

열간 기계적 피어싱을 이용한 핫스탬핑 전단특성 연구

박계정¹· 박재명¹· 공제열²· 김지영²· 윤승채^{2,*}· 현주식²· 정유동³

Study on the Shear Characteristics by using the Hot Mechanical Piercing during the Hot Stamping Process

K. J. Park, J. M. Park, J. Y. Kong, J. Y. Kim, S. C. Yoon, J. S. Hyun, Y. D. Jung

(Received March 6, 2023 / Revised March 17, 2023 / Accepted March 22, 2023)

Abstract

The hot stamping process is widely used for high strength of vehicle parts, with heating 900 °C or higher in a furnace and in-die quenching to achieve strength above 1.5 GPa of the quenchable boron alloyed steel 22MnB5. First of all, the hot stamping process consisted of heating, forming, quenching and trimming. In the trimming process case, the laser method has been conventionally adopted. For laser trimming process, it has the problems pertaining to low productivity and high cost while the hot stamping process, accordingly the trimming process need to investigate the research for alternative method. In order to overcome these issues, many research groups have studied the mechanical trim solution on the hot stamped parts at high temperature. In this study, the mechanical piercing was performed during the hot stamping process at the high temperature for overcome the disadvantages of laser cutting. Also, the process parameters such as piercing time after die closing, clearances of between die and punch were controlled for obtaining the reasonable shear characteristics.

Keywords: 22MnB5, Hot stamping, Hot mechanical piercing, Shear characteristics

1. 서 론

최근 연비 규제와 강화된 환경 이슈로 인한 수송 모빌리티 분야의 변화가 급속히 이루어지고 있다. 이와 관련된 차체 고강도화 기술은 차량의 무게를 절감하는 동시에 충돌 안전 성능을 확보할 수 있는 새로운 솔루션으로 활용되고 있으며, 이를 충족시킬 만한 중요한 역할로 기대되고 있다. 이러한 고강도 경량화 변화에 합리적인 대응을 위해 핫스탬핑 (Hot Stamping) 기술이 적용되고 있으며, 우수한 성형성과 고강도 특성을 동시에 확보할 있는 큰 장점을 가지

고 있다. 핫스탬핑 기술은 약 500 MPa 정도의 강도를 가지는 보론강판을 약 900 °C 이상의 온도로 가열하여 Ac3 이상에서 오스테나이트(Austenite) 상변태를 유도하고 급형 내 성형 및 급속 냉각을 통해 1.5 GPa 급 고강도의 복잡한 형상의 부품을 제조할 수 있는 경량화 기술이다. 이러한 핫스탬핑 기술은 차체의 구조부재 부품을 중심으로 적용되고 있으며 [1-3], 이런 추세는 점점 증대되고 있을 뿐만 아니라 친환경차로의 전환에 따라 더욱 그러하다.

세부적인 핫스탬핑 공정은 블랭크 소재의 가열 (Heating), 성형 (Stamping) 및 급형 냉각 (Quenching) 그리고 불필요한 제품 외 영역을 절단하는 트림 (Trimming) 공정으로 이루어져 있으며, 이러한 공정을 통해 최종 부품의 기계적 물성 및 성능을 확보할 수 있다. 핫스탬핑이 적용된 제품은 높은 고강도 특성으로 인해 통상적으로 레이저 에너지를 사용

1. 현대제철연구소 자동차응용기술팀, 전임연구원
2. 현대제철연구소 자동차응용기술팀, 책임연구원
3. 현대제철연구소 제품개발센터, 상무

* Corresponding Author: Senior Research Engineer, Hyundai Steel R&D Center, Automotive Steel Application Engineering Team,
E-mail: scyoon@hyundai-steel.com
ORCID: 0000-0002-2027-3757

하여 트림을 적용하고 있으나, 이러한 레이저를 활용한 핫스탬핑 제품의 트림은 생산성이 낮고, 에너지 비용과 탄소배출량이 큰 단점을 가지고 있다. 이러한 이슈로 인해 핫스탬핑 적용 부품에 대해 기계식 전단 가공에 대한 연구가 이루어지고 있다[4-9].

