

# 열-소성 연계 해석을 이용한 자동차 로어암 부품 개발

손현성<sup>1#</sup>, 김홍기<sup>1</sup>, 최병근<sup>1</sup>, 조열래<sup>1</sup>

## Development of Automobile One-piece Lower-Arm Part by Thermo-Mechanical Coupled Analysis

H.S. Son, H.G. Kim, B.K. Choi, Y.R. Cho

### Abstract

Hot Press Forming (HPF), an advanced sheet forming method in which a high strength part can be produced by forming at high temperature and rapid cooling in dies, is one of the most successful forming process in producing components with complex geometric shape, high strength and a minimum of springback. In order to obtain effectively and accurately numerical finite element simulations of the actual HPF process, the flow stress of a boron steel in the austenitic state at elevated temperatures has been investigated with Gleeble system. To evaluate the formability of the thermo-mechanical material characteristics in the HPF process, the FLDo defined at the lowest point in the forming limit diagrams of a boron steel has been investigated. In addition, the simulation results of thermo-mechanical coupled analysis of an automobile one-piece lower-arm part are compared with the experimental ones to confirm the validity of the proposed simulations.

**Key Words** : Hot Press Forming (HPF: 열간프레스성형), Thermo-Mechanical Coupled Analysis (열-소성 연계 해석) One-piece Lower-Arm (일체형 로어암)

### 1. 서론

최근 자동차의 연비향상을 위한 추세에 따라 알루미늄, 플라스틱, 마그네슘 등 여러 경량소재들이 자동차 차체 및 주요 부품에 사용되고 있다. 그러나 아직까지 자동차를 구성하는 부품의 약 65% 이상은 철강재료가 차지하고 있는데 이는 다른 경합소재와 비교하여 가격경쟁력의 우수성(생산성, 가공성, 조립성, 도장성, 재활용성 등의 관점에서) 때문이다. 최근 들어서는 자동차의 경량화와 승객의 안정성을 확보차원에서 새로운 고강도 고기능 철강소재가 개발되어 활용이 확대되어 가고 있는 추세이다. 그러나 소재가 고강도화될 수록 소재 연신이 떨어져 차체의 프레스 가공 공정에서의 파단불량 발생이 많아져 이를 회피하

기 위해 새로운 가공기술들이 개발되고 있다. 그 중 열간프레스성형(Hot Press Forming, HPF)은 B, Mo, Cr 등 경화능이 큰 원소를 첨가하여 경화능을 향상시킨 강재를 Ac3변태점 이상인 900℃ 정도의 고온으로 가열한 다음 프레스 다이에서 한번에 제품을 열간성형하면서 급속 냉각하여 고강도 제품을 제조하는 새로운 판재성형법으로써, 1973년에 스웨덴의 철강사인 SSAB 프라나에서 개발한 이후 현재 수십 종의 자동차 부품에 대하여 유럽과 미국의 차종을 중심으로 개발·적용되고 있으며 국내에서는 POSCO에서 양산적용을 시작으로 초기 단계에 있다.

본 연구에서는 HPF 공정의 온도이력을 갖는 인장 및 성형한계의 실험데이터를 구하고, HPF적용시 장점인 경량화·고강도화를 확인하기 위해 차량

1. POSCO 기술연구소

# 교신저자: POSCO 기술연구소, E-mail: hsson@posco.com

부계의 30%를 차지하는 새시(chassis) 중 현가장치 부품인 일체형 로어암(one-piece lower-arm)을 대상으로 열-소성 연계 해석(thermo-mechanical coupled analysis)을 실시한 다음, 시작금형에서 제작된 부품과 비교하여 해석정도를 분석하고자 한다.

## 2. 열-소성 연계 해석

유한요소법(FEM)은 자동차부품을 개발하는데 있어 중요한 도구로 널리 이용되고 있으며, 근래에 주목받고 있는 HPF 부품개발에도 확대 적용이 가능하다. 고온상태의 판재를 성형하는 동안 소재의 소성변형, 소재와 금형간의 열전달, 냉각에 의한 상변태 현상이 생긴다. 이러한 열-소성-상변태 현상은 각각 독립적으로 발생하는 것이 아니라 상호 연계되어 있다. 즉 정확한 해석을 위해서는 모든 현상을 상호 연계된 상태로 고려해야 되지만, 계산시간 증가 및 수치적 불안정성 때문에 열전달과 소성변형만을 고려하는 열-소성 연계 해석방법이 합리적이다. 즉, LS-DYNA 프로그램을 이용하여 열해석은 implicit방법, 소성해석은 explicit방법으로 분리하여 순차적 연계해석방법(sequential coupling method)으로 접근하였다.

