

광섬유 피복 장치 내의 피복재 유동 해석

An Analysis of Flows of Coating Materials in an Optical Fiber Coating Applicator

박태상¹⁾, 서정수¹⁾

Tae Sang Park, Jung-Soo Suh

Axisymmetric flows in an optical fiber coating applicator were computed by using structured finite volume solver FLUENT. The numerical computations were performed for various draw speeds from 900m/min to 1,200m/min. The physical phenomena in the coating applicator is the main topic of this paper. The results of the simulations covering streamline, pressure, temperature, and fluid-fluid interface are shown in this paper.

1. 서론

1970년대 초에 발명된 이후로, 광섬유의 사용량과 수요는 놀라운 속도로 증가해왔다. 오늘날 광섬유의 사용 분야는 매우 많다. 가장 일반적인 분야는 통신, 의학, 군사, 자동차, 공업 등을 들 수 있다. 통신에서의 사용 범위는 전세계적 통신망부터 지역 전화 교환국, 전화 가입자의 집과 데스크탑 컴퓨터까지 광범위하다. 이는 음성, 자료, 영상등의 송신을 담당한다. 통신 이외에도 광섬유의 이용 범위는 다양하다. 의학에서는 특수 살균된 광섬유 케이블이 빛을 비추거나 해당 부위를 직접 보면서 수술해야 하는 경우에 영상을 송신하는 데에 이용되며 신체의 내부를 보기 위해서 이용될 수도 있다. 군사 분야에서는 특수 피복한 광섬유가 유도과 목표 추적을 위해 미사일에 연결된다. 자동차에서도 전조등이나 미등에서 나오는 빛을 계기판에 직접 연결시켜 운전자가 그 작동 여부를 알도록 할 수 있다. 이외에도 항공기 제어나 기기, 선박 교신, 광섬유 회전의(gyroscope)등에 이용될 수 있다. 1997년 현재 전세계의 광섬유 제조량은 연간 약 4천만 킬로미터로 추정되며 앞으로 더욱 늘어날 것으로 보인다. 삼성 역시 광섬유를 제조, 수출하고 있는데, 시장 점유율을 높이기 위해서는 제조 설비의 도입과 더불어 기존 설비의 생산성 향상이 중요하다. 광섬유의 제조 공정은 크게 모재(preform) 제조 공정과 인출 공정으로 나눌 수 있는데, 이중 광섬유 인출 공정의 속도는 현재 분당 900미터로서 선진사에 비해 떨어지고 있다. 이를 선진사 수준인 분당 1,200미터 수준까지 끌어올리기 위해서는 인출 공정에 관계된 물리적 현상들을 파악하고 궁극적으로는 인출 설비의 자체 설계 능력까지 갖추어야 할 것으로 보인다. 인출 공정은 모재를 녹여 광섬유를 만들고, 그 직경을 측정한다. 다음, 피복 장치를 거쳐 피복 품질을 검사하고, 최종적으로 스푼(spool)에 감기는 일련의 과정을 거치는데, 본 연구에서는 이중 광섬유 피복 장치 내부의 1차 및 2차 피복 재료의 유동 및 온도 분포를 수치 해석을 통해 알아본다.

피복재의 유동에 관한 선행 연구를 살펴보면 1979년 Paek과 Schroeder[1]가 원뿔 형태의 피복 장치를 이용한 광섬유 피복에 관한 수학적 해석과 실험을 하였고, 1981년에는 역시 Paek과 Schroeder[2]가 초속 5m/sec로 인출되는 광섬유 인출탑의 피복 장치에 대한 실험 및 해석을 수행하였다. 1982년에는 Chida, et al.[3]이 가압 피복 장치를 이용한 광섬유의 고속 피복에 관한 실험을 수행하였고, 1986년에는 전선 피복에 관한 유한 요소 해석을 Mitsoulis[4]가 수행하였다. 그리고 Lyttikainen[5]은 피복 재료의 높은 점성에 따른 점성 소산을 고려한 피복 장치 내부 유동 및 온도 분포 해석을 상용코드 FIDAP을 이용하여 수행한 바 있다. 한편 광섬유의 기계적, 화학적 마멸, 정적 피로 파괴, 미소 굽힘(microbending)에 의한 신호 감쇠를 방지하기 위해서는 단층의 피복으로는 이를 모두 만족하기 어렵기 때문에, 현재는 두가지 성질이 다른 물질을 복층으로 피복하는 방법을 널리 사용하고 있다. 복층 피복법에는 내층 피복재가 경화된 후 외층 피복을 하는 WOD(Wet-On-Dry) 방식과 동시에 피복하고 경화시키는 WOW(Wet-On-Wet) 방식이 있는데, 삼성에서는 현재 WOW 방식을 채택하고 있다. 이 WOW(Wet-On-Wet)방식에 대한 수치 해석

