

# 유한요소법에 의한 자동차 로어암의 하이드로포밍 성형 해석 및 제작

김정\*·강성종\*\*·강범수\*\*\*

## Manufacture and Analysis of Hydroforming Process for an Automobile Lower Arm by FEM

Jeong Kim, Sung-Jong Kang and Beom-Soo Kang

**Key Words** : Hydroforming Process(하이드로포밍 공정), FEM(유한요소법), Lower Arm(로어암)

### Abstract

An automobile lower arm has been fabricated in a prototype form by hydroforming with the aids of numerical analysis and experiments. For the numerical process design, a program called HydroFORM-3D developed here on the basis of a rigid-plastic model, has been applied to the lower arm hydroforming. The friction calculation between die and workpiece has been dealt carefully by introducing a new scheme in three-dimensional surface integration. To accomplish successful hydroforming process design, thorough investigation on proper combination of process parameters such as internal hydraulic pressure, axial feeding, and tool geometry has been performed. Results obtained from numerical simulation for a lower arm in hydroforming process are compared with a series of experiments. The comparison shows that the numerical analysis successfully provides the manufacturing information on the lower arm hydroforming, and it predicts the geometrical deformation and the thinning.

### 1. 서 론

원형 강관에 작동유체에 의한 압력을 가하여 복잡한 형태의 속이 빈 제품을 제작하는 성형공법을 하이드로포밍(hydroforming)이라고 한다. 다른 일반적인 성형공법과 비교하여 공정수 및 부품 무게 감소, 재료비 절감 등의 장점으로 자동차 산업에의 적용이 증가되고 있는 추세이다. 예로서, 본 공법으로 제작된 BMW AG의 리어 액슬 하우징(rear axle housing) 부품은 대략 40%의 무게 절감 효과

를 보았으며 동사에서 생산되는 자동차 중 하이드로포밍으로 제작된 서브프레임(subframe)을 장착한 차량의 수가 1994년 연간 1,000대에서 1997년 1,000,000대로 증가되었던 것으로 보고되었다.<sup>(1-2)</sup>

한편, 하이드로포밍 공정에서는 소재의 유입을 위한 튜브 끝단에 가해지는 축방향 하중과 내부 유압과의 적절한 조합이 중요한 성형인자가 된다. 시행착오를 통하여 적절한 성형 조건을 도출하는 것은 많은 시간과 비용이 소요되므로 유한요소해석을 통하여 최적의 성형 조건을 도출하는 것이 매우 유용하다고 볼 수 있다. 따라서 수치 해석 결과를 이용하여 내부 유압과 축방향 압축력과 같은 성형 인자를 적절하게 결정하는 것은 종전의 시행착오에 의한 많은 불필요한 작업을 제거시킬 수 있을 것이다.

본 연구에서는 강소성 유한요소법을 근거로 한 3차원 유한요소해석 프로그램인 HydroFORM-3D를

\* 부산대학교 대학원

\*\* 정희원, 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

\*\*\* 정희원, 부산대학교 항공우주공학과

자체 개발하면서 적용하였던 간단하고 효율적인 마찰력 계산 기법을 소개하고자 한다. 아울러 자동차 로어암 부품의 하이드로포밍 공정 해석에 적용하여 본 개발 프로그램이 성형 공정 설계에 필요한 유용한 정보를 제공할 수 있음을 보이고자 한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 강소성 유한요소법의 이론적 배경

강소성 재료의 1차 변분 방정식은 극값 정리(extremum principle)에 기초를 두고 비압축성, 속도 경계조건을 만족할 때 (1)식과 같이 표현될 수 있다.