### 2.1 기본 물성

HPF 공정은 Ac3변태점 이상인 900℃이상으로 충분히 가열한 다음, 고속 유압프레스를 이용하여 600~800℃의 고온상태로 성형하기 때문에 이에 상응하는 인장물성이 필요하다. 즉, HPF 공정과 동일한 온도이력을 갖도록 하기위해 Gleeble 장비를 이용하였다. Fig.1과 Fig.2에서 보듯이, 고온에서의 재료 변형저항은 온도 및 변형률속도에 따라 다르다. 재결정온도 이상의 소위 열간가공 온도범위에서는 가공경화가 거의 일어나지 않아 고온에서 열간가공하는 경우 변형률이 재료의 가공경화에 기여하는 효과는 무시할 정도로 작은 것으로 알려져 있지만, HPF 공정의 온도이력을 갖는 경우 고온상태에서도 가공경화가 발생함을 알 수 있으며 온도가 낮을수록 그러한 경향은 더욱 심하다. 또한, 상온상태에서 변형률 속도 1/s 정도까지는 응력-변형률 곡선이 거의 변하지 않지만,

고온상태의 경우 변형률 속도에 따라 큰 차이가 나며 변형률 속도가 증가할수록 더욱 증가하는 경향을 보인다.

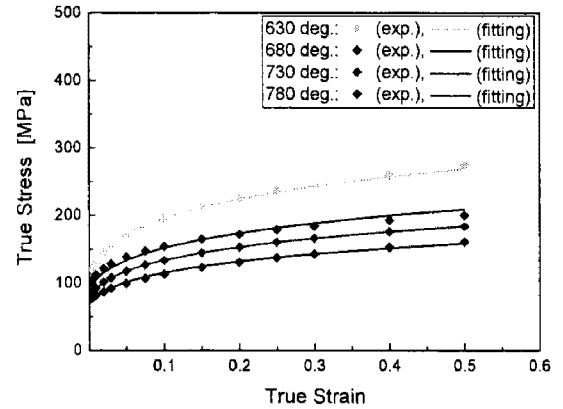


Fig. 1 Stress-strain curves at temperatures of 630~780℃ at strain rate of 0.02/s

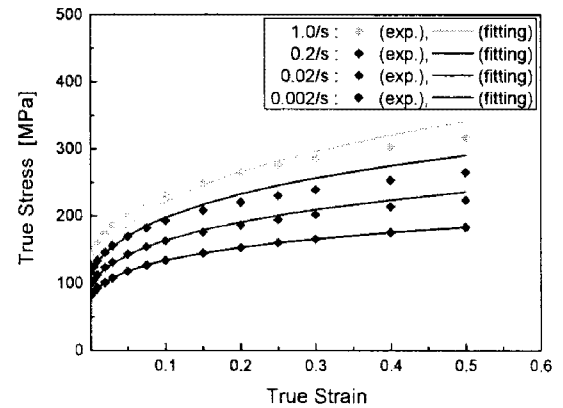


Fig. 2 Stress-strain curves at strain rate of 0.002~1.0/s at temperature of 730℃

금형과 소재간의 접촉면 열전달계수(interface heat transfer coefficient)는 재질, 표면조도, 접촉압력, 간격 등에 따라 다른 것으로 알려져 있다[1]. 본 해석에서는 식(1)과 같이 HPF 실공정에서 사용하는 금형과 소재를 이용하여 소재와 금형간의 간격을 주변수로하는 해석모델을 만들어 실험데이터와 차이를 최소화하는 방법으로 도출된 열전달계수값을 사용하였다[2].

$$\begin{aligned}
 h &= HTC & \text{at } I_{\text{gap}} < G_{\text{crit}} \\
 h &= CF/I_{\text{gap}} & \text{at } G_{\text{crit}} < I_{\text{gap}} < G_{\text{max}} \\
 h &= 0 & \text{at } I_{\text{gap}} > G_{\text{max}}
 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $HTC = 1500 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ ,  $CF = 0.10 \text{ W}/(\text{m K})$ ,  $G_{crit} = 0.067 \text{ mm}$ ,  $G_{max} = 1.00 \text{ mm}$ 이다.

## 2.2 성형한계

일반 스탬핑 공정에서 소재의 성형한계 데이터가 필요한 것처럼, HPF 공정에서도 성형한계 시험을 해야한다. 펀치형 반구를 이용하여 실공정과 동일한 온도이력을 갖는 조건으로 실시한 결과를 Fig.3에 정리하였다. 등이축 변형을 얻기 위해 마찰구속에 의한 변형집중을 방지하기 위한 목적으로 폭 200mm의 시편에 윤활처리를 하였으나, 높은 고온에서 성형이 이루어지기 때문에 윤활작용기능 저하로 완벽한 성형한계도 데이터를 얻지 못해 상온상태의 steel 강종의 성형한계곡선의 형상만 참조하여 점선으로 추정하였다. 그러나, 성형한계곡선상에서 가장 낮은 데이터(평면변형모드)인 FLD<sub>0</sub> 63% (진변형률 0.49)는 연강에서 성형성이 가장 좋은 SEDDQ가 약49%정도인 것과 비교하더라도 HPF 공정이 우수한 성형성을 확보함을 알 수 있다.

