

## 완전접촉 경계면 위의 박막유동 특성을 이용한 고점도 전단유동에 따른 표면응력 감소 설계<sup>§</sup>

박 부 성\* · 김 보 흥\*<sup>†</sup>

\* 울산대학교 기계공학부

### Design of Reduced Shear Stress with High-Viscosity Flow Using Characteristics of Thin Film Flow on Solid Surfaces

Boo Seong Park\* and Bo Hung Kim\*<sup>†</sup>

\* School of Mechanical Engineering, Univ. of Ulsan

(Received May 14, 2014 ; Revised July 19, 2014 ; Accepted July 21, 2014)

**Key Words:** Free Surface Flow(자유표면유동), Shear Stress Ratio(전단응력 비), Optimal Design(최적설계), Ejection Pattern(토출패턴)

**초록:** 회전원판 위 표면에 작용하는 유동 전단응력은 표면마모를 발생시키는 주원인이다. 유체는 원심력에 의해 가장자리까지 자유표면을 갖는 박막유동으로 전달된다. 표면마모는 받음각 또는 곡률에 따른 전단응력 정도에 비례하여 차이를 보이게 된다. 전산해석을 통한 속도분포 기울기로 받음각에 기준한 곡률의 전단응력비를 비교하였다. 곡률반경 변화에 따른 전단유동의 응력감소를 모델링하여 표면마모를 효율적으로 줄일 수 있는 최적구간을 결정하는 것이 본 연구의 주제이며, 이 연구결과는 회전무화나 박막코팅과 같은 박막유동을 활용하는 기구의 최적설계에 적용될 수 있다.

**Abstract:** The shear stress on a surface due to the thin film fluid flow is an important issue. In case of a rotating disk, the fluid is delivered to the edge of the disk by centrifugal force, which acts as a body force on the fluid. Wear of a surface is affected by the shear stress acting on the surface and curvature. In this study, we utilize computational fluid dynamics software to model the ratio of curvature and local shear stress on solid surfaces. The key goal of the study is to determine an optimized curvature for the thin film fluid flow on a solid surface in order to minimize the local shear stress affecting the wear of this surface. Our results on the effects of curvature will be utilized for the design of devices that utilize thin film fluid flow on a solid surface, such as rotating-disk spray systems and thin film coating.

- 기호설명 -

$a$  :  $x$  성분 가속도  
 $H$  : 자유경계면 유동 막 높이  
 $h$  :  $U$  에 도달하는 유동장 내 높이  
 $h^*$  : 기준에 대한  $h$  의 무차원  
 $q$  : 유량  
 $R$  : 곡률반경  
 $r^2$  : 선형상관계수

$U$  : 유동 평균속도  
 $u$  :  $x$  방향 속도  
 $u^*$  : 무차원  $u$  속도  
 $v$  :  $y$  방향 속도  
 $w$  :  $z$  방향 속도  
 $x$  : 평면에 정사영 되는 거리  
 $x$  : 표면 경계에 평행한 방향  
 $y$  : 표면 경계에 수직한 방향  
 $y^*$  : 무차원 유동장 높이  
 $z$  :  $x$  와  $y$  에 수직한 방향

<sup>§</sup> 이 논문은 2014년도 대한기계학회 유체공학부 춘계학술대회(2014. 5. 15.-16., 부산 해운대 한화콘도) 발표논문임.

<sup>†</sup> Corresponding Author, bohungk@ulsan.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

그리스문자

$\tau$  : 전단응력

- $\mu$  : 점성계수
- $\rho$  : 밀도
- $\theta$  : 표면각

하첨자

- c* : 받음
- decre.* : 감소량
- edge* : 경계면 가장자리
- ro.* : 원심
- ratio* : 28°받음각에 기준한 비율
- t* : 경계면 접선

1. 서론

자유표면 유동은 바다나 강 혹은 벽을 타고 흐르는 물줄기 등 생활에서 어렵지 않게 접할 수 있는 현상으로 표면 위에 벽과 같은 제약조건 없이 흐르는 유동을 자유표면 유동이라 한다. 자유표면 유동 중  $\mu m$  단위의 얇은 유동을 박막유동이라 하며, 이러한 유동은 열 및 물질전달 효율을 높여주어 강관의 냉각공정, 열교환기, 정밀화학이나 의약품 제조 등 산업분야에 용이하게 활용된다. 활용도가 높아짐에 따라 다양한 유동현상의 해석이 요구되어 격자방법의 Eulerian, 입자추적방법의 Lagrangian 그리고 두 방법을 혼합한 Arbitrary Lagrangian Eulerian 등 자유표면 유동의 수치해석 기법이 제안되었고 컴퓨터 성능 발전에 힘입어 정확한 예측을 위한 연구가 수행되고 있다.<sup>(1-4)</sup>

유동은 점성에 지배되어 경계면 상에 평행한 유동 마찰응력 즉, 전단응력이 작용하는 전단유동을 하게된다. 전단유동 해석은 경계면에 근접한 부분의 해석정도에 따라 예측이 달라지므로 경계면 주위를 다르게 표현하는 해석 모델을 제안하였고,<sup>(5,6)</sup> 액막유동 계면의 영향, 세류유동, 수직장애물 주위의 유동, 벽 근처 입자 부착성 등 전단유동의 다양한 현상 및 조건에 대한 연구가 되었다.<sup>(7-10)</sup> 최근에는 Kim 등<sup>(11)</sup>이 MD(Molecular Dynamic)code를 이용하여 표면과 유동분자의 친밀도(wettability)에 따른 전단응력간의 관계에 대한 분자단위 해석을 수행하여 연속체 해석으로 해결하지 못하는 부분에 대한 새로운 방법의 해석으로 관심을 끌고있다. 또한 혈관벽에 미치는 응력과 세포 손상의 관계, 혈소판 응착가능성 등 전단유동과 관계한 연구가 되었고,<sup>(12,13)</sup> Beerend 등<sup>(14)</sup>은 혈관의 곡률, 레이놀즈 수, 유량에 따른 관계식을 나타내면서 의학계

