

# 유한요소법을 이용한 자동차 Subframe의 하이드로포밍 공정 해석

장유철\* · 뇌여평\* · 강범수\*\*

## Analysis of Hydroforming Process for Automobile Subframe by FEM

Y. C. Chang, L. P. Lei and B. S. Kang

### Abstract

By using a three-dimensional finite element program HydroFORM-3D based on a rigid-plastic model, the hydroforming process for automobile subframe is analyzed in this study. The goal of this study is to accomplish preform design and determine the level of internal pressure for producing final hydroformed subframe component. Prior to hydroforming, the initial tube blank must be bent to the approximate centerline of the final part to enable the tube to be placed in the die cavity. After then, a preforming operation like stamping is carried out to the prebent tube. Finally, hydroforming process is performed to the preformed tube to get the final production. And through ductile fracture theory, the failure, bursting, is predicted during hydroforming process for tube blank with different diameter.

**Key Words** : Hydroforming, Fracture, Preform, FEM, Subframe

### 1. 서론

하이드로포밍(hydroforming) 성형으로 부품을 제작하기 위해서는 소재인 원형 강관을 하부 금형 내부에 장착하고 소재의 양끝을 두 개의 수평 실린더로써 밀봉을 시킨 후, 금형 내부 형상과 동일한 성형이 되도록 소재 내부에 작동 유체에 의한 압력을 작용시킨다. 성형 공정 수 및 부품 개수를 줄일 수 있고, 무게 대비 강성을 높

일 수 있다는 장점으로 인하여 최근 들어서 여러 가지 다양한 자동차 구조용 부품을 생산하는 데 있어 새로운 공법으로 하이드로포밍 공법이 점차 적용되고 있다. 이에 따라 하이드로포밍 공정의 최적화가 무엇보다도 절실히 요구되는 실정이다.

Subframe은 진동 및 소음을 차단하고, 정면충돌시 엔진의 실내유입을 방지하여, 승객을 안전하게 지켜 주는 안전장치에 속하는 부품이다. Subframe과 같이 중심축

\* 부산대학교 항공우주공학과 대학원

\*\* 부산대학교 항공우주공학과

을 따라 굽어진 부품의 경우에는 하이드로포밍 공정 이전에 원소재 튜브의 굽힘성형과 굽힘 성형된 소재의 스템핑에 의한 예비 성형과정이 요구된다.<sup>(1)</sup>

본 연구에서는 재료의 강소성 모델(rigid-plastic model)을 근거로 자체 개발한 3차원 유한요소해석 프로그램인 HydroFORM-3D를 사용하여 서로 다른 지름을 가진 알루미늄 튜브 블랭크에 대하여 동일 내부압력에 대한 하이드로포밍 성형해석을 수행하여, 두께분포와 연성파괴모델(ductile fracture model)을 이용하여 터짐(bursting)과 같은 파단현상을 예측하였다.

## 2. 이론적 배경

본 연구에서는 성형공정의 수치해석에 널리 사용되고 있는 강소성 유한요소법을 활용하였다. 강소성 재료의 1차 변분 방정식은 극값 정리(extremum principles)에 기초를 두고 비압축성, 속도 경계조건을 만족할 때 (1)식과 같이 표현될 수 있다.<sup>(2)</sup>

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

여기서,  $\bar{\sigma} = \sqrt{3/2} (\sigma'_{ij} \sigma'_{ij})^{1/2}$ ,  $\bar{\epsilon} = \sqrt{2/3} (\epsilon_{ij} \epsilon_{ij})^{1/2}$ ,  $\dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_{ii}$  이고,  $\sigma'_{ij}$ ,  $\epsilon_{ij}$ ,  $F_i$ ,  $v_i$ ,  $K$ 는 편차응력 텐서, 변형률 텐서, 표면력, 속도 텐서, 그리고  $K$ 는 상대적으로 매우 큰 양의 값을 가지는 벌칙상수(penalty constant)를 나타낸다. 식(1)은 유한요소의 기본방정식이며, 이산화를 이용하여 비선형 대수방정식으로 변환할 수 있다. 그리고 소재는 8개의 절점을 가지는 3차원 육면체 요소를 이용하여 이산화하였다.

소재 내부에 인가되는 높은 압력으로 인하여, 마찰 조건은 하이드로포밍 공정에 전반적으로 영향을 미치게 되는데 특히 국부적인 두께 변화에 큰 영향을 미친다. 금형과 소재간에는 금형과 변형되는 소재간에 상대속도가 0이되는 중립점이 존재하며 해석시 마찰력의 갑작스런 변화로 인하여 불안정한 값이 보여지는 이 중립점에서의 강성(stiffness)값을 계산하기 위하여 식(2)을 사용하였다.<sup>(3)</sup>

$$\vec{f}_r \approx -mb^n \sqrt{\frac{\vec{u}_r}{u_{rs}^2 + u_{ri}^2 + u_0^2}} \quad (2)$$

여기서,  $\vec{f}_r$ 는 마찰력,  $\vec{u}_r$  상대속도,  $r$  과  $s$ 는 각각 다이표면에서 정의되는 직교 국부 좌표계를 나타낸다.  $u_0$ 는  $10^{-2} \sim 10^{-3}$  정도의 아주 작은 상수값이며,  $m$ 은 마찰계수,  $b$ 는 수직방향 힘이다. 만약 3 또는 4개의 절점이 금형의 표면에 접촉하면 요소의 표면은 금형과 소재가 접촉하는 것으로 간주하고 마찰력이 계산된다.

