

핫스탬핑 공정에서 Quench Factor Analysis를 이용한 제품의 경도 예측

최재영¹ · 고대훈² · 서판기³ · 차승훈³ · 김병민[#]

Prediction of Hardness of Hot Stamped Parts Using the Quench Factor Analysis

J. Y. Choi, D. H. Ko, P. K. Seo, S. H. Cha, B. M. Kim

(Received July 10, 2014 / Revised July 29, 2014 / Accepted August 7, 2014)

Abstract

The purpose of the current study is to predict the hardness distribution in steel products after hot stamping using a quench factor analysis(QFA) coupled with FE-simulations. QFA is a method to predict properties such as hardness and tensile strength based on time-temperature-property(TTP) curves and can determine properties based on the temperature histories. The constants($K_1 \sim K_5$) of QFA were determined using hardness data obtained after various cooling rates. In the current study, a rear side member was selected for evaluation and FE-simulations were performed to obtain the temperature histories during hot stamping. The predicted temperature data were imported into the QFA to calculate the hardness distribution of the hot stamped parts. A hot stamping experiment of the rear side member was conducted to verify the predicted hardness. The simulation results show good agreement with the experimental measurements.

Key Words : Hardness, Quench Factor Analysis(QFA), Hot Stamping, Boron Steel, FE-simulation

1. 서 론

핫스탬핑(Hot stamping) 공정을 통해 제조된 제품은 차체 경량화와 충돌 성능 확보를 위해 차체 부품으로 널리 적용되고 있다. 핫스탬핑 공정은 가열로에 의해 약 900°C의 분위기 온도에서 완전 오스테나이트화된 소재를 금형으로 이송 후, 성형과 동시에 냉각하여 제품을 제조하는 기술이다. 금형에 의해 소재가 임계속도보다 빠르게 냉각될 경우, 소재 내부의 오스테나이트 조직이 대부분 마르텐사이트 조직으로 변태되어 1.5GPa 수준의 높은 인장강도를 가진다. 임계속도보다 느린 속도로 냉각되면 베

이나이트, 페라이트, 펄라이트 조직 형성과 함께 강도가 저하된다[1]. 즉, 핫스탬핑 제품의 기계적 물성은 냉각속도에 의한 소재의 미세조직에 따라 차이를 나타내므로, 기계적 물성을 정확하게 예측하는 기술은 핫스탬핑 공정 설계에 필수적이다.

핫스탬핑 공정에서 제품의 경도를 예측하기 위해 널리 사용되고 있는 예측모델은 Kirkaldy와 Venugopalan[2]에 의해 개발된 K-V 모델과 이를 수정한 Li의 모델[3] 및 A-O 모델[4] 등이 있다. 이 모델들은 상변태 속도론에 기초하여 미세조직의 상분율을 예측하고, 각각의 상이 가지는 고유 경도를 상분율에 근거하여 최종적인 제품의 경도를 계산한다.

1. 부산대학교 기계공학부

2. 부산대학교 부품소재산학협력연구소

3. ㈜신영 기술연구소

Corresponding Author : School of Mechanical Engineering, Pusan National University, E-mail: bmkim@pusan.ac.kr

