

# 광섬유 2차 코팅다이 형상 변화에 따른 유리섬유 고속 코팅공정 영향성 해석연구

김경진\* · 박중윤\*\*

\*\* 금오공과대학교 기계시스템공학과

## Numerical Study of Secondary Coating Die Geometry Effects on High Speed Optical Glass Fiber Coating Process

Kyoungjin Kim\* and Joong-Youn Park\*\*

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

### ABSTRACT

The protective double layer polymer coatings on silica optical fibers are realized by wet-on-wet liquid coating process and they play an important role in final quality of mass produced optical fibers. This numerical study aims to analyze the effects of secondary coating die design parameters by employing two dimensional axisymmetric model of coating cup and coating die geometry and computational fluid dynamics simulations which include temperature dependent viscosity of polymer coating liquids and viscous dissipation heating. Under high speed fiber drawing conditions and pressurized coating liquid supply, the effects of converging die angle are investigated in order to appreciate the change of coating liquid flow patterns such as flow recirculation zone near coating die as well as primary and secondary coating layer thicknesses. The auxiliary coating die to converging coating die is also tested and the results find that this concept is advantageous in achieving stable double layer coatings on silica glass fiber.

**Key Words** : Optical Fiber, Glass Fiber Coating, Liquid Coating, Coating Die, Computational Simulation

### 1. 서 론

광섬유는 광신호 정보를 가느다란 초고도 투명도의 실리카 유리 또는 고분자 플라스틱 섬유를 통하여 대량 전달하는 매체이다. 구리선 등 금속 매체에 비교하여 광섬유는 초고속 대용량 정보 전송이 가능하며, 매우 낮은 신호 전송 손실, 뛰어난 정보 보안성, 케이블 경량성과 유연성, 그리고 낮은 제조비용 등의 수많은 기술적 장점으로 정보통신분야를 중심으로 전반적 산업분야에 현재 활용되고 있다. 또한 광섬유는 대화면 정보디스플레이 영상전달, 광센서, 조명장치 등에서도 다양하게 응용되고 있다 [1-3].

실리카계 광섬유의 현대적 연선제조시스템을 살펴보면 다음과 같다. 먼저 고순도 실리카 모재가 인출퍼니스 내에서 국부적으로 가열 및 연화되어, 모재 끝부분에 적절한 인출장력을 가하여 일정 속도로 당기면 매우 가는 유리섬유가 인출된다. 인출된 유리섬유는 냉각공정을 거쳐 다음으로 코팅장치를 통과하면 유리섬유 표면에 액상 코팅층이 형성되며, 이를 자외선 조사로 경화하여 광섬유가 최종 완성된다[4].

여기의 해석연구는 광섬유 연선시스템 후반부의 유리섬유 고속 폴리머 액상코팅공정을 대상으로 한다. 실리카계 광섬유는 대체적으로 마이크로벤딩에 의한 광신호 손실 최소화를 위한 1차 내부코팅층(소프트코팅), 기계적 강도 보존 및 유리섬유 표면 보호를 위한 2차 외부코팅층(하드코팅)과 같이 각기 다른 두가지 재질의 폴리머 코팅

†E-mail: jypark@kumoh.ac.kr

이 이중 피복된다[5]. 광섬유 생산기술 개발 초기에서는 각 코팅층 액상피복 및 경화가 순차적으로 적용되는 WOD(wet-on-dry) 방식이 채용되었으나, 최근에는 Fig 1의 도식과 같이 1차 및 2차 액상코팅을 동시에 진행한 후에 이중 액상코팅층을 동시에 자외선 경화하는 WOW(wet-on-wet) 방식이 일반적으로 적용된다[6].

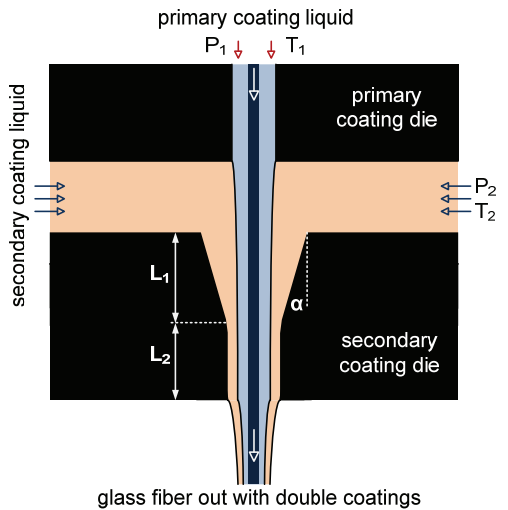


Fig. 1. Schematic of double polymer liquid coating process in optical fiber drawing system.

