

비도금 보론강판 산화층 평가용 시편의 퀴칭속도 예측기법 연구

이지호^{1,2} · 송정한¹ · 배기현^{1,#}

A Study on Quenching Speed Prediction Method of Specimen for Evaluating the Oxide Layer of Uncoated Boron Steel Sheet

J. H. Lee, J. H. Song, G. H. Bae

(Received December 07, 2021 / Revised December 28, 2021 / Accepted January 19, 2022)

Abstract

Hot stamping is widely used to manufacture structural parts to satisfy requirements of eco-friendly vehicles. Recently, hot forming technology using uncoated steel sheet is being studied to reduce cost and solve patent problems. In particular, research is focused on process technology capable of suppressing the generation of an oxide layer. To evaluate the oxide layer in the hot stamping process, Gleeble testing machine can be used to evaluate the oxide layer by controlling the temperature history and the atmosphere condition. At this time, since cooling by gas injection is impossible to protect the oxide layer on the surface of a specimen, research on a method for securing a quenching speed through natural cooling is required. This paper proposes a specimen shape design method to secure a target quenching speed through natural cooling when evaluating the oxide layer of an un-coated boron steel sheet by Gleeble test. For the evaluation of the oxide layer of the un-coated steel sheet through the Gleeble test, dog-bone and rectangular type specimens were used. In consideration of the hot stamping process, the temperature control conditions for the Gleeble test were set and the quenching speed according to the specimen shape design was measured. Finally, the quenching speed sensitivity according to shape parameter was analyzed through regression analysis. A quenching speed prediction equation was then constructed according to the shape of the specimen. The constructed quenching speed prediction equation can be used as a specimen design guideline to secure a target quenching speed when evaluating the oxide layer of an un-coated boron steel sheet by the Gleeble test.

Keywords: Gleeble Test, Hot Stamping, Un-coated Boron Steel Sheet, Quenching Speed, Regression Analysis

1. 서 론

최근 각종 연비 규제 및 환경 규제 등으로 친환경 경차 개발이 가속화되고 있다.[1] 친환경차의 고출력 배터리 탑재에 따른 주행거리 보상을 위하여 차체 경량화를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.[2] 이를 위하여 핫스탬핑 공법을 이용한 초고강도 부품 제조기술이 활발히 적용되고 있다.

핫스탬핑 공법은 920도 이상의 가열로에서 소재를 가열한 후 성형과 동시에 퀴칭하여 1.5GPa 이상

의 강도를 갖는 부품을 제작하는 공정이다. 핫스탬핑 부품은 고강도 특성에 의하여 두께 박육화가 가능하므로 친환경 차량의 경량화 및 고강성화를 동시에 만족시킬 수 있는 생산 방법 중 하나이다.[3-4] 핫스탬핑용 소재는 표면 산화 방지 및 내식성 확보를 위하여 Al-Si 등과 같은 코팅강판이 주로 사용되고 있다. 최근 원가절감을 목적으로 비도금 핫스탬핑 강판을 적용하기 위한 연구가 수행되고 있으며, 글리블 시험장비를 이용하여 정확한 온도이력 제어 및 분위기 제어조건 하에서의 산화층 평가가 가능하다. 하지만 산화층 발생량을 관찰하기 위해서는 가스 분사에 의한 퀴칭 속도 확보가 어려우나, 시편

1. 한국생산기술연구원 뿌리기술연구소, 수석연구원

2. 인하대학교 기계공학과, 석사과정

Corresponding Author : Korea Institute of Industrial Technology, Incheon Regional Division, E-mail: baegh@kitech.re.kr

ORCID : 0000-0002-0015-4742

형상을 적절히 설계함으로써 마르텐사이트 생성에 필요한 쿨링 속도 확보가 가능하다. 따라서 정확한 쿨링 속도 조건 하에서의 산화층 발생량 평가를 위한 시편형상 설계 방법에 관한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 글리블 시험을 이용한 비도금 보론강의 핫스탬핑 산화층 발생량 평가를 위하여 시편 형상에 따른 쿨링 속도 예측식을 구성하였다. 글리블용 판재 인장시편에 대하여 핫스탬핑 온도이력에 따른 22MnB5 소재의 가열-냉각 시험을 수행하여 쿨링 속도 측정 방법을 제시한다. 도그본 시편과 사각시편의 형상에 따른 실험조건을 수립하였으며, 가열-냉각시험 수행을 통하여 쿨링 속도를 측정한다. 쿨링 속도 측정 결과를 바탕으로 시편 형상변수에 따른 민감도를 분석하고, 회귀분석을 통하여 시편 형상에 따른 쿨링 속도 예측식을 구성한다.