하지만 경도 예측을 위해서 소재의 정확한 합금 조성이 요구되고, 경도 계산 시 냉각속도의 영향을 700°C 에서의 평균 냉각속도로 고려하기 때문에 예측오차를 유발할 수 있다. 반면에 Quench factor analysis(QFA)는 냉각곡선과 시간-온도-물성(Time-temperature-property; TTP) 곡선을 이용하여 제품의 물성을 예측하는 방법으로, 냉각곡선을 일정한 시간 간격으로 분할하여 각 분할구간에 대해 경화능을 고려하므로 다양한 온도이력에 대해 비교적 쉽게 물성을 예측할 수 있다. QFA 는 Evancho 와 Staley[5]에 의해 최초로 제안되었으며, 냉각곡선이 알루미늄 합금의 물성에 미치는 영향을 예측하기 위해 사용되었다. Kianezhad 와 Sajjadi[6], Zehtab Yazdi 등[7]과 Totten 등[8]은 QFA 를 강의 물성 예측에 적용하였으며, 예측 결과가 강에 대해서도 유효함을 입증하였다. 하지만 핫스탬핑 공정을 유한요소해석으로 구현하여 소재의 온도 이력을 해석적으로 확보하고, 이를 QFA 에 적용하여 경도를 예측한 사례는 현재까지 제시되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 핫스탬핑 공정에서 유한요소해석과 연계된 QFA 를 적용하여 최종 제품의 경도 분포를 예측하는 방법을 제시하고자 한다. 우선적으로 보론강(22MnB5)의 냉각속도에 따른 경도 데이터를 이용하여 QFA 의 재료상수($K_1 \sim K_5$)를 결정하였다. 핫스탬핑 실제품인 리어 사이드 멤버(Rear side member)에 대해 유한요소해석을 수행하여 제품의 온도 이력을 확보하였으며, 이를 QFA 에 적용하여 경도 분포를 예측하였다. 최종적으로 실제품에 대한 핫스탬핑 실험을 수행하고 제품의 측정경도와 QFA 로 예측한 경도를 비교하여 제시한 경도예측기법의 유효성을 평가하였다.

2. QFA 재료상수 결정

2.1 Quench factor analysis

QFA는 냉각곡선과 TTP 곡선을 통해 제품의 물성을 예측하는 방법으로, 주어진 냉각곡선에 대해 경화능을 나타내는 Quench factor(Q)를 정의한다. 상변태 및 경화 특성은 아래에 나타낸 C_T 함수(TTP diagram)에 의해 표현된다.

$$C_T = -K_1 \cdot K_2 \cdot \exp\left(\frac{K_3 \cdot K_4^2}{R \cdot T \cdot (K_4 - T)^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{K_5}{R \cdot T}\right) \quad (1)$$

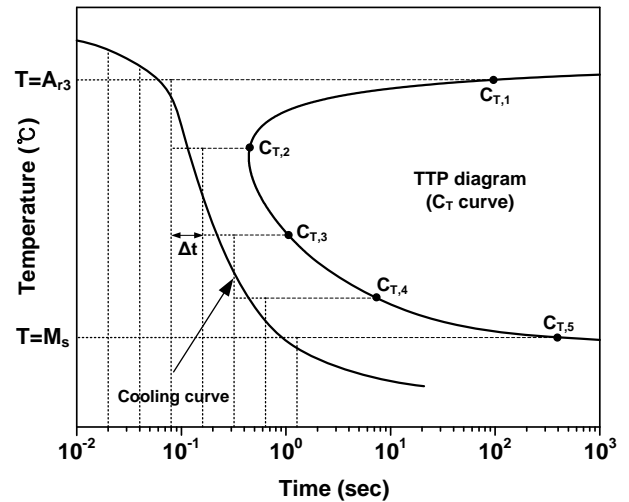


Fig. 1 Schematic illustration of method for calculating quench factor using cooling curve and TTP diagram

여기서 C_T 는 일정량(일반적으로 0.5%)의 페라이트, 펄라이트 및 베이나이트가 생성될 때까지 필요한 임계시간(Incubation time)이다. K_1 은 변태되지 않은 오스테나이트 상분율의 자연로그값(일반적으로 99.5%, $\ln(0.995)=-0.00501$)이며, K_2 는 핵생성 위치의 수와 관련된 상수, K_3 는 핵생성에 소요되는 에너지와 관련된 상수, K_4 는 용해(Solvus) 온도(A_{r3}), 그리고 K_5 는 확산에 필요한 활성화 에너지이다. R 은 기체상수(8.3143J/mol), T 는 냉각곡선에서 분할된 구간에 대한 각각의 평균온도이다.

분할된 각 구간에서의 경화능은 Quench factor 증분량(q)으로 표현된다. 이는 분할된 각 온도에서 임계시간(C_T)에 대한 Δt 의 비로 정의되며, 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$q = \frac{\Delta t}{C_T} \quad (2)$$

여기서 Δt 는 분할 구간에서의 시간 증분량이다.