유리섬유 코팅공정 안정성 및 정밀한 코팅두께 형성이 광섬유 생산성과 최종제품 품질에 상당한 영향이 있기에, 그동안 광섬유 코팅공정에 대한 이론적, 해석적 연구가 활발히 진행되어 왔다. 완전발달유동 가정에 따른 1차원적 이론해석 연구가 진행되었으며[7,8], 점성소산을 포함한 2차원 축대칭적 코팅액 유동해석 시뮬레이션(CFD) 연구[9-11]가 존재하지만 모두 단일 코팅층 적용 공정장치만을 대상으로 하였다.

최근에는 Kim et al. [6] 및 Khan et al. [12]은 WOW 방식의 이중 코팅공정을 1차원적 해석으로 다룬 바 있으며, Kim and Park [13,14]의 연구에서는 광섬유 이중 코팅장치 단순화 형상을 이용하여 2차원적 유동특성 전산해석을 수행하여 코팅액 유동계면 불안정성 및 코팅액 공급은도 등의 주요 공정인자 영향성을 분석하였다.

본 해석연구에서는 광섬유 고속 연선제조시스템의 WOW 방식 이중 액상코팅 공정 대상 선행 전산해석연구를 바탕으로 하여, 유리섬유 이중 코팅장치의 중요 설계점이 되는 2차 코팅다이 형상 변화가 이중 코팅액 유동특성 및 코팅층 형성에 미치는 영향을 고속 광섬유 인출선속 및 점성소산 효과를 고려하여 분석함을 목적으로 한다.

## 2. 유리섬유 WOW 코팅공정 해석모델

WOW방식 이중 액상코팅 공정은 광섬유 인라인 연선시스템의 중요 공정으로서 유리섬유 인출퍼니스에서 인출된 유리섬유는 적정 냉각 후에 이중 코팅장치로 고속 유입된다. 유리섬유는 1차 코팅컵 및 코팅다이를 통과하여 1차 폴리머 코팅액을 표면에 지닌 채로 Fig 1에 나타나는 내부 유로형상의 2차 코팅컵에 진입한다. 각 코팅컵은 작은 직경의 모세관 형상 코팅다이를 각각 가지고 있으며, 각 코팅다이 직경, 길이, 형상이 해당 코팅층 두께 결정 및 코팅액 유동 안정성에 큰 영향을 미칠 수 있다. 2차 코팅다이 출구를 통과하면서 유리섬유 표면에 이중 액상코팅층이 형성되며 후속 단계의 UV 경화장치[15]에서 두 액상층이 경화된다.

실제의 광섬유 이중 코팅장치 내 코팅액이 흐르는 내부 유로의 형상은 상당히 복잡하지만, 본 해석연구에서는 이를 Fig 1처럼 2차원 축대칭 형상으로 간소화하여 유동해석 대상으로 하였다. 선행 연구와 같이 여기에서도 상대적으로 단순한 1차 코팅컵 유동은 제외하였으며, 이중 액상코팅액 유동현상에 중점을 두어 2차 코팅컵 내부와 전후의 1차 및 2차 코팅다이 유로 내의 코팅액 유동만을 전산유동해석 모델 영역에 포함하였다. 참고로 코팅컵 및 코팅다이, 그리고 유리섬유 등 고체영역은 해석영역에 포함되지 않는다.

이중 코팅액 유동 해석에서 동원된 CFD 해석기법은 선행 연구[13,14]에서 자세히 설명되어 있으며, 요약하면 다음과 같다. 다물리 전산해석 소프트웨어인 COMSOL Multiphysics 3을 활용하여 코팅액 유동 및 대류열전달 해석을 수행하였다. 열손실이 무시할 만하다는 가정하에 코팅컵과 코팅다이 내벽은 단열조건으로 처리하였으며, 빠르게 통과하는 유리섬유 표면도 단열조건을 주었다. 전산유동해석에는 정방형 격자를 활용하였는데, 속도 및 온도 구배가 극심하게 나타나는 유리섬유 표면 및 코팅다이 내벽 인근에 충분히 많은 격자를 중점 배치하였다. 또한 격자 민감성 시험을 통하여 사용된 격자계가 충분한지 확인하였다.