2. 글리블 산화층 평가

본 연구에서는 비도금 22MnB5 1.5t 소재를 이용하여 실험을 진행하였으며, 화학 조성을 Table 1에 표기하였다. 핫스탬핑 공정의 온도이력을 모사하기 위해 Fig. 1과 같이 Gleeble 3500 System을 이용하였다. 초기 쿨링 속도 평가를 위하여 Dynamic Systems사에서 추천하는 글리블 시험용 판재 표준시편을 사용하였으며, 시편 형상을 Fig. 2에 도시하였다.[1] 이때 시편의 중심에 열전대를 용접하여 온도측정하였다.

핫스탬핑 온도이력을 고려하여 Fig. 3과 같이 글리블 시험의 온도제어 조건을 결정하였다. 산화층 탈락을 방지하기 위하여 자연 냉각에 의한 쿨링을 수행하였다. 시편 내 온도구배를 최소화하기 위하여 SUS 재질의 그립을 사용하였다.

시험의 재연성을 고려한 3번의 실험을 진행 하였고 온도이력을 Fig. 4에 측정된 쿨링 속도를 Table 2에 도시하였다. 이때 프레스 성형 시작 온도와 마르텐사이트 생성 온도를 고려하여 800 °C ~ 400 °C 사이의 평균 쿨링 속도를 측정하였다. 쿨링 속도 측정결과로는 -12.45 °C/s ~ -12.57 °C/s 수준으로 마르텐사이트 생성을 위한 쿨링 속도가 약 -50 °C/s 수준임을 감안하면 쿨링 속도가 매우 낮은 상황이다. 쿨링 속도가 낮은 이유는 [5~8]의 실험들은 Argon, Air 등 압축 기체 분사를 통해 쿨링을 진행하였지만 본 연구에서는 비도금 소재의 산화층 보호를 위하여 자연냉각 방식으로 쿨링을 진행하였기 때문이다. 이와 같이

비도금 강판의 마르텐사이트 생성을 위한 쿨링 속도를 확보함과 동시에 쿨링 속도에 따른 산화층 발생 분석을 위해서는 목표 쿨링 속도 조건을 부가할 수 있는 시편 설계 기준 확보가 필요하다.

Table 1 Chemical compositions of 22MnB5(unit :Wt%)

| C | Mn | Ti | Nb | Al | Si | P | S | B |
|------|------|-------|------|-------|------|-------|-------|-------|
| 0.24 | 1.14 | 0.036 | 0.17 | 0.004 | 0.27 | 0.015 | 0.001 | 0.003 |



Fig. 1 Gleeble 3500 System

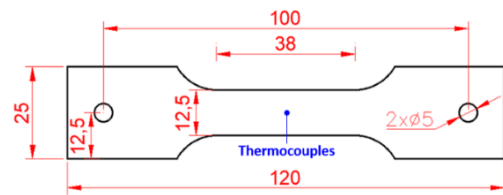


Fig. 2 Specimen shape for the sheet metal tensile test

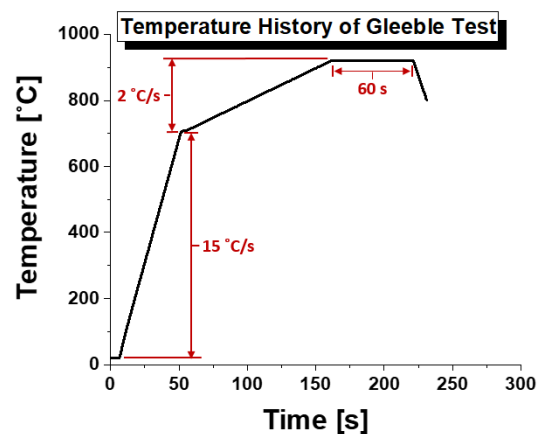


Fig. 3 Imposed temperature history for the Gleeble test based on the hot stamping process

