

## 관재의 하이드로 포밍 기술개발

박 재 석\*, 이 택 균\*, 박 춘 달\*\*, 김 영 석\*\*\*

## Development of tube hydroforming technology

Jae-Suk Park, Taek-Kyun Lee, Chun-Dal Park, Young-Suk Kim

### Abstract

The hydroforming technology has gained in importance over the last few years, because of its potential for substantial weight savings costs reduction and quality improvement such as collision property, shape fixability and rigidity of white body. However, in comparison with the traditional sheet forming process, the hydroforming is much younger and the main development efforts were made in the last 15 years. The new technology, high pressure tubular hydroforming in particular, involves many process parameters to be optimized.

This paper covers a brief overview of the hydroforming simulator as well as design of die and tools. The effects of typical parameters such as internal pressure and axial compression stroke are presented. Moreover, the conditions of forming failure occurrences such as fracture and wrinkle are examined.

**Key words :** hydroforming technology(액압성형기술), internal pressure(내압), axial compression stroke(축압입량), conditions of forming failure occurrence(성형파단 발생 조건)

### 1. 서론

최근 관재의 하이드로 포밍 기술은 자동차산업의 차체경량화 및 부품의 가격절감의 시대적 요구에 의해 관심이 높아지고 있다. 이 기술은 현재 자동차산업이 직면하고 있는 경량화 및 고품질(안정성 및 내식성)화보에 대한 사회적 요구를 충족시킬 수 있고, 가격경쟁력이 뛰어난 자동차를 생산하기 위한 방법으로 널리 사용되고 있다. 유럽, 미국 및 일본의 자동차 업계는 이미 이 신기술을 이용하여 차체 프레임, 각종 빔, 배기시스템 및 각종소프트 등의 부품 양산화를 하고 있으나,<sup>[1,2]</sup> 국내 자동차 업계의 동기술 개발은 매우 미비한 상태로서, 국제 경쟁력 강화를 위해 독자적인 하이드로 포밍 기술개발이 절실히 요구되고 있는 실정이다.<sup>[3]</sup>

하이드로 포밍 기술은 기존의 관재를 이용한

성형 방법에 비해 단면의 형상을 자유롭게 가공할 수 있으므로 이를 이용하여 생산공정을 줄일 수가 있고, 가공경화를 통해 보다 강성이 높은 부품을 생산할 수 있으며, 용접을 이용한 제품생산 시 발생할 수 있는 품질저하에 따른 가격 경쟁력하락을 방지할 수 있으며, 경량화, 치수정밀도 향상등과 같은 장점이 있다.<sup>[4,5,6]</sup>

관재 성형기술과 비교하여, 새로운 하이드로 포밍 기술, 특히 관재의 하이드로 포밍은 공정의 최적조건을 찾기 위해 많은 변수가 고려되어져야 하지만, 실제 가공에서는 실험적, 이론적 자료가 충분하지 못해 어려움이 많은 실정이다.

본 연구에서는 하이드로 포밍 시뮬레이터를 개발하고, 관재로부터 원형 및 사각단면으로의 성형실험을 통하여 하이드로 포밍 성형성에 영향을 미치는 성형인자 즉, 내압 및 축 압입량의 효과에 대한 고찰과 가공불량(주름, 좌굴 및 파단) 발생한계에 대해 검토하였다.

### 2. 실험장치 및 실험방법

\* 경북대학교 기계공학부 대학원

\*\* 현대자동차 금형기술개발부

\*\*\* 경북대학교 기계공학부

그림 1은 하이드로 포밍 시뮬레이터의 구조와 가공 공정의 개념을 나타낸다. 실험은 다음과 같은 순서로 순차적으로 수행하였다. 먼저 내외경 인발에 의해 소정의 두께로 가공된 관재를 상하 다이의 사이에 놓고, 상하 다이를 체결 또는 프레스 가압한 후에 양쪽 플런저(Plunger)를 관재의 양쪽 끝단이 봉인(sealing)되도록 전진시킨다. 가공유는 플런저의 중앙부를 관통하는 유로를 통해 관 내부로 유입된다. 관 내부의 잔류공기를 배기 시킨 후 증압기를 작동시키면 플런저와 연결되어 있는 하이드로 펌프를 통해 내압이 지속적으로 관내에 작용하여 관재의 벌장(bulging)가공이 일어나게 된다. 이와 동시에 양쪽의 플런저가 전진하면서 관에 축 방향의 압축력이 가해진다. 플런저의 축 압입량과 관내에 작용하는 내압은 관재가 완전히 성형이 이루어 질 때까지 특정한 경로를 따라 작용하게 된다. 관재가 원하는 다이 형상으로 성형이 된 후에는 관내에 작용하는 내압을 제거하고, 양쪽 플런저를 후퇴시켜 축 압축력을 제거한다. 한편 관내에 고압이 발생될 때, 관내 양쪽으로 가공유의 누수를 방지하기 위해 플런저 양 끝단에 우레탄을 사용하여 봉인하였다.