¹⁾ 삼성중합기술원 TCS센터 수퍼컴용용Lab.

은 필자가 아는 한에서는 아직 이루어진 바가 없다. WOW방식은 이종의 물질이 경계면을 이루며 서로 섞이지 않고 흐르기 때문에 이를 해석하기 위해서는 경계면을 추적할 수 있는 기법을 사용하여야 한다. 이러한 기법에는 와류법(vortex method), 경계 적분법(boundary integral method), 경계면 추적법(front tracking method), 투영법(projection method), VOF 방법(Volume Of Fluid method) 등이 있다. 이중 특히 VOF 방법이 그 적용상 용이성과 우수한 경계면 추적 능력 등의 이유로 널리 사용되고 있으며, 본 연구에서도 VOF 방법을 채택한 유동 해석 코드 "FLUENT"를 사용하여 수치 해석을 수행하였다.

2. 본론

2.1 해석 모델

해석대상인 광섬유 피복 장치는 그 대부분이 축대칭 구조를 이루고 있기 때문에 축대칭 유동으로 가정하여 해석을 수행하였다. 광섬유의 직경은 $125\mu\text{m}$, 피복장치 출구 직경은 $395\mu\text{m}$, 주피복관의 직경은 4 mm이다.

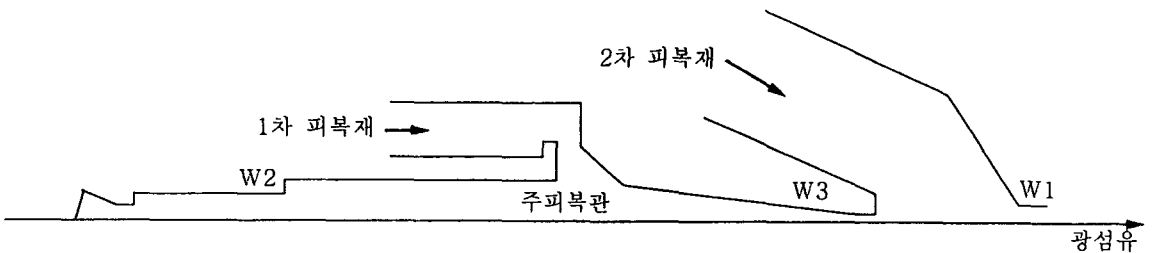


그림 1. 광섬유 피복 장치 (축대칭)

2.2 지배방정식 및 상태량

지배 방정식으로는 비압축성 연속 방정식과 운동량 방정식, 점성 소산을 고려한 에너지 방정식, 그리고 VOF 모델 방정식을 사용하였다. 방정식의 자세한 내용은 참고문헌[6]을 참조하기 바란다. 피복재의 점도가 크고, 피복 장치의 직경이 작기 때문에 층류 유동으로 가정하였다. 밀도는 1차 피복재 $1,010\text{kg/m}^3$, 2차 피복재 $1,120\text{kg/m}^3$, 열전도율은 1,2차 피복재 모두 0.176 W/mK 이고, 표면 장력은 1차 피복재 33 dyne/cm , 2차 피복재 37 dyne/cm 이다. 비열은 다음식으로 주어진다.

$$c_{p1}(J/kgK) = 1132.297 + 2.908591T(K)$$

$$c_{p2}(J/kgK) = 2234$$

점도역시 온도의 함수로 주어지며 다음과 같다.

$$\mu_1(Pa.s) = \exp(3.345258 - 5.6086801 \times 10^{-2} T(^{\circ}C))$$

$$\mu_2(Pa.s) = \exp(4.160654 - 9.0263344 \times 10^{-2} T(^{\circ}C))$$

2.3. 경계조건 및 격자계

피복재 입구 조건은 피복에 필요한 유량으로부터 계산한 속도를 고정시키는 속도 경계조건을 주었고, 입구 온도는 1차 피복재는 40°C , 2차 피복재는 45°C 이다. 광섬유의 표면 온도는 25°C 로 일정하다고 가정하였다. 'W1'으로 표시된 벽은 2차 피복재와 같은 온도로 고정하고 나머지 벽면은 모두 단열 조건을 주었다. 총 격자수는 481×127 개이다.

