

CTBA Tubular Beam의 열간 성형해석 및 실험

서창희¹ · 김우성² · 성지현[#] · 박종규³ · 김용식⁴ · 김영석⁵

Hot Stamping Simulations and Experiments for CTBA Tubular Beams

C. H. Suh, W. S. Kim, J. H. Sung, J. K. Park, Y. S. Kim, Y. S. Kim

(Received July 7, 2014 / Revised December 2, 2014 / Accepted December 3, 2014)

Abstract

For an accurate analysis of hot stamping, a coupled simulation with different aspects of the process(i.e. mechanical, thermal, and phase transformation) is needed. However, coupled simulations are time consuming and costly. Therefore, the current study proposes a simplified method focused on the forming for the hot stamping simulation of a coupled torsion beam axle (CTBA) tubular beam. In this simplified method, non-isothermal conditions were assumed and only conduction was considered, since it represents the majority of the heat transfer during hot stamping. In addition, temperature and strain rate effects were also included. Moreover, an isothermal simulation was conducted and compared with a non-isothermal simulation. Finally, the simulations were verified by experiments. In conclusion, the proposed method is shown to be effective for the development of tube-type parts, and it effectively predicts the deformation of the tubular beam during hot stamping.

Key Words : Boron Steel, Hot Stamping, Tubular Beam, Finite Element Simulation

1. 서론

열간성형(Hot stamping)은 경화능(Hardenability)이 우수한 소재인 보론강을 노(Furnace)에서 약 900°C 내외로 가열한 후 가열된 소재를 금형 내부로 이송하여 성형하는 공법으로, 성형 후 금형을 닫은 상태로 소재를 급냉시켜 고강도 특성을 얻을 수 있다[1, 2]. 고온에서 오스테나이트화된 소재는 우수한 연성을 가지기 때문에 복잡한 부품의 성형이 가능하게 되고, 급냉에 의해 조직이 마르텐사이트로 변태하여 고강도가 얻어지기 때문에 열간성형은 고연성과 고강도가 요구되는 자동차용 부품에 적용이 확대되고 있다.

열간성형 공정을 정밀하게 해석 하기 위해서는 기계적인 변형, 상변태, 열전달을 연계한 열간성형 해석이 수행되어야 한다. 하지만 3분야의 연계해석을 위해서는 많은 물성치가 요구되고 해석 시간 또한 과도하게 길어지는 문제가 있기 때문에 지금까지 대부분의 제품을 대상으로 한 연계 해석에 관한 연구들은 변형과 열전달에 초점을 맞춘 2분야 연계 해석에 대한 연구들이 주로 수행되고 있다. 우선 열전달이 존재할 경우에 변형을 예측하기 위해서는 온도와 변형 속도에 따른 유동응력의 획득이 요구된다. 고온에서 변형을 속도에 따른 유동응력을 획득하기 위한 실험적인 연구들이 많이 수행되었으며, 실험 결과를 바탕으로 한 다양한 유동응력식도

1. 대구기계부품연구원
2. 한국생산기술연구원 대경지역본부
3. ㈜화신
4. ㈜화신테크
5. 경북대학교 기계공학부

Corresponding Author : KITECH, E-mail : jsung@kitech.re.kr

제안되었다[3~6]. 또한 성형 중의 실제 열전달을 정확히 예측하기 위해서 열전달 변수들에 대한 연구와 이를 활용한 열간 성형 해석에 대한 연구들도 활발히 진행되고 있다[7~9].

하지만 지금까지의 대부분의 연구들은 판재를 대상으로 한 연구들이며, 튜브를 대상으로 한 열간 성형 해석에 대한 연구들은 아직 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 자동차용 서스펜션 부품인 CTBA(Coupled torsion beam axle)의 튜브빔(Tubular beam)을 대상으로 성형에 초점을 맞춘 2분야 연계 해석에 대해서 검토하였다. 해석의 단순화를 위해서 상대적으로 영향이 큰 전도 열전달만을 고려하였다. 또한 제품 개발의 초기에 성형성을 검토할 수 있게 하기 위해서 등온조건에서 변형을 속도를 고려하지 않는 간단한 성형해석법과 등온조건에서 변형을 속도만을 고려하는 성형 해석법에 대해서도 고찰하였다. 그리고 시제품 제작을 통해 해석 정확성을 비교 검토하였으며, 성형성 이외에 튜브빔의 조직 및 강도의 제어를 위한 공정을 제안하였다.

