

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2008.32.4.327

자동차 알루미늄 범퍼의 가변 곡률 압출공정 개발

조영준* · 이상곤* · 김병민† · 오개희** · 박상우**
(2007년 8월 3일 접수, 2008년 3월 1일 심사완료)

Process Development of Variable Curvature Extrusion for Automotive Aluminum Bumper

Byung-Min Kim, Young-June Jo, Sang-Kon Lee, Kae Hee Oh and Sang-Woo Park

Key Words : Aluminum Extrusion(알루미늄 압출), Variable Curvature(가변곡률), Theoretical Analysis(이론해석), FE Simulation(유한요소해석), Extrusion Experiment(압출실험)

Abstract

The effectiveness of vehicle parts made through extrusion is in the limelight because of the advantages of high strength stiffness materials can be produced and the number of processes can be drastically reduced. Therefore, the parts should have sufficient stiffness and be lightweight enough to improve fuel efficiency. However, the application of extruded aluminum requires pre-bending technologies that can manufacture the complex designs profiles demanded by vehicle parts. The aim of this research is that the development of the variable curvature extrusion technology that can produce a variety of curvature. In order to produce a variable curvature, the guide transfer speed and transfer time should be controlled properly. The guide transfer speed and transfer time were examined by the theoretical analysis. A model was developed to simulate the deformation behaviors of extrusion and bending process from the symmetric bumper with range of radii from 1863mm to 2163mm. The theoretical analysis and FE analysis were verified through experimental method.

기호설명

- R : 제품의 곡률반경
- U : 가이드 이송거리
- a : 그립틀과 가이드 축 사이의 거리
- g_1 : 제품과 가이드 롤의 틈새 거리
- g_2 : 제품과 그립틀의 틈새 거리
- V_G : 가이드 이송 속도
- V_E : 다이 출구부의 압출속도

1. 서론

지구 온난화에 따른 환경법규가 제정됨에 따라 배출 가스에 대한 규제가 강화되고 연료소비 감소가 요구되고 있으며, 이를 충족시키기 위해 많은 연구들이 진행되고 있다.⁽¹⁾ 최근 자동차 산업은 소비자들의 고급화, 편의성 증가, 안전성 증가, 성능향상에 대한 요구를 만족시키기 위해 보다 많은 부품을 사용하고 있다. 이로 인해 차량의 전체적인 중량은 증가할 수 밖에 없는 상황이며, 때문에 각 부품을 구성하는 소재를 더욱 더 가볍게 함으로써 이와 같은 문제를 해결하고자 한다. 이러한 이유로 최근 자동차 개발에 있어 경량화 소재에 대한 연구는 특히 중요한 분야로 부각되고 있

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부
E-mail : bmkim@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-3074 FAX : (051)581-3075

* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

** ㈜동양강철 기술연구소

다.⁽²⁾

알루미늄 합금은 저비중, 고강도, 내부식성 등을 가지며 기존의 철강재료를 대체하는 경량화 소재로 많이 연구되고 있다. 또한, 알루미늄 압출의 경우 복잡한 단면 형상을 가진 중공형 제품 생산에 적합한 기술로 자동차 산업에 널리 활용되고 있다. 압출품은 자동차 부품의 다양한 형태를 가지기 위해 벤딩 공정을 거치게 된다. 하지만, 기존의 스트렛치 벤딩, 금형을 이용한 벤딩 방법은 고가의 설비를 사용함으로써 인해 제품의 원가를 상승시키게 된다.

이를 해결하기 위한 다양한 곡률성형 방법들이 연구되고 있다. K. Muller⁽³⁾는 압출기 후면에 여러 개의 판(disc)을 설치하고 각 판의 위치변화에 따라 곡률 형상을 제어하는 방법을 연구하였으며 이와 같은 방법은 작은 곡률을 가진 소형제품에 적합하다. G. Peter⁽⁴⁾는 벤딩 다이의 2 차원 적인 움직임에 의해 제품의 곡률을 성형하는 방법에 대해서 연구하였다. 하지만 이는 냉간에서 성형되는 방법으로 스프링 백에 의한 변형 후 형상을 예측하는데 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 가이드의 움직임을 이용한 압출성형과 굽힘성형이 동시에 가능한 기술을 적용하여 다양한 곡률반경을 가진 차량용 범퍼를 제조하고자 한다. 이를 위해 가이드 움직임을 이론 해석을 통해 결정하고, 성형해석과 압출 실험을 통해 그 유효성을 검증하였다.

