

## 고무 패드 벤딩 공정설계에 관한 실험적 연구

권혁철\*, 임용택\*\*, 지동철\*\*\*, 이명호\*\*\*

## Experimental Study on Process Design of Rubber Pad Bending

Hyuck-Cheol Kwon, Yong-Taek Im, Dong-Cheol Ji and Meung-Ho Rhee

**Key Words :** Rubber Pad Bending(고무 패드 벤딩), Target Profile(목표 형상), Curvature(곡률), Roller Path(롤러 경로), AA6061-T6, Roof Rail(루프 레일)

## Abstract

In this study, a research for process design in bending of structural frame of AA6061-T6 with rubber pad was conducted. In this process, the conventional lower die made of metal is replaced with a polyurethane pad, resulting in high flexibility during bending. Vulcanized polyurethane rubber with shore A hardness of 60 was used for the pad. Experiments on a newly developed bending machine were carried out by controlling the stroke of the roller and horizontal movement of roller pad lower die. From this, the relation between roller path and geometry of the materials bent was obtained for the process design of producing roof rail part of a passenger car and the experimental result was compared with the target profile. For more accurate process design, it is required to control the roller path interactively. Based on the experience in developing the prototype bending machine, it is construed that a fully automated bending system with rubber pad to produce various light-weight components for automotive body frames can be successfully developed.

## 1. 서론

자동차 경량화는 자원 고갈과 지구 온난화의 주요한 원인인 화석연료 소모와 배기가스 발생을 동시에 줄일 수 있는 방법으로 기대되고 있다. 이러한 차량 경량화의 중요성에 대한 인식으로부터 초경량철강차체(Ultra-Light Steel Auto Body, ULSAB) 개발, 알루미늄 스페이스 프레임(Aluminum Space Frame, ASF) 기술 개발, 그리고 대체 소재 개발에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다.

이들 연구 가운데, 알루미늄 스페이스 프레임 기술이 자동차 산업에서 많이 적용되고 있는데, 이는 낮은 비중, 높은 비강성, 우수한 부식저항, 양호한 재활용성, 그리고 우수한 성형성과 같은 알루미늄 압출재의 장점에 기인하는 것이다. 기존에 구조용 부품으로 적용되던 직선형 압출재와는

달리 자동차 차체 프레임의 제작에는 다양한 형상을 갖는 형상 성형을 위한 굽힘공정이 요구된다. 따라서 이러한 굽힘부재의 설계 및 생산을 위해서는 다양한 형상의 프레임 제작에 필요한 유연성 있는 굽힘공정 기술이 지원되어야 한다. 더군다나 대량생산보다는 소량생산으로의 시장여건 변화로 인해 유연성 있는 굽힘 기술 개발의 필요성이 날로 증가하고 있다.

그 동안 스트레치 벤딩, 드로우 벤딩, 롤 벤딩 등과 같은 다양한 벤딩 방법에 관한 다수의 연구가 진행되어 왔다<sup>(1,2)</sup>. 그러나 각 공정의 장점들도 불구하고 금형세트의 복잡성, 높은 생산비용, 그리고 과도한 생산시간 등에 관련된 단점도 가지고 있다. 드로우 벤딩 공정의 경우 우수한 재현성을 가지지만 비교적 큰 규모의 금형세트가 요구되며 이에 따른 생산비용이 매우 높은 편이다. 그리고 롤 벤딩에서 있어서는 전체적인 금형비용이 양호하며 비교적 작은 금형으로 큰 형상의 굽힘도 가능하지만 굽힘부재의 설계 및 생산에서의 난점으로 인해 스페이스 프레임의 실제 적용과정에는

\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

\*\*\* 자동차부품연구원 경량소재개발실

많은 시행착오가 수반된다. 스트레치 밴딩의 경우 3 차원 밴딩으로 쉽게 확장될 수 있는 장점을 가지고 있지만 높은 금형비용과 함께 굽힘부재의 크기만큼 큰 치수의 금형이 요구된다는 단점을 가지고 있다. 따라서 알루미늄 스페이스 프레임 기술의 실제 적용을 위해서는 새로운 밴딩 기술의 개발이 요구된다고 볼 수 있으며, 이러한 밴딩 기술은 생산공정에서의 자유도를 증가시켜 임의 형상으로의 굽힘이 가능한 유연성 있는 생산 방식이어야 하며 또한 이 과정에서 생산에 소요되는 제반 비용이 다른 밴딩공정에 보다 낮아야만 한다.

