

마그네슘 합금(AZ31B) 버티드 튜브 성형 공정 해석

한수식[#] · 이목영¹

Numerical Study of the Butting Process for a AZ31B Magnesium Alloy Tube

S. S. Han, M. Y. Lee

(Received October 7, 2013 / Revised October 30, 2013 / Accepted November 4, 2013)

Abstract

A numerical investigation of the butting process for an AZ31B magnesium alloy tube at elevated temperatures was conducted to develop a double-buttet magnesium alloy tube. As a result of the current study, it was found that the amount of doming of the tube end, prior ironing-extrusion to obtain high wall thickness reduction are important factors for the butting process of magnesium alloy tubes. There is also a limitation of the thickness profile of butted tube due to buckling of tube wall during the stripping stage.

Key Words: Doming, Bicycle Frame, Ironing-extrusion, Weight Reduction

1. 서 론

마그네슘 합금은 낮은 밀도와 높은 비강도 그리고 우수한 충격 흡수능 등으로 인하여 경량 구조물용으로 매우 적절한 소재로서 주목을 받고 있다. 마그네슘 합금의 이러한 특징으로 인하여 경량화에 대한 요구가 높은 취미 사업 분야에 널리 적용되고 있다.

마그네슘 합금은 상온에서 낮은 연성과 성형성을 나타내고 있으나 200℃ 이상의 온간에서는 적절한 성형성을 갖고 있어 마그네슘 합금을 적용한 부품의 제작에는 다이캐스팅이 가장 일반적인 방법으로 사용되고 있다. 최근 들어서 마그네슘 합금 판재의 양산이 이루어짐에 따라 온간에서 프레스를 이용하여 마그네슘 합금 판재를 성형하는 기술이 마그네슘 합금 부품의 가공에 사용되기 시작하고 있다[1, 2].

마그네슘 합금의 적용에 대하여 관심을 갖는 분야 중의 하나가 바로 자전거 프레임 제작 분야이다. 마

그네슘 합금 튜브의 자전거 프레임 적용을 통하여 자전거 프레임의 경량화와 다른 고가 소재에 비교하여 경제성을 함께 확보할 수 있을 것으로 판단하고 있다.

본 연구에서는 경량 자전거 프레임 제작을 위하여 마그네슘 합금 튜브의 버팅 가공(Butting process) 기술을 개발하고자 하였다. 아이어닝-압출 (Ironing-extrusion) 방식에 의한 버팅 가공법을 선정하여 유한 요소 해석 모델을 작성하고 각각 인자들에 영향을 분석하였다. 해석된 결과를 바탕으로 금형을 설계, 제작하여 버팅 가공 시험을 수행하였다. 이와 같이 성형 해석과 가공 시험을 이용하여 마그네슘 합금 튜브의 버팅 가공 기술을 개발하였다.

2. Butting공정 성형 해석

2.1 Butting공정의 개요

버팅 가공은 튜브 길이 방향으로의 벽두께 분포를

1. 포항산업과학연구원 신금속연구본부

Corresponding Author : Department of Mechanical Engineering Kumoh National Institute of Technology, E-mail: sshan@kumoh.ac.kr

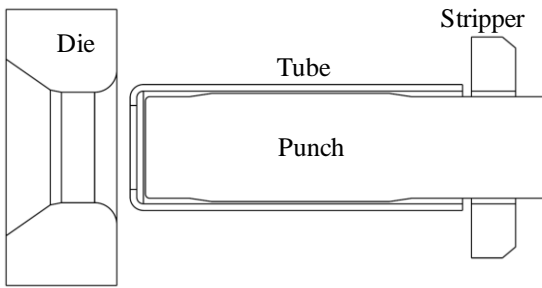


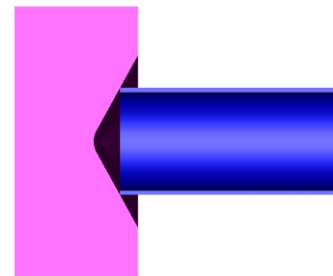
Fig. 1 Schematic diagram of ironing-extrusion process for tube butting

소성 가공을 통하여 변화시키는 가공 기술을 말한다. 그 목적은 필요한 부분의 두께를 증가 또는 감소시키는 것을 통하여 구조용 부품의 경량화와 고성능화를 이루는 것이다. 튜브 벽 두께 변경 가공을 통하여 튜브의 일부 구간에 대하여 벽두께를 주기적으로 변화시킨 튜브를 버티드 튜브(Butted tube)이라고 부른다.