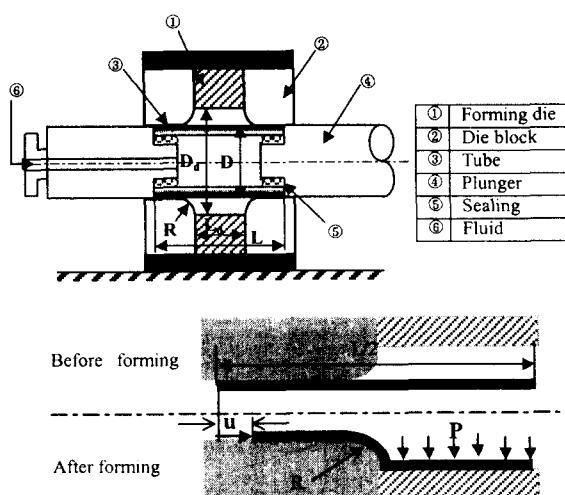


Fig.1 Schematic diagram of die arrangement and concept of hydroforming process

그림 2는 하이드로 포밍 시뮬레이터의 시스템 회로도를 나타내고 있다.<sup>[7]</sup> 관내에 작용하는 내압은 플런저와 연결된 증압기의 밸브를 통해 조절된다. 또한 축 방향 가압력은 플런저의 압력조절

밸브를 통해 조절되고, 속도조절기를 통해 플런저의 변위가 제어된다. 증압기는 최대 1000bar 까지 압력 제어가 가능하며, 플런저의 축 방향변위는 최고 50mm 까지 가능하도록 설계되었다.

표 1에 성형 다이와 관재의 재원 및 규격을 나타내었다.

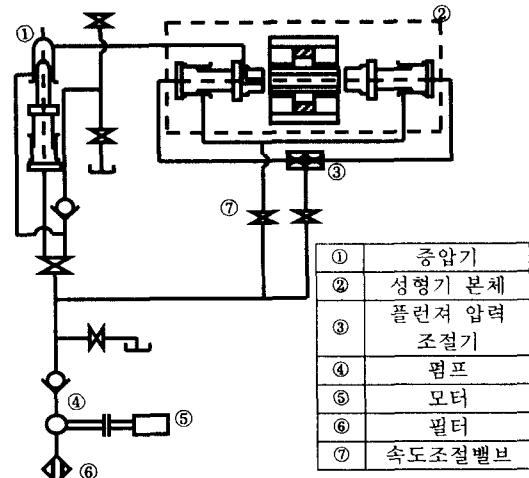


Fig.2 Hydraulic circuit of the hydroforming simulator

Table 1 The size of forming die and pipe

Pipe	$D/\text{mm}$	40
	$T/\text{mm}$	1.2
	$L/\text{mm}$	300
Forming Die	Shape	Circular Square
	$D_d/\text{mm}$	60 63.6
	$L_d/\text{mm}$	80 80
	$R/\text{mm}$	10

실험에서 사용된 소재는 기계 구조용 탄소 강판인 STKM 11A로서 관재의 내외경 인발 가공에서 발생한 응력제거를 위해 600 °C에서 40분동안 풀립 처리하였다. 인장 시험편은 관재로부터 길이방향에 평행하게 KS-13 호 규격시편을 채취하였다. 4회의 인장시험을 행한 후 평균을 통해 구한 기계적 성질은 표 2와 같다.

