

# 하이드로포밍 공정 전후의 인장 및 피로 물성 변화

오충석#, 권순규\*, 최병익\*\*

## The Variations of Tensile and Fatigue Properties in the Hydroforming Process

Chung-Seog Oh#, Soon-Gue Kwon\* and Byung-Ik Choi\*\*

### ABSTRACT

Hydroforming is a cost-effective way of shaping malleable metals such as steel into lightweight, structurally stiff and strong pieces. With the increased use of the hydroformed components in automotive and aerospace industries, it is important to know the variations of the mechanical properties in the hydroforming process for the safe and durable design purposes. The principal goal of this paper is to suggest a procedure to evaluate the variations of tensile and fatigue properties before and after a hydroforming process. A miniature specimen, which is 0.2 mm thick and 2.3 mm wide, is devised and tested to measure local mechanical properties. The effects of specimen size, defects, surface roughness, and hydroforming on the tensile and fatigue behaviors are discussed.

**Key Words :** Fatigue test (피로시험), Hydroforming (하이드로포밍), Miniature specimen (소형 시편), Size effect (크기효과), Surface roughness (표면거칠기), Tensile test (인장시험)

### 기호설명

$\delta$  = displacement/stroke  
 $e$  = engineering strain  
 $S$  = engineering stress  
 $S_a$  = stress amplitude  
 $(S_y)_{0.2}$  = 0.2 % offset yield strength  
 $S_U$  = ultimate tensile strength  
 $b$  = Basquin's exponent  
 $E$  = Young's modulus  
 $N$  = number of cycles to failure

$R$  = stress ratio  
 $R_a$  = average surface roughness

### 1. 서론

하이드로포밍 기술 (hydroforming technology) 은 금속 관재 (tube)나 판재 (sheet)를 일정 형상의 금형 (die)에 고정된 후 정수압 (hydrostatic pressure)을 인가해 원하는 형상으로 만드는 냉간 가공법 중의 하나이다.<sup>1,2</sup> 이 가공법은 절삭, 가공, 조립 등의 공정이 많이 요구되는 전통적인 제작법에 비

접수일: 2007 년 4 월 19 일; 게재승인일: 2007 년 10 월 4 일

# 교신저자: 금오공과대학교 기계공학부

E-mail: ocs@kumoh.ac.kr Tel. (054) 478-7323

\* (주)화신 기술연구소

\*\* 한국기계연구원 나노공정장비연구센터

해 공정 및 부품수를 크게 줄일 수 있을 뿐만 아니라 강성 (stiffness)도 향상시킬 수 있어 약 30 %의 부품 경량화가 가능하다고 알려져 있다.<sup>3</sup> 또한 형상이 매우 복잡한 부품도 최소의 공정으로 제작이 가능하다. 이러한 이유들로 인해 이 가공법은 최근 엔진 받침대 (engine cradle), 배기 시스템 (exhaust system) 등과 같은 다양한 자동차 부품 제작에 활발하게 적용되고 있다.<sup>4</sup>

하이드로포밍 기술의 소개<sup>5</sup>에서부터 최근 본격적으로 사용<sup>4</sup>되기까지 불과 20여 년의 기간밖에 지나지 않았기 때문에 현재까지 대부분의 하이드로포밍 관련 연구는 관련 장비의 소개<sup>6,7</sup>와 제조 방법<sup>8-10</sup>에 치중되어 왔다. 또한, 유한요소해석 (FEM)을 이용하여 하이드로포밍 공정을 사전에 해석하여 설계에 반영하려는 연구도 활발하게 진행되었다.<sup>11-13</sup>

하이드로포밍 공정에 의해 제작된 제품이 사용 중 구조적 파손 (structural failure) 없이 제 기능을 수행하도록 하기 위해서는 하이드로포밍 공정 전후의 기계적 물성 변화를 사전에 파악하여 설계에 반영하여야 한다. Luo 등<sup>14</sup>은 하이드로포밍으로 제작된 두 종류의 알루미늄 합금 구조물의 평면부 (planar section)에서 표준 인장 및 피로 시편을 추출하여 실험을 수행하였다. 그러나 하이드로포밍으로 제작된 부품들은 대부분 형상이 복잡하여 이로부터 표준 시편 (standard specimen)을 추출하기는 매우 어렵다. 따라서 표준 시편보다 크기가 작은 시편 (subsize specimen)을 이용하여 국부적인 물성을 측정할 필요가 있다. Jeelani 등<sup>15</sup>은 세 종류의 금속 재료들 (AISI 4130 강, 2024-T4 알루미늄 합금 및 6Al-4V 티탄 합금)로 제작한 표준 시편과 소형 시편을 가지고 각각 피로 시험을 수행하여 비교한 결과 시편 크기에 따른 피로거동 차이가 거의 없음을 보였다.