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

여기서,  $\bar{\sigma} = \sqrt{3/2}(\sigma'_{ij}\sigma'_{ij})^{1/2}$ ,  $\tilde{\epsilon} = \sqrt{2/3}(\dot{\epsilon}_{ij}\dot{\epsilon}_{ij})^{1/2}$ ,  $\dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_{ii}$  이고  $\sigma'_{ij}$ ,  $\dot{\epsilon}_{ij}$ ,  $F_i$ ,  $u_i$  는 편차응력 텐서(deviatoric tensor), 변형률 텐서(strain rate tensor), 표면력(surface traction), 속도(velocity) 성분 그리고  $K$ 는 상대적으로 매우 큰 양의 값을 가지는 벌칙상수(penalty constant)를 나타낸다. 식(1)은 유한요소의 기본방정식이며, 이산화를 통하여 선형화된 형태의 방정식으로 나타낼 수 있다.<sup>(3-6)</sup>

강소성 지배 방정식의 하중 벡터에 절점에 가해지는 압력 하중을 부가하기 위해서는 다음과 같은 수식화가 필요하다.

$$\frac{\partial \pi_{s_f}}{\partial v_n} = - \int_{S_f} p q_n dS \quad (2)$$

여기서,  $p$ 는 하이드로포밍 공정에서의 내부 압력을,  $q_n$ 는  $n$ 번째 절점에서의 형상함수(shape function)를 나타낸다. 압력값은 강성행렬에 영향을 미치지 않으며 식(2)의 적분식은 압력이 작용하는 면적에 대한 5x5 가우스 수치적분(Gaussian quadrature)을 사용하여 계산한다. 압력 하중의 방향은 압력이 가해지는 요소의 법선 방향과 일치한다.

### 2.2 마찰 효과

소재 내부에 부과되는 높은 압력으로 인하여, 마찰조건은 하이드로포밍 공정에 영향을 미치게 되

며, 특히 국부적인 두께 변화에 큰 영향을 미친다. 마찰력 벡터  $\mathbf{f}_r$ 이 두 물체간 상대 속도 벡터  $\mathbf{u}_r$ 의 반대 방향으로 작용한다고 가정하면, 마찰조건 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{u}_r \neq 0, \quad \mathbf{f}_r = -\mu N \frac{\mathbf{u}_r}{|\mathbf{u}_r|} \quad (3a)$$

$$\mathbf{u}_r = 0, \quad \mathbf{f}_r \leq -\mu N \frac{\mathbf{u}_r}{|\mathbf{u}_r|} \quad (3b)$$

여기서,  $N$ 은 수직방향 성분의 힘,  $\mu$ 는 마찰상수이다. 급형과 변형이 발생하는 소재간에는 상대속도가 0(zero)이 되는 중립점(neutral point)이 존재하는데, 해석시 마찰력의 갑작스런 변화로 불안정한 값이 보여지는 이 중립점에서의 강성(stiffness)값을 계산하기 위해 속도의존성 마찰력의 가정을 채택하였다.<sup>(7)</sup> Chen과 Kobayashi<sup>(8)</sup>가 제시한 마찰력 계산법은 2차원 문제에 대해서는 적용 가능하지만 3차원 문제에서는 마찰력의 방향을 정확하게 표현할 수 없는 문제점이 있다. 따라서 본 논문에서는 다음과 같은 새로운 마찰력계산 방법을 제시하였다.<sup>(9)</sup>

$$\mathbf{f}_r \cong -\mu N \frac{\mathbf{u}_r}{\sqrt{u_r^2 + u_0^2}} \quad (4)$$

여기서,  $u_0$ 는 작은값을 가지는 양의 상수이며  $u_r$ 와  $u_0$ 는 급형 표면에서 정의된 국부 좌표계에서 벡터  $\mathbf{u}_r$ 의  $s, t$  방향으로의 성분들이다.

