

핫스탬핑용 보론강의 고온 성형한계선도 평가 연구

한수식^{1, #}

Formability Test of Boron Steel Sheet at Elevated Temperature for Hot Stamping

S. S. Han

(Received January 5, 2017 / Revised March 9, 2017 / Accepted March 10, 2017)

Abstract

The hot stamping process is an innovative forming method that could prevent the cracking of high strength steel sheets. The formability test of boron steel sheet using forming limit diagrams at elevated temperature is very complicated and time consuming job. In this paper, an alternative test method to evaluate the formability of boron steel in hot stamping has proposed. It measured the FLD0 instead of whole strain combinations of FLD with the tensile test machine and specially designed test rig. Test results shows that the proposed test method can simulate the plain strain condition fracture and can make the FLD of boron steel sheet at elevated temperature with less effort.

Key Words : FLD0, Plain Strain Condition Fracture, Standard FLC Shape, Circle Grid Analysis

1. 서 론

차량 경량화와 충돌 안전성 확보를 위하여 고강도 강재의 자동차 부품 적용에 대한 요구와 필요성은 지속적으로 증가하고 있다. 그러나 고강도 강재의 부족한 연신율에 의한 낮은 성형성과 높은 강도로 인하여 발생하는 성형 후의 큰 스프링백은 고강도 강재를 자동차 부품에 적용하는데 큰 장벽으로 작용하고 있다. 소재를 고온 상태로 가열하여 연신율을 증가시켜 부족한 강재의 성형성을 확보하고 성형 직후 금형 내에서 냉각 열처리를 수행하여 부품의 강도를 증가시키는 성형 기술인 핫스탬핑 기술은 고강도 강재 성형에서 발생하는 문제점들을 해결해 줄 수 있는 성형 기술의 하나로서 최근 자동차 부품 성형에 지속적으로 그 적용이 증가하고 있다[1].

열간에서 성형이 이루어지고 성형 후 금형 내에서 열처리에 의한 상변태가 발생하는 핫스탬핑 기

술을 적용한 자동차 부품의 설계를 위해서는 열간 성형시 변형률 분포, 소재와 금형 사이의 열전달 그리고 냉각에 따른 상변태 등을 고려하여야 하기 때문에 해석 기술의 중요성은 다른 판재 성형 기술에 비하여 매우 크다[2~5]. 핫스탬핑 공정의 정확한 해석을 위해서는 소재의 기계적 성질인 응력-변형률선도[6~8]와 소재의 성형성에 대한 평가가 핫스탬핑 성형이 시행되는 고온에서 적절하게 이루어져야 한다. 성형중 소재의 파단 발생 여부를 판정하는 기준으로 사용되는 성형한계선도(FLD)를 핫스탬핑 성형이 이루어지는 고온에서 평가하기 위해서는 매우 많은 시간과 노력이 요구된다[9].

본 연구에서는 핫스탬핑 공정의 해석을 위하여 필수적이지만 평가에 시간과 노력이 많이 소요되는 보론 강재의 고온 성형한계선도를 고온 인장 시험기와 시험용 지그를 사용하여 비교적 간단한 방법으로 평가할 수 있는 방법에 대하여 연구하여 제시하고자 한다.

1. 금오공과대학교 기계공학과

Corresponding Author : Kumoh National Institute of Technology,
Department of Mechanical Engineering, E-mail:sshan@kumoh.ac.kr