2.4. 계산결과

그림 2는 유선의 형태를 보여준다. 1차 피복재와 2차 피복재 공히 재순환 영역을 보이고 있다. 특히 1차 피복재의 재순환 영역은 주피복관 전체에 걸쳐 길게 형성된다. 피복 장치의 내부 구조가 공정상의 어려움 때문에 많은 모서리(corner)를 가지고 있지만 점도가 높기 때문에 특별한 유동의 불안정 현상은 보이지 않고 있다. 인출 속도를 900 m/min에서 1,200 m/min으로 증가시켜도 유동 형태의 특별한 변화는 보이지 않는다. 그림 3은 압력 분포를 나타내고 있다. 테이퍼진 부분의 끝단에서 가장 높은 압력이 형성되며, 이는 바로 광섬유가 중심축에서 벗어나지 않도록 해주는 중심력(centering force)이 된다. 그림 4는 온도 분포를 나타내고 있다. 1차 피복재의 온도는 점성 소산으로 높아진 반면 2차 피복재의 온도는 거의 변화가 없는데 이는 2차 피복재의 속도 구배가 상대적으로 작고, 또 서로 섞이지 않기 때문에 1차 피복재로부터의 열전달은 오직 전도로만 이루어지는데 이 전도 계수가 매우 작기 때문이다. 따라서 2차 피복재의 냉각을 위해 출구 부분 다이(W1)에 냉각 장치를 설치할 필요는 없다고 판단된다. 그림 5는 피복 장치 출구 부분의 계면 상태를 보여준다. 계면 윗쪽에 존재하는 2차 피복재의 재순환 영역으로 말미암아 1차 피복재가 흐르는 단면적이 줄어들다가 다시 늘어나는 구조를 보인다. 그림 6은 인출 속도를 1,200 m/min으로 증가시켰을 경우로 계면의 형태는 변하지 않으나 1차 피복재가 흐르는 단면적이 약간 증가하는데 이는 속도가 증가함에 따라 2차 피복재 재순환 영역의 밑부분이 조금 더 평평해지기 때문으로 풀이된다. 그림 7은 2차 피복재의 입구 온도를 달리하였을 때의 피복 장치 출구 부분의 계면 형태를 보여주고 있다. 2차 피복재의 입구 온도를 30°C로 낮추었을 때, 피복재 간의 점도차로 말미암아 유동의 불안정성이 발생하였고 따라서 정상상태로 수렴하지 않았다.

3. 결론

본 연구실에서 보유하고 있는 경계 부착 좌표계의 정렬 격자계의 상용 S/W Fluent를 사용하여 광섬유 피복 장치 내 유동 해석을 수행하였다. 피복재의 높은 압력으로 중심력을 주는 부분을 확인할 수 있었고, 큰 점도와 낮은 열전도계수로 말미암아 1차 피복재의 온도가 크게 올라감을 확인할 수 있었다. 또한 2차 피복재의 온도를 30°C 정도로 낮출 경우 피복재간의 큰 점도차가 계면의 불안정성을 유발함을 알 수 있었다. 인출 속도를 1,200m/min으로 증가시켜 해석을 수행한 결과 현재의 피복 장치로도 안정한 피복이 이루어질 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] U. C. Paek and C. M. Schroeder, "Coating of Optical Fibers with a Conical Shape Applicator", *Fiber and Integrated Optics*, Vol.2, No.3-4, pp.287-298. 1979
- [2] U. C. Paek and C. M. Schroeder, "High Speed Coating of Optical Fibers with UV Curable Materials at a Rate of Greater Than 5m/sec", *Applied Optics*, Vol.20, No.23, pp.4028-4034, Dec. 1981
- [3] K. Chida, S. Sakaguchi, M. Wagatsuma, and T. Kimura, "High-Speed Coating of Optical Fibers with Thermally Curable Silicone Resin Using a Pressurised Die", *Electronic Letters*, Vol.13, No.16, pp.713-715, Aug. 1982
- [4] E. Mitsoulis, "Finite Element Analysis of Wire Coating", *Polymer Engineering and Science*, Vol.26, No.2, pp.171-186, Jan. 1986
- [5] K. J. Lyttikainen, "Numerical Simulation of Optical Fiber Coating Process"
- [6] FLUENT 4.4 User's Guide Volume 4, 1997