본 연구에서는 하이드로포밍 공정 전후의 국부적인 기계적 물성 값을 평가할 수 있는 시험 방법을 제시하는 데 그 목적을 두고 있다. 이를 위해 성형된 제품의 두께가 인장 및 피로 시편의 폭이 되도록 가공된 소형 시편 (miniature specimen)을 고안하여 사용하였다.

## 2. 연구 절차

하이드로포밍 공정 전후의 기계적 물성 변화를

측정하기 위하여 Fig. 1 과 같은 절차를 따라 연구를 수행하였다.

먼저 판재 상태의 모재 (parent material)에서 인장 및 피로시험용 표준 시편과 소형 시편을 각각 채취하여 독립적으로 실험한 뒤, 이들 사이의 물성 변화를 비교한다. 이를 통하여 인장 및 피로 물성에 미치는 시편 크기의 영향 (specimen size effect)을 살펴본다.

다음으로 하이드로포밍된 부재에서 채취한 소형 시편에 대해 인장 및 피로 물성을 측정된 뒤 모재의 결과와 비교함으로써 하이드로포밍 공정 전후의 물성 변화를 관찰한다.

마지막으로, 시편 표면 거칠기 (surface roughness)의 영향을 살펴보기 위하여 서로 다른 거칠기를 갖는 두 종류의 소형 시편을 제작하여 인장 및 피로 시험을 수행하여 비교한다.

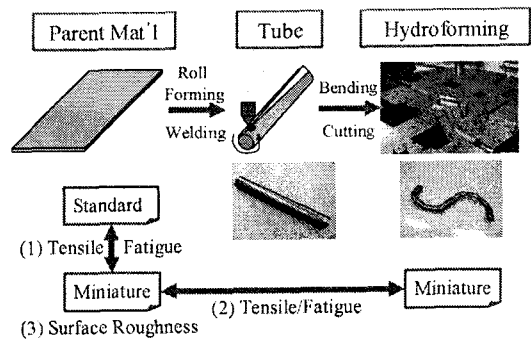


Fig. 1 Schematic research flow

## 3. 시험 방법

### 3.1 시편

#### 3.1.1 모재 재료

모재 (POS HF-440)는 탄소 0.14 %, 망간 0.85 % 및 알루미늄 0.035 %를 포함하는 저탄소강으로서 850 °C 에서 열간 압연한 뒤, 620 °C 에서 코일링 (coiling)한 압연 강판 (hot-rolled sheet)이다. 하이드로포밍에 적합하도록 개발된 제품으로서 인장강도 (ultimate tensile strength) 440 MPa, 연신률 (elongation) 32 % 이상을 목표로 삼고 있다.

#### 3.1.2 모재 표준 시편

표준 인장 시편은 ASTM E8M<sup>16</sup> 에서 추천하고 있는 폭 12.5 mm의 판재 (sheet)용 사각 단면 시편

을 사용하였다. 시편의 상세 치수와 실제 제작된 시편을 Fig. 2 에 나타내었다.

표준 피로 시편은 ASTM E466<sup>17</sup> 에서 추천하고 있는 폭 12.5 mm 의 판재 (sheet)용 사각 단면 시편을 사용하였다. 시편의 상세 치수와 실제 제작된 시편을 Fig. 3 에 나타내었다.

두 종류의 시편 모두 시편 길이 방향이 모재의 압연 방향과 일치되도록 와이어 방전가공 (wire electrodischarge machining)을 이용하여 제작하였다. 시편 두께는 2.3 mm 이다.

