

알루미늄 압출판재의 프레스성형 중 파열조건에 대한 조사[§]

주석재** · 박창구* · 조은화*

* 울산대학교 기계공학부

Investigation of Cracking Condition during Press Forming of Extruded Aluminum Sheets

Seok Jae Chu*, Chang Gu Park** and Eun Hwa Cho**

* School of Mechanical Engineering, Univ. of Ulsan

(Received June 24, 2013 ; Revised October 10, 2013 ; Accepted November 19, 2013)

Key Words: Cracking(균열), Extruded Aluminum Sheets(압출 알루미늄판재), Bending(굽힘), Finite Element Simulation(유한요소 시뮬레이션), Forming Limit Diagram(성형한계도)

초록: 선루프 트랙은 알루미늄을 압출하고 프레스성형하여 생산한다. 프레스성형 중 날카롭게 굽혀진 좌면의 가장자리를 따라 균열이 발생하였다. 좌면의 가장자리를 절단하여 펀치와 다이 모서리의 최종위치를 측정하고 균열발생과의 관계를 조사하였다. 그리고, 이 최종위치까지 굽힘을 유한요소 시뮬레이션하여 임계변형률을 구하였다. 한편, 소재의 방향, 경도, 굽힘 가장자리 길이, 굽힘반경의 여러 가지 다른 조합에 대하여 3점굽힘시험을 수행하였다. 그리고, 3점굽힘시험에 대한 유한요소 시뮬레이션을 수행하여 임계변형률을 구하여 비교하였다.

Abstract: Sunroof tracks are manufactured by press-forming extruded aluminum sheets. During press forming, cracking occurs along the sharply bent edge. The final positions of the punch and die were measured on the section, and their relation to cracking was investigated. Finite element simulation of bending to the final position was done to find the critical strains. Three-point bending tests with different material orientations, hardnesses, bending edge lengths, and bending radii were carried out in the laboratory, and finite element simulation of the three-point bending tests was performed to find the critical strains.

1. 서론

선루프트랙은 선루프를 얹어 전후로 미끄러지게 하는 것으로 승용차 루프 좌우 양쪽에 설치된다. 이것은 알루미늄 Al 6038ST5를 압출한 뒤 프레스 전단과 성형을 거쳐 완성된다. 볼트체결용 좌면을 성형할 때, 일부 날카롭게 굽혀지는 좌면 가장자리 표면이 파열되는 문제가 발생하였다. 좌면 가장자리는 파열된 것도 있고 파열되지 않은 것도 있었다. 파열 조건을 찾아 파열을 방지하는 것이 필요하였다.

파열에 대한 굽힘가공변수의 영향을 조사하여

보니 굽힘너비(Fig. 1 참조)가 증가할수록 평면변형상태에 가까워지므로 파열이 발생하기 쉽고,⁽¹⁾ 굽힘너비방향이 압연방향과 평행일 때 균열이 발생하기 쉽다.⁽²⁾ 그리고, 소재의 경도를 높일수록 연신율이 낮아지므로 파열이 발생하기 쉬울 것이고, 굽힘반경(Fig. 1 참조)이 작을수록 변형률이 증가하여 역시 파열이 발생하기 쉬울 것이다.

주변형률과 부변형률을 이용하여 정량적으로 파열을 예측하려고 만든 것이 성형한계도이다. 알루미늄의 성형한계도와 관련된 연구로서 김형종 등⁽³⁾은 Al6063에 대하여 액압성형할 때 성형한계도를 측정하여 사용하였고, 김기정 등⁽⁴⁾은 Al6061에 대하여 EWK(ESI-Wilkins-Kamoulakos) 파단모델을 사용하여 성형한계도를 예측하고 시험하여 검증하였고, 김찬일 등⁽⁵⁾은 Al5454에 대하

§ 이 논문은 대한기계학회 울산지회 2013년도 춘계 학술대회 (2013. 5. 10., 울산대) 발표논문임.

† Corresponding Author, sjchu@ulsan.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

여 성형한계도를 예측하고 시험하여 검증하였다.

Castany 등⁽⁶⁾은 알루미늄 6016에 대하여 최소굽힘반경으로 정의된 굽힘가공성에 끼치는 담금질 속도와 미세구조의 영향을 연구하였고, Mattei 등⁽⁷⁾도 알루미늄 6016에 대하여 굽힘가공중 손상발생에 대하여 연구하였다. 이들은 모두 3점굽힘시험을 이용하였다.

본 논문에서는 굽힘시험과 유한요소 시뮬레이션을 모두 수행하여 알루미늄 Al 6038ST5 압출판재의 파열조건을 조사하려고 한다. 그리하여, 성형한계도를 제시하려고 한다.

