보론강판의 열간 벤딩 공정에서 성형인자가 기계성질에 미치는 영향

권기영¹ · 신보성² · 강충길[#]

The Effect of Forming Parameter on Mechanical Properties in Hot Bending Process of Boron Steel Sheet

K. Y. Kwon, B. S. Sin, C. G. Kang

(Received August 6, 2009 / Revised May 4, 2010 / Accepted May 6, 2010)

Abstract

In the hot press forming process (HPF), a martensitic structure is obtained by controlling the cooling rate when cooling a boron sheet that is heated up to over 900°C. The HPF process has various advantages such as the improvement in formability and material properties and minimal spring back of the deformed materials. The factors related to the cooling rate depend on the heat transfer characteristics between heated materials and dies. Therefore, in this study, the cooling rate is controlled by adjusting the heat transfer coefficient of the material at the pressing process. And, the mechanical properties and microstructure of the deformed material is demonstrated during the HPF process where cold dies are used to form the heated steel plate. This is achieved by varying the major forming conditions that control the cooling rate regarded as the most important process parameter.

Key Words : Hot Press Forming (HPF), Boron Sheet, Cooling Rate, Tensile Strength, Hardness

1. 서 론

최근 차량 경량화 및 충돌 안정성을 만족시키기 위하여 알루미늄 합금강판, 마그네슘 합금강판 등의 신소재를 이용하거나, 하이드로포밍, 용접 블랭크 등의 신 성형기술을 이용하여 경량부품을 개발 및 제작하고 있다. 그러나 알루미늄 강판이나 마그네슘 합금강판등이 철강소재에 비하여 차체 중량을 줄이는데 효과는 있지만, 가격이 비싸고 성형성이 열악하여 실제 차체 제작에 적용 시 제한 사항이 많다.

철강소재를 이용한 차체의 경우에는 고장력 강판이 주로 이용되고 있다. 고장력 강판의 특징은

높은 강도를 가지며 상대적으로 연신율이 낮기 때문에 기존의 상온 스탬핑 공정으로는 부품을 성형하는데 한계가 있다. 이러한 낮은 성형성을 극복하기 위하여 핫스탬핑공법, 하이드로포밍, 냉간 프레스공정 등이 사용된다.

프레스공정에서 소재를 경화시키는 프레스경화공정은 보론강과 같이 경화능이 큰 재료의 판재를 고온상태로 가열 후 상온의 금형을 이용하여 성형하는 새로운 판재성형 방법으로써 1975년 스웨덴의 철강회사(SABB)에서 개발된 이후 유럽과 미국 등에서 응용된다.

핫프레스 공법은 보통 소재를 900°C 이상 가열한 후 프레스공정에서 냉각속도를 제어하여 마르

1. 부산대학교 기계공학부 대학원

2. 부산대학교 기계공학부

교신저자: 부산대학교 기계공학부, 정밀정형 및 금형가공 연구소(ERC/NSDM), E-mail: cgkang@pusan.ac.kr

텐사이트 조직을 얻는 공정이다. 이때 프레스공정에서 가열된 소재와 금형 사이의 열전달 현상에 의하여 냉각속도에 영향을 주는 인자가 결정된다. 가압공정에서 소재의 열전달 현상에 미치는 인자는 금형온도, 가압시간, 가압력, 냉각홀의 크기 및 위치 등이다. 900℃로 가열된 판재가 성형이 완료된 후 금형과 판재 사이의 열전달 계수는 펀치의 가압력과 가압시간에 크게 영향을 받는다.

Maclean[1] 등은 냉각속도의 변화에 따른 기계적 특성을 규명하여 냉각 속도가 20~30℃/sec일 때 베이나이트에서 마르텐사이트로 변화 된다고 보고하였으며 강도는 1440MPa 임을 제시하였다.

자동차 부품의 고강도 보론강의 적용연구에서 Lee[2]와 Lee[3]등은 보론강의 열처리 조건에 따른 기계적 특성을 파악하였고, Lee[4]와 Chae[5] 등은 마이크로 구조와 기계적 특성 사이의 관계를 규명하였다. Kim[6] 등은 열변형 거동의 유한해석과 실험적 연구를 수행하였다.