Quench factor(Q)는 상변태 온도범위인 M_s 온도와 A_{r3} 온도 구간에서의 Quench factor 증분량(q)의 합으로 정의되며, 식 (3)과 같이 나타낸다.

$$Q = \sum q = \sum_{T=M_s}^{T=A_{r3}} \frac{\Delta t}{C_T} \quad (3)$$

Quench factor의 계산 방법을 Fig. 1에 도식적으로 나타내었다. Quench factor는 냉각곡선에 영향을

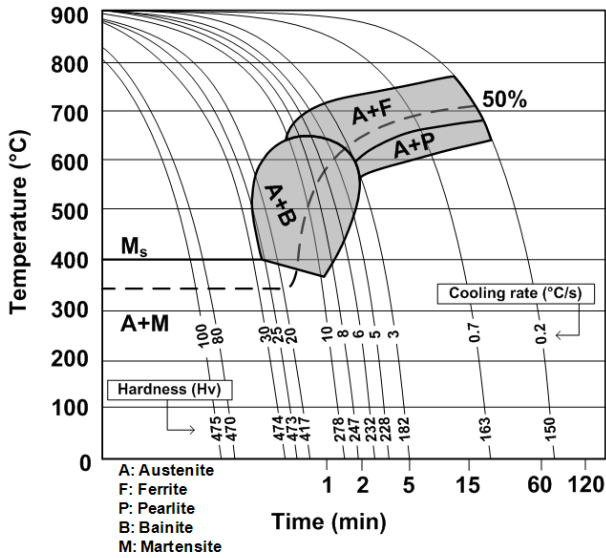


Fig. 2 Continuous cooling transformation diagram of boron steel and measured hardness according to various cooling rates[9, 10]

미치는 공정변수, 즉 소재두께, 금형온도 및 공정시간 등이 고려된 경화 특성을 나타낸다. 그리고 Quench factor와 기계적 물성 간의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_p = P_{min} + (P_{max} - P_{min}) \cdot \exp(K_1 \cdot Q) \quad (4)$$

여기서 P_p 는 예측되는 물성치로 경도 또는 인장강도 등이 해당된다. P_{max} 와 P_{min} 은 각각 최대 물성치 및 최소 물성치이다. 따라서 냉각속도가 높을수록 Quench factor가 낮은 값을 가지며, 이는 최대 물성치에 가까운 물성을 가지는 것을 의미한다.

2.2 재료상수 결정

식 (1)의 재료상수($K_1 \sim K_5$)를 결정하기 위해서는 재료의 다양한 냉각속도에 따라 측정된 경도값이 필요하며, 본 연구에서는 보론강에 대해 문헌 상에 제시된 결과를 활용하였다. Fig. 2는 보론강에 대한 연속 냉각 변태도(Continuous cooling transformation diagram) 및 냉각속도에 따른 경도를 나타낸 것이다 [9, 10].

QFA의 재료상수는 식 (1)과 Fig. 2에 나타낸 냉각속도에 따른 경도 결과를 Flexible polyhedron search(FPS) 기법에 적용하여 도출하였다. FPS 기법은 Nelder와 Mead가 제안한 비선형 최적화 기법

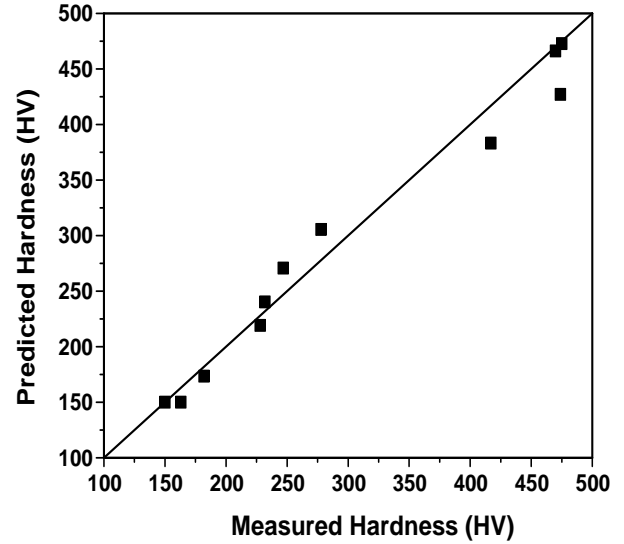


Fig. 3 Comparison of hardness between predicted and measured results for boron steel(22MnB5)