2. 가변곡률 압출 장치

2.1 가변곡률 압출 시스템

압출과 동시에 곡률을 성형하는 공정은 Fig. 1과 같다.

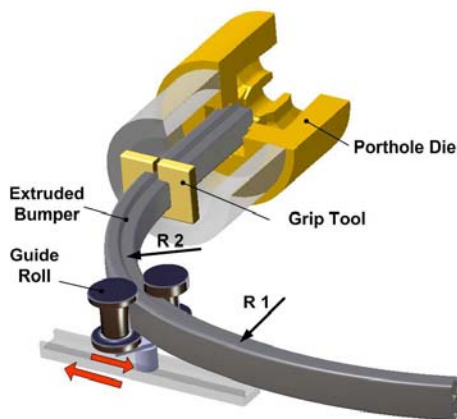


Fig. 1 Schematic description of variable curvature extrusion process

알루미늄 압출금형 후면에 제품을 직선으로 고정하는 그립툴(grip tool)을 설치하고 이후 압출방향의 직각방향으로 왕복운동을 하는 가이드 롤(guide roll)의 이송으로 일정한 곡률반경을 가진 압출체가 성형된다. 이때 가이드의 위치에 따라 압출체의 곡률반경이 달라진다. 따라서 연속적인 가이드의 움직임으로 다양한 곡률반경을 가진 제품을 성형할 수 있다.

2.2 가이드 위치에 따른 곡률 변화

제품의 곡률반경은 가이드의 위치에 따라 변하고 이때 제품의 곡률반경은 Fig. 2와 같이 가이드 이송거리, 그립툴과 가이드 축 사이의 거리, 제품과 가이드 롤의 틈새, 제품과 그립툴의 틈새에 의해 결정되고, 이때 곡률반경은 기하학적인 관계에 의해 식 (1)로 표현된다. 각 항의 계수 A, B, C는 제품과 그립툴과의 틈새의 함수로 표현되며, 이는 성형해석을 통해 구하였다.

만약 제품과 가이드 롤의 틈새와 제품과 그립툴의 틈새가 0에 가까워지면 제품의 곡률은 식 (2)로 표현된다.

$$R = \frac{\left[a + A(g_2) \cdot \exp\left(-\frac{U}{B(g_2)}\right) + C(g_2) \right]^2 + (U - g_1 - g_2)^2}{2(U - g_1 - g_2)} \quad (1)$$