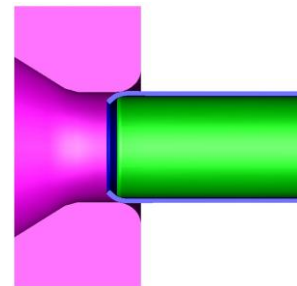
자전거 프레임의 경량화를 위하여 버티드 튜브가 널리 사용되고 있다. 프레임 부위 중에서 응력이 크게 작용하는 부위에는 튜브의 두께를 두껍게 하고 작용하는 응력이 작은 경우에는 벽 두께를 얇게 하여 전체 프레임의 중량을 감소시킨다. 버티드 튜브는 두께 차이에 의한 단차를 갖게 되는데 일반적으로 단차가 2 개인 더블 버티드 튜브가 가장 많이 사용되고 있다.

아이어닝-압출에 의한 튜브 버팅 기술은 가공 방법이 매우 간단하기 때문에 자전거 프레임용 버티드 튜브의 경우와 같이 두께 단차가 크지 않은 경우에 널리 사용된다[3](Fig. 1).

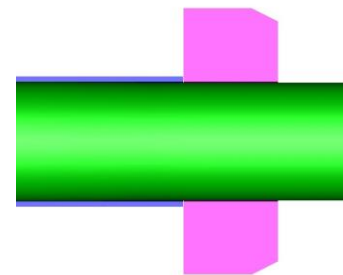
아이어닝-압출에 의한 버팅 가공 방법은 크게 3 가지의 과정으로 구성되어 있다(Fig. 2). 첫 번째 도밍(Doming)공정은 원추형 다이를 이용하여 튜브의 끝부분을 오므리는 공정이다. 이렇게 오므리기 가공된 부위는 후속되는 아이어닝-압출 공정에서 펀치에 의하여 튜브를 가공하는데 필요한 하중을 전달하는 역할을 하게 된다. 두 번째는 아이어닝-압출 공정이다. 이 공정에서 튜브의 벽 두께를 감소시켜 주며 길이 방향으로의 위치에 따라서 서로 다른 벽 두께를 갖게 할 수 있다. 이때 두께의 단차가 너무 크거나 오므리기 가공량이 부족하면 가공이 잘 이루어 지지 않는 경우가 발생하게 된다. 마지막으로 가공된 튜브를 펀치로부터 분리하는 스트리핑



(a) Doming



(b) Ironing-extrusion



(c) Stripping

Fig. 2 Each forming stage for tube butting with ironing-extrusion process

(Stripping) 공정이 있다. 만약 가공된 튜브를 펀치로부터 분리하는데 하중이 너무 많이 소요되면 튜브의 후단 부분에 좌굴이나 튜브의 표면 주름이 발생할 수 있다.

이와 같이 각각의 공정에서의 공정 조건이 적절하지 않은 경우에는 튜브의 버팅 가공이 잘 이루어지지 않는다. 각각의 공정에 대하여 유한 요소 해석을 수행하여 적절한 공정 인자 조건을 도출하고 이를 버티드 튜브 성형 공정 설계에 적용하고자 한다.

성형 해석에는 상용 유한 요소 해석 프로그램인 Pam-Stamp 2G V2012 64-bit를 사용하였고 8절점 솔리드 요소를 사용하였다. 마그네슘 합금 AZ31B 판재를 U-O 성형을 통하여 조관한 레이저 용접 튜브를 소재로 사용하였으며 소재의 온도에 따른 기계적

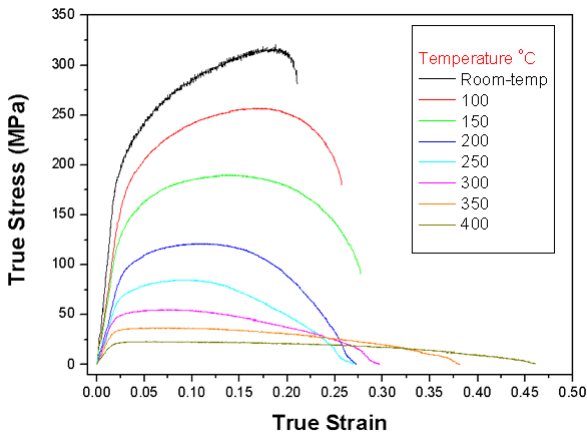


Fig. 3 Flow curves of AZ31B at various temperatures

Table 1 Conditions for finite element analysis

Tube	Condition	Butted Tube		
		OD	Max. Thickness	Min. Thickness
- AZ31B	#1	48,8mm	2.0mm	1.8mm
- OD:49.5mm				
- 2.0t				
- Length : 730mm	#2	48.6mm	2.0mm	1.7mm
	#3	48.4mm	2.0mm	1.6mm

