

유한요소해석을 이용한 증육 모델의 성형특성 연구

조종두¹ · 김영진[#]

Study of Forming Properties for an Edge Thickening Model Using the Finite Element Method

C. D. Cho, Y. J. Kim

(Received January 16, 2012 / Revised April 18, 2012 / Accepted April 25, 2012)

Abstract

This study examines the forming properties and forming loads needed to increase the edge thickness on the external face of a plate using finite element analysis(FEA). Recently, forming optimization techniques within FEA are being extensively used in designing the optimal forming conditions for processes like forging, extrusion, rolling, and spinning. Most of these existing forming operations involve reducing the volume per unit length, but research for increasing volume per unit length is not very extensive. For this study we chose an automotive engine flywheel which is a welded assembly of a plate and a gear with each component having a different thickness. We considered a forming technique to increase the thickness in order to allow the machining of the gear directly on the external face of plate alleviating the need for a weld. To study various forming techniques, we used the finite element method with the flow stress of material and incremental forming steps. We conclude from this study that the analysis of forming properties and forming loads by using the finite element analysis and testing is useful as a method to increase the thickness per unit length.

Key Words: Edge Thickening, Flow Forming, Flow Stress, Incremental Forming, Flywheel, Forming Load

1. 서 론

본 연구에서 사용된 모델은 자동변속기 자동차 엔진에 적용되고 있는 링기어(Ring-Gear) 플레이트로써, 이해의 편의를 위해 자동차 부품 산업체에서 널리 쓰이고 있는 플라이휠(Flywheel)로 표현하였다. 이 부품은 엔진의 동력을 변속기로 전달 하거나 시동모터의 피니언(Pinion) 기어를 통해 플라이휠 링기어로 동력을 전달하여 엔진이 시동되는 자동차 부품이다. 이 부품은 일반적으로 플레이트와 링기어로 구분되며, 플레이트의 외주면에 링기어를 용접하여 제조한다. 플레이트는 2~3mm 두께 판

재를 스탬핑(Stamping) 공법을 통해 제조하며, 링기어는 7~10mm 두께 및 10~15mm 폭의 사각단면 림을 기어 가공하여 제조한다. 다음의 Fig. 1 은 현재 적용되고 있는 용접형 플라이휠을 보여 준다.

그러나 이와 같이 독립적 부품에 대해 별도 용접하는 방법은 재료의 손실 및 추가적인 공정으로 인해 부품제조원가를 상승시키고 있다. 현재 많은 자동차부품들은 제조 원가를 줄이기 위해 기존 가공을 통해 제조하던 부품들을 재료의 유동응력 및 극 소성변형을 이용하는 냉간 및 열간 단조, 하이드로포밍(Hydro-forming), 딥드로잉(Deep-drawing), 압출, 압연, 스피닝(Spinning)등과 같은 많은 발전된

1. 인하대학교 기계공학과

교신저자: 인하대학교 기계공학 대학원,

E-mail: jain777@inhaian.net



Fig. 1 Welded flywheel

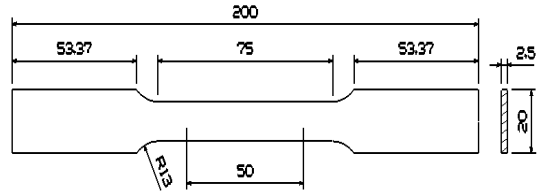


Fig. 2 Tensile test specimen

성형기법을 통해 부품을 성형하여 제조 하고 있다 [1~5].

그러나 이와 같은 성형기법들은 단위 길이당 체적을 감소하는 기법으로 이와 반대되는 단위 길이당 체적을 증대하는 성형기법의 연구는 많이 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 별도 제조를 통해 용접 결합하는 방식이 아닌 2.5mm 두께의 플레이트 외주면을 성형하여 두께를 증대하는, 증육(Edge Thickening)을 통해 기어가공이 가능한 두께 8mm 의 사각단면을 성형할 수 있는 단위 길이당 체적을 증대시키는 기법을 연구하였다. 이와 같은 증육을 위해 유동성형 및 점진성형을 적용한 유한요소해석을 이용하였으며, 유한요소해석 프로그램은 성형해석에 범용적으로 사용되고 있는 SFTC사의 DEFORM 을 사용 하였다. 성형해석을 위해 변형률 속도에 따른 재료인장시험을 통해 유동응력을 얻어 적용하였다. 유한요소해석을 통해 각 공정에서의 성형특성을 알 수 있었으며, 성형속도에 따른 성형하중을 분석할 수 있었다. 결과로써 플레이트의 외주면에 기어 가공이 가능한 사각 단면 림을 성형 할 수 있었으며, 성형특성 및 성형하중 분석을 통해 공정을 설정할 수 있었다.