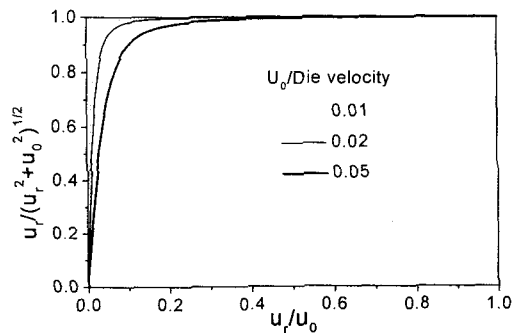


Fig. 1 The approximated function for the friction representation

Fig. 1에서 보는 바와 같이 금형의 속도가 일정할 때 금형과 소재간의 상대속도가 증가함에 따라 마찰력이  $\mu N$  값으로 접근함을 알 수 있다.  $u_0$  값에 따라 마찰력의 크기가 상당히 다르게 계산될 수 있는데, Fig. 1에서 보면  $u_r/u_0$  값이 50 이상이어야 실제 공정과 유사함을 알 수 있다. 반면,  $u_r/u_0$  값이 상대적으로 너무 크면 중립점에서 마찰력의 값이 갑작스럽게 변화하게 되므로 해석상의 불안정성이 야기된다. 따라서  $u_0$  값으로는  $10^2 \sim 10^3$  정도가 적당하다. 이러한 마찰력 항에 대한 1차 변분치를 구하면 다음 식(5)와 같다.

$$\delta\pi_f = -f_r \delta u_r = \mu N \frac{u_r}{\sqrt{u_r^2 + u_n^2 + u_0^2}} \delta u_r \quad (5)$$

식(4)의 1차 도함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial \pi_f}{\partial u_{r_n}} = \mu N_i \frac{u_{r_n}}{\sqrt{u_{r_n}^2 + u_n^2 + u_0^2}} \quad (6a)$$

$$\frac{\partial \pi_f}{\partial u_{r_n}} = \mu N_i \frac{u_{r_n}}{\sqrt{u_{r_n}^2 + u_n^2 + u_0^2}} \quad (6b)$$

$$\frac{\partial^2 \pi_f}{\partial u_{r_n}^2} = \mu N_i \left( \frac{1}{\sqrt{u_{r_n}^2 + u_n^2 + u_0^2}} - \frac{u_{r_n}^2}{\left(\sqrt{u_{r_n}^2 + u_n^2 + u_0^2}\right)^3} \right) \quad (6c)$$

$$\frac{\partial^2 \pi_f}{\partial u_{r_n}^2} = \mu N_i \left( \frac{1}{\sqrt{u_{r_n}^2 + u_n^2 + u_0^2}} - \frac{u_{r_n}^2}{\left(\sqrt{u_{r_n}^2 + u_n^2 + u_0^2}\right)^3} \right) \quad (6d)$$

$$\frac{\partial^2 \pi_f}{\partial u_{r_n} \partial u_{r_n}} = -\mu N_i \frac{u_{r_n} u_{r_n}}{\left(\sqrt{u_{r_n}^2 + u_n^2 + u_0^2}\right)^3} \quad (6e)$$

마찰력을 계산하기 위해서 외연적 방법(explicit method)을 사용하였으며, 다른 방법과 비교했을 때, 이 방법은 다루기 쉽고, 시간중분만 작게 유지된다면 높은 해의 정확도를 가진다고 알려져 있다.<sup>(10)</sup>

### 3. 자동차 로어암의 하이드로포밍

본 연구를 통해 자체 개발한 강소성 유한요소 프로그램인 HydroFORM-3D의 신뢰성을 검증하기

위해 자동차 로어암 부품에 대한 하이드로포밍 공정을 해석하였다. 아울러 해석결과는 실험치와 비교 검증하였다.

#### 3.1 예비성형체 해석

로어암은 자동차 앞 하단부에 장착되어 크로스 멤버(cross member) 등과 조립되어 타이어의 회전 중심 기능을 수행하는 부품이다. 하이드로포밍 공법을 통하여 로어암을 제작할 경우 공정수의 감소에 따른 비용 절감과 동시에 고강도의 부품으로서 기존의 스탬핑-용접 공정에 의한 부품들을 대체할 수 있다. 소재 물성치 및 치수는 다음과 같다.