2. 시제품 파열부위의 관찰과 유한요소 시뮬레이션

시제품 좌면 가장자리 파열부위의 표면을 관찰

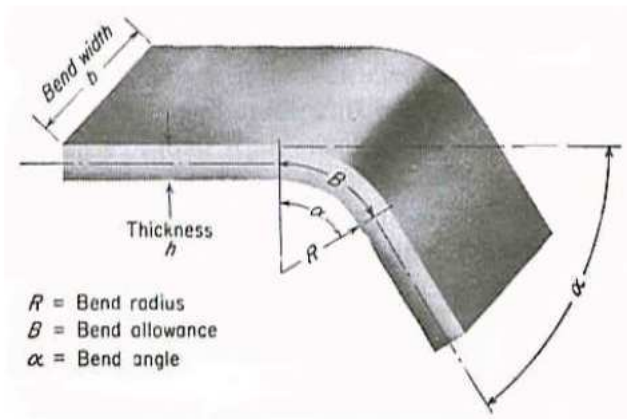


Fig. 1 Bending terminology⁽¹⁾

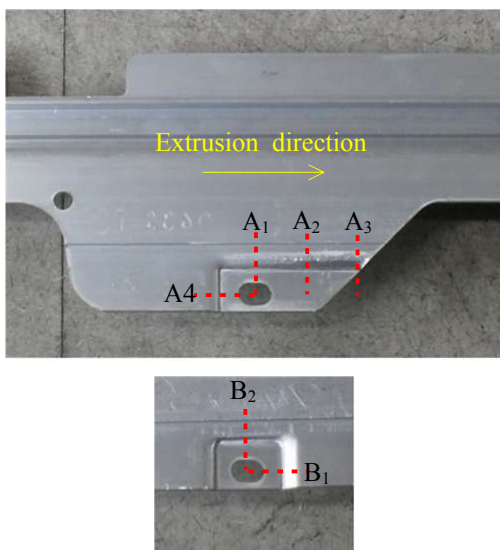
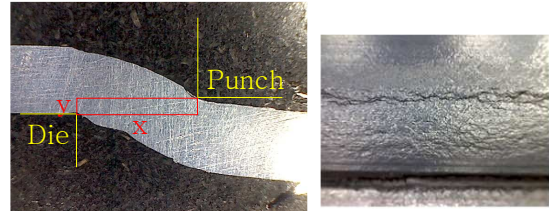
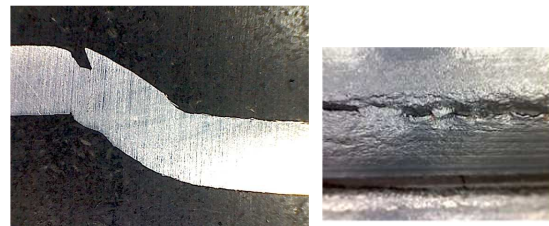


Fig. 2 Press-formed bolt bearing surfaces

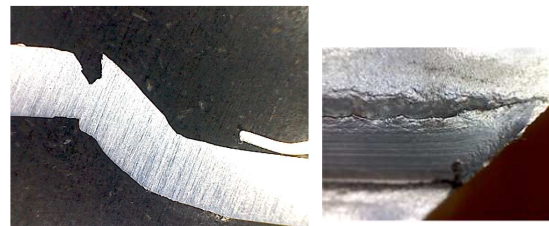
하였다. 이 때 가장자리 굽힘단면에서 측정한 펀치와 다이의 최종위치를 입력하여 굽힘가공을 유한요소 시뮬레이션하였다.