그리고 시험을 통해 단위 길이당 체적을 증대하는 성형기법 및 유한요소해석을 통한 분석이 타당함을 알 수 있었다.

2. 유동응력 평가

단위 길이당 두께를 증대하는 유동성형을 위한 소재로 자동차 엔진용 플라이휠의 기어 소재로 널리 사용되고 있는 AISI 1035 탄소강을 사용하였다. 그리고 인장시험을 통해 기계적 특성 및 유동응력, 가공경화지수 등을 얻을 수 있었다. 본 연구에서 사용된 인장시험편은 Fig. 2와 같으며, ASTM 표준인장시험편을 사용하였다[6~7].

성형속도에 따른 성형특성 및 성형하중을 분석하기 위해 변형률 속도에 따른 인장시험평가를 하

Table 1 AISI 1035 mechanical property data

Property Fields	Strain Rate		
	0.5 s ⁻¹	1.0 s ⁻¹	2.0 s ⁻¹
E modulus	171 GPa	177 GPa	191 GPa
ν	0.28	0.28	0.28
Yield stress	405 MPa	406 MPa	410 MPa
Tensile stress	590 MPa	603 MPa	640 MPa
Elongation	22.9 %	22.3 %	20.5 %
n-value	0.108	0.117	0.146
Flow stress	723· $\epsilon^{0.108}$	751· $\epsilon^{0.117}$	845· $\epsilon^{0.146}$

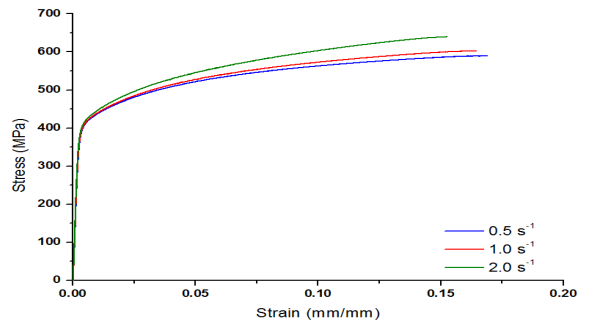


Fig. 3 Stress-strain curve for three strain rates

였으며, Table 1은 변형률 속도에 따른 기계적 특성을 정리한 것이고 Fig. 3은 변형률 속도 및 진 변형률에 대한 응력-변형률 선도이다.

성형속도에 따른 유동성형 유한요소해석을 위해 Table 1과 같이 인장시험을 통해 얻어진 변형률 속도에 따른 유동응력을 적용하였다[8].

3. 유동성형 유한요소해석

3.1 유한요소 모델링

플라이휠의 기어부 가공을 가능하게 하기 위해 Fig. 4와 같이 두께 2.5mm 플레이트의 외주면을 성형 하여 기어 가공이 가능한 폭 10mm, 두께 8mm