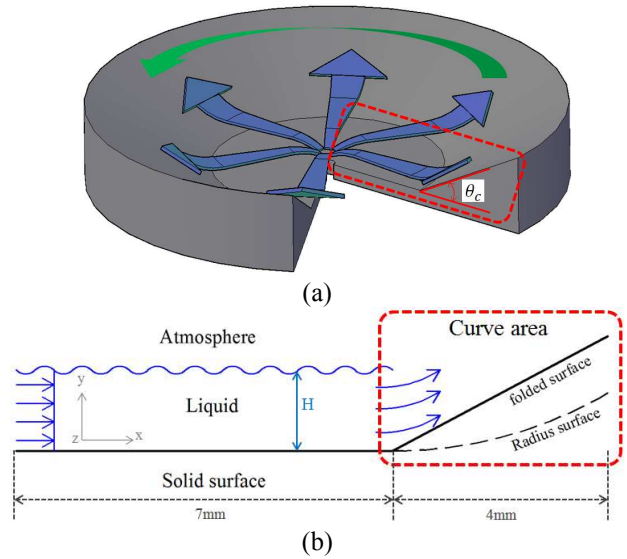


Fig. 1 Schematic description: (a) fluid flow on the rotary circular plane and (b) axisymmetric flow

에도 적용이 되고 있다.

임의영역의 전단유동을 측정하는 실험적인 방법으로 광학기기를 이용한 방법이 대중화되었다. 촬영된 내부 유동장을 curve fitting 한 속도분포에서 변형률에 따라 응력비교가 가능하며, 유동막 두께가 얇아짐에 따라 나타나는 간섭영상의 줄무늬 간격 또한 응력비교가 가능하다. 하지만 광학실험은 왜곡에 의한 오차가 커서 해석프로그램의 결과와 비교를 요하게 된다.<sup>(15-17)</sup>

전단응력은 표면마모를 일으키는 주원인으로 응력을 완전히 없애는 것은 불가능하므로 최대한 줄이도록 하는 최적설계를 통한 응력감소가 되어야 한다.<sup>(18,19)</sup> 최적설계는 변수의 다양한 변화로 최적화지점을 찾는 과정이지만 시험품을 모두 구현하여 실험하기에는 많은 노력이 든다. 임석현 등<sup>(20)</sup>은 실험으로 야기될 시행착오를 줄이기 위해 수학적 이론으로만 유도된 최적조건을 따르는 알고리즘으로 형상을 만들려고 했다. 그러나 실제로 산업에 적용되기에는 제약조건이 많고 이론적으로 도출된 예상결과와 다를 경우가 있어 단순화시킨 실제적인 조건에서 최적화가 되어야한다. 임유진 등<sup>(21)</sup>은 도로포장체의 전단변형 내구성을 개선하는 연구에서 실제 지반조건을 축소된 장비실험을 통해 전단응력비 개념을 도입하여 응력 개선비교를 하여 실용적 도입이 쉽게 이루어졌다.

본 연구는 평면 위를 흐르는 액체로부터 전달 방향을 바꿔주는 매개체에 대한 전단응력을 줄여 마모를 개선시키기 위한 연구이다. 매개체는 직선의 받음각 또는 곡률의 표면으로 형성되고 응력을 줄

Table 1 Operating condition

RPM	$q(cc/min)$	Surface characteristic
60000	400	No-slip

Table 2 Material properties

Temp.	$\rho(kg/m^3)$	$\mu(kg/m \cdot s)$	Flow state
15.6°C	912	0.38	incompressible

이기 위한 최적형상을 전단응력비로 비교하여 효율적인 개선효과를 위한 최적설계가 될 수 있도록 모델링 한다.<sup>(21-22)</sup> 기존 연구<sup>(14-17)</sup>에서는 관내부의 곡률에 따른 응력관계, 액막의 광학촬영으로 임의 영역의 응력을 측정하는 연구가 되었지만, 이번 연구에서는 전산유체해석 프로그램인 FLUENT 를 사용하여 곡률 및 임의영역에 따른 응력을 해석하여 비교하였다. 박막유동 특성을 이용한 곡률에 따른 전단응력비를 통해 표면마모를 효율적으로 줄일 수 있는 최적설계를 하여 산업에서 박막유동을 활용하는 분야에 적용이 유용하도록 하는 최적화 설계를 위한 방법을 제시하였다.

