



## 마이크로 박판 미세 패턴 성형공정의 성형성에 대한 해석적 연구

차 성 훈\* · 신 명 수\* · 김 중 호\*\* · 이 혜 진\*\*\* · 김 중 봉\*\*\*\*,†

\*서울산업대학교 NID 융합대학원, \*\*서울산업대학교 금형설계학과

\*\*\*한국생산기술연구원 디지털성형팀, \*\*\*\*서울산업대학교 자동차공학과

(2009년 10월 7일 접수, 2009년 10월 19일 수정 및 채택)

### An Analysis of Formability of Micro Pattern Forming on the Thin Sheet Metal

Sung-Hoon Cha\*, Myung-Soo Shin\*, Jong-Ho Kim\*\*,  
Hye-Jin Lee\*\*\*, and Jong-Bong Kim\*\*\*\*,†

\*Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National University of Technology, Seoul, South Korea

\*\*Department of Product Design and Manufacturing Engineering Seoul National University of Technology

\*\*\*Department of Manufacturing Convergence Technology, Korea Institute of Industrial Technology,  
Ansan City, Gyeonggi-do, South Korea

\*\*\*\*Department of Automotive Engineering, Seoul National University of Technology

(Received October 7, 2009, Revised & Accepted October 19, 2009)

**요약** : 롤-롤(Roll to roll) 성형은 공정이 비교적 간단하고 생산 효율이 높은 중요한 금속 성형 공정이다. 이러한 이유로 롤-롤 성형 공정은 최근에 솔라셀 집전판, 디스플레이 격벽구조, 그리고 회로기판 성형 등 넓은 범위에서의 활용이 검토되고 있다. 본 연구에서는 솔라셀 집전판에 수십만 개의 홈을 성형하는 공정에 대해 유한요소해석을 수행하였다. 수백만 개 홈에 대한 성형을 해석하는 것은 컴퓨터 용량과 시간의 문제로 불가능하기 때문에 공정 설계를 가능하게 하는 최소의 문제 영역을 해석 결과를 바탕으로 설정하였다. 그리고, 홈의 형상과 온도에 따른 해석을 수행하여 그 결과를 분석함으로써 공정 설계의 방향성을 제시하였다.

**ABSTRACT** : Roll-to-roll forming process is one of important metal processing technology because the process is simple and economical. These days, with these merits, roll-to-roll forming process is tried to be employed in manufacturing the circuit board, barrier ribs and solar cell plate. The solar cell plate may have millions of patterns, and the analysis of forming considering all the patterns is impossible due to the computational costs. In this study, analyses are carried out for various numbers of patterns and the results are compared. It is shown that the analyses results with four row patterns and twelve row patterns are same. So, it is considered that the analysis can be carried out for only four rows of pattern for the design of incremental roll-to-roll forming process. Also formability is analysed for various number of mesh, protrusion shapes and forming temperature.

**Keywords** : roll-to-roll forming, FEM(finite element method), elasto-plastic, solar cell

## I. 서 론

롤포밍(Roll Forming) 공정은 금속 띠판(Strip)을 성형롤(Forming Roll) 사이로 통과시키면서 점진적인 굽힘(Bending) 가공을 가하여 단면 형상이 일정하고 길이가 긴 제품을 생산할 수 있는 공정이다.<sup>1,2</sup> Metal Roll Forming 기술은 공정을 단순화시킬 수 있는 장점과, 대량생산을 통해 생산성을 높일 수 있다는 점에서 금속 가공기술에 있어 매우 중요하다고 할 수

있다.<sup>3</sup> 본 연구에서는 생산성이 우수한 롤포밍 공정을 응용한 롤-롤(Roll-to-roll) 성형공정으로 박판에 미세한 홈을 성형하는 공정을 제안하고자 한다. 마이크로 크기 또는 서브마이크로 크기의 홈을 성형하기 위해서는 기존 롤 성형의 공정과 달리 성형 공정 적용에 제약이 있다. 마이크로 스케일에서의 롤-롤 성형 공정을 설계하고자 유한요소해석을 통해 성형공정을 분석하였다.

마이크로 크기 및 서브 마이크로 크기의 금속성형은 마이크로 압출<sup>4</sup> 마이크로 엠보싱,<sup>5,6</sup> 마이크로 펀칭<sup>7</sup> 등의 공정에 대한 연구가 진행되었다. 금속성형 공정 중에서 마이크로 롤-롤 성

† 대표저자 E-mail: jbkim@snut.ac.kr

형 공정은 높은 생산성으로 인해 PDP 격벽구조, 솔라셀 집전판, 기관회로 설계 등의 넓은 범위에서 활용이 검토되고 있다. Park<sup>8</sup> 등은 고분자를 이용한 마이크로 롤-롤 성형으로 PDP 격벽구조 (Barrier Rib)를 성형하는 것에 대한 해석적 연구를 수행하였다. 본 연구는 태양전지 집전판 성형을 위한 롤-롤 성형 공정을 설계하기 위해 공정을 해석하고자 한다. 하지만, 태양전지 집전판은 수백만 개의 홈을 가지고 있어 해석에 어려움이 있다. 본 연구에서는 신뢰성을 확보하기 위한 최적의 격자 개수와 최소의 해석 홈의 수를 결정하였다. 또한 고온에서는 금속의 성형성은 향상되고 기계적 강도는 작아져 적합한 성형 조건이 형성된다. 본 연구에서는 온도에 따른 성형성을 판단하기 위해 성형 온도에 따른 성형성 변화를 관찰하였으며, 홈의 형상과 크기에 따른 성형성을 예측하였다.<sup>9</sup>