1차 및 2차 코팅컵으로 공급되는 각 코팅액의 공급은도 및 공급압력은 중요한 공정인자로서 여기서는 적정 유리섬유 냉각을 전제로 하여 실제 공정조건에 준하는 값들을 경계조건으로 하였으며, 2차 코팅다이의 출구에는 계기영압력의 출구유동 경계조건을 설정하였다. 각 코팅액의 비혼합성에 따라 1차 및 2차 코팅액 계면 처리를 위하여 Level Set 해석기법을 적용하였다.

각 코팅액 점도는 온도에 따라 민감하게 변하는데, 점성소산 발열에 의한 코팅액 온도 상승과 점도의 온도의

존성을 해석에 반영하였다. 1차 및 2차 폴리머 코팅액으로 실제 광섬유 생산현장에서 사용되는 Desotech사의 Desolite DP-1004와 DS-2015 코팅액의 점도를 묘사하는 각 코팅액 점도를 온도의 함수로 다음과 같이 주었다[16].

$$\mu_1 = \exp(9.0242 - 2.3511 \ln T) \quad (1)$$

$$\mu_2 = \exp(12.167 - 3.2277 \ln T) \quad (2)$$

위에서 온도 및 점도의 단위는 각각 K 및 Pas이다. 폴리머 코팅액에서 일반적으로 나타나는 비뉴턴유체적 점도 변화는 그 효과는 크지 않다고 보고 여기서는 고려하지 않았다. 코팅액의 유동해석은 1차 코팅액이 2차 코팅다이에 진입하는 시점을 초기조건으로 하여 유동현상이 시간적으로 더 이상 변화하지 않는 정상유동 도달 시점까지 전산시뮬레이션을 진행하였다. 공정조건에 따라 일정하지는 않지만, 정상유동 확립 계산시간은 3 ms 정도로 나타났으며, 유동장 및 코팅액 두께의 시간적 변화를 확인하여 실제 계산시간은 이보다 약간 더 길게 잡아 해석을 수행하였다.

### 3. 전산해석 결과 및 토론

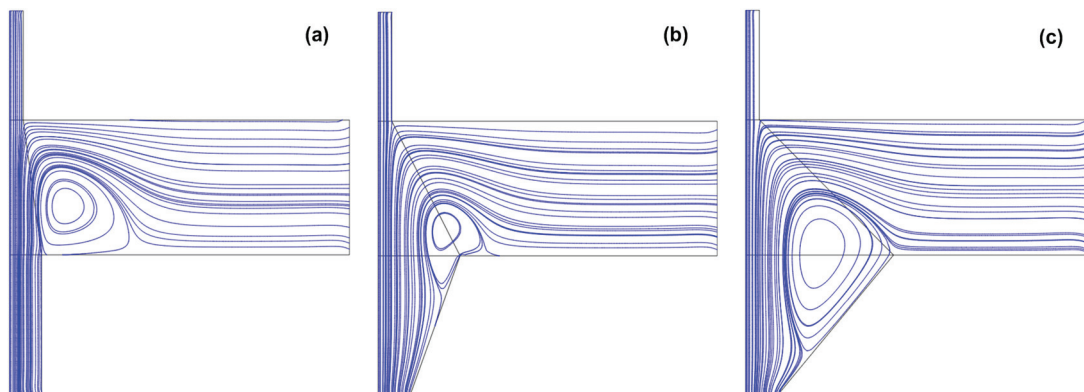
본 연구에서는 Fig. 1에서 축대칭 단면으로 도시된 바와 같은 유리섬유 이중 코팅장치를 대상으로 한다. 이 코팅장치 중심축을 일정 선속으로 통과하는 유리섬유의 직경은 산업표준치수인 125  $\mu\text{m}$ 이며, 이 직경은 실리카 코어와 클래딩을 포함한다[5]. 이중 코팅장치 형상치수로 산업현장에서 사용되는 실제값을 최대한 반영하여 1차 코팅다이 직경 및 길이는 각각 245  $\mu\text{m}$ 와 470  $\mu\text{m}$ 이며, 2차 코팅

높이는 580  $\mu\text{m}$ 로 설정하였다.

