

## 압착되어 회전하는 강체/변형 롤의 동적 특성에 관한 수치해석 연구

이문규\* · 이상혁\* · 허남건\*<sup>†</sup> · 서영진\*\* · 김인철\*\* · 이성진\*\*

\* 서강대학교 기계공학과, \*\* (주)포스코 기술연구소 압연공정연구그룹

### A Numerical Study on Dynamic Characteristics of Counter-Rotating Rigid/Deformable Rolls in Press Contact

Moon Kyu Lee\*, Sang Hyuk Lee\*, Nahmkeon Hur\*<sup>†</sup>,  
Young Jin Seo\*\*, In-Cheol Kim\*\* and Sung-Jin Lee\*\*

\* Dept. of Mechanical Engineering, Sogang Univ.,

\*\* Rolling Tech. Research Group, Posco Co.

(Received December 6, 2010 ; Revised May 17, 2011 ; Accepted May 18, 2011)

**Key Words:** Deformable Roll(변형 롤), Dynamic Characteristics(동적특성), Numerical Analysis(수치해석), Negative Gap(음의 간격)

**초록:** 동적 특성에 영향을 받는 롤 코팅의 평형적인 두께 예측과 불안정성을 분석하는 것은 중요하다. 본 연구에서는 강체/변형롤 사이에서 생성되는 마이크로 코팅액의 두께를 예측하기 위해 앞서 압착되어 회전하는 두 롤 사이에 발생하는 접촉 압력의 분포와 변형롤의 변형 형상을 예측하고자 한다. 또한 변형롤의 재료상수와 롤의 속도 및 마찰계수 그리고 압착 크기 등의 변수들에 대한 접촉압력분포를 수치적인 방법으로 측정하여 유효한 변수들의 영향을 분석하고자 한다. 수치해석 방법으로는 유한요소법을 사용하였고 두 롤을 모델링하여 변형롤에 고무물성치를 초탄성체 모델로 가정하여 일반적으로 사용되는 Mooney Rivlin 계수를 사용하였고 40~80rpm 사이의 속도로 회전할 때 접촉 형상 및 압력분포를 분석하였다. 접촉형상의 경우 압착정도에 따라 변하고 그 외 변수들에는 영향을 받지 않고 접촉압력의 경우 변형롤의 물성치와 압착정도에 의해 주요한 영향을 받고 속도 및 마찰계수에는 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

**Abstract:** It is important to analyze the dynamic behavior of counter-rotating rigid/deformable rolls in the roll-coating process, because the stability of the process is affected by the dynamic characteristics. In the present study, the effects of material property, angular velocity, and gap size on the contact pressure and contact shape of the deformable roll are numerically investigated. The behavior of two rolls with a negative gap was analyzed using the finite element method, and the material property of the deformable roll was applied with the Mooney-Rivlin coefficients of the hyper-elastic model. The contact shape is affected by the gap size, and the contact pressure mainly depends on the stiffness of the deformable roll and the gap size. To maintain a negative gap between two rolls, controls such as load and displacement controls must be used. The results indicate that displacement control can reduce the instability.

## 1. 서 론

코팅 기술은 롤(roll)을 이용하여 기재(substrate) 위에 미세두께의 코팅용액을 일정한 두께로 도포하는 기술로 액정 디스플레이, 고집적 회로기판, 연료전지 등 다양한 분야에서 움직이는 기재에 연속적인 코팅이 응용되는 기술이다. 하지만 ribbing 이나 cascade 현상과 같은 불안정성으로 인한 결

함이 중요한 문제점으로 알려져 있다. 이러한 현상은 외부의 외란 등으로 인한 다양한 형태의 불안정성에 의해 발생 할 수 있다. Ribbing 현상은 롤의 폭 방향으로 두께의 주기적인 변화로 주름진 형상을 의미하고 cascade 현상은 ribbing과 같이 작용하면서 유막의 유동방향으로 두께에 대한 큰 진폭으로 인해 물결 모양의 형상을 의미한다. 이와 같은 코팅막의 불안정성은 회전하는 롤 주변에서 코팅액의 거동 특성에 의해 좌우된다. 이에, 회전하는 롤의 변형 및 거동 특성, 롤 사이에서 코팅액의 거동 특성 등을 예측함으로써, 롤

