

Al6063 합금 중공각재 튜브에 의한 프레스 성형 연구

이정국[#], 김원중^{*}

A Study on the Press Forming by Rectangular Tube of Al6063 Alloys

Choung-Kook Lee[#], Won-Jung Kim^{*}

(Received 18 July 2011; received in revised form 30 November 2011; accepted 6 December 2011)

ABSTRACT

In this study, a method for the press forming of rectangular aluminium tube has been proposed. Rectangular aluminium tube has high stiff as the cold steel which can be lighter over 30% weight. It is increased every year by being recycled over 80%. Press die consists of punch, wing-die and holder for aluminium tube bending. When punch is applied with aluminium tube, holder is operated as same punch and wing-die is rotated through hinge. Stress-strain relations and springback are considered by bending angle of aluminium tube. In this study, the behaviors on tubes of square aluminium and rectangular aluminium with different thickness and area are established by the analysis of DEFORMTM-3D program. Reducing fuel consumption is expected by using the aluminium tube deformation and it becomes the lightweight through recycling.

Key Words : Finite Element Method(FEM:유한요소법), Springback(스프링백), Tensile Yield Strength(인장강도), Modulus of Elasticity(탄성계수)

1. 서 론

최근의 자동차 산업은 연비를 향상시키기 위해 엔진기술의 개량 및 차체의 경량화를 목적으로 하고 있다. 엔진기술의 개량은 성능과 기능을 유지하면서 연비를 획기적으로 향상시키는 것은 한계가 있기 때문에 경량화를 통한 연비 향상이 가장 효과적인 대안으로 간주되고 있다.

알루미늄 중공 각재는 냉연강판과 동일한 강성을 만족 할 때 30% 이상의 경량화를 시킬 수 있으며, 80% 이상 재활용이 가능하여 매년 사용이 증가하고 있는 추세이다. 알루미늄 소재는 성형시 소성 이방성비가 작아 재료의 유입이 잘 이루어지지 않으며, 강판소재에 비해 낮은 탄성계수(강판의 약 1/3)로 인하여 스프링백량 또한 강판소재에 비해 크다는 단점이 있다.

스프링백 현상은 제품의 치수 정밀도를 떨어뜨릴 뿐만 아니라 제품결합의 원인이 될 수 있으므로 대책 마련이 시급한 실정이다^[1].

금속 성형공정에서 한 물체를 소성 변형시켜 원하는 형태로 만드는데 요구되는 힘을 계산하는 것은 매

교신저자 : 한국폴리텍VII대학 컴퓨터응용 기계설계과
E-mail : jglee6511@yahoo.co.kr

* 한국폴리텍VII대학 컴퓨터응용 기계설계과

우 중요하다. 이러한 소성가공 문제를 해석하는 것은 크게 이론적 방법과 실험적 방법으로 나눌 수 있다. 이론적 해석 방법에는 슬래브법(slab method)과 미끄럼선장법(slip line method), 상계법(upper bound method), 상계요소법(UBET : Upper Bound Elemental Technique), 유한요소법(FEM : Finite Element Method) 등의 수치적인 방법이 주로 사용되고 있다. 슬래브법과 미끄럼선장법은 복잡한 형태의 소성 가공 문제 해석에는 적용하기 어려워 현재는 주로 유한요소법, 상계법 및 상계요소법 등이 많이 이용되고 있다.

본 연구는 알루미늄 중공 각재를 성형하기 위하여 펀치, 텅-다이, 홀더를 제작하고 굽힘 성형을 위해 프레스 금형을 이용하여 알루미늄 사각 중공 각재의 굽힘 각도에 따른 응력-변형률관계와 스프링백에 대한 실험을 하였다.

특히 소성가공 공정시 굽힘 실험결과를 검증 및 비교하기 위하여 상용 강소성 유한요소 프로그램(DEFORMTM-3D)을 이용하여 해석하고 이를 바탕으로 알루미늄 중공 각재의 프레스 성형에 관한 방법을 제시하였다^[2-5].