Table 1 Determined material constants of boron steel

Material constants	Values
K_1	-0.00501
K_2	0.0648
K_3	340.55 J/mol
K_4	1173 K
K_5	40,000 J/mol
P_{max}	500 Hv
P_{min}	150 Hv

으로, 수치해석적 접근을 통해 주어진 함수에서 두 가지 또는 세 가지 입력 변수들에 대한 최적값을 산출할 수 있다[11]. 본 연구에서는 FPS 기법을 MATLAB 2011b S/W를 활용하여 프로그래밍하였으며, 오차 범위가 10% 이내로 수렴할 때까지 반복적으로 계산하여 재료상수 K_2 와 K_3 를 산출하도록 하였다. 결정된 재료상수를 정리하여 Table 1에 나타내었으며, P_{max} 는 900°C로 가열된 소재를 수냉했을 때의 경도값, P_{min} 은 Fig. 2에서 가장 낮은 냉각속도에 해당하는 경도값이다. K_1 은 일반적으로 사용하는 고정값인 $\ln(0.995)=-0.00501$ 이며, K_5 는 Zehtab Yazdi 등[7]의 연구 결과를 인용하여 40,000J/mol 을 사용하였다.

3. 유한요소해석을 통한 제품 경도 예측

QFA를 이용하여 제품의 경도를 예측하기 위해 유한요소해석을 통해 핫스탬핑 공정 중 제품의 온도 이력을 확보하였다. 해석은 상용 프로그램인 JStamp/NV 2.5.5를 활용하여 수행하였고, 평가 제품은 리어 사이드 멤버로 선정하여 Fig. 4와 같이 해석 모델을 구성하였다. 블랭크(blank)의 길이는 1680mm, 최대폭은 400mm, 두께는 1.4mm이며, 쉘 요소(Shell element)로 모델링을 수행하였고, 메쉬(Mesh)의 크기는 5mm로 설정하였다. 핫스탬핑 공정에서 소재의 열적, 기계적 특성이 고려되어야 하므로, 구성방정식으로 식 (5)에 나타낸 Cowper-Symonds 모델을 적용하였다.

$$\sigma_{dyn} = \sigma_{stat} \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^p \right]^{\frac{1}{p}} \quad (5)$$

여기서 σ_{dyn} 은 동적 응력, σ_{stat} 은 준정적 응력, $\dot{\epsilon}$ 는 유효변형률속도이다. 그리고 C , p 는 재료상수이며, 실제 핫스탬핑 공정의 온도 범위를 고려하여 20°C 부터 900°C까지 문헌[12]을 참고하여 온도에 의존하는 함수로 입력하였다.

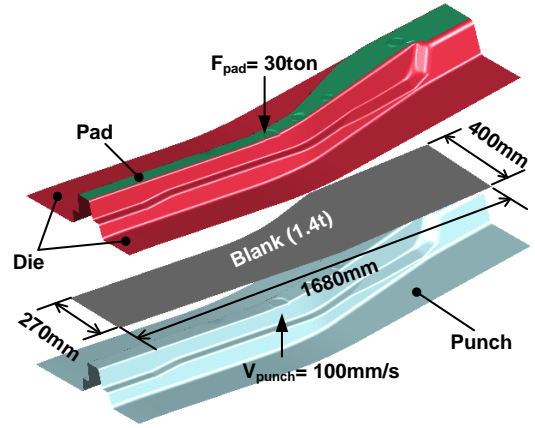


Fig. 4 FE-model for hot stamping of rear side member

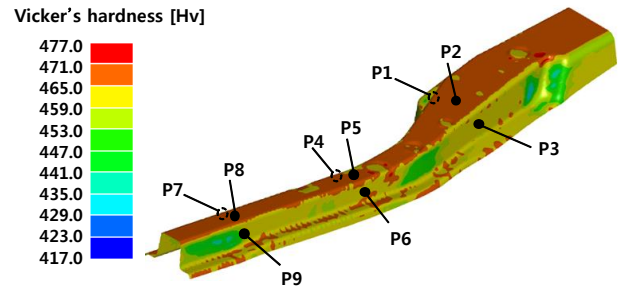


Fig. 5 Distribution of predicted hardness and selected evaluation points for rear side member