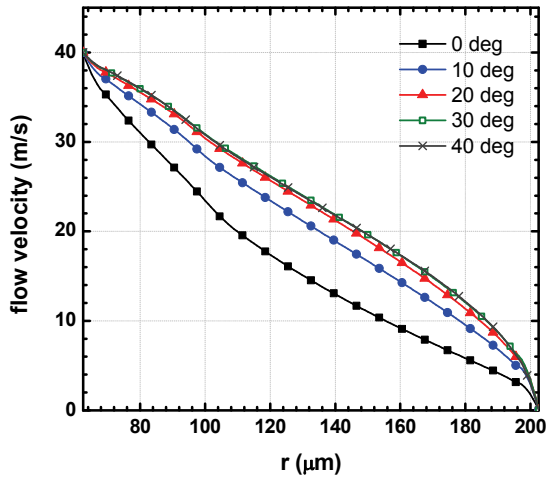
선행 연구에서는 2차 코팅다이 직경 및 길이를 각각 405  $\mu\text{m}$ 와 600  $\mu\text{m}$ 로 고정하여 일정 직경의 모세관의 형상만을 사용하였다[14]. 하지만 여기서는 코팅다이 형상을 수렴각( $\alpha$ )을 가지는 길이  $L_1$ 의 축소 모세관을 적용하였으며, 일정 직경 모세관 형상의 길이  $L_2$ 의 보조 코팅다이 역시 적용하였다. 실제 광섬유 제조공정을 반영하여 1차 코팅액 공급조건은  $T_1 = 40^\circ\text{C}$  및  $P_1 = 10 \text{ bar}$ , 2차 코팅액 공급조건은  $T_2 = 40^\circ\text{C}$  및  $P_2 = 3 \text{ bar}$ 로 주었다. 인출선속은 현재의 고속 광섬유 연선기술에 준하는  $V_f = 40 \text{ m/s}$ 를 기본으로 설정하였다.

먼저 보조 코팅다이 없이( $L_2 = 0$ ), 길이  $L_1 = 600 \mu\text{m}$ 의 축소형 코팅다이 형상을 대상으로 앞서 공정조건에 대한 전산해석 및 분석을 수행하였다. 코팅다이의 수렴각을 0도에서 40도까지 적용하여 수렴각의 영향을 분석하였는데, 코팅장치 내부단면의 코팅액 유동패턴이 Fig. 2에 나타나 있다. 코팅다이 수렴각  $\alpha = 0^\circ$ 인 비축소형 다이 경우와 비교하여 수렴각이 20도로 커지면서 2차 코팅다이 입구 인근의 2차 코팅액 재순환영역이 상대적으로 작아지며 코팅다이 내부로 파고들어감에 관찰된다. 하지만 코팅다이 수렴각이 40도로 증가하면 오히려 재순환영역이 확대됨을 보여 수렴각이 너무 커지면 유동 불안정의 요인이 될 수 있으며, 두 코팅액 계면의 안정적 유지 및 균일 두께의 이중 코팅층 형성을 방해할 수 있다.

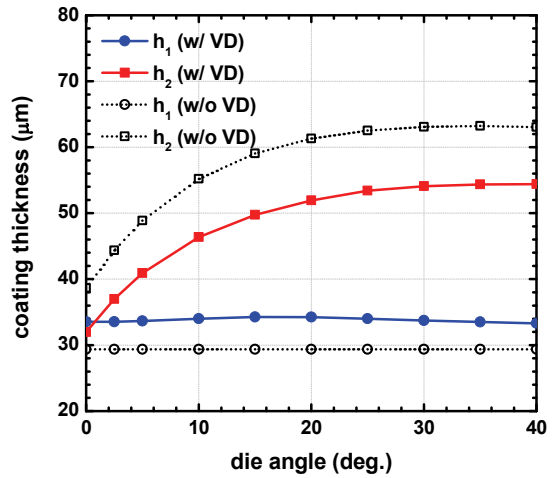
이러한 수렴각 변화에 따른 2차 코팅다이 출구면에서의 코팅액 유속분포가 Fig. 3에 나타나 있다. 수렴각이 커질수록 유속분포가 좀 더 층만해지는데, 수렴각 20도 이후에는 더 이상의 큰 변화를 보이지 않는다. Fig. 4에서는 1차 및 2차 코팅액 공급유량을 산출하여 질량보존에 기반