또한, 연성 재질에 대한 성형 한계를 예측하기 위하여 Oyane이 제안한 식(3)과 같은 연성 파괴 이론<sup>(4)</sup>을 적용하였다.

$$I = \frac{1}{b} \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \left( \frac{\bar{\sigma}_m}{\bar{\sigma}} + a \right) d\bar{\epsilon} \quad (3)$$

여기서,  $\bar{\epsilon}_f$ 은 파단이 일어날때의 유효변형률,  $\bar{\sigma}_m$  평균 응력,  $\bar{\sigma}$  유효응력,  $\bar{\epsilon}$  유효변형률,  $a, b$  재료상수이다. 만약 연성 파괴 지수  $I$ 가 1보다 크면 파단이 일어날 것이다.

## 3. 예비 성형체 해석 및 결과

Table 1은 해석에 사용된 원소재 튜브의 물성치를 정리한 표이다.

본 연구에서 사용된 소재는 A5052이며, 길이 3,000mm, 두께 2mm, 외경이 40과 50mm인 원형관이다. Subframe의 각 단면의 치수를 나타내는 Fig. 1에서 보듯이 외경이 40mm 튜브의 경우 하이드로포밍 성형 전에 초기 굽힘 과정만이 요구되지만, 지름이 50mm인 경우에는 하이드로포밍 성형 전에 초기 굽힘성형 뿐만 아니라, 예비성형(preform) 단계로서 스템핑이 추가 공정으로 요구된다.

Table 1 Material property of A5052

	A5052
K-value ( $\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n$ ) (MPa)	400
exponent, n	0.30
a in fracture criteria	0.30
b in fracture criteria	0.28

Fig. 1과 Fig. 2는 각각 하이드로포밍 공법을 이용하여 제작된 자동차 Subframe과 본 연구에 사용된 해석 모델로서 최종 완성된 하이드로포밍 부품의 축방향으로의 각 단면 치수를 나타낸다.

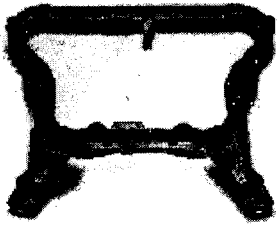


Fig. 1 Hydroformed Subframe

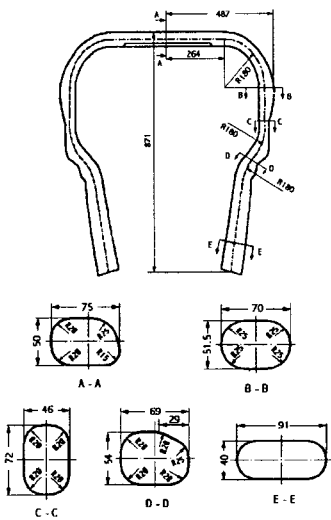


Fig. 2 Schematic view of subframe

### 3.1 초기 굽힘 성형

Subframe 형상이 좌우 대칭이므로 1/2 모델을 이용하여 Fig. 3과 같은 일반적인 회전 굽힘기를 사용하여 초기 굽힘 공정을 수행하였다. 회전 굽힘기를 사용하여 굽힘 공정을 수행하기 위해서는 굽힘금형, 압력금형, 구속금형, 그리고, 굽힘 성형시 압축 부위에서의 주름 발생을 방지하기 위한 와이퍼 금형이 필요하다. 초기 굽힘 공정과 예비 성형 단계에서 마찰계수는 0.08을 적용하였다.

하이드로포밍을 위한 Subframe 금형과 형상을 맞추기 위해서 회전 중심을 달리하면서 3번에 걸쳐 초기 굽힘 공정을 실시하였다. Fig. 4는 초기 굽힘 공정이 완료된 후의 변형된 모습을 나타낸다.

### 3.2 예비 성형체 성형

Fig. 2로부터 외경이 50mm인 튜브의 경우 초기 굽힘 성형후에도 최종 Subframe 단면치수보다 C-C, E-E 단

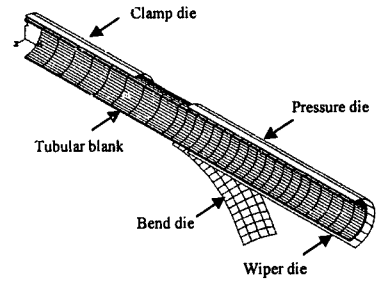


Fig. 3 Die and workpiece for bending

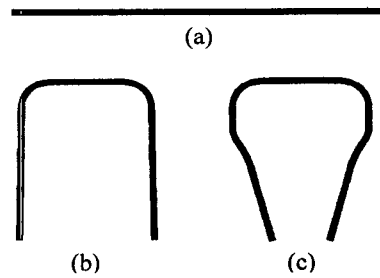


Fig. 4 Deformed shape after bending  
(a) Tubular blank ; (b),(c) After each bending process

면에서 여전히 치수가 크다. 따라서, C-C 단면에서는 폭 46mm, E-E 단면에서는 높이 40mm 정도 치수를 맞추어 줄 수 있는 스탬핑 공정해석을 하였다.

