

## 자동 격자 생성 기법을 이용한 평면 유리 공정 수치해석

김시조, 임경훈  
안동대학교 기계공학부

### Numerical Simulation for Glass Sheet Forming with Auto-Remeshing

See Jo Kim, Kyung Hoon Lim  
Department of Mechanical Engineering, Andong National University,  
Andong, Kyungbuk 760-749, Korea

#### 1. 서론

TFT-LCD와 PDP는 영상을 출력하는 방식은 다르지만 두 가지 모두 표면이 고른 얇은 유리를 사용한다. 하지만 화면의 크기를 크게하기위해서 얇고 큰 유리가 필수적이다. 이런 유리를 생산하는 전통적인 overflow 장비에서 flow rate는 유리가 trough를 따라 진행함에 따라 마찰과 다른 유동저항에 때문에 증가할 뿐만 아니라 각각의 trough lip을 흐르는 유동은 그 크기를 따라가면서 감소한다. 따라서 lips 위를 흐르는 고르지 못한 overflow rate가 발생할 뿐만 아니라 lips위를 흐르는 glass의 overflowing의 높이는 trough의 크기에 따라 균등하지 못하게 된다. 이 문제를 해결하기위해 channel length를 따라 lips위를 일정한 flow rate를 유지하도록 수학적으로 정확하게 contoured bottom이 고안되었다[1].

본논문에서는 overflow 장비의 2차원 수치해석을 FEM을 이용하여 뉴턴,비뉴턴 유체에 대해서 유량에 따른 film두께(film thickness)를 계산하였다.

#### 2. 이론

##### 2.1 연속 방정식과 운동량 방정식

본논문에 사용된 유체에 대한 연속방정식과 운동량방정식은 각각 식(1),(2)와 같이 나타낼수 있으며 여기서  $g$ 는 중력가속도를 나타낸다..

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right) = -\nabla \cdot \underline{\underline{\sigma}} + \nabla \cdot \underline{\underline{\tau}} + \rho g \quad (2)$$

##### 2.2. 멱 법칙(truncated power-law model)

본 연구에서 점성 법칙은 멱법칙(truncated power-law model)을 적용하였다.

$$\mu(\dot{\gamma}) = K \dot{\gamma}^{n-1} \quad (3)$$

##### 2.3 필름 두께계산

전체유량  $Q$ 는 단위길이당 유량이고 양쪽으로 나누어져 흐른다. 또한 film두께는

다음과 같이 계산된다. 뉴턴유체의 경우 이론적 film 두께  $\delta'$ 은 다음과 같이 주어진다[2].

$$\delta' = \left\{ \frac{3\mu Q}{2\rho g} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

여기서  $\mu$ 는 유리의 점도이고  $\rho$ 는 밀도이다.

오차를 수치해석값과 이론값과의 차로 정의한다. 즉

$$e = \delta_{simulation} - \delta'_{theory} \quad (5)$$

### 2.3. 경계조건

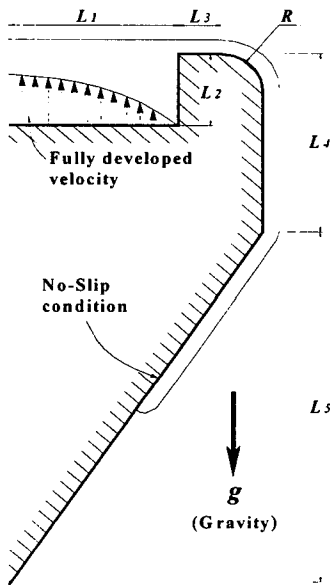


Fig.1은 본 수치계산에서 이용된 계산영역과 계산조건을 나타낸것이다. 유체는 trough를 다 채운후 trough lip 양쪽으로 넘쳐흘려 벽을 타고 천천히 아래로 흘러내리게 된다. 완전히 발달된 속도분포의 입구조건을 적용하였다. 유체 장비사이에는 비 미끄럼 조건(No-slip)을 적용하였다. 계산에 사용된 모든 단위는 cgs 단위이며  $L_1=8, L_2=4, L_3=2, L_4=10, L_5=20, R=2$ 이다.  $\mu=10000, \rho=2.54, g=980$ 이다.

뉴턴 유체인 경우 유량을 변화시켜가면서 film 두께를 해석 하였고 비뉴턴유체인 경우 유량을 일정하게 하고 먹지수를 변화시켜 가면서 해석을 수행하였다. 중력장에 의한 자유경계면 추적은 자동격자 생성기법을 도입 하여 해석하였다[3]

Fig.1 Schematic diagram describing the geometry and boundary condition.

### 3. 결과 및 고찰

본 수치모사에서는 유턴유체인 경우 유량을 0.1, 0.19, 0.3, 0.39, 0.49로 하였으며 유량에 따른 이론 두께는 식(4)를 이용하여 계산하면 표1과 같다.

Table 1. Theoretical film thickness as a function of the flow rate.

유량(Q)	0.1	0.19	0.3	0.39	0.49
film 두께( $\delta'$ )	0.8447	1.0462	1.2182	1.3230	1.4346

Fig.2는 유량이 0.1일때 뉴턴유체가 시간에 따라서 자동격자 생성기법에 의해 재구성된 메쉬결과를 나타낸다. 이러한 자동격자 생성기법의 도입으로 유체의 자유경계면을 정확하게 측정할수 있으며 이로부터 유동해를 정확하게 구할수 있었다.