## II. 해 석

### 1. 형상모델링

해석은 범용 해석프로그램인 Deform-3D를 이용하여 수행하였다. Figure 1은 해석을 위한 개략적인 형상을 보여준다. 두께 0.2 mm의 판넬에 직경 150 mm의 상하부 롤러를 이용하여 상부 롤러에 패턴 된 높이 0.05 mm,  $\theta_1 = 0.2^\circ$ ,  $\theta_2 = 45^\circ$ 의 돌기가 판넬에 소성변형을 일으키게 된다.

해석은 상부롤러 돌기 열의 개수를 4, 8, 그리고 12개로 수행하여 일정한 결과가 나오는 최소의 돌기의 수를 결정하였다. 실제 금형에는 수백만 개의 돌기가 가공되어 있다. 해석에서는 모든 돌기에 대해 해석을 수행할 수는 없었다. 그래서 최외곽의 돌기에 의한 성형과 내부 돌기에 의한 성형 결과는 다르지만, 어느 정도 안쪽에 위치한 돌기에서부터는 일정한 성형 패턴의 결과가 나올 것이라 가정하고 그 결과를 관찰하였다. 그리고, 성형 공정 인자에 대한 영향을 파악하기 위해,

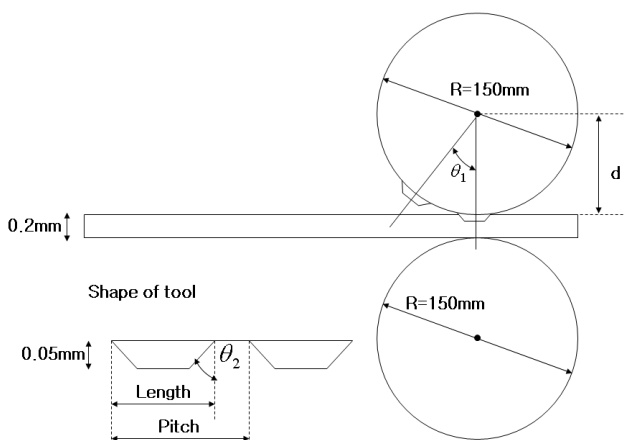


Figure 1. Configuration of the analysis model.

돌기의 구배각  $\theta_2$ 를  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ , 그리고  $45^\circ$ 로 변화시키면서 그 결과를 관찰하였다. 해석은 탄성복원형상을 고려하고 해의 정확도를 확보하기 위해 탄소성으로 수행하였다.

### 2. 유한요소 격자 및 경계조건

범용 3D CAD 프로그램 Pro-Engineer을 이용하여 소재와 금형에 대한 모델링을 수행하였고, 그 결과를 STL 파일로 변환하여 해석프로그램인 Deform-3D에서 읽어 들여 해석에 적합한 요소로 분할하였다. 변형이 이루어지는 박판소재는 200000개의 요소로 이산화 하였다. 격자는 소성변형이 크게 발생하고 주 관심대상인 소재의 중심부에 비교적 크기가 작은 요소를 적용하였고 압축 인장에 의한 소성변형을 정확히 해석하고자 두께방향으로의 격자를 충분히 하였다.

격자의 개수에 따른 해의 정확성을 판단하기 위하여 격자의 개수를 50000개에서 500000로 변화시키면서 그 양상을 관찰하였다. 요소의 종류는 격자재생성이 용이한 사면체 요소를 이용하였다. 상하부 롤러는 강체로 가정하였다. 롤러(Roller)의 회전속도는 상·하부 롤러 모두 1 rad/s를 적용하였다. 해석에서 속도를 설정하였지만, 유동응력을 점소성 모델로 묘사하지 않았기 때문에 롤러의 속도는 해석의 결과에 영향을 주지 않는다. 상·하부 롤러와 판넬과의 마찰조건은 냉간 가공에서 일반적으로 적용이 되는 전단응력마찰  $m=0.12$ 로 설정하였다.