2. 유한요소해석 및 실험

2.1 해석모델 및 조건

본 연구의 대상은 승용차용 후륜 현가 부품인 CTBA의 튜브빔이며, 형상을 Fig. 1에 나타냈다. 튜브빔을 성형하기 위한 금형을 Fig. 2에 나타냈다. 하형이 고정되고 상형이 하강한 후 양쪽의 측면 캠(Side cam)이 튜브 내부로 이동하면서 튜브빔의 형상을 완성하게 된다.

본 연구에 사용된 소재는 두께가 2.8mm이며, 길이가 1,175mm, 외경이 101.6mm인 보론강 튜브(Tube)이다. 성형 해석용 유동 응력은 온도와 변형 속도를 동시에 고려하기 위해서 고온에서 실험과 잘 일치되는 유동 응력 특성을 나타내는 Voce-Kocks 모델[2, 5]을 사용하였다. Naderi 등[5]은 본 연구에서 사용된 보론강과 거의 동일한 보론강을 사용하여 유동 응력을 획득하여 Voce-Kocks 변수들을 구하였으며, 본 연구에서는 이 모델을 사용하여 온도와 변형 속도에 따른 유동 응력을 포인트 데이터로 변환하여 해석에 사용하였다. 열간 성형해석을 위한 공정 변수들은 Numisheet 2008 Benchmark Test BM03[10]을 참고하였으며, Table 1에 나타내었다. 해석의 간략화를 위해서 열전달은 가장 영향이 큰 전

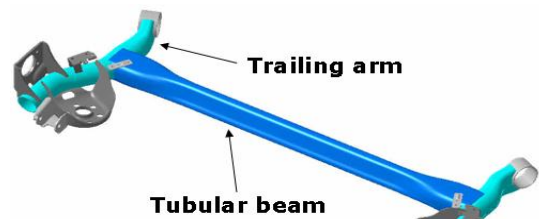


Fig. 1 The CTBA geometry

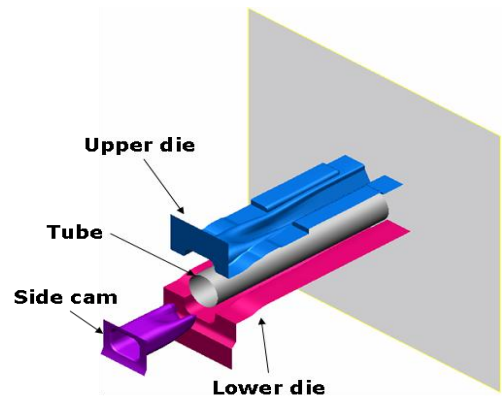


Fig. 2 The finite element model for hot stamping simulation

Table 1 Process parameters used in the simulation

Young's modulus	100 GPa
Poisson's ratio	0.3
Specific heat	650 J/kg K
Heat conductivity	32 W/m K
Heat transfer coefficient	P = 0 MPa: 1,300 W/m ² K P = 20 MPa: 4,000 W/m ² K P = 35 MPa: 4,500 W/m ² K
Friction coefficient	0.4
Flow stress	Voce-Kocks model

도에 의한 열전달만을 고려하였으며, 대류와 복사에 의한 영향은 상대적으로 열전달량이 크지 않기 때문에 본 해석에서는 고려하지 않았다[7].

