

## 열처리 영향도에 따른 강관 하이드로포밍 성형성 분석

박광수<sup>†</sup> · 김봉준\* · 문영훈\*  
부산대학교 정밀기계공학과

### Effect of Heat Treatments on the Steel Tube Hydroformability

Kwang-Soo Park<sup>†</sup>, Bong-Joon Kim and Young-Hoon Moon

Dept. of Mechanical Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

**Abstract** Tube hydroforming provides a number of advantages over conventional stamping process, including fewer secondary operation, weight reduction, assembly simplification, adaptability to forming of complex structural components and improved structural strength and stiffness. It can produce wide range of products such as subframe, engine cradle, and exhaust manifold. In this study, the effect of the heat treatment conditions such as post seam annealing (PSA) and bright annealing (BA) on the ovality and hydro-formability of steel tubes has been investigated. Hydroformabilities have been estimated by the bulging heights obtained at various processing parameters such as internal pressure, axial feeding and heat treatment conditions. The ovality and forming height are strongly influenced by material properties after heat treatments.

(Received April 25, 2005; accepted July 22, 2005)

**Key words:** Hydroforming, Axial feeding, Hydro-formability, AW : As welded, PSA : Post seam annealing, Bright annealing

#### 1. 서 론

액압 성형 공정은 균일한 제품 두께, 성형 후 재료의 좁은 경화영역, 정밀한 제품 생산 가능, 제품의 강성 증가, 가격 경쟁력 향상, 부품 개수 감소에 의한 경량화 등의 장점이 있다[1-3]. 현재 액압 성형 기술을 적용하여 생산하고 있는 자동차 부품에는 사이드레일(side rail), 서브프레임(subframe), 대시패널(dash panel), 필라(pollar), 레일루프(rail roof), 패키지 트레일(package trail)등의 승용차 부품 및 트럭용 부품에 이르기까지 다양한 종류가 있다[4-6].

본 논문에서는 열처리 조건이 다른 자동차 구조용 강관으로 많이 사용되는 SAPH 강관을 원통형과 T형 성형으로 각각 실험하여 열처리 조건에 따른 확관을 비교해 봄으로서 하이드로포밍 성형성을 평가하고자 한다. 이에 본 연구에서는 자동차 부품소재중 엔진 크래이들 및 샤시 등 하중을 많이 받는 곳에 응용되고 있는  $\phi 73$  mm 관재를 사용하여 액압 성형 실험을 하고, 이를 통해 열처리 영향도에 따른

강관하이드로포밍 성형성을 비교, 분석하고자 한다.

#### 2. 용접 후 열처리 조건

조관 공정의 전기 저항 용접(ERW : Electric Resistance Welding)시 발생 될 수 있는 용접부 취성, 특히 열영향부 경화와 같은 제조상의 문제를 해결하기 위해 용접부에 대한 열처리를 수행했으며, 아울러 Full body annealing 열처리를 하였다.

자동차용 하이드로포밍 관재는 열처리 조건에 따라서 흔히 AW, PSA, BA 열처리 소재의 관재라고 칭한다. 관재의 미열처리 소재(As welded : AW), 용접 후 풀림 처리 소재(Post seam annealing : PSA), 전체 풀림 처리 소재(Bright annealing : BA)가 가진 기계적 특성을 인장시험, 경도시험, 유한요소해석을 통해 분석하고 하이드로포밍 성형성과의 상관관계를 분석하였다. Fig. 1은 PSA열처리 소재와 BA열처리 소재의 열처리 조건을 나타낸 것으로 PSA열처리 소재는 950°C에서 20초간 열처리를 하였고, BA

<sup>†</sup>E-mail : winter@pusan.ac.kr

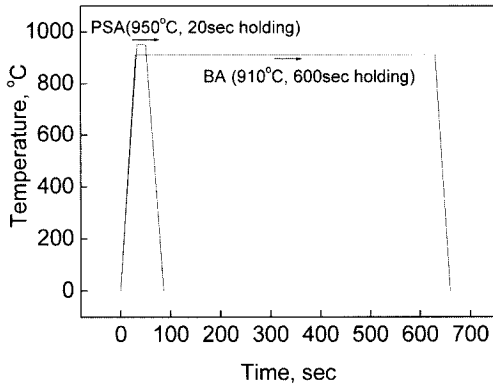


Fig. 1. Heat treatment curves.

