

핫스탬핑 소재의 열간 피어싱 공정에서 펀치 전단각에 따른 전단면 특성 평가

전 용 준·최 현 석·강 정 진·채 보 혜·김 동 언*

한국생산기술연구원 형상제조부문

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

Yongjun Jeon · Hyunseok Choi · Jeongjin Kang · Bohye Chae · Dongearm Kim*

Shape Manufacturing R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology, 156 Gaetbeol-ro,
Yeonsu-gu, Incheon 21999, Korea

(Received 30 June 2020 / Revised 6 November 2020 / Accepted 12 November 2020)

Abstract : Although post-processing by using trimming dies has been continuously conducted to shorten the processing time of press-hardened steel, it is quite difficult to secure the life expectancy of the dies due to its high strength at 1.5 GPa. Therefore, in this study, hot piercing was performed at 550 °C during the quenching process of press-hardened steels. The characteristics of the pierced holes were analyzed after changing the shearing angle of the piercing punch. The specimen on which a flat punch with a shear angle of 0° was applied showed a 17 % rollover, 65 % burnish, and 18% fracture, all relative to depth. However, when a piercing punch with a shear angle of 2° was applied, the surface quality deteriorated considerably, with a 14 % rollover, 12 % burnish, and 74 % fracture. These results indicated that when a piercing punch with a shearing angle was applied, the diameter of the piercing hole increased above the target dimension. This can be attributed to the unbalanced load occurring in the radial direction of the piercing punch when the active surface of the punch failed to make contact with the material in the circumferential direction. Moreover, the application of the piercing punch also reduced the effect of the shear load. This can be explained by the temperature at which the piercing process was performed (i.e., 550 °C), which was higher than the martensitic transformation temperature of press-hardened steel. Therefore, the application of a piercing punch with a shearing angle is deemed unsuitable for the piercing process, which would be conducted during the quenching of press-hardened steel, for the following reasons: decreased quality of the processed surface, increased diameter of the processed hole, and reduced impact load.

Key words : Hot stamping(핫스탬핑), In-die trimming(다이 트리밍), Quenching(급속냉각), Piercing(피어싱), Shearing angle(전단각), Martensite(마르텐사이트), Phase transformation(상변태)

1. 서 론

최근 이산화탄소 배출 제한 및 고속에서의 차량 안전성 확보를 위해 고강도 차체 부품의 필요성이 증대되고 있다.¹⁾ 이에 따라 고온에서 가공되어 성형성이 우수하고 최종 제품 기준 1.5 GPa 이상의 강도가 확보되는 핫스탬핑 부품 적용이 주요 완성차 OEM을 중심으로 확대되고 있다.²⁾ 그러나 핫스탬핑 소재의 높은 강도로 인해 제품의 외곽 스크랩부 트리밍이나 내측 피어싱 등의 후가공에 금형을 적용하면 업체에서 요구하는 금형의 요구수명 확보가 매우 어렵다. 또한 현재 양산차 제조 라인에서 일반

적으로 사용되는 레이저 가공은 낮은 생산성 및 높은 투자비용에서 야기되는 고비용 저효율 문제가 지속적으로 지적되고 있다. 최근 이를 극복하고자 고온에서 핫스탬핑 소재의 제품 성형과 동시에 동일 금형 내에서 냉각 공정 중 전단공정 기반 후가공을 구현하는 In-die trimming 공법에 대한 연구가 진행되고 있다.

핫스탬핑 소재의 고온 전단에 대한 기존 연구는 블랭킹 공정을 대상으로 성형품의 전단하중을 저감하면서 전단면의 고품질을 확보하기 위한 공정조건 수립을 중심으로 진행되었다. 소현우 등³⁾은 핫스탬핑 소재의 냉각 공정

*Corresponding author, E-mail: kdu0517@kitech.re.kr

¹⁾This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

중 고온 조건에서 완전 블랭킹하여 클리어런스 및 전단 시점온도 등 주요 전단공정 변수를 대상으로 전단부 품질에 미치는 영향을 확인하고 최적조건을 제시하였다. 최홍석 등⁴⁾은 핫스탬핑 성형 시 Half blanking 기법을 적용하여 열간 상태에서 일부 전단 한 뒤 퀴칭 후 완전 전단하는 다단 공정을 적용하여 클리어런스 및 열간 전단 두께 변수에 따른 전단면 품질에 대한 연구를 수행하였다. Mori 등^{5,6)}은 국부 저항 가열 후 다이 퀴칭된 강판에 대하여 미세 홀 피어싱 후 전단면 분포 및 경도 등의 특성을 분석하였다.

