

유한요소해석을 이용한 마이크로 박판 미세 패턴 롤-롤 성형공정 설계

차성훈¹ · 신명수¹ · 이해진² · 김종봉[#]

Design of Roll-to-Roll Forming Process for Micro Pattern on the Thin Sheet Metal by Finite Element Analysis

S.-H. Cha, M.-S. Shin, H.-J. Lee, J.-B. Kim

(Received January 25, 2010 / Revised March 8, 2010 / Accepted March 23, 2010)

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. However, it is difficult to apply to the forming of micro scale or sub-micro scale pattern. In this study, the roll forming processing for the micro scale is designed and analyzed. The forming of micro pattern for small electric device such as LCD panel by incremental roll forming process is analyzed. Firstly, the optimum analysis conditions are found by several analyses. And then, formability is analyzed for various protrusion shapes at various forming temperatures. The formability is evaluated in terms of filling ratio and damage value. The filling ratio is defined from the tool geometry and critical damage is determined from the analysis of uniaxial tensile test. Finally, optimum forming conditions that guarantee the successful forming are found.

Key Words : Roll-to-Roll Forming, FEM(Finite Element Method), Metal Sheet

1. 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[1,2]. Metal Roll Forming 기술은 공정을 단순화시킬 수 있는 장점과, 대량생산을 통해 생산성을 높일 수 있다는 점에서 금속 가공기술에 있어 매우 중요하다고 할 수 있다.[3] 본 연구에서는 생산성이 우수한 롤포밍 공정을 응용한 롤-롤(Roll-to-roll) 성형공정으로 박판에 미세한 홈을 성형하는 공정을 제안하고

자 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 유한요소 해석을 통해 성형공정을 분석하였다.

마이크로 크기 및 서브 마이크로 크기의 금속성형은 마이크로 압출[4] 마이크로 엠보싱[5,6], 마이크로 펀칭[7] 등의 공정에 대한 연구가 진행되었다. 금속성형 공정 중에서 마이크로 롤-롤 성형 공정은 높은 생산성으로 인해 PDP 격벽구조, 솔라셀 집전판, 기관회로 설계 등의 넓은 범위에서 활용이 검토되고 있다. Park[8] 등은 고분자를 이용한 마이크로

1. 서울산업대학교 NID 융합대학원
2. 한국생산기술연구원 융합생산기술연구부
교신저자 : 서울산업대학교 자동차공학과,
E-mail : jbkim@snut.ac.kr

롤-롤 성형으로 PDP 격벽구조(barrier rib)를 성형하는 것에 대한 해석적 연구를 수행하였다.

본 연구는 반복형상을 가지는 전자부품 기판 성형을 위한 롤-롤 성형 공정을 설계하기 위해 공정을 해석하고자 한다. 하지만, 전자부품 기판은 수백만 개의 홈을 가지고 있어 해석에 어려움이 있다. 본 연구에서는 신뢰성을 확보하기 위한 최소의 해석 홈의 수를 결정하였고[9] 홈의 형상과 크기에 따른 최적 성형 깊이를 결정하였다. 균열은 성형시 발생하는 중요한 불량 요인 중 하나이다. 균열을 판단하기 위한 노력으로 Xue-wierzbicki[10], wilkins[11], Johnson-Cook[12], Cockcroft-Latham[13] 등 다양한 방정식의 형태로 균열 예측 연구가 진행되어 왔다.[14] 본 연구에서는 Cockcroft-Latham[13]의 균열 예측 방정식을 이용하여 성형공정 후 홈의 형상과 크기에 따른 균열 발생 유무를 예측하였다.

2. 해석

2.1 형상모델링

해석은 범용 해석프로그램인 Deform-3D를 이용하여 수행하였다. Fig. 1은 해석을 위한 개략적인 형상을 보여준다. 두께 0.2mm의 소재에 직경 150mm의 상하부 롤러를 이용하여 상부 롤러에 패턴된 높이가 0.05mm, $\theta_1 = 0.2^\circ$, $\theta_2 = 45^\circ$ 의 돌기가 관벌에 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 제외각의 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, 돌기의 구배각 θ_2 를 10°, 20°, 30°, 그리고 45°로 변화시키면서 그 결과를 관찰하였다.