성질은 Y. S. Lee[4]의 결과를 사용하였다. 성형 온도는 적절한 성형성이 나타나는 200℃로 선정하였다. 가열 금형을 사용하기 때문에 가공 공정중 소재와 금형 사이의 열전달은 고려하지 않았다. 성형 해석의 마찰 계수는 무윤활 조건은 0.12, 윤활 조건의 0.08을 사용하였다. 성형 해석은 표 1에 나타난 것과 같이 3가지 조건에 대하여 수행하였다.

2.2 Doming 공정 해석

도밍 공정에서는 원추각이 120° 인 금형을 이용하여 튜브 끝단을 오므리기 가공한다. 후 공정인 아이어닝-압출 공정을 위하여서는 오므리기 가공량이 클수록 유리하다. 그러나 가공량이 너무 클 경우 가공되는 튜브 선단부의 벽에서 Fig. 4와 같이 벌징 현상이 일어나 후공정이 곤란해지는 문제가 발생하게 된다. Fig. 5와 같이 성형 해석 결과, 튜브의 선단부 벽에서 벌징 현상이 발생하지 않는 최대 행정 거리인 5mm로 성형하여 후 공정을 진행하였다.

2.3 Ironing-extrusion 공정 해석

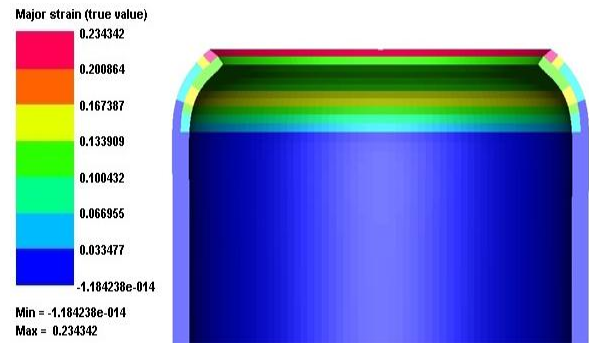


Fig. 4 Deformed shape of tube after doming (punch stroke = 6mm)

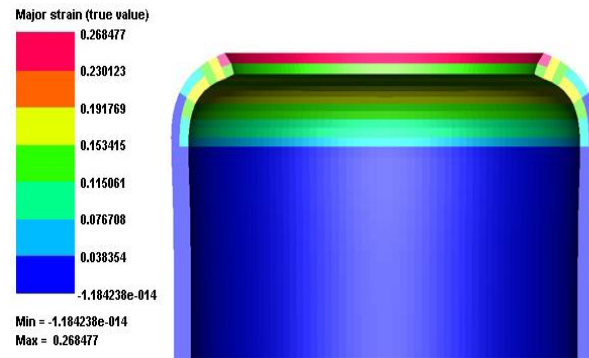


Fig. 5 Deformed shape of tube after doming (punch stroke = 5mm)

튜브 벽면의 두께에 길이 방향으로의 단차를 주는 공정인 아이어닝-압출 공정에 대하여 유한 요소 해석을 수행하였다. 아이어닝-압출 공정은 선단부가 오므리기 가공된 튜브를 단차 가공된 펀치를 이용하여 다이 공동부를 통과시키면서 튜브 벽 부분의 두께를 감소시키는 가공 방식이다. 이때 가장 중요한 사항은 가공이 종료될 때까지 펀치가 튜브를 다이 공동부로 끌고 들어가야 하는 것이다. 튜브의 벽 두께를 감소시키는데 필요한 하중은 튜브 선단부의 오므리기 가공된 부위에서 거의 대부분을 담당한다. 튜브의 오므리기 가공된 부위가 이러한 하중을 감당하지 못하면 오므리기 가공된 부위는 펀치에 의하여 변형되고 더 이상 공정을 수행할 수 없게 된다. 오므리기 가공된 부위에 작용하는 하중을 감소시키기 위하여 일반적으로 펀치와 튜브 사이는 무윤활 상태로 하고 다이와 튜브 사이는 윤활 상태로 한다.