## 2. 최적설계

### 2.1 연구모델

본 연구의 대상이 되는 Fig. 1(a)는 회전형 원판으로 Table 1의 조건으로 중앙홀에서 Table 2의 액체가 공급된다. 액체의 유속은 원심가속에 의해 빨라지고 질량보존법칙으로 반경이 커질수록  $\mu m$  단위로 얇아지는 박막유동으로 전달된다. 가장자리로 갈수록 유속이 빨라지므로 액체의 표면점착 유지 및 전달방향의 전환을 위해 가장자리 부근의 표면은 받음각( $\theta_c$ )으로 형성된다. 점성에 따른 전단유동으로  $\theta_c$  표면은 평면보다 높은 전단응력( $\tau$ )을 받고 표면마모는 응력에 비례하여 가속된다. 물질은 점도가 비교적 높아 모든 표면에서  $Re < 5 \times 10^5$  을 만족하는 평판상 층류 유동을 이루고, 회전관성이 충분히 적용되어 Fig. 1(b)와 같이 완전접촉을 유지한 상태의 회전 중심 축에 대칭된 유동으로 정상화되었다고 두었다. 가장자리 곡선 (curve)영역에서 응력감소를 위해 곡률을 적용하고 기존  $\theta_c$  표면에 대한  $\tau$  를 비교한다.

### 2.2 해석방법

#### 2.2.1 지배방정식

본 연구모델에서 유동 물질은 회전관성이 충분히 전달된 상태에서 완전접촉을 유지하여 원판과

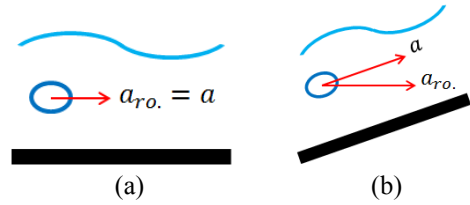


Fig. 2 Acceleration on the surface boundary

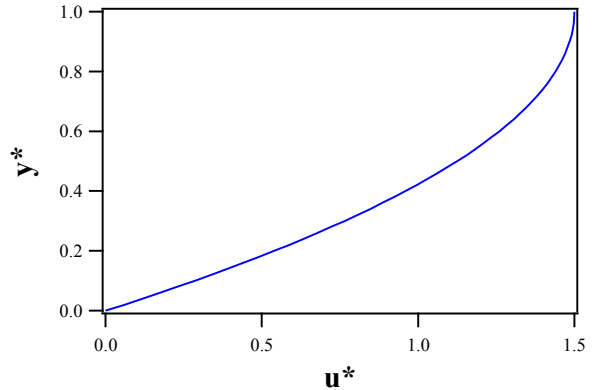


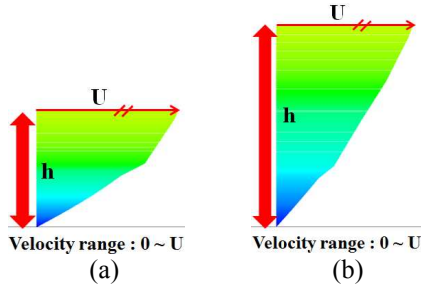
Fig. 3 Non-dimensional velocity profile within flow field

같이 회전하고 동시에 반경방향으로 원심력에 의해 가장자리까지 도달한다. 물질의 입자 시점에서 보면 Fig. 1(b)의 표면상에 평행한 방향인  $x$  방향으로만 이동되는 것으로 고려되고, 표면상에 수직인 방향인  $y$  방향으로 유동 높이가 형성되는 것으로 본다. 원판 위 모든 원주에 대해 고려하면 층류 및 정상상태 하에 동일한 형태의 유동으로 나타나기 때문에 회전 중심 축을 기준으로  $x$ - $y$  좌표면의 유동인 2 차원 해석이 축 대칭으로 되어, Fig. 1(b)가 모든 원주에 대한 유동현상을 대표한다.

Curve 영역의 응력해석을 위해 표면 위 유동 지배방정식으로 운동방정식과 Navier-Stokes 방정식을 두었다. 자유도에 따라 소거할 수 있는 성분들을 생각하면 가속도항으로부터  $x$  성분의 가속도  $a$  즉, 표면 경계상에 평행한 가속도를 표현한 식(1)이 되어 회전력에 의해 발생된 표면에 평행한 가속도가 유동 모멘텀으로 작용하게 된다. Fig. 2는 표면상  $a$ 의 관계를 나타낸 것으로 Fig. 2(a)인 경우는 평면상에서 순수 원심가속도가  $a$ 로 적용되는 것이고, Fig. 2(b)는 순수 원심가속도의 cosine 이 곡면에 평행한 가속도로  $a$ 가 적용되는 것을 보여주며, 본 해석에서는 곡면해석이므로 Fig. 2(b) 경우를 고려하게 된다. 경계면의 No-slip 조건과 자유경계 조건으로 유동장 속도분포는 식(2)로, 축 대칭으로 대표된  $x$ - $y$  좌표면의 유동 해석에서 표면으로부터 수직인 높이변화에 따른  $x$  방향 유속분포를 나타내는  $u(y)$ 로 표현된다. 표면 위 어떤 지점

Table 3 FLUENT setting materials

Material	$\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	$\mu(\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s})$
SAE30oil	912	0.38
Air	1.225	$1.7894e^{-5}$

Fig. 4 Comparison of shear stress corresponding to  $h$ 

에서도 식 (2)의 형태로 만족할 수 있는 무차원 유동장은 식 (3)으로 표현되고 그 분포는 Fig. 3 이 된다.  $y^*=0$  은 No-slip 조건으로  $u^*=0$  이며, 자유 경계면인  $y^*=1$ 에서는 저항이 거의 없으므로  $u^*$ 가 가장 크게 분포된다.  $u^*>1$ 는 유동 평균속도( $U$ )보다 커지는 것으로, 이는 접촉 경계면부위에서 소실된 유속에 대해 자유 경계면에서 상대적으로 큰 유속을 가짐으로써 질량보존이 만족되도록 하기 때문이다.<sup>(22,23)</sup>  $\tau$ 는  $y^*\approx 0$ 에서 소실된 유속에 따른 속도분포 기울기에 따라 크기가 달라지며 식 (4)로 표현된다.