2.2 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.

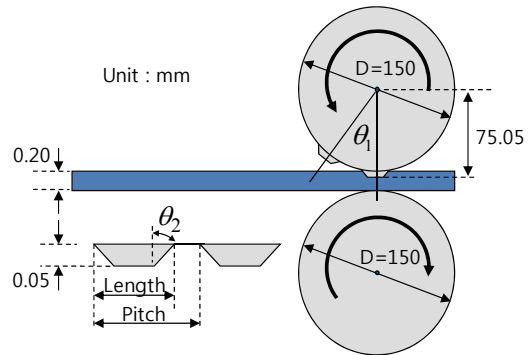


Fig. 1 Configuration of the analysis model

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. 요소의 종류는 격자재 생성이 용이한 사면체 요소를 이용하였다. 상하부 롤러는 강체로 가정하였다. 롤러(Roller)의 회전속도는 상·하부 롤러 모두 1rad/s를 적용하였다. 해석에서 속도를 설정하였지만, 유동응력을 점소성 모델로 묘사하지 않았기 때문에 롤러의 속도는 해석의 결과에 영향을 주지 않는다. 상·하부 롤러와 소재와의 마찰조건은 냉간 가공에서 일반적으로 적용이 되는 전단응력마찰 $m=0.12$ 로 설정하였다.

해석은 다음과 같이 두 단계로 수행되었다.

(1) 수백만 개의 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. Fig. 2와 Fig. 3 이 이러한 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. Fig. 5 부터가 이 해석의 결과이다. 해석 결과가 패턴마다 반복된다고 가정하고 돌기 형상의 중간 부분을 나누어서 해석하고 나누어진 경계 부분은 대칭 조건을 부여하고 해석하였다.

2.3 소재의 물성

성형에 이용된 소재는 알루미늄소재(Al 6111-T4)[15]이다. 판넬에 사용된 소재의 물성은 Table 1 과 같고 유동응력-변형률 물성은 Johnson-Cook[16] 모델을 이용하였다. Johnson-cook 모델은 변형률 경화, 변형률속도 경화, 열연화의 영향을 고려하여 다음 식(1)과 같이 표현된다.

$$\bar{\sigma} = (A + B\bar{\epsilon}^n)(1 + c \ln \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0})(1 - (T^*)^m) \quad (1)$$

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

여기서, $\bar{\sigma}$ 는 유동응력, $\bar{\epsilon}$ 은 등가소성변형율, 그리고, A, B, C, n, m은 피팅 계수이다.

Table 1 Johnson-Cook coefficients for Al6111-T4

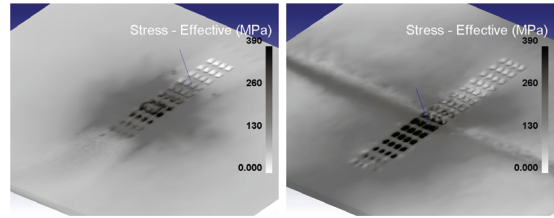
A	150 MPa
B	412 MPa
C	0.1
n	0.66
m	2.16
Melting Temp	662°