3. 시편 형상에 따른 쿨링 속도 측정

본 연구에서는 일반적인 도그본 인장시편 외에도 추가적으로 사각타입 시편에 대한 쿨링 속도 분석을 수행하였다. 인장조건이 부가된 상태에서의 산화

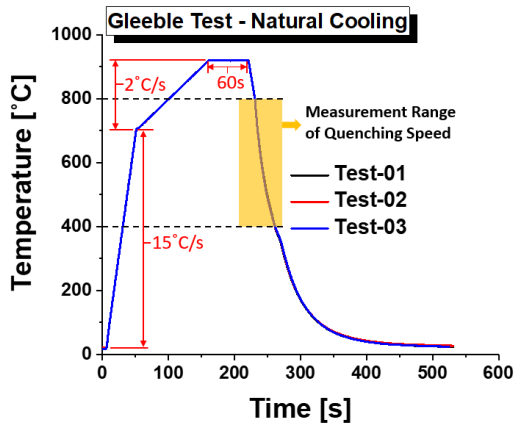


Fig. 4 Temperature history of dog-bone type specimen

Table 2 Quenching speed of dog-bone type specimen under the natural quenching condition

| Test No. | Quenching Speed [$^{\circ}\text{C/s}$] |
|----------|--|
| 1 | 12.5 |
| 2 | 12.6 |
| 3 | 12.5 |

층 평가를 위해서는 도그본 시편이 필요하지만, 온도이력에 따른 단순 산화층 평가 시에는 사각타입 시편을 사용해도 무방할 것이다. Fig. 5는 두 가지 타입의 시편 형상 및 치수를 보여준다. 시편 형상을 고려하여 도그본 시편에서 L , W_1 , W_2 의 3가지 설계변수를 선정하였으며, 사각타입 시편은 L , W 의 두 가지 설계변수를 선정하였다. 설계변수에 따른 퀴칭속도 평가를 위하여 Table 3, 4과 같이 각각 7개, 9개의 시편형상을 제안하였으며, Fig. 6에 가공된 시편을 제시하였다. Fig. 3에서 제시한 것과 동일한 온도이력에 조건에서 시험을 수행하였으며, 측정된 퀴칭 속

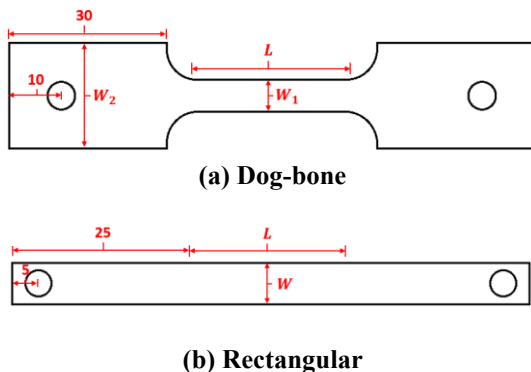
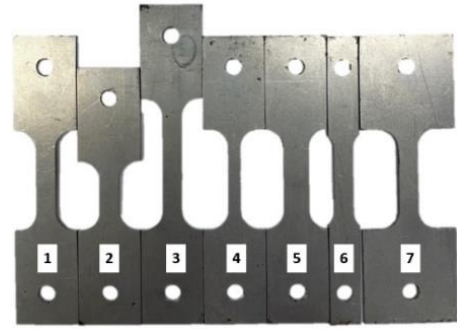
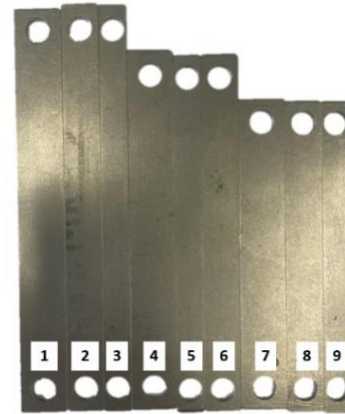