위에서 언급한 굽힘 공정의 요구조건들을 만족시킬 수 있는 몇가지 밴딩기술이 개발되고 있으며 한 가지 예로서 최근 레이저 밴딩 기술에 관한 광범위한 연구가 수행되고 있다(3,4). 레이저 밴딩 공정은 금형이 불필요하고 접촉이 발생하지 않는 성형공정이라는 장점을 가지며 제품의 치수 정밀도가 높은 생산공정에 해당한다.

최근에는 고무패드를 이용하는 압출재 밴딩 기술이 개발되어 적용되고 있는데(5,6) 이 공정에서 기존에 금속으로 제작되던 하부금형이 폴리우레탄 고무 패드로 대체되며 롤러 형상을 갖는 상부 금형이 2 차원적으로 이송되면서 밴딩성형이 이루어진다. 이 공정에서 롤러 이송 경로의 자유도와 압축량에 따른 고무의 압축 저항력의 변화를 통해 유연성있는 밴딩공정이 가능하게 된다.

본 연구에서는 5 개의 플랜지를 갖는 알루미늄 압출재 형상에 한정하여 고무패드 밴딩 실험을 수행하였다. 이를 위해 실험용 밴딩 장치를 제작하였으며 이를 이용하여 공정 변수들의 영향을 고찰하였고, 밴딩용 롤러와 부재 변형 형상의 관계를 도출하여 루프 레일(roof rail) 형상에 관한 공정설계를 수행하고 실험 결과를 비교하였다.

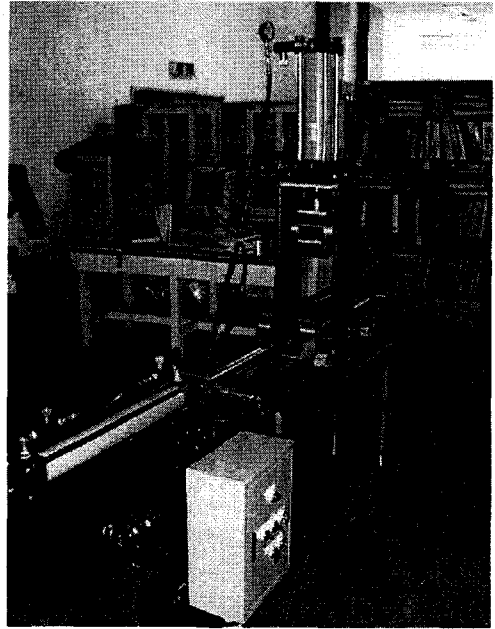
## 2. 실험

### 2.1 실험장치

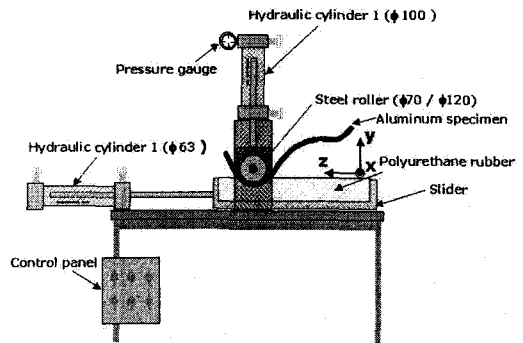
압출재의 밴딩을 위한 실험장치는 Fig. 1(a)와 (b)에 보여지는 바와 같이 2 개의 유압용 액츄에이터(actuator), 고무 패드, 롤러, 그리고 조정반(control panel)으로 구성되어 있다(그림의 모든 치수는 mm 단위로 기입되었다).