$$R = \frac{a^2 + U^2}{2U} \quad (2)$$

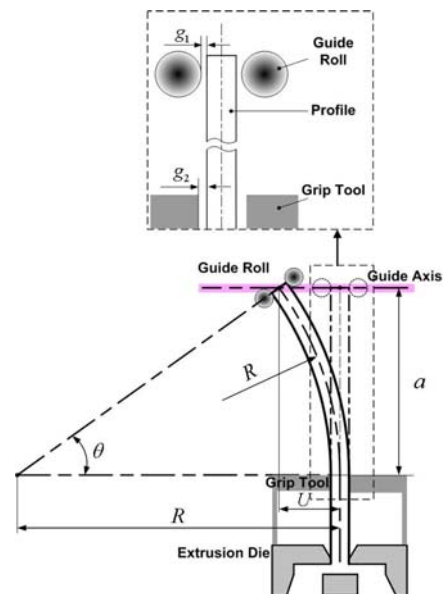


Fig. 2 The geometric relationship between curvature radius and guide movement

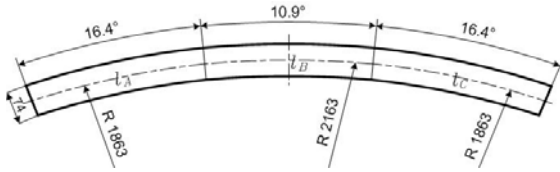


Fig. 3 Dimensions and geometry of curvature for the vehicle bumper

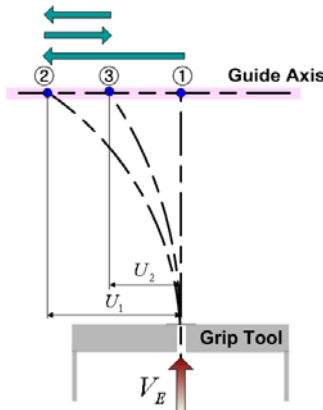


Fig. 4 Moving path of guide for variable curvature extrusion

3. 가변곡률을 위한 가이드 이송조건

3.1 가이드 이송경로

본 연구에서는 차량용 범퍼를 대상으로 가변곡률 압출을 수행하였다. 범퍼의 형상은 Fig. 3 과 같이 중심선의 곡률반경(R)이 1,863mm, 2,163mm 의 조합으로 구성되어 있으며, 폭은 74mm 이다.

Fig. 4 는 범퍼를 성형하기 위한 가이드 이송경로를 나타낸 것이다. 압출된 범퍼는 그립툴을 통과하여 위치 ①에 이르게 된다. 이후 가이드는 곡률 성형을 위하여 압출체의 직각방향으로 위치 ②로 이동하게 된다. 가이드가 위치 ②에 머무르는 동안 범퍼의 첫 번째 곡률반경 1,863mm 를 성형하게 되고 이후 가이드는 두 번째 곡률반경 2,163mm 를 성형하기 위해 위치 ③으로 이동하게 된다. 마지막으로 세 번째 곡률반경 1,863mm 를 성형하기 위해 가이드는 위치 ②로 되돌아 오게 된다. 이와 같은 가이드 이송을 반복함으로써 연속적인 곡률을 가진 범퍼를 성형하게 된다.

3.2 이송경로(① → ②, ③ → ②)

가이드의 이송이 위치 ①에서 위치 ②로 이동할 경우 압출속도에 따라 가이드 이송 속도가 달라져야한다. Fig. 5 는 가이드 이송위치에 따른 압출체의 길이 변화를 나타낸 것이다. 가이드가 위치 ②로 이동하였을 때 형성되는 제품의 길이(l)는 가이드 이송전 제품의 길이(l0)보다 길다. 이는 식

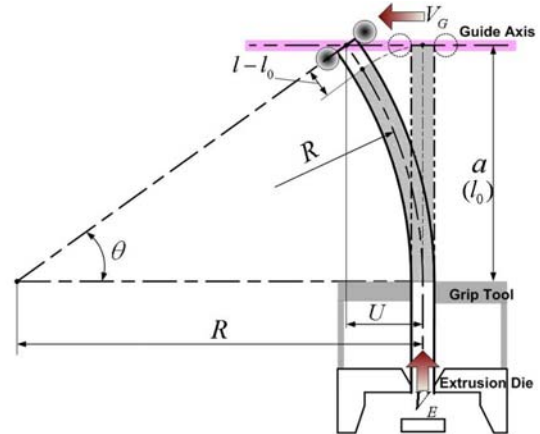


Fig. 5 Geometric relationship between initial length and arc length

(3)에서 나타낸 것과 같이 가이드의 이송시간과 $l-l_0$ 의 길이를 갖는 제품이 압출되는 시간이 같아야 한다는 의미이다.