지금까지의 연구는 보론강판을 이용한 성형실험 및 공정해석과 구조해석 연구가 대부분이었지만 제품의 성형과정 중에서 냉각속도를 고려한 연구는 발표되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 핫스탬핑 성형에서 냉각속도에 따른 소재의 특성을 파악하기 위하여 냉각속도에 미치는 인자들 중 금형온도, 가압력, 가압유지시간 및 금형의 냉각 홀의 위치변화 등에 따른 조건에서 고온상태의 보론강판을 프레스성형을 실시하여 기계적 성질 및 미세조직을 관찰하였다. 강판의 기계적 성질에 미치는 영향을 파악하기 위하여 본 연구에서는 냉각속도와 관련이 있는 금형의 온도제어에 초점을 두었다.

금형의 온도변화는 금형내부에 존재하는 냉각홀의 위치가 크게 영향을 주며, 펀치 하중이나 가압시간에 따라 소재의 냉각속도가 달라 질 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 냉각홀의 위치, 펀치하중, 성형후 가압시간 및 금형온도가 성형후 소재의 기계적 특성에 미치는 영향을 파악하였으며, 핫프레스포밍 공정에서 효율적인 냉각속도제어를 검토할 수 있는 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 핫프레스 실험방법

2.1 핫프레스 공정개요

핫프레스는 강판을 900℃ 이상의 고온으로 가열

한 후 상온의 금형으로 성형함과 동시에 급냉하여 강도를 증가시켜 초고강도 부품을 제조하는 성형 방법으로, 성형성이 우수한 고온의 상태에서 성형이 이루어져 복잡한 형상의 부품을 성형할 수 있다. 성형 후 1500MPa 전후의 인장강도를 갖게 되므로 자동차 충돌부품에 사용이 급속히 증가하고 있으며, 차량 경량화와 동시에 점차 강화되는 충돌법규를 만족시킬 수 있는 가장 효과적인 기술로 크게 각광받고 있는 신기술이다.

Table 1 Comparison of the material properties between Press of UHSS(Ultra High Strength Steel) and Hot Press Forming of boron sheet

Type	Press of UHSS	Hot Press Forming of boron sheet
Strength (MPa)	780 ~ 980	1200~1500
Elongation	low	high
Springback	large	small
Weldability	poor	good

Table 1은 고장력강판과 보론강판을 각각 이용하여 프레스 성형과 핫프레스 성형에서 나타나는 강도와 스프링백 및 용접성을 비교하여 나타낸 것이다. 핫프레스 성형인 경우 공정은 Table 1에서 보여주는 바와 같이 강도가 매우 큼에도 불구하고 우수한 성형성, 용접성을 가지고 있다. 고장력강판의 경우는 연신률이 아주 작아 제품 형상에 큰 제약이 있으며, 특히 성형 후 스프링백에 의한 형상변화로 인하여 자동차부품간의 조립에 큰 문제가 있다. 고온 성형시 연신률이 일반연강 보다 뛰어나서 복잡한 형상의 제품 성형이 가능하며, 성형 후 스프링백이 거의 없어 정밀한 부품을 제작할 수 있기 때문에, Xing[7]와 Kim[8]등은 보론강판을 실제성형 후 스프링백에 대한 결과를 해석하는 연구를 수행하였다.

2.2 핫프레스공정의 실험장치

본 연구에서 사용한 핫프레스포밍 장비의 외관을 Fig. 1에 나타내었다. 프레스는 최대하중 200ton의 복동식 유압프레스를 사용하였으며, 금형과 펀치에는 냉각수 유입을 위해 냉각 홀을 설계하여 제작하였다.

(1)Die (2)Furnace
(3)Cooling system (4)Data logger
(5)Strainmeter (6)Load cell (20ton)

Fig. 1 The experiment apparatus of hot press forming system

Fig. 2 The position of cooling line in punch and die

Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 냉각수를 제어하기 위하여 유량제어 밸브가 부착되어 있다. Fig. 1의 (4)와 같이 금형과 소재의 온도변화는 다점온도측정기를 이용하여 금형온도를 측정하였다. 펀치하중은 20ton 로드셀을 이용하여 측정하였다.

금형의 온도 변화를 관찰하기 위하여 각 금형 표면으로부터 1.5mm 까지 열전대를 설치 하였고, 냉각 홀의 위치에 따른 열전달을 파악하기 위해 Fig. 2에서 보여주는 바와 같이 좌/우측의 홀 위치를 다르게 설계하여 제작하였으며, 냉각 홀은 직경 ϕ 10mm 길이 100mm의 동일한 크기를 제작하였다.