<sup>†</sup> Corresponding Author, nhur@sogang.ac.kr

**Table 1** Material properties of thermoset polyurethane

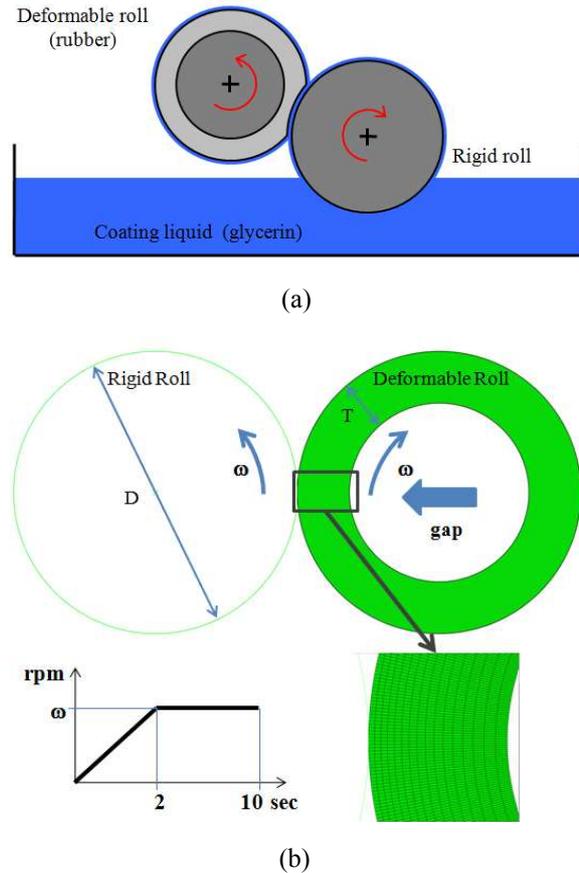
Material properties		Value
Density		0.381 g/cc
Mooney Rivlin coefficients	MAT 1	C10=1.24MPa, C01=0.01MPa, D1=0.37
	MAT 2	C10=4.96MPa, C01=0.01MPa, D1=0.09
	MAT 3	C10=1.24MPa, C01=10.0MPa, D1=0.04
	MAT 4	C10=4.96MPa, C01=10.0MPa, D1=0.03

사이에서의 코팅액의 압력 특성 및 유연학적 특성에 따른 코팅막의 불안정성에 대한 실험 및 해석적 연구들이 진행되었다.<sup>(1-6)</sup> 또한 수치적 방법을 이용하여 코팅기술을 구현하고 문제를 해결하기 위한 접근도 시도 하고 있다.<sup>(7)</sup> Szczurek 등은 음의 간격을 갖고 있는 변형 롤을 해석하기 위해 구조 해석을 위한 상용 프로그램(ABAQUS)과 유동 해석을 위한 상용 프로그램(FIDAP CFD)을 개별적으로 사용하여 구조해석을 통한 접촉면의 실제 선 속도와 접촉 압력 프로파일을 계산하여 유동 해석 프로그램에 경계조건으로 적용함으로써 해석을 수행하였다.<sup>(7)</sup> 하지만 코팅에 대한 불안정성은 유동의 불안정성과 더불어 두 롤 사이의 간격 크기, 속도 및 롤의 고정 방식 등에도 주요한 영향을 받게 된다. 특히, 변형(deformable) 롤과 강체(rigid) 롤로 이루어진 두 개의 롤에 대한 음의 간격(하중이 가해짐으로 변형롤의 변형에 의해서로 일정부분 겹쳐짐)에 대해 롤의 회전제어 및 하중제어는 코팅의 결합에 중요한 인자가 될 수 있다. 이에 본 연구는 음의 간격 상에서 변형 롤의 재료, 음의 간격에 대한 크기 및 속도와 마찰 계수에 따른 동적 특성을 파악하고 강체 롤의 회전 시 변형롤의 회전 구동 여부에 대한 접촉압력 분포를 분석하고자 한다. 또한 음의 간격을 유지 하도록 두 롤의 축을 고정시키기 위한 제어방법으로 위치제어와 하중제어에 따른 롤의 거동을 비교하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 롤 코팅공정 모델링 및 동적해석

롤 코팅공정은 일반적으로 압착된 두 개의 롤로 간략히 표현할 수 있는데 두 개의 롤이 순방향으



**Fig. 1** Roll coating process : (a) Schematic of process and (b) finite element model of rolls and the profile of rotational velocity

로 회전하면서 하단의 유체를 밀어 올라가면서 롤 사이를 통과할 때 원하는 얇은 유막을 형성시킴을 목적으로 하고 있다[Fig. 1(a)]. 이 때의 얇은 유막은 강판등의 표면을 코팅함에 사용되는 것이다. 이러한 롤의 동적 특성을 분석하기 위해 변형 롤과 강체 롤을 모델링 하였다[Fig. 1(b)]. 두 롤의 직경은 136mm으로 결정하고 변형 롤의 두께는 25mm로 정하였다. 각 강체 롤은 강철로 구성된 중실 롤로 가정하여 강철의 밀도 7.85g/cc를 적용하였다. 이에 각 roll의 질량은 각각 22.8kg과 11.36kg을 갖도록 하였고 각 축에 대해 해당 질량에 대한 관성 모멘트를 부과하였다.