Fig. 5 Parameters for the specimen shape design

도를 Table 4에 제시하였다. 도그본 시편과 사각시편은 각각 $-30.6^{\circ}\text{C/s} \sim 84.0^{\circ}\text{C/s}$, $-33.7^{\circ}\text{C/s} \sim -70.0^{\circ}\text{C/s}$ 의 퀴칭속도 범위로 측정되었으며, 설계범위 내에서 마르텐사이트 생성을 위한 퀴칭속도 획득이 가능한 것으로 판단된다.



(a) Dog-bone



(b) Rectangular

Fig. 6 Specimens for the oxide layer evaluation of the uncoated boron steel sheet

Table 3 Quenching speed measurement according to the design parameter of dog-bone type specimen

| No. | L [mm] | W_1 [mm] | W_2 [mm] | Quenching Speed [$^{\circ}\text{C/s}$] |
|-----|----------|------------|------------|--|
| 1 | 20 | 6 | 20 | 47.5 |
| 2 | 10 | 6 | 20 | 84.0 |
| 3 | 30 | 6 | 20 | 30.6 |
| 4 | 20 | 4 | 20 | 53.0 |
| 5 | 20 | 8 | 20 | 45.0 |
| 6 | 20 | 6 | 30 | 43.7 |
| 7 | 20 | 6 | 10 | 46.8 |

Table 4 Quenching speed measurement according to the design parameter of rectangular type specimen

| No. | L [mm] | W [mm] | Quenching Speed [°C/s] |
|-----|--------|--------|------------------------|
| 1 | 38 | 10 | 33.7 |
| 2 | 38 | 8 | 34.9 |
| 3 | 38 | 6 | 35.9 |
| 4 | 28 | 10 | 56.2 |
| 5 | 28 | 8 | 56.7 |
| 6 | 28 | 6 | 57.9 |
| 7 | 18 | 10 | 70.0 |
| 8 | 18 | 8 | 70.1 |
| 9 | 18 | 6 | 70.0 |

4. 켄칭 속도 예측식 구성

시편형상 설계변수에 따른 켄칭 속도 민감도 분석 및 예측식 구성을 위하여 회귀분석을 수행하였다. 회귀분석은 Minitab17 프로그램을 이용하였으며, 2차 회귀식으로 결과를 근사하였다. 도그본 시편과 사각 시편의 민감도 분석 결과를 Fig. 7에 제시하였다. 두 가지 시편 형상 모두 설계범위 내에서는 게이지부 길이가 주요 인자임을 확인할 수 있으며, 시편 폭에 따른 켄칭 속도 변화는 크지 않은 것을 확인하였다.

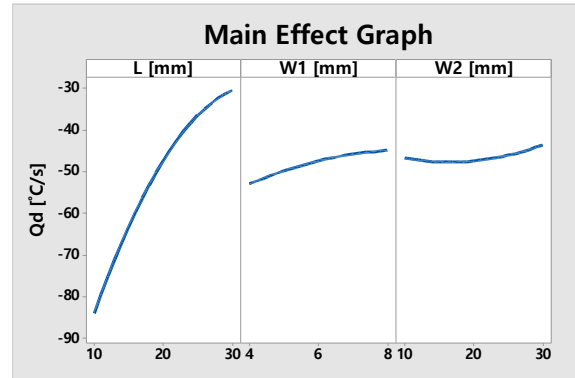
따라서 글리블 시험 수행을 위한 적정 시편폭을 설정한 후 게이지부 길이를 조절하여 목표 켄칭 속도를 확보하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

두 가지 시편의 켄칭 속도 예측을 위하여 구성한 2차 회귀식은 아래와 같다.