Fig. 2에서와 같이 금형의 좌측과 우측부분에서 냉각홀의 위치는 금형표면으로부터 15mm, 10mm 위치에 존재하도록 냉각홀이 가공되어있다. 그 이유는 일반적으로 자동차부품(범퍼, 센터필라)은 핫포밍을 할 때 냉각수의 위치는 금형표면으로부터 10~15mm 위치에 있다. 따라서 본 연구에서는 냉각홀의 위치가 소재의 냉각능력에 미치는 영향을 파악하기 위하여 냉각홀의 위치를 각각 다르게 하였다.

Fig. 3 Pressing force evolution from punch (water temperature: 20℃, die temperature: 20℃ holding time: 275s)

2.3 핫프레스 성형 실험조건

본 실험에 사용된 보론강관은 200×100mm의 두께 1.4mm를 사용하였으며, 강관이 전기로에서 완전 오스테나이트 조직을 가질 수 있도록 930℃에서 5분 동안 가열하였다. 냉각시 물의 온도는 상온을 유지하였다.

성형조건은 핫프레스 성형에서 가장 중요하게 여겨지는 냉각속도에 따른 성형품의 기계적 성질을 확인하기 위해 냉각유량이 일정할 때 펀치의 가압력(P), 금형온도(T_d), 가압유지시간(t_h)에 따른 제품의 미시적 조직관찰과 기계적 성질을 알아 보았다. 또한 펀치의 가압력, 금형온도, 가압시간 및 금형의 냉각홀의 위치와의 상호관계가 기계적 성질에 미치는 영향을 조사하였다.

3. 실험결과

3.1 펀치하중에 따른 성형결과

핫프레스 굽힘공정에서 판재의 변형이 끝난 후에는 펀치의 가압력에 의하여 냉각속도와 스프링백 등을 제어할 수 있다. 가압력이 0~40MPa에서 열전달율이 1,100~3,000W/m²K 정도로 알려져 있기 때문에 판재의 온도변화는 열전달계수에 민감하며, 소재의 조직이 오스테나이트에서 마르텐사이트로 변화는 중 스프링백의 억제에도 영향을 준다[9]. 따라서 본 연구에서는 펀치 가압력에 따른 기계적 성질 및 마이크로 조직사진을 관찰하였다.

Fig. 3은 900℃의 보론강관의 굽힘실험을 할 때 가압유지시간과 압력의 관계를 나타낸 것이다.

가압유지시간이 (0~25)초 사이에서는 하중이 없는 것으로 표현 되어있다. 이것은 펀치의 표면이

Fig. 4 The position of sample for tensile test

(a) Ultimate tensile strength

(b) Elongation

Fig. 5 Results of tensile test in formed boron sheet for each position by flow rate, (water temperature: 20℃, die temperature: 20℃ holding time: 275s)

소재에 접촉되기까지의 시간이며 25초 사이에 강판의 표면온도는 900℃에서 780℃까지 감소함을 알 수 있었다.

실제로 가압시 강판의 온도는 780℃이며 펀치가 소재에 접촉하는 순간부터는 급격히 성형하중이 증가함을 알 수 있었다. 성형이 완료된 이후부터는 최대 190kN, 100kN, 50kN로 하여 275초 동안 가압하였다.

Fig. 4는 성형후 시험편의 인장시험편 채취 위치

Fig. 6 The microstructures of formed boron sheet in hot press forming, (water temperature: 20℃, die temperature: 20℃ holding time: 275s, pressing force: 50kN, 100kN, 200kN)

와 조직조사를 하기 위한 위치를 각각 나타낸 것이다. 위치 A, D는 펀치와 금형이 접촉하는 측면 부위이며, 위치 B, C는 직접가압위치를 나타낸 것이다. Fig. 5는 $T_d=20^\circ\text{C}$, $t_h=275\text{s}$ 일 때 가압력의 변화에 따른 강도와 연신율을 나타낸 것이다.

가압력이 190kN일 때는 Fig. 4에서 보여주는 위치 B, C부분에서는 A, D부분보다 강도와 연신율이 높게 나타나고 있음을 Fig. 5에서 알 수 있다. 측면부분인 위치 A, D부분은 스트레칭 부분이므로 냉각속도의 지연으로 강도와 연신율이 저하된 것으로 생각된다. 금형표면으로부터 냉각홀의 위치가 10mm인 위치 C 부분에서 강도가 15mm인 위치 B부분보다 높게 나타남을 알 수 있다. 이 결과는 가압력과 냉각수 홀의 위치가 기계적 성질에 미치는 영향을 알 수 있다.

Fig. 6은 가압력의 변화에 따른 조직사진을 나타낸 것이다.