(a) A₁ section



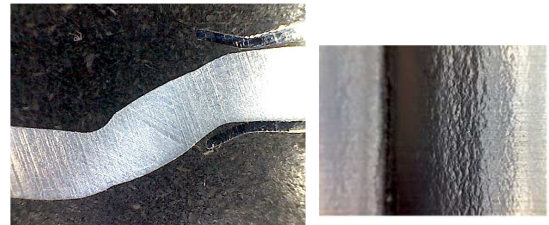
(b) A₂ section



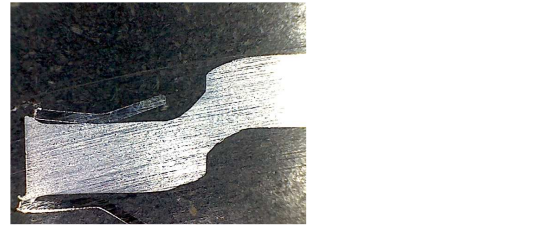
(c) A₃ section



(d) A₄ section

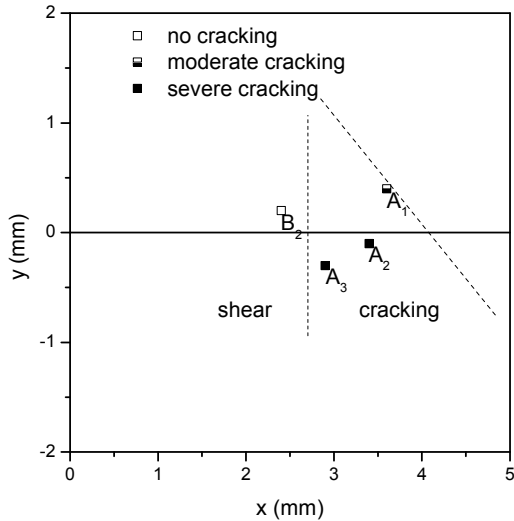


(e) B₁ section

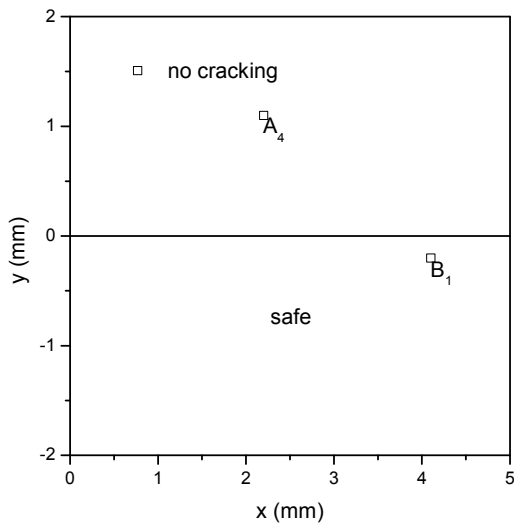


(f) B₂ section

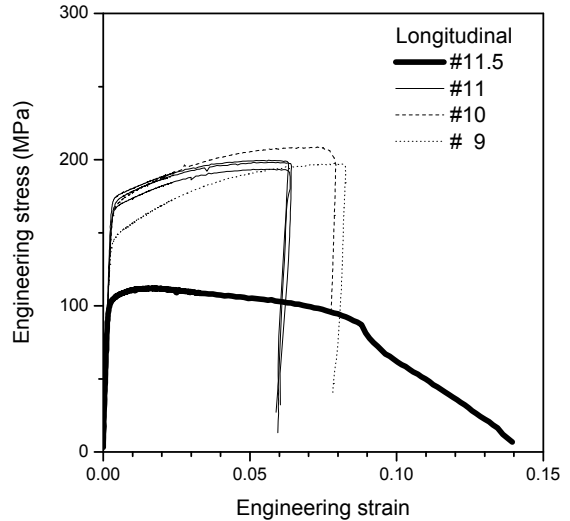
Fig. 3 Representative sections, surface photographs



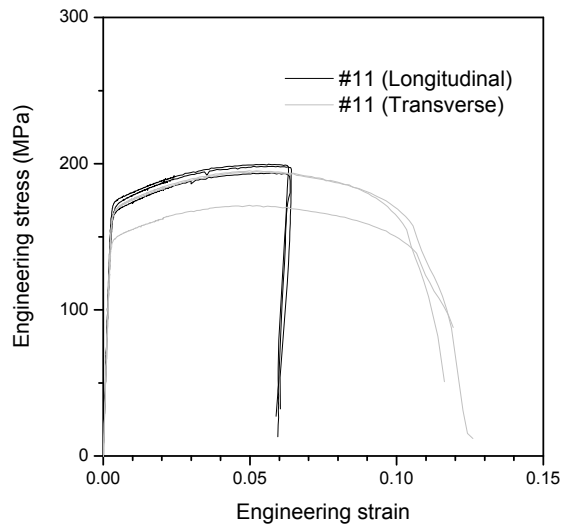
(a) Case with bending axis parallel to the extrusion direction



(b) Case with bending axis perpendicular to the extrusion direction



(a) Specimens parallel to the extrusion direction



(b) Specimens with hardness number #11

Fig. 6 Stress-strain curves of Al 6063ST5

Fig. 4 Relative final positions of the punch from the die

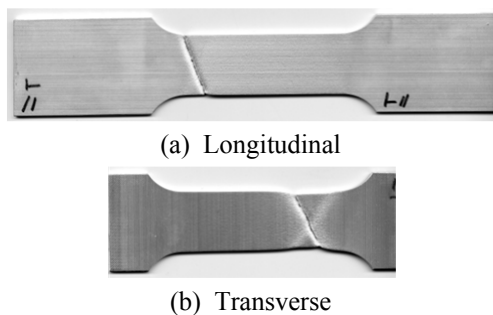


Fig. 5 Specimens after the tensile test

2.1 표면과 굽힘단면의 관찰

해당 선루프트랙에는 체결용 볼트 좌면이 8개 존재한다. 좌면을 성형할 때 가장자리는 굽혀진다. Fig. 2는 대표적인 좌면 2곳을 촬영한 것이다.