두개의 유압실린더는 압력제어식이므로, 실린더에 부착된 롤러의 이송거리는 압력제어 밸브를 이용하여 간접적으로 조절되도록 장치가 구성되어 있다. 상하 이송 실린더가 작동압력에 따라 이송되고 나면 하부의 고무장착 베드가 일정한 속도로

수평으로 이송되면서 밴딩이 수행된다. 그리고 각 실린더는 양방향으로 실린더의 이송속도를 조절하는 두개의 유량 조절용 밸브가 부착되어 있다.



(a)



(b)

Fig. 1 (a) Photo of the experimental set-up and (b) schematic diagram of the experimental set-up

본 실험에서 사용된 롤러는 Fig. 2 에 보여지는 바와 같이 알루미늄 프레임(AA6061-T6)과 맞물리도록 제작되었다. 압출재 시편은 두께 2.5 mm 인 5 개의 플랜지를 가지며 실린더 형상의 롤러는 리브 부위와 잘 맞도록 4 개의 볼록한 부위로 구성되어 있다. 이러한 구속조건으로 밴딩 과정에서 압출재의 단면형상은 거의 변형되지 않고 원래 단면형상을 유지하게 되어 밴딩 이전의 굽힘강성을 유지하게 된다.

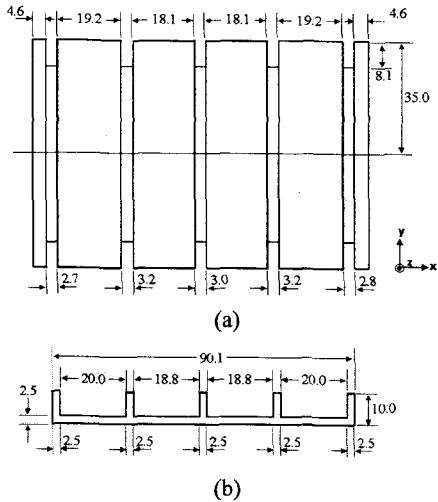


Fig. 2 Geometries of (a) the roller of radius 35 mm and (b) cross section of the aluminum frame

벤딩 공정에서 롤러의 볼록한 부분이 알루미늄 압출재와 체결된 후 롤러의 상하 이송과 고무 베드의 수평 이송에 의해 변형이 시작된다. 롤러의 상하 스트로크가 증가함에 따라 폴리우레탄 고무의 반발력이 증가하게 되는데 소재의 스프링백 정도는 고무의 반발력에 의해 결정된다. 따라서 벤딩이 이루어진 후 압출재의 최종형상은 실험에 사용된 고무의 물성치에 크게 영향을 받게 된다.

실험에 사용된 폴리우레탄 고무는 쇼어 A 스케일로  $65 \pm 5$ 의 경도를 가지며 연신률은  $1200 \pm 300\%$ 로 알려져 있다. 고무의 비선형 거동을 파악하기 위해 고무 전용 인장시험기를 이용하여 아령형 3호 시편으로 인장시험을 수행하였으며(7,8) 그 결과

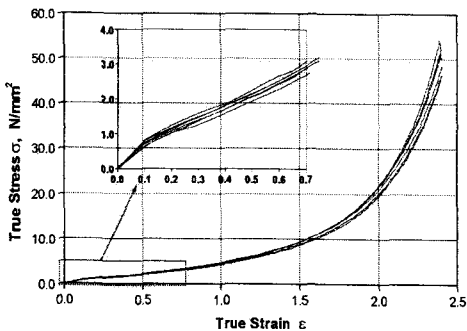


Fig. 3 Stress and strain relation of polyurethane rubber used in the experiment

를 Fig. 3에 나타내었다. 전체적으로는 비선형 거동을 보이고 있지만, 변형률 0.7(인장 시편의 길이가 두 배로 되는 변형상태)까지의 구간에서는 선

형탄성 거동을 보인다고 가정할 수 있다.

## 2.2 실험조건

본 실험에서의 주요 공정 변수들을 Table 1에 나타내었다. 여기서 롤러의 외곽반경, 롤러의 상하 스트로크, 그리고 벤딩 횟수의 영향을 벤딩 실험에서 고려하였으며 다른 변수들은 고정시켜 실험 횟수를 줄였다.