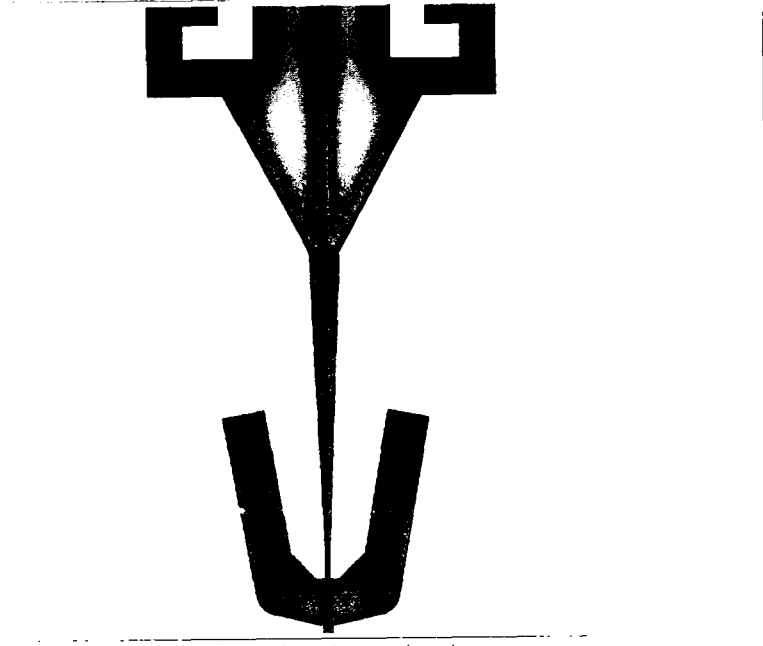
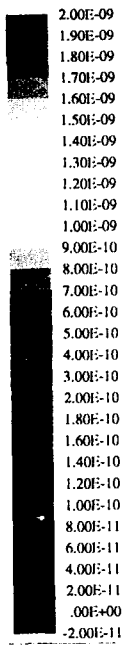


그림 2. 유선 분포 (900m/min)

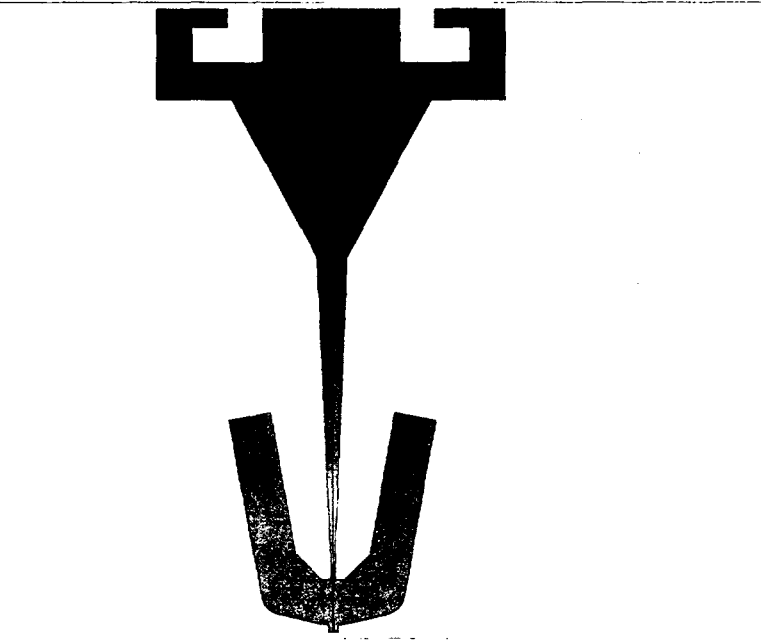
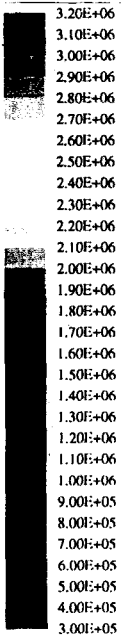