Table 2 The conditions of FE-simulation for hot stamping of rear side member

Conditions		Values
Blank	Thickness (mm)	1.4
	Initial temperature (°C)	900
	Young's modulus (GPa)	100
	Poisson's ratio	0.3
	Heat capacity (J/kg·K)	650
	Heat conductivity (W/m·K)	32
Tools	Initial temperature (°C)	150
	Punch speed (mm/s)	100
	Holding force of pad (ton)	30
Process time	Transfer stage	7.5 sec
	Holding stage	0.5 sec
	Forming stage	1 sec
	Quenching stage	20 sec

해석 조건들을 Table 2에 정리하여 나타내었으며, 유한요소해석은 실제 핫스탬핑 공정을 고려하여 이송(Transfer), 홀딩(Holding), 성형(Forming), 퀴칭(Quenching)의 4단계에 대해 수행하였다. 또한 각 단계별 소요시간은 실제 현장에서 적용하는 리어 사이드 멤버의 공정 조건을 반영하여 선정하였다. 이송 단계에서 블랭크는 상온의 대기에 의해 냉각되며 소재 표면에 대해 대류열전달계수의 값으로 $20W/m^2 \cdot K$ 를 적용하였다. 홀딩, 성형 및 퀴칭 단계에서는 추가적으로 금형과의 접촉에 의한 블랭크의 열손실이 발생하기 때문에, 금형과 블랭크 사이의 계면열전달계수를 Merklein 등[13]의 연구결과를 인용하여 접촉압력에 따른 함수로 고려하였다.

유한요소해석을 통해 확보한 온도 이력을 QFA에 적용하여 리어 사이드 멤버의 경도 분포를 예측하였으며, 이를 Fig. 5에 나타내었다. 패드(Pad)와 접촉하는 상부의 경도는 약 470Hv, 측벽부의 경도는 약 460Hv로 나타났다.

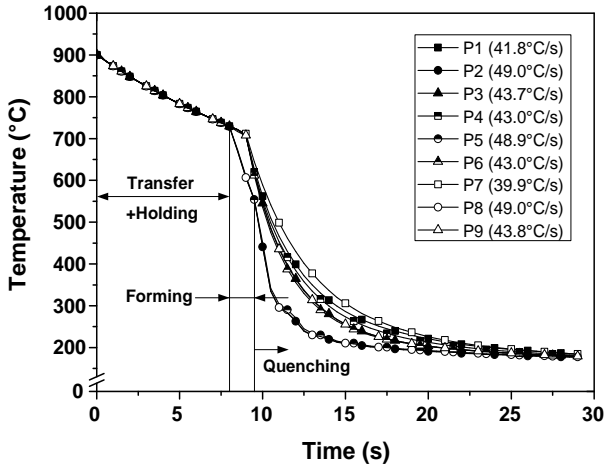


Fig. 6 Cooling curves of rear side member at predefined points

제품에 대해 총 9개의 평가지점(P1~P9)을 선정하여 각 지점에 대한 냉각곡선을 Fig. 6에 나타내었으며, QFA의 온도 고려 범위인 900°C부터 400°C까지의 평균 냉각속도를 함께 표시하였다. 상부의 평가지점(P2, P5, P8)에서 다른 지점보다 빠른 냉각 속도(약 49°C/s)를 보였으며, 이는 상부가 패드와의 접촉에 의해 먼저 냉각이 시작되고, 패드의 홀딩력(Holding force)에 의해 더 높은 접촉압력이 부여되기 때문이다.