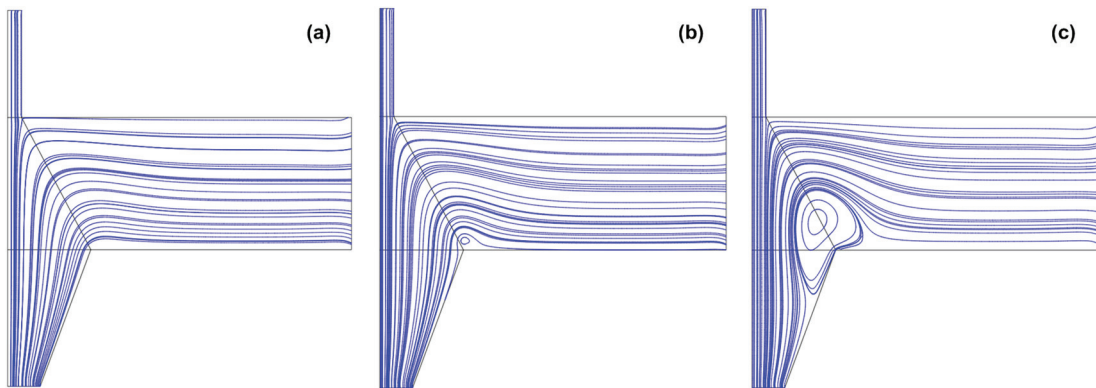
**Fig. 2.** Streamline patterns of coating liquids in double layer fiber coating process with converging angle of secondary coating die: (a)  $\alpha = 0^\circ$ ; (b)  $\alpha = 20^\circ$ ; (c)  $\alpha = 40^\circ$  at fiber drawing speed of  $V_f = 40 \text{ m/s}$ .  $L_1 = 600 \mu\text{m}$  and  $L_2 = 0$ .



**Fig. 3.** The effects of converging die angle ( $\alpha$ ) in secondary coating die on coating flow velocity profiles at the secondary coating die exit.  $V_f = 40$  m/s.  $L_1 = 600 \mu\text{m}$  and  $L_2 = 0$ .



**Fig. 4.** The effects of converging die angle ( $\alpha$ ) in secondary coating die on primary and secondary coating thicknesses with and without viscous dissipation.  $V_f = 40$  m/s.  $L_1 = 600 \mu\text{m}$  and  $L_2 = 0$ .



**Fig. 5.** Streamline patterns of coating liquids in double layer fiber coating process with increasing fiber drawing speed: (a)  $V_f = 10$  m/s; (b)  $V_f = 20$  m/s; (c)  $V_f = 80$  m/s. The converging angle of  $\alpha = 20^\circ$ .  $L_1 = 600 \mu\text{m}$  and  $L_2 = 0$ .

하여 액체코팅층의 UV 경화 시 1차 및 2차 코팅두께를 계산하였으며[6], 점성소산이 고려되지 않은 해석결과(점선)와도 비교하였다. 앞서 언급에서 보는 바처럼 수렴각이 20도 이상 커지면 2차 코팅두께( $h_2$ )는 더 이상 크게 변하지 않는다. 이에 비하여 1차 코팅두께( $h_1$ )는 2차 코팅다이 수렴각의 영향이 미미함이 나타난다. 전체적으로 점성소산 발열을 해석모델에 포함하지 않으면 1차 코팅두께는 과다, 2차 코팅두께는 과소 예측되기에 40 m/s 정도의 고속 연선과정에서는 점성소산 영향을 필히 고려해야 할 수 있다.

축소형 코팅다이 수렴각 20도인 경우에 대하여 인출선

속의 변화에 따른 코팅액 유동의 재순환 유동패턴에 미치는 효과가 Fig. 5에 나타나 있다. 인출선속이 10 m/s 정도로 낮을 시에는 2차 코팅액이 재순환영역 발생없이 2차 코팅다이 내로 진입한다. 하지만 약 20 m/s 선속에서부터 재순환영역이 발생하기 시작한다. 인출선속 40 m/s에 해당하는 Fig. 2(b)에서는 상당한 크기의 재순환영역이 형성되며, 이는 Fig. 5(c)의 인출선속 80 m/s 경우에도 유지된다. 광섬유 생산성의 증대를 위하여 인출선속이 계속 높아지는데, 이 때 코팅다이의 형상 적정 설계가 더 중요해지는 것을 알 수 있다.