Table 1 Process parameters in the experiment

Factor	Unit	Level
Roller outer diameter	mm	70 / 120
Roller stroke (Fig. 4)	mm	0.0 ~ 5.0
Bending cycle	cycle	1 / 2
Bending velocity	mm/s	20
Al section geometry	mm	fixed

실험 과정에서 외곽형상은 동일하고 최외곽부의 롤러 직경이 각각 70 mm와 120 mm인 롤러가 사용되었다. 그리고 Fig. 4에서 보여지는 바와 같이 0.0 mm~5.0 mm까지의 깊이를 갖는 계단형 형상의 롤러 경로를 구현하여 벤딩 실험을 수행하였다.

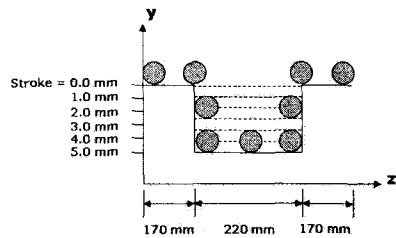


Fig. 4 Roller path in the bending experiment

그리고 롤러의 벤딩 횟수가 2회인 경우 두 번째 벤딩 경로는 첫 번째 벤딩 경로를 역으로 추적하도록 롤러 경로를 설정하였다. 그리고 두 번째 벤딩 과정에서 첫 번째 벤딩 직후 고무의 회복이 지연되는 영향을 줄이도록 첫 번째 벤딩 이후 롤러와 소재를 분리시킨 후 몇분 간의 회복 시간을 가지고 두 번째 벤딩 공정을 구현하였다. 이러한 방법으로 벤딩 횟수가 최종 소재의 변형형상에 미치는 영향에 대해 고려하였다.

## 3. 공정설계

위의 실험장치 및 조건에 의한 실험 결과를 이용하여 고무패드 벤딩 공정의 공정설계에 관한 연구를 수행하였으며 이에 관련된 전반적인 공정설

계 절차를 Fig. 5 에 나타내었다. 공정설계는 그림에 나타난 바와 같이 기초벤딩 실험, 변형형상 측정, 곡률 계산, 곡률-스트로크 관계식 도출, 임의형상의 공정설계, 그리고 설계된 공정안의 검증과정으로 구성된다(좌측상단으로부터 시계방향으로).

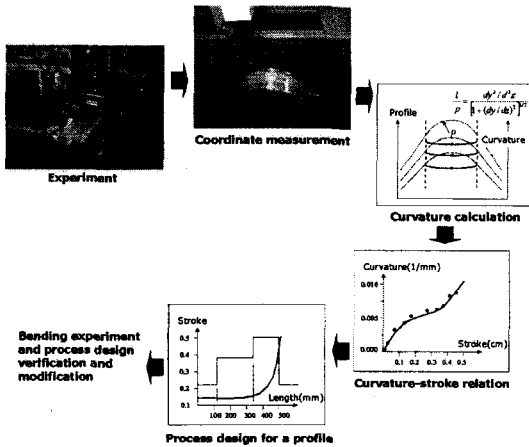


Fig. 5 Overall procedure of process design

벤딩 실험이 수행된 후에 굽힘된 압출재 프레임의 형상은 3 차원 좌표측정기를 이용하여 측정하였다. 이때 570 mm 의 압출재에서 약 550 개의 데이터를 측정하였으며 측정된 데이터 중 시편의 중앙부위 ( $150 \leq z \leq 350$ )를 4 차 다항함수로 곡선맞춤하여 측정 데이터 중의 불규칙한 데이터를 제거하였으며 구해진 다항식으로부터 변형된 압출재의 곡률분포를 계산하였다.

롤러의 스트로크와 소재변형 사이의 관계식을 도출하기 위해 구해진 곡률 데이터를 이용하였는데, 이때 시편의 중앙 ( $z=250$ )에서의 곡률을 주어진 스트로크에 대한 소재변형 형상을 대표하는 형상데이터로 선정하였다. 이 형상 데이터와 스트로크와의 관계성을 회귀분석으로 구하였으며 이 결과를 이용하여 임의의 형상을 갖는 스페이스 프레임 제품의 공정설계에 적용하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 실험결과

전술한 실험장치 및 실험조건에 기초하여 벤딩 실험을 수행하였으며 실험결과에의 예를 Fig. 6 에 나타내었다. 실험결과를 롤러 반경이 35 mm 인 롤러를 이용한 실험결과로 좌측 시편부터 스트로크가 각각 1.9, 2.5, 3.5, 4.3, 그리고 4.6 mm 에 해당하

는 벤딩 결과인데 스트로크에 따라 압출재의 벤딩 정도가 증가함을 알 수 있다.