열간 성형해석은 판재 전용 유한요소 해석 프로그램인 Pam-stamp 2G(Explicit)를 사용하였으며, 해석 시간의 단축을 위해 1/2 모델을 사용하였다. 상형 및 측면 캠의 이송 속도는 10m/sec으로 하였으며, 해석 속도와 실험시의 성형 속도를 보정하기 위해서 속도 보정 계수(Velocity correction factor)를 사용

Table 2 Simulation conditions

No.	Conditions	Details	
1	Isothermal/mono strain rate	Tube temperature = 800°C Strain rate = 0.01	
2		Tube temperature = 800°C Strain rate = 0.1	
3		Tube temperature = 800°C Strain rate = 1	
4	Isothermal/multi strain rate	Tube temperature = 800°C Strain rate = 0.01~1	
5	Non-isothermal/multi strain rate	Die temperature = 20°C	Initial tube temperature = 800°C
6		Die temperature = 200°C	Strain rate = 0.01~1

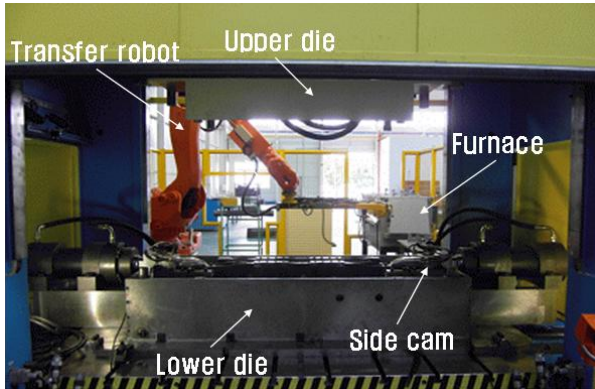


Fig. 3 The experimental apparatus for hot stamping

하였다. 튜브에 사용된 철요소의 크기는 성형 후 최종 형상을 고려하여 2mm로 하였다.

열간 성형해석은 등온조건에서 변형율속도를 고려하지 않는 경우와 고려하는 경우, 비등온조건에서 변형율속도를 고려하는 3가지 방법으로 수행되었으며, 자세한 해석 조건은 Table 2에 나타났다. 등온조건에서 변형율 속도를 고려하지 않는 해석에서는 튜브 온도를 800°C의 등온조건으로 가정하고 선정된 변형율 속도에서의 유동응력만 하나만을 고려하여 해석을 수행하였다. 여기서 튜브 온도는 노에서 930°C로 가열된 후 이송 중 온도 저하를 고려하여 800°C로 가정하였다. 등온조건에서 변형율 속도를 고려하는 경우는 800°C의 등온조건으로 가정하고 변형율 속도의 변화를 고려하여 해석하였다. 비등온조건에서 변형율 속도를 고려하는 경우는 온도의 변화와 변형율 속도의 변화를 모두 고려하였다.

2.1 실험방법

튜브빔의 제작을 위해 800톤의 서보유압프레스, 이송용 로봇, 간접가열 방식의 가열로를 사용하였으며(Fig. 3), 측면 캠의 이동은 유압 실린더로 제어하였다. 실험은 소재를 930°C에서 6분간 가열한 후 상온의 금형내로 7초 동안 이송하였다. 이후 1초동안 단힘 성형을 하였으며, 최종적으로 측면 캠을 1초 동안 튜브내로 삽입하여 측면 형상을 성형하였다. 그리고 성형이 완료된 상태로 약 20초 동안 유지하여 튜브 소재를 마르텐사이트화 하였다. 이때 성형이 시작될 때와 단힘 성형이 완료된 후 튜브의 온도를 비접촉식 온도계를 사용하여 측정하였으며, 측정 결과를 해석 결과와 비교하여 해석의 정도를 검토하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 단힘 성형

단힘 공정에서는 상형이 완전히 단혔을 경우의 튜브 양끝단부의 함몰량(Depth of dent)이 중요하다. 함몰량이 과도하게 클 경우는 측면 캠이 튜브로 삽입 도중 접촉에 의해서 주름이 발생할 우려가 있기 때문이다. 따라서 단힘 해석에서는 함몰량의 정확한 예측이 요구된다.