Table 2 Mechanical properties of STKM 11A pipe

$\rho$ $\text{kg}/\text{m}^3$	E Gpa	K Mpa	$\sigma_y$ MPa	n	R	EL (%)	V
$7.8 \times 10^3$	206	534	215	0.207	2.14	30.7	0.3

### 3. 실험결과 및 고찰

그림 3은 원형 형상으로 가공되는 관재의 순차적인 성형과정과 가공불량 예를 나타낸 것이다. 여기에서 p와 u는 각 단계에서의 내압과 축압입량을 나타낸다. 성형이 진행됨에 따라, 관재의 중앙부위가 먼저 벌징가공 되고, 원형 다이블록의 형상에 밀착될 때까지 점진적으로 성형이 계속된다.

하이드로 포밍 공정 시 가장 중요하게 고려되어야 할 사항은 내압과 축압입량의 최적 부하경로를 찾는 것이다. 성형공정 중 축압입량이 내압에 비해 상대적으로 너무 작은 경우에는 벌징부분이 충분한 재료의 공급을 받지 못해 관재의 원주 방향으로 국부 박판화가 진행된다. 이것은 곧 파단(fracture)으로 이어지게 된다. 이와 반대로 과다한 축압입량이 관재에 작용하였을 때는 그림에서 보듯이 좌굴(buckle)이 발생하게 된다.

그림 4는 원형 형상으로 가공되는 관재의 축방향으로 측정된 두께 분포를 나타낸다. 축방향으로 작용하는 압축력의 영향으로, 벌징가공되지 않은 부분의 두께가 성형 전 관재의 두께보다 두꺼워 진 것을 확인 할 수 있다. 그러나 성형이 진행됨에 따라서(2단계 -> 4단계), 벌징가공 된 영역의 두께가 점차적으로 감소하여 중앙부( $Z_0 = 0$ )에서 최소값을 가지는 것을 알 수 있다. 4단계에서는 벌징가공된 관재가 다이블록에 완전히 밀착되고, 벌징가공된 영역의 두께분포는 거의 일정하게 최소의 값을 갖는다.

그림 5는 원형 관재로부터 사각형상으로 가공되는 관재의 변형된 형상을 나타낸 것이다. 성형이 진행됨에 따라서, 관재가 점차적으로 사각형상으로 변형되는 것을 알 수 있다. 과다한 내압이 작용하는 경우 파단이 그림 6의 S1과 S2 지역의 사이에서 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 또한 성형과정의 마지막 단계에서 충분한 내압이 관내에 작용하지 못하면, 이전 단계에서 좌굴이 일어난 부위를 완전히 펴주지 못한 채 성형을 마치게 됨으로서 그림에서 보여주듯이 관벽에 주름(wrinkle)이 남게 된다.

그림 6은 사각형상으로 가공되는 관재의 두께분포를 길이 방향의 두 단면, S1과 S2를 따라서 측정한 결과이다. S1과 S2를 따라서 측정한 두께분포는 2단계에서는 비슷한 경향을 보이고 있지만 3단계에서는 큰 차이를 보이고 있다. 이것 은 벌징가공된 영역에서 S1영역의 두께가 S2영

역보다 얇아지는 박판화 현상이 일어나는 것을 의미한다.

그림 7은 사각형상으로 가공되는 관재의 중앙단면에서 원주방향으로 측정한 두께분포를 나타낸다. 코너부위의 두께가 성형 전 보다 두꺼워졌고, 이외 다른 지역에서는 얇아진 것을 알 수 있다. 특히 국부적인 박판화가 측정 시작점과 마지막 점 근처에서 발생하는 것이 관찰된다.

그림 8은 원형 형상으로 가공되는 관재의 길이방향으로 측정한 벌징가공 된 형상 프로파일(profile)을 나타낸다. 관재의 중심에서 벌징가공이 시작되고, 성형이 완료된 후 원주방향으로의 연신율은 약 50%정도인 것이 확인되었다. 이것은 인장파단 연신율이 30.7%인 것에 반해 축압입의 효과로 관재의 가공성이 증가한 것을 의미한다. 이는 통상 관재가공시에 가공한계를 나타내는 성형한계선(Forming Limit Curve, FLC)<sup>[8]</sup>이 단축인장예변형후 이축인장 상태로 부하경로를 바꾸는 경우, 단순 부하 경로보다 가공성이 증가하는 사실을 뒷받침한다.

