

유한요소법을 이용한 자동차 로어암의 액압성형 해석

김정* · 장유철* · 강성종** · 강범수***

(2001년 2월 26일 접수)

Analysis of Hydroforming Process for an Automobile Lower Arm by FEM

J. Kim, Y. C. Chang, S. J. Kang and B. S. Kang

Abstract

Tubular hydroforming has attracted increased attention in the automotive industry recently. In this study, a professional finite element program for analysis and design of tube hydroforming processes, has been developed, called HydroFORM-3D, which is based on a rigid-plastic model. With the developed program, HydroFORM-3D, the hydroforming process for an automobile lower arm is analyzed and designed. The manufacturing process for a lower arm consists of tube bending, preforming, and final hydroforming. To accomplish successful hydroforming process design, thorough investigation on proper combination of process parameters such as internal hydraulic pressure, axial feeding, and tool geometry is required. This paper describes the influences of forming conditions on the hydroforming of a lower arm by using simulation to predict strain and tube shape during bending, preforming, and final hydroforming processes.

Key Words : Hydroforming Process, Preform Design, FEM, Lower Arm

1. 서 론

액압성형 공법(hydroforming)을 통하여 부품을 제작하기 위해서는 소재(workpiece)인 원형 강관을 하부 금형 내부에 장착하고 소재의 양끝을 두 개의 수평 실린더로써 밀봉을 시킨 후, 금형 내부 형상과 동일한 성형이 되

도록 소재 내부에 작동 유체에 의한 압력을 작용시킨다. 액압성형 공법은 성형 공정 수 및 부품 개수를 줄일 수 있고, 무게 대비 강성을 높일 수 있는 장점으로 인하여 최근 들어서 자동차 구조용 부품을 생산하는 데 있어 새로운 공법으로 자리잡고 있다.⁽¹⁻³⁾ 이에 따라 액압성형 공정의 최적화가 무엇보다도 절실히 요구되고 있다.⁽⁴⁾ 본

*부산대학교 항공우주공학과 대학원

**대구기톨릭대학교 기계자동차공학부

***부산대학교 항공우주공학과

연구에서는 재료의 강소성 모델(rigid-plastic model)을 근거로 자체 개발한 3차원 유한요소해석 프로그램인 HydroFORM-3D를 활용하여 자동차 로어암(lower arm) 부품에 대한 액압성형 해석을 수행하였다.

본 해석의 궁극적인 목표는 가장 경제적이고, 효율적으로 로어암 부품을 액압성형 할 수 있도록 공정을 최적 설계하고, 제어하는데 있다. 많은 경우에 있어서, 액압성형된 부품은 여러 단계의 공정을 거치면서 마모와 스크랩(scrap)을 줄일 수 있으며 이것으로 인하여, 제조 원가와 우수한 표면 품질을 얻을 수가 있다. 로어암 부품을 성형하기 위한 다 단계 공정은 다음과 같다.

- 원소재 강관의 굽힘 성형 (prebending process of the starting blank tube)
- 굽힘 성형된 소재의 스탬핑에 의한 예비 성형 (preforming of the prebent tube by stamping process)
- 예비 성형된 소재의 최종 부품화를 위한 액압성형 (final sizing by hydroforming of the preformed tube)

액압성형 공법을 수행하기 이전에, 소재를 금형 내부에 위치시킬 수 있도록 최종 부품의 중심 축을 따라 굽힘 공정을 거치게 된다. 그 후, 굽힘 성형된 강관에 대하여 액압성형을 위한 예비 성형(preforming)을 수행한다. 로어암 부품과 같이 중심축을 따라 굽힘 성형된 소재를 액압성형할 때, 굽힘 변형이 발생한 부위에 있어서 최대 팽창 한도(maximum expansion limit)는 직관 소재를 사용한 동일 부위에서의 한도보다 낮다. 이것은 그 부위의 재료 유입(material feeding)이 충분하지 못하기 때문이다. 굽힘 성형된 소재의 외경 치수가 최종 로어암 부품의 최소 치수보다 크기 때문에 또 한번의 예비 성형을 거쳐야 한다. 이 공정은 예비 성형된 소재를 하부 액압성형 금형에 넣고 상부 금형을 닫으면서 소재에 대하여 압축력을 작용시켜 외경 치수를 줄이는 것이다. 상부 금형이 닫힌 상태에서 소재 내부에 압력을 부가시켜 최종 부품을 성형한다. 본 연구에서는 이와 같은 액압성형 공정에 대한 성형 인자 즉, 내부 압력, 축 방향으로의 소재 유입량(axial feeding) 및 마찰 조건 등과 같은 인자들의 영향을 파악하고 로어암 부품을 최적 성형하기 위한 성형 인자를 도출 하고자 한다. 아울러 본 연구에서 도출된 성형 조건하에서 실제로 로어암을 제작하여 본 해석 결과의 신뢰성을 보이고자한다.