변형 롤의 재료는 실제 공정에서도 널리 사용되는 열경화성 폴리우레탄(polyurethane)으로 결정하였다. 동적 해석은 강체 롤과 변형 롤을 서로의 순방향으로 네 가지 각속도 (20, 40, 60, 80rpm)에 대해 수행하였다. 강체 롤과 변형롤을 모두 같은 각속도로 회전하는 방식과 다른 각속도로 회전하는 방식으로 수행하여 속도 비 (0~1)에 대해 접촉압력

을 비교 분석하였고, 0.03~0.1까지의 마찰계수에 따른 특성 분석도 수행하였다. 또한 변형 롤을 기본적으로 2.84mm까지의 음의 간격을 갖도록 강체를 방향으로 수평하게 이동하였고 이 외에 2~5mm까지의 음의 간격 크기에 대해서도 분석하였다. 마지막으로 변위를 통해 축을 고정 시키는 위치제어 방법과 2.84mm의 음의 간격에 대응하는 하중을 가하여 축을 고정시키는 하중 제어 방법에 대해 축의 거동을 비교하였다. 롤의 속도는 2초 동안 해당 속도로 선형적인 증가를 갖은 후 10초 동안 유지하도록 해석을 수행하였다[Fig. 1(b)]. 동적해석은 ABAQUS Explicit (Ver. 6.9)를 사용하였다.<sup>(8)</sup> 형상에 대한 요소망은 이차원의 평면변형률조건으로 구현하였고 접촉조건을 고려하여 4절점 선형 요소인 CPE4R을 사용하였다. 변형률과 강체를 모두 중심부에 참조 노드를 정의하여 참조 노드에 경계조건 및 각속도와 하중 변위 조건을 부과하여 동적해석을 수행하였다. 또한 참조 노드에 질량 및 질량관성모멘트 조건을 부과하여 동적거동을 모사할 수 있도록 하였다. 변형률과 강체의 접촉조건은 면접촉 조건을 부과하고 접선방향으로의 마찰계수를 적용하였다. 동적해석은 각 롤에 대한 참조 노드에 속도 프로파일을 적용하였고 처음 2초간의 과도함수, 그리고 그 다음 8초간에는 일정 속도를 부과하여 초기의 과도상태 및 10초 후의 정상상태에 대한 결과를 분석하였다.

### 2.2 재료 물성치

변형되는 영역은 실제 현장에서도 일반적으로 사용되는 열경화성 폴리우레탄에 대해 기존 문헌을 참고하여 초탄성 (hyperelastic) 재료의 물성치를 부과하였다(Table 1).<sup>(9)</sup> 초탄성 재료 모델 중에서 일반적으로 사용되는 1차 Mooney Rivlin 계수( $C_{10}$ ,  $C_{01}$ )를 사용하였다. 이에 대한 변형 에너지로서의 지배 방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있고 본 식의 기본 계수인  $C_{10}$ 은 1.24MPa,  $C_{01}$ 은 0.1 MPa로 부과하였다. 본 물성치의 값에 대해서는 응력에 따라 비교적 선형적인 거동을 나타냄을 알 수 있다.

$$U = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{D_1}(J^{el} - 1)^2 \quad (1)$$

$$\bar{I}_1 = \bar{\lambda}_1^2 + \bar{\lambda}_2^2 + \bar{\lambda}_3^2$$

$$\bar{I}_2 = \bar{\lambda}_1^{(-2)} + \bar{\lambda}_2^{(-2)} + \bar{\lambda}_3^{(-2)}$$

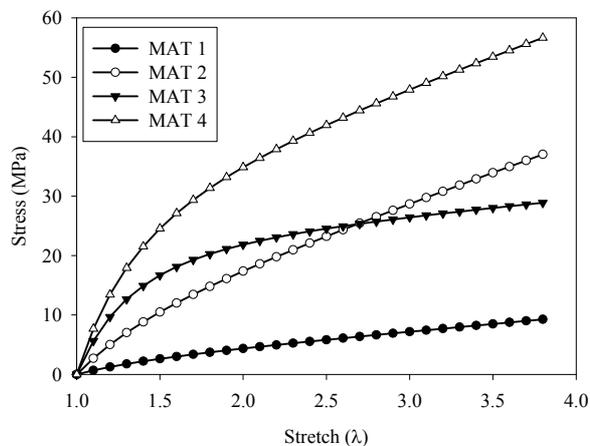


Fig. 2 Stress-stretch curves of material properties as a hyper-elastic model

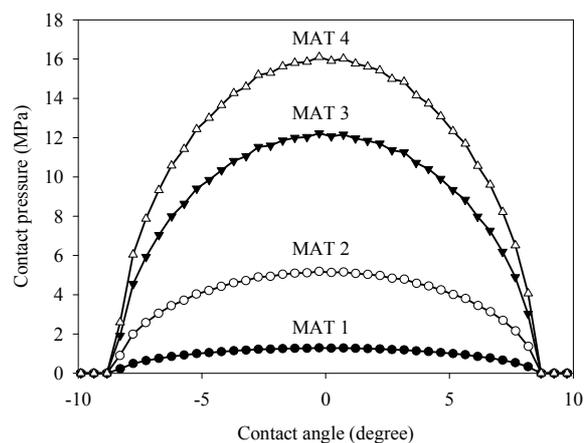


Fig. 3 Contact pressure distribution for the material properties of deformable roll