다음으로 비축소형 코팅다이 형상(수렴각  $\alpha = 0^\circ$ 의 경우)

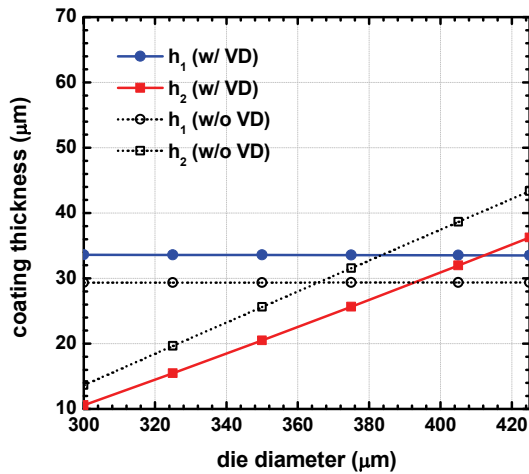


Fig. 6. The effects of secondary coating die diameter on primary and secondary coating thicknesses with and without viscous dissipation.  $V_f = 40$  m/s and  $\alpha = 0^\circ$ .  $L_1 = 600$   $\mu\text{m}$  and  $L_2 = 0$ .

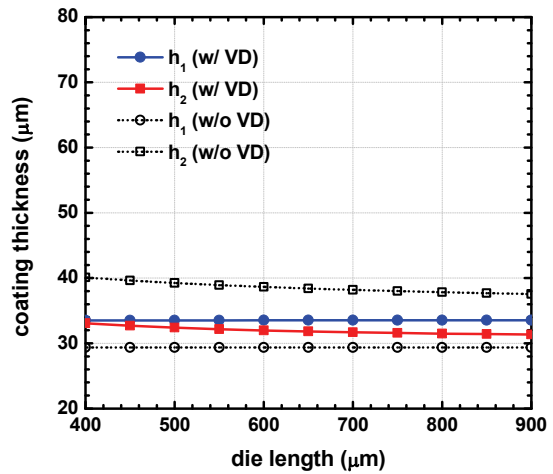


Fig. 7. The effects of secondary coating die length on primary and secondary coating thicknesses with and without viscous dissipation.  $V_f = 40$  m/s and  $\alpha = 0^\circ$ .  $L_1 = 600$   $\mu\text{m}$  and  $L_2 = 0$ .

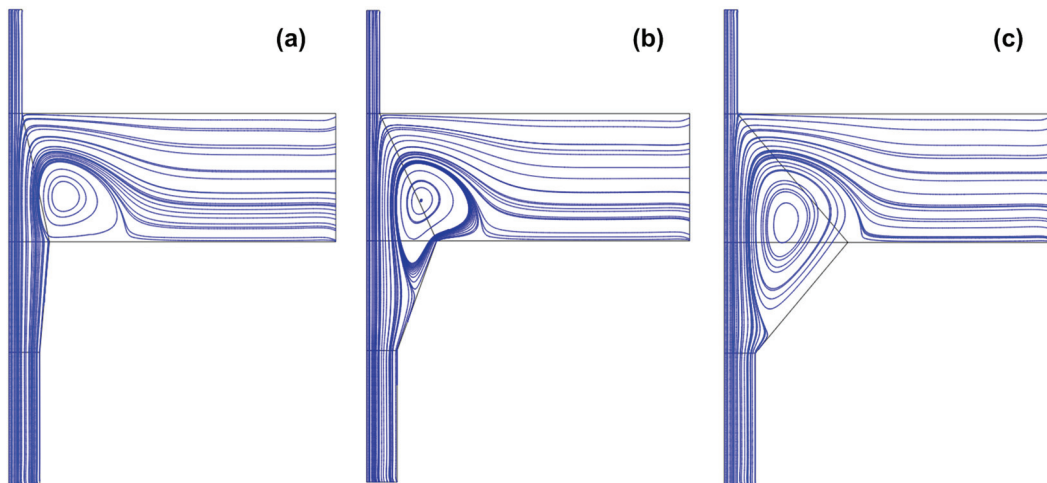


Fig. 8. Streamline patterns of coating liquids in double layer fiber coating process with converging angle of secondary coating die and auxiliary coating die: (a)  $\alpha = 5^\circ$ ; (b)  $\alpha = 20^\circ$ ; (c)  $\alpha = 40^\circ$  at fiber drawing speed of  $V_f = 40$  m/s.  $L_1 = 500$   $\mu\text{m}$  and  $L_2 = 600$   $\mu\text{m}$ .