$$a = -\frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

$$u(y) = -\frac{\rho a}{2\mu} y^2 + \frac{\rho a H}{\mu} y \quad (2)$$

$$u^* = -C(y^*)^2 + 2C(y^*), \quad u^* = \frac{u}{U}, \quad y^* = \frac{y}{H}, \quad C = \frac{\rho a H^2}{2\mu U} \quad (3)$$

$$\tau = \mu \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (4)$$

경계면 형상에 따라 달라지는  $\tau$ 는 유속-높이 변화율  $\partial u / \partial y$ 에 비례하며 Fig. 3 으로부터 비교적 선형분포를 보이는  $0 \leq u^* \leq 1$ 에서 비교할 수 있다.  $u^*=1$ 은 유동장 내 속도  $u$ 가 유동 평균속도  $U$ 와 일치한  $u=U$ 이며 이를 만족하는 표면 경계로부터의 높이는 Fig. 4 에서 유동장 내 높이( $h$ )로 본다.  $\tau$ 는 표면형상에 따라 달라지는 전단력으로 차이가 나므로 전단력이 클수록 낮은  $h$ 에서  $U$ 가 나타나므로, 유속-높이 변화율인  $U/h$ 에 의해 응력비교가 가능하다. Fig. 4 에서  $h$ 는 Fig. 4(a)가 작기 때문에  $\tau$ 는 Fig. 4(a)가 크다고 할 수 있다. 따라서  $\tau$ 는  $U/h$  관계로 결정되는 식 (5)로 표현

되고 전산유체해석을 통하여 도출된  $U/h$ 에서 응력감소 정도를 비교한다.

$$\tau \propto \frac{\partial u}{\partial y} \approx \frac{U}{h} \quad (5)$$

## 2.2.2 해석프로그램 구현

속도분포를 도출하기 위한 전산유체 해석프로그램으로 ANSYS FLUENT 14.5 를 사용하였다. 유동은 표면의 반경방향으로 전달되기 때문에 회전 중심 축에 대한 축 대칭 유동인 x-y 평면의 2 차원으로 단순화하여 계산시간을 줄였다. 완전발달유동이 되기 위해 계산영역은 평면과 곡면을 모두 시행했다. 해석모델은 자유표면을 만들어주기 위해 VOF(Volume of fluid) 법을 하였고 박막유동의 경우 Reynold 수의 characteristic length 크기가 아주 작으므로 낮은 Reynold 수로 인해 Laminar flow 이다. 상단 및 출구 경계면은 대기압 상태의 pressure outlet=0Pa 로 설정하고, 고체표면 경계는 회전 중심 축을 기준으로 회전 조건(60000rad/min) 및 No-slip 조건을 설정하였으며, 입구는 inlet velocity 3m/s 으로 설정했다. 고체표면에 근접한 mesh 는 표면길이의 1/100 배 내에서 inflation layer 를 10 으로 주어 벽 근처 유속분포 및 박막유동 해석 정도를 높였다. 물질은 Table 3 으로 사용하여 대기상태에서 SAE30oil 을 투입하였다. Continuity, x-velocity, y-velocity 의 수렴 정도는 각각  $9.31e^{-5}$ ,  $4.43e^{-6}$ ,  $2.12e^{-6}$  로 수치해석상 어려움 없었다.

## 2.3 최적화

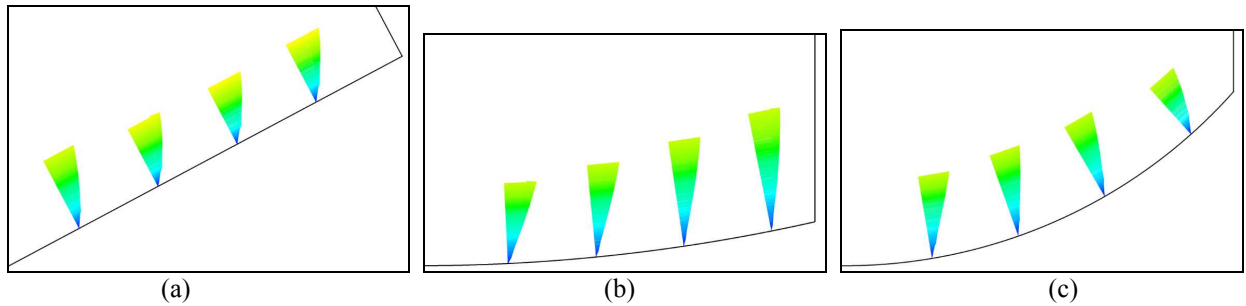
Fig. 5 는 FLUENT 로 구현된 curve 영역 형상에 따른 표면 위 임의지점의  $0 \leq u \leq U$  분포이며 Fig.5 (a)는 기존  $\theta_c = 28^\circ$  표면, Fig. 5(b)와 Fig. 5(c)는 각각 크고 작은 곡률반경( $R$ )에서 나타난 현상이다.  $h$ 는 표면형태 및  $x$ 에 따라 달라지므로, Fig. 6 에서 Fig. 5(a)의  $x$ 에 따른  $h$ 를 기준으로 무차원 된  $h^*$ 를 통해 각 표면형상에 따라 비교하였다.  $x$ 는 곡면 시작점으로부터 평면상에 정사영 되는 거리를 뜻하며,  $h^*$ 는  $\theta_c$ 보다는  $R$ 에서 증가함을 알 수 있다.  $x$ 가 커질수록 감소하거나 증가량이 떨어지는데 이는 표면 형상이 달라짐에 따라 전단력에 의한 응력이 달라지는 것으로 볼 수 있으며, 특정지점에서  $h^*$ 가 크면 작은 전단력을 받아 응력이 작은 것이고  $h^*$ 가 작으면 큰 전단력을 받아 응력이 큰 것으로 해석된다.