여기서  $J^{el}$ 은 탄성 체적비이고  $\lambda_i$ 는 주방향 신장을 의미한다. 그리고  $I$ 는 right Cauchy-Green 텐서를 나타낸다. 재료상수  $D_1$ 의 값은 푸아송비와 전단계수로 구할 수 있고 이에 0.37의 값을 얻을 수 있다[식 (2)].

$$D_1 = \frac{3(1-2\nu)}{G_0(1+\nu)} \quad (2)$$

여기서 푸아송비는 폴리우레탄 발포체(foam)임을 고려하였을 때 제조공정에 따라 다양한 값을 가지므로 본 연구에서는 0.3으로 가정하였고<sup>(10)</sup>  $G_0$ 는 초기 전단계수로 다음과 같이 Mooney Rivlin 계수로 정의할 수 있다[식 (3)].

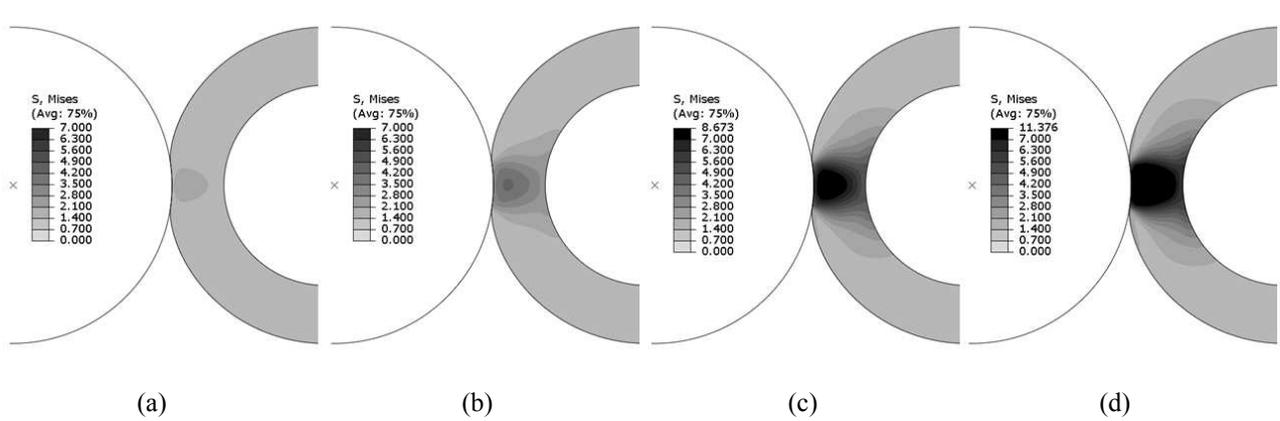


Fig. 4 Stress distribution of deformable roll for material property

$$G_0 = 2(C_{10} + C_{01}) \quad (3)$$

본 연구에서는 참고문헌을 토대로 한 기본적인 물성치를 사용함과 동시에 폴리우레탄의 제조 시에 달라질 수 있는 물성치에 따른 동적해석을 분석하기 위해 강성의 변화를 줄 수 있는 재료물성치의 값을 주어 4가지의 물성치에 대한 모델을 제작한 후 해석을 수행하였다 (Table 1, Fig. 2).

2.3 모델의 검증

모델의 검증을 위해 두 원통에 대한 탄성 접촉에서의 접촉하중과 최대압력에 대한 관계식을 나타낸 Hertz 이론식<sup>(11)</sup>을 사용하였다[식 (4)].

$$p = \left( \frac{6PE_c^2}{\pi^3 R^2} \right)^{1/3} \quad (4)$$

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (5)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (6)$$

$$\delta = \left( \frac{9P^2}{16RE_c^2} \right)^{1/3} \quad (7)$$

여기서  $P$ 는 전체 하중이고  $R$ 과  $E_c$ 는 각각 두 물 사이의 유효곡률반경과 유효탄성계수를 의미한다. 또한  $\delta$ 은 최대 변형 크기,  $p$ 는 롤의 최대 압