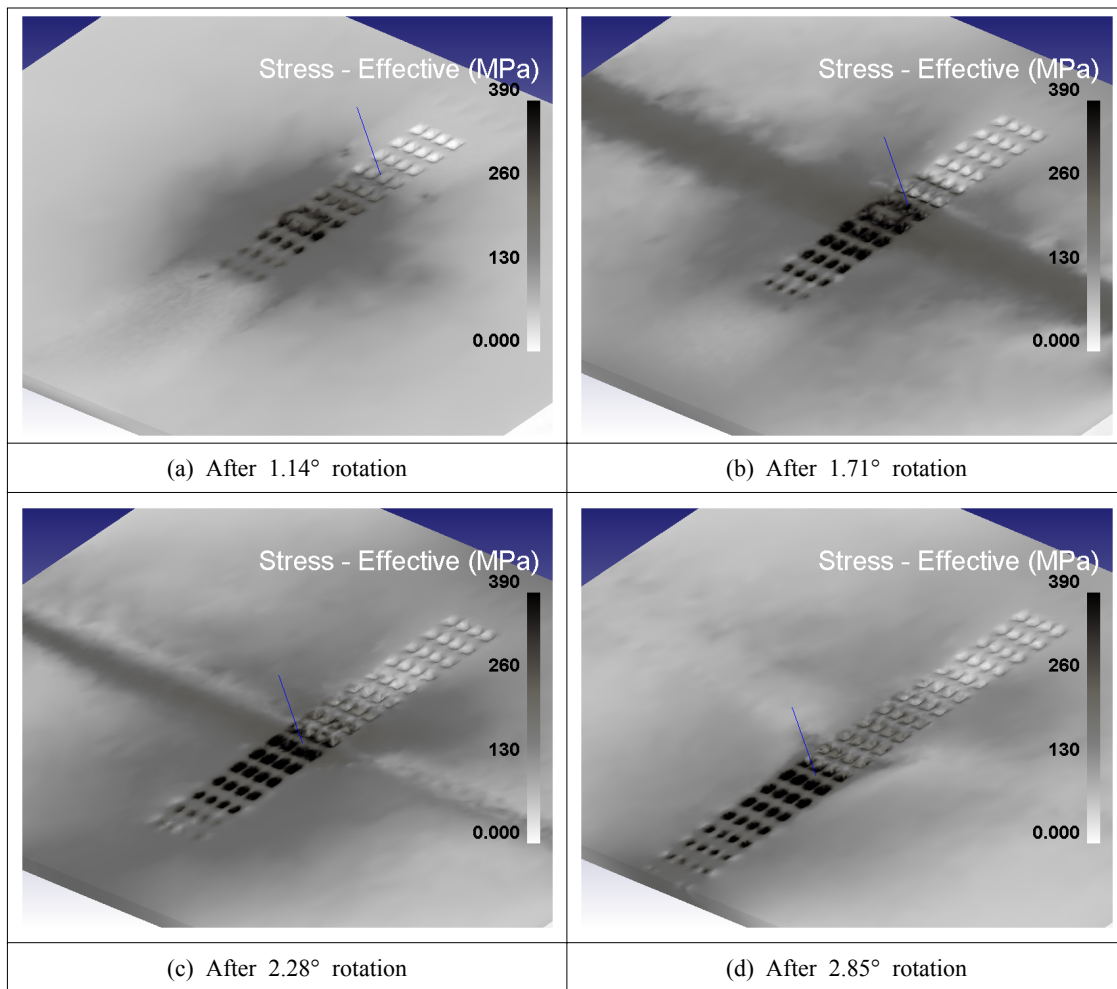
해석은 다음과 같이 두 단계로 수행되었다.

1) 수백만개의 돌기에 대해 해석을 수행하는 대신에 폭 방향으로 돌기의 수를 4, 8, 12개로 바꾸어 가면서 롤-롤 성형을 해석하였다. 이 해석의 결과를 바탕으로 해석의 결과의 정확도를 확보할 수 있는 최소의 돌기 열의 수를 결정하였다. Figure 2부터 Figure 4까지가 이 해석의 결과이다.

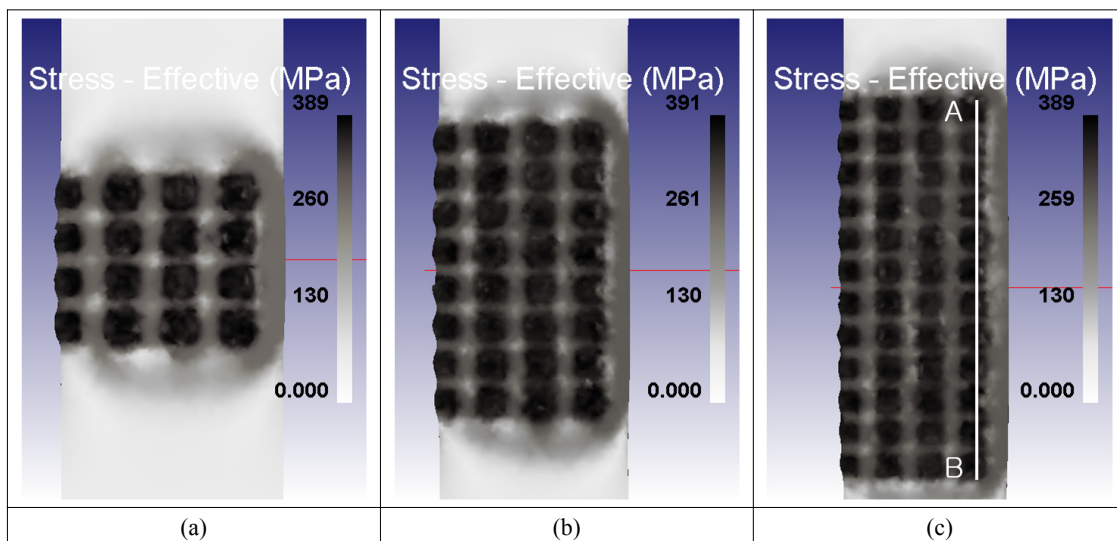
2) 상부롤에 가공된 돌기 형상의 영향과 성형 온도의 영향을 파악하기 위한 해석에서는 롤-롤 성형을 해석하지 않고 단순 압입으로 해석하였다. 본 공정에서 롤의 직경은 돌기의 크기에 비해 매우 크다. 롤의 직경은 돌기의 높이에 비해 3000배이다. 그래서 회전 효과는 무시할 수 있다고 가정하고 압입 해석으로 공정인자의 영향을 파악하였다. Figure 5부터가 이 해석의 결과이다. 해석 결과가 패턴마다 반복된다고 가정하고 돌기 형상의 중간 부분을 나누어서 해석하고 나누어진 경계 부분은 대칭 조건을 부여하고 해석하였다 (Figure 5).