열처리 소재는 910°C에서 600초간 실시하였다. 용접부에 대한 열처리 조건 중 주요인자는 열처리 온도와 수냉개시 온도 및 소재의 화학성분이다. 제조 공정간에 위치한 용접부 열처리는 통상의 열처리로에서의 전체가열과는 달리 이동되는 용접부를 따라 외면에서 유도가열 시키므로 가열속도가 빠른 반면 강관의 두께 방향으로 온도 구배가 크게 된다. 또한 국부가열이므로 냉각속도가 빠르다는 특징이 있다. 그리고 통상 적용되는 열처리 온도는 용접부 내면온도가 Ac3 변태선(아공석 구간에서  $\alpha\text{Fe} \Rightarrow \gamma\text{Fe}$  온도) 이상으로 되도록 전두께(완전 열침투 깊이)에 걸쳐 풀림 처리의 조건을 만족하고 동시에 용접부 외면 온도의 과열로 인해 조대 결정립이 생성되어 용접부 취화 현상이 발생치 않도록 하는 온도 범위에 있도록 요구된다.

Fig. 2는 유한요소 해석을 통해 나타난 열 이동의 분포를 나타낸 것이다. PSA열처리 소재는 폭 1cm 두께로 950°C에서 20초간 열처리를 행하였기 때문

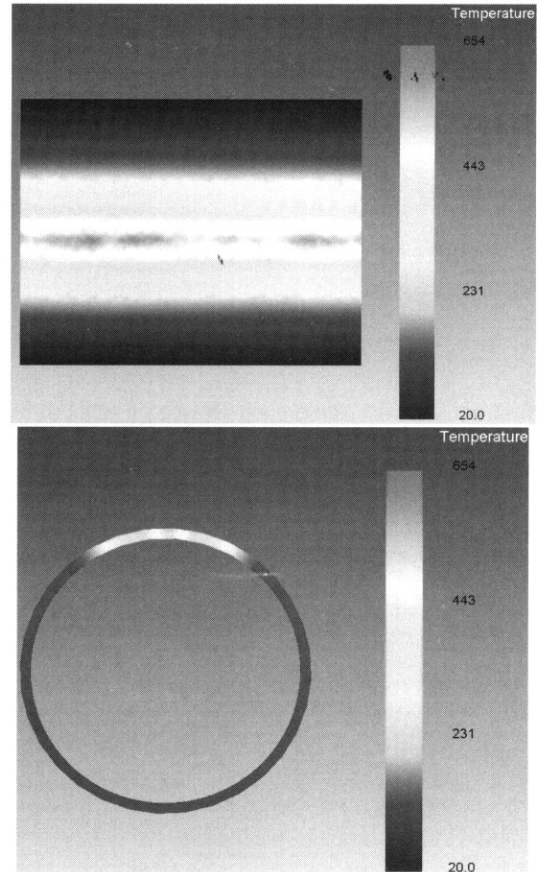


Fig. 2. Temperature profiles obtained from FEM (SAPH 400 - PSA heat treatment).