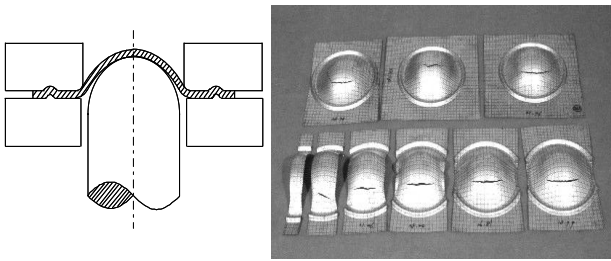


Fig. 1 Schematic diagram of FLD test tool and examples for sheet metal

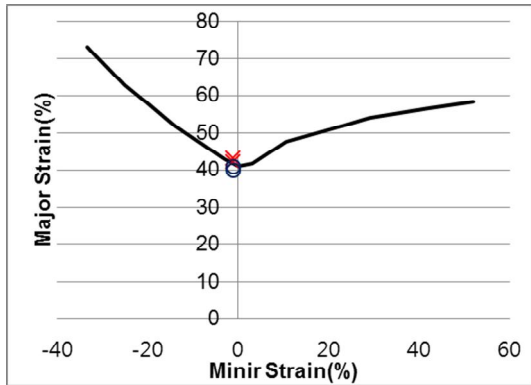


Fig. 2 Example of FLD that generated with FLD0(41%) and standard FLD shape

2. 성형성 평가

2.1 성형한계선도

성형한계선도란 여러 가지 조합의 주변형률과 부변형률이 발생하는 조건으로 성형 시험을 하여 파단이 발생하는 한계 주변형률과 부변형률을 측정하고 이를 주변형률과 부변형률의 평면상에 도시한 것이다. 판재의 성형한계선도는 Fig. 1과 같이 반구형 펀치를 이용한 장출 시험법을 이용하여 시험편의 폭을 변화시켜 성형한계선도의 왼쪽편 즉 드로잉 변형 모드가 발생하는 부분의 한계 변형률을 구하고 판재와 펀치 사이의 윤활 조건을 변화시켜 성형한계선도의 오른쪽 부분인 장출 변형 모드에서의 한계 변형률을 구한다.

철강 판재들의 성형한계선도는 유사한 형상을 나타내며 소재의 종류에 따라 성형한계선도의 높이만 다른 것이 대부분이기 때문에 Fig. 2에 나타난 바와 같이 실용적으로는 평면 변형조건에서의 최대 한계 변형률인 FLD0를 측정하여 표준 형상의 성형한계선도를 평행 이동하여 사용하고 있다.

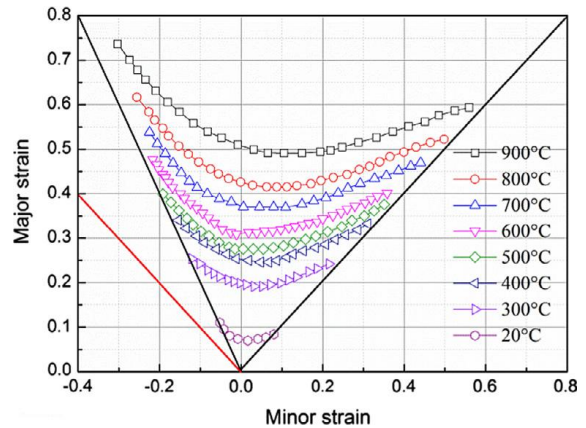


Fig. 3 FLDs of 22MnB5 under various temperatures[9]

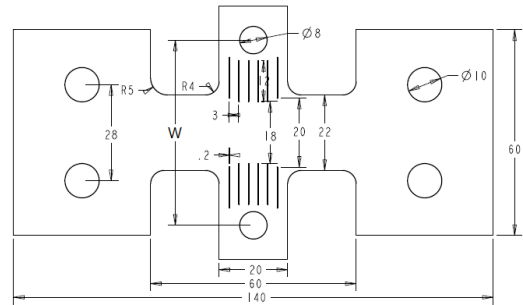


Fig. 4 Test specimen for plain strain tensile test

Fig. 3은 J. J.Cui[9] 등이 핫스탬핑용 보론 강재에 대하여 가열된 금형을 이용하여 Fig. 1과 같은 방법으로 여러 가지 온도에 대하여 성형한계선도를 측정한 것을 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 보론 강재의 고온 성형한계선도도 철강 판재의 상온성형한계선도와 그 형상이 유사한 것을 알 수 있다. 따라서 핫스탬핑용 보론 강재의 고온 성형한계선도도 고온에서의 FLD0값과 표준성형한계선도 형상을 이용하여 구할 수 있을 것으로 판단할 수 있다.