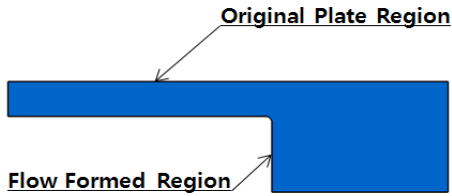


Fig. 4 The forming model description

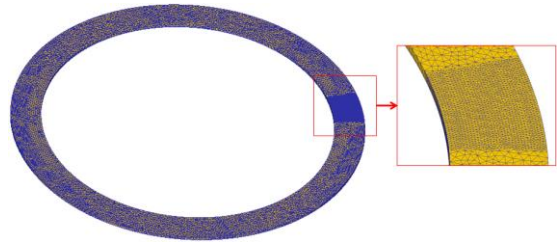


Fig. 6 FE model for the flow forming

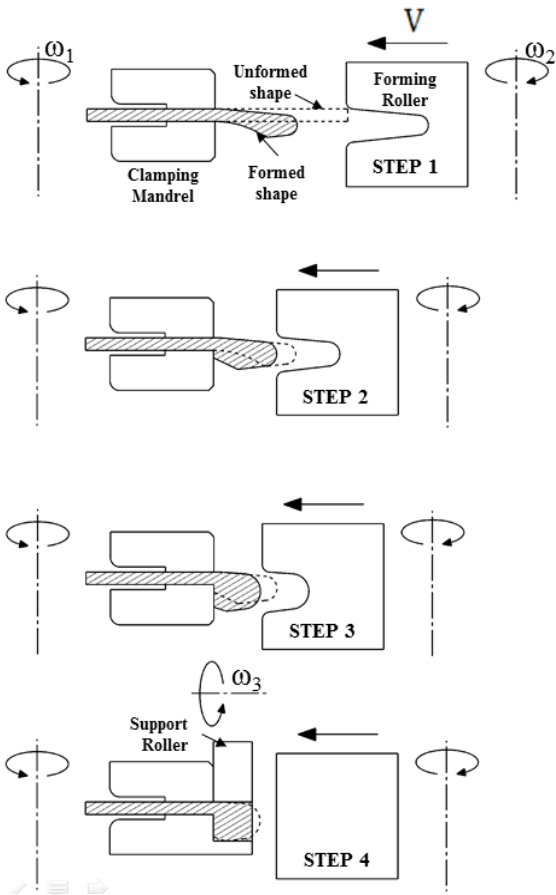


Fig. 5 Flow forming condition description

의 사각단면 림으로 성형 하는 기법을 고려 하였으며, 모델의 크기 등은 실 용접형 플라이휠의 크기를 반영하였다.

플레이트 및 링기어 개별 부품이 아닌 유동성형을 통한 단위 길이당 체적을 증대하는 증육 기법이다.

성형해석을 위한 공정 설정은 한번의 성형으로 기어 가공이 가능한 사각단면의 림을 성형할 수

없기에 4 개의 공정으로 분할한 점진성형기법을 적용 하였으며, 각 성형 단계에서의 성형 롤러 단면 형상은 공정 별 성형형상을 예측하여 구성하였다.

그리고 Fig. 5 는 각 성형 단계에 대한 공정 설정을 모델링 한 것으로 사각단면 림의 경계 및 플레이트를 고정하기 위한 상, 하 클램핑 멘드릴 (Clamping Mandrel)을 적용 하였으며, 마지막 공정 STEP 4 에서는 보조 롤러를 적용 하여 사각단면의 상, 하부 평면을 유지 하였다. 클램핑 멘드릴에 37.7 rad/s 의 각속도를 적용하여 플레이트의 회전을 적용하였으며, 성형 롤러는 플레이트 회전 중심 반경 방향으로 속도를 적용하였다. 성형 시 플레이트와 성형 롤러 간의 상대적 롤러 회전력 발생에 따른 롤러의 회전은 마찰 계수를 무시하여 반영 하였다. 그리고 성형 속도에 따른 성형특성을 분석하기 위해 성형 롤러의 성형 속도, V 는 3mm/s, 4mm/s, 6mm/s 로 다르게 하여 적용 하였다.

위의 Fig. 6 은 유한요소해석을 위한 요소 모델링으로 실제 플레이트에서 성형이 이루어지는 영역에 대해서만 전(Full) 모델링을 하였다. 플레이트의 형상은 축 대칭이지만, 성형 시 회전 각속도에 따른 변형 거동이 축 대칭으로 묘사되지 않기 때문이다. 모델의 요소는 3 차원 삼면체(3D Tetra) 요소로 정의되었으며, 사용된 요소와 절점의 수는 각 89,560 개와 23,739 개이다.

3.2 성형특성 및 성형하중평가

다음의 Fig. 7 은 유동성형 및 점진성형을 통한 각각의 성형단계에서의 성형특성 및 단면을 나타낸 것으로써 최종적으로 자동차 엔진용 플라이휠의 기어를 가공하기 위한 사각단면의 림을 성형하는, 단위 길이당 체적을 증대 하는 증육에 대한 유한요소해석 결과를 나타낸다. 단면 형상 또한 성형 예측된 성형롤러의 단면 형상을 따름을 알 수 있다.

