

# 자기유변 연마공정에서 연마채널 내 점소성 유체의 유변학적 거동에 대한 모델링 연구

## A modeling study on the rheological behavior of viscoplastic fluids in the channel in the magnetorheological polishing process

\*김필기<sup>1</sup>, 정지현<sup>1</sup>, 배상현<sup>1</sup>, #석종원<sup>2</sup>

\*Pilkee Kim<sup>1</sup>, Jeehyun Jung<sup>1</sup>, Sanghyun Bae<sup>1</sup>, #Jongwon Seok (seokj@cau.ac.kr)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>중앙대학교 기계공학부 대학원, <sup>2</sup>중앙대학교 기계공학부

Key words : Magnetorheological fluid, Viscoplastic fluid, Bi-viscosity model, Navier slip model

### 1. 서론

최근 바이오, 나노, 정보저장관련 기술이 급속도로 발전함에 따라, 초정밀/초미세 부품 표면의 선택적 3 차원 연마를 위하여 자기유변 연마공정이 각광받고 있다. 자기유변 유체는 대표적인 점소성 물질 중 하나로써, 이의 유변학적 특성은 외부 자기장에 크게 의존한다. 빙햄 모델에서, 항복 이전의 점소성 유체는 변형이 불가능한 고체 (Rigid solid)로, 항복 이후에는 뉴톤 유체 (Newtonian fluid)로 취급된다. 이러한 빙햄 모델은 다소 이상화된 모델로써, 'squeezing flow paradox'[1]를 야기하는 것으로 잘 알려져 있다. 본 연구에서는, 자기유변 연마공정의 마찰/마모 메커니즘을 유체역학적 관점에서 고찰하기 위하여, biviscosity model 을 바탕으로 한 점소성 유체의 채널 유동에 대한 해석적 연구가 수행되었다.

### 2. MR fluid 의 채널유동

자기유변 연마공정에서, magnetic tool 과 workpiece 사이의 채널 형상은 Fig. 1 과 같이 주어지며, 채널의 높이 변화는 채널 길이에 비해 매우 작다.

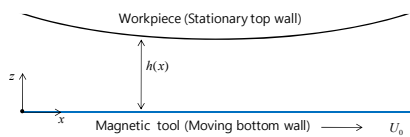


Fig. 1 Channel geometry in MR polishing process

중력 및 관성 효과를 무시하고, lubrication theory 를 적용하면서, 채널 내 MR 유체의 정상상태 유동은 다음과 같이 Reynolds 식으로

표현될 수 있다.

$$\frac{d\tau}{dz} = \frac{dp}{dx}, \quad \frac{\partial q_x}{\partial x} = 0, \quad q_x = \int_0^h u dz \quad (1)$$

여기에서,  $\tau$  는 전단응력,  $p$  는 압력,  $q_x$  는 단위체적당 유량,  $u$  는 유속을 의미한다. MR 유체의 구성방정식으로 사용된 biviscosity 모델[2]은 다음과 같이 표현된다.

$$\tau = \eta_1 \frac{du}{dz}, \quad |\tau| < \tau_y, \\ \tau = \eta_2 \frac{du}{dz} + \tau_y \left( 1 - \frac{\eta_2}{\eta_1} \right) \text{sgn} \left( \frac{du}{dz} \right), \quad |\tau| > \tau_y, \quad (2)$$

여기에서,  $\eta_1$  및  $\eta_2$  는 항복 전/후의 유체의 점성이며,  $\tau_y$  는 유사항복응력이다. 식 (2)에서와 같이, biviscosity 모델에서 항복 전의 점소성 유체는 빙햄 모델과 달리 고점성 유체로 취급된다 ( $\eta_2/\eta_1 \sim O(10^3)$ ). Navier slip model 을 도입하면서, 채널 벽면의 경계조건은 다음과 같이 주어진다.

$$u|_{z=0} = U_0, \quad u|_{z=h} = -\beta \tau_{zx}|_{z=h}, \quad (3)$$

여기에서,  $U_0$  는 아래 벽면의 이동속도이며,  $\beta$  는 슬립 계수이다. 식 (4)에 주어진 무차원수들이 식 (1)-(3)에 도입되었으며, 이 후의 모든 식에서 틸드 기호는 편의상 생략된다.

$$\tilde{x} = \frac{x}{h^*}, \quad \tilde{z} = \frac{z}{h^*}, \quad \tilde{\tau} = \frac{\tau h^*}{\eta_2 U^*}, \quad \tilde{u} = \frac{u}{U^*}, \quad \tilde{p} = \frac{p h^*}{\eta_2 U^*}, \quad \tilde{\beta} = \frac{\beta \eta_2}{h^*} \quad (4)$$

식 (1)과 (2)를 이용하면서, 점소성 유체의 해석해는 항복 전/후의 영역에서 다음과 같이 주어질 수 있다.