2.2 시험용 지그 및 시편 형상 설계

보론 강재의 고온 평면 변형 파단을 발생시키기 위하여 지그 및 시편의 형상을 설계하였다. 먼저 시편의 형상은 이축 인장 시험에 사용되는 인장 시편의 형상[10]에서 착안하여 Fig. 4에 나타난 것과 같이 결정하였다. 슬릿 가공된 시편의 양쪽 구멍의 폭 방향 움직임을 제한하고 인장 시험을 실시하면 슬릿에 의하여 길이 방향 변형은 가능하나 폭 방향 변형은 제한되어 파단 발생부위의 변형 조건이 평면 변형 상태를 유지하게 된다.

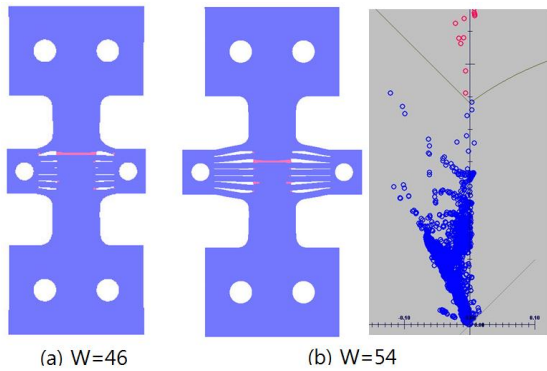


Fig. 5 Crack location and strain mode with respect to hole distance W

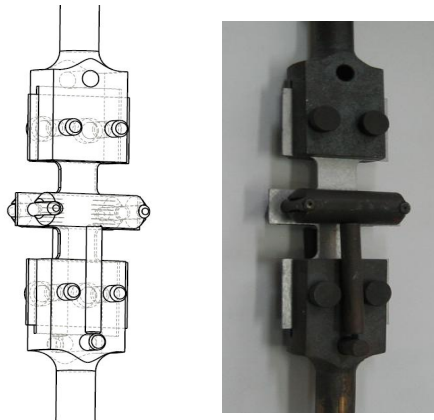


Fig. 6 Testing jig for formability test at elevated temperature

시편의 구멍 사이의 거리 W 는 성형 해석을 통하여서 결정하였다. 해석은 Pamstamp 2G 를 사용하였으며 소재의 기계적 물성치는 해석 프로그램에서 기본으로 제공하는 보론 강재의 값을 사용하였으며 해석온도는 800°C 로 하였다. Fig. 5와 같이 W 값이 작은 경우 파단이 한쪽으로 많이 치우쳐 나타났으며 W 를 증가시키면 길이 방향의 중심 쪽으로 이동하였다. 그런데 시편은 내부 공간 지름이 80mm 인 가열로 내부에 장착되기 때문에 W 를 54mm 로 결정하였다. 이때 파단 발생 부위의 변형모드는 평면 변형 모드인 것을 알 수 있다.

가열로 속에서 시편을 인장하고 인장 변형시 시편의 폭 방향 수축을 방지할 수 있는 고온 성형성 시험용 지그를 설계하였다. 설계 형상과 제작된 지그를 Fig. 6에 나타내었다. 시험을 위한 지그는 비교적 Ni 함량이 높고 가공성이 우수한 STS316로 제작하였다.

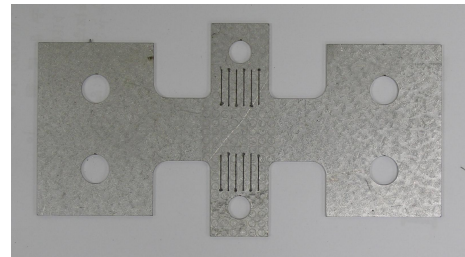


Fig. 7 Test specimen after grid marking with laser printing



Fig. 8 Test setup for formability with high temperature tensile tester

2.3 고온 성형성 시험

제작된 성형성 시험용 지그를 이용하여 핫스탬핑용 보론 강재의 고온 성형성 시험을 실시하였다. 시편은 알루미늄 도금 처리된 핫스탬핑용 소재 22MnB5(두께 1.2mm)를 레이저를 이용하여 절단하여 제작하였다. 시험 후 변형률을 측정하기 위하여 시편의 표면에 원형 그리드를 레이저를 이용하여 마킹하였다. 전기화학 방식을 사용하여 에칭한 경우 가열에 의한 표면 산화 등으로 생긴 변색 때문에 시험 후 그리드의 식별이 곤란하였기 때문이다.