3. 결과 및 고찰

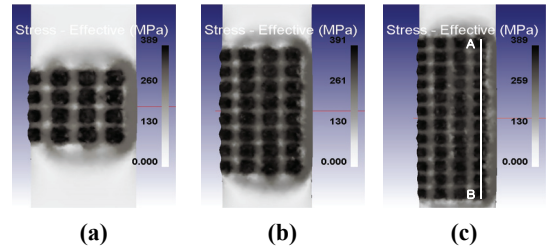
3.1 패턴열의 개수에 따른 해석 결과

Fig. 2 는 롤-롤 성형 후 판넬의 변형형상과 응력분포를 롤의 회전 각도 별로 보여준다. 롤러가 회전하면서 진행 방향으로 미세 패턴을 만들고 있다. 국부 성형이 일어나는 부분에서 약 390Mpa의 유효응력이 발생하는 것을 확인할 수 있으며 성형을 마친 부분에서는 점진적으로 응력이 사라지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 3에 보인 해석 결과는 해석시간을 짧게 하여 결과를 보기 위해 실제보다 매우 작은 패턴의 수로 해석한 결과이다. 실제 전자부품 기관의 경우 수만 개의 패턴 열이 성형되어야 한다. 성형해석으로 수만 개 열의 패턴의 성형을 해석하는 것은 컴퓨터 능력과 메모리 등을 고려할 때 불가능하다. 그래서 해석으로 공정을 설계하기 위한 사전단계로 최소한 몇 개 열의 패턴을 해석해야 전체를 해석하는 것과 같은지를 판단하기 위해 패턴 열의 개수를 4, 8, 그리고 12개로 변화시키면서



(a) After 1.14° rotation (b) After 1.71° rotation
Fig. 2 Effective stress distributions on the sheet as the forming proceeds

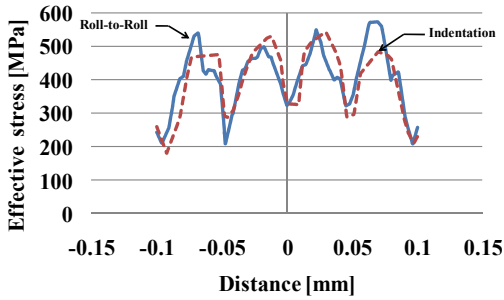


(a) (b) (c)
Fig. 3 Effective stress distributions on the sheet for the number of patterns of (a) 4, (b) 8, and (c) 12

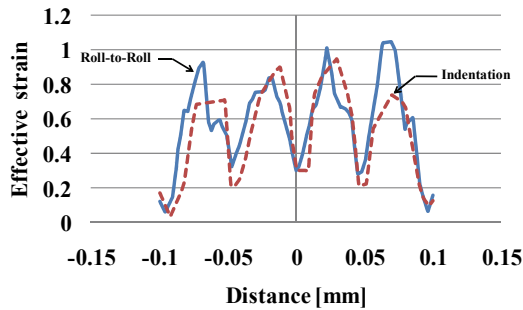
해석을 수행하여 그 양상을 관찰하였다. Fig. 3은 패턴열의 수에 따른 응력분포를 보여준다. 성형이 되는 돌기 부분의 응력은 패턴열의 개수에 상관 없이 전체적으로 비슷한 응력 분포를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 기존의 연구 결과[9]에서 돌기의 수를 4개 이상 해석 하면 그 이상의 개수로 해석한 결과와 차이가 나지 않음을 보였다.

3.2 롤-롤 성형과 압입성형 비교

본 연구에서 제한한 롤-롤 성형을 해석으로 묘사할 시 소대에 과도하게 많은 격자를 적용해야 해의 신뢰성을 얻을 수 있다. 하지만 격자의 개수가 많아지면 해석의 소요시간이 기하급수적으로 늘어나기 때문에 해석에 어려움이 있다. Fig. 4 는 Fig. 2의 실제 롤-롤해석 결과와 Fig. 3의 단순압입해석의 결과의 응력 및 변형률 분포를 비교한 그 래프이다. Fig. 4 에서 두 공정의 응력 변형률 분포 양상이 유사한 것을 알 수 있다. 이것은 금형의 반경에 비해 패턴의 사이즈가 무시할 만큼 작기 때문에 기인한 것으로 해석의 효율성을 위해 단순압입 해석만으로도 롤-롤 성형결과를 예측할 수 있다는 것을 알 수 있다. 이후 해석의 결과는 단순압입 공정 해석을 이용하여 롤-롤 성형공정을 예측하였다.