기계식 트림 공정은 레이저 트림에 비해, 생산성이 높고 에너지 비용이 낮은 장점을 가지고 있지만, 높은 고강도 제품의 트림으로 인해 가공 금형의 수명 저감 및 제품에 버(Burr) 발생으로 차체 부품의 품질을 저하시키는 문제가 야기될 수도 있다. 차체 고강도-경량화 제품을 위해 핫스탬핑 제조 비용을 낮추고 에너지 효율을 높일 수 있는 트림 공정에 대한 연구가 지속적으로 이루어질 필요가 있다. 더 나아가 기술적 한계를 극복하고 제품의 성능을 확보하기 위해 핫스탬핑 고온 성형 중에 금형 내에서 전단 가공을 적용하는 열간 전단 기술에 대한 연구가 선행될 필요가 있다.

Mori 등은 국소부위에 저항 가열을 사용하여 홀 가공을 함으로써, 온간 및 열간 전단 공정에 대한 특성을 분석하였고[4,5], Choi 등은 핫스탬핑 공정에서 열간 성형 시 트림 부위를 일부 절단하고, 냉각 이후 별도의 트림 공정을 적용하는 다단 트림 공정을 연구하였다. 또한 전단 가공 부위의 국부적인 연화를 통해 전단 하중을 감소시키고 금형 수명 향상을 추구하는 연구도 수행하였다[6,7]. Jeon 등은 핫스탬핑 공정 중 금형 내에서 고온 전단공정을 적용함과 더불어 금형 패드의 유무, 성형 속도, 그리고 펀치 형상 등을 다양한 공정 변수로 수립하여 이에 따른 전단면 특성을 분석하였다[8,9]. 이와 같이 전단 공정 분석 및 에너지 효율을 높이기 위한 핫스탬핑 고온 전단 기술에 대한 모사 연구가 진행되고 있다[10-12].

핫스탬핑 공정이 적용된 제품의 성능은 공정 경로 의존적인 특성을 나타내기 때문에 소재 특성과 동반된 공정 조건을 고려한 특성 평가가 반드시 선행되어야 하며, 이를 통해 공정 조건과 제품 특성의 통합적 연구가 필요하다[13-15]. 이에 본 연구에서는 핫스탬핑 공정에서 마르텐사이트(Martensite) 조직을 얻기 위한 금형 내 급속 냉각을 모사할 수 있는 공정 조건 하에서의 고온 전단에 대한 연구를 수행하고자 하였다. 핫스탬핑 양산 공정을 모사할 수 있게 장치를 구성하였으며, 전단 가공에 영향을 줄 수 있는 금형 단합 후 전단 시점(delay time)과 금형(die)과

Table 1 Chemical components of 22MnB5

Material	Components (wt %)							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	B
22MnB5	0.23	0.25	1.2	0.015	0.002	0.2	0.03	0.003

펀치(punch)의 사이의 클리어런스(clearance)를 주요 인자로 설정하여 고온 전단 특성을 분석하였다.

2. 실험 방법

자동차 차체구조 부재 고강도를 위해 핫스탬핑 공정에 많이 사용되는 있는 22MnB5 소재를 사용하였으며, 주요 성분은 Table 1 과 같다. 핫스탬핑 고온 성형 중 전단 특성을 실제 양산과 유사하게 모사하기 위해 약 1000 톤 용량을 가지는 서보 프레스를 활용하여 성형 조건을 구현하고자 하였다. 본 연구에 사용된 금형 재질은 핫스탬핑 양산 금형에 사용하는 있는 DAC-P 재질인데, 통상 45~48 HRC 값을 가지는 열간용 금형강이다. Fig. 1 에서 보는 바와 같이, 금형 중 전단 가공을 할 수 있도록 금형과 별도의 유압 장비를 구비하여 금형 내 급속 냉각 중 홀(hole) 전단을 모사할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 여러 전단 특성 중 홀 가공과 관련된 영역에 한정하여 연구를 수행하고자 하였다. 사용된 홀 펀치는 내구수명을 높이기 위해 TiN 코팅을 적용하였으며, 전체적인 금형 구조는 Fig. 2 와 같이 구성하였다. 금형 내의 접촉 센서를 적용하여 상부 금형이 하부 금형에 도달하는 시점을 계측하고, 금형이 완전히 닫힌 순간(하사점)부터 0.1 초 단위로 지연시간을 설정하여 약 1.2 m/s 의 속도로 홀 전단가공이 이루어지도록 금형 구성 및 유압 조건을 설계하였다.