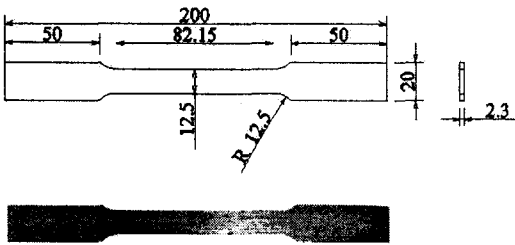


Fig. 2 Standard tensile specimen [unit: mm]

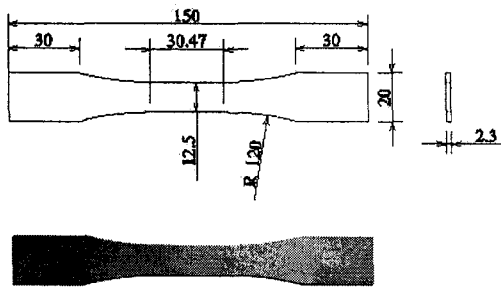


Fig. 3 Standard fatigue specimen [unit: mm]

### 3.1.3 모재 소형 시편

다음과 같은 사항을 고려하여 시편을 설계하였다. 먼저 가공상의 재현성과 용이성을 위해 모재의 두께 (2.3 mm)가 소형 시편의 폭이 되도록 하였다. 또한 표준 시편과의 일관성을 유지하기 위해 시편 길이 방향이 압연 방향과 일치되도록 하였다. 이에 대한 개략도를 Fig. 4 에 나타내었다.

다음으로 사용할 시험기 용량 (250 N)을 고려하여 시험부 (test section)의 두께는 0.2 mm 로 하였다. 시편의 상세 치수와 와이어 방전가공한 실제 시편을 Fig. 5 에 나타내었다.

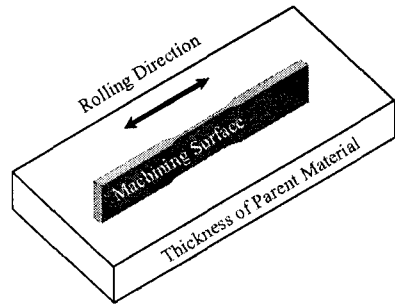


Fig. 4 Miniature specimen orientation and machining method

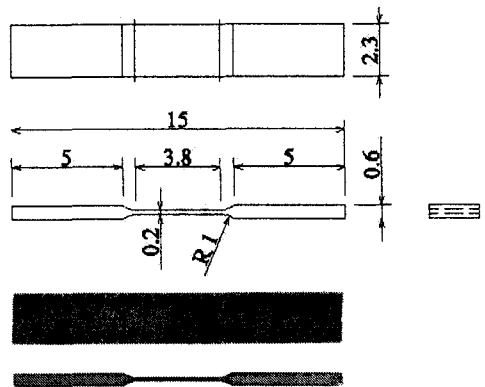


Fig. 5 Miniature specimen [unit: mm]

### 3.1.4 하이드로포밍 부재 소형 시편

Fig. 1 과 같은 하이드로포밍 공정을 거쳐 제작된 승용차 후방 현가장치용 사이드 멤버 (side member)를 Fig. 6 에 나타내었다. 1 회 의 하이드로포밍 공정으로 그림과 같이 제작한 뒤, 그림에 표시한 절단면을 따라 절단하여 동일한 2 개의 부품을 동시에 제작한다. 그림에 나타난 시편 채취 부에서 Fig. 5 와 같은 소형 시편을 추출하였다.

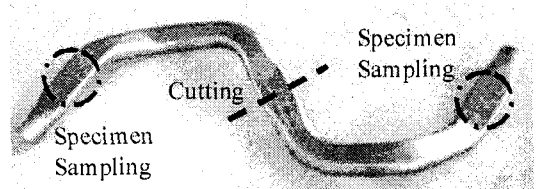


Fig. 6 A pair of hydroformed side members

### 3.2 시험 장치

표준 시편에 대한 인장 및 피로 시험을 위해

$\pm 100$  kN,  $\pm 100$  mm 용량의 유압 시험기 (Model; MTS 810, Fig. 7)를 사용하였다.

소형 시편에 대한 인장 및 피로 시험을 위해  $\pm 250$  N,  $\pm 50$  mm 용량의 전동형 (electrodynamic) 시험기 (Model; MTS Tytron 250, Fig. 8)를 사용하였다.