$$t = \frac{V_G}{U} = \frac{V_E}{l-l_0} \quad (3)$$

만약 가이드 이송 시간동안 압출되는 제품의 길이가 $l-l_0$ 보다 짧을 경우, 제품은 가이드에서 이탈 될 것이다. 또한, 가이드 이송 시간동안 압출되는 제품의 길이가 $l-l_0$ 를 초과할 경우, 가이드의 위치가 연속적으로 변화하는 구간에서 형성되는 곡률로써 요구되는 일정 곡률반경을 성형할 수 없는 곡률반경천이 구간이 형성 된다. 따라서, 가이드 이송속도는 식 (4)로 표현된다.

$$V_G = \frac{V_E \times U}{l-l_0} = \frac{V_E \times U}{\left[R \times \frac{\pi}{180} \times \sin^{-1} \left(\frac{a}{R} \right) \right] - a} \quad (4)$$

식 (4)에 의해 위치 ①에서 위치 ②로 이동하는 동안 가이드의 이송속도는 687.8mm/s 로 계산된다. 실험에 사용된 가이드의 실제 이송속도는 최고 417.0mm/s 이다. 따라서, 가이드 이송속도의 차이에 의해 약 2.2mm 의 곡률반경천이구간이 형성된다.

가이드가 위치 ③에서 위치 ②로 이동할 경우 위와 같은 방법으로 가이드 속도가 정해진다. 이때 가이드의 이송속도는 579.7mm/s 로 정해지고 실제 가이드 이송속도는 417.0mm/s 이므로 곡률천이구간이 형성된다. 하지만, 가이드의 이송거리가 4.3mm 로 매우 짧기 때문에 이때 성형되는 곡률반경천이구간의 길이는 0.15mm 에 불과하다.

3.3 이송경로(② → ③)

곡률반경 2,163mm 의 압출제를 성형하기 위해 가이드는 위치 ②에서 위치 ③으로 이동한다. 가이드는 곡률을 유지하기 위해 그림을 해제하게 되고 Fig. 6 과 같이 R_1 의 곡률반경을 갖는 l_A 구간 의 압출제가 가이드 위치 ③에 도달하게 된다. 이때 l_A 구간은 가이드의 이송위치 ③과 무관하게 R_1 의 곡률반경을 가지게 된다. 따라서 R_1 의 곡률 반경을 갖는 구간은 가이드 위치 ②에서 위치 ③ 으로 이송되면서 발생하는 l_A 구간으로 이루어진다.

R_1 의 곡률반경을 가지고 l_A 의 길이를 갖는 제품을 성형하기 위해서 가이드 위치 ②에서 성형길이가 l_A-l_A' 가 되는 순간 가이드의 이송이 시작되어 한다. 따라서 가이드 이송량에 따른 l_A 의 길이를 구할 필요가 있다. l_A 의 길이는 반지름 R_1 , 중심각 θ_A 를 가지는 호의 길이와 같다. $a-x$ 를 밑변, U_1-U_2 의 높이를 가지는 삼각형으로부터 현의 길이를 구하고 이때 현을 높이로 가지고, R_1 을 빗변으로 하는 삼각형(ΔOPQ)으로부터 중심각 θ_A 를 구할 수 있다. 이는 식 (5)로 표현된다.

$$l_A = R_1 \theta_A = 2R_1 \frac{\pi}{180} \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{(a-x)^2 + (U_1-U_2)^2}}{2R_1} \right) \quad (5)$$

위 식에서 x 는 $(0, R_1)$ 을 중심으로 하는 원의 방정식으로부터 식 (6)과 같이 구할 수 있고, 이를 식 (5)에 대입하여 l_A 의 길이를 구하는 식 (7)을

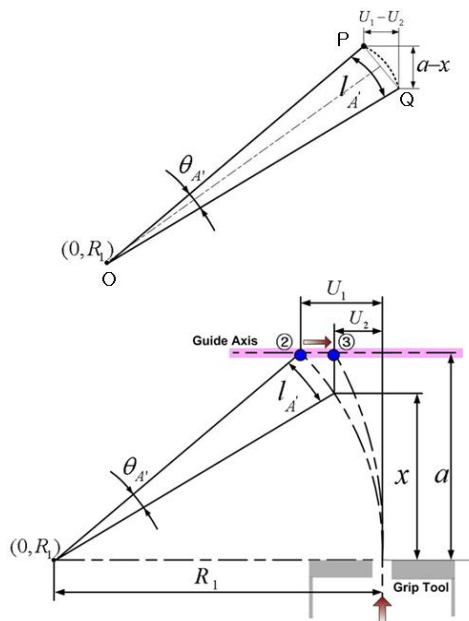


Fig. 6 Geometric relationship between guide transfer and arc length

도출 하였다.