에 실제 모재부에는 열처리부에서 열영향부가 협소하게 나타남을 알 수 있다. 중심부 650°C로부터 전체 관 둘레의 1/6에 해당하는 부분이 열의 영향을 받아

Table 1. The material properties of the tubes

Heat treat.	Position	Tensile properties					Hardness (Hv)		
		TS (kg/mm <sup>2</sup> )	YS (kg/mm <sup>2</sup> )	T-EL (%)	UF/EL (%)	n-value	weld	HAZ	base metal
AW	weld	53.2	42.1	26.0	11.53	0.106	208	210	170
	base	48.4	41.0	28.97	14.50	0.132			
PSA	weld	51.6	41.3	27.70	12.86	0.115	187	191	171
	base	48.4	41.0	29.70	15.1	0.156			
BA	weld	40.2	29.4	34.65	21.08	0.204	118	122	125
	base	42.1	31.1	33.15	20.50	0.207			

500°C이상으로 모재부로부터 용접심부 까지 열 영향 부를 형성하고 있음을 알 수 있다. Table 1에 실험에 사용한 강관의 기계적 물성치 값을 나타내었다.

### 3. 실험결과

Fig. 3은 열처리 조건 별로 원통형 최적 확관이

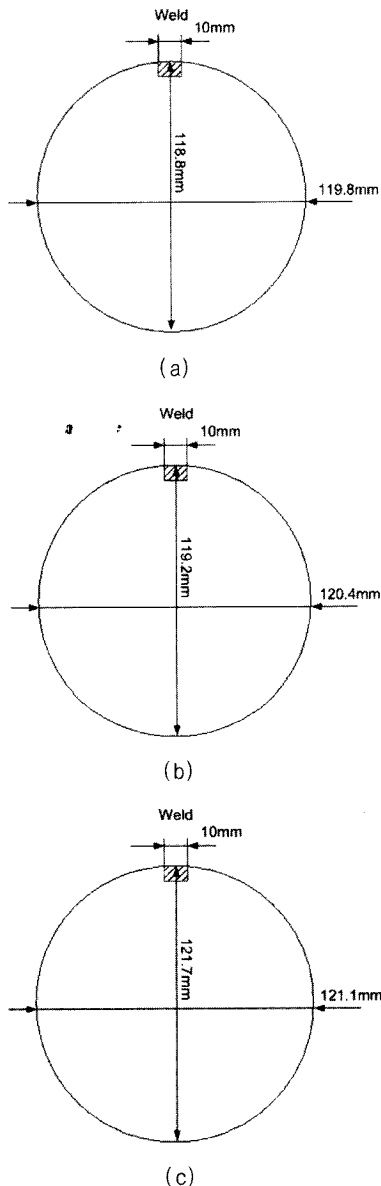


Fig. 3. Ovalities after circular bulging test roundness. Variance of roundness: (a) AW:0.25, (b) PSA:0.36, (c) BA:0.09.

이루어 졌을 때  $\phi 73$  mm관재의 용접부를 중심으로 한 확관 양상을 실제 측정하여 나타낸 것이다. AW 열처리 소재의 경우는 진원도가 용접부 수평방향에 수직방향에 비해 1.0 mm가량 큰 확관량을 보였고, 이는 용접후 풀림처리가 없으므로 인한 연신을 감소로 수직방향보다 수평방향의 확관이 더욱 잘 일어났음을 알 수 있다. PSA 열처리 소재의 확관량은 AW 열처리 소재와 유사한 약 1.2 mm의 차이를 나타내었다. 반면 BA 열처리 소재의 경우는 용접부 수평방향보다 수직방향의 확관량이 더욱 큼을 알 수 있었고 그 이유는 전체 풀림 처리후 용접부 경도 및 인장강도 감소로 인해 확관량이 용접부에서 더욱 잘 일어났으리라 생각된다. 그리고 각 소재별 진원도는 AW, PSA, BA 열처리 소재 각각 0.25, 0.36, 0.09의 진원도를 나타내었고, 하이드로 포밍 공정의 특성상 진원도가 매우 중요한 변수의 하나로 작용하는 관계로 본 실험의 결과로서 진원도 측면에서 BA 열처리 소재가 가장 우수한 풀림처리 방법이라 사료된다.