2. 이론적 배경

본 연구에서는 성형 공정의 수치해석에 효과적으로 널리 사용되고 있는 강소성 유한요소법을 사용하였으며 수

치 해석에 관련된 일반적인 언급은 여러 문헌에 잘 나타나 있다.⁽⁵⁻⁷⁾

강소성 재료의 1차 변분 방정식은 극값 정리에 기초를 두고 비압축성, 속도 경계조건을 만족하는 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta\pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \bar{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_f} F_i \delta u_i dS = 0 \quad (1)$$

여기서, $\bar{\sigma} = \sqrt{3/2}(\sigma'_{ij}\sigma'_{ij})^{1/2}$, $\bar{\epsilon} = \sqrt{2/3}(\dot{\epsilon}_{ij}\dot{\epsilon}_{ij})^{1/2}$, $\dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_{ii}$

이고, σ'_{ij} , $\dot{\epsilon}_{ij}$, F_i , u_i 는 편차응력 텐서(deviatoric stress tensor), 변형률 속도 텐서(strain rate tensor), 표면력(surface traction), 속도(velocity) 성분 그리고 K 는 상대적으로 매우 큰 양의 값을 가지는 벌칙 상수(penalty constant)를 나타낸다. 식(1)은 유한 요소 이산화를 위한 기본 방정식이며, 이산화 과정을 거쳐 비선형 대수 방정식으로 변환 가능하다. 본 해석에서 원형 강관 소재는 8개의 절점을 가진 3차원 육면체 요소를 이용하여 이산화하였으며, 소재와 금형간에는 쿨롱 마찰 조건이 적용되었다. 금형과 변형되는 소재 사이에는 상대속도가 0(zero)이 되는 중립점이 존재하는데, 해석 시 마찰력의 갑작스런 변화로 불안정한 값이 보여지는 중립점에서의 강성 값을 계산하기 위해 속도 의존성 마찰력의 가정을 채택하였으며 다음 식과 같다.⁽⁸⁾

$$f_r \equiv -\mu N \frac{u_r}{\sqrt{u_{r_s}^2 + u_{r_t}^2 + u_0^2}} \quad (2)$$

여기서, N 은 수직 방향 힘, μ 는 마찰 계수, 상대 속도 u_r 은 접촉 면상의 국부 좌표 s , t 축에 대하여 u_{r_s} 와

u_{r_t} 성분으로 각각 나타낼 수 있다. u_0 는 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 정도의 작은 값을 사용한다. 마찰력에 관한 항은 식 (1)의 기본 방정식에 다음과 같은 형태로 첨가된다.

$$\delta\pi_f = -f_r \delta u_r = \mu N \frac{u_r}{\sqrt{u_{r_s}^2 + u_{r_t}^2 + u_0^2}} \delta u_r \quad (3)$$

그리고, 식 (3)의 미분치는 다음 식과 같다.

$$\frac{\partial \pi_f}{\partial u_{r_s}} = \mu N_i \frac{u_{r_s}}{\sqrt{u_{r_s}^2 + u_{r_t}^2 + u_0^2}} \quad (4a)$$

$$\frac{\partial \pi_f}{\partial u_{r_i}} = \mu N_i \frac{u_{r_i}}{\sqrt{u_{r_i}^2 + u_{r_n}^2 + u_0^2}} \quad (4b)$$

$$\frac{\partial^2 \pi_f}{\partial u_{r_i}^2} = \mu N_i \left(\frac{1}{\sqrt{u_{r_i}^2 + u_{r_n}^2 + u_0^2}} - \frac{u_{r_i}^2}{(u_{r_i}^2 + u_{r_n}^2 + u_0^2)^{3/2}} \right) \quad (4c)$$

$$\frac{\partial^2 \pi_f}{\partial u_{r_n}^2} = \mu N_i \left(\frac{1}{\sqrt{u_{r_i}^2 + u_{r_n}^2 + u_0^2}} - \frac{u_{r_n}^2}{(u_{r_i}^2 + u_{r_n}^2 + u_0^2)^{3/2}} \right) \quad (4d)$$

$$\frac{\partial^2 \pi_f}{\partial u_{r_i} \partial u_{r_n}} = -\mu N_i \frac{u_{r_i} u_{r_n}}{(u_{r_i}^2 + u_{r_n}^2 + u_0^2)^{3/2}} \quad (4e)$$

금형과 접촉하고 있는 절점들에 대해서 식 (4)에 의해서 마찰력이 계산된다.