$$(x-0)^2 + (U_2 - R_1)^2 = R_1^2, \quad x = \sqrt{2U_2 \cdot R_1 - U_2^2} \quad (6)$$

$$l_A = 2R_1 \frac{\pi}{180} \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{(a - \sqrt{2U_2 \cdot R_1 - U_2^2})^2 + (U_1 - U_2)^2}}{2R_1} \right) \quad (7)$$

범퍼에서 곡률이 처음 시작되는 구간은 중심각이 16.4° 이고 곡률반경이 1,863mm 이다. 따라서, 이 구간의 길이는 532mm 이며 식 (7)에 의해 계산된 l_A 의 길이는 20mm 이다. 따라서 가이드는 위치 ②에서 반경 512mm 의 곡률이 성형되는 순간 위치 ③으로 이동해야 하며, 이때 가이드 이송속도는 압출속도보다 빨라야 한다.

4. 성형해석 및 실험

4.1 포트홀 압출 해석

가변곡률 압출 해석은 초기 빌렛이 범퍼 형상으로 압출되는 구간과 압출된 범퍼가 가이드 이송에 의해 곡률을 가지는 구간으로 나누어 수행하였다. 본 연구에서 사용된 소재는 A7108 이고 소재의 온도 및 변형률속도에 따른 유동성을 평가하기 위하여 400, 450, 500, 550℃ 온도에서 변형률속도 0.01, 0.1, 1.0, 10.0 sec^{-1} 에 대하여 압축시험을 수행하였다. 시험결과 Fig. 7 과 같이 변형률속도가 증가함에 따라 유동응력이 증가하였으며, 온도가 증가함에 따라 유동응력이 감소하였다.

포트홀 압출을 위한 성형해석은 Fig. 8 과 같이 최종제품의 대칭성을 고려하여 1/2 단면에 대하여 수행하였으며, 상용 유한요소해석 S/W DEFORM-3D 를 사용하였다. 빌렛의 직경은 279.4mm 이고,

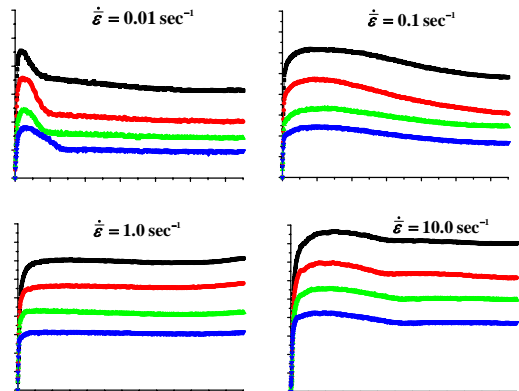


Fig. 7 True stress-strain curve of A7108

소재의 초기온도는 480℃이다. 압출비는 50.9, 램 속도는 1mm/s 이고, 분위기 온도는 25℃로 설정하였다. Table 1 에 이상의 해석조건을 나타내었다.^(5,6)

해석결과 금형 출구부에서 관찰되는 제품의 변형률, 온도분포를 Fig. 9 에 나타내었다. 제품의 온도분포는 약 510~530℃이다. 소재의 고상선 온도 (Solidus temperature)는 약 610℃이므로 부분적인 용융은 관찰되지 않는다. 변형률은 포트홀을 거치면서 약 1.4~3.0 이었다. 본 연구에서는 변형이력이 고려된 압출제에 대하여 가변곡률 해석을 위한 초기 모델로 활용하였다.