### 3. 소재의 물성

성형에 이용된 소재는 알루미늄소재 (Al 6111-T4)<sup>10</sup>이다. 판넬에 사용된 소재의 물성은 Table 1과 같고 유동응력-변형률 물성은 Johnson-Cook<sup>11</sup>모델을 이용하였다. Johnson-cook 모델은 변형률경화, 변형률속도 경화, 열연화의 영향을 고려하여 식 (1)과 (2)와 같이 표현된다.



**Figure 2.** Effective stress distributions on the sheet as the forming proceeds.



**Figure 3.** Effective stress distributions on the sheet for the number of patterns of (a) 4, (b) 8, and (c) 12.

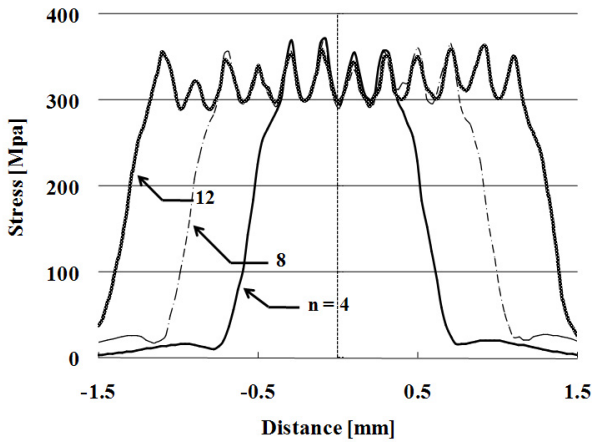


Figure 4. Effective stress distribution along the path AB shown in Figure 3 for various protrusions number.

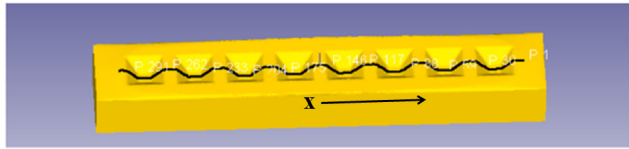


Figure 5. Deformed shapes after indentation forming.

Table 1. Material properties of workpiece and roller

	Workpiece	Roller
Material	Al 6111-T4	Rigid body
A	150 MPa	
B	412 MPa	
C	0	
n	0.66	
m	2.16	
Melting temperature	662 °C	

$$\bar{\sigma} = (A + B\bar{\varepsilon}^n) \left(1 + C \ln \frac{\bar{\varepsilon}}{\varepsilon_0}\right) (1 - (T^*)^m) \quad (1)$$

$$T^* = (T - T_{room}) / (T_m - T_{room}) \quad (2)$$

여기서,  $\bar{\sigma}$ 는 유효응력,  $\bar{\varepsilon}$ 은 등가소성변형률, 그리고, A, B, C, n, m은 피팅 계수이다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 패턴열의 개수에 따른 해석 결과

Figure 2는 롤-롤 성형 후 판넬의 변형형상과 응력분포를

롤의 회전 각도별로 보여준다. 롤러가 회전하면서 진행 방향으로 미세 패턴을 만들고 있다. 국부 성형이 일어나는 부분에서 약 390 MPa의 유효응력이 발생하는 것을 확인할 수 있으며 성형을 마친 부분에서는 점진적으로 응력이 사라지는 것을 확인할 수 있다.