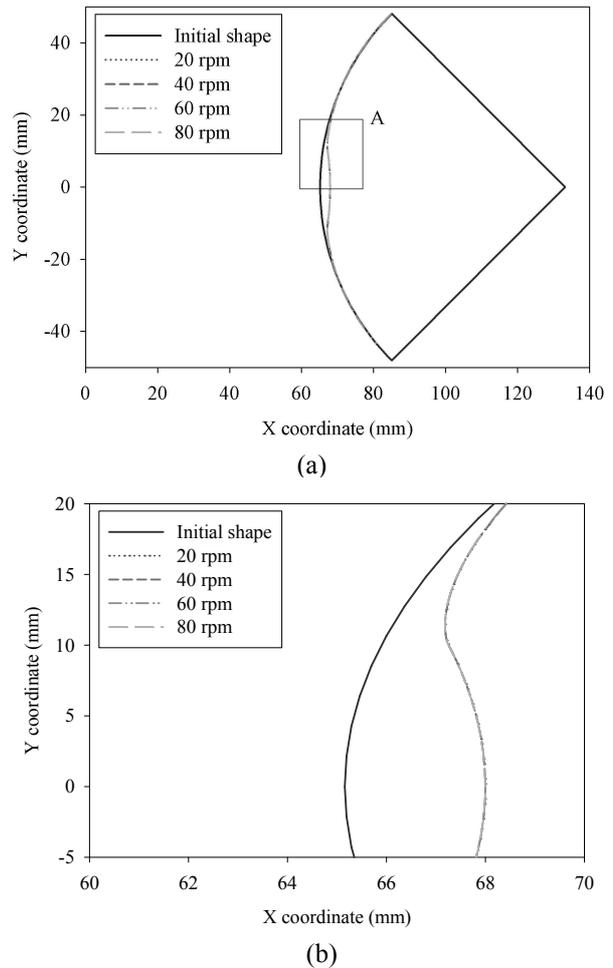


Fig. 5 Contact shape of deformable roll for angular velocity : (a) whole shape and (b) magnifying shape at 'A'

력을 의미하고  $\nu$ 는 푸아송비를 의미한다. 아래첨자의 1은 변형률을 2는 강체물에 해당되는 값을

의미한다. 모델의 검증은 위해 수행한 모델 중 MAT1의 물성치에 대한 초기 재료 거동으로부터 탄성계수를 추출하여 부과하였고 변위를 부과하여 정적해석을 수행한 후 수치모델로부터 얻은 반력을 통해 모델을 검증하였다. 탄성계수 6.2MPa를 부과하였을 때 강체물의 탄성계수가 매우 크다고 가정하면 식 (5)에 의해 유효탄성계수는 6.8MPa이 되고 동일한 두 물의 반경 68mm에 대한 유효곡률반경은 식 (6)에 의해 34mm가 된다. 변형물에 2.84mm만큼의 변형을 주었을 때 Herz 이론식에 의해서는 식 (7)에 의해 253N을 발생하게 되고 최대압력 1.25MPa을 갖는다. 같은 조건으로 해석을 수행하였을 때는 최대압력이 1.31MPa이 발생하여 약 4.8%의 에러를 갖게 된다. 이는 본 연구에서 사용하는 유한요소모델의 유효성을 보여주고 있다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 변형물의 재료 물성치에 따른 동적 특성

네 가지의 물성치를 갖는 변형물에 대한 접촉 압력을 살펴보면 강성이 커질수록 그 크기가 커짐을 알 수 있다(Fig. 3). 특히, MAT 2와 MAT 3의 재료에 대한 압력분포를 살펴보면 초기의 강성의 크기가 응력분포의 크기에 주요하게 영향을 주게 됨을 알 수 있다. 하지만 접촉압력의 범위는 변하지 않음을 알 수 있다. 즉, 변형물의 재료 강성이 접촉 형상에는 영향을 주지 않는다. 변형물의 응력분포 또한 재료 강성이 커질수록 동일한 변형에 대해 큰 응력분포를 갖게된다(Fig. 4). 접촉압력이 물 사이의 유막 두께에 주요한 영향을 미치기 때문에 이러한 결과는 변형물의 재료가 유막형성에 중요한 영향을 줄 수 있고, 시간에 따른 변형물의 부분적 경화가 발생한다면 유막의 불안정성을 유발할 수 있는 요인이 될 수 있음을 말해준다. 추가로 물의 질량과 질량 관성 모멘트를 고려한 과도상태의 동적해석으로 수행하였기 때문에 정적해석과는 달리 상하 비대칭의 응력분포를 갖게 된다. 이는 물의 해석에 있어 정적해석보다는 동적해석이 실제 현상을 더 잘 반영함을 알 수 있다.