이는 Fig. 4에 나타나 있는 용접부를 중심으로 한 구간별 평균연신율의 차이와 비교하여 보아도 유사함을 알 수 있다. 또한 Table 1의 인장값과 비교하여 살펴보면 용접부에서 인장강도 값이 AW 열처리 소재가 PSA나 BA 열처리 소재에 비해 높은 값을 나타내었고, 용접부 인장강도의 증가와 연신율의 감소로 인해 용접부를 중심으로 한 각도별 평균연신율 변화양상 또한 AW 열처리 소재가 용접부 수직방향으로의 확관량이 작음을 알 수 있다. 그리고 PSA 열처리 소재 또한 용접부 방향의 평균연신율 값이 AW 열처리 소재의 11.5에 비해 12.8로서 조금 증가하였으나 성형성에는 커다란 영향을 미치지 못했다. BA 풀림 처리시 용접부 뿐만 아니라 전체적으로 연신율이 증가하였고 큰 하이드로포밍 성형성을 보였다.

Fig. 5는 각 소재별 열처리 특성에 따른 용접부와 모재부의 경도분포를 나타낸다. AW, PSA, BA 열처리 소재의 용접부를 중심으로 한 비커스 경도값(Hv)의 변화를 살펴보면 AW 열처리 소재와 PSA 열처리 소재는 용접부의 경도값이 HAZ나 모재부 보다는 훨씬 큰 경도값을 나타내었다. 반면 BA 열처리 소재는 오히려 모재의 경도값(Hv123)보다 용접부의 경도(Hv118)가 더욱 떨어짐을 알 수 있었다. 이는 전체 풀림처리 과정에서 용접부의 연화가 모재보다는 더욱

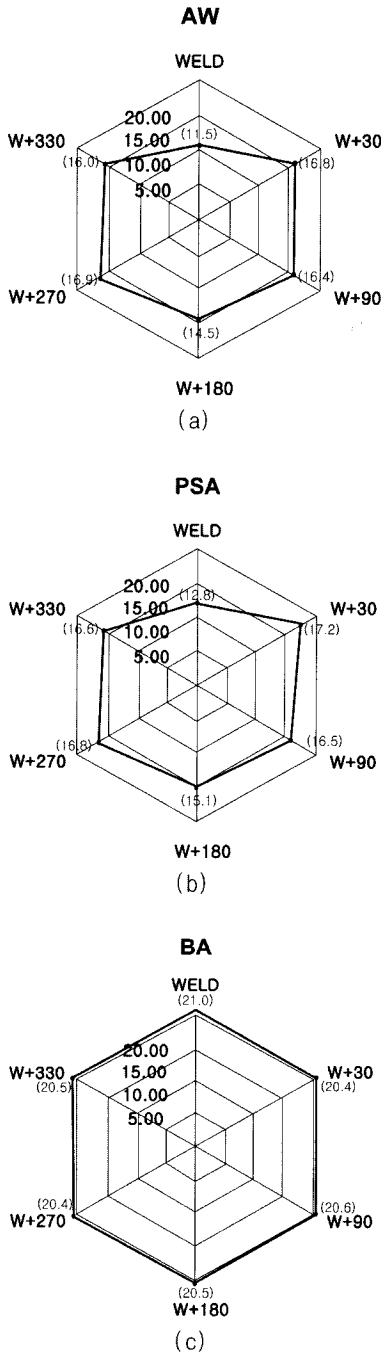


Fig. 4. Circumferential variation of uniform elongation with respect to angles between weld seam (a) AW, (b) PSA, (c) BA.

크게 일어남을 유추해 볼 수 있다. 이로 인해 하이드로 포밍 성형성에 좋은 영향을 준 것으로 사료된다.

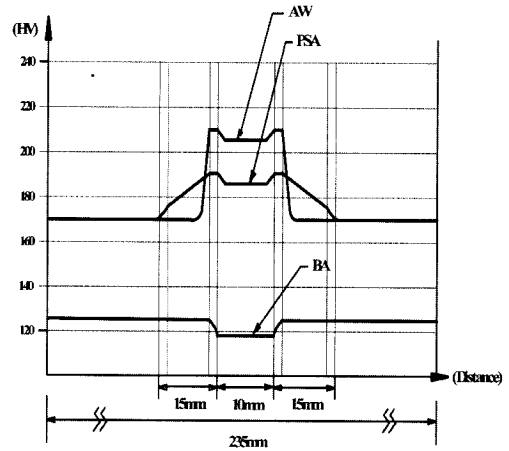


Fig. 5. The hardness value of weld and heat treatment zone.