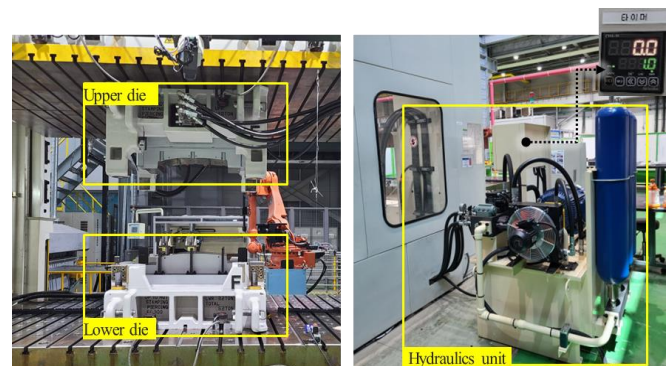


Fig. 1 Hot mechanical piercing tool and hydraulic unit

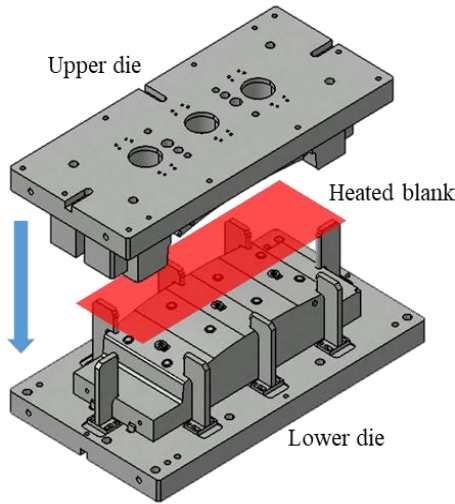


Fig. 2 Hot mechanical piercing tool structure

구성된 유압 장치의 최대 전단력은 약 190,000 kgf에 해당하며, 유압 용량은 약 400 L 수준이다. 이는 1.5 GPa 급 소재를 가공하는 것에 충분한 용량으로 설계하였다. 금형의 구조적 설계를 통해 전단 가공이 되는 것과 달리, 유압 장치를 활용하여 홀 가공을 별도로 제어할수록 설계하여 전단 시점을 자유롭게 조절할 수 있도록 하였다. 핫스탬핑 소재를 950 °C로 300 초를 가열하여 약 13 초 이송 후 금형 냉각과 동시에 홀 전단을 적용할 수 있는 핫스탬핑 열간 피어싱 기술을 수행하였으며, 이때 사용된 소재의 두께는 1.2 mm에 해당한다. Fig. 3은 핫스탬핑 열간 피어싱 공정이 적용된 시편이며, 핫스탬핑 열간 피어싱의 효과를 고찰하기 위해 금형과 펀치의 클리어런스를 5%, 15%의 두 가지 조건을 반영하였고 금형이 하사점에 도달한 후 0 초~2 초까지 약 0.1 초 간격으로 그 결과를 평가하였다. 여기서 열간 기계적 피어싱의 클리어런스는 홀 펀치와 하부 금형의 간극을 말하는 것으로 실험에 사용된 소재의 두께로 나누어 그 비율을 설정하게 된다. 이를 조절하기 위해 하부 금형에 Bushing 형태의 보조 금형 장치를 제작하여 다양한 클리어런스에서 실험이 이루어질 수 있도록 구성하였다.

본 연구에서는 핫스탬핑 공정 중 고온에서 홀 가공이 가능한 열간 피어싱(Hot-Mechanical Piercing) 장치 구성을 통해 클리어런스와 홀 가공 시점을 주요 영향 인자로 설정하였으며, 이에 따른 전단면 특성을 평가하고자 하였다.