#### 3.2 변형물의 속도 및 속도 비와 접촉 마찰계수에 따른 동적 특성

기본적인 해석은 두 물이 같은 속도로 회전하

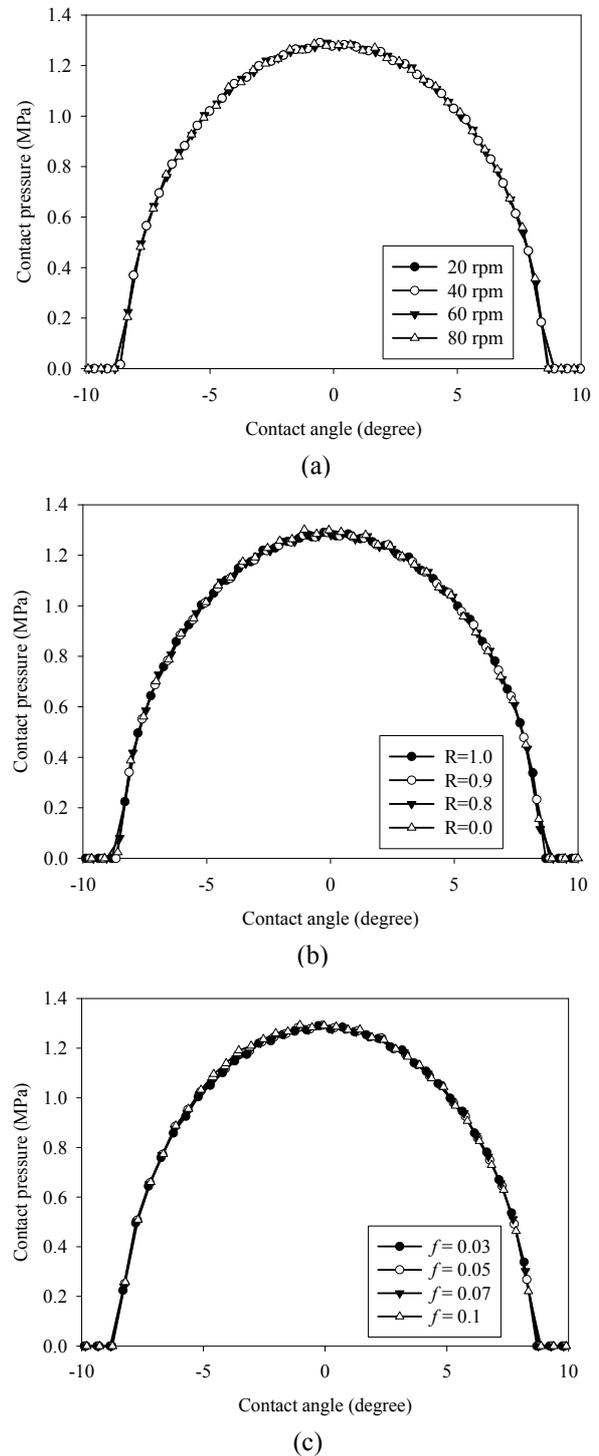


Fig. 6 Contact pressure distribution for (a) angular velocity, (b) velocity ratio (R) and (c) friction coefficient (f)

도록 하였다. 20에서 80rpm까지 그 회전속도의 크기에 따라 정상상태에서 분석한 결과 변형된 접촉형상에 영향을 주지 않음을 알 수 있다[Fig.

5(a)]. Figure 5(b)는 접촉형상을 확대한 그림으로 속도에 따라서 동일한 형상을 갖음을 확인 할 수 있다. 또한 이러한 롤의 속도에 대한 크기가 접촉압력의 크기에도 영향을 주지 않는다[Fig. 6(a)]. 40rpm의 강재롤 속도에 대한 변형롤의 속도 비 (R)를 0에서 1까지 변화를 주어도 접촉압력의 크기 변화에 영향을 주지 않고 롤 사이의 접촉 마찰계수 ( $f$ )의 크기(0.03~0.1)도 정상상태에서 접촉압력의 크기에 영향을 주지 않음을 확인할 수 있다[Fig. 6(b,c)]. 이는 롤의 속도에 따라 유막의 유동속도가 바뀌어 유막두께가 변하거나 마찰계수가 미세하게 변할지라도 이러한 현상이 롤 사이의 접촉압력에 다시 영향을 주지 않음을 보여주고 있다. 속도비의 경우에서도 코팅막 두께에 영향을 주는 법선방향의 접촉압력에는 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 특히, 본 연구에서 수행한 마찰계수의 범위는 코팅막의 윤회작용을 고려한 상대적으로 작은 마찰계수 (0.03~0.1)이기 때문에 해당 범위 내에서는 접촉압력의 변화에 영향을 주지 않음을 나타내고 있다. 이러한 사실은 동적 해석을 통한 접촉압력의 분포에 대한 정보가 유동해석의 경계조건에 사용되어 유막의 두께를 결정할 수 있음에 타당성을 부여하고 있다.