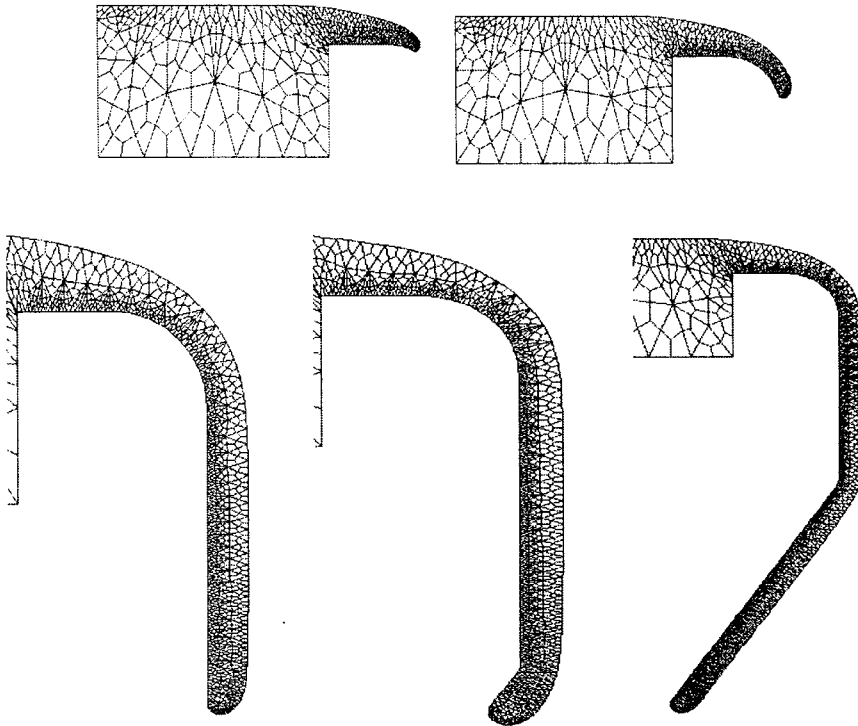


Fig. 2 Auto-remeshing of sheet forming with time-marching.

Fig.3는 뉴턴유체인 경우 각각의 유량에 대한 수치해석의 한 film 두께 그래프이다. 이론두께와 수치해석상의 두께 사이의 오차는 식(5)에 의해서 유량 0.1, 0.19, 0.3, 0.39, 0.49에 대해 각각 0.42mm, 0.477mm, 0.478mm, 0.529mm, 0.447mm로 나타나 전반적으로 약간 두껍게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 유동이 일정한 두께로 나오지 않고 약간 불룩한 형상을 하는 것을 확인하였다.

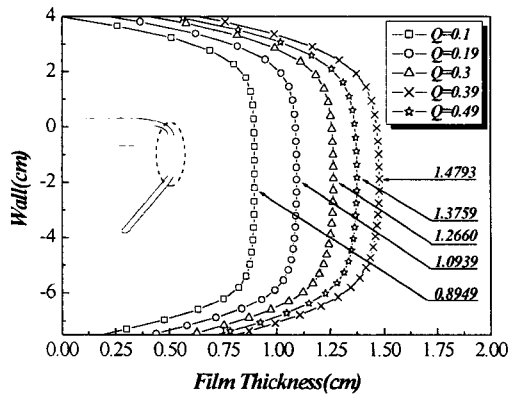


Fig.3 Film thickness distribution with respect to the flow rate in Newtonian fluid.

Fig. 4은 유입유량이 0.1일때 멱지수의 값의 변화에 대한 필름 두께 그래프이다. 멱지수의 값이 변함에 따라 film두께는 거의 변화없이 약 8.928mm의 값을 나타냄을 알수 있다.

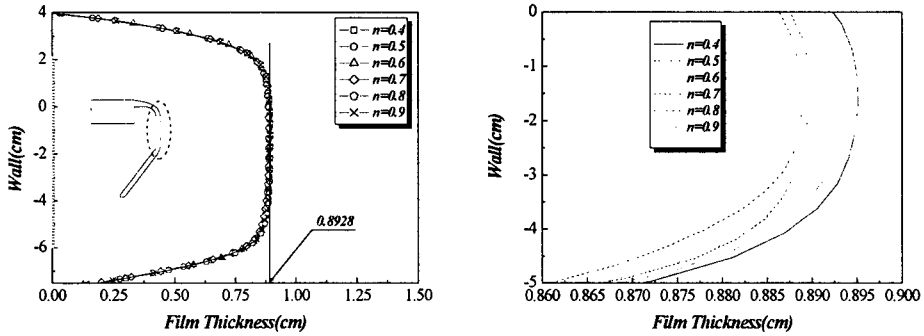


Fig.4 Film thickness distribution with respect to the power-law index( $n$ ) in non-Newtonian fluid.

#### 4. 후기

본 발표는 BK21사업의 지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

#### 5. 참고문헌

1. S. M. Dockerty, "Sheet Forming Apparatus", United States Patent Office, 3338696.
2. R.B. Bird, W.E. Stewart, and E.N. Lightfoot, "Transport Phenomena", Chap. 2, John Wiley & Sons, inc.
3. S.J. Kim and C.D. Han, "Finite element analysis of axisymmetric creeping motion of a deformation non-Newtonian drop in the entrance region of a cylindrical tube," J. Rheol. 45(6), Nov./Dec., pp.1279~1280 (2001).