4. 경도 예측결과의 검증

QFA로 예측된 경도의 유효성을 평가하기 위해 핫스탬핑 실험을 수행하였으며, Fig. 7에 실험에 사용된 장비 구성을 나타내었다. 리어 사이드 멤버 제조를 위한 금형은 펀치, 다이 및 패드로 구성되어 있으며, 600ton 용량의 유압 프레스 장비를 사용하였다. 펀치의 하강속도는 100mm/s이며, 패드에 작용하는 홀딩력은 유압에 의해 30ton이 부여되었다. 금형으로 이송된 소재의 위치 조절을 용이하게 하기 위해 3개의 가이드(Guide)를 설치하였다. 완전 오스테나이트화를 위해 블랭크는 900°C의 전기 가열로에서 6분간 가열되었으며, 가열된 블랭크를 수동으로 금형에 이송한 뒤 성형하였다.

핫스탬핑 실험을 통해 제조된 제품을 절단하여 경도 측정을 위해 Fig. 5에 나타난 평가지점에 대한 시편을 확보하였다. MXT-Alpha micro-hardness tester를 이용하여 0.5kgf의 시험 하중을 부여해 비커스 경도

(Vicker's hardness)를 측정하였으며, 각 평가지점에 대해 7회 측정하여 최대값과 최소값을 제외한 나머지 5회 측정값의 평균을 선정된 평가지점의 경도로 결정하였다.

측정된 경도를 QFA를 통해 예측된 경도와 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 제품 경도 비교 결과, 최대 오차가 5.85%로 나타남에 따라 예측된 경도가 매우 우수한 정밀도를 가지는 것으로 판단되었다. 따라서 본 연구에서 제시한 유한요소해석과 연계된 QFA의 핫스탬핑 경도예측기법에 대한 신뢰성을 확보할 수 있었다.

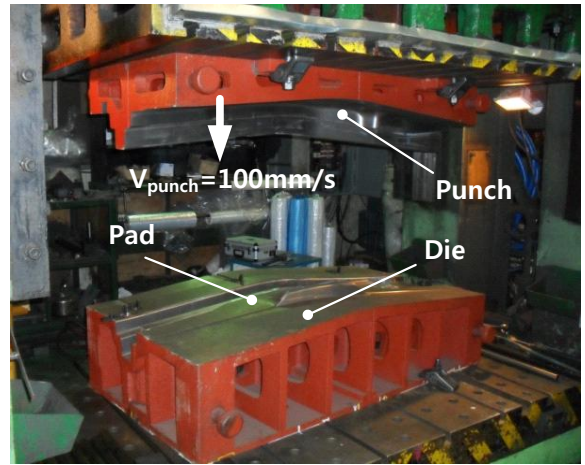


Fig. 7 Experimental setup for hot stamping test for rear side member

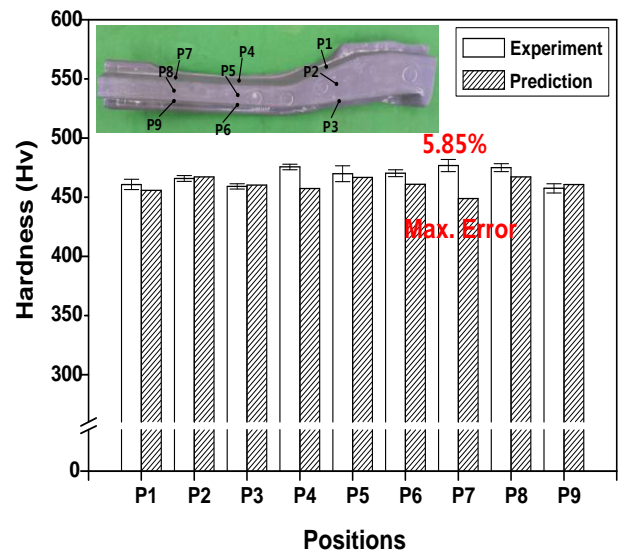


Fig. 8 Comparison between predicted and measured hardness for rear side member

5. 결 론

본 연구에서는 핫스탬핑 공정에서 제품의 경도를 유한요소해석과 연계된 QFA를 통해 예측하고, 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 냉각속도에 따른 경도 결과를 통해 보론강의 QFA 재료상수를 결정하고 유한요소해석과 연계하여 핫스탬핑 제품의 경도 분포를 예측하였다.