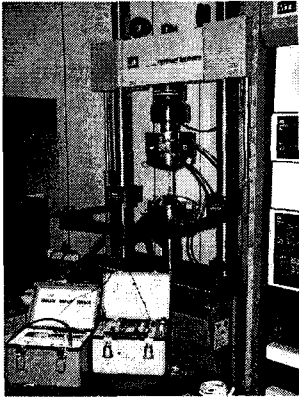


Fig. 7 A servohydraulic test system

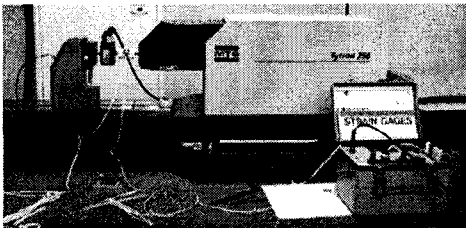


Fig. 8 An electrodynamic test system

소형 시편의 경우 시편 길이가 짧아 하중계 (load cell), 시편, 그립, 작동기 (actuator)간의 정렬 (alignment) 상태가 시험 결과에 영향을 준다. 이를 해소하기 위하여 제작된 한 쌍의 클램핑 그립 (clamping grip)과 이송대 (translational stage) 부분을 Fig. 9 에 나타내었다.

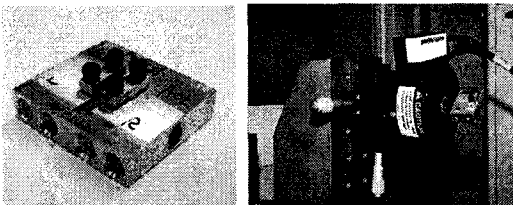


Fig. 9 A pair of clamping grips and a two-axis translational stage

### 3.3 시험 절차

#### 3.3.1 정렬 상태 검사 및 조정

모든 표준 시편과 소형 시편의 앞뒤 면에 120  $\Omega$  변형률 게이지 (strain gage)를 부착한 뒤, 본 시험 전 탄성 영역에서 부하 (loading) 및 제하 (unloading)를 반복하며 시편의 변형률 상태를 검사하였다 (strain survey). 이러한 검사 장면을 Fig. 7 과 Fig. 8 에 나타내었다.

표준 시편의 경우 대부분 굽힘 성분이 인장 성분의 1~2 % 내에 들었기 때문에 별도의 조정이 필요 없었으나, 소형 시편의 경우에는 차이가 크기 때문에 조정이 필요하였다. 변형률 게이지가 부착된 시편을 시험기에 설치한 후 탄성 영역 내에서 반복적으로 하중을 인가하며 시편 앞뒤의 변형률이 같아지도록 Fig. 9 우측의 이송대를 조정하였다. 또한 탄성 영역 내에서 측정된 응력-변형률 값을 이용하여 영률 (Young's modulus)을 측정하여  $205 \pm 10$  GPa 내에 드는지를 확인하였다. 이와 같은 탄성계수 정렬 방법 (MAM; modulus alignment method)은 수 마이크로 두께의 박막 측정에 있어서도 유용함이 검증된 방법이다.<sup>18</sup>

#### 3.3.2 인장 시험

인장 시험은 ASTM E8M<sup>16</sup> 에 준하여 수행하였다. 시험기의 하중계 값과 시편에 부착한 변형률 게이지 값으로부터 공칭 응력-변형률 곡선을 얻어 영률, 0.2 % 오프셋 항복강도 (0.2 % offset yield strength)를 얻고 하중-변위 선도 (load-displacement diagram)로부터 인장강도를 산정하였다. 하중-변위 선도로부터 인장강도를 산정한 이유는 변형률 게이지가 최종 파단 이전에 떨어지기 때문이다.

시험은 변위 제어 방식으로 수행하였으며, 탄성 영역에서의 응력 증가율은 표준 시편의 경우 1.7 MPa/sec, 소형 시편의 경우 2.2 MPa/sec로 하였다. 두 시험 속도 모두 항복 강도 결정 시에 사용되는 ASTM 기준 값인 1.15~11.5 MPa/sec 사이에 들도록 하였다.