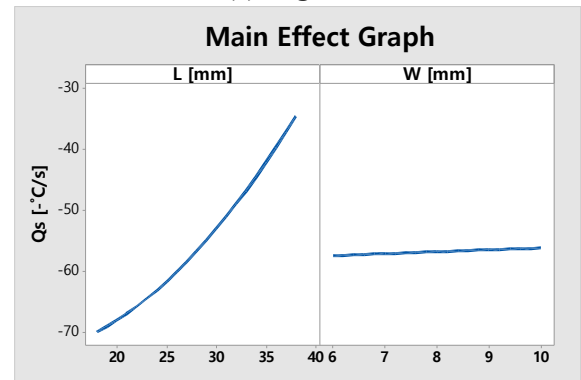
$$Q_d = -159.7 + 6.590L + 6.500W_1 - 0.745W_2 - 0.098L^2 - 0.375W_1^2 + 0.0225W_2^2 \quad (1)$$

$$Q_s = -68.14 - 0.980L - 0.245W + 0.045L^2 - 0.0125W^2 + 0.0275L \cdot W \quad (2)$$

이때 Q_d, Q_s 는 각각 도그본 시편과 사각시편의 켄칭 속도를 의미하며, R-제곱 값은 각각 99.83%, 99.98%로 매우 우수한 근사성을 보이는 것을 확인할 수 있다. 회귀식을 이용하여 시편형상 설계변수 변화에 따른 켄칭 속도 맵을 Fig. 8에 도시하였다. 이때 도그본 시편의 W_2 인자의 영향도가 매우 낮으며



(a) Dog-bone

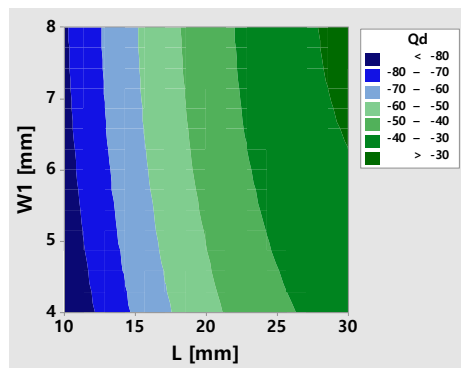


(b) Rectangular

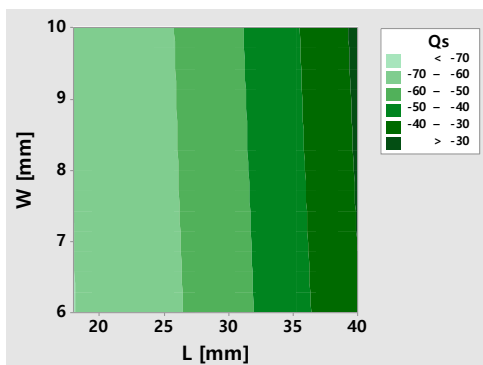
Fig. 7 Sensitivity analysis result according to the specimen shape parameters

로 맵 작성에서 제외하였다. Fig. 8을 통해서도 민감도 분석에서와 동일하게 게이지부 길이에 따른 켄칭 속도의 영향도가 매우 높은 것을 확인할 수 있으며, 게이지부 길이가 증가할수록 게이지부 폭의 영향도가 증가하는 경향을 확인할 수 있다.

켄칭 속도 예측식의 정확도를 검증하기 위하여 도그본 시편과 사각시편에서 각각 -70°C/s 와 -60°C/s 의 켄칭 속도 확보가 가능한 2가지 설계안을 제안하였으며, 설계안에 따라 준비한 시편을 사용하여 검증 시험을 수행하였다. Table 5, 6은 도그본 시편과 사각 시편에 대하여 회귀식을 통한 켄칭속도 예측 결과와 글리블 시험을 통한 켄칭속도 측정 결과를 비교한 것이다. 도그본 시편과 사각시편의 켄칭 속도 오차의 평균은 각각 0.6%, 0.8%로 예측성능이 매우 우수함을 확인할 수 있다. 따라서 구성된 예측식은 목표 켄칭 속도 조건 확보를 위한 산화층 평가용 시편 설계 기준으로 활용 가능할 것으로 판단된다.