2. 관련 이론

유한변형중인 강재의 응력-변형률 관계를 정식화하기 위해 좌표계상 강제회전과 대변형을 수반하는 재료의 비선형거동을 정확히 구현 할 수 있는 키르초프 응력의 야만 속도형(Jaumann's derivative of krichoff stress) 구성식은 식(1)과 같이 정의 하였다.

$$d\sigma_{ij}^J = d\sigma_{ij}^* - dW_{ik}\sigma_{kj} + dW_{jk}\sigma_{ki} \quad (1)$$

여기서, σ_{ij}^J 는 속도형으로 표시되는 야만형응력성분이며, σ_{ij}^* 는 시간 t에서 계산되어진 응력성분이다. σ_{kj} 는 전 단계에서 계산된 응력성분이며 W_{ki} 는 순간적인 강제 회전을 나타내는 스핀텐서이다.

Fig. 1은 속도형 탄소성 재료행렬 D_{ijkl}^{ep*} 의 계산순서를 나타낸 순서도이다.

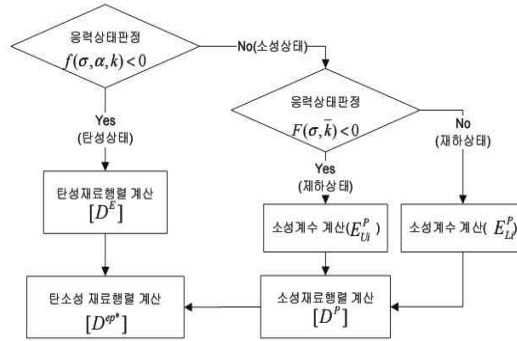


Fig. 1 Flow chart for calculation D_{ijkl}^{ep*}

이상 유한변위이론에 기초한 3차원 입체요소 변위장, 변위-변형률 행렬 및 속도형- 응력-변형률 행렬을 정식화 하였으며 이를 적용한 3차원 탄소성 유한요소 해석의 정식화 과정은 다음과 같다.

정식화된 유한변위이론과 미소변위이론, 반복소성 모델을 3차원 탄소성 유한요소법에 적용하기 위해 각각의 이론이 적용된 행렬식을 강성 행렬로 정식화 하였다. 전체 강성방정식은 가상일의 원리를 이용하여 식(2)과 같이 정의된다.

$$[K]\{du\} = \{dF_s\} + \{dF_v\} \quad (2)$$

여기서, $\{dF_s\}$ 와 $\{dF_v\}$ 는 표면력과 물체력을 나타내며 $\{du\}$ 는 변위를 나타낸다. $[K]$ 는 요소의 강성행렬로 적용된 변형이론 및 소성모델에 따라 정식화 과정이 다르게 전개된다.

강성행렬 $[K]$ 은 유한변위이론과 반복소성모델을 갱신 라그랑지안 정식화에 의해 식(3)과 같이 정식화하였다.

$$[K] = \int_v ([B]^T [D^{ep*}] [B] + [G]^T [M] [G]) dV \quad (3)$$

여기서, $[B]$ 은 유한변형중인 변위-변형률 행렬이다. 또한, $[D^{ep*}]$ 는 강제회전을 고려한 탄소성재료행렬이다.

Fig. 2는 유한변위 이론에 기초하여 정식화된 해석 기법에서 동적하중을 작용 시 응력계산 과정을 나타낸 순서도이다.