3. 로어암의 예비 성형체 해석

로어암은 자동차 앞 하단부에 장착되어 크로스 멤버 및 너클 등과 조립되어 볼 조인트에 의해 타이어의 회전 중심 기능을 수행하고 주행 중에 발생하는 진동을 흡수, 완화시키는 물론 휠 얼라인먼트에 영향을 주는 부품이다. 액압성형 공법을 통하여 로어암을 제작할 경우 공정수의 감소에 따른 비용 절감과 동시에 고강도의 부품으로서 기존의 스탬핑-용접 공정에 의한 부품들을 대체할 수 있다. Fig. 1은 종래의 스탬핑-용접 공정에 의하여 제작된 로어암 조립체와 액압성형 공법에 의하여 제작된 로어암 단품을 비교해 놓았다. Fig. 2는 액압성형 공법에 의한 로어암 단품의 축 방향 길이에 따른 주요 단면 형상을 보여준다. Table 1은 강소성 모델을 따르는 소재의 응력과 변형률 사이의 가공 경화식을 나타낸다.

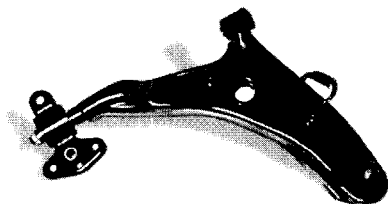


Fig. 1(a) A conventional stamping-welded lower arm assembly



Fig. 1(b) A solid model to be hydroformed

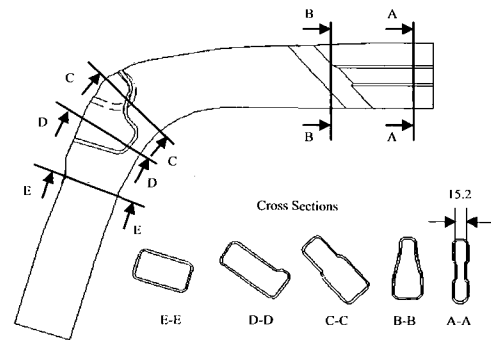


Fig. 2 Schematic view of a lower arm

쿨롱 마찰 조건이 사용되었으며, 소재는 등방성이라고 가정하였다. 예비 성형체 해석 단계에서 마찰 계수는 0.1이 적용되었다. 원형 강관의 초기 외경은 63.5mm이며, 두께는 2.6mm, 그리고, 초기 굽힘 공정 전의 길이는 600mm이다.

3.1 예비 굽힘 해석

액압성형 공법에 의하여 로어암을 제작하기 위해서는 원형 강관이 금형에 적절하게 놓여 질 수 있도록 우선 예비 굽힘 공정이 이루어져야 한다. 부품의 형상이 전반적으로 복잡하지 않은 경우, 굽힘 공정은 액압성형 금형을 이용하여 동시에 이루어지지만, 대부분의 경우 굽힘 공정은 독립적으로 이루어진다. 일반적으로 굽힘 공정시 원형 강관의 굽힘이 일어나는 부분의 바깥쪽은 두께가 감소하고, 안쪽은 증가한다.

Table 1 Tensile properties of the material used

	STKM-11A
K-value ($\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n$) (MPa)	468.3
Work-hardening exponent, n	0.206
Yield stress (MPa)	215.1

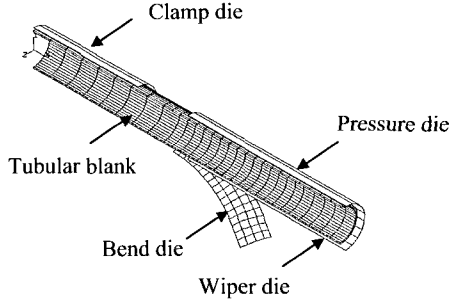


Fig. 3 Initial finite element model of the bending tool

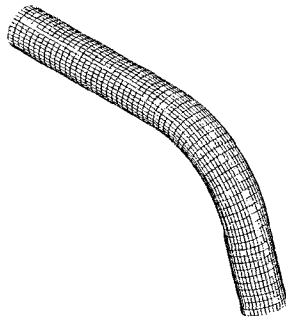


Fig. 4 Deformed shape after pre-bending operation

예비 굽힘 해석은 회전 굽힘기를 이용하였으며, 굽힘 각은 73° 이다. 회전 굽힘기를 이용한 굽힘은 두께가 얇은 원형 관에 일반적으로 널리 사용되며, 비용면에서 효율적이다. 예비 굽힘 공정은 Fig. 3에 보여지는 것처럼 굽힘 금형(bend die), 압력 금형(pressure die), 구속 금형(clamp die), 그리고 와이퍼 금형(wiper die) 등이 필요하다. 여기서 와이퍼 금형은 굽힘 성형시 압축 부위에서의 주름 발생을 방지하기 위해서 사용되어 진다.⁽⁹⁾ Fig. 4는 예비 굽힘 후의 원형 강관의 변형 형상을 나타낸다. 예비 굽힘이 끝난 단계에서의 최대 유효 소성 변형률은 0.226이고 최대 유효 응력은 368MPa이다. 그리고 최소 두께는 인장이 발생하는 굽힘 부의 바깥쪽에서 원 소재 두께의 7.3% 감소한 2.41mm이었으며, 이 수치는 실험치인 10%와 유사한 결과이다.