좌면 A에는 4곳, 좌면 B에는 2곳의 파열상태를 관찰하였다. Fig. 2에서 수평방향이 압출방향이므로 A1~A3와 B2는 굽힘너비방향이 압출방향과 평행이고, A4와 B1은 굽힘너비방향이 압출방향과 수직이다.

파열되거나 거칠어진 곳의 표면을 촬영한 뒤 Fig. 2에 그린 점선을 따라 절단하여 단면을 촬영

하여 Fig. 3에 열거하였다. A₁에서 A₃로 갈수록 파열이 심하였으며 B₁은 표면이 거칠어지기만 하였다. A₄와 B₂는 표면이 거의 거칠어지지 않았다.

Fig. 3(a) 단면사진에 표시된 것과 같이 다이 모서리에서 펀치 모서리까지 거리를 측정하여 굽힘너비방향별로 이 거리와 파열상태의 관련성을 찾아보았다. Fig. 4(a)는 굽힘너비방향이 압출방향과 평행인 경우를 그린 것으로, A₁에서 A₃로 갈수록 펀치의 최종위치는 다이에 가까워지며 더 내려가고 파열(cracking)은 심하여졌다. 그러나, B₂

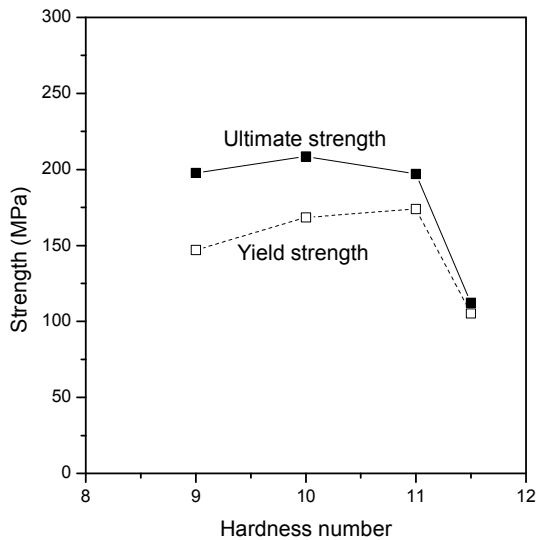
와 같이 지나치게 가까워지면 전단(shear)이 발생하여 굽힘이 더 진행되지 않아서 파열은 발생하지 않았다. Fig. 4(b)는 굽힘너비방향이 압출방향에 수직인 경우를 그린 것으로, A₄는 펀치가 별로 내려오지 않았고 B₁은 펀치의 최종위치는 다이에서 충분히 멀어 파열이 발생하지 않았다 (safe).

2.2 소재의 인장시험

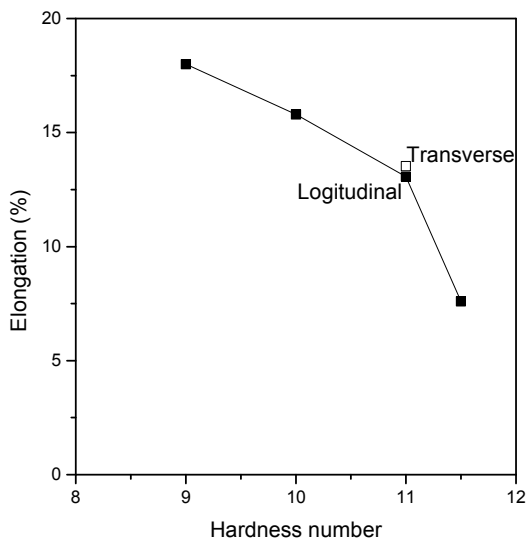
길이방향이 압출방향과 평행인 인장시편은 경도 #9(H_V=74), #10(H_V=81), #11(H_V=90), #11.5(H_V=44)에 대하여 제작하고, 길이방향이 압출방향과 수직인 인장시편은 제품생산에 사용되는 소재인 경도 #11(H_V=90)에 대하여만 제작하였다.