고온 성형성 시험은 원통형 가열로가 설치된 SHIMADZU AG25TG 인장 시험기를 사용하여 수행하였다. 가열로의 최대 가열 가능 온도는 970°C 이며 자동 온도 조절 장치에 의하여 가열로의 상중하 3부분의 온도가 검출되고 제어된다. 고온 성형성 시험은 핫스탬핑 공정의 열 사이클을 모사한 조건으로 수행하였다. 핫스탬핑 공정에서는 먼저 소재를

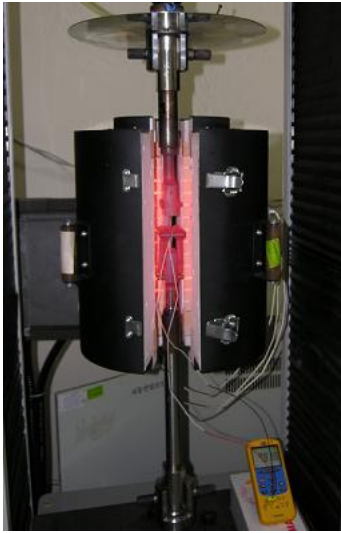


Fig. 9 Cooling method of specimen by opening the heating chamber

900℃ 이상으로 가열하여 오스테나이트 조직으로 만들고 소재 전체의 온도와 상 균질화를 이루고 도금 강판을 사용하는 경우에는 도금층의 합금화 반응이 완료될 수 있도록 하기 위하여 일정 시간 주어진 온도를 유지한다. 그 이후 가열된 소재는 금형으로 옮겨져 고온 상태에서 성형된다. 가열로에서 금형으로 이송되는 과정에 발생한 냉각 때문에 성형이 시작될 때 소재 온도는 800℃에서 700℃ 사이인 것 알려져 있다. 따라서 핫스탬핑용 보론 강재의 고온 성형성 평가는 이러한 열사이클에서 이루어져야 한다. 본 연구에서는 시편을 930℃로 가열하여 4분간 유지한 후 800℃, 700℃ 각각의 온도로 냉각하여 고온 성형성을 각각 평가하였다. 시험에 사용된 가열로의 특성상 내부 온도의 하강 속도가 느리기 때문에 930℃로 가열 후 가열로 내에서 시편의 온도를 시험 온도인 800℃나 700℃로 낮추는 데 상당히 오랜 시간이 소요된다. 이것은 실성형 과정과는 매우 다르기 때문에 Fig. 9에 나타낸 것처럼 가열로를 열어서 시편의 온도를 목표 온도로 낮추는 방법을 이용하였다.

가열로를 완전히 열어서 시편이 시험 목표 온도에 도달하도록 냉각한 후 가열로를 반쯤 닫아서 온도를 유지하였다. 이때 가열로의 열림 정도는 시행착오를 통하여 결정하였다. 시편의 그림 부분의 부피가 시편에 비하여 크기 때문에 시편에 비하여 늦게 냉각된다. 시편이 목표 시험 온도에 도달하여 가

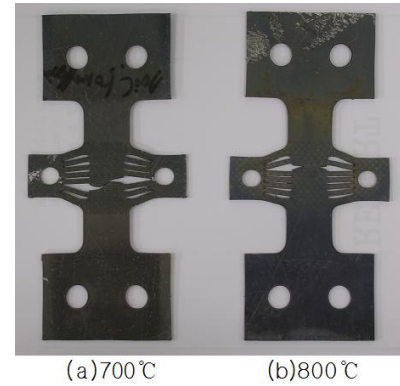


Fig.10 Examples of specimen after formability test at each elevated temperature

열로를 반쯤 닫아 냉각을 중단하면 그림 부분으로부터 시편으로 열이 유입되어 시편의 온도가 시험 중에 약 5℃ 정도 상승하는 현상이 나타났다. 이 때문에 시험 시작과 종료 시점의 시편의 온도는 약 5℃의 차이가 있다. 그리고 시험시 인장 속도는 5m/min 로 하였다.