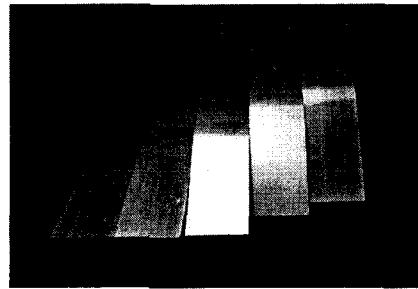
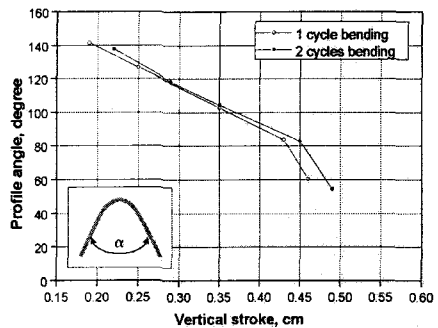
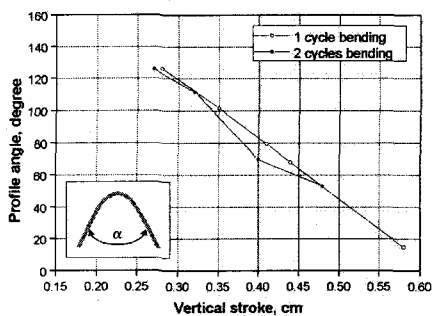


Fig. 6 Examples of the bent profiles

벤딩 횟수에 따른 최종소재의 벤딩 정도에 관한 비교를 위해 두 가지 롤러에 대한 벤딩 실험을 수행하여 그 결과를 Fig. 7(a)와 (b)에 각각 나타내었다. 그림에서와 같이 두 경우 모두, 1 회의 벤딩으로 변형된 형상과 2 회의 벤딩에 따른 변형형상이 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 따라서 실제 고무패드 벤딩 공정에서 일정한 목표 형상을 얻기 위해 2 회 이상의 동일한 공구 경로를 구현하더라도 큰 효과를 얻을 수 없을 것으로 판단된다.



(a)



(b)

Fig. 7 Angle of bent profiles according to the bending cycle: (a) roller radius = 35 mm and (b) roller radius = 60 mm

#### 4.2 공정설계 및 고찰

공정설계에 필요한 스트로크와 시편 중앙부 곡률의 관계식을 얻기 위해 추가 실험을 수행하였으며 이때 반경이 35 mm 인 롤러를 사용하였다. 수행된 실험 결과를 Fig. 8 에 나타내었으며 그림과 같이 두 변수 사이에는 선형적으로 반비례하는 관계가 있음을 확인하였고 구해진 선형관계식을 그림의 우측 상단에 표기하였다.

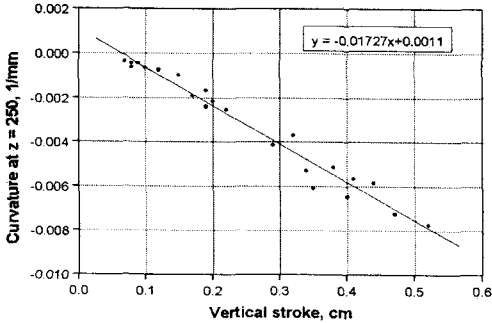


Fig. 8 Relation between stroke and the resulting curvature at the center of bent profiles

위 그림의 관계식을 승용차량의 루프를 지탱하는 루프레일 형상 공정설계에 적용하였다.