3.2 예비 성형체 해석

굽힘 공정 후 원형 강관의 지름은 최종 부품의 최소 치수보다도 크기 때문에 액압성형 공정 전에 예비 성형 단계를 거쳐야만 한다.⁽¹⁰⁾ 예비 성형 해석은 굽힘 공정

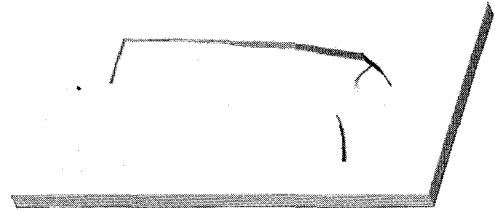


Fig. 5 Schematic view of the lower stamping and hydro-forming die

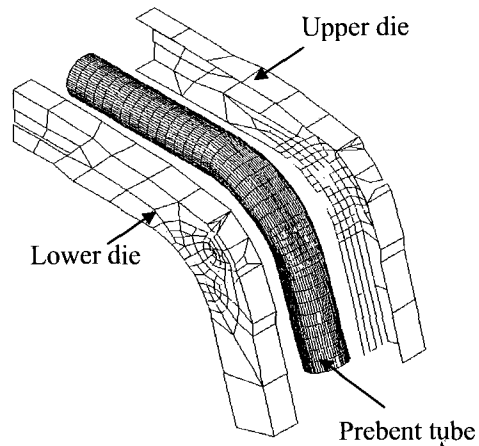
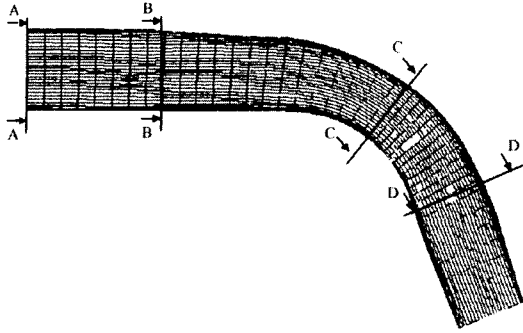


Fig. 6 Finite element model of stamping die and prebent blank

후의 모델을 사용하며, 외경을 감소시키기 위하여 액압 성형을 위한 금형 내부에 장착하게 된다. Fig. 5는 예비 성형과 액압성형을 위한 하부 금형을 나타낸다. Fig. 6은 예비 굽힘 후의 원형 강관과 스탬핑 공정을 위한 상하부 금형을 나타낸다. 초기 굽힘 성형 후에도 소재의 외경은 원 소재의 외경 치수인 63.5mm와 거의 동일하므로, 최종 로우 암 부품의 최소 치수인 15.2mm보다 크다. 따라서 24.15mm정도 치수를 낮추어줄 수 있는 스탬핑 공정이 필요하게 된다. 우선 굽힘을 거친 원형 소재를 액압 성형을 위한 금형에 위치시키고, 상부 금형이 완전히 닫힐 때까지 스탬핑 공정이 이루어진다. Fig. 7은 스탬핑 공정 후의 변형 형상과 축을 따라 주요 부분의 단면별 형상을 나타낸다. 스탬핑 공정 이후 단면은 굽힘 공정 이후의 단면 형상과는 달리 더 이상 원형 형상을 유지하지 않는다. 최대 유효 소성 변형률은 0.414이며, 최대 유효 응력은 379.3MPa이다.



A-A B-B C-C D-D

Fig. 7 Deformed shape and cross sections after preforming operation

최소 두께는 2.38mm로서, 9.2% 감소하였으며, 예비 굽힘 단계 이후보다 두께 감소율이 다소 증가하였다.

4. 로어암 액압성형 해석

액압성형 해석은 예비 성형 단계 이후의 생성 모델을 이용하게 되며, 스탬핑 공정에서와 동일한 금형을 사용한다. Fig. 8은 예비 성형체와 상하부 금형, 그리고 축 방향으로의 소재 유입을 위한 램(ram)을 보여준다.