2.4 고온 성형성 시험 결과 및 분석

각각의 시험온도에서 고온 성형성 시험을 시행한 시편의 형상을 Fig. 10에 각각 나타내었다. 시험 후 크랙 부위의 변형률은 화상을 이용한 변형률 분석장치인 FMTI System 의 CGA 장비를 사용하였다. 크랙 부위의 변형률을 측정된 결과 부변형률이 해석 결과와는 다르게 값이 0(Zero)으로 나타나지 않고 -2%~-3%정도를 갖는 것으로 나타나 크랙이 완전한 평면 변형 조건에서 발생되지는 않았음을 알 수 있었다. 이것은 시편을 시험용 지그에 장착하기 위하여 필요한 시편과 지그 사이의 유격에 의하여 시험 중 폭 방향으로의 변형이 완전하게 구속되지 못하였기 때문으로 판단된다.

크랙 부위의 측정된 변형률과 표준성형한계선도 형상을 이용하여 작성된 각각의 성형 온도에서의 보론 강재의 고온 성형한계선도를 Fig. 11와 12에 각각 나타내었다. 이들 보론 강재의 고온 성형한계선도는 다음과 같은 방법을 통하여 작성되었다. 먼저 주변형률-부변형률 좌표축에 크랙 부위에서 측정된 변형률을 표시하였다. 이때 크랙에 인접한 영역에서 측정된 변형률은 실패로 표시하고 크랙에 인접하지 않은 영역의 변형률은 성공으로 표시하였다. 그리고 상온 표준성형한계선도 형상을 주변형률 방향으로

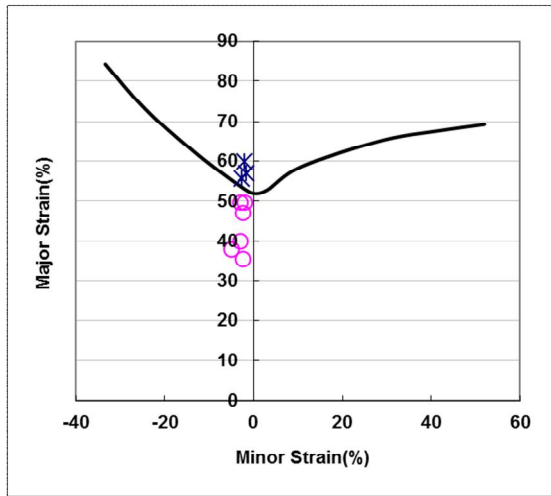


Fig.11 FLD of boron steel that generated with FLD0 at 800°C and standard FLD shape

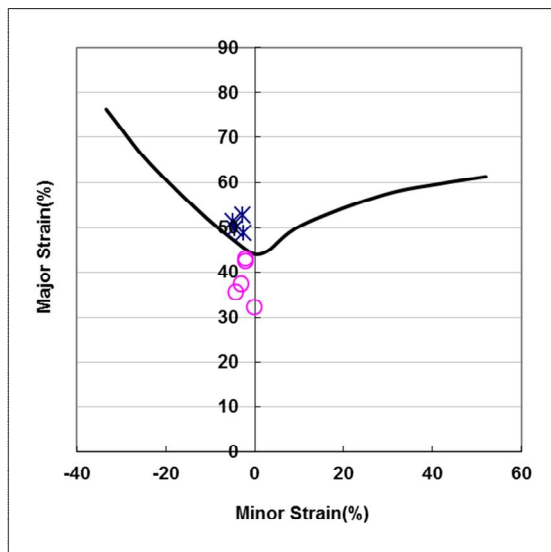


Fig.12 FLD of boron steel that generated with FLD0 at 700°C and standard FLD shape

평행 이동하여 실패와 성공을 나타내는 표식의 중앙에 위치하도록 하여 보론 강재의 고온 성형한계선도를 구하였다. 이러한 방법은 FLD0 값과 상온 표준성형한계선도를 이용하여 강판의 상온 성형한계선도를 작성할 때 일반적으로 사용되는 방법이다.