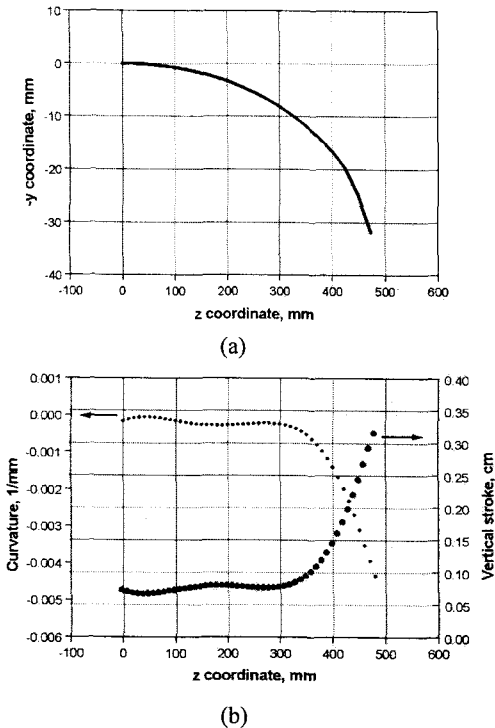


Fig. 9 Process design results: (a) profile of half of the car roof rail part and (b) curvature of the profile and required roller stroke

공정설계가 적용된 형상을 Fig. 9(a)에 나타내었는데 전체 길이가 약 500 mm 이며 끝단의 높이 차이는 약 30 mm 정도로 비교적 경사가 완만한 형상을 갖는 스페이스 프레임에 해당한다. 이 형상에 대한 곡률 분포를 구하여 Fig. 9(b)에 작은 점으로 표시하였다. 그림에서 볼 때 300 mm 이후에서 곡률값이 급격히 증가함을 알 수 있다. 구해진 관계식을 이용하여 곡률분포로부터 벤딩 공정에서 구현되어야 할 길이방향에 따른 스트로크를 구하여 그림에서 큰 점으로 나타내었다. 선형적으로 반비례하는 관계성에 의해 요구 곡률과 소요 스트로크는 거의 상하가 대칭인 형상을 취하게 되어 소요 스트로크 또한 곡률값과 함께 300 mm 이상의 부분에서 급격히 증가함을 알 수 있다.

루프 레일 형상에 대한 공정 설계 안의 타당성 검증을 위해 벤딩 실험을 수행하였다. 이때 설계된 공구 경로를 현재의 실험장비에서 구현하기 위해 롤러의 스트로크를 z 축 방향으로 10 mm 폭을 갖는 계단형 함수들의 조합으로 근사화 하였다. 그리고 좌우 이송용 슬라이더가 10 mm 이송될 때마다 압력조절밸브를 조절하여 각 부분에서의 롤러의 스트로크를 구현하였다.

구현된 공구 경로에 따른 성형결과를 목표형상과 비교하여 Fig. 10 에 나타내었는데 z 좌표값이 증가하는 좌측으로 갈수록 초기목표 형상과의 편차가 증가함을 알 수 있다. 두 형상간의 오차는 계속 증가하여 좌측 끝단에서 약 7 mm 정도의 높이 차이가 발생하였다.

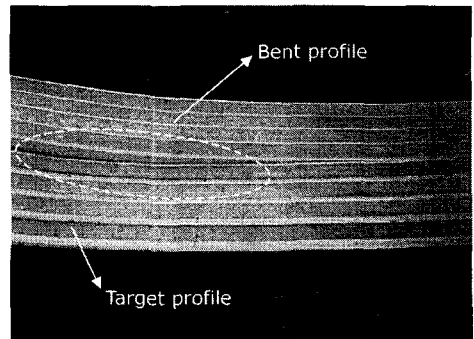


Fig. 10 Comparison of target profile and bent profile

이러한 오차의 발생 요인으로 우선 유압실린더의 응답시간을 들 수 있다. 소재의 경사가 완만한 300 mm 이하의 구간과는 달리 형상 변화가 급격히 발생하는 300 mm~400 mm 구간에서 슬라이더가 이송되는 동안 조절된 압력 밸브에 해당하는 롤러의 상하 스트로크가 구현되지 않았던 것으로 생각된다. 이로 인해 설계된 공구경로가 실험과정

에서 정확히 구현되지 않았을 것으로 판단된다.