4.1 내부 압력에 따른 성형성 평가

내부 압력에 따른 로어암의 성형성을 평가하기 위하여 Fig. 9에서 보여지는 것처럼 시간에 따른 3가지 하중 조건하에서 액압성형 해석이 수행되어졌다.

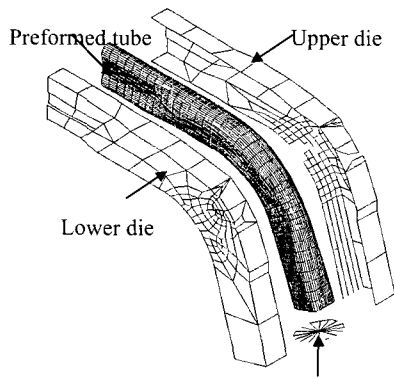


Fig. 8 Finite element model of hydroforming process

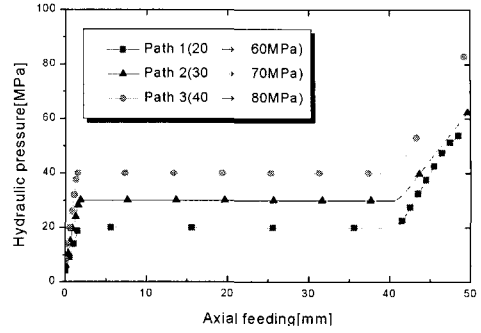
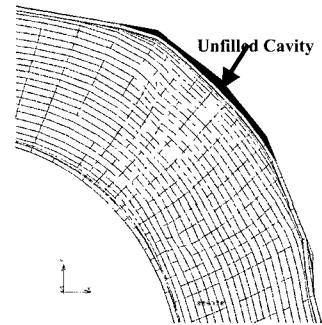
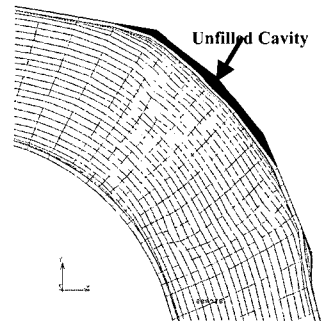


Fig. 9 Loading paths

축 방향으로의 소재 유입은 50mm로서 고정되었다. 하중 조건 1,2의 경우는 성형이 끝난 단계에서 Fig. 10에서 보여지는 것처럼 소재의 충만이 이루어지지 않았음을 확인할 수 있다. Fig. 10(a)는 최종 압력 이후의 변형 형상을 나타내고, Fig. 10(b)는 보정 압력을 가하는 지점에서의 변형 형상을 나타낸다. 이 결과로부터 완전히 충만된 액압성형 부품을 제작하기 위해서는 초기 압력이 증가하는 지점의 압력은 30MPa이상이어야 하며, 최종 압력은 40MPa보다 커야 함을 알 수 있다.



(a) Path 1



(b) Path 2

Fig. 10 Deformed shape of the workpiece for different loading paths

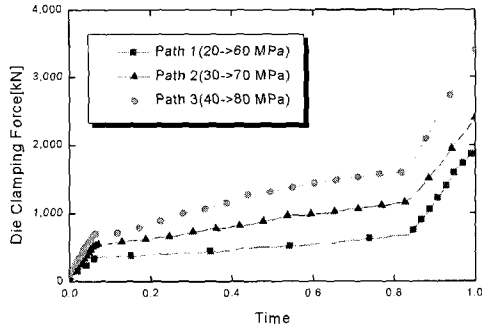


Fig. 11(a) The variations of die clamping forces during hydroforming process

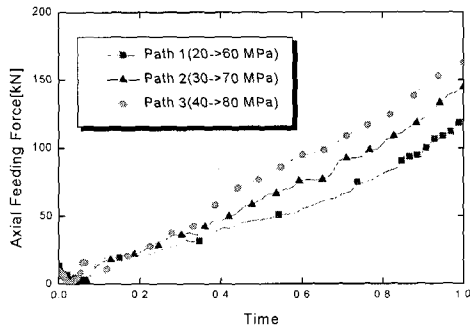


Fig. 11(b) The variations of axial feeding forces during hydroforming process

하중 조건 3의 경우 액압성형 해석 후의 최소 두께는 1.73mm(33.5% 감소)였으며, 예비 굽힘 단계 이후에서와 동일하게 굽힘이 일어나는 소재 바깥 부분에서 발생하였다. Fig. 11은 액압성형 공정 동안의 클램핑력과 축 방향으로의 소재를 유입시키기 위해 필요한 램에 걸리는 힘의 변화를 나타낸 그림이다. 이 경우 3,403kN의 클램핑력과 162kN의 축방향으로의 힘이 필요하다.