을 대상으로 하여 2차 코팅다이의 직경과 길이가 코팅두께 형성에 미치는 영향을 Fig. 6과 Fig. 7에서 분석하였다. 일단 여기서도 2차 코팅다이 직경 및 길이 변경이 점성소산 고려 유무에 상관없이 1차 코팅두께에는 별다른 영향을 발휘하지 않고 있다.

Fig. 6에서 관찰되는 바처럼 2차 코팅다이의 직경은 2차 코팅두께 형성에 매우 큰 영향성을 보이는데, 실제 현장

에서도 상정된 인출선속에 맞추어 코팅다이의 직경을 먼저 결정하여 코팅장치를 설계 및 제작하며, 정밀한 코팅두께 조정은 연선시스템 운영 시 해당 코팅액 공급압력의 미세적 조절을 통하여 구현함이 일반적이다[14]. 이러한 경향성에 비하여 Fig. 7에서 보는 바처럼 2차 코팅다이의 길이 변경에 따른 2차 코팅두께의 변화는 매우 작음이 관찰된다.



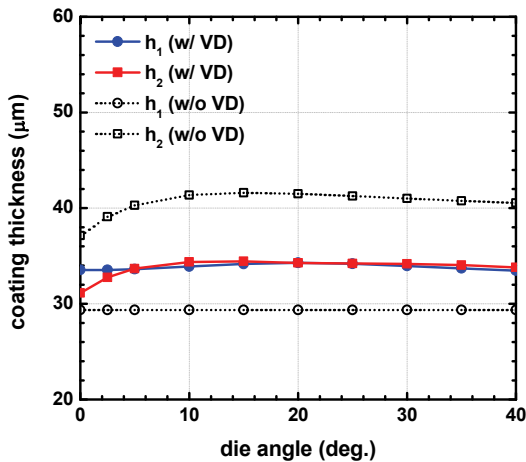


Fig. 9. The effects of converging die angle ( $\alpha$ ) in secondary coating die on primary and secondary coating thicknesses with and without viscous dissipation for the case of auxiliary coating die.  $V_f = 40$  m/s.  $L_1 = 500$   $\mu$ m and  $L_2 = 600$   $\mu$ m.

마지막으로 Fig. 1에 묘사된 경우처럼 축소형 코팅다이에 보조 코팅다이가 연결된 2차 코팅다이 설계형상을 대상으로 전산유동해석을 진행하였으며 그 결과가 Fig. 8 및 Fig. 9에 수록되어 있다. 적용된 각 다이 영역의 길이는 축소형 코팅다이  $L_1 = 500$   $\mu$ m 및 보조 코팅다이  $L_2 = 600$   $\mu$ m이며, 40 m/s의 인출선속을 대상으로 하였다. 여기서도 축소형 코팅다이의 수렴각을 0도에서 40도까지 변화시키며 전산해석을 진행하였다.

Fig. 8은 축소형 코팅다이 수렴각이 5, 20, 40도인 경우의 코팅액 유동선 분포를 보여주며, 수렴각이 증가하면서 코팅액 재순환영역이 조금씩 커지며 축소형 코팅다이 내로 침투하고 있다. 축소형 코팅다이 수렴각 변화가 1차 및 2차 코팅두께에 미치는 영향은 점성소산 고려 유무에 따라 Fig. 9에 정리되어 있다. 이를 보조 코팅다이가 없는 설계형상 해석결과인 Fig. 4와 비교하여 볼 때, 1차 코팅두께 뿐만 아니라 2차 코팅두께 역시 수렴각 변화의 영향이 상당히 적음을 볼 수 있다. 이를 종합하면 축소형 코팅다이에 보조 코팅다이를 결합한 형태의 코팅장치 설계개념이 안정적 코팅층 형성 측면에서 좀 더 유리함을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 공정연구는 폴리머 코팅액 전산열유동해석을 통하여 광섬유 연선제조시스템의 유리섬유 이중 액상코팅공정에 필요한 2차 코팅다이의 여러 설계제작 형상인자 영