고강도 소재가 우선 적용되는 B-pillar와 같은 충돌 관련 안전부재는 BIW와의 체결을 위한 피어싱 가공 형상들이 다수 포함된다. 일반적으로 고강도 소재의 피어싱 펀치는 전단날에 형상을 부여하여 공정 중 발생하는 최대 하중을 저감하여 금형 수명을 향상하는 기술을 적용하고 있다. 그러나 평면형태의 피어싱 펀치를 사용한 가공면 대비 전단면 품질이 낮아 일반적인 전단공정에서도 선택적으로 적용되고 있다. 이에 본 연구에서는 핫스탬핑 소재를 대상으로 급냉 공정 중 피어싱 온도와 피어싱 펀치의 전단각에 따른 전단면 특성 및 성형품의 치수 정밀도를 분석하였다. 이를 바탕으로 피어싱 금형의 수명과 연계되는 전단 하중에 대한 특성 평가를 수행함으로써 핫스탬핑 소재의 급속냉각 중 수행되는 고온 피어싱 공정에서 금형 수명 확보와 고품질의 전단면 품질을 확보하는 주요 공정인자에 대해 파악하고자 한다.

2. 핫스탬핑 고온 피어싱 실험

2.1 핫스탬핑 고온 피어싱 분석 모듈

직경 20 mm의 홀을 기준으로 핫스탬핑 소재의 고온 피어싱 공정에서 전단면 품질에 대한 공정인자의 영향성을 분석하기 위한 테스트 금형을 제작하였다. 금형에 장착된 피어싱 펀치 상단에 로드셀을 설치하여 공정 중 발생하는 전단하중의 변화를 실시간으로 측정하였다. 비접촉식 온도 센서인 파이로미터를 설치하여 가열로에서 900 °C 이상으로 가열된 시편을 테스트 금형에 안착 후 피어싱 공정까지의 온도 변화를 실시간으로 측정하였으며 이를 바탕으로 전단시점을 제어하였다. 레이저 기반의 변위 센서를 금형 측면에 설치하여 시편의 전단 깊이에 따른 전단 하중을 포함한 특성을 실시간으로 비교 분석하였다.

2.2 핫스탬핑 고온 피어싱 조건

핫스탬핑 소재를 전기 가열로에 장착하고 950 °C에서 3분 동안 가열하여 오스테나이트 상을 갖는 시편을 테스

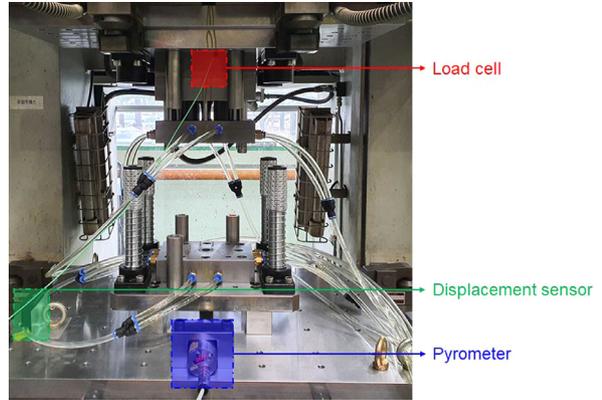


Fig. 1 The testing module of a piercing process during quenching of press-hardened steel

트 금형으로 이송한 후 급속 냉각하는 과정에서 목표 온도에 맞춰 피어싱 공정을 수행하였다.⁷⁾ 기 수형 연구를 기반으로 우수한 전단면 특성을 보이는 전단시점 온도 550 °C⁸⁾에서 20 mm/s 속도로 피어싱 공정을 수행하였다. 두께 1 mm의 SABC 1470 판재를 기준으로 테스트 금형의 펀치와 다이의 간극은 5%(0.01 mm)로 조정하였다. 피어싱 펀치의 전단각은 일반적인 평면형(전단각 0°)와 자동차 부품 제조용 프레스 금형에서 금형 수명 향상을 위해 적용되는 전단각 2°를 선정하여 전단 특성 평가를 하였다.