Figure 3에 보인 해석 결과는 해석시간을 짧게 하여 결과를 보기 위해 실제보다 매우 작은 패턴의 수로 해석한 결과이다. 실제 태양광전지 집진판의 경우 수만 개의 패턴 열이 성형되어야 한다. 성형해석으로 수만 개열의 패턴의 성형을 해석하는 것은 컴퓨터 능력과 메모리 등을 고려할 때 불가능하다. 그래서 해석으로 공정을 설계하기 위한 사전단계로 최소한 몇 개열의 패턴을 해석해야 전체를 해석하는 것과 같은지를 판단하기 위해 패턴 열의 개수를 4, 8, 그리고 12개로 변화시키면서 해석을 수행하여 그 양상을 관찰하였다. Figure 3은 패턴의 열의 수에 따른 응력분포를 보여준다. 성형이 되는 열의 부분의 응력은 패턴의 열의 개수에 상관없이 전체적으로 비슷한 응력 분포를 나타내는 것을 확인할 수 있다. Figure 4는 판넬의 폭 방향 단면 (Section A-B)에서의 응력과 변형률 분포를 보여준다. 돌기의 개수와 상관없이 응력과 변형률이 같은 값으로 분포하는 것으로 보아 돌기의 개수는 성형에 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 응력과 변형률은 돌기를 지나면서 주기적인 분포를 가진다.

#### 2. 격자 개수에 따른 해석 결과

격자의 개수가 해의 정확성에 끼치는 영향을 판단하고 적정 격자 개수를 결정하기 위해 격자 개수를 Table 2의 조건과 같이  $5 \times 10^4$  개에서  $50 \times 10^4$  개로 변화시키면서 양상을 관찰하였다. 또한 금형의 반경에 비해 패턴의 사이즈가 무시할 수 있을 만큼 작기 때문에 단순 형상의 압입 해석만으로도 실제의 롤-롤 성형 공정의 예측이 가능하다고 가정하여 해석의 효율성을 위해 모든 경우의 해석을 Figure 5의 형상과 같은 단순 압입 해석을 수행하여 그 양상을 관찰하였다. Figure 6은

Table 2. Number of mesh for analysis

Volume of specimen :  $0.108 \text{ mm}^3$   
 Volume of protrusion :  $5.4 \times 10^{-5} \text{ mm}^3$

Number of mesh	Average volume of a mesh [ $\text{mm}^3$ ]	Average number of mesh per protrusion
$5 \times 10^4$	$2.16 \times 10^{-6} \text{ mm}^3$	25
$10 \times 10^4$	$1.08 \times 10^{-6} \text{ mm}^3$	50
$15 \times 10^4$	$0.72 \times 10^{-6} \text{ mm}^3$	75
$20 \times 10^4$	$0.54 \times 10^{-6} \text{ mm}^3$	100
$25 \times 10^4$	$0.432 \times 10^{-6} \text{ mm}^3$	125
$30 \times 10^4$	$0.36 \times 10^{-6} \text{ mm}^3$	150
$50 \times 10^4$	$0.216 \times 10^{-6} \text{ mm}^3$	250

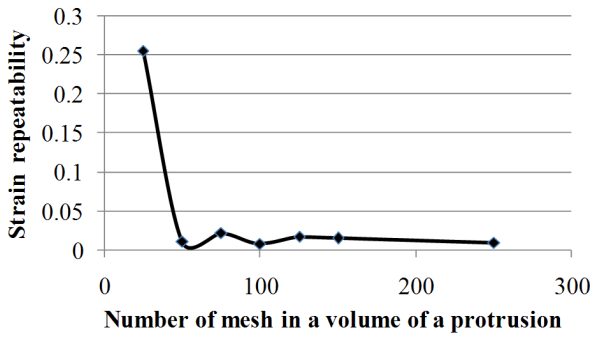


Figure 6. Effect of mesh size on strain repeatability.

이상적인 해석 결과에서 응력 변형률 분포가 중심축을 기준으로 좌우 대칭이라고 판단하여 Figure 5에서와 같이 한 경로를 추적하며 응력을 추출하여 격자 개수에 따른 응력 좌우 비대칭성을 나타내는 그래프이다. 좌우 비대칭성이 격자개수가 많아질수록 작아지는 것을 확인 할 수 있으며, 격자의 수 20만개 즉 한 개의 돌기 부피에 약 100개 이상의 격자를 사용한 경우 부터 해석의 결과가 안정적이 되는 것을 확인할 수 있다.

3. 패턴의 구배각 및 형상에 따른 해석 결과

패턴의 형상 길이가 150 μm이고 피치가 200 μm인 경우와 길이가 100 μm이고 피치 150 μm인 경우 각각에 대해 구배각을 10°, 20°, 30°, 그리고 45°로 변화시키면서 성형 해석을 수행하였다. Figure 7과 Figure 8은 구배각 별로 스트로크에 따른 성형 하중을 계산한 것이다. 성형하중이 스트로크에 따라 완만하게 증가하다가 어느 시점 이후 급격히 증가하는 것을 볼 수 있는데 이것은 소재가 금형 내부에 완전 밀폐되어 나타나는 효과이며, 하중이 급격히 증가하는 스트로크 이상에서는 더 이상의 성형은 무의미하다고 판단하여 그 시점을 성형 완료 시점으로 결정하였다. Table 3은 Figure 7과 Figure 8에서 결정된 구배각에 따른 적정 성형 깊이이다. Figure 7과 Figure 8에서 구배각이 작을수록 성형하중이 높으며 상대적으로 빨리 성형

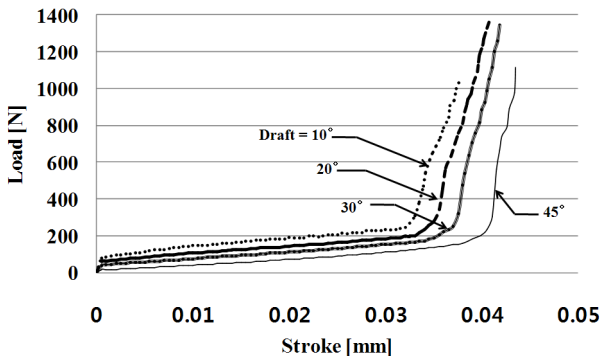


Figure 7. Predicted forming loads for various draft angles(protrusion length=150 μm, pitch=200 μm).