### 2.3.1 최대 최적곡률

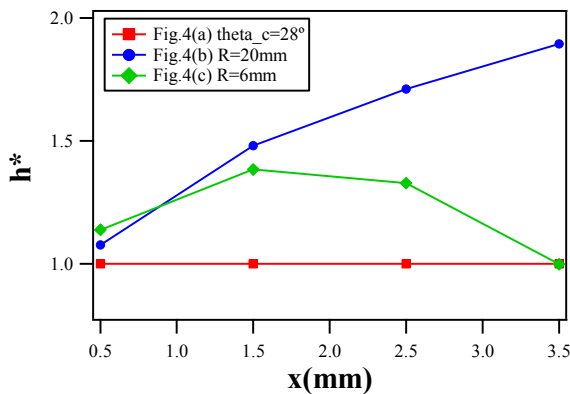
표면 형상에 따른 전체적인 응력비교를 하기 위

**Table 4** Linear correlation coefficient of  $\tau_{ratio,decre.}$

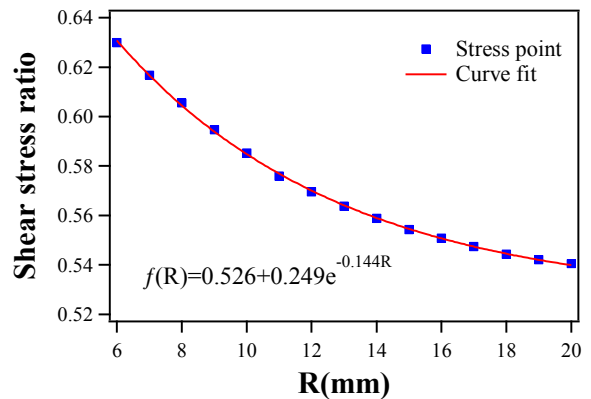
Range of $R$	7~8	7~9	7~10	7~11	7~12	7~13	7~14
$r^2$	1	0.998281	0.995888	0.992836	0.989142	0.984826	0.979913



**Fig. 5** Velocity profile (range:  $0 \sim U$ ) corresponding to boundary shape (a)  $\theta_c = 28^\circ$  (b)  $R = 20mm$  (c)  $R = 6mm$

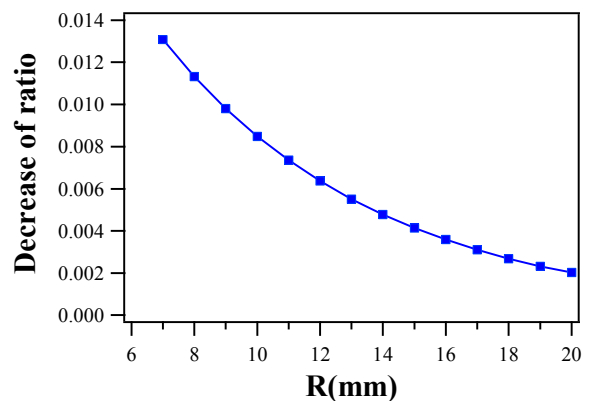


**Fig. 6** Comparison of  $h^*$  on the curved surface



**Fig. 7** Distribution of  $\tau_{ratio}$  corresponding to  $R$

해서는 Fig. 6 에서 보듯이 curve 영역의  $x$  에 따라  $h^*$  가 변하는 관계에서 적분한 값으로 취하여 기존 표면과 비교를 해야 한다. Fig. 7 은  $R$  에 따라 전체표면에서 적분된  $\tau_{ratio}$  변화를 나타내며  $\tau_{ratio}$  는 기존  $\theta_c = 28^\circ$  표면을 기준으로 한  $R$  변화에 따른 전단응력의 비를 말한다. Curve 영역길이가 4mm 이므로  $R < 4mm$  은 형상적으로 만족하지 않기 때문에  $R \geq 6mm$  에서 비교했다.  $\tau_{ratio}$  가 0.63 이하로 분포되어 곡률이  $\tau$  감소에 효과적인 것으로 보였다.  $\theta_c$  표면은 순간적인 경사가 되면서 전단력이 커지는데 반해 곡면은 점진적인 경사를 유도하여 전단력을 줄여준다.  $R$  이 작을수록  $\tau_{ratio}$  가 큰 것은 점진적 경사도가 증가하여 전단력이 크게 된 것이다.  $R$  이 증가할수록 응력은 감소하지만 감소량은 줄어드는 경향을 보인다.  $R$  의 증가는 평면에 가깝게 형성되는 것으로 상대적으로 작은  $R$  구간에서는 표면변화가 크지만 큰  $R$  구간에서는 표면변화가 미미하여  $\tau_{ratio}$  변화도 같이 줄어드는 경향을 가졌다. Fig. 7 의 분포를 Curve fit 하여