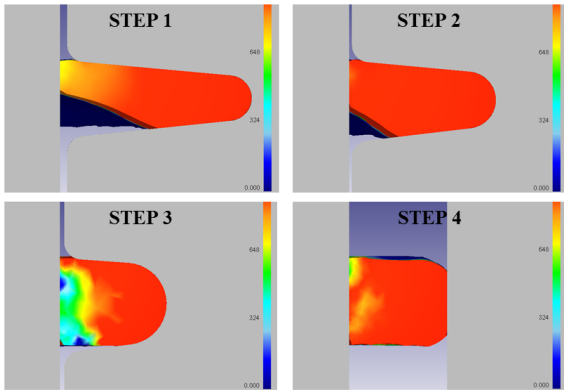


Fig. 7 Formed shape results by each step

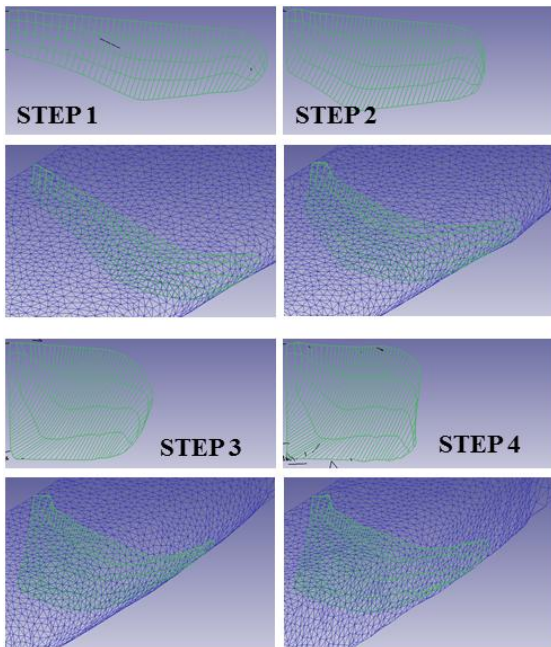


Fig. 8 Formed metal flow by each step

위의 성형특성 결과로부터 스피닝 공법과 같은 단위 길이당 체적을 감소하는 유동성형뿐만 아니라 반대되는 단위길이당 체적을 증대하는 성형 기법 또한 타당함을 알 수 있다. 그리고 위의 성형특성은 성형 물리의 성형 속도 3mm/s 에 대한 결과로써, 다른 속도 조건 4mm/s 및 6mm/s 에 대해서도 같은 성형 형상 결과를 나타내었다.

위의 Fig. 8 은 유동 성형 해석 시 각 공정에 대한 유동성형에 따른 두께 방향 및 회전 접선 방향으로의 유동흐름 결과로써, 유동흐름이 단면에 대

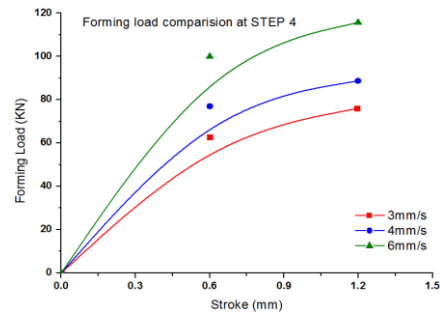
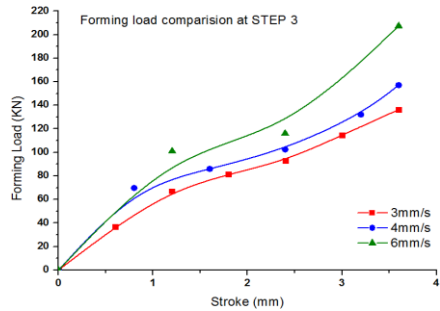
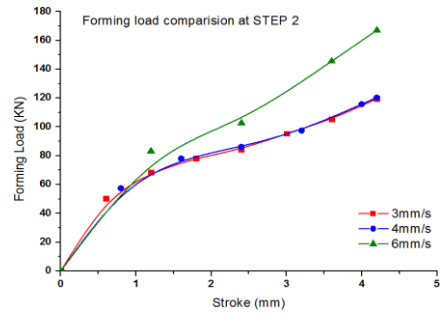
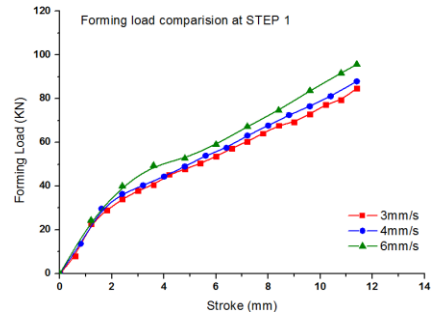