4.2 축방향으로의 소재 유입량에 따른 성형성 평가

축 방향으로의 소재 유입량에 따른 성형성을 평가하기 위해서 유입량이 없는 경우와 50mm, 그리고 100mm인 3가지 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 내부 압력은 Fig. 9의 하중 조건 2을 적용하였으며, 소재와 금형사이의 마찰 계수는 0.05로서 일정하다. 소재 유입이 없는 경우 소재 굽힘이 일어나는 부분에서 터짐 현상이 일어날 가능성이 가장 높았으며, 축 방향으로의 소재 유입이 증가할수록 성형성도 증가하였다. 이것은 터짐이 일어날 가능성이 높은 지역에 소재의 유입으로 인한 두께 증가로 인한 것이라고 할 수 있다. 하지만 과도한 소재 유입

은 최종 부품의 무게의 증가를 가져오며, 좌굴과 주름 발생의 원인이 될 수 있다. 그러므로, 축 방향으로 소재 유입은 결함이 없는 최종 부품을 얻을 수 있도록 충분하여야 하며, 과도해서는 안 된다. 소재 유입이 없는 경우 최소 두께 감소율은 42.7%로서 1.49mm였다. Table 2는 축 방향으로의 서로 다른 소재 유입량을 적용한 3가지 경우에 대한 액압성형 단계가 끝난 지점에서의 클램핑력과 램에 걸리는 힘을 나타낸다. Table 2에서 알 수 있는 바와 같이 축방향으로의 소재 유입량이 증가할수록 더 큰 램 하중이 필요하다. 한편, 클램핑력은 50mm인 경우에 다소 감소함을 보이고는 있으나 소재 유입량과는 무관하다고 판단된다.

4.3 마찰 계수에 따른 성형성 평가

소재와 금형 사이의 마찰 계수에 따른 성형성을 평가하기 위하여 마찰 계수 0.01, 0.05, 0.1, 그리고 0.2의 4가지 경우에 대하여 해석하였다. 내부 압력은 Fig. 9의 하중 조건 2가 채택되었으며, 소재 유입량은 50mm로서 고정되었다. 해석 결과로부터, 마찰 계수가 감소함에 따라 성형성이 상대적으로 양호하였으며, 이것은 소재와 금형 사이의 윤활 조건이 좋을수록 소재 유입이 쉽게 일어나기 때문이다.

Table 2 Maximum clamping forces and axial feeding forces for different axial feeding displacements

Axial feeding displacements	No feeding	50mm	100mm
Clamping force of hydroforming	3,512	3,403	3,520
Axial feeding force [kN]	N/A	162	307

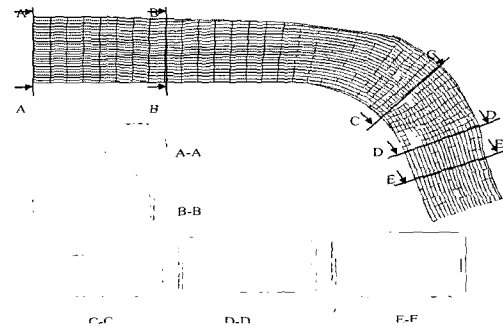


Fig. 12 Cross sections after finishing hydroforming process

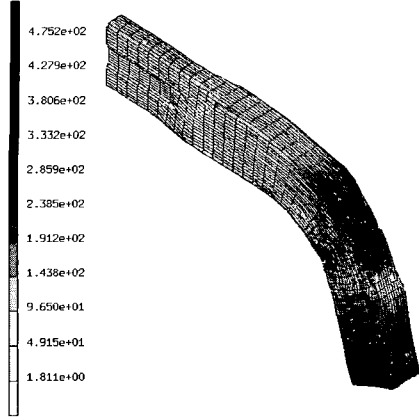


Fig. 13 Distribution of equivalent stress of the hydroformed lower arm

그리고, 마찰 계수가 0.1 이상인 경우, 국부 주름과 터짐 현상의 발생 가능성이 크게 증가하였다. 마찰 계수가 0.05인 경우, 액압성형 해석이 완전히 끝난 이후의 단면별 형상을 Fig. 12에 나타내었다. 마찰 계수 0.2의 경우 최소 두께 감소율은 52.3% (1.24mm)이며, 액압성형 금형 프레스 하중은 211kN이다. 이 경우, 밀봉을 위한 최대 금형 클램핑력은 3,158kN 이고, 최대 유효 소성 변형률은 0.738, 최대 유효 응력은 475.2MPa이다. Fig. 13은 마찰 계수가 0.05인 경우 유효 응력 분포를 나타낸 그림이다. 최대 유효 소성 변형률은 0.738이고, 최대 유효 응력은 475.2MPa이다.