#### 3.3.3 피로 시험

피로 시험은 ASTM E466<sup>16</sup> 에 준하여 하중제어 방식으로 수행하였다. 모든 시험에 있어서 응력비 (stress ratio, R)는 0 으로 하였다. 시험 주파수 (test frequency)는 표준 시편의 경우 13 Hz, 소형 시편의 경우 31 Hz로 하였다.

#### 4. 시험 결과 및 검토

##### 4.1 인장 시험

모재 (PM) 표준 시편, 모재 소형 시편 1 (거친 가공), 모재 소형 시편 2 (정밀 가공), 하이드로포밍 (HF) 소형 시편 (거친 가공)에 대해 각각 5, 6, 4 및 5 회 반복 시험하였다. 이를 통해 얻은 대표적인 응력-변형률-변위 곡선을 Figs. 10~13 에 나타내었다.

이 그래프들로부터 다음과 같은 점들을 알 수 있다. 첫째, 표준 시편의 경우(Fig. 10)에는 소형 시편 (Figs. 11~13)에서는 관찰되지 않는 평평부 (flat

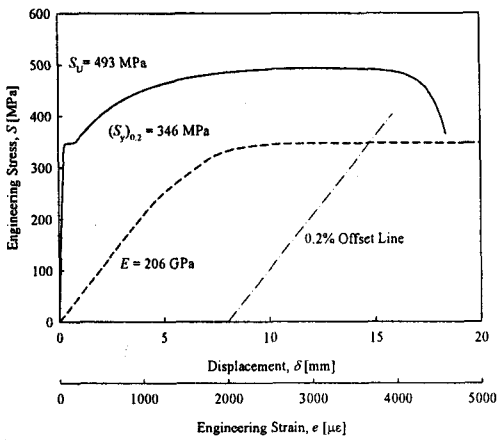


Fig. 10 A typical stress-strain-displacement curve for a standard specimen (PM)

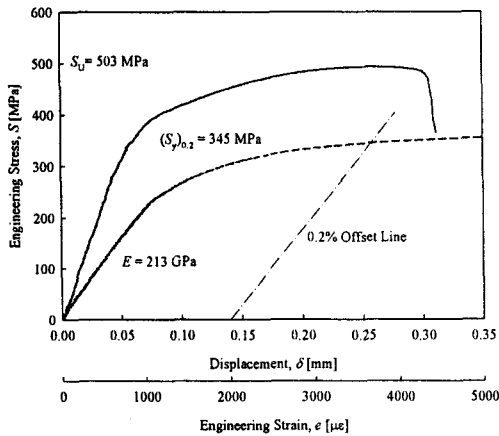


Fig. 11 A typical stress-strain-displacement curve for a miniature specimen (PM; coarse machining)

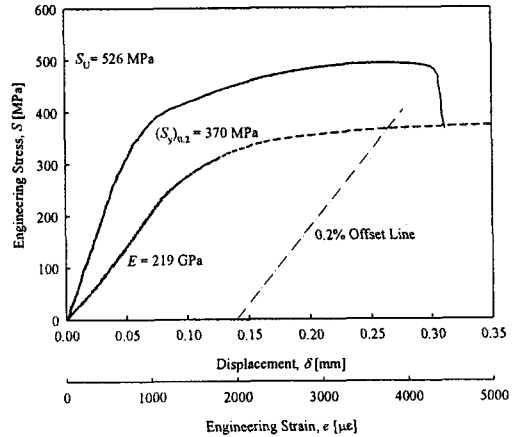


Fig. 12 A typical stress-strain-displacement curve for a miniature specimen (PM; fine machining)

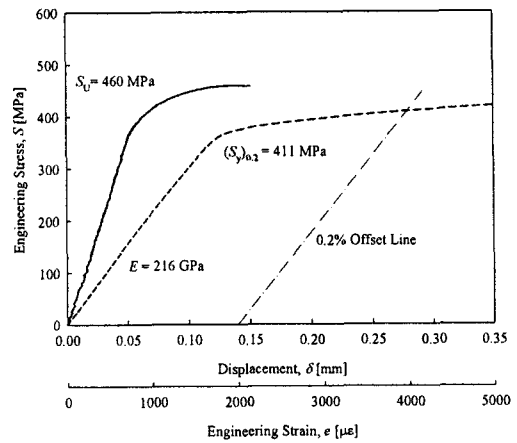


Fig. 13 A typical stress-strain-displacement curve for a miniature specimen (HF; coarse machining)