소재 : STKM-11A

응력-변형률 관계 :  $\bar{\sigma} = 468.3\epsilon^{-0.206}$  MPa

관 벽 두께 : 2.6mm

원형 강관의 길이 : 600mm

외경 : 63.5mm

로어암을 제작하기 위해서는 하이드로포밍 전에 예비 굽힘과 예비 성형 단계가 요구된다.<sup>(11)</sup> 예비 굽힘은 회전 굽힘기(rotary bending machine)를 사용하였으며, 굽힘 각은  $73^\circ$ 이다. 예비 굽힘 공정에 사용되는 금형들은 Fig. 2와 같이 구성되어져 있다. 여기서 와이프 금형은 굽힘 성형시 압축부위에서의 주름 발생을 방지하기 위해서 사용되어 진다.<sup>(12)</sup> 굽힘 공정 해석을 수행한 결과, 인장을 받는 소재 바깥쪽에서 최소 두께 2.41mm로서 7.3%의 감소하였으며, 이 값은 실험치 10%와 유사하다. 굽힘 공정 후 원형 강관의 지름은 최종 부품의 최소 치수보다도 크기 때문에, 하이드로포밍 공정 전에 스탬핑과 같은 예비 성형 단계를 거쳐야만 한다.

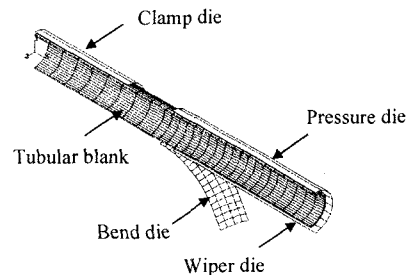


Fig. 2 Finite Element model of the pre-bending process

### 3.2 하이드로포밍 공정해석

하이드로포밍 공정해석은 급힘 공정과 스탬핑 공정과 같은 예비 성형 단계가 완료된 블랭크를 사용하게 되며, 스탬핑 공정에서의 동일한 금형을 사용한다. Fig. 3는 예비 성형체와 상·하부 금형, 그리고 축 방향으로의 소재 유입을 위한 압축 실린더를 보여준다. 축방향의 소재 유입량은 성형이 완료되기까지 선형적으로 증가시켜 최종 50mm가 되도록 하였으며, 내부 압력은 소재 유입량이 40mm가 도달할 때까지 40MPa로 일정하게 부가하고, 충전 단계에서는 최대 압력을 80MPa가 되도록 하였다. 그리고 예비성형체와 금형 벽면 사이의 마찰계수는 0.05로 가정하였다. 하이드로포밍 해석 후의 로어암 변형 형상과 단면별 형상을 Fig. 4에 나타내었으며, 성형이 잘 이루어 졌음을 알 수 있다.