가압력이 190kN인 경우는 50, 100kN과 달리 침상형태의 마르텐사이트 조직이 관찰되었다. 가압력이 최소가 되는 50kN에서는 100, 190kN에 비하여 조대한 마르텐사이트 조직으로 되어있음을 관찰할 수 있다.

3.2 금형온도에 따른 성형결과

핫프레스 성형공정에서 금형의 온도제어는 가

Fig. 7 Variation of the blank temperature with respect to the initial die temperatures

Table 2 Cooling rate of each die temperature in blank

Die temperature(°C)	20	100	200	300
Cooling rate(°C/s)	200	53	10	4

Fig. 8 The microstructures of formed boron sheet from hot press forming(die temperature: 100°C, 200°C, 300°C, pressing force: 50kN, holding time: 275s)

장 중요한 변수이다. 금형의 온도는 판재의 냉각 속도에 크게 영향을 미치며 마르텐사이트 변태 속도에 크게 영향을 주기 때문에 본 연구에서는 금

Fig. 9 Elongation and the UTS of boron sheet for each position by die temperature(pressing force: 50kN, holding time: 275s)

형온도를 제어한 후 930°C까지 가열한 판재를 성형할 때 판재의 온도변화를 예측하였다. 판재의 온도변화를 예측하기 위하여 판재표면에 열전대를 부착하여 성형중 블랭크의 온도변화를 측정하였다.

Fig. 7은 금형온도에 따른 블랭크 온도변화를 측정한 것이다.

프레스 가압시 블랭크 온도에서 마르텐사이트 종료온도 230°C내외까지의 냉각속도를 Table 2에 나타내었다.

금형온도가 100°C 상승할 때마다 블랭크의 냉각속도가 2배정도 감소 하는 것을 Table 2에서 확인할 수 있다.

Fig. 8은 금형온도변화에 따른 조직을 관찰한 사진이다.

마르텐사이트 조직이라 할 수 있는 세지(lath)무늬가 온도의 상승에 따라 감소하는 것을 확인할 수 있다. 특히 금형온도가 300°C일 때의 조직과 경도는 현저히 떨어짐을 보였다.

Fig. 9는 금형온도에 따른 각 위치 별 인장강도, 연신율을 비교하여 나타낸 그래프이며 인장시험을 5회씩 실시하여 최대값과 최소값을 제외한 평균값을 나타내었다.

Fig.10 The microstructures of formed boron sheet in hot press forming, (die temperature: 300℃, pressing force: 50kN)

(a) $T_d = 20^\circ\text{C}$, $h_t = 275\text{sec}$

(b) $P = 50\text{kN}$, $T_d = 300^\circ\text{C}$

(c) $P = 50\text{kN}$, $h_t = 275\text{sec}$

Fig.11 Hardness of formed boron sheet by each pressing force, die temperature, holding time

금형온도가 20℃와 100℃일 때의 강도는 큰 차이가 없었으나, 금형의 온도가 200℃ 이상 상승하면 100MPa 이상의 강도차이가 나타남을 알 수 있다. 또한 직접가압 부분인 B, C 부분이 스트레칭 부분인 A, B 부분보다 강도가 높음을 알 수 있다.

3.3 가압유지시간에 따른 성형결과

핫프레스 성형에서 스프링백이 현저히 저감된다고 알려져 있다. 이러한 원인은 판재의 변형이 완성된 이후 일정한 하중으로 가압을 유지 함으로써 열전달의 촉진과 마르텐사이트 변태시간을 제어함으로써 열변형을 최소화 할 수 있다. 가압유지시간은 생산 사이클과도 밀접한 관계가 있기 때문에 산업현장에서는 가압유지시간의 변화에 따른 기계적 성질과 조직변화의 데이터를 필요로 하고 있다.

Fig. 10은 가압유지시간에 따른 미세조직사진을 Fig. 4에서의 소재 위치에 따라 나타내고 있다.

가압유지시간이 길어질수록 미세한 침상조직이 다수 관찰되고 있음을 알 수 있다. 위의 원인은 가압유지시간이 증가할수록 열전달이 촉진되어 냉각속도의 증가로 인한 현상에 기인한 것이다.

Fig. 11(a)~(c)는 가압력(P) 금형온도(T_d) 및 가압유지시간(h_t)의 변화에 따른 Fig. 4에서 보여주는 각 부위 별 경도를 나타낸 것이다.