region)가 나타난다. 이 평평부는 일정 응력 (flow stress) 이상이 되면 재료 내부의 전위 (dislocation) 들이 지속적으로 움직이면서 발생하는 현상으로, 소형 시편의 경우에는 크기가 작아 이러한 현상이 거의 일어나지 않는 것으로 생각된다. 둘째, 모재의 연신률은 가공 정도에 크게 영향을 받지 않으나 (Fig. 11 vs. Fig. 12), 하이드로포밍 시편 (Fig. 13)의 경우에는 연신률이 크게 낮아짐을 알 수 있다. 하이드로포밍 시편은 제조 공정 중의 소성변형으로 인해 가공 경화 (strain hardening)가 일어나므로 연성 (ductility)이 크게 줄어드는 것으로 생각된다.

모든 인장시험 결과들을 Table 1 에 정리하였다.

이 결과로부터 다음과 같은 점들을 알 수 있다. 첫째, 모재 소형 시편의 경우 항복강도와 인장강도 모두 표준 시편에 비해 5~6 % 정도 높음을 알 수 있다. 시편의 크기가 작아짐에 따라 강도가 높아지는 것은 일반적으로 알려진 크기 효과 (size effect)를 보여주는 것으로 생각된다. 둘째, 가공 방법을 달리한 모재 소형 시편 (소형 1 vs. 소형 2)의 결과에서 알 수 있듯이 시편의 표면 상태나 거칠기는 인장 시험에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 셋째, 모재와 하이드로포밍재 소형 시편 결과를 비교해 보면, 하이드로포밍 과정에서 항복강도는 약간 증가하지만 인장강도는 크게 낮아지고 있음을 알 수 있다. 항복강도가 증가한 것은 하이드로포밍 공정 중에 일어난 가공경화에 기인한 것으로 보이며, 인장강도가 낮아진 것은 재료 내부에 전위와 같은 결함 (defects)이 다수 생겨있기 때문인 것으로 추정된다.

Table 1 Mechanical properties comparison among 4 types of specimens

Property		$(S_y)_{0.2}$	$S_U$	No. of
Specimen		[MPa]	[MPa]	Specimen
PM	Standard	346 ± 3	492 ± 4	5
	Mini 1	368 ± 24	514 ± 12	6
	Mini 2	365 ± 5	518 ± 12	3
HF	Mini 1	377 ± 52	416 ± 77	5

#### 4.2 피로 시험

모재 표준 시편, 모재 소형 시편 1 (거친 가공), 모재 소형 시편 2 (정밀 가공), 하이드로포밍 소형 시편 (거친 가공)에 대한 피로 시험을 통해 얻은 응력-수명 곡선을 Fig. 14에 나타내었다. 이 그림으로부터 아래와 같은 사항들을 관찰할 수 있다.

첫째, 정밀 가공된 소형 시편 ( $\Delta$ )은 거칠게 가공된 소형 시편 ( $\circ$ )에 비해 높은 피로 저항을 보이지만 모재 표준 시편 ( $\bullet$ )과는 거의 동일한 거동을 보인다. 이러한 차이를 일으키는 원인을 규명하기 위하여 접촉식 조도 측정기 (Model; Mitutoyo SurfTest SV-2000)로 앞에서 언급한 세 가지 시편의 평균 표면 거칠기 ( $R_a$ )를 측정하였다. 측정 결과 표준 시편, 정밀 소형 시편 및 거친 소형 시편에 대해 각각 0.36, 0.37 및 1.47  $\mu\text{m}$ 의 값을 얻을 수 있었다. 이로부터 표면 거칠기가 피로 거동에 많

은 영향을 주고 있으며, 표준 시편과 동일한 거칠기를 갖는 소형 시편은 표준 시편 대응으로 사용할 수 있음을 알 수 있다. 참고적으로 모재를 이용하여 제작한 거친 시편과 정밀 시편을 Fig. 15에 나타내었다.