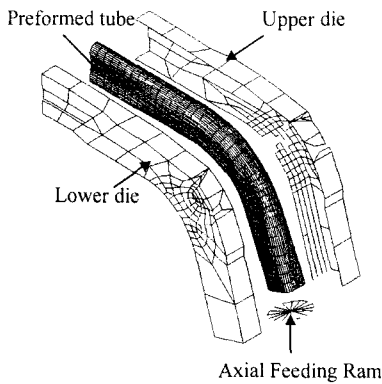


Fig. 3 Finite Element model of the hydroforming process

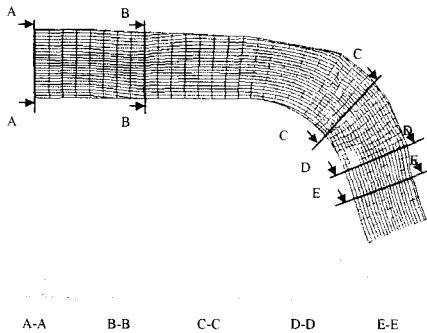


Fig. 4 Deformed shapes and cross-sections after hydroforming process

### 3.3 하이드로포밍에 의한 로어암의 제작

하이드로포밍 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 설계되어져야 하고 하이드로포밍 공정 중에 금형을 고정시킬 수 있어야 한다. 소재 유입을 위한 축방향의 실린더는 용량이 150톤으로서 비압축성 작동 유체를 정밀하게 제어할 수 있도록 서보 밸브가 장착되어져 있다. 장비의 모든 기능은 PC에서 제어 가능하도록 되어있으며, 입력 변수 및 응답은 PC 모니터에서 볼 수 있고 데이터로도 저장되어 진다. Fig. 5는 로어암을 제작하기 위하여 입력된 성형 변수와 이에 따른 실시간 응답 곡선을 보여준다. Fig. 6은 Fig. 5에 나와있는 성형 조건에 의하여 제작된 로어암 부품을 보여주고 있으며 Fig. 4의 해석결과와 동일함을 알 수 있다.

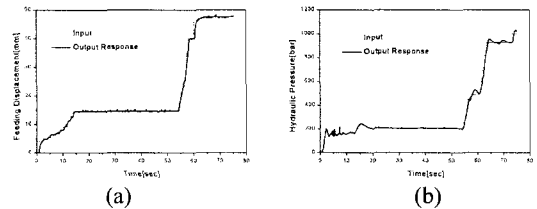


Fig. 5 Input and actual response of loading conditions for the hydroforming process; (a) axial feeding displacements, (b) internal hydraulic pressures



Fig. 6 Final actual shape of a lower arm by hydroforming

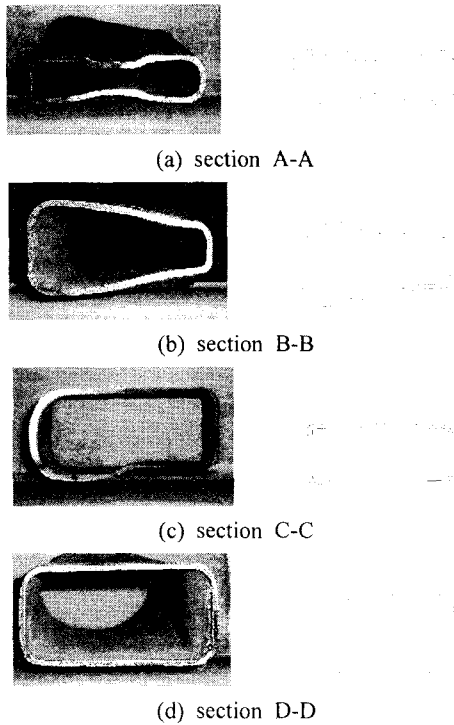


Fig. 7 Comparison of several actual cross sections and the simulation results for hydroforming process

Fig. 7은 Fig. 4에 표시되어져 있는 부위들의 단면 형상을 보여 주고 있으며 금형 내부로 대체적으로 잘 충전이 되었음을 알 수 있다. Fig. 8은 주요 단면에서 원주 방향을 따라 측정된 두께분포를 보여준다. 측정 결과에 따르면 단면 B-B의 바깥면에서 최대 두께가 줄어들음을 알 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. 7에서 보는 바와 같이 일부 부위는 금형 내부 벽면까지 완전하게 성형이 이루어지지 않았음을 알 수 있으며 이러한 성형 결함이 해석치와 차이를 발생시킨다고 판단된다.

#### 4. 결 론

하이드로포밍 공정해석을 위한 3차원 강소성 유한요소해석 프로그램인 HydroFORM-3D를 개발하여 자동차 로어암의 성형 공정해석에 적용하였다.