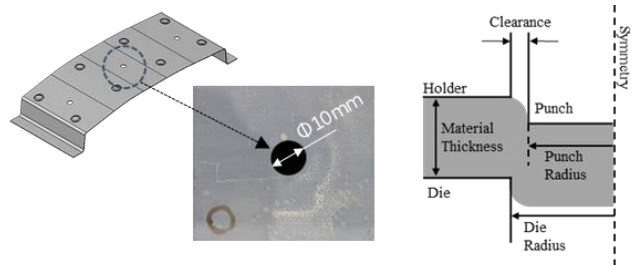


Fig. 3 Hole shape using hot mechanical piercing

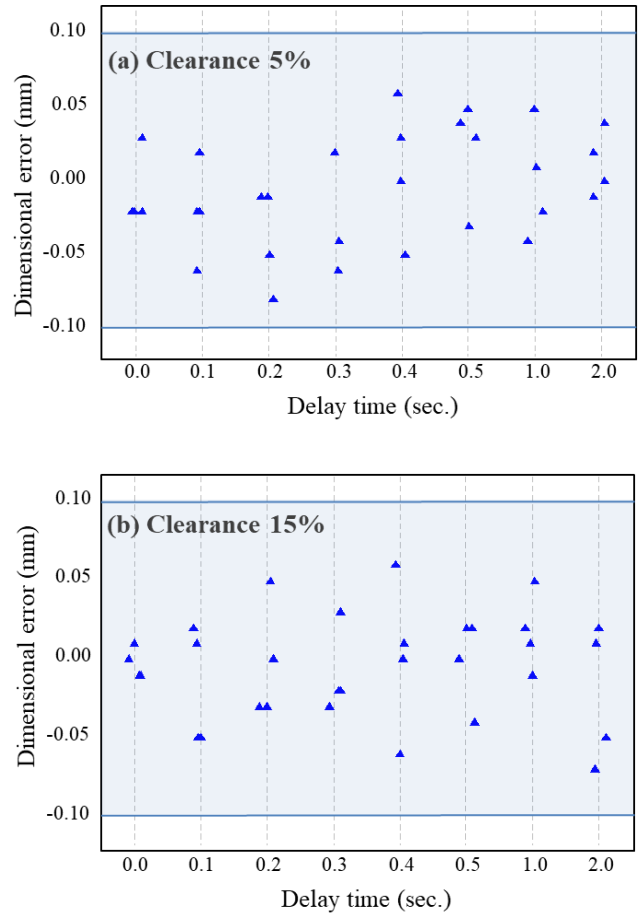


Fig.4 Hole dimensional error results by clearance and delay time (a) Clearance 5%, (b) Clearance 15%

3. 결과 및 고찰

핫스탬핑 공정에서의 시간은 온도와의 연관성이 높은 조건 변수이기 때문에 열간 피어싱 공정에서 금형 단합 이후의 피어싱 되는 시간은 홀 전단면 특성에 영향을 미치는 중요한 변수가 될 수 있다.

Fig. 4은 핫스탬핑 하사점 이후의 열간 피어싱을

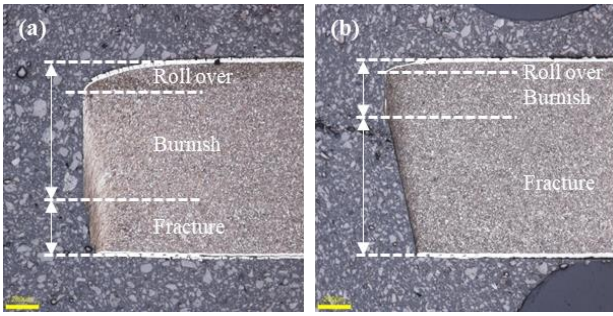


Fig. 5 Shear characteristic associated with piercing methods (a) Hot mechanical piercing, (b) Cold mechanical piercing

하는 시점에 따른 홀 크기 변화를 측정하는 것으로서, 평가한 10 mm 홀에 대해 원래 크기에서 벗어난 오차를 나타내었다. Fig. 4(a)는 클리어런스 5%, Fig. 4(b)는 클리어런스 15%의 결과로 전체적으로 -0.1 mm~0.1 mm 사이에 그 분포가 존재하는 것을 알 수 있다. 이는 핫스탬핑 공정 시 급형에 의한 급속 냉각 및 상변태에 의한 부피 변화가 일부 동반되어 그 홀의 크기 변화가 일부 발생할 수 있으나, 본 연구에서는 그 오차 범위가 약 0.2 mm 이내 수준으로 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