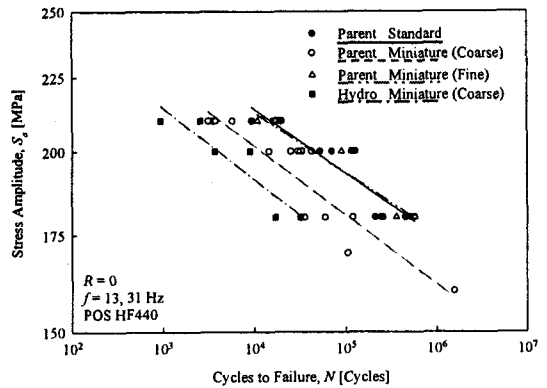


Fig. 14 Stress-life curves



Fig. 15 Coarsely (top) and finely (bottom) machined miniature specimens

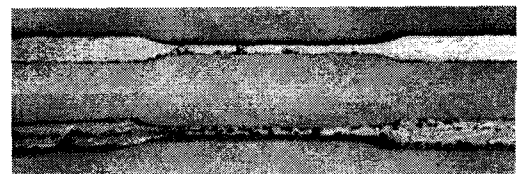


Fig. 16 Microstructures of two miniature specimens

둘째, 인장 시험에서 나타났던 크기 효과가 피로 시험의 경우에는 반대로 나타나고 있다. 즉, 소형 시편의 피로 강도가 표준 시편에 비해 낮게 측정되고 있다. 그 원인을 알아보기 위해 일차적으로 소형 시편의 두께 방향 미시 조직을 관찰하여

Fig. 16 에 나타내었다. 사진으로부터 두께 방향으로 큰 결함들이 존재하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결함들이 두께가 얇은 소형 시편의 피로 거동에 영향을 주어 표준 시편에 비해 낮은 피로 저항을 보이게 된 것으로 생각된다.

셋째, 하이드로포밍 시편 (■)은 모재 (○)에 비해 낮은 피로 강도를 보이고 있다. 공정 중 큰 소성 변형을 겪는 하이드로포밍 시편은 가공 경화와 함께 재료 내부에 많은 결함이 생기게 된다. 또한 모재 내부에 존재하고 있던 Fig. 16 과 같은 기공(void)들이 변형되어 날카로운 노치가 되고, 이 노치들로부터 균열이 쉽게 생기게 될 것이다. 이러한 원인들로 인해 하이드로포밍된 부재의 경우 모재에 비해 낮은 피로 강도를 보이는 것으로 추측된다.

넷째, Fig. 14 에 보인 직선들의 기울기는 Basquin 식<sup>19</sup>  $S_a = CN^b$  에 있어서  $b$  값에 해당하며, 피로강도지수 (fatigue strength exponent) 또는 Basquin 상수라고 한다. 이 값은 -0.05 내외이며 일반적으로 알려진 값<sup>19</sup>, -0.05 ~ -0.12, 의 하한계에 가까운 값을 보이고 있다.

### 5. 결론

본 연구를 통해 하이드로포밍 부재와 같이 국부적인 물성 값 측정이 요구되는 경우에 적용할 수 있는 시험 절차를 제안하였으며, 이를 통해 아래와 같은 결론에 다다를 수 있었다.

- 1) 소형 시편의 항복강도와 인장강도는 표준 시편보다 약간 높게 평가되었다.
- 2) 하이드로포밍 공정 후 항복강도는 증가하지만 인장강도는 크게 떨어졌다.
- 3) 시편 표면 거칠기는 인장 물성에는 영향을 미치지 않으나 피로 거동에 큰 영향을 준다.
- 4) 표준 시편과 표면 조도가 동일하게 제작된 소형 시편은 표준 시편의 피로 거동과 거의 일치하였다.
- 5) 하이드로포밍 공정 후 피로강도가 낮아졌다.
- 6) 모든 피로 시편의 경우 유사한 피로강도지수, 약 -0.05, 를 보인다.

### 후 기

본 연구는 2005 년도 금오공과대학교 학술연구

비 지원에 의하여 연구된 논문임. 연구 수행에 물심양면으로 도움을 주신 포스코 김근환, 쌍용자동차 김주성, 김기주, 한국기계연구원 이학주 박사님께 감사 드립니다.