직사각형 압출판재의 크기가 제한되어 길이방향이 압출방향과 수직인 인장시편은 부득이 짧게 제작하였다. 최종파단은 Fig. 5와 같이 모두 인장하중방향과 60°를 이룬 방향에 네킹이 발생하여 파단되었다. Fig. 6(a)를 보면 경도 #11.5(H_V=44)에 대한 곡선이 다른 경도에 대한 곡선과 차이가 심하였다. 경도 #9(H_V=74), #10(H_V=81), #11(H_V=90)은 네킹이 신율계 표점 밖에서 발생하여 변형률을 파단까지 측정하지 못하였다.

Fig. 6(b)를 보면 시편의 길이방향이 압출방향에 평행인 것과 수직인 것 각각 3개 중 압출방향에 수직인 것 1개를 제외하면 나머지는 서로 비슷하였다. 탄성계수는 경도에 상관없이 64.7 GPa 이었다.



(a) Strength



(b) Elongation

Fig. 7 Variation of mechanical properties

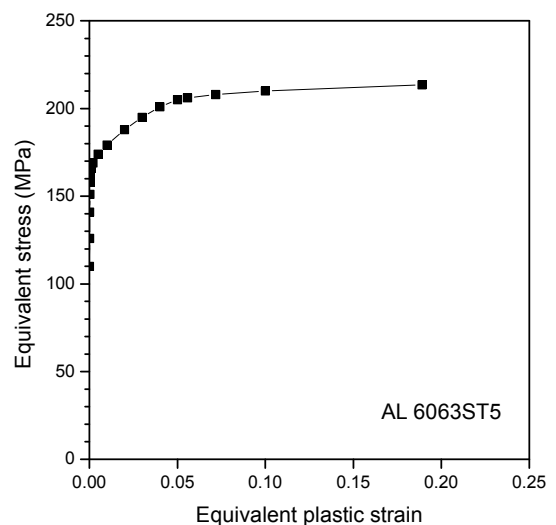


Fig. 8 Equivalent stress-plastic strain curve

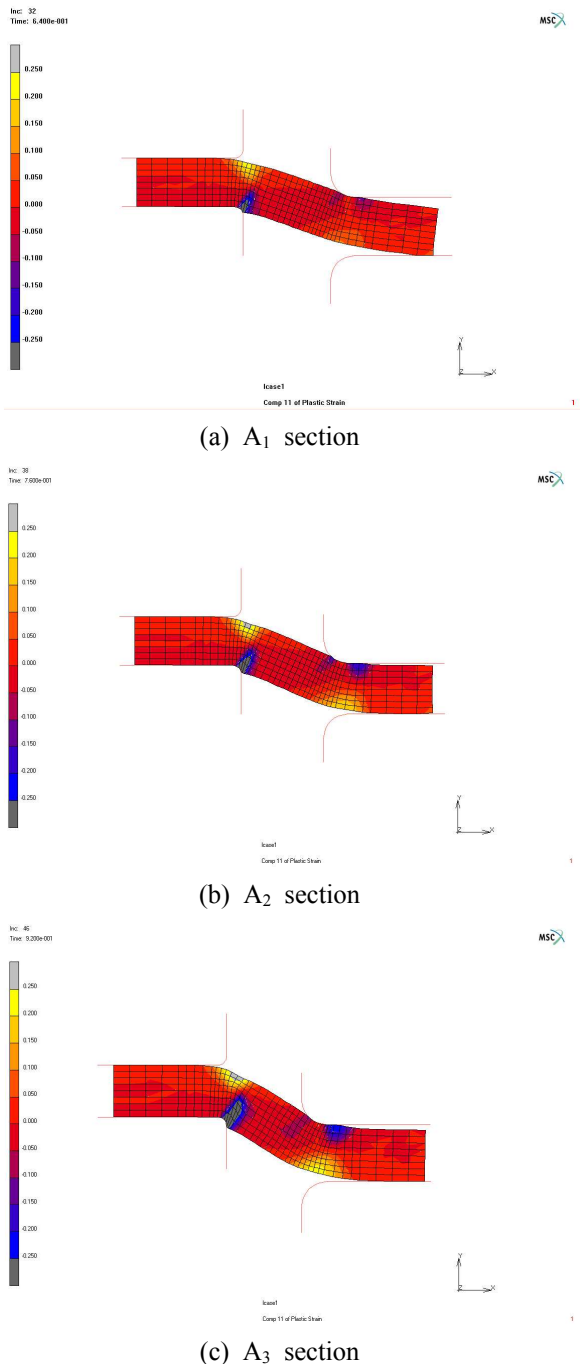


Fig. 9 Finite element simulation of bending (all equivalent plastic strain contour bands with ranges from -0.25 to 0.25)