3.3 변형롤의 압착 크기에 따른 동적 특성

변형롤의 압착 크기에 따라서는 변형롤의 접촉형상에 큰 영향을 주게 된다(Fig. 7). 즉, 실제 현장에서 사용되는 두 롤의 상대위치를 일정하게 유지하기 위한 하중의 크기가 롤 사이의 접촉 현상에 영향을 주게 되고 이뿐만 아니라 압력 분포에도 영향을 주게 됨을 알 수 있다(Fig. 8). 이러한 결과는 기존 연구를 통해서도 확인할 수 있듯이 롤 사이의 접촉압력은 변형롤의 재료 물성치뿐만 아니라 두 롤의 간격에 주요하게 영향을 받는다.<sup>(7)</sup> 즉, 다음 절에 자세히 언급하지만 압착 크기를 결정 하는 롤에 가하는 하중제어는 롤 사이 유막의 유동과 두께뿐만 아니라 불안정성에도 주요하게 영향을 줄 수 있는 인자임을 알 수 있다.

3.4 변형롤의 접촉조건에 따른 동적 특성

변형롤의 변위제어 및 하중제어에 따른 과도상태에서의 동적해석을 분석한 결과 하중제어를 할 경우 동일한 하중을 부과하였음에도 불구하고 롤

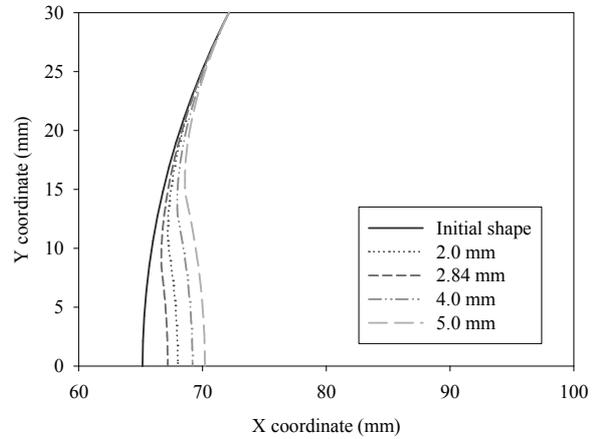


Fig. 7 Contact shape of deformable roll for amount of contact press

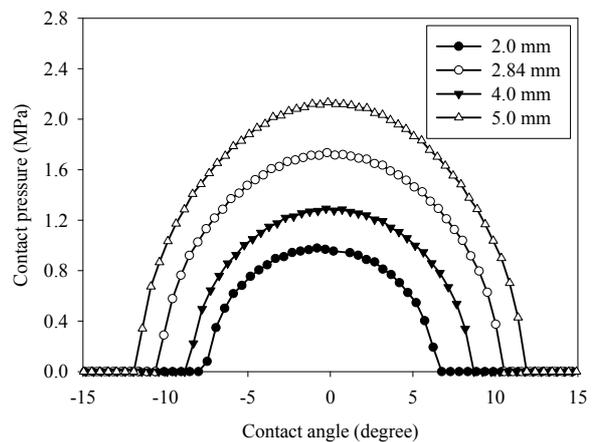


Fig. 8 Contact pressure distribution of deformable roll for amount of contact press

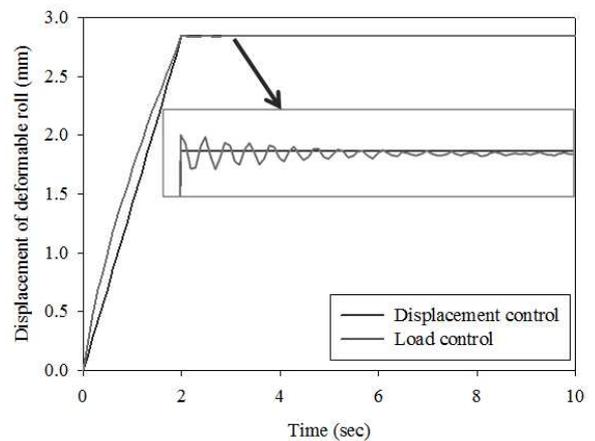


Fig. 9 The displacement oscillation of deformable roll centroid under load control

의 변위가 주기적으로 미세하게 변화됨을 알 수 있다(Fig. 9). 이에 따른 응력분포도 일정한 입력 하중을 주는 동안에 변화가 발생하게 된다. 즉, 동일한 변위를 주기위한 20N의 하중을 가한 결과 2초 후의 초기진동의 진폭은 0.01mm 주기 약 0.5초를 갖게 되고 6초 후에는 주기는 변하지 않으나 진폭이 약 10분의 1로 줄게 됨을 알 수 있다. 이러한 초기 진동의 발생은 20N의 하중을 가함에 있어 발생한 관성의 영향이라고 볼 수 있으며 시간이 지남에 따라 수치적으로 원하는 하중에 도달하기 위한 변형률에 대한 수평방향의 감쇠는 줄어들지만 6초 이후에도 지속적인 미세한 진동이 발생하는 것은 수치해석적으로 회전에 의한 관성의 영향이 작용하는 것이라 사료된다(Fig. 9). 이는 질량과 관성 모멘트를 갖고 있는 롤에 대한 불안정성이라 볼 수 있으며 하중제어 시에는 편심 질량과 같은 불안정성을 가중하는 요소를 고려할 때 cascade와 같은 코팅막의 결함을 유발 할 수 있으므로 추가적인 피드백 제어가 필요함을 나타내고 있다.