$$u = \frac{1}{2} \frac{dp}{dx} z^2 + \left( \tau_b - \text{sgn} \left( \frac{du}{dz} \right) \tau_0 \right) z + A_1, \quad |\tau| > \tau_y, \\ u = \frac{\varepsilon}{2} \frac{dp}{dx} z^2 + \varepsilon \tau_b z + A_2, \quad |\tau| < \tau_y, \quad (5)$$

여기에서,  $\tau_0 = \tau_b(1-\varepsilon)$ ,  $\varepsilon$ 은 점성비( $\eta_2/\eta_1$ )이며,  $\tau_b$ 는 아래 벽에서의 응력을 의미한다. 적분상수( $A_1, A_2$ )는 식 (3)의 경계조건과 유체 내 항복계면의  $C_1, C_2$  연속조건으로부터 결정될 수 있다. Bi-viscosity 유체의 유동 형태는 항복 전 영역의 분포에 따라, floating pseudo-core flow (Case I), upper pseudo-core flow (Case II), lower pseudo-core flow (Case III), pure shear flow (Case IV), pure pseudo-core flow (Case V)와 같이 총 5 가지로 나누어질 수 있다[3,4]. 각 유동형태에 따른 응력조건 그리고 채널 내 유동장은 Refs. [3,4]에 기술된 절차와 동일한 방법으로 구하여질 수 있다.

### 3. 결과

채널의 높이와 채널 내 압력이 일정한 경우,  $\tau_y$ 와  $U_0$ 는 잘 알려진 무차원수 Bingham number (Bn)와 Couette number (Co)를 의미한다. 평행판 채널에서의 점소성 유체의 Couette-Poiseuille flow는 Bn과 Co에 따라 다른 유동형태를 나타내는 것으로 잘 알려져 있다[5].

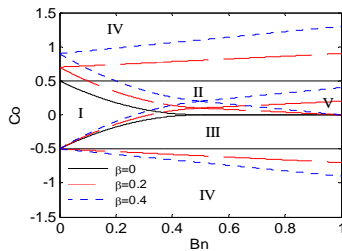


Fig. 2 Bn-Co diagram of the biviscosity fluid in the parallel channel:  $\varepsilon=0.001, \tau_y=1.374$

Fig. 2는  $\beta$ 에 따른 Bn-Co diagram의 변화를 나타낸 것이다. Case I은  $Bn < 0.5$ 인 경우에 발생 가능하며, 반대로 Case V는  $Bn > 0.5$ 인 경우에 발생한다. Bn-Co diagram에서 각 유동형태에 대한 경계선의 기울기는  $\beta$ 가 클수록 증가하는 경향을 나타낸다. 이는 workpiece 표면의 슬립이 증가함에 따라, Bn-Co diagram에서 유사코어를 갖는 유동에 대한 영역이 넓어지는 것을 의미한다. Fig. 3은 Fig. 1에 주어진 채널 내에 형성되는 유사코어 영역을  $\beta$ 에 따라 나타낸 것이다. 이 결과에서, 채널 입/출구단의 압력은 대기압으로 가정하였다. 채널 내 코어의 형성은 입/출구단

및 채널 중앙부분으로부터 발생하며, 슬립이 증가할수록 채널 내 코어영역이 넓어진다.

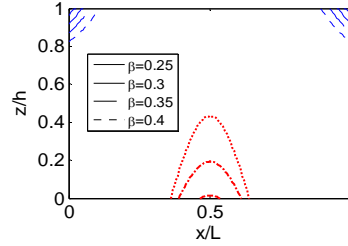


Fig. 3 Boundaries of the pseudo-core region in the channel:  $\varepsilon=0.001, \tau_y=1.374$

### 4. 결론

본 연구에서는 자기유변 연마공정의 연마채널 내의 유동을 고찰하기 위하여, 점소성 유체의 채널 유동에 대한 해석적 연구를 수행하였다. 이 과정에서, 구성방정식 및 슬립 모델로써, biviscosity 모델 및 Navier slip model이 각각 도입되었다. Bn-Co diagram과 채널 내 유동장 해석을 통하여, workpiece 표면의 슬립 정도에 따른 유사코어 형성조건과 채널 내 유사코어 형성 변화를 고찰하였다.

### 후기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임.(No. 2010-0028116)

### 참고문헌

1. Wilson, S.D.R., "Squeezing flow of a Bingham material," J. Non-Newtonian Fluid Mech., **47**, 211-219, 1993.
2. O'Donovan, E.J. and Tanner, R.I., "Numerical study of the Bingham squeeze film problem," J. Non-Newtonian Fluid Mech., **15**, 75-83, 1984.
3. Tichy, J.A., "Hydrodynamic lubrication theory for the Bingham plastic flow model," J. Rheol., **85**(4), 477-496, 1991.
4. Kim, P. and Seok, J., "Viscoplastic flow in slightly varying channels with wall slip pertaining to a magnetorheological (MR) polishing process," submitted to J. Non-Newtonian Fluid Mech.