(a) Effective stress distributions



(b) Effective strain distributions

Fig. 4 Effective (a)stress and (b)strain distributions for comparison of the roll-roll forming results with the indentation results

3.3 패턴의 구배각 및 형상에 따른 성형 깊이 결정

패턴의 형상 길이가 150 μm 이고 피치가 200 μm 인 경우와 길이가 100 μm 이고 피치 150 μm 인 경우 각각에 대해 구배각을 10°, 20°, 30°, 그리고 45°로 변화시키면서 성형 해석을 수행하였다. Fig. 4는 구배각 별로 스트로크에 따른 성형하중을 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 2는 Fig. 5에서 결정된 구배각에 따른 적정 성형 깊이이다. Fig. 5에서 구배각이 작을수록 성형하중이 높으며 상대적으로 빨리 성형을 마치는 것을 확인할 수 있다. 이것은 구배각이 작을수록 상부롤에 가공된 돌기의 부피가 크고 그렇지 않은 부분은 부피가 작다. 그렇기 때문에

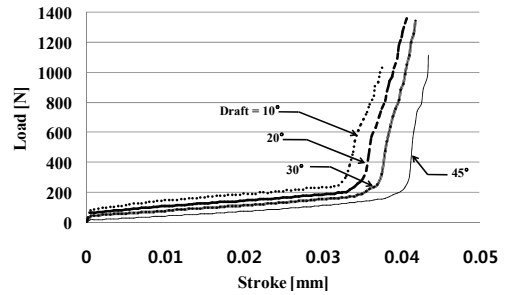


Fig. 5 Forming loads for various draft angles (protrusion length=150 μm , pitch= 200 μm)

Table 2 Forming stroke for various draft angles

Shape of protrusion		Stroke
Length, Pitch [μm]	Draft angle [$^\circ$]	[μm]
Length : 150 μm Pitch : 200 μm	10 $^\circ$	33 μm
	20 $^\circ$	35 μm
	30 $^\circ$	37 μm
	45 $^\circ$	41 μm
Length : 100 μm Pitch : 150 μm	10 $^\circ$	40 μm
	20 $^\circ$	42 μm
	30 $^\circ$	44 μm

구배각이 작을수록 많은 부피의 소재가 돌기 부분에서 빠져 나와 벽 부위를 채우기 때문으로 사료된다.

3.4 성형 충진률 예측

해석을 통해 성형 시 불량요인 중 하나인 성형 미충진을 구배각도에 따라 예측하였다. 3.2절에서 결정된 성형 깊이를 이용하여 결정된 깊이만큼 성형하였을 때 한 개의 돌기에서 금형과 소재의 중심부 단면 형상을 이차원화 하여 비교하였고 완전성형이 이루어지지 않은 미충진량을 구배각에 따라 다음과 같이 정량화 하여 비교하였다.

$$FR = A_{\text{Formed_protrusion}} / A_{\text{Desired_protrusion}} \quad (3)$$

Fig. 7은 소재의 미충진 형상을 관찰하기 위한 소재와 금형의 단면을 보여준다. 소재의 요소 크기가 큰 경우나 코너가 예리한 경우 미충진이 발생할 수 있다. 요소는 충분히 작게 되어 미충진 요인이 아니라고 판단이 되어 코너의 각도에 따른 충진을 분석하였다.