Fig. 11(a)~(c)에서 보여주는 바와 같이 직접가압 위치 B, C에서의 경도 값이 간접가압위치 A, D보다 높음을 알 수 있다. 경도분포에 미치는 영향은 가압력 및 가압유지시간보다 금형온도에 민감함을 Fig. 11(a)~(c)로부터 알 수 있다.

4. 결 론

핫프레스 성형공정을 이용한 하이브리드 보론 강판의 강도 향상을 목적으로 고온상태의 강판을 이용하여 열간프레스 성형을 실시하여 성형조건에 따른 기계적 성질 및 미세조직변화를 관찰해 보았다.

(1) 성형시 펀치하중에 따른 인장강도의 변화는 나타나지 않았으며 연신율 또한 10% 내외로 일정함을 확인하였다. 하지만 하중을 직접 받는 가압부의 강도와 비 가압부의 강도변화를 확인할 수 있었다. 가압부의 최대인장강도 및 항복강도가

100MPa 이상 큼을 알 수 있다. 이는 가압부가 비가압부 보다 냉각라인과 가까운 지점에 있어 가압부의 냉각속도가 상대적으로 비가압부 보다 빠르기 때문에 마르텐사이트 조직이 증가 되었기 때문으로 이다.

(2) 금형의 온도가 100℃까지는 인장강도의 변화가 크게 나타나지 않았지만, 200℃ 이상일 때는 다소 감소함을 확인할 수 있었다. 경도변화는 100℃까지는 약간 감소하다가 200℃ 이상일 때는 조금 더 큰 감소량을 확인할 수 있었다. 이는 금형의 온도가 200℃이상 일 때부터 블랭크의 냉각 속도에 조금 더 많은 영향을 주었기 때문이다.

(3) 가압유지시간에 따른 경도 변화는 크게 나타나지 않았으나 가압유지시간이 275초일 때의 조직사진은 다소 차이가 나타났으며 약간의 경도가 감소함을 확인할 수 있었다. 이는 고온(300℃)에서 오랜 시간 가압하여 블랭크의 냉각속도가 감소했기 때문이다.

후 기

본 과제(연구)는 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략기술인력양성사업으로 수행된 결과이며 관계자 분들께 감사를 표합니다.

참 고 문 헌

- [1] S. H. Maclean, E. J. Pavlina, C. J. Van Tyne, 2008, Bending properties of boron sheet steel processed with variable cooling rates, Proc. 9th ICTP, Gyeongju, Korea, pp. 103~110.
- [2] J. H. Lee, D. S. Yoo, S. K. Park, 2003, A Study on Fatigue strength by hardenability of Boron Addition Steel”, J. Korea Society of Industrial Application, Vol. 6, No. 4, pp. 299~305.
- [3] D. H. Lee, T. J. Kim, J. D. Lim, H. J. Lim, 2009, Development of High Strength Steel Body by Hot Stamping, Transactions of Materials Processing, Vol. 18, No. 4, pp. 304~309.
- [4] J.S. Lee, M.S. Chae, C. D. Park, Y. S. Kim, 2007, Mechanical and microstructural characteristic of a high-strength boron-alloyed steel for hot press forming, Proc. Con. on KSME, pusan, korea, pp. 344~349.
- [5] M. S. Chae, G. D. LEE, Y. S. Suh, K. H. Lee, Y. S. Kim, 2009, Mechanical and Foriming Charateristics of High – Strength Boron – Alloyed Steel with Hot Forming, Transactions of Materials Processing, Vol. 18, No. 3, pp. 236~244.
- [6] H. S. Kim, M. H. Seo, S. J. Kim, S. C. Baik, W. J. Bang, H. R. Lee, 2009, Finite Element Analysis and Experimental Investigation on the Thermal Deforming Behavior of Steel Sheets during Press Hardening, J. Kor .Inst. Met. & Mater, Vol. 39, No. 9, pp. 1076~1083.
- [7] Z. W. Xing, J. Bao, Y. Y. Yang, 2009, Numerical simulation of hot stamping of quenchable boron steel, Materials Science and Engineering A , Vol.499, No.3, pp. 28~31.
- [8] B. G. Kim, I. S. Lee, Y. T. Keun, 2009, Study on the Springback Reduction of Automotive Advanced High Strength Steel Panel, Transactions of Materials Processing, Vol. 18, No.6, pp. 488~493.
- [9] M. Geiger, M. Merklein, J. Lechler, 2008, Determination of tribological conditions within hot stamping, prod. Eng. Res. Devel. Vol. 2, No. 3, pp. 269~276.