성형 해석 조건 #2에 대하여 성형 해석한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 그리고 Fig. 7에는 성형 해석

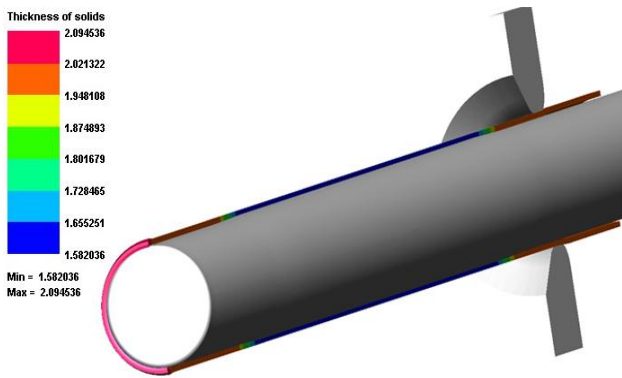


Fig. 6 Deformed shape and thickness distribution of tube after ironing-extrusion process(#2 condition)

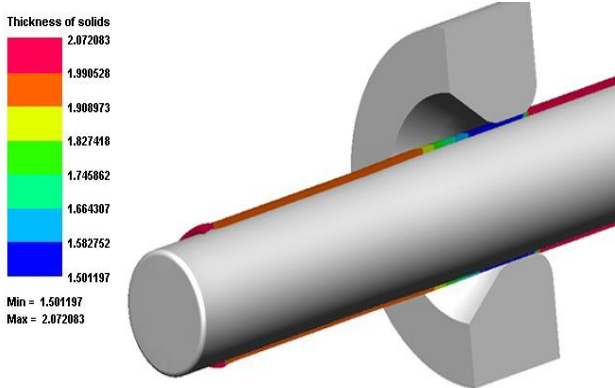


Fig. 7 Deformed shape and thickness distribution of tube during ironing-extrusion process(#3 condition)

조건 #3의 해석 결과를 나타내었다. 성형 해석 조건 #3의 경우 가공에 필요한 하중이 너무 커서 오므리기 가공한 튜브의 선단부가 펀치에 의하여 변형되어 더 이상 튜브가 다이 공동부를 통과하도록 할 수 없어서 성형이 불가능한 것을 알 수 있다.

아이어닝-압출 공정에서 튜브의 벽두께 감소량이 증가할수록 더 많은 성형 하중이 필요하게 되고 이로 인하여 튜브 선단의 오므리기 가공 부위에 가해지는 하중도 증가하게 된다. 튜브의 오므리기 가공량을 증가시키면 이 부분이 담당할 수 있는 성형 하중도 증가하지만 전술한 바와 같이 튜브의 오므리기 가공량에는 한계가 있기 때문에 아이어닝-압출 공정에서 성형 가능한 벽두께 감소량에는 한계가 있다. 본 연구에서 사용된 성형 조건으로 아이어닝-압출 가공으로부터 얻을 수 있는 벽두께 감소량은 0.3mm 정도인 것을 알 수 있었다.

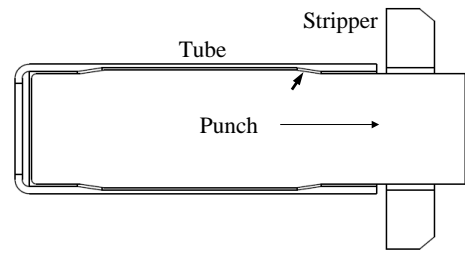


Fig. 8 Schematic diagram of stripping process

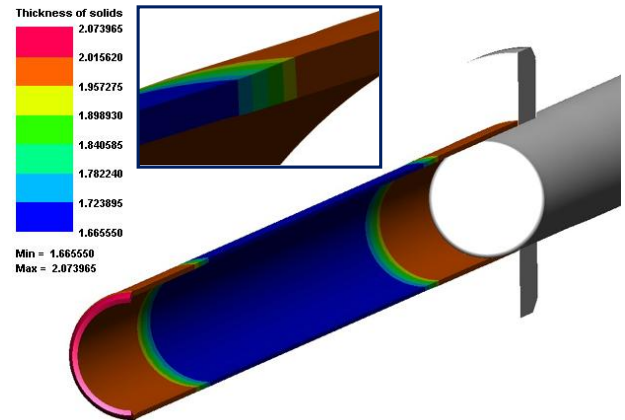


Fig. 9 Deformed shape and thickness distribution of tube after stripping process(#1 condition)