한편, 일반적으로 홀 가공 후 전단 부위는 Rollover, 전단면(Burnish), 파단면(Fracture) 및 버(Burr)로 구분되는데[12], Fig. 5는 핫스탬핑 열간 피어싱을 적용한 전단부와 핫스탬핑 공정이 완료 후 상온까지 냉각이 이루어진 이후에 피어싱을 적용한 전단부를 비교한 것으로 5% 클리어런스가 동일하게 적용된 전단 단면이다. 열간 피어싱이 적용된 Fig. 5(a) Rollover와 전단면의 비율이 상대적으로 높은 반면 파단면과 버는 적은 비율을 차지하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 핫스탬핑 공정이 상온까지 완전히 완료된 이후 피어싱을 적용한 Fig. 5(b)의 경우, Rollover와 전단면이 상대적으로 적게 분포되어 있는 것을 확인할 수 있는데, 이는 피어싱이 적용되는 단계의 소재 강도가 다르기 때문으로 사료된다. 다시 말해 열간 피어싱 조건에서는 고온의 상변태가 동반되는 시점으로 오스테나이트와 마르텐사이트 조직이 혼재된 열간 상태에서 전단 공정이 적용된 반면, 핫스탬핑 공정이 완전히 완료된 이후의 냉간 피어싱 공정을 수행할 때에는 그 조직이 고강도 마르텐사이트이기 때문이다. 전단부위의 파단면과

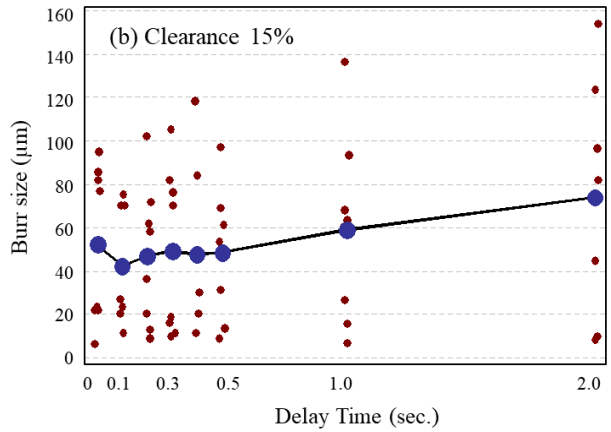
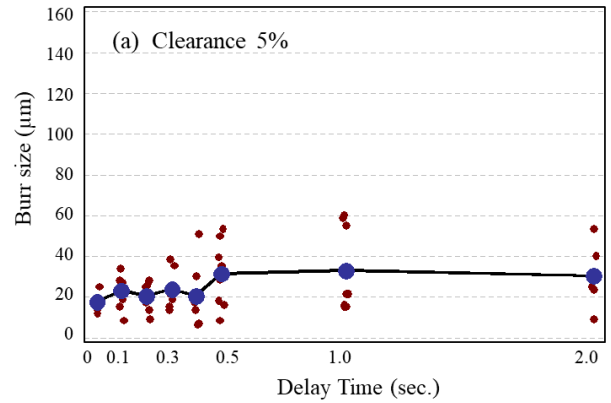


Fig. 6 Burr size distribution owing to delay time (a) Clearance 5%, (b) Clearance 15%

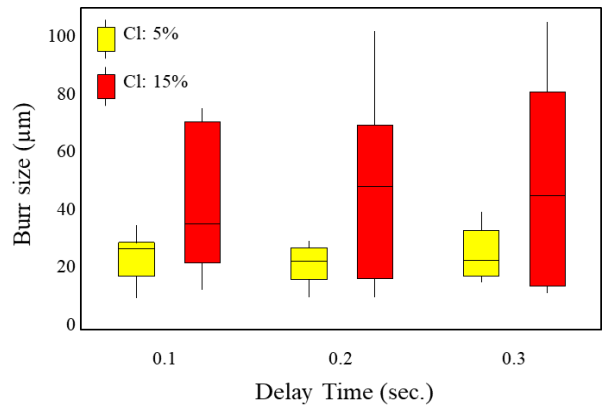


Fig. 7 Comparison of burr size due to delay time and clearance

버의 비율이 높게 되면, 국부적인 높은 응력 및 손상(damage)이 존재할 수 있어 제품에 2차 가공 또는 응력의 추가 부여 시 파단 및 취성으로 연결될 가능성이 높아지게 된다[16].