해석 조건별 단힘 해석과 실험 결과를 비교하여 Fig. 4와 Table 3에 나타냈다. 등온/단변형율속도 조건(Isothermal/Mono strain rate)에서는 변형율 속도가 느린 경우의 유동응력을 사용할수록 함몰량이 작아졌다. 그러나 변형율 속도에 따른 함몰량의 차이는 미미하였다. 등온/다중변형율속도 조건(Isothermal/Multi strain rate)에서는 등온/단변형율속도 조건과 유사한 낮은 함몰량을 나타냈다. 비등온/다중변형율속도 조건(Non-isothermal/Multi strain rate)에서는 실험과 가장 유사한 함몰량을 나타냈으며, 함몰량이 가장 크게 나타났다.

실제 공정에서는 측정된 튜브의 온도는 금형내로 이송 후 약 820°C 내외이며, 단힘 성형이 완료된 후 상형을 상승시키고 성형된 튜브의 내측면의 중간부분을 측정된 온도는 약 700°C 내외를 나타냈다. 실제 공정은 비등온 과정이며 튜브의 부위별로 변형율 속도가 다르기 때문에 해석에서도 비등온/다중변형율속도 조건에서의 해석이 가장 실험과 유사한 결과를 나타냈다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 비등온/

다중변형율속도를 고려한 해석에서 단힘 해석후의 온도 분포도 실측치와 유사하게 성형된 튜브의 내측면 중간부(Inner wall center area) 온도가 741~763°C를 나타냈다. 해석에서는 대류 및 복사 열전달을 고려하지 않은 점을 감안하면, 실측치와 거의 유사한 온도 분포를 나타내고 있는 것으로 생각된다. 상형과 접촉하는 시점이 가장 빠른 내면 중앙부(Inner bottom area)에서 655~677°C도 정도의 온도 분포를 나타내고 금형과의 접촉이 없는 귀부분(Ear area)으로 갈수록 800°C에 가까운 온도 분포를 나타내고 있다. 이처럼 부위별로 다른 온도 분포와 변형율 속도를 고려해야 열간 성형시 변형을 정확히 예측 가능할 것으로 생각된다. 800°C의 등온 조건에서 함몰량이 작게 나타난 이유는 고온에서의 가공경화지수가 낮아지기 때문이다. 가공경화지수는 온도에 민감하며[11], 일반적으로 온도가 높아 질수록 가공경화지수가 낮아진다. 본 연구에 사용된 Voch-kocks 모델도 이러한 경향을 나타낸다. 가공경화 지수가 낮은 경우는 금형과 접촉에 의한 변형이 주위로 잘 전파되지 못해 변형이 국부적으로 제한된다. 따라서 상형으로 성형되는 중앙부의 변형이 튜브 양 끝단부에 미치는 영향이 적어지게 되기 때문에 튜브 끝단부의 함몰량이 적어진다. 즉, 등온 조건을 성형이 시작되는 초기 온도인 800°C의 고온으로 가정할 경우는 소재가 성형중 국부적으로 냉각되면서 증가하는 유동응력을 표현하지 못하기 때문에 등온 조건의 성형해석시 튜브의 함몰량이 실험보다는 작아지는 경향을 나타냈다.

3.2 측면 캠 성형

Fig. 6에 해석과 실험에서의 측면 캠 성형 후의 변형 양상을 나타냈다. 등온조건에서 변형율 속도를 고려하는 경우와 하지 않는 경우 모두에서 캠 성형의 문제점은 발견되지 않았으며, 거의 유사한 성형 해석 결과를 나타냈다. Fig. 6(a)에 등온조건에서 변형율 속도를 고려한 경우의 성형해석 결과를 나타냈다. 등온 조건에서는 변형율 속도의 고려와 상관없이 단힘 성형에서 함몰량이 작기 때문에 측면 캠이 튜브내로 진입시 캠과 튜브의 간섭이 크지 않았다. 하지만 비등온 조건의 해석에서는 Fig. 6(b)에서 나타난 바와 같이 캠의 삽입시 튜브의 입구 윗면에 주름이 발생하였다. 이러한 주름은 실제 실험(Fig. 6(c)에서도 동일하게 나타났다. 비등온 조건에서의