2.4 Stripping 공정 해석

스트리핑 공정은 아이어닝-압출 공정을 통하여 단차 가공된 튜브를 스트리퍼(Stripper)를 이용하여 펀치로부터 분리하는 공정이다(Fig. 8). 더블 버티드 튜브의 경우 가공된 튜브를 펀치로부터 분리하는데 필요한 하중은 튜브와 펀치 사이의 마찰 저항과 소재를 Fig. 8에서 굵은 화살표로 나타낸 단차만큼 튜브를 확장시키는데 필요한 하중이다. 버티드 튜브의 두께 단차가 증가할수록 단차만큼 튜브를 확장시키는데 필요한 하중이 증가하게 되어 스트리핑 공정의 진행이 어렵게 된다. 만약 소요 하중이 튜브의 좌굴 하중보다 크게 되면 스트리핑 공정 중에 스트리퍼와 닿는 튜브의 뒷부분에 좌굴이 발생하게 된다.

Fig. 9는 성형 해석 조건 #1로 가공된 튜브의 스트리핑 공정을 성형 해석한 결과이다. 단차 부분에서 튜브 확장이 발생하여 공정이 완료된 후에 이 부분의 외경이 아이어닝-압출 가공 후의 튜브 외경보다 약간 증가하는 것을 알 수 있다. 스트리핑 공정시 확장되는 부분 응력이 소재 항복 응력보다

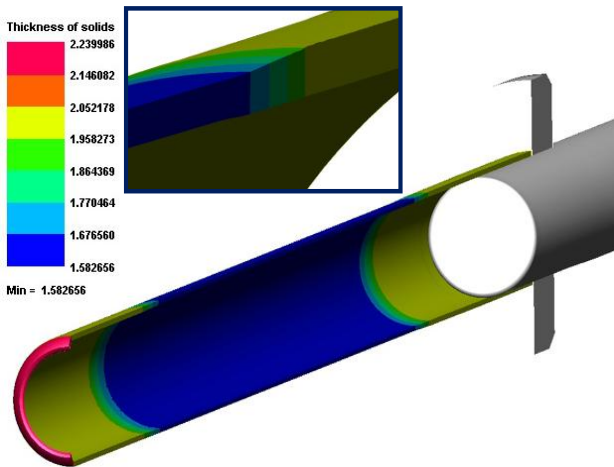


Fig.10 Deformed shape and thickness distribution of tube after stripping process (#2 condition)

커서 소성 변형이 발생하여 스트리핑 이후에도 완전히 스트리핑 전의 형상으로 탄성 회복되지 않았기 때문이다. Fig. 10는 성형 해석 조건 #2로 가공된 튜브의 스트리핑 공정을 성형 해석한 결과이다.

성형 해석 조건 #2의 경우 Fig. 10에 나타난 것처럼 스트리핑 후 튜브 표면에 미세한 주름들이 발생한 것을 알 수 있다. 이것은 튜브의 두께 단차가 너무 커서 스트리핑에 소요되는 하중이 증가하여 생긴 것으로 판단된다. 이러한 튜브 표면의 주름은 형상 불량으로 분류된다.

이상의 버팅 공정 해석 결과, 주어진 치수의 튜브를 아이어닝-압출 방법으로 버티드 튜브를 가공하기에는 성형 해석 조건 #1이 적절한 것으로 판단된다.