Fig. 6 는 열간 피어싱의 금형 하사점 이후의 피어싱 시간에 따른 버의 크기를 측정한 그래프로서, 앞에서 언급한 5%, 15% 클리어런스에 따라 그 크기를 측정하였다. Fig. 6(a) 는 5% 클리어런스의 결과로 금형 하사점 이후 2 초까지 버 크기가 60 μm 수준으로 발생하는 경향이 있으나, 15% 클리어런스에서는 Fig. 6(b) 에서와 같이 열간 피어싱이 적용되는 시간이 증가함에 따라 버의 크기뿐만 아니라 그 산포도 증가되고 있음을 알 수 있다. 이는 동일한 열간 피어싱 조건에서 클리어런스 차이가 버의 크기와 그 산포 발생에 큰 영향을 주는 것으로 사료된다. 이를 보다 구체적으로 확인하기 위해 Fig. 7 에서는 클리어런스 및 공정 조건에 따른 버의 크기 값과 산포를 비교 분석하였는데, 그 정도를 세부적으로 확인하고자 지연시간 (delay time)을 0.1~0.3 초 범위로 한정하였다. 클리어런스가 5%인 경우에는 금형 하사점 이후의 시간에 따라 버의 크기와 산포가 크게 변화하지 않은 반면, 15%의 경우에는 그 시간에 따라 변화가 매우 큰 것을 알 수 있었다. 다시 말해 클리어런스가 작은 경우에는 열간 피어싱 되는 시점에 따라 버의 크기와 산포 발생이 크게 영향을 받지 않는 것으로 판단되어지나, 클리어런스가 큰 경우에는 그 영향 정도가 크게 발생하는 것으로 추정된다. 이는 핫스탬핑 열간 피어싱 기술에서 금형과 펀치의 클리어런스가 버 생성에 중요한 영향 인자로 작용하고 있는 것을 알 수 있다. 전단 특성에 의해 발견되는 수소취성에 대한 특성에 대해서는 추후 논의하고자 한다.

4. 결 론

핫스탬핑 공정을 이용한 차체 부품 고강도화 기술이 많이 적용되고 있으며, 그 적용성을 높이고자 공정의 에너지 비용 절감과 생산성 향상을 모색하고 있다. 이에 본 연구에서는 핫스탬핑 고온 성형 중에 홀을 가공하는 열간 피어싱 공정의 특성을 분석하였다. 특히 핫스탬핑 고온의 성형 중에 발생하는 상변태 특성을 감안하여 금형 하사점 이후 전단 시점과 클리어런스에 따른 홀 크기 변화 및 전단부 특성의 변화를 고찰하였다.

열간 피어싱의 5%, 15% 적용된 클리어런스에 따른 홀의 크기 변화는 약 0.2 mm 이내의 수준의 오차가 발생된 것을 확인할 수 있었는데, 이는 핫스탬

핑 성형이 완료 되는 시점(하사점) 이후에 0.1 초 단위로 열간 피어싱을 했기 때문에 그 크기 변화가 크지 않은 것으로 사료된다. 또한 핫스탬핑 공정이 완료된 냉간 상태에서 홀 가공하는 것과 달리 열간 피어싱 기술이 적용된 전단부는 Rollover 및 전단면의 비율이 높고 파단면과 버의 비율이 상대적으로 낮은 것을 알 수 있었다. 전단 공정에 의해 발생하는 버의 크기와 산포는 5% 클리어런스에서는 열간 피어싱 시점에 따라 크게 영향을 받지 않으며 전반적으로 약 60 μm 이하의 크기로 생성된 것을 알 수 있었으나, 클리어런스가 15%에서는 열간 홀 피어싱 시점에 크게 영향을 받을 뿐만 아니라 그 산포도 크게 발생하는 것을 알 수 있었다. 향후 핫스탬핑 열간 피어싱 기술 적용에 따른 제품 성능 확보를 위해서는 공정 최적화 연구가 필요할 것으로 사료된다.