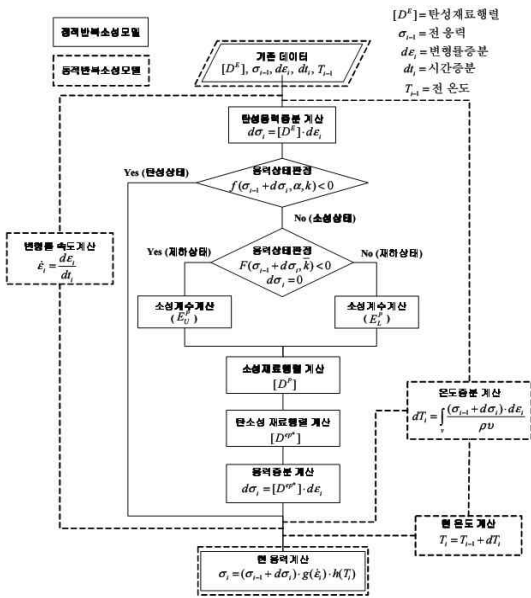


Fig. 2 Flow chart for calculation of current stress on the dynamic deforming

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 금형구성 및 설계조건

작업에 사용된 프레스는 가압능력 300ton, 스트로크 800mm의 유압프레스를 사용하였으며, 일반적인 밴딩 금형의 구조와 달리 펀치, 윙-다이(wing- die)와 홀더로 구성하였다. 펀치의 움직임을 중심으로 윙-다이가 회전을 하고, 소재(A16063합금)가 변형 후에도 평면을 유지 하도록 홀더를 이용하였다. Fig. 3은 금형 구조와 소재를 설치한 것을 보여주고 있다.



Fig. 3 Structure of die and material

3.2 탄소성 유한요소법 이용한 구조해석

굽힘에 대한 프레스 성형으로 앞에서 보는바와 같이 펀치, 윙-다이와 홀더로 구성된 금형을 3D Pro/E Modeling Tool을 통하여 설계하였다. 소재는 A16063을 이용하였으며, 소재의 굽힘각, 단면비 및 두께비에 따른 굽힘 해석을 수행하였다. 그리고 탄소성 해석을 통하여 각 변수에 따른 스프링백의 변화를 비교 분석하였다. 또한 프레스 공정 해석을 위해 소성가공해석 소프트웨어인 DEFORMTM -3D(Ver5.0)를 이용하였고 소성가공 전용해석 소프트웨어로써 유한요소법(FEM, finite element method)을 이용하며, 금속재료의 냉 열간 성형해석에 이용된다.

성형 후의 처짐, 좌굴정도를 예측하기 위해 알루미늄 압출재를 탄소성재료로 모델링 하였으며 국부적인 변형을 검토할 때 해석 시간을 줄이기 위해, 강소성 재료로 가정하여 해석을 수행하였다.

성형해석은 펀치가 일정 속도로 내려오고, 소재를 고정하기 위한 홀더 역시 펀치와 함께 같은 속도로 이동하게 하였다. 윙-다이는 힌지를 중심으로 펀치의 속력에 따른 각속도로 회전하도록 하였다.

3.3 설계변수에 대한 성형해석

Fig. 4는 설계 변수 조건으로 굽힘각, 단면비, 두께비에 대한 변화를 주어 굽힘 성형을 하였으며, Fig. 5는 중공 각재의 치수조건이다.

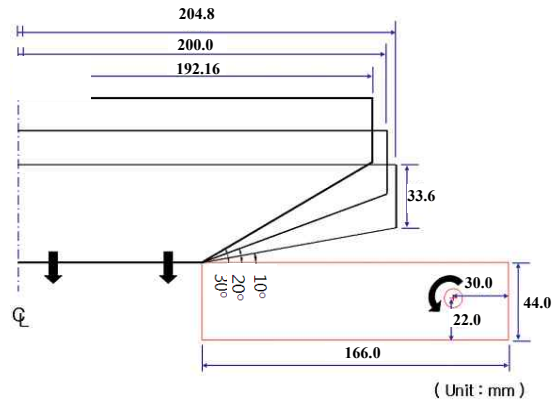


Fig. 4 Angle of bending

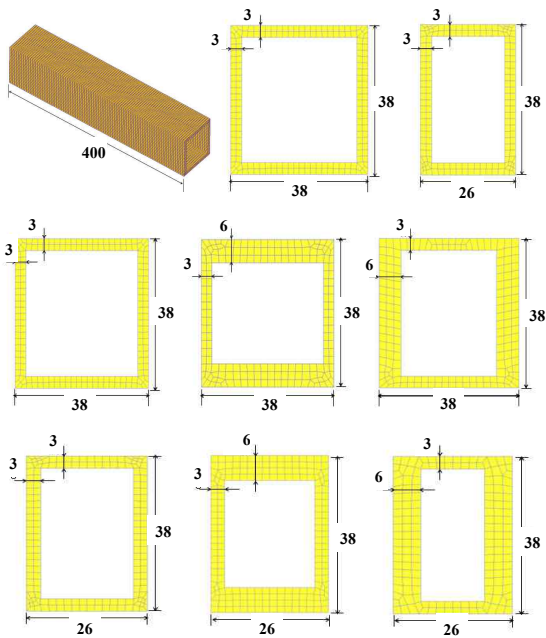


Fig. 5 Dimension condition of rectangular tube

해석에 사용된 알루미늄 압출소재는 Al6063을 선택 하였으며, 소재의 소성 변형 특성을 나타내는 유동응력-변형률 곡선은 Fig. 6과 같다.