#### 4. 결 론

롤에 의한 동적 거동에서 변형률의 재료 강성이 커질수록 접촉 압력도 1MPa에서 16MPa까지 커질 수 있음을 알 수 있다. 특히, 재료의 변형률에 대한 응력곡선에서 초기 거동에 대한 강성이 응력분포와 접촉 응력에 주요한 영향을 갖는다. 하지만 두 롤의 속도의 크기나 속도 비 그리고 롤 사이의 마찰계수에 따라 접촉 형상 및 접촉 압력에 유효한 차이를 보이지 않음을 알 수 있다. 롤 사이의 압착되는 음의 간격에 대한 크기가 커질수록 롤의 변형 크기가 커지고 및 접촉압력 또한 커짐을 알 수 있다. 따라서 원하는 유막의 두께를 형성함에 있어 변형률 재료의 선정과 변형률과 강체롤의 음의 간격 크기가 롤의 속도나 롤 사이의 마찰계수보다 중요한 인자임을 알 수 있다. 추가로 변형률 축에 대한 제어에 따른 동적 거동을 살펴보면 변위제어로 회전시켰을 경우에는 일정한 음의 간격을 가지게 되나 하중제어로 회전하였을 경우에는 두 롤 사이의 간격이 시간에 따라 주기적으로 변하게 됨을 알 수 있다. 이것이 코팅의 결함을 줄 수 있는 주요 원인 중에 한가지로 작용될 수 있다.

#### 후 기

이 논문은 2009년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받는 ‘다중현상 CFD 연구센터 (No. 20090083510)’ 산학대응 과제에 의한 일환으로 (주)포스코의 지원을 받아 수행된 연구임.

#### 참고문헌

- (1) Marcio, S., Carvalho, M. S. and Scriven, E., 1997, “Deformable Roll Coating Flows: Steady State and Linear Perturbation Analysis,” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 339, pp. 143~172.
- (2) Carvalho, M. S. and Scriven, L. E., 1999, “Three-Dimensional Stability Analysis of Free Surface Flows: Application to Forward Deformable Roll Coating,” *Journal of Computational Physics*, Vol. 151, pp. 534~562.
- (3) Lee, J. H., Han, S. K., Lee, J. S., Jung, H. W. and Hyun, J. C., 2010, “Ribbing Instability in Rigid and Deformable Forward Roll Coating Flows,” *Korea-Australia Rheology Journal*, Vol. 22, No. 1, March, pp. 75~80.
- (4) Han, S. K., Shin, D. M., Park, H. W., Jung, H. W. and Hyun, J. C., 2009, “Effect of Viscoelasticity on Dynamics and Stability in Roll Coatings,” *European Physical Journal Special Topics*, Vol. 166, pp. 107~110.
- (5) Lee, S.H., Lee J.H., Hur, N., Seo, Y.J., Kim, I.-C. and Lee S.-J., 2011, "A Numerical Analysis of the Behavior of Liquid Film Around a Rotating Cylinder," *Transactions of the KSME(in Korean)*, Vol. 35, No. 5, pp. 481~486.
- (6) Yu, S., Lee, K. and Um, S., 2007, "Analysis of Film Around Rotating Roller Partially Immersed in Ink," *Transactions of the KSME(in Korean)*, Vol. 31, No. 12, pp. 1017~1023.
- (7) Szczurek, E., Dubar, M., Deltombe, R., Dubois, A. and Dubar, L., 2009, “New Approach to the Evaluation of the Free Surface Position in Roll Coating,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp. 3187~3197.
- (8) ABAQUS User Guide V6.9, 2007, USA.
- (9) Kanyanta, V. and Ivankovic, A., 2010, “Mechanical

- Characterisation of Polyurethane Elastomer for Biomedical Applications," *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Vol. 3, pp. 51~62.
- (10) Widdle, R. D., Bajaj, A. K. and Davies, P., 2008, "Measurement of the Poisson's Ratio of Flexible Polyurethane Foam and Its Influence on a Uniaxial Compression Model," *International Journal of Engineering Science*, Vol. 46, pp. 31~49.
- (11) Johnson, K. L., 1994, "Contact Mechanics," Cambridge University Press, pp. 84~106.