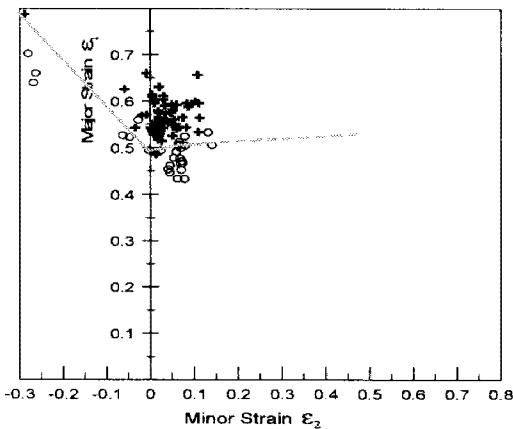


Fig. 3 Forming limit diagrams for boron steel

## 3. 성형해석 및 결과

앞서 구한 데이터를 이용한 열-소성 연계해석의 정도를 비교하기 위해, Fig.4과 같이 두께 2.8mm인 일체형 로어암 부품을 선정하였다. 시작품 제작공정은 900°C 온도로 충분히 가열후, 약2초 이내에 성형(forming) 단계과 15초 동안의 냉각(cooling) 단계로 이루어진다. 성형직전 블랭크

크 초기온도는 780°C이며, 금형의 온도는 75°C가 유지된다고 가정하였고 마찰계수는 0.4를 사용했다.

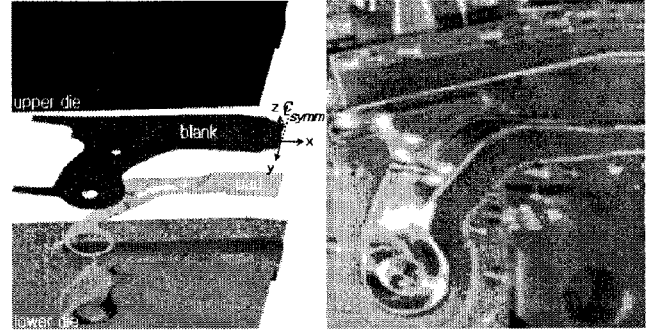


Fig. 4 Tool setup position of finite element model and photograph of prototype tool

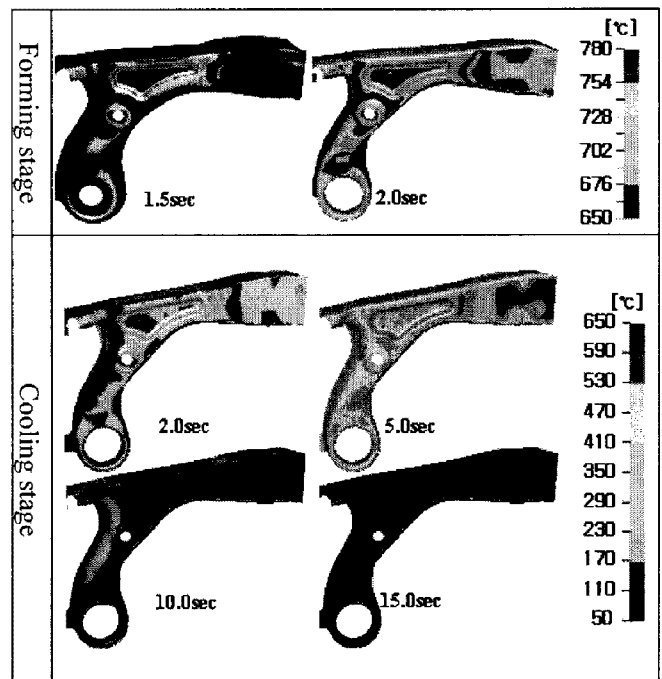


Fig. 5 Temperature distribution of forming and cooling stage

Fig.5 은 성형과 냉각공정 중의 온도분포 결과를 나타낸다. 성형단계에서는 블랭크가 금형에 완벽히 밀착이 되지 않고 더욱이 성형시간이 순간적이기 때문에 큰 온도변화는 없다. 하지만, 성형이 완료된 냉각단계에서는 완벽한 밀착과 유지시간으로 인해 급격한 온도하강이 생겨 전영역에서 마텐사이트 조직을 얻을수 있는 임계냉각속도( $\approx 30 \text{ }^\circ\text{C}/\text{s}$ )이상임을 알 수 있다.