### 참고문헌

1. Lang, L. H., Wang, Z. R., Kang, D. C., Yuan, S. J., Zhang, S. H., Danckert, J. and Nielsen, K. B., "Hydroforming Highlights: Sheet Hydroforming and Tube Hydroforming," J. Mater. Process. Technol., Vol. 151, No. 1-3, pp. 165-177, 2004.
2. Dohmann, F. and Hartl, Ch., "Hydroforming- a Method to Manufacture Light-Weight Parts," J. Mater. Process. Technol., Vol. 60, No. 1-4, pp. 669-676, 1996.
3. Lücke, H. U., Hartl, Ch. and Abbey, T., "Hydroforming," J. Mater. Process. Technol., Vol. 115, No. 1, pp. 87-91, 2001.
4. Hartl, Ch., "Research and Advances in Fundamentals and Industrial Applications of Hydroforming," J. Mater. Process. Technol., Vol. 167, No. 2-3, pp. 383-392, 2005.
5. Ueda, T., "Differential Gear Casings for Automobiles by Liquid Bulge Forming Processes - Part 1," Sheet Metal Industries, Vol. 60, No. 3, pp. 181-185, 1983.
6. Siegert, K., Häussermann, M., Lösch, B. and Rieger, R., "Recent Developments in Hydroforming Technology," J. Mater. Process. Technol., Vol. 98, No. 2, pp. 251-258, 2000.
7. Ahmetoglu, M., Sutter, K., Li, X. J. and Altan, T., "Tube Hydroforming: Current Research, Applications and Need for Training," J. Mater. Process. Technol., Vol. 98, No. 2, pp. 224-231, 2000.
8. Kim, J., Lei, L. P., Hwang, S. M., Kang, S. J. and Kang, B. S., "Manufacture of an Automobile Lower Arm by Hydroforming," Int. J. Machine Tools & Manufacture, Vol. 42, No. 1, pp. 69-78, 2002.
9. Manabe, K. I. and Amino, M., "Effects of Process Parameters and Material Properties on Deformation Process in Tube Hydroforming," J. Mater. Process. Technol., Vol. 123, No. 2, pp. 285-291, 2002.
10. Hama, T., Asakawa, M. and Makinouchi, A., "Investigation of Factors which cause Breakage

- during the Hydroforming of an Automotive Part,” J. Mater. Process. Technol., Vol. 150, No. 1-2, pp. 10-17, 2004.
11. Lei, L. P., Kim, J. and Kang, B. S., “Analysis and Design of Hydroforming Process for Automobile Rear Axle Housing by FEM,” Int. J. Machine Tools & Manufacture, Vol. 40, No. 12, pp. 1691-1708, 2000.
  12. Kim, J., Kang, S. J. and Kang, B. S., “Computational Approach to Analysis and Design of Hydroforming Process for an Automobile Lower Arm,” Computers & Structures, Vol. 80, No. 14-15, pp. 1295-1304, 2002.
  13. Kim, J., Lei, L. P. and Kang, B. S., “Preform Design in Hydroforming of Automobile Lower Arm by FEM,” J. Mater. Process. Technol., Vol. 138, No. 1-3, pp. 58-62, 2003.
  14. Luo, A. A., Kubic, R. C. and Tartaglia, J. M., “Microstructure and Fatigue Properties of Hydroformed Aluminum Alloys 6063 and 5754,” Metallurgical & Mater. Transactions A, Vol. 34, No. 11, pp. 2549-2557, 2003.
  15. Jeelani, S., Natarajan, R. and Reddy, G. R., “A Subsize Fatigue Specimen,” Int. J. Fatigue, Vol. 8, No. 3, pp. 159-164, 1986.
  16. ASTM, “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric],” ASTM E8M-00, 2000.
  17. ASTM, “Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials,” ASTM E466-96, 2000.
  18. Kim, S. W., Oh, C. S. and Lee, H. J., “Specimen Aligning Techniques in Tensile and Fatigue Tests for Thin Films,” Fat. Fract. Engng. Mater. Struct., Vol. 30, No. 1, pp. 64-71, 2007.
  19. Bannantine, J. A., Comer, J. J. and Handrock, J. L., “Fundamentals of Metal Fatigue Analysis,” Prentice Hall, 1990.