Fig. 7(a)는 경도에 대한 강도를 그린 것이다. 항복강도는 경도 #11($H_V=90$), 극한강도는 경도 #10($H_V=81$)일 때 최대이었다. Fig. 7(b)는 경도에 대한 연신율을 그린 것이다. 연신율은 최종파단된 시편의 전체길이를 시험전 시편의 전체길이로

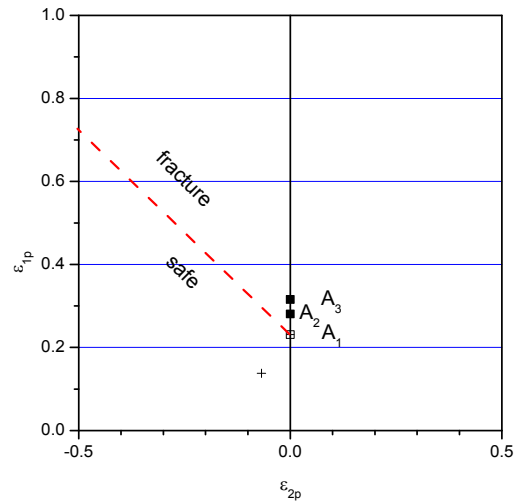


Fig. 10 Forming limit diagram from the actual press-forming product

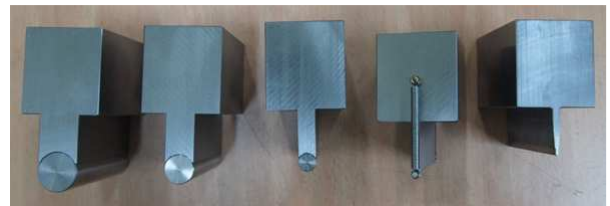


Fig. 11 Punches with different tip size for bending tests in the lab

나뉘 구하였다. 경도가 증가할수록 연신율은 감소하였다. 그리고, 경도 #11($H_V=90$)에 대한 결과를 보면 인장시편의 방향의 연신율에 대한 영향은 거의 없었다.

2.3 시제품 굽힘가공의 유한요소 시뮬레이션

인장시험을 유한요소 시뮬레이션하여, 경도 #11($H_V=90$)에 대한 인장시험 응력-변형률 곡선을 발생시키는 등가응력-등가소성변형률 곡선을 찾았다. 그 곡선은 Fig. 8과 같았다.

그리고, $A_1 \sim A_3$ 단면에서 측정된 펀치의 최종위치까지 굽힘가공을 유한요소 시뮬레이션하여 파열부위의 임계변형률을 구하였다. 이 때 평면변형을 가정하였다.

시제품 생산과정중 파열이 발생한 순간의 펀치 위치에 대한 정보가 없으므로 임계변형률은 최종펀치위치에 대한 변형률로 대신 구하였다. Fig. 9는 펀치가 최종위치까지 내려갔을 때 최대변형률을 그린 것이다.

이와 같이 구한 임계변형률을 성형한계도에 그

린 것이 Fig. 10이다. $\epsilon_2 < 0$ 인 범위는 참고문헌 [8]을 참조하여 단순히 수평과 45°를 이룬다고 가정하여 그렸다.

3. 소재의 굽힘시험과 유한요소 시뮬레이션

시편채취방향별, 굽힘너비별로 시편을, 굽힘반



(a) Bending in the extrusion direction



(b) Bending perpendicular to the extrusion direction

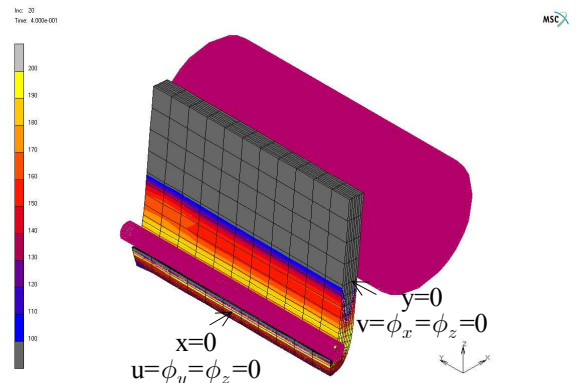
Fig. 12 Specimens after bending tests in the lab

경별로 펀치를 준비하여 굽힘시험을 수행하였다. 그리고, 굽힘시험을 유한요소 시뮬레이션하였다.