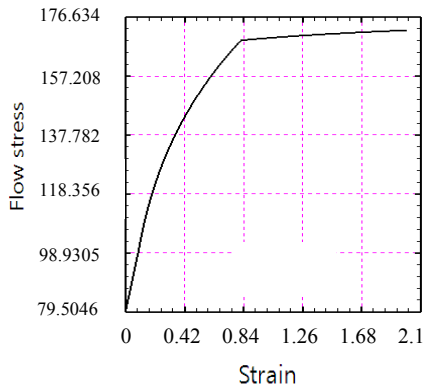


Fig. 6 Flow stress-strain a curve of Al6063 alloys

3.4 Wing-다이를 이용한 굽힘 금형

Fig. 7은 굽힘 성형해석을 하기 위해 단순화한 금형의 전체적인 형상이다. 그림과 같이 중앙부 펀치와 홀더가 수직으로 이동하여 소재를 밀게 되면 소재는 다

시 양쪽 Wing-다이를 밀고 Wing-다이는 원자로 고정되어 있으므로 펀치의 이동과 Wing-다이의 회전에 의해 압출 소재를 굽힘 성형한다. 이때 중앙부 펀치의 수직 가압 속도 및 이동거리를 구하고 이에 따른 Wing-다이 회전 각속도를 구하는 것이 가장 중요하다. 특히 급격한 회전을 방지하기 위해서 실제 금형에는 스프링 등을 이용하여 지지하게 되고 중앙부 펀치의 이동량에 따라 Wing-다이가 펀치에 접촉하여 이동하게 된다.

비선형 해석상에서 이러한 접촉관계를 고려하기 위해 펀치의 이동속도에 따른 Wing-다이의 이동 각속도를 계산 후 Wing-다이의 강제 회전조건으로 설정하였다.

Table 1의 알루미늄 재료는 성형해석에 사용된 재료 물성치이며 굽힘 변형 후 재료의 변형량이나 파손 등을 비교 판단하는데 활용하고자 한 것이다.

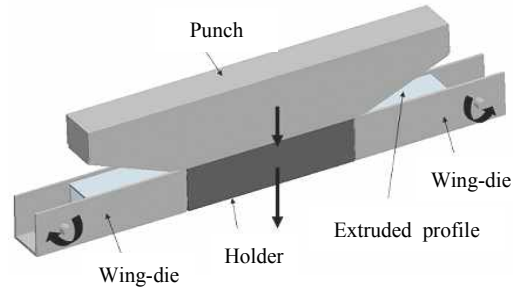


Fig. 7 Simplified die for analysis

Table 1 Mechanical properties of Al6063

Materials	Range	Unit
Modulus of elasticity	68.9	MPa
Poisson's ratio	0.33	-
Ultimate tensile strength	89.6	MPa
Tensile yield strength	48.3	MPa

3.5 굽힘 공정 해석

Fig. 8은 Wing-다이를 이용한 굽힘 성형해석 공정으로 중앙부 펀치의 수직 가압 속도 및 이동거리를 구하고 이에 따른 Wing-다이 회전각속도를 구하여 펀치의 이동과 Wing-다이의 회전에 의해 압출소재를 굽힘 성형한다. (a)는 초기 금형위치를 나타내며 (b)는 800 스텝에서 진행된 굽힘 성형된 소재를 나타낸다. 또한 (c)는 1620 스텝으로 최종 위치까지 중앙부 펀치가 이동했을 때 Wing-다이의 회전 위치와 소재의 변형된 형상을 나타낸다. 전반적으로 수직 압축에 의해 소재가 아래로 밀려

간 형상임을 알 수 있다. 윙-다이를 이용할 경우 소재의 변형은 굽힘 곡률부에서 전반적으로 일어난다. 그러므로 굽힘부의 안쪽은 압축이 발생하여 두께가 두꺼워지기도 하고 중공 소재 안쪽으로 소재가 함몰된다. 반대로 바깥쪽은 소재가 인장되면서 중공 소재 안쪽으로 소재가 함몰되기도 한다. 변형되는 영역이 사이드 펀치 굽힘 공정에 비해 작고 변형부 외의 치수 변화가 작으므로 제품의 치수 정밀도가 높다.