단힘시 함몰량이 실험결과와 가장 유사하였으며, 함몰량이 크게 나타났기 때문에 캠이 튜브내로 진입시 캠이 고온에서 연화된 튜브의 상면을 압축하였을 것으로 생각된다. 또한 상온의 캠과 접촉하는 튜브의 상면에서 국부적으로 냉각이 일어나서 소재가 경화되고 경화된 주위의 소재들은 아직 연화된 상태로 존재하게 되면서 연화된 부분에서 과도한 변형이 집중되어 상면의 주름 발생을 더욱 촉진 시켰을 것으로 생각된다. 즉, 온도와 변형율 속도의 변화를 고려하는 성형해석이 튜브의 캠 성형 공정시 변형 거동을 잘 예측하는 것으로 확인되었다.

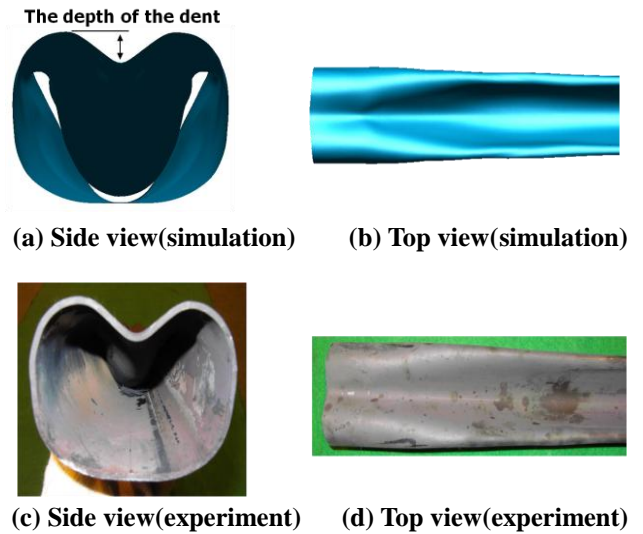


Fig. 4 Deformed shapes after die closing in case of simulation No. 6 and experimental result

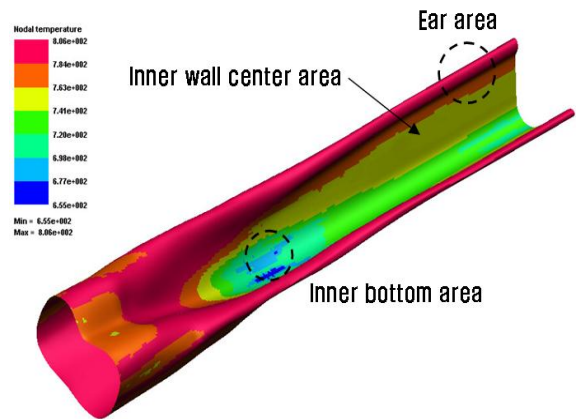
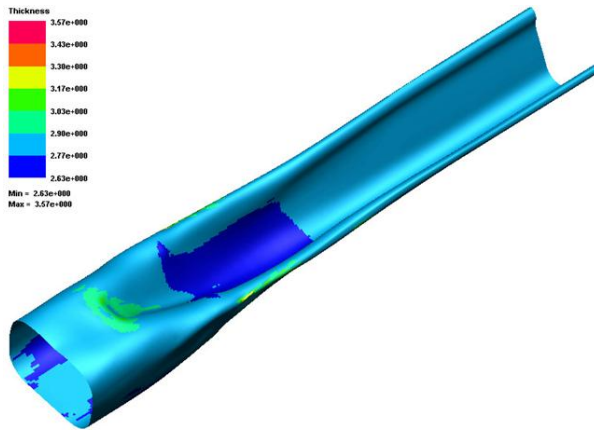