(a) Dog-bone



(b) Rectangular

Fig. 8 Sensitivity analysis result according to the specimen shape parameter

Table 5 Verification of the quenching speed prediction equation for the dog-bone type specimen

| No. | L [mm] | W ₁ [mm] | W ₂ [mm] | Predicted Quenching Speed [°-C/s] | Tested Quenching Speed [°-C/s] |
|-----|--------|---------------------|---------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 13 | 6 | 20 | 70.99 | 70.49 |
| 2 | 14 | 4 | 20 | 72.55 | 72.18 |

Table 6 Verification of the quenching speed prediction equation for the rectangular type specimen

| No. | L [mm] | W [mm] | Predicted Quenching Speed [°-C/s] | Tested Quenching Speed [°-C/s] |
|-----|--------|--------|-----------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 75 | 8 | 60.18 | 60.78 |
| 2 | 75 | 6 | 60.48 | 60.83 |

4. 결론

본 논문에서는 비도금 22MnB5 소재의 핫스탬핑 시 형상 변수에 따른 쿨링 속도 예측식을 구성하였다. 시편 형상인자의 민감도 분석을 통하여 게이지 부 길이가 주요 영향인자임을 확인하였으며, 예측식을 이용하여 시편형상을 설계할 경우 자연냉각 방식을 통하여 목표 쿨링 속도 확보가 가능함을 확인하였다. 따라서 구성된 예측식은 비도금 핫스탬핑 강판의 쿨링 속도 제어에 따른 산화층 평가를 위한 시편 설계 가이드라인으로 활용 가능할 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 한국생산기술연구원 기관주요사업 “Add-on 모듈 탑재를 통한 지능형 뿌리공정 기술개발(KITECH EO-21-0009)”와 “친환경차용 비도금 초고강도강판 열간 프레스 성형 및 부품화 기술 개발”의 지원으로 수행한 연구입니다.

REFERENCES

- [1] S. W. Nam, G. H. Bae, 2021, Study on the Cold Stamping Process Design Method of 1.5GPa Grade Front Side Rear Lower Member, Trans. Mater. Process. Vol. 30.5, pp. 236-241. <https://doi.org/10.5228/KSTP.2021.30.5.236>
- [2] S.H. Kim, N. Park, J.H. Song, W. Noh, K.Y. Park, G. Bae, 2020, Parametric Study of Steel-Al Alloy SPR Joint Process via Finite Element Analysis, Trans. Mater. Process. Vol. 29.6, pp. 301-306. <https://doi.org/10.5228/KSTP.2020.29.6.301>
- [3] H. Karbasian, A.E. Tekkaya, 2010, A review on hot stamping, J. Mater. Process. Technol. Vol. 210.15, pp. 2103-2118. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.07.019>
- [4] Zhong-xiang Gui, Wei-kang Liang, Yong Liu, Yi-sheng Zhang, 2014, Thermo-mechanical behavior of the Al-Si alloy coated hot stamping boron steel, Mater. Des. Vol. 60, pp. 26-33. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.03.011>

- [5] G. Venturato, S. Bruschi, A. Ghiotti, X. Chen, 2019, Numerical modeling of the 22MnB5 formability at high temperature, *Procedia Manuf.* Vol. 29, pp. 428-434.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.158>
- [6] R. Zhang, Z. Shao, J. Lin, T.A. Dean, 2020, Measurement and Analysis of Heterogeneous Strain Fields in Uniaxial Tensile Tests for Boron Steel Under Hot Stamping Conditions. *Exp Mech.* Vol. 60, pp.1289–1300
<https://doi.org/10.1007/s11340-020-00658-6>
- [7] Y. Li, S. Li, Y. Chen, G. Han, 2019, Constitutive parameters identification based on DIC assisted thermo-mechanical tensile test for hot stamping of boron steel, *J. Mater. Process. Technol.* Vol. 271, pp. 429-443
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.04.020>.
- [8] M. Ganapathy, N. Li, J. Lin, M. Abspoel, D. Bhattacharjee, 2018, A Novel Grip Design for High-Accuracy Thermo-Mechanical Tensile Testing of Boron Steel under Hot Stamping Conditions. *Exp. Mech.* Vol. 58, pp. 243–258.
<https://doi.org/10.1007/s11340-017-0333-8>Metec 2015