PSA열처리 소재는 용접후 풀림처리 이후에 경도 변화가 AW열처리 소재에 비해 조금 낮아졌으나 이로 인해 하이드로포밍 성형성에 커다란 작용을 하지는 못했다.

기계적 물성치가 하이드로포밍 성형성에 미치는 영향은 각각의 기계적 물성치와 실제 성형후의 성형 높이가 비교로 분석해 볼 수 있다. Fig. 6은 인장강도와 항복강도, 총연신율과 평균연신율, 경도, 이렇게 5개의 기계적 물성치와 열처리 조건별 소재의 성형 높이와의 비교값을 나타낸 것이다. 기계적 물성치와 성형 높이와의 관계는 그래프에 나타난 것처럼 성형 높이가 추이는 BA열처리 소재 일수록 높았고, PSA와 AW열처리 소재는 성형 높이가 떨어짐을 알 수 있다. PSA열처리 소재와 AW열처리 소재는 커다란 차이를 나타내지 못하였다.

강관의 조관 공정 특성상 용접부는 필히 존재하는 것이고, 용접부의 용접 후 잔류응력과 경도 증가로 인해 균일한 확관성을 나타내지 못하였고 하이드로 포밍용 강관의 선정에서는 더욱 바람직하지 못한 특성을 나타내었다.

하이드로 포밍 성형 공정중 액압이 작용하는 상태에서 용접부를 중심으로한 열 영향부와 모재부 사이 등에서 자주 파단이 일어나는 것을 확인 할 수 있었고 그에 따른 소재의 손실 또한 심했다. 이로 인해 용접후 잔류응력을 제거하는 풀림 처리가 필요하게 되었고, BA 열처리 소재처럼 전체 풀림 처리를 하