두께감소율 분포 결과로써, Fig.6 은 팔호안의 실험값과 잘 일치하며, A 와 B 영역에서 심한 두께감소율이 발생하는 경향을 보인다. 즉, 두께감소율이 30%를 초과하더라도 HPF 공정은 과단없이 충분한 성형성을 확보함을 알 수 있으며 버링부까지 성형시 한 공정으로 일체형 성형이 가능하다. Fig.7 는 변형률 분포의 결과로써 Fig.3 에서 도출된  $FLD_0=0.49$  이하에서 모든 변형률이 분포되어 과단없이 제품을 성형할 수 있음을 의미한다.

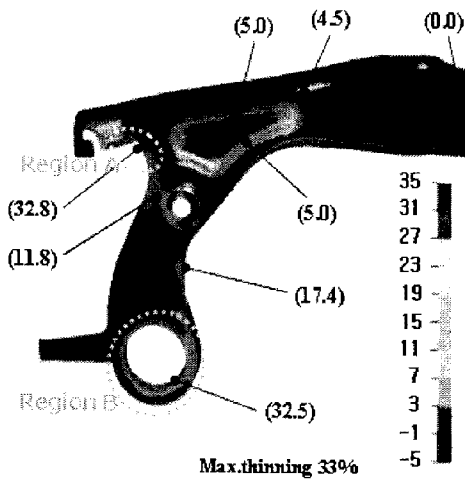


Fig. 6 Thinning distribution at final stage

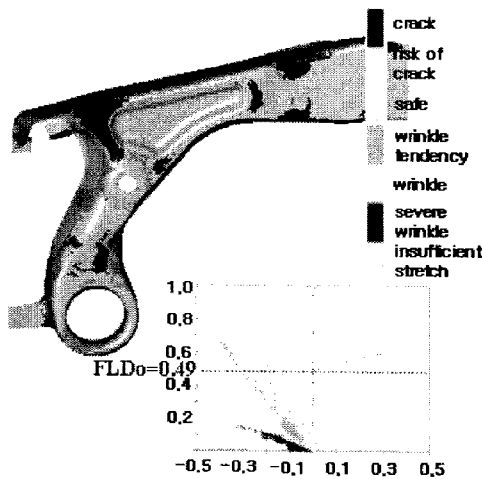


Fig. 7 Strain distribution at final stage

시작금형을 이용하여 일체형 로어암 부품을 제작한 사진이 Fig.8 에 있다. 또한 제작된 부품에서 HPF 부품의 평가를 위해 경도측정용 시편을 채취하여 구한 경도 결과도 함께 있다. Fig.5 의 해석결과로부터 예측하였듯이, 모든 영역에서

450Hv (≒1480MPa) 이상의 값이 나왔으며, 경도 편차 12.1 은 비교적 균일한 강도를 가짐을 알 수 있다. 끝으로, 로어암 부품 특성상 중요한 내구 성능 평가를 횡(load:0.5±5.0kN) 및 종(load:1.0±5.0kN) 방향으로 실시한 결과, 모두 기준 스펙 25 만 cycle 를 모두 만족하였다.

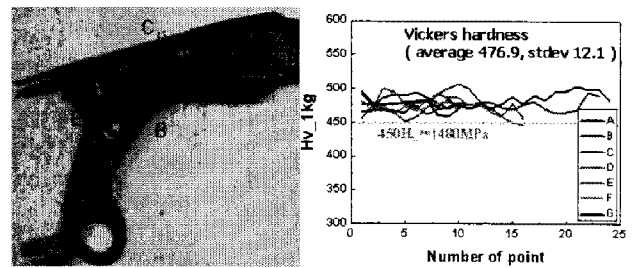


Fig. 8 One-piece lower-arm part manufactured in HPF process and its hardness distribution

#### 4. 결론

HPF 공정의 온도이력을 고려한 인장시험과 성형한계시험을 수행하였다. 도출된 실험데이터를 기반으로 열-소성 연계해석을 이용하여 일체형 로어암 부품을 해석한 결과는 시작금형으로부터 제작된 실부품의 결과와 비교적 잘 일치하였다. 또한, 두께감소율(약30%)이 심한 영역에서도 고온에서의 우수한 성형성 때문에 문제가 없었으며, 버링부까지 성형시 한 공정으로 일체형 성형이 가능함을 알 수 있었다. 게다가, HPF공정 적용으로 일체형 로어암 적용시 두께감소에 의한 경량화가 가능하며, 내구성능도 만족함을 알 수 있었다.

#### 참고 문헌

- [1] H. Palaniswamy, G. Ngaile and T. Altan, 2004, Finite element simulation of magnesium alloy sheet forming at elevated temperatures, J.Mater.Proc.Tech., Vol. 146, pp52-60
- [2] H.G. Kim, H.S. Son, S.Y. Kang S.J. and S.H. Park, 2006, Thermal-mechanical coupled simulation on ther forming of hot press formed part, IDDRG