그림 3. 압력 분포 (900m/min)

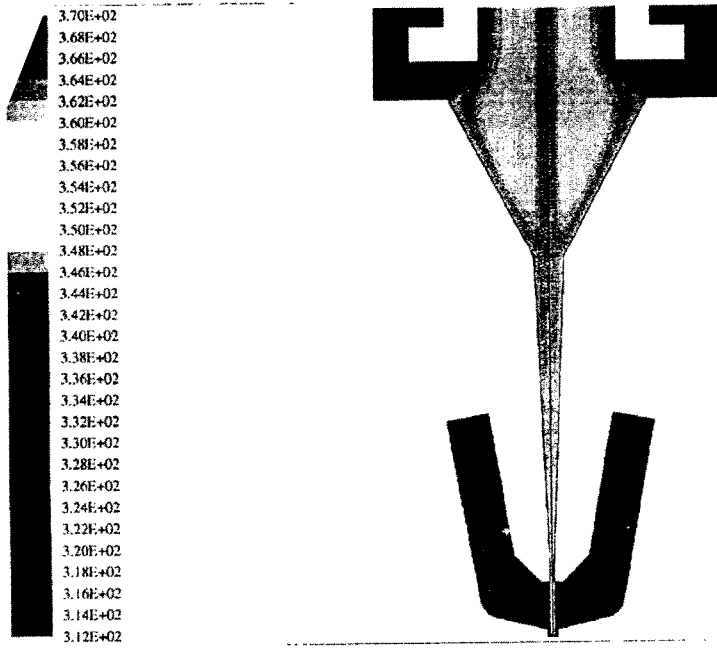


그림 4. 온도 분포 (900m/min)

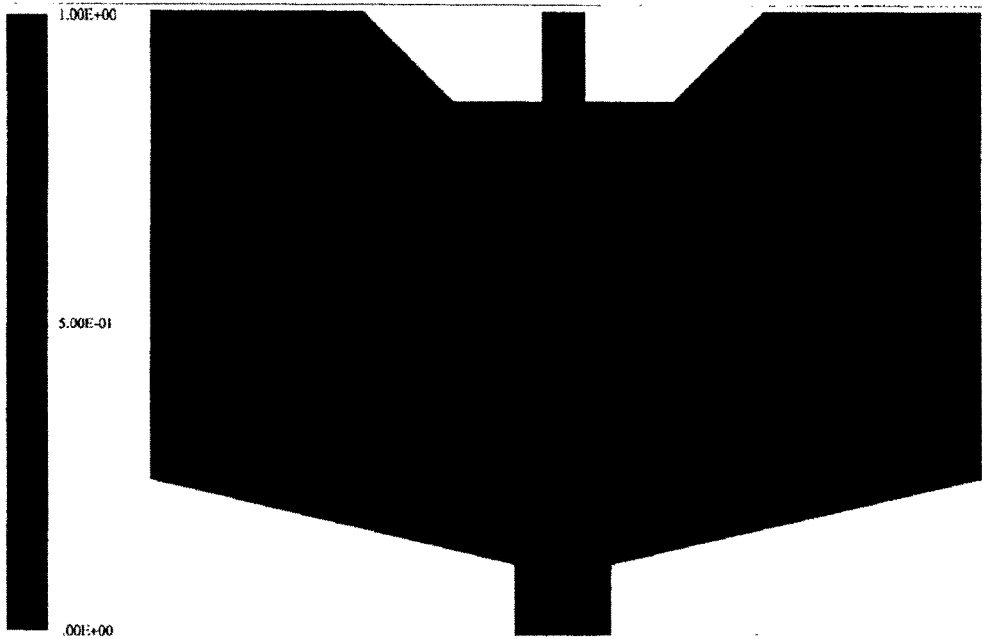


그림 5. 체적률 (900m/min)