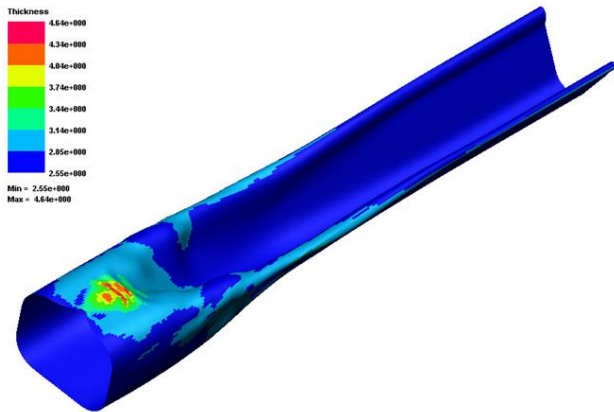
Fig. 5 Temperature distribution after die closing in case of simulation No. 5 (Non-isothermal/multi strain rate condition and die temperature = 20°C)

Table 3 Depth of dent after die closing simulation

		Depth of dent
Simulation	1	6.0
	2	6.1
	3	6.3
	4	5.1
	5	9.9
	6	9.9
Experiment		10.1



(a) Simulation No. 4



(b) Simulation No. 5



(c) Experiment

Fig. 6 Results of deformed shapes after side cam forming

3.3 수정 공정

기존 공정의 주름 발생을 방지하기 위해서 수정된 공정을 제안 하였다. 기존 공정의 문제점은 단힘 성형 후 튜브 양 끝단의 함몰량이 과도하다는 것이다. 따라서 함몰량을 낮추기 위해서 상형의 단힘 정도를 조절하였다. 즉, 상형을 완전히 닫지 않고 캠을 삽입한 후 다시 상형을 완전히 닫는 공정을 제안하였다. 본 연구에서는 캠의 형상을 고려해서 상형이 완전히 닫히기 10mm 전에 정지 후 측면 캠 성형을 수행하고 이후 상형이 완전히 닫히는 공정 순서를 최적의 상태로 제안하였다. 제안된 공정은 성공적이었으며, 튜브의 주름은 발생되지 않았다.

Fig. 7에 수정된 공정으로 얻어진 성형해석 결과와 실험 결과를 나타냈다. 수정된 공정에서는 해석과 실험에서 모두 튜브의 주름이 발생되지 않았으며, 정상적으로 성형이 완료 되었다. 상형시 단힘량이 줄어 들면서 튜브 상면의 함몰량도 줄어 들었으며, 캠의 진입시 함몰된 부분과의 접촉 시점이 지연되었다. 열간 성형에서는 튜브의 온도가 국부적으로 많은 차이를 나타내게 되어 소재의 물성도 국부적으로 많은 차이를 나타내기 때문에 이를 고려한 해석이 수행되어야 정확한 재료 거동의 예측이 가능할 것으로 판단된다. 또한 금형을 수정하지 않고 공정의 순서만을 변화시켜서 튜브빔을 제작할 수 있었으며, 해석적인 접근으로 실험의 문제를 정확히 구현 할 수 있음을 확인하였다.

3.4 조직 및 경도

수정된 공정으로 성형이 정상적으로 이루어 졌으며, 성형 후 금형을 닫은 상태로 20초간 유지하였다. 20초간 유지한 이후의 조직과 경도를 Fig. 8과 Fig. 9에