그림 9는 원형 형상으로 가공되는 관재에 대해서 다양한 내압-축압입량의 부하경로 하에서 파단과 좌굴발생 영역을 나타낸 것이다. 그림으로부터 좌굴과 파단등 가공불량이 발생하지 않는 안전한 영역, 즉 그림 3에서와 같이 완벽한 성형이 이루어지는 부하경로는 파단과 좌굴발생 영역 사이에 존재하는 것을 알 수 있다. 하지만 성형과정이 그림에서 빛금 친 영역 어느 쪽에라도 속하게 되면 파단, 주름 및 좌굴로 이어지게 된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 개발된 하이드로 포밍 시뮬레이터를 이용하여 원형 형상과 사각 형상으로 가공된 관재의 성형성 평가를 위한 실험을 수행하였다. 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 축압입량과 내압의 경로에 따라서 파단, 주름 및 좌굴 등의 가공불량이 일어날 수 있다.
- (2) 원형 형상으로 가공된 관재는 성형 후 일정한 두께분포를 보이지만, 사각 형상으로 가공된 관재에서는 국부적인 박판화가 진행된다.
- (3) 축압입의 효과로 소재의 가공성이 증가하였다.
- (4) 부하경로에 따라서 가공불량이 발생하지 않는

안전한 영역이 존재하는 것을 확인할 수 있었다.

### 5. 참고문헌

- [1] 白寄 篤 : “内圧と軸押込みによる銅管の型成刑加工”, 48回 日本塑性加工連合講演会., 1997, pp. 365~366.
- [2] F. Dohmann. and Ch. Hartl., “Tube hydroforming research and practical application”, J. Mat. Proc. Tech., 1997, Vol. 71, pp. 174~186.
- [3] 오수익, 전병희., “Tube hydroforming 을 위한 성형인자 연구”, 한국소성가공학회 '98 추계학술 대회 논문집., 1998, pp. 32~36.
- [4] M.Ahmed. and M.S.J. Hashimi., “Estimation of machine parameters for hydraulic bulge forming of tubular components”, J. Mat. Proc. Tech., 1997, Vol. 64, pp. 9~23.
- [5] Franz-Josef Lenz. and Dirk Hoffmann., “Application of Hydroforming For Body-In-White”, IBEC '97. Body Assembly & Manufacturing., 1997, pp. 120~128.
- [6] Mustafa Ahmetoglu, Kevin Sutter, and Taylan Altan., “管のハイドロフォーミング技術”, J. JSTP, 1998, Vol. 39, No. 453, pp. 43~48.
- [7] 김영석, 1999, 특허출원중.
- [8] 김영석, 1999, 소성역학-이론과 응용, 경북대 기계공학부.