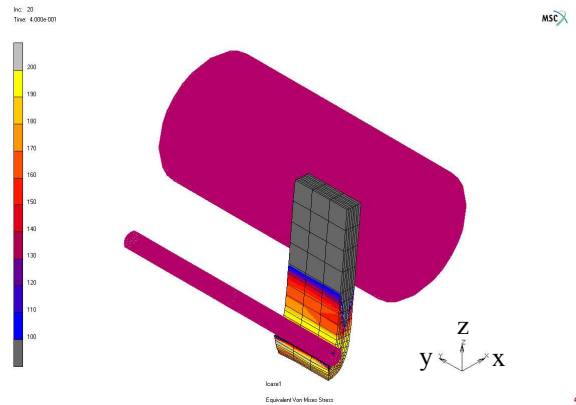
3.1 소재의 굽힘시험

시제품 굽힘반경이 5.5 mm 부근이어서 굽힘반경은 이것을 중심으로 11, 8.5, 6, 3.5, 2.5 mm로 설정하였다. Fig. 11은 굽힘시험에 사용된 5가지 펀치로서 굽힘시편의 두께 2 mm이므로 하단의 지름은 18, 13, 8, 3, 1 mm로 제작하였다. 롤러 2개로 직사각형 시편의 양단을 지지하고 펀치로 시편의 중앙을 누르는 3점굽힘을 수행하였다.

좌면 가장자리 중 짧은 것이 15 mm이었고, 긴 것도 55 mm 이하이어서 굽힘너비 범위를 15~55 mm로 설정하였다. Fig. 12(a)는 굽힘너비방향이 압출방향과 평행인 경우로, 굽힘너비는 15~55 mm이고, 펀치 지름 18, 8, 3, 1 mm인 것만 사용되었다.



(a) Bending width = 55 mm

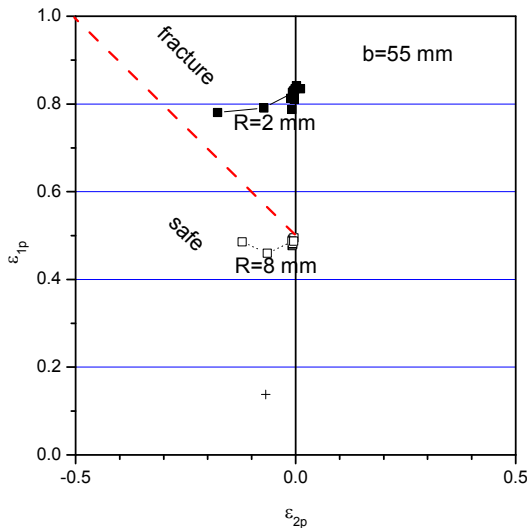


(b) Bending width = 15 mm

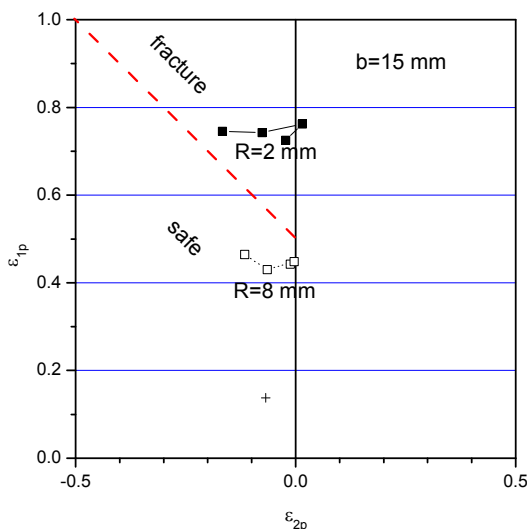
Fig. 13 Finite element simulation of bending tests in the lab

굽힘반경이 감소하며 6 mm 이상일 때는 거의 거칠어지지 않았으나 3.5 mm일 때는 거칠어지고 일부 파열되었고, 2.5 mm일 때는 모두 파열되었다. 굽힘너비의 영향은 나타나지 않았다.

Fig. 12(b)는 굽힘너비방향이 압출방향과 수직인 경우로, 굽힘반경이 감소하며 6 mm 이상일 때는 역시 거의 거칠어지지 않았으나 3.5 mm일 때는 거칠어지기만 하고 파열되지 않았고, 2.5 mm일 때도 전혀 파열되지 않았다. 역시 굽힘너비의 영향은 나타나지 않았다.



(a) Bending width = 55 mm



(b) Bending width = 15 mm

Fig. 14 Forming limit diagram from bending tests in the lab

3.2 굽힘시험의 유한요소 시뮬레이션

시편의 굽힘너비 15와 55 mm, 편치의 지름 2와 8 mm의 조합에 대한 굽힘시험을 유한요소 시뮬레이션하였다. 이 때 대칭성을 이용하여 우측 반만 유한요소 시뮬레이션하였다. Fig. 13은 그 결과인 von Mises 응력분포를 그린 것이다.