Fig. 9 Forming load comparison at forming step

한 두께 방향뿐만 아니라 회전 방향으로도 나타남을 알 수 있다. 이는 성형에 따른 변형 거동이 회전 중심 반경 방향뿐만 아니라 접선 방향으로의 변형도 있음을 나타내어 해석 모델 설정 시 축 대칭 모델이 아닌 전 모델이 타당함을 증명 한다.

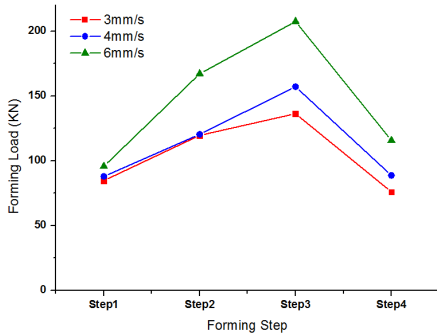


Fig. 10 Maximum forming load comparison

각 성형 공정에서의 성형에 따른 성형 롤러에 작용하는 하중을 Fig. 9 에서 나타내었으며, 성형 속도에 따른 작용하중도 각 성형 공정 별로 나타내었다. 가로축의 스트로크(Stroke)는 성형롤러의 성형 변위를 나타낸 것이다. 결과에서와 같이 공정이 진행에 따라 성형 하중 및 하중 기울기가 증대됨을 알 수 있다. 이는 소재의 극 소성변형 및 가공경화에 의한 것으로 볼 수 있으며, 인장시험을 통해 얻어진 유동응력 특성이 성형해석에서 반영됨을 알 수 있다. 특히 STEP 3의 성형공정에서 성형하중이 가장 높은 것은 변형길이는 상대적으로 작지만 단위길이당 체적의 변화가 상대적으로 많기에 그 만큼의 성형 하중이 필요함을 알 수 있다.

그리고 성형 속도에 따른 성형하중의 결과를 보면, 성형 속도 3mm/s 와 4mm/s 와의 성형하중 차이는 작음을 보여 주며, 성형 속도 6mm/s 와의 차이는 상당함을 알 수 있다.

이 또한 소재 인장 시험 시 변형률 속도에 따른 유동응력 특성과 같은 경향을 보이는 것으로, 성형 속도가 성형 하중에 미치는 영향이 큼을 알 수 있다. 위의 Fig. 10 은 성형 속도에 따른 각 공정에서의 최대 하중을 나타낸 것이다.

4. 증육 유동성형 시험

유동성형 유한요소 해석 결과를 바탕으로 성형 롤러 등의 성형 금형(Tool)을 제작 하여 기어 가공이 가능하게 하기 위한 증육 시험을 수행하였다.

Fig. 11 은 최종적 4 단계의 점진성형 및 유동성형 시험을 통해 제작된, 기어 가공이 가능하도록 외주면에 두께 8mm, 폭 10mm 의 사각단면이 유동성형된 플레이트의 시험결과를 나타낸 것이다. 단일 플레이트에 서로 다른 두께를 가지게 되어 용

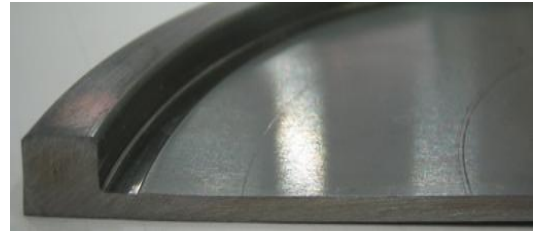


Fig. 11 Flow formed plate

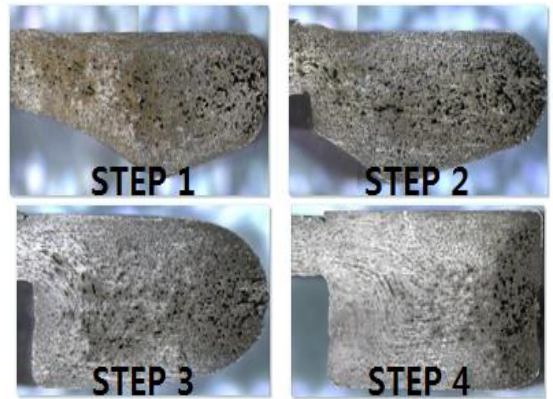


Fig. 12 Formed shape results by each step

접 조립공정 없이 플라이휠의 플레이트와 기어부를 동시에 수행할 수 있도록 한 것이다.