3. Butting 가공 시험

마그네슘 합금 튜브에 대하여 버팅 가공 시험을 수행하였다. 유한 요소 해석 결과를 바탕으로 하여 시험 대상 버티드 튜브 형상을 Fig. 11과 같이 선정하여 길이 730mm, 외경 49.5mm, 두께 2mm의 AZ31B 마그네슘 합금 튜브로 버티드 튜브를 가공할 수 있도록 금형과 펀치를 설계 제작하였다. 가공 시험에 사용된 금형과 전용 장비를 각각 Fig. 12와 Fig. 13에 나타내었다. 사용된 시험 장치는 상온에서 버팅 가공하도록 설계 제작된 것이기 때문에 금형 가열 장치가 설치되어 있지 않다. 온간 시험을 위하여 먼저 금형과 튜브를 가열로로 270℃ 까지 가열한

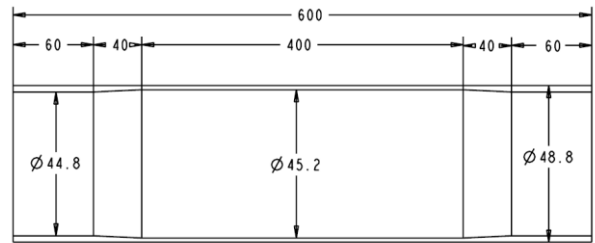


Fig.11 Geometry of butted tube for test



Fig.12 Test rig for tube butting process



Fig.13 Tools for tube butting process

다음 장치에 장착하여 약 210℃ 정도로 냉각될 때까지 기다렸다가 시험을 시행하였다. 온도 측정 결과, 시험 이후에도 금형의 온도가 200℃ 이상으로 유지되는 것이 확인되었다.

시험에서 펀치의 행정 거리는 730mm로 하였다. 마그네슘 합금 튜브와 다이 사이에는 MOLYKOTE FB-180 윤활제를 사용하였으며 펀치와 튜브 사이는 무윤활로 하였다. 윤활제는 다이 입구와 튜브 선단 부위에 도포하여 펀치의 진행에 따라 윤활제가 다이와 튜브의 경계면으로 떨어져 들어가면서 윤활이 되도록 하였다. 마그네슘 합금 튜브에 대하여 버팅 가공 전후의 튜브 모습을 Fig. 14에 나타내었다. 튜브의 직경 감소와 일부 구간의 벽두께 감소로 인하여 가공 전에 비하여 튜브 길이가 61mm 증가한 것으로 나타났다. 길이 증가분에서 초기 튜브 외경 49.5mm에서 가공 후 외경 48.8mm로의 외경 감소로



Fig.14 Butted tube after butting process

부터 계산된 길이 증가분 11mm 를 제외하면 버팅 가공으로 인한 길이 증가량은 51mm 이다. 이와 같이 버팅 가공된 튜브를 자전거 프레임 제작에 적용할 경우 튜브 길이 증가분 51m만큼의 중량 감소 효과를 얻을 수 있다.

4. 결 론

AZ31B 마그네슘 합금 튜브를 이용하여 길이 방향으로 두께 단차가 있는 더블 버티드 튜브를 가공하는 공정을 유한 요소 해석하고 결과를 활용하여 금형을 제작한 후 가공 시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

튜브 벽 두께를 감소시키는 아이어닝-압출 공정에서 얻을 수 있는 벽두께 감소량은 도밍에 의한 오프리기 가공 부분의 변형 저항에 의하여 결정된다.

가공된 튜브의 두께 단차가 너무 클 경우 스트리핑 소요 하중이 증가하여 스트리핑시 튜브에 주름을 발생시켜 형상 불량을 발생시킨다.

이와 같이 온간 아이어닝-압출 공정을 이용하여 마그네슘 합금 더블 버티드를 가공할 때 더블 버티드 튜브의 두께 단차 크기는 오프리기 가공 부분의 변형 저항뿐만 아니라 스트리핑 저항을 함께 고려해서 설계하여야 하는 것을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문입니다.

REFERENCES

- [1] E. Doege, K. Droeder, 2001, Sheet Metal Forming of Magnesium Wrought Alloys - Formability and Process Technology, J. Mater. Process. Technol., Vol. 115, No. 1, pp. 14~19,
- [2] T. Serkan, O. Fahrettin, K. Ilyas, 2008, Review of Warm Forming of Aluminum-magnesium Alloys, J. Mater. Process. Technol., Vol. 207, No. 1, pp. 1~12.
- [3] The Japan Society for Technology of Plasticity, 1990, Tube Forming, Corona, Tokyo, pp. 148~158.
- [4] Y. S. Lee, Y. N. Kwon, S. H. Kang, S. W. Kim, J. H. Lee, 2008, Forming Limit of AZ31 Alloy Sheet and Strain Rate on Warm Sheet Metal Forming, J. Mater. Process. Technol., Vol. 201, No. 1, pp. 431~435.