향성을 분석하였다. 40 m/s의 고속 광섬유 인출조건을 대상으로 하여 축소형 코팅다이의 수렴각, 직경, 길이, 그리고 보조 코팅다이 포함 여부 등이 2차 코팅컵 내 코팅액의 재순환영역 형성 및 1차와 2차 코팅두께에 미치는 영향을 해석하였다. 축소형 코팅다이 수렴각은 20도 정도가 적합하며, 보조 코팅다이를 채용함이 안정적 코팅층 형성에 유리함을 확인하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 지원된 논문이다.

#### 참고문헌

1. Lee, B., "Review of the Present Status of Optical Fiber Sensors," *Optical Fiber Technology*, Vol. 9, pp. 57-79, 2003.
2. Koike, Y. and Ishigure, T., "High-Bandwidth Plastic Optical Fiber for Fiber to the Display," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 24, pp. 4541-4553, 2006.
3. Chellappan, K. V., Erden, E., and Urey, H., "Laser-Based Displays: A Review," *Applied Optics*, Vol. 49, pp. F79-F98, 2010.
4. Paek, U. C., "Free Drawing and Polymer Coating of Silica Glass Optical Fibers," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 121, pp. 1-15, 1999.
5. Schmid, S. R. and Toussaint, A. F., "Optical Fiber Coatings," Mendez, A. and Morse, T. F. (eds.), *Specialty Optical Fibers Handbook*, Academic Press, pp. 95-122, 2007.
6. Kim, K., Kwak, H. S., Park, S. H., and Lee, Y. S., "Theoretical Prediction on Double-Layer Coating in Wet-on-Wet Optical Fiber Coating Process," *Journal of Coatings Technology and Research*, Vol. 8, pp.35-44, 2011.
7. Sakaguchi, S. and Kimura, T., "High-Speed Drawing of Optical Fibers with Pressurized Coating," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. LT-3, pp. 669-673, 1985.
8. Yang, A., Tao, X. M., and Cheng, X. Y., "Prediction of Fiber Coating Via Liquid-Phase Process," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 202, pp. 365-373, 2008.
9. Yoo, S. Y. and Jaluria, Y., "Isothermal Flow in an Optical Fiber Coating Applicator and Die System," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 24, pp. 449-463, 2006.
10. Yoo, S. Y. and Jaluria, Y., "Fluid Flow and Heat Transfer in an Optical Fiber Coating Process," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 1176-

- 1185, 2007.
11. Park, S., Kim, K., and Kwak, H. S., "Effects of Convergent Angle of Nozzle Contraction on High-Speed Optical Coating Flow," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol. 21, pp. 11-18, 2016.
  12. Khan, Z., Islam, S., Shah, R. A., and Khan, I., "Flow and Heat Transfer of Two Immiscible Fluids in Double-Layer Optical Fiber Coating," *Journal of Coatings Technology and Research*, Vol. 13, pp. 1055-1063, 2016.
  13. Kim, K. and Park, J. Y., "Analysis of Coating Flow Characteristics in Wet-on-Wet Optical Fiber Liquid Coating Process," *Journal of the Semiconductor and Display Technology*, Vol. 16, pp. 91-96, 2017.
  14. Kim, K. and Park, J. Y., "Parametric Investigation of Double Layer Liquid Coating Process with Viscous Dissipation in Optical Fiber Mass Manufacturing System," *Journal of the Semiconductor and Display Technology*, Vol. 17, pp. 80-85, 2018.
  15. Back, S. K., Jang, S. H., and Cho, U. R., "Synthesis of Hard Coating Solution for Plastic Display Plate," *Journal of the Semiconductor and Display Technology*, Vol. 16, pp. 45-51, 2017.
  16. DSM Desotech, *Desolite Fiber Coatings Product Data*, Desolite DP-1004 and DS-2015, 2009.
- 
- 접수일: 2019년 8월 8일, 심사일: 2019년 9월 17일,  
게재확정일: 2019년 9월 23일