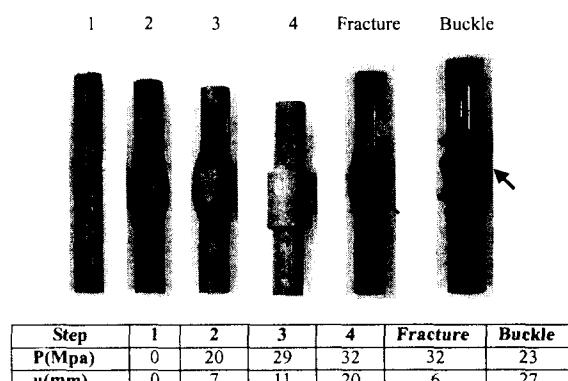


Fig.3 Deformed shapes of circular comonents in

Sequence and forming failure

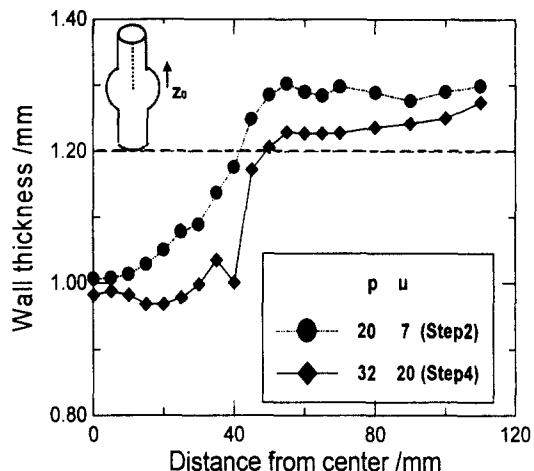


Fig.4 Wallthickness distributions along the axial direction

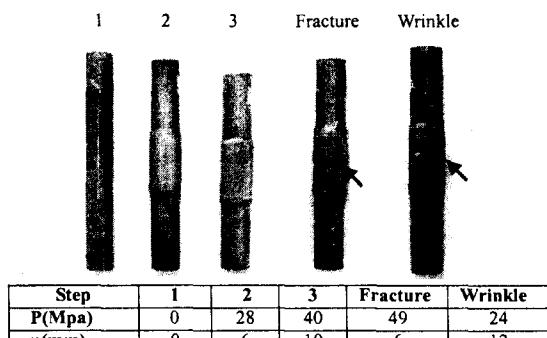


Fig.5 Deformed shapes of square components

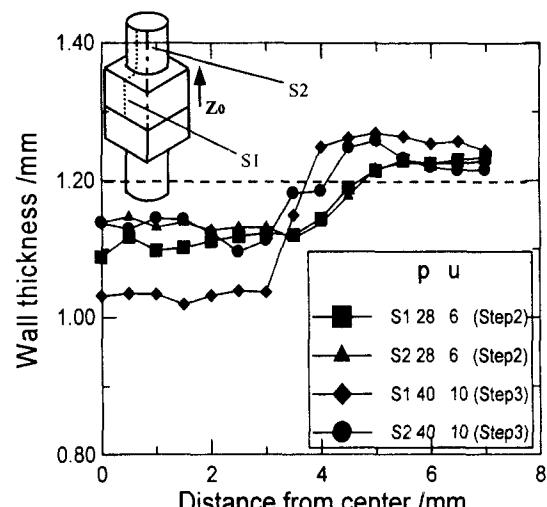


Fig.6 Wall thickness distributions along S1 and S2 sections

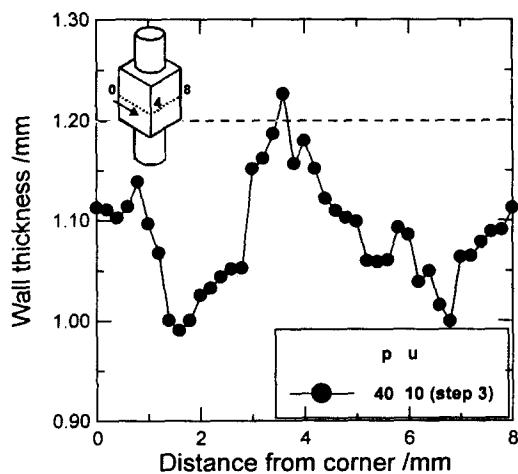


Fig.7 Wall thickness distributions at cross sectional area

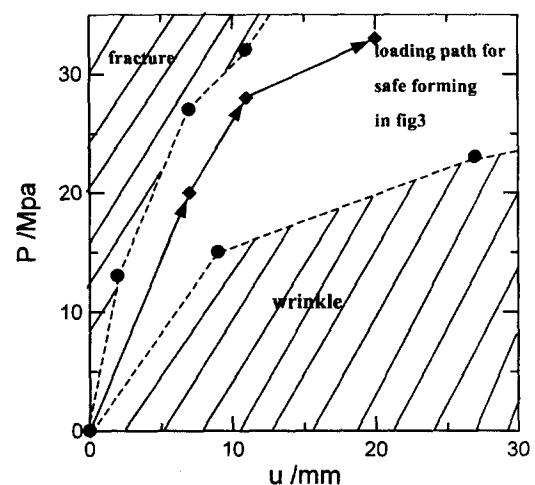


Fig.9 Relationship between internal pressure and axial compression stroke for circular tube forming

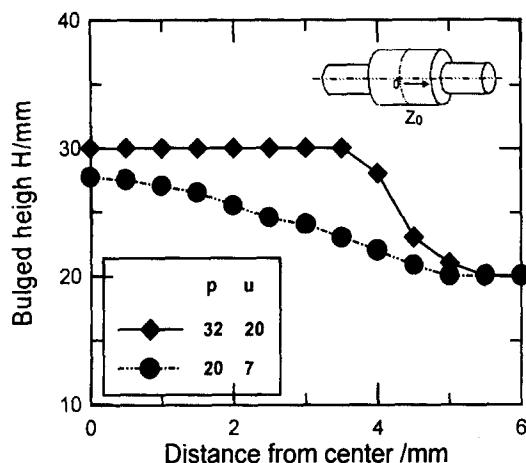


Fig.8 Bulged heights along horizontal direction( $Z_0$ )