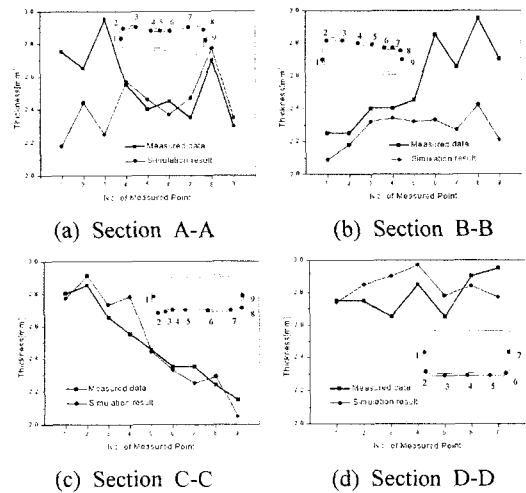


Fig. 8 Comparison of actual and simulation results of thickness distributions

아울러 쿨롱 마찰 조건을 따르는 속도 의존성 마찰력의 가정을 제시하여 안정적인 유한요소해석을 수행하였다. 내부 압력 하중은 면적에 대한 적분으로, 5×5 가우스 수치적분법을 사용하였으며 압력 하중의 방향은 압력이 가해지는 요소의 법선 방향과 일치한다고 가정하였다.

HydroFORM-3D를 사용하여 하이드로포밍 공정 해석을 수행하여 실험치와 비교해 본 결과, 해의 신뢰성을 보여주었으며 이러한 결과를 비추어 볼 때 수치해석기법을 이용한 하이드로포밍 공정해석은 실제 공정 설계에의 이해와 다양한 분야로의 적용 가능성을 보여주었다.

#### 후기

이 논문은 부산대학교의 정밀정형 및 금형가공 연구센터와 두뇌 한국 21사업 핵심 분야에서 지원 받아 수행된 연구로서 이에 감사 드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Kautz, T., 1997, "View, Trend and Developments in Hydroforming," *Hydroforming Cong.*, Nov. 4
- (2) 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.

- (3) Yang, D.Y., Chung, W.J. and Shim, H.B., 1990, "Rigid-plastic Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Sheet Metal Forming Processes with Initial Guess Generation," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.32, pp. 687~708.
- (4) Shiau, Y.C., 1989, "Three-dimensional Finite Element Analysis of Open-Die Forging and Plate Rolling," *Ph.D. Dissertation*, University of California, Berkeley.
- (5) Yoo, D.J., Song, I.S., Yang, D.Y. and Lee, J.H. 1994, "Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Sheet Metal Forming Processes Using Continuous Contact Treatment and Membrane," *J. Mater. Proc. Technol.*, Vol. 36, No. 6, pp. 513~546.
- (6) Nakamachi, E., 1990, "Computer Aided Simulation of Sheet Metal Forming Procedures by Thin Shell Finite Element," *Analysis. Advanced Technology of Plasticity*, Kyoto, Japan, July 1~6, pp. 1475~1750.
- (7) Kobayashi, S., Oh, S.I. and Altan, T., 1989, "Metal Forming and the Finite Element Method," *Oxford University Press*, New York.
- (8) Chen, C.C. & Kobayashi, S., 1978, "Rigid-Plastic Finite Element Method Analysis of Ring Application of Numerical Method to Forming Processes," *ASME AMD*, Vol. 28, No. 163.
- (9) Lei, L.P., 2000, "Analysis and Design of Hydroforming Processes by The Rigid-Plastic Finite Element Method," *Ph. D. Dissertation*, Pusan National University, Korea.
- (10) Manuel, M. and Martins, P., 1990, "Three-dimensional Finite Element Contact Algorithm for Metal Forming," *Int. J. Num. Meth. in Eng.*, Vol. 30, pp. 1341~1354.
- (11) 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*.
- (12) Yang J. B., Jeong B. H. and Oh S. I., 1999, "Tube Bending Technology of Hydroforming Process for an Automotive Part", *Proc. of AFD-M99*, Pusan Korea, pp.557~562.