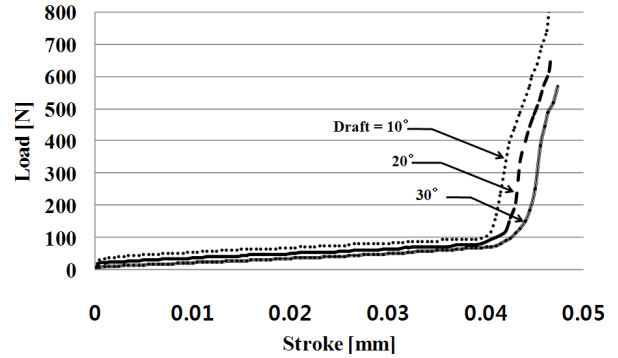


Figure 8. Predicted forming loads for various draft angles(protrusion length=100 μm, pitch= 150 μm).

Table 3. Forming stroke for various draft angles

Shape of protrusion		Stroke (μm)
Length, Pitch [μm]	Draft angle [degree]	
Length : 150 μm Pitch : 200 μm	10°	33 μm
	20°	35 μm
	30°	37 μm
	45°	41 μm
Length : 100 μm Pitch : 150 μm	10°	40 μm
	20°	42 μm
	30°	44 μm

을 마치는 것을 확인할 수 있다. 이것은 구배각이 작을수록 상부물에 가공된 돌기의 부피가 크고 그렇지 않은 부분은 부피가 작다. 그렇기 때문에 구배각이 작을수록 많은 부피의 소재가 돌기 부분에서 빠져 나와 벽 부위를 채우기 때문으로 사료된다.

해석으로 결정한 성형 깊이만큼 성형을 마쳤을 때 성형성 및 충진률을 확인하고 응력 및 변형률 분포를 관찰하였다. Figure 9는 구배각에 따른 성형결과의 이미지를 보여준다. 성형을 마친 후에도 패턴의 모서리 부분에는 완전 충진이 이뤄지지 않았음을 확인할 수 있으며 구배각이 작을수록, 즉 벽면이 직각에 가까울수록 불완전 성형이 이루어짐을 확인할 수 있다.

Figure 10 은 길이 100 μm, 피치 150 μm인 형상의 돌기를 구배각을 변화시키면서 해석한 결과를 Figure 5와 같은 경로를 따라가며 추출한 응력분포를 나타낸 그래프이다. Figure 10의 결과를 보다 자세히 관찰하기 위해, Figure 11과 Figure 12에 패턴 한 개에 대해 경로를 따라 추출한 응력과 변형률 결과를 도시하였다. 구배각이 작을수록 돌기 구석 부분에서 큰 응력과 변형율이 발생할 것으로 예측하였는데, 해석 결과는 구배각이 작을수록 응력과 변형율이 작음을 보여준다. 이것은 구배각이 클 수록 돌기가 뾰족해 지기 때문에 돌기가