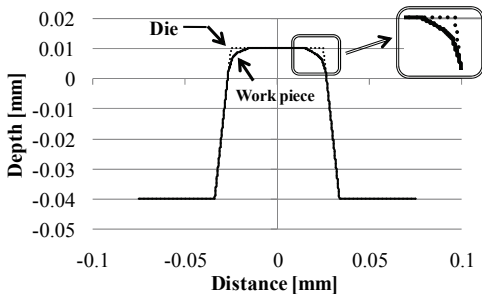


Fig. 6 Section profiles of die and work-piece for the draft angle of protrusions of 10°

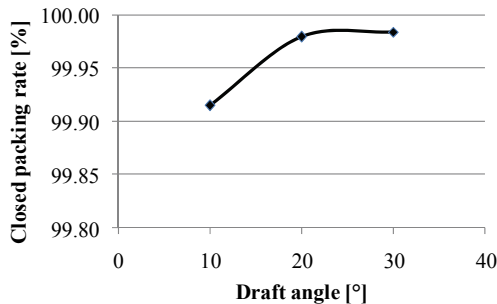


Fig. 7 Closed packing rate as the draft angle

Fig. 7은 Fig. 6에서의 충전된 부분의 넓이를 구하여 식 (3)에 정의한 충전률(FR : Filling Ratio)을 구배각에 따라 구해 나타낸 그래프이다. 구배각이 10°인 경우 충전률은 99.91%인 반면 30°인 경우 99.98%로 구배각이 클수록 완전 성형에 가까워지는 것을 확인 할 수 있었다. 이것은 구배각이 큰 경우 소재의 유동이 원활하여 구석까지 유입될 수 있기 때문으로 사료된다.

3.5 균열 예측해석 결과

해석을 통해 구해진 여러 값들을 Cockcroft-Latham(C-L) 예측식을 적용하여 성형 후 균열 발생 유무를 판단하였다. Cockcroft-Latham은 최대주응력과 유효변형률을 고려하여 다음 식과 같이 표현된다.

$$ND = \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \sigma_1 d\bar{\epsilon} / C \quad (4)$$

ND(Normalized Damage)는 정규화된 데미지 값이고, C는 정규화 상수이다. 본 연구에서는 소재의 연신률[16] 만큼 인장시 소재에 분포하는 (C-L)값을 데미지 임계값으로 하고 성형시 소재 국부에서

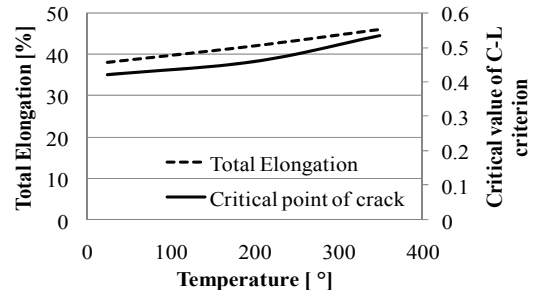


Fig. 8 Total elongation and critical value of C-L criterion as temperature.

Table 3 Normalized crack for various draft angles

(Value of normalized damage >1 : Crack occurred)

Draft angle	Maximum normalized damage	
	Length:150 μ m, Pitch :200 μ m	Length:100 μ m, Pitch :150 μ m
10°	1.42	1.18
20°	1.10	1.06
30°	0.60	0.67
45°	0.34	

발생하는 최대 (C-L)값을 임계값으로 나누어 무차원화 하여 균열의 유무를 판단하였다.

Fig. 8은 온도에 따른 연신률과 해석을 통하여 균열 발생시점에서의 시편에 발생하는 손상 임계값을 나타낸 그래프이며, Table 3은 상온에서의 돌기의 크기와 구배각에 따른 무차원 값이다. 이때 값이 1이상인 구배각 10°, 20°의 경우 균열이 발생하는 것으로 예측되었으며 구배각 30°, 45°의 경우 균열에 대해 안전한 것으로 확인되었다. 이것은 구배각이 작은 경우 상대적으로 돌기가 뾰족하기 때문에 모서리 국부에서 큰 변형률이 발생하는 것에 기인한 것으로 사료 된다.