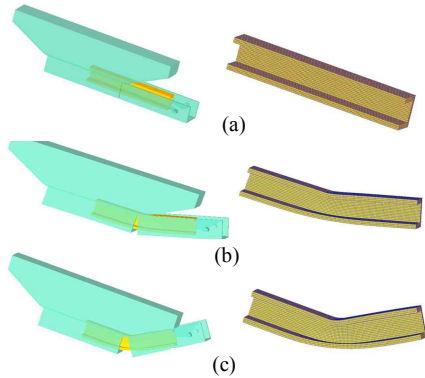


Fig. 8 Processing of forming analysis by wing-die on bending

4. 실험결과 분석

본 실험에서 프레스를 이용하여 단면적 38mm×38mm, 두께 각각 3t인 알루미늄 프로파일을 10°의 굽힘 각도로 실험하였다. 그 결과 Fig. 9와 같이 나왔으며 굽힘이 이루어지는 부분에 변형이 있음을 볼 수 있다. 10° 굽힘에서 탄성회복이 이루어 졌으며 그 결과는 Table 2에 보여진다.

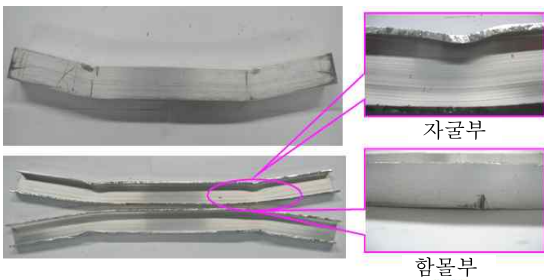


Fig. 9 The effective strain by the wing-die bending process (38mm×38mm×3t)

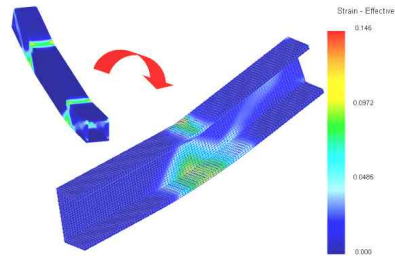
Table 2 Result value of experiment(38×38×3t)

Bending degrees	Degrees after springback	Displacement
10°	20°	0.359mm

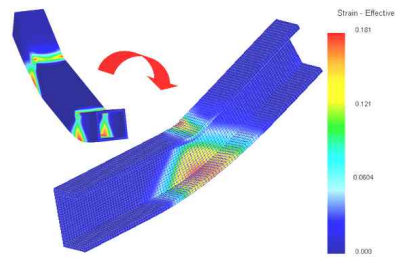
Fig. 10에서는 단면적 38mm×38mm, 두께 3t인 중공 알루미늄 압출재에 10°, 20°, 30°의 굽힘 각도로 유한요소 해석하여 유효변형률을 나타내었는데 소재의 변형은 펀치의 굽힘부를 중심으로 주변에 고르게 발생하였으며 소재의 전체적인 변형보다는 굽힘부에서만 변형을 나타내는 것을 볼 수 있다. 특히 최대 굽힘각 30°일 때 유효변형률의 최대값이 0.253 정도로 비교적 낮은 상태를 알 수 있고 바깥쪽은 소재가 인장되면서 중공 소재 안쪽으로 함몰되기도 하였으나 변형되는 영역이 작아 변형부 외의 치수 변화에는 크게 영향을 미치지 못하였다. 따라서 제품의 치수 정밀도는 높은 것으로 측정되었다. Table 3은 굽힘 각도에 따른 유효변형률과 탄성회복 전·후 값을 나타내었다.