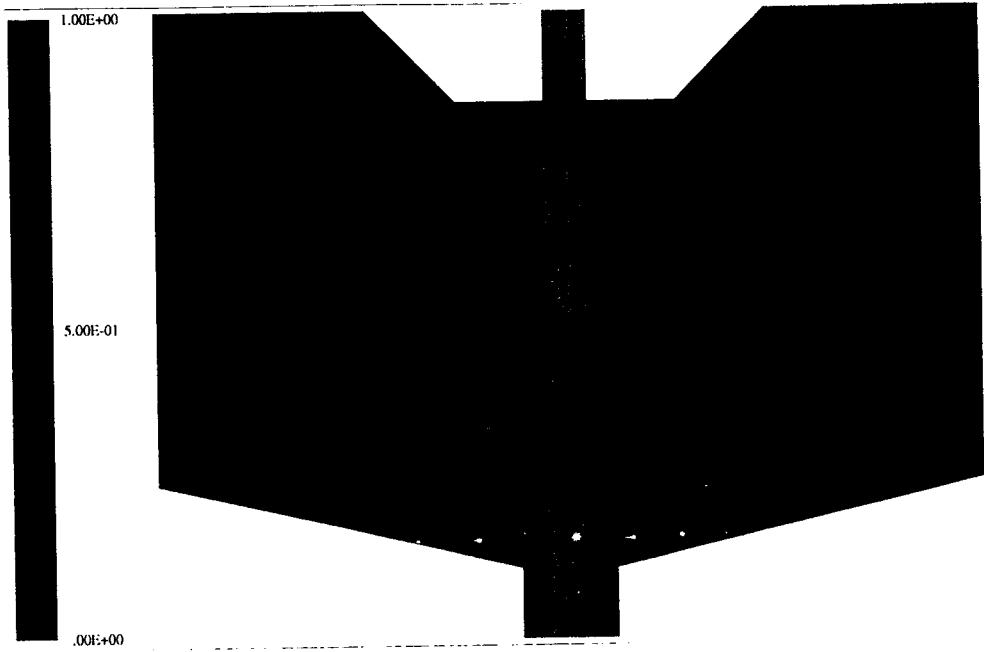


그림 6. 체적률 (1,200m/min)

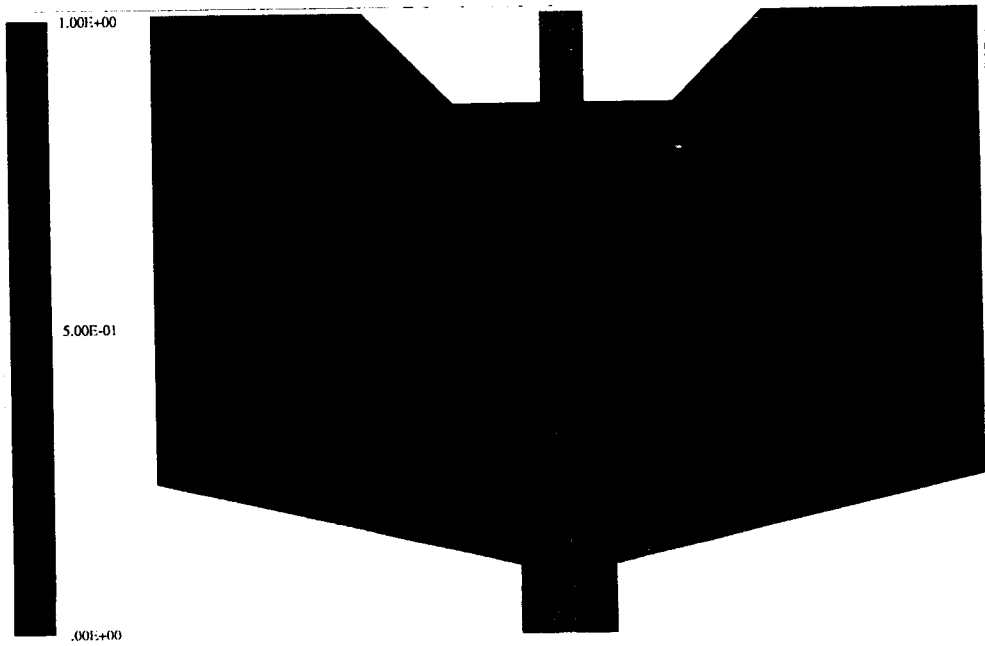


그림 7. 체적률 (900m/min, 2차 피복재 30°C)