5. 액압성형 공법에 의한 로어암의 제작

액압성형 공법을 사용하여 로어암 부품을 제작하기 위한 프레스 장비는 2,500톤 용량으로서, 유압을 공급하는 유압 유닛과 내부 압력과 소재 유입량이 상호 연관되게 부가될 수 있도록 하는 제어 유닛으로 구성되어 있다. 유압 유닛은 고압측에서는 4,000bar, 저압측에서는 210bar의 유압을 공급할 수 있다. 따라서 프레스 장비는 이러한 내부 유압에 견딜 수 있도록 설계되어야 하고 액압성형 공정 중에 금형을 고정시킬 수 있어야 한다. 소재 유입을 위한 축방향의 실린더는 용량이 150톤으로서 비압축성 작동 유체를 정밀하게 제어할 수 있도록 서보 밸브가 장착되어 있다. 장비의 모든 기능은 PC에서 제어 가능하도록 되어있으며, 입력 변수 및 응답은 PC 모니터에서 볼 수 있고 데이터로도 저장되어 진다. Fig. 14는 앞서 도출된 성형 조건에 의하여 제작된 로어암 부품을 보여주고 있으며 Fig. 12의 해석결과와 동일함을 알

수 있다. Fig. 15는 Fig. 12에 표시되어져 있는 부위들의 단면 형상을 보여 주고 있으며 금형 내부로 대체적으로 잘 충전이 되었음을 알 수 있다.

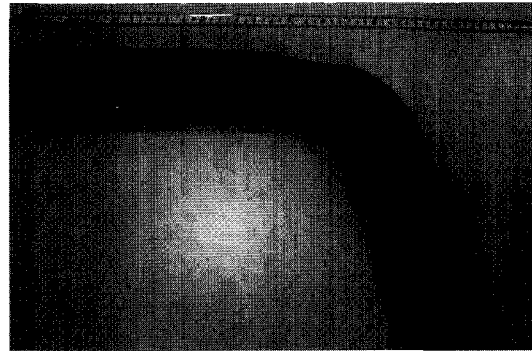


Fig. 14 Final actual shape of a lower arm by hydroforming

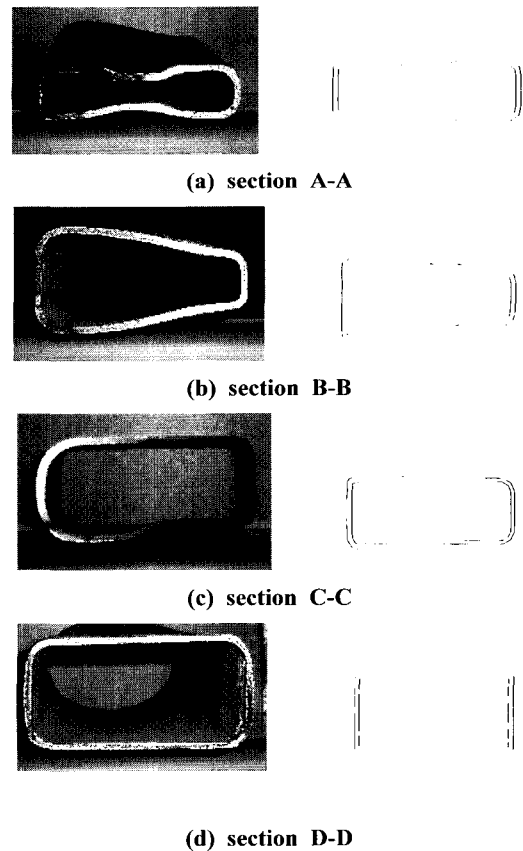
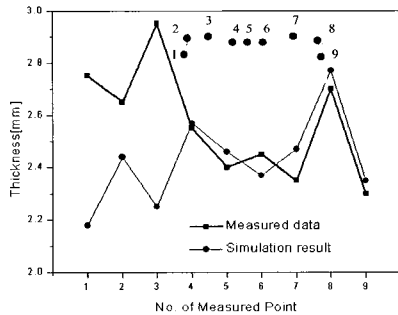
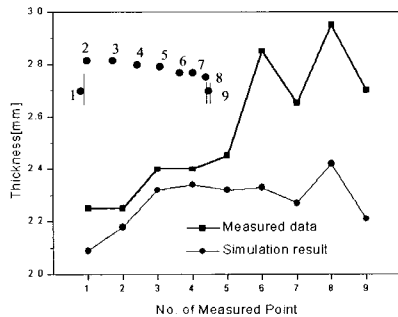