4.2 가변곡률공정 해석 및 실험

가변곡률공정 해석 모델은 Fig. 10 과 같이 설정하였다. 압출금형 출구부에서 그립툴까지의 거리는 1,300mm 이다. 그립툴과 가이드 사이의 거리는 310mm 이고, 가변곡률 압출을 위한 가이드 이송

Table 1 Conditions of FE simulation for porthole die extrusion

Extrusion conditions	Values
Material of billet	A7108
Material of tools	AISI-H13
Initial temperature of billet(℃)	480
Initial temperature of tools(℃)	460
Friction factor (m)	0.6
Punch speed (mm/s)	1.0
Dimension of billet (mm)	∅ 279.4 × h 700

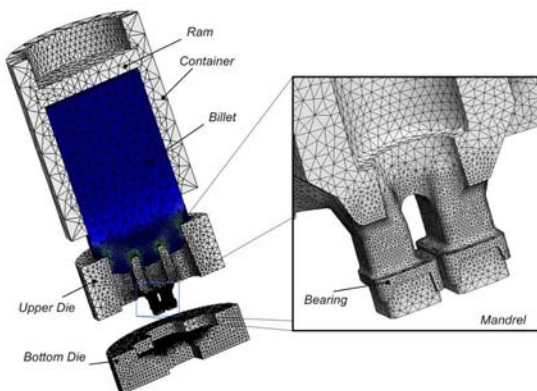


Fig. 8 FE model of porthole die extrusion

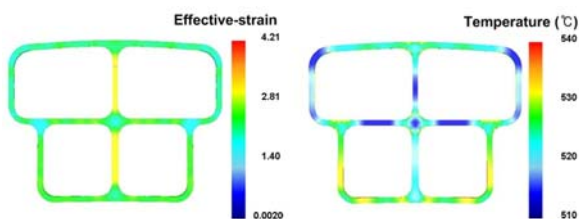


Fig. 9 Simulation results of porthole extrusion

조건은 식 (1), (4), (7)을 기초로 Table 2 와 같이 설정하였다. 이론적 해석을 바탕으로 작성된 가이드 이송 조건표를 근거로 범퍼의 가변곡률 압출 실험을 통해 검증하였다. Fig. 11 은 곡률이 성형되는 과정을 나타낸 것이다.

Fig. 12 는 성형해석 결과와 제품의 외형선을 비교한 것이다. 요구되는 제품의 형상과 약 1.2mm 의 오차를 나타내었으며, 이는 가이드 이송속도의 차이에 의해 발생한 것으로 판단된다. Fig. 13 은 실험을 통해 압출된 범퍼 백빔의 형상을 나타낸 것이다. 가변곡률 후 제품의 단면치수변화는 거의 없기 때문에 본 연구에서는 제품 외형선을 기준으로 곡률반경 1,900mm - 2,200mm - 1,900mm 의 체커

Table 2 Guide movement conditions for variable curvature extrusion

Section	Guide position (mm)	Guide movement (mm)	Time (sec)
①→②	-	+45.6	0.11
②	45.6	0	15.07
②→③	-	-4.3	15.08
③	41.3	0	24.77
③→②	-	+4.3	24.78
②	45.6	0	35.22