**Fig. 8** Decrease of shear stress ratio ( $\tau_{ratio,decre.}$ ) corresponding to  $R$

$R$  에 따른  $\tau_{ratio}$  감소의 효율적인 적용을 보기 위해 Curve fit 을 미분한  $\tau_{ratio}$  감소량( $\tau_{ratio,decre.}$ )을 Fig. 8 에 나타내어 최적설계를 위한 구간이 선정되도록 했다.  $R$  이 작을 때  $\tau_{ratio,decre.}$  가 상대적으로 큰 값을 보이지만  $R$  이 커질수록  $\tau_{ratio,decre.}$  는 낮아지는



Table 5 Decrease of  $\tau_{ratio}$  by  $R$  section

Section	Interval of $R$	Range of $R$	$\tau_{ratio,decre.}$
①	5	6~11	0.0501
②		11~16	0.0244

Table 6 Value of  $\tau_{ratio}$  within optimum  $R$  interval

$R$	8.5	9	10	11
$\tau_{ratio}$	0.600	0.595	0.585	0.576

경향을 보였다. 최적설계를 위해서는 최적화 변수 ( $R$ )에 따른 효과가 비교적 균일하게 적용이 되는 것이 중요하다. 하지만 Fig. 8에 나타나듯이 감소율을 자체가 균일하지 못하고 지속적으로 떨어지는 상태하에 최대한의 효율을 얻기 위해서는 감소율에 대한 선형상관관계에서 높은 값을 유지하는 것이 최적구간을 선정하기 위한 방법이 된다. Table 4에서 초기  $R$ 로부터  $R$  간격에 따른  $\tau_{ratio,decre.}$ 에 대한 선형상관관계를 구하였다. 선형상관계수( $r^2$ )가 0.99 이상이 되는 범위를 최적구간의 기준으로 지정하여  $R$  간격에서 7~11 되는 구간이 기준에 딱 맞도록 근접하였다. 따라서 최대효율을 나타내는 최적  $R$  구간을 6~11mm로 선정하고 최대 최적곡률값  $R_{max}$ 를 11mm로 설정하였다.  $R_{max}$ 를 기준으로 전후 구간의 동일한  $R$  증가량에 따른  $\tau_{ratio,decre.}$ 를 Table 5에서 비교하면 ①구간이 ②구간보다 2배 정도의 감소량을 보여 최적구간이  $\tau_{ratio}$  감소에 영향을 극대화하는 것을 보여준다. ②구간은  $\tau_{ratio}$ 가 더 낮은 분포를 보이지만  $\tau_{ratio,decre.}$ 가 ①구간만큼의 효과를 보이지 않고 또한,  $R$  값이 상대적으로 크기 때문에 평면에 거의 근사해지므로 고속 회전 표면에서 유동 점착성의 안정성을 확보하기 어려워진다. 따라서 최적  $R$  구간을 선정함으로써 효과적인 응력감소 및 점착 안정성을 얻을 수 있게 된다.

2.3.2 최소 최적곡률

곡률을 적용함으로써 표면  $\tau$ 가 감소함과 동시에 가장자리의 액체 토출 방향은 기존  $\theta_c$  표면과 차이를 보일 수 있다. 토출 방향은 가장자리 접선각( $\theta_{t,edge}$ )에 의존하고 이에 따라 토출 패턴이 좁거나 넓은 종모양 형태가 될 수 있다. 본 연구 대상이 도포 민감성이 높은 피도물에 사용될 경우 토출 패턴이 중요한 요소로 고려될 수 있어 기존의 토출 패턴을 유지하는 방법으로 최적설계에

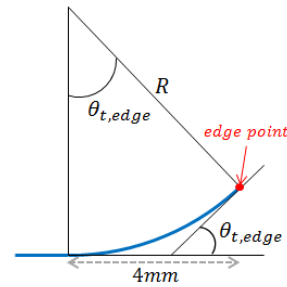


Fig. 9 Schematic description of tangential angle at edge

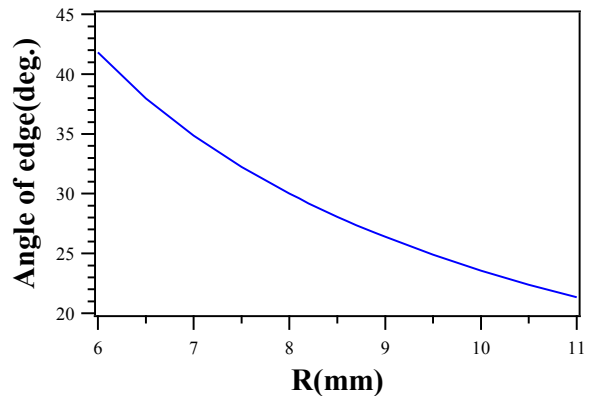


Fig. 10 Tangential angel of edge corresponding to  $R$

적용되어야 한다.  $\theta_c$  표면은 경계면 접선각( $\theta_t$ )과  $\theta_{t,edge}$ 가 같은  $\theta_c = \theta_t = \theta_{t,edge}$ 를 만족하지만, 곡률면의  $\theta_t$ 는 원판 반경에 따라 증가하다가 가장자리에서 최대치가 되어  $\theta_t \leq \theta_{t,edge}$  된다. 기존  $\theta_c = 28^\circ$ 의  $\theta_{t,edge}$ 과 곡률에서의  $\theta_{t,edge}$ 가 동일할 때 토출 패턴이 유지되므로, Fig. 9에서 경계면(파란색) edge point 지점의 접선각을 구하는 기하학적 관계를 통한 식 (6)으로  $R$ 에 따라  $\theta_{t,edge}$ 가 일치하는  $R$  값을 찾게 된다.