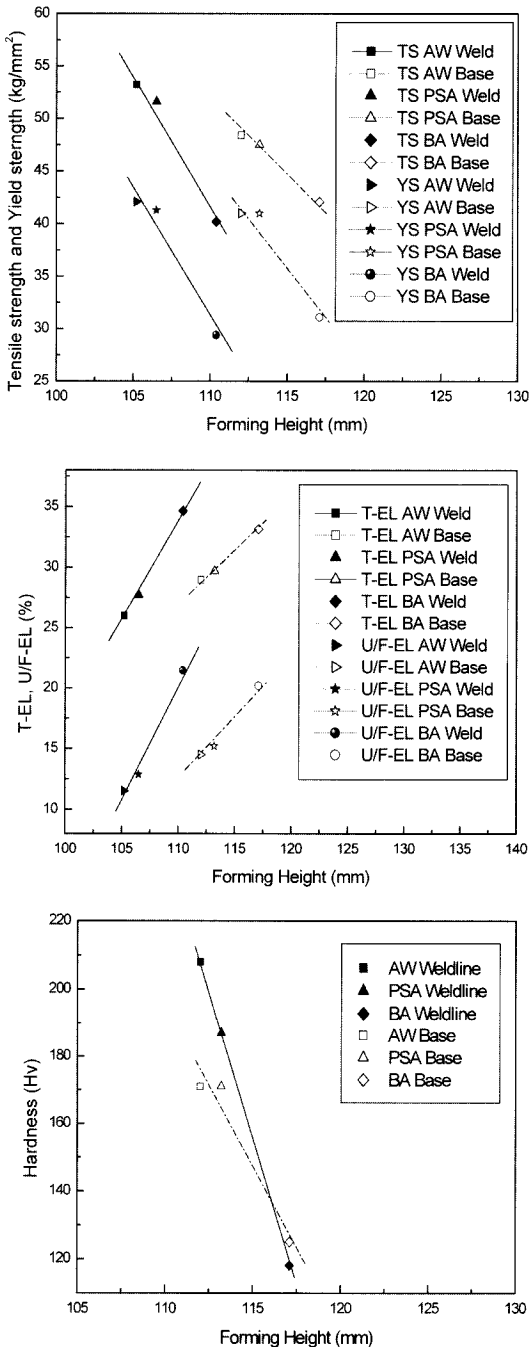


Fig. 6. Effect of tensile strength(TS), yield strength(YS), total elongation(T-EL), uniform elongation(U/F-EL), hardness on the forming height in the T-fitting forming.

는 것이 바람직 하나 전체 풀림 처리가 시간이 많이 소요되는 관계로 생산성의 측면에서 유리한 용접

후 풀림 처리를 실시한 PSA 강관이 하이드로포밍 성형성에 어떠한 영향을 미치는가에 관한 실험이었고 그 결과는 PSA 풀림처리 방법이 아예 풀림처리를 하지 않은 소재에 비해 크게 다르지 않음을 알 수 있었다.

본 실험에 사용된 열처리 조건이 다른 강관 3종류에서 가장 좋지않은 성형성을 보인 것은 AW 열처리 소재 이다. 그에 비해 BA열처리 소재는 균일한 성형이 이루어 졌다. 또한 PSA열처리 소재는 AW열처리 소재에 비해 좋은 성형성을 나타내지 못했는데 이는 용접후 용접부만 국부적으로 풀림처리 하는 방법이 하이드로포밍 성형성에는 커다란 영향을 미치지 못함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

열처리 영향도에 따른 강관 하이드로포밍 성형성 분석의 연구 결론은 다음과 같다.

(1) 강관의 균일한 기계적 물성치가 액압을 사용하는 하이드로 포밍 성형성에서는 가장 큰 변수로 작용한다. 이는 성형시의 용접부와 모재부 사이의 변형 저항 차이값이 중요한 요소를 차지함을 의미한다. AW, PSA, BA열처리 소재 각각의 진원도는 평균연신율로 인한 원 주변 변화량으로 알 수 있다.

(2) 원통형 환관 성형실험에서 성형 높이는 기계적 물성치가 중요한 영향을 차지한다. BA열처리 소재가 열처리후 좋아진 연성의 영향으로 PSA, AW열처리 소재에 비해 좋은 성형성을 나타내었다.

(3) 용접시 발생한 잔류응력을 감소하기 위한 PSA 열처리 효과는 하이드로포밍 성형성의 증가에 큰 영향을 미치지 못했다.

#### 참고문헌

1. M. Koc and T. Altan : Prediction of forming limits and parameters in the tube hydroforming process, International Journal of Machine Tools and Manufacture, **42** (2002) 123-138.
2. Debin Shan, Y.S. Kim, Yan Lu, S.T. Kim and Cheng Lu Wang : Characteristics of Tee Tube Forming Deformation Zone using Plastic Pressure-Building Medium, Metals and Materials International, **6** (2000) 519 -524.

3. B. J. Kim, D. I. Hyun, S. M. Oak, S. K. Choi and Y. H. Moon : Effect of process parameters on tubular hydroformability, *Key Engineering Materials*, **223** (2003) 457-462.
4. F.Dohmann, Ch,Hartl : “Tube hydroforming research and practical application”, *Journl of Material Processing Technology*, **71** (1997) 174-186.
5. H.Mizukoshi, H.Okada, H.WAKABAYASHI, “Tee fitting hydraulic formability of aluminum alloy tubes”, *Advanced Technology of Plasticity*, **2** (1999) 1189-1194.
6. Yuan-Yao Qian, Dave Cattran and Medhat Karima, “Towards Further Understanding of the Mechanics of Tube Hydroforming”, SAE paper, 982276, (1998).