또한 기본 벤딩 실험결과와 일반적인 벤딩 공정으로의 적용 여부에 관한 부분도 고려되어야 한다. 즉 계단형 함수로 구현된 롤러 경로와 변형되는 소재의 곡률값 사이의 관계가 롤러 경로가 연속적으로 변하는 임의 형상의 벤딩 과정에서의 두 변수간의 관계와 동일하지 않을 수 있다는 점 또한 오차 요인으로 작용했을 것으로 추측된다.

따라서 계단형 형상으로 구현된 스트로크와 소재곡률의 관계성이 임의 형상의 벤딩 공정에 일반적으로 적용가능한지를 2 차원 모델에 대한 공정 해석을 통해서 검토해 보고자 한다. 이와 함께 2 차원 상에서의 임의형상 제어가 가능하도록 현재의 장치를 수정, 보완하는 작업이 필요하고 공구 경로의 실시간 측정을 가능하도록 하여 고무패드 벤딩 공정의 공정설계에서의 정확성을 향상시키는 추가 연구가 필요하다고 보여진다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 알루미늄 스페이스 프레임에 대한 고무패드 벤딩 공정의 공정설계에 관한 실험적 연구결과를 제시하였다. 이러한 실험 과정에서 새로 개발된 벤딩 장치를 이용하였으며 실험 결과로부터 공정변수의 영향을 고찰하였고 롤러 경로와 압출재 변형간의 상관성을 도출하여 이를 루프레이 형상의 공정설계에 적용하였다.

본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 고무패드 벤딩 과정에서 롤러가 일정한 경로를 반복하는 횟수는 벤딩된 최종 제품의 형상에 미치는 영향이 매우 작음을 알 수 있었다.

(2) 임의 형상의 프레임에 관한 공정설계를 위해 롤러의 스트로크와 변형된 압출재 중앙부의 곡률간의 상관성을 도출하였으며 이를 루프레이 형상의 벤딩공정 설계에 적용하였다.

(3) 벤딩 장치에서 임의 형상으로의 공구 이송이 가능하도록 측정 및 제어 장치를 보완한다면 보다 정확한 공정설계가 가능하리라 판단된다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부에서 지원되는 차세대자동차기술개발 사업의 일부로 연구가 진행되었으며 관계자 제위께 감사 드립니다. 또한 고무 인장시험과정에서 지원을 아끼지 않으신 한국기계연구원 고무역학연구실에 감사의 뜻을 전합니다.

## 참고문헌

- (1) A. Vollerstein, A. Sprenger, J. Kraus, and H. Arnet, 1999, "Extrusion, channel, and profile bending: a review," *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 87, pp. 1~27.
- (2) A. H. Clausen, O. S. Hopperstad, and M. Langseth, 1999, "Stretch bending of aluminum extrusions: Effect of geometry and alloy," *ASCE J. Eng. Mech.*, Vol. 125, No. 4, pp. 392~400.
- (3) T. Hennige, 2000, "Development of irradiation strategies for 3D-laser forming," *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 103, pp. 102~108.
- (4) A. Otto and V. Brandt, 1999, "Closed loop control for laser bending of extrusions," *Advanced Technology of Plasticity, Proc. of the 6<sup>th</sup> ICTP*, Vol. 2, pp. 1019~1024.
- (5) M. Geiger, H. Arnet, and F. Vollerstein, 1996, "Profilbiegen mit Polyurethanmartrize," *Rohre und Profil-Blech Rohre Profile*, Vol. 43, No. 3, pp. 114~118.
- (6) H. Arnet, 1999, "Section bending with kinematic shaping," *Advanced Technology of Plasticity, Proc. of the 6<sup>th</sup> ICTP*, Vol. 3, pp. 2349~2354.
- (7) 김완두, 우창수, 한승우, 1998, "유한요소해석을 이용한 고무 재료시험 시편 설계," *대한기계학회 충청지부 춘계학술대회 논문집*, pp. 81~87.
- (8) L. R. G. Treloar, 1975, *The Physics of Rubber Elasticity*, 3rd Ed., Oxford University Press, U.K..