$$\theta_{t,edge} = \sin^{-1}\left(\frac{4}{R}\right) \tag{6}$$

Fig. 10에서  $R$ 에 따른  $\theta_{t,edge}$ 를 보여주며  $R$ 이 증가할수록 평면에 가까워지는 형상이 되므로  $\theta_{t,edge}$ 는 0에 수렴된다. 기존  $\theta_c = 28^\circ$  표면과 동일한  $\theta_{t,edge}$ 를 보이는  $R$ 은 8.5mm 이고, 이 값은  $\tau_{ratio}$  감소의 최대효과를 내는  $R$  구간에 속하였다. 토출 패턴을 고려한  $R$  값을 최적  $R$  구간의 최소 곡률값  $R_{min}$ 으로 설정하여 최대, 최소  $R$  사이의 최적설계에 의한 곡률을 선정한다. 최적  $R$  구간에서  $\tau$  감소로 인한 마모 저감효과 또는 피도물의 도포 민감성으로 인한 토출 패턴의 일치 중 중요한 요

인에 따라  $R$  을 선정한다. Table 6 은 최적  $R$  구간 사이에서  $\tau_{ratio}$  를 비교한 것으로 최고값과 최저값의 차이는 0.024 였다. 이는 기존  $\theta_c = 28^\circ$  의  $\tau$  기준으로 최적  $R$  구간 사이에서  $\tau$  는 2.4%의 미미한 차이를 보이는 것이다. 따라서 기존  $\theta_c$  표면으로부터 곡률이 적용됨으로써  $\tau$  감소에 확연한 효과를 보이지만 최적  $R$  구간에서는 효과가 미미하므로 토출 패턴 유지에 가중치를 둔  $R$  을 선정하는 것이 좋다고 보았다. 본 연구에서는 직선 받음각 표면  $\theta_c = 28^\circ$  에 한해서 응력감소의 최적화를 하였다.  $\theta_c$  가 다양한 경우  $\theta_{t,edge}$  이 변경되어 최적구간이 바뀌면서 최적  $R$  도 변경되지만, 본 연구에 언급된 바와 같은 최적화 접근방식에 의해 최종 설계값을 선정하는 방법은 다양한 직선표면 형상에서도 충분히 적용 가능한 방법으로 생각된다. 최적설계를 통한 표면 내구성 향상 및 토출 패턴 유지로 연구대상을 활용하는 회전무화나 박막코팅 등 도포 민감성이 높은 분야에서도 충분히 적용이 되는 장점이 있게 된다.

### 3. 결론

박막을 형성하는 회전원판 위 유동이 표면형상에 따라 전단응력을 발생시키는 관계를 파악하고 응력을 줄이기 위한 최적설계를 수행했다.

해석모델은 자유 및 No-slip 경계를 포함하고, 회전관성이 충분히 적용되어 층류유동으로 정상화된 자유표면 유동으로 두며, 회전 중심 축에 축 대칭된 x-y 좌표면으로 두었다.

전산해석을 이용한  $U/h$  분포로 기존  $\theta_c = 28^\circ$  표면에 대한 응력을 비교했다. 곡률이 적용되면서  $\tau_{ratio}$  는 감소했지만  $R$  이 커질수록이  $\tau_{ratio,decre.}$  가 줄어들었다. 최적설계를 위해  $\tau_{ratio,decre.}$  의 선형상관관계에서 높은 값을 유지하는 것이 최적구간을 선정하기 위한 방법으로 지정하여 선형상관계수  $r^2$  가 0.99 이상이 되는 범위를 최적구간의 기준으로 지정하여 최적  $R$  구간을 6~11mm 로 설정하였다.  $R$  에 따른 효과적인 응력감소 및 점착 안정성의 확보를 위해  $\tau_{ratio,decre.}$  가 극대되는 최적  $R$  구간의 최대값을  $R_{max} = 11mm$  로 설정하였다.

곡률 적용으로  $\theta_{t,edge}$  가 기존  $\theta_c$  표면과 달라지는 것은 토출 패턴이 바뀌므로써 다른 영향을 미칠 수 있어 이를 방지하기 위해  $\theta_{t,edge}$  가 일치되는 최적  $R$  구간의 최소값  $R_{min} = 8.5mm$  을 설정했다.

최적  $R$  구간에서  $\tau_{ratio}$  차이는 0.024 로 기존 형상

의  $\tau$  기준에서는 2.4%의 미미한 차이를 보이기 때문에 응력 감소보다는 산업적 활용의 용이성을 위해 토출 패턴 유지하는  $R$  을 선정하는 것이 좋다고 보았다. 직선 받음각 표면  $\theta_c = 28^\circ$  에 한해서 응력감소의 최적화를 하였지만,  $\theta_c$  가 다양한 경우  $\theta_{t,edge}$  이 변경되어 최적구간이 바뀌면서 최적  $R$  도 변경될 것이다. 본 연구에 언급된 바와 같은 최적화 접근방식에 의해 최종 설계값을 선정하는 방법은 다양한 직선표면 형상에서도 충분히 적용 가능한 방법으로 생각된다.

본 연구에서 받음각보다는 곡률을 형성하는 것이 표면 응력을 줄이는데 효과적인 것을 보았고, 곡률반경에 따라서는 큰 차이를 나타내지 않으므로 기존과 같은 토출 패턴을 유지하여 이를 이용한 산업적 활용이 용이한 방향으로 최적설계를 하도록 제안하였다.