REFERENCES

- [1] P. Feng, P. Zhu, Y. U. Zhang, 2010, Metamodel-based Lightweight Design of B-pillar with TWB Structure via Support Vector Regression, *Comput. Struct.*, Vol. 88, No. 1, pp. 36~44.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2009.07.008>
- [2] P. O. Marklund, L. Nilsson, 2001, Optimization of a Car Body Component Subjected to Side Impact, *Struct. Multidiscip. Optim.*, Vol. 21, No. 5, pp. 383~392. <http://doi.org/10.1007/s001580100117>
- [3] H. Karbasian, A. E. Tekkaya, 2010, A Review on Hot Stamping, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 210, No. 15, pp. 2103~2118.
<http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.07.019>
- [4] K. Mori, S. Saito, S. Maki, 2008, Warm and Hot Punching of Ultra High Strength Steel Sheet, *CIRP Annals - Manufacturing Technol.*, Vol. 57, No.1, pp. 321~324.
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.125>
- [5] K. Mori, T. Maeno, Y. Maruo, 2012, Punching of Small Hole of Die-quenched Steel Sheets Using Local Resistance Heating, *CIRP Annals - Manufacturing Technol.*, Vol. 61, No. 1, pp. 255~258.
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.124>
- [6] H. S. Choi, B. M. Kim, D. H. Kim and D. C. Ko, 2014,

- Application of Mechanical Trimming to Hot Stamped 22MnB5 Parts for Energy Saving, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 15, No. 6, pp. 1087~1093.
<https://doi.org/10.1007/s12541-014-0441-7>
- [7] H. S. Choi, W. S. Lim, C. G. Kang, B. M. Kim, 2011, A Local Softening Method for Reducing Die Load and Increasing Service Life in Trimming of Hot Stamped Part, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 20, No. 6, pp. 427~431.
<https://doi.org/10.5228/KSTP.2011.20.6.427>
- [8] Y. J. Jeon, H. S. Choi, J. J. Kang, B. H. Chae, D. E. Kim, 2020, A Study on the Quality of Holes Pierced during the Quenching Process of Press-hardened Steel According to the Shearing Angle of the Piercing Punch, *Trans. Kor. Soc. Auto. Eng.*, Vol. 28, pp. 903~908.
<https://doi.org/10.7467/KSAE.2020.28.12.903>
- [9] Y. J. Jeon, M. J. Song, H. K. Kim, 2015, Effect of Hot-Stamping Process Conditions on the Changes in Material Strength, *Int. J. Automot. Technol.*, Vol. 16, pp. 619~627.
<https://doi.org/10.1007/s12239-015-0063-9>
- [10] H. W. So, D. Fabmann, H. Hoffmann, R. Golle, M. Schaper, 2012, An Investigation of the Blanking Process of the Quenchable Boron Alloyed steel 22MnB5 Before and After Hot Stamping Process, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 212, No. 2, pp. 437~449.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.10.006>
- [11] S. Salari, M. Naderi, W. Bleck, 2015, Constitutive Modeling During Simultaneous Forming and Quenching of a Boron Bearing Steel at High Temperatures, *J. Mater. Eng. Perform.*, Vol. 24, pp. 808~815.
<https://doi.org/10.1007/s11665-014-1345-5>
- [12] K. H. Park, 2013, A Study on Improvement the Burr Problem for the Precision Punching Press Process, Chonnam National University, Gwangju, pp. 7~13.
- [13] S. C. Yoon, D. H. Kim, 2012, Analysis of Phase Transformation and Temperature History during Hot Stamping Using the Finite Element Method, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 22, pp. 123~132.
<https://doi.org/10.5228/KSTP.2013.22.3.123>
- [14] 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.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.04.009>
- [15] M. Merklein, J. Lechler, 2008, Determination of Material and Process Characteristics for Hot Stamping Processes of Quenchenable Ultra High Strength Steels with respect to a FE-based Process Design, *SAE Int. J. Mater. Manuf.*, Vol. 1, pp. 411~426.
<https://doi.org/10.4271/2008-01-0853>
- [16] W. Yang, E. Hwang, H. Kim, S. Ahn, S. Kim, H. Castaneda, 2019, A Study of Annealing Time to Surface Characteristics and Hydrogen Embrittlement on AlSi coated 22MnB5 during Hot Stamping Process, *Surf. Coating Tech.*, Vol. 378, pp. 1~7.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.124911>