편치가 충분히 내려왔을 때 굽힘너비방향을 따라 굽힘부위 외표면 변형률을 읽어 Fig. 14 성형한계도에 그렸다. 굽힘너비가 감소하니 주변형률도 약간 감소하였다. 역시 $\epsilon_2 < 0$ 인 범위는 단순히 수평과 45°를 이룬다고 가정하여 그렸다. 굽힘너비 범위의 최소값인 15 mm와 최대값인 55 mm에 대하여 유한요소해석을 수행한 결과 약간만 변하는 것에 그쳐 굽힘너비의 중간값에 대하여는 유한요소해석을 수행하지 않았다.

Fig. 10 시제품에서 얻은 성형한계도와 비교하여보니 굽힘시험에서 얻은 성형한계도는 변형률 ϵ_1 이 0.3만큼 높아졌다. 시제품은 급속히 성형하여 생산한 것이고, 굽힘시험은 충분히 느리게 수행한 것이므로 성형속도의 차이 때문에 차이가 발생한 것으로 추측한다.

4. 결론

시제품 좌면 가장자리를 관찰한 결과 굽힘너비방향이 압출방향과 평행인 경우, 편치의 최종위치가 다이에 가까워지고 낮아질수록 파열이 심하여졌다. 그러나, 너무 가까워지면 전단이 발생하여 굽힘이 더 진행되지 않았다. 굽힘너비방향이 압출방향에 수직인 경우, 파열이 발생하지 않았다.

굽힘가공을 유한요소 시뮬레이션하여 파열부위의 임계변형률을 구하고 성형한계도에 표시하였다.

두께 2 mm 알루미늄 압출판재의 굽힘시험 결과 굽힘너비방향이 압출방향과 평행인 경우 굽힘반경이 감소하며 3.5 mm일 때는 거칠어지고 일부 파열되었고, 2.5 mm일 때는 모두 파열되었다. 굽힘너비의 영향은 나타나지 않았다. 굽힘너비방향이 압출방향과 수직인 경우, 굽힘반경이 감소하며 3.5 mm일 때는 거칠어지기만 하고, 2.5 mm일 때도 전혀 파열되지 않았다. 역시 굽힘너비의 영향은 나타나지 않았다.

굽힘시험을 유한요소 시뮬레이션하여 파열부위

의 임계변형률을 구하고 성형한계도에 표시하였다. 굽힘시험에서 얻은 성형한계도는 시제품에서 얻은 성형한계도보다 변형률 ϵ_1 이 0.3쯤 높아졌다. 굽힘시험은 두께방향으로 변형률이 심하게 변하므로 성형한계도 오차가 발생한 것으로 추측한다.

후 기

본 논문은 2012년도 울산대학교 산학협력선도 대학육성사업단의 지원을 받아 이루어진 것입니다.

참고문헌 (References)

- (1) Udomphol, T., 2007, Sheet-metal Forming, Suranaree University of Technology.
- (2) Kalpakjian, S. and Schmid, S., 2007, Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th edition.
- (3) Kim, J. S., Lee, J. K., Park, J. Y., Lee, D. J., Kim, H. Y. and Kim, H. J., 2005, "Forming Limit Diagram of an Aluminum Tube Through Hydroforming Tests," *Trans. of Material Processing*, Vol. 14, No. 6, pp. 514~519.
- (4) Kim, K. J., Nguyen, N. T., Kim, D. Y. and Kim, H. Y., 2011, "Application of Failure Criteria in Aluminum Sheet Forming Analysis," *Trans. of Material Processing*, Vol. 20, No. 2, pp. 167~172.
- (5) Kim, C. I., Yang, S. H. and Kim, Y. S., 2012, "Prediction of Formability of Aluminum Alloy 5454 Sheet," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 360, No. 2, pp. 179~186.
- (6) Castany, P., Diologent, F., Rossoll, A., Despois, J-F, Bezencon, C. and Mortensen, A., 2013, "Influence of Quench Rate and Microstructure on Bendability of AA6016 Aluminum Alloys," *Material Science & Engineering A*, Vol. 559, pp. 558~565.
- (7) Mattei, L., Daniel, D., Guiglionda, G., Klöcker, H. and Drive, J., 2013, "Strain Localization and Damage Mechanisms During Bending of AA6016 Sheet," *Material Science & Engineering A* Vol. 559, pp. 812~821.