -5$ mm의 위치는 냉각장치 입구를 의미한다. 먼저 헬륨주입이 없이 공기만이 900 m/min 또는 15 m/s로 이동하는 유리섬유와 함께 유입될 때의 유속 분포를 보면, 유리섬유의 이동으로 인한 Couette 유동과 더불어 긴 냉각관에서의 압력강하에 따른 Poiseuille 유동이 복합되어진 것을 발견할 수 있다. 여기서 헬륨주입이 도입이 되어 그 주입량이 늘어나면, 입구부에서의 압력강하를 상쇄하게 되면서 Poiseuille 유동에 의하여 들어오는 공기의 유입량이 감소한다. 헬륨주입량이 5 lpm 정도로 높아지면 입구부에서의 높은 압력강하 상쇄가 역방향의 Poiseuille 유동으로 나타나며 입구에서의 외부공기의 유입은 최소화되며 내부기체의 역류 현상이 나타난다. 순방향 및 역방향 모두 증가하는 헬륨 주입량에 대하여 비슷한 현상으로 보이는데, 순방향 주입의 경우가 역방향 주입의 경우에 비하여 헬륨 주입에 의한 공기유입 억제효과가 큼을 여기서도 관찰할 수 있다.

Fig. 7에는 900 m/min의 인출속도에 대하여 헬륨을 순방향 및 역방향으로 3 lpm 또는 5 lpm으로 주입할 때, 헬륨 주입구를 포함하여 입구 및 출구 부근의 유동장을 우선으로 표현하였다. 헬륨의 순방향 주입의 경우, 앞서 언급된 바와 같이

입구부에서의 공기유입이 억제되면서 주입된 헬륨이 하류로 이동하며 냉각관 중심으로 퍼짐을 볼 수 있다. 이에 비하여 역방향 주입의 경우, 출구부 인근에 설치된 헬륨 주입구에 들어오는 헬륨의 상당 부분이 그대로 출구부로 배출되며 상류로 이동하는 헬륨은 냉각관 바깥 부분에서 재순환되어지고 있다. 따라서 같은 유량의 헬륨이 주입되었을 때, 역방향 주입이 순방향 주입에 비하여 공기유입 억제효과가 상대적으로 크지 않고 주입된 헬륨이 유리섬유 인근 기체 헬륨농도의 상승에도 상대적으로 적게 기여하는 것으로 보인다.

마지막으로 순방향 또는 역방향으로 3 lpm 유량의 헬륨을 주입할 때, 유리섬유 표면을 따라 헬륨의 국부적인 질량비가 Fig. 8에 각 인출속도에 대하여 나타나 있다. 참고로 축방향 위치 0은 입구부와 만나는 10 mm 지름의 냉각관 부분을 의미한다. 여기서도 같은 유리섬유 인출속도에서 순방향의 헬륨 주입이 역방향의 경우보다 높은 헬륨 순도를 유리섬유 표면에 유지시켜주는 것으로 나타났다. 그리고 순방향의 헬륨 주입 경우에는 헬륨 주입 후 유입된 공기와 섞이면서 일정 거리 이후에 헬륨의 농도가 일정하게 유지된다. 이에 반하여, 역방향으로 헬륨을 주입할 경우에는 냉각장치 출구부에 헬륨

의 농도가 다른 위치에 비하여 상대적으로 높게 나타나, 유리섬유 이동과 반대방향으로 주입된 헬륨이 냉각장치 내부 전체에 골고루 퍼지지 못하고 출구부로 배출되어 내부기체의 냉각효과에 대해서 불리함을 알 수 있다.

본 연구에서는 냉각장치 내 유동해석을 통한 헬륨 농도의 분석에 중점을 두었으나, 고온의 유리섬유 유입에 따른 자연 대류 및 냉각장치의 기하학적 형상 등을 함께 고려하여 유리섬유 냉각성능 극대화를 목표로 하는 열전달 추가 해석이 향후의 연구에 필요하다.

4. 결 론

광섬유 제조공정에서 모재에서 인출된 고온의 유리섬유를 냉각하는데 헬륨 주입을 이용한 냉각장치가 사용되는데 유리섬유와 함께 유입되는 공기는 내부 기체에서의 헬륨의 순도를 낮추어 냉각성능에 악영향을 준다. 본 연구에서는 상용 CFD 패키지를 이용하여 헬륨 주입량 및 방향이 냉각장치 내부로의 공기 유입현상에 미치는 영향을 전산해석 하였다.

그 결과, 주어진 헬륨 주입량에 대하여 공기 유입량이 급격히 증가하고 헬륨의 농도가 급격히 감소하는 분기 인출속도가 발견되었다. 또한 순방향의 헬륨 주입이 역방향의 헬륨 주입보다 분기인출속도가 높으며, 같은 인출속도에서 공기의 유입량이 적고 헬륨의 농도가 높아 유리섬유의 냉각에 유리함을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2009년도 삼성광통신의 헬륨가스 절감형 유리섬유 냉각장치 연구개발과제 지원으로 수행된 연구의 결과이다.

참고문헌

- [1] 1996, Hiroshi, M., *Handbook of Optical Fibers and Cables*, Marcel Dekker, Inc., New York.
- [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] 1979, 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.
- [4] 1981, 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.
- [5] 1986, 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.
- [6] 2000, National Research Council (U.S.), *The Impact of Selling the Federal Helium Reserve*, National Academy Press, Washington, D.C.
- [7] 1993, 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.
- [8] 1995, 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.
- [9] 2001, Tschümperlé, D. and Nicolardot, M., "Fiber Cooling Modelisation During Draw Using CFD," *Proceedings of ASME CFD Symposium: 3rd International Symposium on Computational Technologies for Fluid/Thermal/Chemical Systems with Industrial Applications*, Atlanta, GA.
- [10] 2001, 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.
- [11] 2002, 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.