Table 3 Result value of simulation(38×38×3t)

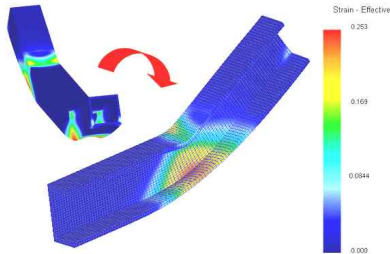
Elastic recovery	Simulation result	Bending degrees		
		10°	20°	30°
Before	Effective strain	0.146	0.181	0.253
	Displacement	0.704mm	0.895mm	0.990mm
After	Plastic strain	0.146mm	0.181mm	0.253mm
	Elastic strain	0	0	0



(a) Strain-effective on 10° bending



(b) Strain-effective on 20° bending



(c) Strain-effective on 30° bending

Fig. 10 Distribution of the effective strain in 38×38mm area by the wing-die bending process

단면 비에 따른 변형 해석에서는 최대 굽힘 각 30°일 때 유효변형률의 최대값이 0.285이며 비교적 낮은 상태임을 알 수 있지만, 같은 단면적 38mm×38mm에서는 동일한 굽힘 각에서의 유효변형률 보다 크다는 것을 알 수 있다. Table 4는 굽힘 각도에 따른 유효변형률과 탄성회복 전·후 값에 대하여 나타내었다.

Table 4 Result value of simulation(26×38×3t)

Elastic recovery	Simulation result	Bending degrees		
		10°	20°	30°
	Effective strain	0.263mm	0.259mm	0.285mm
Before	Displacement	0.644mm	0.892mm	0.910mm
After	Plastic strain	0.263mm	0.259mm	0.285mm
	Elastic strain	0	0	0

Fig. 11은 38mm×38mm, 두께 3t, 6t 중공 알루미늄 압출재를 이용하여 각각 10°, 20°, 30°의 굽힘 각으로 두께 비에 따른 변형해석을 나타내었는데 최대 굽힘 각 30°일 때 유효변형률의 최대값이 0.288과 0.261 값으로 낮은 상태임을 알 수 있다. Table 5와 Table 6은 굽힘 각도에 대하여 두께 비에 따른 유효변형률과 탄성회복 전·후 값에 대하여 나타내었다.

Table 5 Result value of simulation [38(3t)×38(6t)]

Elastic recovery	Simulation result	Bending degrees		
		10°	20°	30°
	Effective strain	0.193mm	0.210mm	0.288mm
Before	Displacement	0.646mm	0.835mm	1.070mm
After	Plastic strain	0.193mm	0.210mm	0.288mm
	Elastic strain	0	0	0

Table 6 Result value of simulation [38(6t)×38(3t)]

Elastic recovery	Simulation result	Bending degrees		
		10°	20°	30°
	Effective strain	0.222mm	0.204mm	0.261mm
Before	Displacement	0.779mm	0.852mm	0.976mm
After	Plastic strain	0.222mm	0.204mm	0.261mm
	Elastic strain	0	0	0

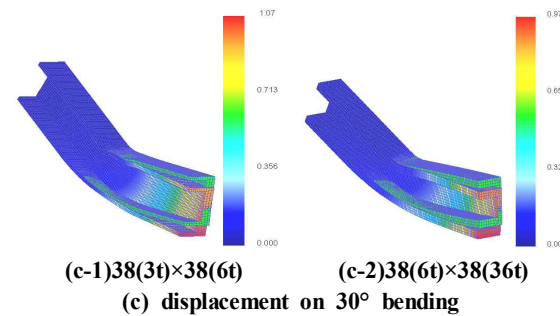
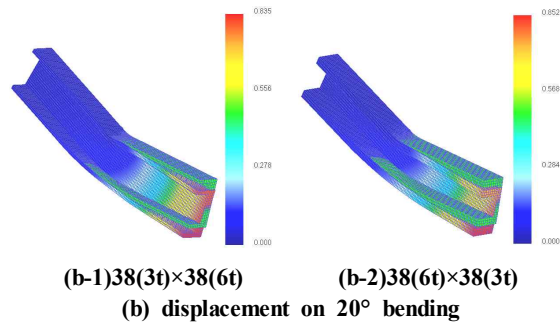
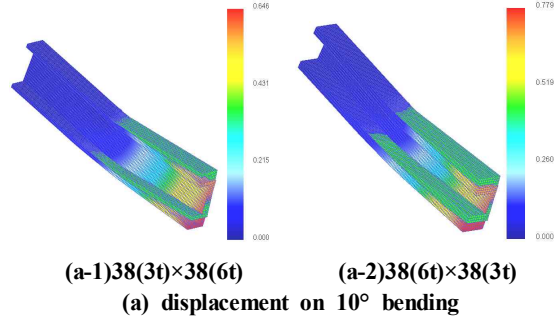