그리고 Fig. 12 는 각 성형 단계별 플레이트의 성형 단면을 나타낸 것으로, 유한 요소 해석을 통해 얻어진 각 성형 단계의 단면 형상 및 유동흐름과 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 또한 유동성형에 의한 금속 접힘 현상, 폴드(Fold) 없이 원활한 성형이 이루어짐을 확인 할 수 있었다.

5. 결론

본 연구는 자동차 엔진용 플라이휠에 대해 현 용접에 의한 조립이 아닌 플레이트 외주면에 두께를 증대하여 기어 가공이 가능한 사각 단면을 생성 하는 증육에 관한 것으로, 유동성형 및 점진성형을 이용하였다. 방법으로 유한요소해석 및 시험을 통하여 단위 길이당 체적을 증대하는, 증육에 대해 고찰 하였다.

- (1) 유한요소해석 및 시험을 통해 단위 길이당 체적을 증대하는 성형 기법 및 공정 모델링, 점진성형을 통한 공정 분할이 타당함을 알 수 있었다.
- (2) 성형 속도에 따른 성형 하중 분석 결과 성형

속도가 높을수록 성형 하중이 높아 짐을 알 수 있었으며, 이는 변형률 속도에 따른 소재 인장 시험 결과와 같은 경향을 나타내는 것으로 소재의 유동 응력 특성이 성형에 미침을 알 수 있었다.

(3) 성형 속도에 따른 성형 하중의 크기 차이는 있지만, 공통적으로 Step 3 공정에서 하중이 높은, 하중의 불 균일을 관찰하였다. 이는 변형길이는 상대적으로 작지만 체적 변화가 상대적으로 많기 때문이며, 향후 최적의 공정 분할 및 성형롤러 설계를 통해 성형 하중 분산의 최적화 연구가 필요함을 알 수 있었다.

본 연구를 통해 단위길이당 체적을 증대하는 성형기법에 대한 타당함을 증명할 수 있었으며, 향후, 성형하중에 의한 성형롤러의 내력 및 응력, 내구성 연구를 통해 최적의 공정 설정 연구가 필요 하다.

후 기

본 연구는 인하대학교의 지원으로 수행 되어 졌음.

참 고 문 헌

[1] C. C. Wong, T. A. Dean, J. Lin, 2003, A Review of Spinning, Shear Forming and Flow Forming

Processes, Int. J. Mach. Tools Manuf., Vol. 43, No. 14, pp. 1419~1435.

[2] C. C. Wong, A. Danno, K. K. Tong, M. S. Yong, 2008, Cold Rotary Forming of Thin-Wall Component from Flat-Disc Blank, J. Mater. Process. Technol., Vol. 208, No 1-3, pp. 53~62.

[3] M. Jie, C. H. Cheng, L. C. Chan, C. L. Chow, 2009, Forming Limit Diagrams of Strain-Rate-Dependent Sheet Metals, Int. J. Mech. Sci., Vol. 51, No. 4, pp. 269~275.

[4] J. N. Park, J. E. Keh, B. M. Kim, 2002, An Experimental Study of Automobile Hub Clutch used Flow Control Forming Techniques, J. Kor. Soc. Precis. Eng., Vol. 19, No. 12, pp. 142~149.

[5] Y. N. Kwon, S. W. Kim, B. J. Kim, E. S. Park, D. J. Cha, 2011, Development of Flow Forming Process for Hollow Shaped Parts from Seamless Steel Tube, Trans. Mater. Process., Vol. 20, No. 8, pp. 611~618.

[6] ASTM E8-01, ASTM STANDARDS 2002, Vol. 03.01.

[7] ASTM E517-00, ATSM STANDARDS 2002, Vol. 03.01.

[8] N. S. Kim, H. J. Kim, 2002, Plastic Forming and Analysis, 1st Ed, Moonwoondang, Seoul, pp. 35~40.