성형성 시험 온도가 800°C 일 때 FLD0 값이 50% 정도였으나 성형성 시험 온도가 700°C 일 때는 FLD0 값이 45% 정도로 그 값이 상당히 많이 작아진 것을 알 수 있다. 이것으로부터 핫스탬핑 공정에

서는 가열 후 급형으로의 이송 시간을 최소화하여 소재의 냉각을 줄여서 성형이 가능한 한 높은 온도에서 이루어 지도록 하는 것이 성형성 확보에 유리하다는 것을 알 수 있다. 그리고 이와 같이 고온 인장 시험장치와 지그를 통하여서 작성된 핫스탬핑용 보론 강재의 고온 성형한계선도는 핫스탬핑 공정 해석시 파단의 발생을 예측하는데 판단 도구로서 매우 유용하게 사용될 수 있다.

3. 결론

핫스탬핑용 보론 강재의 고온 성형한계선도 평가 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 제안된 고온 성형성 평가 시편 형상과 시험용 지그를 이용하여 고온에서 평면 변형 파단 조건과 유사한 조건에서 파단을 발생시킬 수 있다.

(2) 고온 성형성 시험을 통하여 구한 파단 부위의 변형률 조합과 표준 상온성형한계선도 형상을 이용하여 보론 강재와 같은 고온에서 성형되는 소재의 파단을 예측하는데 필요한 고온 성형한계선도를 작성하였다.

(3) 시간과 노력이 많이 소요되는 핫스탬핑용 보론 강재의 고온 성형한계선도를 고온 인장 시험기와 시험용 지그를 이용하여 비교적 작은 시간과 노력으로 작성할 수 있는 방법을 제시하였다.

(4) 이상과 같은 방법으로 구한 핫스탬핑용 보론 강재의 고온 성형한계선도는 핫스탬핑 부품의 개발과 설계시 적용되는 성형 해석에서 파단 발생 예측의 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단한다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문입니다.

REFERENCES

[1] Y. J. Lee, 2012, Proc. Sheet Metal Forming Symposium, Kor. Soc. Tech. Plast, Seoul, Korea, pp. 65~78.
 [2] K. J. Kim, C. P. Han, J. H. Lim, Y. S. Lee, S. T. Won, J. W. Lee, 2012, Light-weight Design and Simulation of Automotive Rear Bumper Impact Beam Using

- Boron Steels, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng., Vol. 20, No. 2, pp. 98~102.
- [3] H. W. Lee, J. B. Hwang, S. U. Kim, W. H. Kim, S. J. Yoo, H. W. Lim, Y. J. Yum, 2010, Construction of Vehicle Door Impact Beam Using Hot Stamping Technology, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng., Vol. 34, No. 6, pp. 797~803.
- [4] D. H. Lee, T. J. Kim, J. D. Lim, H. J. Lim, 2009, Development of High Strength Steel Body by Hot Stamping, Trans. Mater. Process., Vol. 18, No. 4, pp. 304~309.
- [5] S. C. Yoon, D. H. Kim, 2013, Analysis of Phase Transformation and Temperature History during Hot Stamping Using the Finite Element Method, Trans. Mater. Process., Vol. 22, No. 3, pp. 123~132.
- [6] H. I. Je, M. Y. Lee, T. I. Kim, S. H. Ahn, K. W. Nam, Basic Evaluation of Boron Steels for Hot Stamping 2009, Proc. Kor. Soc. Mech. Eng. Conf., Kor. Soc. Mech. Eng., pp.231~235
- [7] K. W. Nam, S. H. Hwang, D. Y. Kim, M. Y. Lee, S. M. Lee, 2012, Mechanical Properties and Formability of TWB Boron Steel, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng., Vol. 36, No.10, pp. 1221~1226.
- [8] H. I. Je, K. W. Nam, D. Y. Kim, 2010, Proc. Kor. Soc. Mech. Eng. Spring Conf., Kor. Soc. Mech. Eng., Seoul, Korea, pp.137~140.
- [9] J. J. Cui, G. Y. Sun, J. R. Xu, X. D. Huang, G. Y. Li, 2015, A Method to Evaluate the Formability of High-strength Steel in Hot Stamping, Mater. Des., Vol. 77, pp. 95~109.
- [10] D. E. Green, K.W. Neale, S. R. MacEwen, A. Makinde, R. Perrin, 2004, Experimental Investigation of the Biaxial Behaviour of an Aluminum Sheet, Int. J. Plast., Vol. 20, No. 8, pp. 1677~1706.