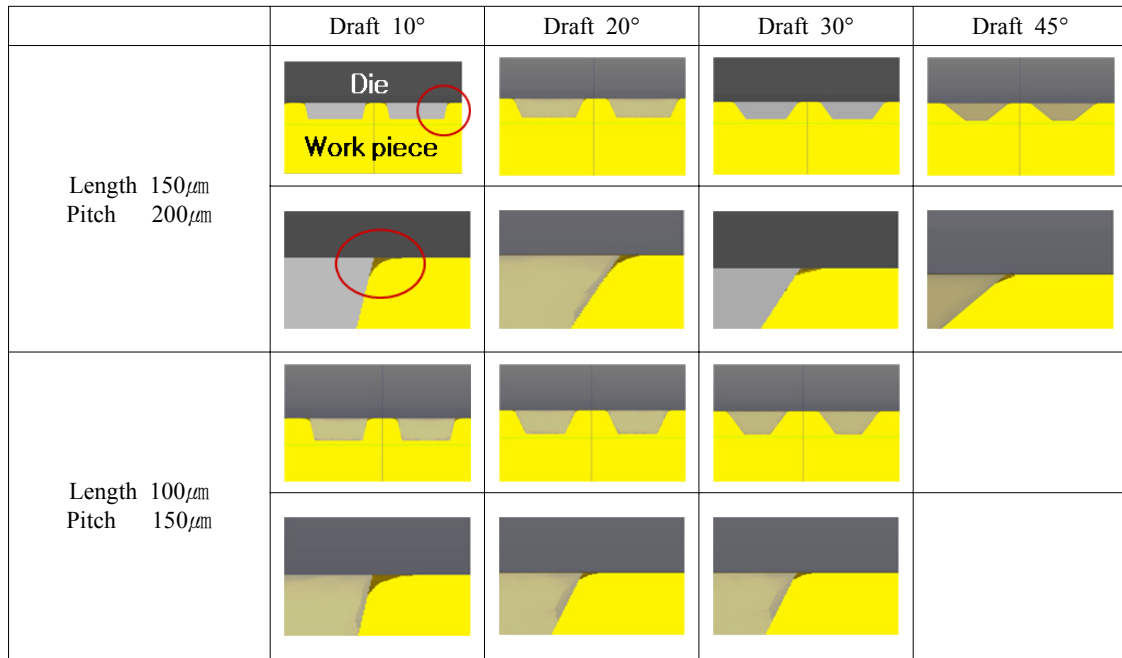


Figure 9. Underfilled shapes for various draft angles.

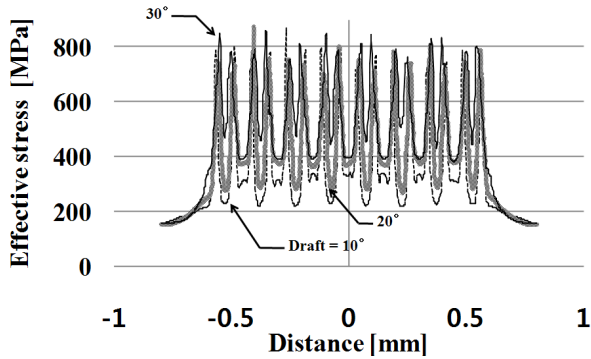


Figure 10. Effective stress distributions for various draft angles along the path shown in Figure 5.

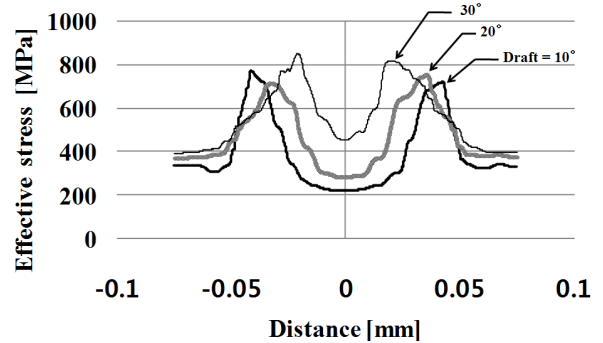


Figure 12. Detailed view of effective stress distributions for one pattern.

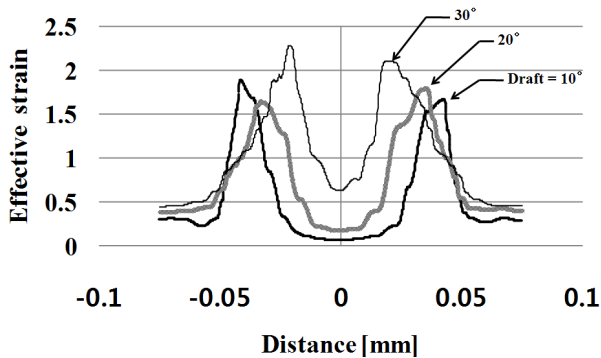


Figure 11. Detailed view of effective strain distributions for one pattern.

있는 국부에서만 변형이 발생하고, 구배각이 큰 경우 큰 부피의 소재가 유효를 하기 때문에 보다 넓은 영역에서 변형이 발생하기 때문으로 사료된다.

#### 4. 성형 온도에 따른 해석 결과

고온에서는 금속의 성형성은 향상되고 기계적 강도는 작아져 적합한 성형 조건이 형성된다. 본 연구에서는 성형 온도를 25 °C, 200 °C, 그리고 400 °C 로 변화시키면서 해석을 수행하여 성형성의 변화를 관찰하였다. Figure 13은 성형온도에 따른 유효응력의 분포이며, Figure 14는 온도에 따른 유효응력 그래프이다. 유효응력이 성형온도가 높을수록 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 본 해석을 통해 실제 공정에서 성형 온도를 높일

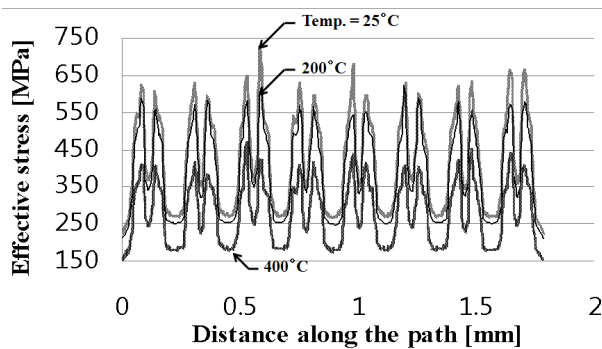


Figure 13. Effective stress distributions for various forming temperatures.