4. 결론

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 해석하여 4~12개의

패턴 열에 대한 해석 결과가 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. 그리고 실제 공정인 롤-롤 성형 결과와 압입성형 결과 양상이 유사하여 압입 성형 해석만으로 롤-롤 성형을 예측할 수 있음을 검증하였고 압입 해석으로 인자 영향을 파악하였다. 형상의 크기, 피치 그리고 구배각을 변화시키면서 스트로크에 따른 성형하중을 분석하여 형상 별 최적의 성형 깊이를 결정하였다. 구배각이 성형성 및 균열에 미치는 영향을 파악하였다. 구배각이 작은 경우 모서리 부분에서 불완전 성형이 이뤄지는 것을 확인하였고, 또한 크랙이 발생할 수 있는 가능성이 큰 것으로 예측되었다. Cockcroft-Latham 데미지로 크랙을 예측한 결과 구배각이 10°와 20°인 경우 크랙이 발생할 수 있음을 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 전략기술개발 사업과, 지식경제부와 한국산업기술재단의 전략기술인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참 고 문 헌

- [1] K. H. Kim, 1999, Design of Forming Rolls using Finite Element, J. Kor. Soc. Ocean Eng., Vol. 13, No. 4, pp. 75~81.
- [2] Society of Manufacturing Engineers, Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4th ed, Vol. 2, Chapter 8, 1984.
- [3] B. Y. Joo, S. W. Baek, S. I. Oh, 2006, Micro Channel Forming With Ultra Thin Metal Foil, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng., Vol. 30, No. 2, pp. 157~163.
- [4] J. Y. Kim, S. M. Joo, H. K. Kim, 2008, Superplastic Micro-extrusion for Micro-gears, Trans. of Kor. Soc. Mach. Tool Eng., Vol. 17, pp. 1~7.
- [5] M. Geiger, M. Kleiner, R. Eckstein, N. Tiesler, U. Engel, 2001, Microforming, Annals of the CIRP, Vol. 50/2, pp. 445~459.
- [6] H. Ike, M. Plancak, 1998, Coining Process as a Means of Controlling Surface Microgeometry, J. Mater. Process. Technol., Vol. 80~81, pp. 101~107.
- [7] B.-Y. Joo, S.-I. Oh, 2001, Development of Micro Punching System, Annals of the CIRP, Vol. 50/1, pp. 191~194.
- [8] J. J. Park, H. S. Hwang, Y. S. Kim, H. C. Jeon, 2002, Design of Groove and Preform for Roll Forming of PDP Barrier Ribs, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng., Vol. 26, No. 10, pp. 2082~2088.
- [9] S. H. Cha, M. S. Shin, J. H. Kim, J. B. Kim, H. J. Lee, J. H. Song, 2009, On the effective analysis method of micro pattern forming on the thin sheet metal, Proc. Kor. Soc. Tech. Plasticity, Spring, pp. 53~56.
- [10] L. Wue, 2007, Damage accumulation and fracture initiation in uncracked ductile solids under triaxial loading, Int. J. Solids and Structure, Vol. 44, pp. 5163~5181.
- [11] M. L. Wilkins, R. D. Streit, J. E. Reaugh, 1980, Cumulative-strain-damage model of ductile fracture: simulation and prediction of engineering fracture tests. Technical Report UCRL-53058, Lawrence Livermore National Laboratory, October.
- [12] G. R. Johnson, T. J. Holmquist, 1989, Test data and computational strength and fracture model constants for 23 materials subjected to large strain, high strain rates, and high temperature. Technical Report LA-11463-MS, Los Alamos National Laboratory.
- [13] M. G. Cockcroft, D. H. Latham, 1968, Ductility and the workability of metals., J. Inst. Metals, Vol. 96, pp. 9~33.
- [14] T. Wierzbicki, Y. Bao, Y.-W. Lee, Y. Bai, 2005, Calibration and evaluation of seven fracture models, Int. J. Mech. Sci., Vol. 47, pp. 719~743.
- [15] D. Li, A. Ghosh, 2003, Tensile deformation behavior of aluminum alloys at warm forming temperatures, Mater. Sci. Eng. Vol. A 352, pp. 279~286.
- [16] G. R. Johnson, W. H. Cook, 1983, 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, pp. 541~547.