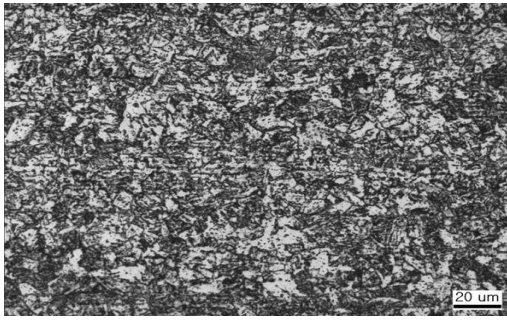


(a) Simulation

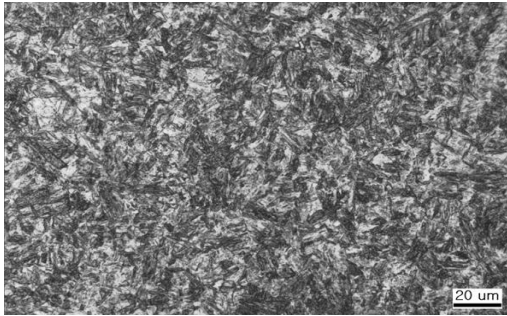


(b) Experiment

Fig. 7 Final deformed shapes after process modification

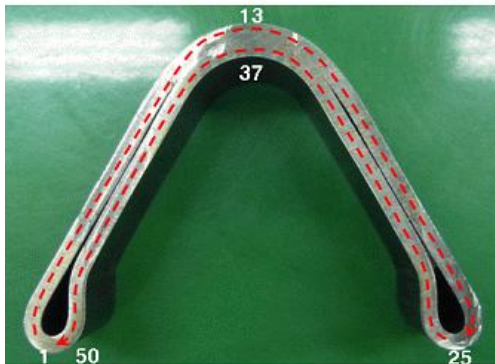


(a) Ear area

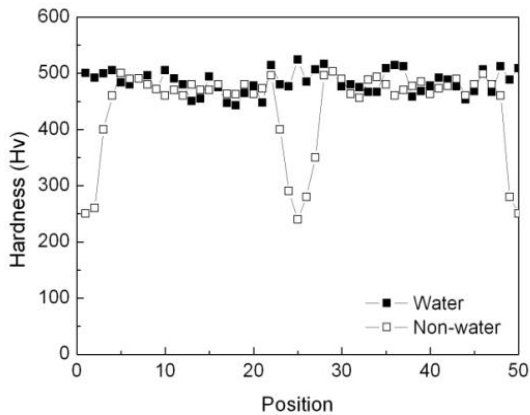


(b) Die contact area

Fig. 8 Results of microstructure observation



(a) Test area



(b) Hardness value according to test position

Fig. 9 Result of hardness test

나타냈다. 금형과 비접촉되는 귀부분에서는 서냉되어져 페라이트를 포함한 저경도의 조직이 얻어졌으나, 금형과 접촉되는 부분에서는 금냉에 의해서 고경도의 마르텐사이트 조직이 얻어졌다. 경도 분포에서도 귀부분의 경도가 낮아지는 현상이 발생하여 조직관찰 결과와 잘 일치하고 있음을 확인하였다. 이러한 조직 및 경도의 변화는 성형해석시 온도분포 결과에서 예측되어진다. Fig. 5의 단힘 성형 후 온도분포에서 귀부분의 온도는 거의 감소하지 않았으며, 금형과 접촉하는 부분의 온도 감소가 급격히 발생함을 알 수 있다. 이러한 온도분포 결과는 냉각되었을 경우 발생하는 조직관찰 결과를 잘 설명해준다.

조직 및 경도의 불균일은 튜브빔의 내구성을 저하시키는 요인으로 작용하기 때문에 불균일을 방지하기 위해서 성형 후 귀부분에 물을 분사하는 공정을 추가하였다. 물 분사 공정의 도입으로 조직은 모든 부분에서 마르텐사이트화가 이루어졌으며, 경도도 모든 부분에서 약 450~500Hv의 높은 값을 나타냈다. 이러한 조직 및 경도 관찰 결과는 튜브빔이 오스테나이트화 온도까지 충분히 가열되어졌으며, 금형을 사용한 냉각과정에서 충분한 냉각속도로 냉각되어 고경도의 마르텐사이트 조직이 얻어질 수 있음을 확인한 결과이다. 본 연구에서 튜브빔의 성형성을 예측할 수 있는 성형해석기법을 연구하였으며, 향후 냉각속도 제어를 통한 조직 및 경도의 예측에 관한 연구를 수행하여 튜브빔의 최적 열간성형 공정에 대한 최적의 조건을 도출할 예정이다.