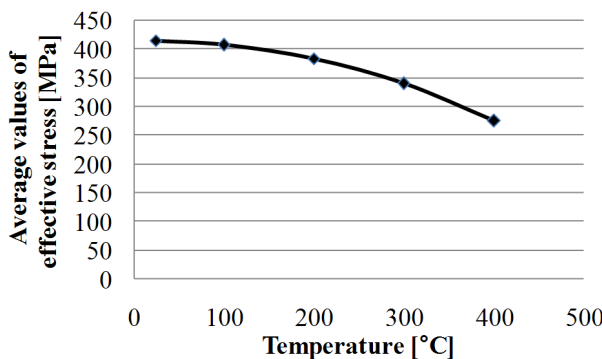


Figure 14. Average values of effective stress along the path shown in Figure 5 for various forming temperatures.

경우 소재에 걸리는 응력을 낮출 수 있다는 것을 알 수 있다. 그리고, 알루미늄 소재의 경우 고온에서 연신율이 좋아지기 때문에 성형성이 크게 개선될 것으로 보인다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 수십~수백 마이크로 크기의 패턴을 롤-롤 성형 공정으로 성형하기 위해 유한요소 해석을 수행하였다. 해석으로 공정을 설계하기 이전에 컴퓨터 능력과 메모리 문제로 수백만 개의 패턴에 대한 해석이 불가능하기 때문에 최소한의 패턴에 대해 해석을 수행하기 위해 사전 연구를 수행하였다. 패턴의 열의 수 4, 8, 그리고 12개에 대해 롤-롤 성형 공정을 해석하였다. 4~12개의 패턴 열에 대한 해석 결과가 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. 그렇기 때문에, 한 개의 해석을 수행하는데 수개월이 걸릴 수도 있는 수백만 개의 패턴에 대한 해석을 수행하지 않고도 단지 4개 또는 8개의 패턴에 대한 해석만으로도 신뢰성을 가지고 공정을 설계할 수 있음을 확인하였다. 동일 해석 조건에서 격자의 개수를 다르게 해석을 수행함으로써 한 개의 패턴 안에 약 100개의 격자를 적용할 경우 격자 개수가 적절함을 확인하여 해석의 신뢰성을 확보하

였다. 형상의 크기, 피치 그리고 구배각을 변화시키면서 스트로크에 따른 성형하중을 분석하여 형상별 최적의 성형 깊이를 결정하였으며 결정된 성형 깊이만큼 성형 하여 구배각이 성형성에 미치는 영향을 파악하였다. 또한, 소재의 층진율을 분석한 결과 구배각이 작은 경우 모서리 부분에서 불완전 성형이 이뤄지는 것을 확인하였다. 또한 온도를 변화시키면서 성형해석을 수행함으로써 성형온도를 높일 경우 소재에 적은 응력이 발생하는 것을 알 수 있었다. 본 연구를 통해 분석한 성형에 영향을 끼치는 인자들은 추후 마이크로 롤-롤 성형 공정 설계에 있어 귀중한 자료가 될 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 지식경제부가 지원한 전략기술개발사업과, 지식경제부와 한국산업기술재단의 전략기술인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

#### 참 고 문 헌

1. K. H. Kim, "Design of Forming Rolls using Finite Element", *Trans. Kor. Soc. Ocean Eng.*, **13**, 75 (1999).
2. Society of Manufacturing Engineers, *Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4thed*, **2**, 8 (1984).
3. B. Y. Joo, S. W. Baek, and S. I. Oh, "Micro Channel Forming with Ultra Thin Metal Foil", *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng.*, **30**, 157 (2006).
4. J. Y. Kim, S. M. Joo, and H. K. Kim, SuperPlastic Micro-extrusion for Micro-gears, *Trans. of Kor. Soc. Machine Tool Eng.*, **17**, 1 (2008).
5. Geiger, M., Kleiner, M., Eckstein, R., Tiesler, N. and Engel, U., "Microforming," *Annals of the CIRP*, **50**, 445 (2000).
6. Lke, H. and Plancak, M., "Coining Process as a Means of Controlling Surface Microgeometry", *Int., J., Mater. Process. Technol.*, **80**, 101 (1998).
7. Joo, B.-Y. and Oh, S.-I., "Development of Micro Punching System", *Annals of the CIRP*, **50**, 191 (2001).
8. J. J. Park, H. S. Hwang, Y. S. Kim, and H. C. Jeon, "Design of Groove and Preform for Roll Forming of PDP Barrier Ribs", *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng.*, **26**, 2082 (2002).
9. S. H. Cha, M. S. Shin, J. H. Kim, J. B. Kim, H. J. Lee, and J. H. Song, "On the Effective Analysis Method of Micro Pattern Forming on the Thin Sheet Metal", *Proc. Kor. Soc. Tech. Plasticity, Spring*, **56** (2009).
10. D. Li and A. Ghosh, "Tensile Deformation Behavior of Aluminum Alloys at Warm Forming Temperatures", *Mater. Sci. Eng.*, **A352**, 279 (2003).
11. Johnson, G. R. and Cook, W. H., "A constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strain, High Strain Rates and Temperatures", *Proceedings of the 7th international symposium on ballistics, Den Haag, Netherlands*, **541** (1983).