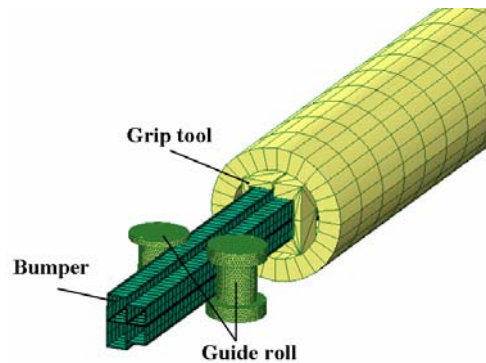


Fig. 10 FE model of variable curvature extrusion

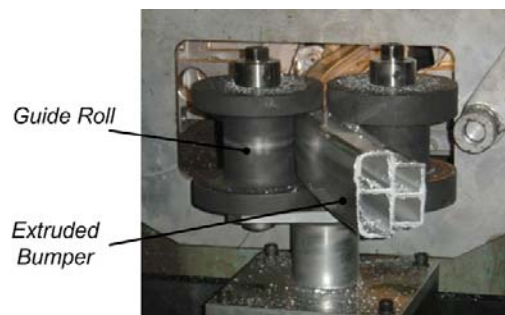


Fig. 11 A photograph of variable curvature extrusion experiment

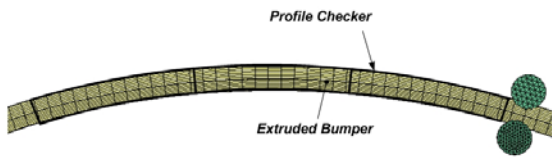


Fig. 12 Comparison of desired curvature and simulation result

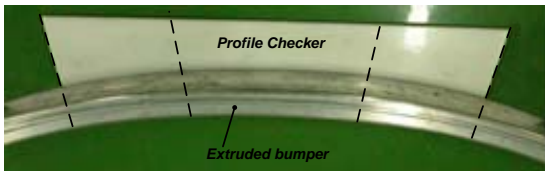


Fig. 13 Comparison of desired curvature and experimental result

(Checker)를 제작하여 제품과 비교하였으며, 이때 제품의 양 끝단부에서 1~3mm의 오차가 발생하였다. 벤딩 시 발생하는 치수오차와 벤딩 후 제품 냉각 시 발생하는 변형을 고려하여도 상당히 잘 일치함을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 압출금형 후면에 위치한 가이드의 이송으로 다양한 곡률반경을 가진 자동차 범퍼를 성형할 수 있는 가변곡률 압출기술을 개발하였고, 이를 통하여 다음의 결론을 얻었다.

(1) 가이드의 위치에 따라 압출체의 곡률반경이 달라지므로 연속적인 가이드의 움직임으로 다양한 곡률반경이 조합된 압출체를 성형할 수 있다.

(2) 압출속도가 증가함에 따라 가이드 이송속도는 증가하고, 이때 요구되는 가이드 이송속도를 결정하는 모델을 제안하였다.

(3) 요구되는 다양한 곡률반경을 정확하게 얻기 위해서는 압출속도와 가이드의 이송속도가 정교하게 제어되어야 한다. 만약, 두 속도가 정교하게 제어되지 않을 경우 곡률반경 오차가 발생한다.

(4) 가이드의 이송시기는 압출체의 곡률반경과 곡률 구간의 길이에 따라 달라지며 본 연구에서는 이를 결정하는 모델을 제안하였다.

(5) 실제 가변곡률 실험결과와 이론해석 및 유한요소해석결과가 잘 일치하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부 부품소재기술사업의 지원을 받아 행해졌으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Miller, W. S., Zhuang, L. and Wittebrood, A. J., 2000, "Recent Development in Aluminium Alloys for the Automotive Industry," *Material Science and Engineering*, Vol. 280, pp.37~49.
- (2) Kleiner, M., Chatti, S. and Klaus, A., 2006, "Metal Forming Techniques for Lightweight Construction," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 177, pp. 2~7.
- (3) Muller, and Klaus, B., 2006, "Bending of Extruded Profiles During Extrusion Process," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, pp.1238~1242.
- (4) Peter, G., Herbert, B., David, K.H. and Anjali. K.M.D.S., 2005, "Free-Bending-A New Bending Technique in the Hydroforming Process Chain," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 167, pp.302~308.
- (5) Lee, J. M., Kim, B. M., Kang, C. G. and Jo, H. H., 2005, "FE Analysis of Extrusion Process and Estimation of Welding Strength for Micro Multi Cell Tube with Serration," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 22, No.9, pp.45-59, 2005.
- (6) Lee, J. M., Kim, B. M., Kang, C. G. and Jo, H. H., 2004, "Development of Direct Extrusion Process on Al 1050 Condenser Tube by Using Porthole Die," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 21, No.7, pp.53~61.