### 후 기

본 연구는 2012 년 울산대학교 기계공학부 일류화 사업단의 연구비에 의하여 연구되었음.

### 참고문헌 (References)

- (1) Hong, H. E., Ahn, H. T. and Myung, H. J., 2012, "An Efficient Incompressible Free Surface Flow Simulation Using CPU," *J. Comput. Fluids Eng.*, Vol. 17, No. 2, pp. 35~41.
- (2) Sung, J. Y., Choi, H. G. and Yoo, J. Y., 1995, "A Study on the Thin Liquid Film Flow with Free Surface," *KSME Fall Annual Meeting 1995*, pp. 252~257.
- (3) Hong, H. E., Ahn, H. T. and Myung, H. J., 2012, "Characterizing Liquid Film Thickness in Spinning Disc Reactors," *J. Comput. Fluids Eng.*, Vol. 17, No. 2, pp. 35~41.
- (4) Shevchuk, I. V., 2009, *Convective Heat and Mass Transfer in Rotating Disk Systems*, Springer, New York, pp. 163~189.
- (5) Jang, Y. J., 2011, "The Near-Wall Flow Analysis using Wall Function in LES Code(FDS5)," *J. Comput. Fluids Eng.*, Vol. 2011, No. 10, pp. 1594~1600.
- (6) Choi, W. C., Seo, Y. M., Choi, S. K. and Chung, K. M., 2009, "Development of 3-equation Turbulence Model for Free Shear Flow and Channel Flow," *KSME Fall Annual Meeting 2009*, Vol. 2009, No. 11, pp. 2125~2130.
- (7) Kim, B. J., Jeong, E. S. and Kim, J. H., 1998, "Effects of Interfacial Shear Stress on Laminar-Wavy Film Flow," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 22, No. 7, pp. 992~1000.
- (9) Yoon, S. H. and Jeong J. T., 2011, "Study of Stokes Flow

- Past a Vertical Plate in a Two-Dimensional Channel," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 35, No. 6, pp. 609~615.
- (10) Jeong, J. D., Cho, S. G and Lee, C. H., 2006, "Behavior of a Heavy Particle in the Shear Flow Near a Flat Wall," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 30, No. 8, pp. 806~817.
- (11) B. H. Kim, Beskok, A. and Cagin, T., 2010, "Viscous Heating in Nanoscale Shear Driven Liquid Flows," *Microfluidics and Nanofluidics*, Vol. 9, No. 3, pp. 31~40.
- (12) Kim, C. N., Oh, T. Y., Choi, M. J. and Jung, S. D., 2005, "Elastic Motion of the Blood Vessel and Wall Shear Stress in Carotid Artery with Stenosis," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 22, No. 9, pp. 179~187.
- (13) Byeon, H. J., Ha, H. J. and Lee, S. J., 2011, "Experimental Estimation of Wall Shear Stress in a Stenotic Rat Mesentery Vessel," *KSME Fall Annual Meeting 2011*, Vol. 2011, No. 10, pp. 3075~3077.
- (14) Hierck, B. P., Heiden, K. V., Poelma, C., Westerweel, J., Poelmann, R. E., 2008, "Fluid Shear Stress and Inner Curvature Remodeling of the Embryonic Heart, Choosing the right lane!" *The Scientific World JOURNAL*, Vol. 8, pp. 212~222.
- (15) Choi, S. H. and Lee, Y., 1997, "Skin Friction Measurements using He-Ne Laser," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 21, No. 7, pp. 939~947.
- (16) Kim, J. T. and Rhee, K. H., 1995, "A Study on the Flow Inside the Laminar Wavy Liquid Film using Flow Visualization," *KSME Fall Annual Meeting 1995*, pp. 263~267.
- (17) Kang, S. J. and Lee, Y., 1999, "Experimental Study on the Global Skin Friction Measurements Using the Interferometry," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 27, No. 4, pp. 128~134.
- (18) Lim, S. H. and Choi, H., 1997, "Optimal Shape Design using a Mathematical Theory in Laminar Flow," *KSME Spring Annual Meeting 1997*, pp. 357~362.
- (19) Park, G. J., Kwak, H. S., Son, B. C. and Kim, K. J., 2007, "Numerical Investigation of the Flow in a Micronozzle for Dispensing a Highly Viscous Sealant," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol. 12, No. 4, pp. 54~60.
- (20) Choi, Y. and Lee, D., 2012, "A Study on Effect of Surface Texturing on Wall Shear Stress Distribution of Engine Piston Ring," *KSPE Fall Annual Meeting 2012*, Vol. 17, No. 2, pp. 933~934.
- (21) Lim, Y. J., Kim, I. T. and Kwak, K. H., 2011, "Evaluation of Permanent Deformation Characteristics in Crushed Subbase Materials using Shear Stress Ratio and Large Repeated Triaxial Compression Test," *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Vol. 13, No. 4, pp.41~50.
- (22) Park, B. S. and Kim, B. H., 2013, "Design of Rotary Atomizer using Characteristics of Thin Film Flow on Solid Surfaces," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No. 12, pp. 1473~1482.
- (23) Young, Munson, Okiishi and Huebsch, 2007, *A Brief Introduction to FLUID MECHANICS*, 4<sup>th</sup>, John Wiley & Sons, New York, pp. 256~259.