Fig. 11 Distribution of the displacement by the wing-die bending process

Table 7과 Table 8에서는 26mm(3t)×38mm(6t)와 26mm(6t)×38mm(3t), 중공 알루미늄 압출재를 이용하

여 굽힘 각도에 대해 각 단면 비와 두께 비에 따른 유효변형률과 탄성회복 전·후 값에 대하여 나타내었는데 굽힘 각에서는 굽힘 각도가 낮을수록 유효변형률이 적었지만 30°일 때 최대값은 0.276, 0.304 정도로 비교적 낮은 상태임을 알 수 있다.

Table 7 Result value of simulation 26(3t)×38(6t)

Elastic recovery	Simulation result	Bending degrees		
		10°	20°	30°
	Effective strain	0.237mm	0.243mm	0.276mm
Before	Displacement	0.682mm	0.871mm	1.010mm
After	Plastic strain	0.237mm	0.243mm	0.276mm
	Elastic strain	0	0	0

Table 8 Result value of simulation 26(6t)×38(3t)

Elastic recovery	Simulation result	Bending degrees		
		10°	20°	30°
	Effective strain	0.223mm	0.219mm	0.304mm
Before	Displacement	0.583mm	0.791mm	0.916mm
After	Plastic strain	0.223mm	0.219mm	0.304mm
	Elastic strain	0	0	0

5. 결 론

본 연구에서는 알루미늄 중공 각재의 프레스 굽힘에 따른 소재의 변형특성에 대해서 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 유효요소 해석 프로그램을 이용한 결과 굽힘 각도가 커질수록 유효 변형률이 커짐을 알 수 있으며 세로변의 두께가 가로변의 두께보다 두꺼울 때 유효변형이 크다는 것을 알 수 있다.
2. 실제로 굽히고자 하는 각도는 탄성회복을 고려하여 예측할 수 있는 $Y=a + b1*X + b2 * X^2$ 와 같이 일반식을 제안 할 수 있으며 단면 38×38(mm²)일 때 보다 26×38(mm²)일 때 탄성 회복 정도가 적음을 알 수 있다. 또한 두께가 가로변의 두께가 세로변의 두께보다 두꺼울 때 탄성회복 정도가 적음을 알 수 있다.
3. 프레스 성형실험에서 38×38(mm²) 두께 3mm인 알루미늄 튜브를 10°로 굽힘 실험한 후 탄성 회복량은 0.359mm로 나타났으나 동일조건으로 유효요소해

석 프로그램으로 해석한 값 0.704mm보다 적게 나온 것을 볼 수 있는데 이것은 링-다이에 의한 굽힘 성형결과 굽힘부 변형이 안정적이며 좌굴 정도가 낮음을 알 수 있다.

참고문헌

1. Pack, J. H. and Lee, J. S. Kim, H. S. Sung, K. I. Lee, S. K., "A Study on Manufacturing Temporary Platform Structure using press Forming Processes", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 6, No. 4, pp. 92-97, 2007.
2. Annika Nilsson, Lars Melin and Claed Magnusson, "Finite-element simulation of V-die bending: a comparison with experimental results", Journal of Materials Processing Technology, Vol 65, pp. 52-58, 1997.
3. 한규택, 김진욱, 박정식, 황원식, "자동차용 이중벽 구조 튜브의 유효요소해석", 한국기계가공학회 춘 추계학술대회 논문집, pp. 217-221, 2003.
4. T. Uemori, T. Okada, F. Yoshida, "FE analysis of springback in hat-bending with consideration of initial anisotropy and the Baushinger effect", Key Engineering Materials, Vol. 177-180, Part 2, 99.497-502, 2000. 3.
5. Ko, D. L. and Jung, D. W. Kim, J. M. Lee, K. S. "A Study on the Burr Formation in Shearing with Al Alloy", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 6. No. 2, pp. 17-21, 2007.