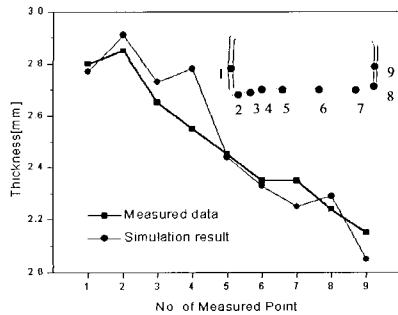
Fig. 15 Comparison of several actual cross section and the simulation results



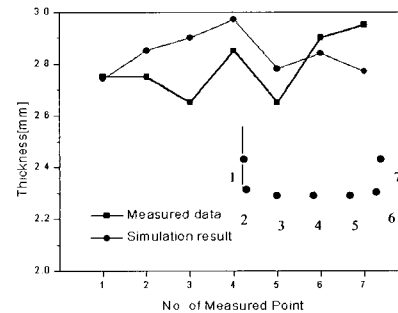
(a) Section A-A



(b) Section B-B



(c) Section C-C



(d) Section D-D

Fig. 16 Comparison of actual and the simulation results of thickness distribution

Fig. 16은 주요 단면에서 원주 방향을 따라 측정된 두께분포를 보여준다. 측정 결과에 따르면 단면 C-C의 바깥면에서 최대 두께가 줄어들 수 있으며 이 부위에서 터짐 불량 발생 가능성이 높음을 보여준다. 측정 부위에 따라서 해석 결과와 약간의 차이는 있으나 측정치와 유사함을 알 수 있다. 이러한 오차는 로어암 시작품의 성형 결함에서 기인하며, Fig. 15에서 보는 바와 같이 일부 부위는 금형 내부 벽면까지 완전하게 성형이 이루어지지 않았음을 알 수 있으며 이러한 성형 결함이 해석치와 차이를 발생시킨다고 판단된다.

6. 결론

액압성형 공법을 이용하여 로어암 자동차 부품을 제작하기 위하여 강소성 모델에 근거를 둔 HydroFORM-3D를 이용한 유한요소해석이 수행되었다. 본 해석을 통하여 내부 압력, 축 방향으로의 소재 유입량, 그리고 소재와 금형 사이의 마찰 계수와 같은 성형 인자들에 대한 적절한 수준이 본 연구에서 제시되었으며 이를 통하여 실제 로어암 부품의 시작품(prototype)을 제작하였다.

따라서 본 연구에서 사용된 유한요소 해석 프로그램인 HydroFORM-3D가 액압성형 공법을 통하여 부품을 제작함에 있어서 설계자에게 시행 착오법에 따른 비용과 시간을 줄이고, 공정 설계에 관한 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 부산대학교 ERC/NSDM과 두뇌 한국 21사업 핵심 분야에서 지원 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

- (1) Dohmann, F. and Hartl, C., 1997, "Tube Hydroforming Research and Practical Application", J. of Mat. Proc. Technol., Vol.71, pp.174~186.
- (2) Schmoeckel, D. and Hielscher, C., 1999, "Metal Forming of Tubes and Sheet with Liquid and Other Flexible Media", Annals of CIRP, Vol.48, No.2, pp.497~513.
- (3) 손성만, 이문용, 이상용, 2000, "자동차용 범퍼 레일의 하이드로포밍 기술 연구", 한국소성가공학회지, 제9권, 제6호, pp.561~566.

- (4) Liu, J. and Hahn, D., 2000, "Optimization of Process and Tool Development for Tube Hydroforming Using Computer Simulation", Innovations in Tube Hydroforming Technology International Conference.
- (5) Manuel, M. and Martins, P., 1990, "Three-Dimensional Finite Element Contact Algorithm for Metal Forming", Int. J. for Numerical Methods in Engineering, Vol.30, pp.1341~1354.
- (6) Kobayashi, S., Oh, S. I. and Altan, T., 1989, "Metal Forming and the Finite Element Method", Oxford University Press, New York.
- (7) Chen, C. C. and Kobayashi, S., 1978, "New Solutions to Rigid Plastic Deformation Problems Using a Matrix Method", Trans. ASME, J. Eng. Ind., Vol.95, pp.865~873.
- (8) Lei, L. P., Kim, J. and Kang, B. S., 2000, "Analysis and Design of Hydroforming Process for Automobile Rear Axle Housing by FEM", Int. J. of Machine Tools & Manufacture, Vol.40, pp.1691~1708.
- (9) Yang, J. B., Jeon, B. H. and Oh, S. I., 1999, "Tube Bending Technology of Hydroforming Process for an Automotive Part", Proc. of AFDM99, Pusan Korea, pp.557~562.
- (10) Kim, J., Lei, L. P. and Kang, B. S., 2000, "Preform Design in Hydroforming of Automobile Lower Arm by FEM", International Manufacturing Conference in China.