## 4. 하이드로포밍 공정 해석 및 결과

Fig. 5와 같이 동일 내부 압력하에서 서로 다른 외경을 가진 튜브 블랭크에 따른 성형 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 하이드로포밍 성형인자 중의 하나인 축방향으로 소재 유입은 고려하지 않았으며, 하이드로포밍 공정에서 마찰계수는 0.04를 적용하였다.

Table 2 The results after final bending process

	Diameter of initial tube blank	
	40mm	50mm
$\bar{\epsilon}_{max}$	0.283	0.413
$\bar{\sigma}_{max}$ [MPa]	63.46	130.5
$t_{min}$ [mm]	1.78 (11.2%감소)	1.84 (8% 감소)

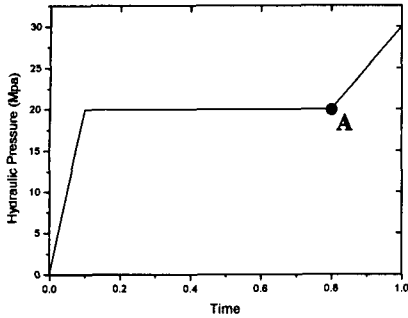


Fig. 5 The loading path for internal pressure

Fig. 5의 일정 압력 구간이 끝나는 A점에서 지름 50mm인 튜브의 경우 벌써 하이드로포밍 성형이 완료되었지만, 지름 40mm 튜브의 경우는 30 Mpa의 교정 압력이 더 요구됨을 해석을 통하여 알수 있었다.

Fig. 6은 최종 하이드로포밍 성형 부품의 변형 형상과 단면별 형상을 보여준다.

두가지 경우 모두 최대 연성파괴지수 I 값은 Fig. 6의 단면 B-B 부근에서 나타나며, bulging으로 인하여 파단 현상이 일어날 가능성이 높은 지점이다.

### 5. 결론

강-소성 유한요소법에 근거를 둔 자체 개발한 Hydro FORM-3D를 이용하여 서로 다른 외경을 가진 튜브 블랭크를 이용하여 자동차 Subframe 부품에 대한 하이드로포밍 공정에 대한 성형성을 평가하였다. 해석 과정은 하이드로포밍 전에 굽힘과 예비 성형 단계가 요구됨을 보여주고 있으며, 수치 해석을 통하여 하이드로포밍 성형을 위한 내부 압력의 수준이 제시되었다.

Table 3 The results after hydroforming process

	Diameter of initial tube blank	
	40mm	50mm
$\bar{\epsilon}_{max}$	0.684	0.706
$\bar{\sigma}_{max}$ [Mpa]	293	102.7
$t_{min.}$ [mm]	1.55(22.5% 감소)	1.67(16.5% 감소)
$I$	0.96	0.71

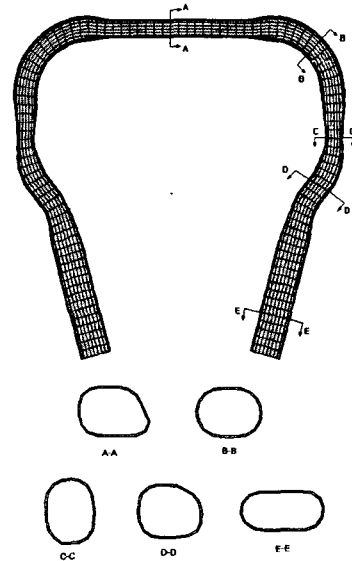


Fig. 6 Different cross section shapes for the final subframe

### 후 기

이 논문은 1999년도 두뇌 한국 21사업 핵심 분야에서 지원 받아 수행된 연구임.

### 참 고 문 헌

- (1) J.Kim, L.P.Lei, and B.S. Kang, 2000, "Preform Design in Hydroforming of Lower Arm by the FEM", The Ninth International Manufacturing Conference in China, Hong Kong
- (2) L.P.Lei, 2000, "Analysis and Design of Hydroforming Process by The Rigid-Plastic Finite Element Method", Ph.D. Thesis in Pusan National University
- (3) J.B.Yang, B.H.Jeong, and S.I.Oh, 1999, "Tube bending Technology of Hydroforming Process for an Automotive Part", Proc. of AFDM '99
- (4) L.P.Lei, D.H.Kim, S.J.Kang, and B.S.Kang, 2000, "Prediction of Forming Limit of Hydroforming Process by Using FEM and Fracture Criterion", Metal Forming 2000