4. 결론

본 연구에서는 자동차용 서스펜션 부품의 일종인 CTBA의 튜브빔의 열간 성형성을 예측하기 위해서 성형에 초점을 맞춘 2 분야를 연계해석하는 기법에 대해서 연구하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 온도와 변형을 속도, 열전달을 고려하는 비등온 해석은 실제 튜브빔의 성형 거동을 정확히 예측할 수 있었다. 튜브는 성형 중 금형과의 접촉에 의한 냉각이 가장 지배적이기 때문에, 대류와 복사를 고려하지 않고 금형과 튜브의 접촉에 의한 열전달만을 고려하는 단순화된 해석이 시간과 비용적인 측면에서 효과적일 것으로 생각된다.

(2) 등온 조건에서의 해석에서는 튜브의 변형을

나타내는 함몰량이 시험과 차이를 나타냈으며 변형 속도의 고려와 상관없이 실제 거동을 예측하는데는 무리가 있었다. 성형 중 소재와 금형의 불균일한 열전달과 이로 인한 소재 강도의 국부적인 변화가 성형 중에 주름과 같은 문제를 발생시키는 주된 원인중의 하나로 판단되며, 이러한 거동은 비등온해석에서 좀더 정확히 표현되고 있음을 확인하였다.

(3) 상형 단형을 완전히 진행하지 않고 일정한 간격을 띄운 상태에서 캠으로 성형하는 공정을 제안하였다. 본 연구에서는 10mm의 간격을 가지는 상태에서 상형을 정지하고 캠을 이동시켜서 성형하는 공정이 주름 방지를 위해서 효과적이었으며, 실험에 의해 유효성을 검증하였다.

(4) 금형과 접촉되는 부분은 충분히 냉각이 진행되어 고경도를 나타냈으나 비접촉부는 낮은 경도를 나타냈다. 하지만 비접촉부에 물을 분사하는 공정을 개발하여 튜브빔 전체를 고경도화 하였다.

REFERENCES

- [1] M. S. Chae, G. D. Lee, Y. S. Suh, K. H. Lee, Y. S. Kim, 2009, Mechanical and Forming Characteristics of High-strength Boron-alloyed Steel with Hot Forming, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 18, No. 3, pp. 236~244.
- [2] H. Karbasian, A. E. Tekkaya, 2010, A Review on Hot Stamping, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 210, No. 15, pp. 2103~2118.
- [3] A. Turetta, S. Bruschi, A. Ghiotti, 2006, Investigation of 22MnB5 Formability in Hot Stamping Operations, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 177, No. 1, pp. 396~400.
- [4] M. Merklein, J. Lechler, 2006, Investigation of the Thermo-mechanical Properties of Hot Stamping Steels, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 177, No. 1, pp. 452~455.
- [5] M. Naderi, L. Durrenberger, A. Molinari, W. Bleck, Constitutive Relationships for 22MnB5 Boron Steel Deformed Isothermally at High Temperatures, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 478, No. 1, pp. 130~139.
- [6] A. Bardelcik, C. Salisbury, M. Worswick, M. Wells, 2008, Proc. 1st Int. Conf. on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel(editor:K. Steinhoff), Grips Media, Bad Harzburg, Kassel, Germany, pp. 45~54.
- [7] A. B. Shapiro, 2008, Proc. 1st Int. Conf. on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel (editor:K. Steinhoff), Grips Media, Bad Harzburg, Kassel, Germany, pp. 89~95.
- [8] H. Karbasian, C. Klimmek, A. Brosius, A. E. Tekkaya, 2008, Proc. 1st Int. Conf. on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel(editor: K. Steinhoff), Grips Media, Bad Harzburg, Kassel, Germany, pp. 97~103.
- [9] H. S. Son, H. G. Kim, Y. R. Cho, 2008, Proc. Numisheet 2008(editor:Pavel Hora), ETH, Zurich, Interlaken, Switzerland, pp. 1~5.
- [10] Audi, 2008, Numisheet 2008, Continuous Press Hardening Benchmark Problem BM03.
- [11] W. Bang, J. Y. Jung, Y. W. Chang, 2001, A Study on the Flow Stress Compensation of Deformation Heating for Hot Forming Analysis, *J. Korean Inst. Met. Mater.*, Vol. 39, No. 12, pp. 1375~1380.