(2) 경도예측 결과, 제품 경도는 대부분 약 470Hv로 나타났으며, 측벽부에 다소 낮은 경도분포를 가지는 것으로 나타났다. 이는 측벽부에서 상대적으로 낮은 접촉압력에 의해 냉각속도가 저하되어 발생된 요인으로 판단된다.

(3) 핫스탬핑 실험을 수행하여 리어 사이드 멤버를 제작하였으며, 9개의 평가지점에 대해 경도를 측정하고 예측된 경도와 비교한 결과, 최대 오차가 5.85%로 매우 우수한 예측정밀도를 나타내었다.

(4) 본 연구에서 제시한 유한요소해석과 연계된 QFA를 통해 핫스탬핑 공정에서 정밀한 제품 경도에 측이 가능할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(미래창조과학부)의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2012R1A5A1048294).

REFERENCES

- [1] A. Bardelcik, C. P. Salisbury, S. Winkler, M. A. Wells, M. J. Worswick, 2010, Effect of Cooling Rate on the High Strain Rate Properties of Boron Steel, *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 37, No. 6, pp. 694~702.
- [2] J. S. Kirkaldy, D. Venugopalan, 1983, *Proc. Int. Conf. on Phase Transformations in Ferrous Alloys*(eds. A. R. Marder, J. I. Goldstein), Metall. Soc. AIME, Philadelphia, pp. 125~148.
- [3] M. V. Li, D. V. Niebuhr, L. L. Meekisho, D. G. Atteridge, 1998, A Computational Model for the Prediction of Steel Hardenability, *Metall. Mater. Trans. B*, Vol. 29, No. 3, pp. 661~672.
- [4] P. Åkerström, M. Oldenburg, 2006, Austenite Decomposition During Press Hardening of a Boron Steel-Computer Simulation and Test, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 174, No. 1-3, pp. 399~406.
- [5] J. W. Evancho, J. T. Staley, 1974, Kinetics of Precipitation in Aluminum Alloys During Continuous Cooling, *Metall. Trans. B*, Vol. 5, No. 1, pp. 43~47.
- [6] M. Kianezhad, S. A. Sajjadi, 2013, Improvement of Quench Factor Analysis in Phase and Hardness Prediction of a Quenched Steel, *Metall. Mater. Trans. A*, Vol. 44, No. 5, pp. 2053~2059.
- [7] A. Zehrab Yazdi, S. A. Sajjadi, S. M. Zebarjad, S. M. Moosavi Nezhad, 2008, Prediction of Hardness at Different Points of Jominy Specimen Using Quench Factor Analysis Method, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol.199, No. 1-3, pp. 124~129.
- [8] G. E. Totten, L. C. F. Canale, A. C. Canale, C. E. Bates, 2006, *Proc. 15th Int. Fed. Heat Treat. & Surf. Eng. Congr.*(eds. R. Schneider), Austrian Soc. Metall. Mater., Leoben, Austria, pp. 545~550.
- [9] M. Merklein, J. Lechler, 2006, Investigation of the Thermo-mechanical Properties of Hot Stamping Steels, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 177, No. 1-3, pp. 452~455.
- [10] T. Altan, A. E. Tekkaya, 2012, *Sheet Metal Forming-Processes and Applications*, ASM Int., Ohio, pp. 133~156.
- [11] D. M. Himmelblau, 1972, *Applied Nonlinear Programming*, McGraw-Hill, New York, pp.148~157.
- [12] A. B. Shapiro, 2009, *Using LS-Dyna for Hot Stamping*, 7th Eur. LS-Dyna Conf., Dynamore GmbH.
- [13] M. Merklein, J. Lechler, T. Stoehr, 2008, *Proc. 7th Int. Conf. THE Coat. Manuf. Eng.*(eds. K. D. Bouzakis, F. W. Bach, B. Denkena, M. Geiger), EEDM & Frounhofer PCCM, Aristoteles Univ., Thessaloniki, Greece, pp. 219~228.