3. 피어싱 펀치 형상에 따른 전단품 특성 평가

3.1 전단면 특성 및 품질 분석

3.1.1 피어싱 홀 분석 방법

피어싱 펀치 작동부의 형상 조건이 핫스탬핑 공정중 가공된 홀에 미치는 영향을 파악하기 위하여 시편 가공부를 원주 방향 4개 영역으로 구분하여 측정위치를 설정하고 위치별 전단면 수준을 검토하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 전단각이 있는 피어싱 펀치로 시험된 시편의 1-2번 위치가 펀치와 처음 만나는 영역이다. 개별 측정 영역에서 전단면의 정면과 폴리싱 후 측면을 대상으로 눌림면(Rollover), 전단면(Burnish), 파단면(Fracture)의 3개 영역이 시편 두께에서 각각 차지하는 분율을 측정하였다.

3.1.2 전단각 적용에 따른 피어싱 전단면 특성 변화

피어싱 금형의 전단각이 급속 냉각 중 핫스탬핑 소재 전단면의 품질에 미치는 영향을 Fig. 3에서 확인할 수 있다. 전단각 0°인 평면형 펀치의 경우 전단면(Burnish)이 지배적인 반면, 전단각 2°의 펀치의 경우 파단면(Fracture)이 우세한 것을 확인할 수 있다. 평면형 펀치를 사용한 단면은 평균적으로 눌림면, 전단면, 파단면이 각각 17%, 65%,

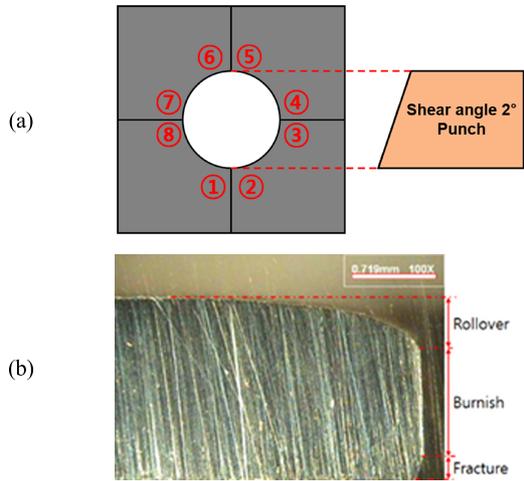


Fig. 2 Sheared surface; (a) Measure points of sheared surface based on the shearing angle of the piercing punch, (b) Characterization of rollover, burnish and fracture

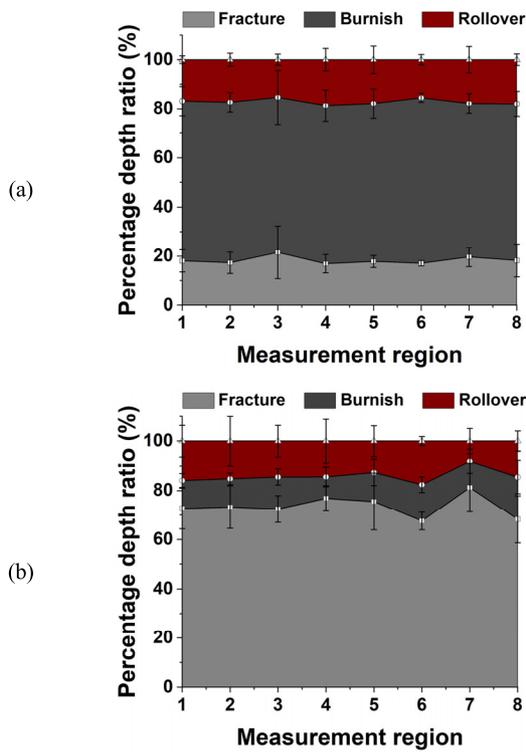


Fig. 3 Characteristics of sheared surface depending on shearing angles of piercing punch; (a) Shearing angle 0°, (b) Shearing angle 2°

18 %를 차지한다. 전단각 2°펀치를 사용한 단면은 늘림면, 전단면, 파단면이 각각 14 %, 12 %, 74 %인 것으로 확인된다.

전단각이 있는 펀치를 사용하는 경우 피어싱 홀의 원주 방향의 단면 특성이 상대적으로 불균일한 것을 Fig. 3

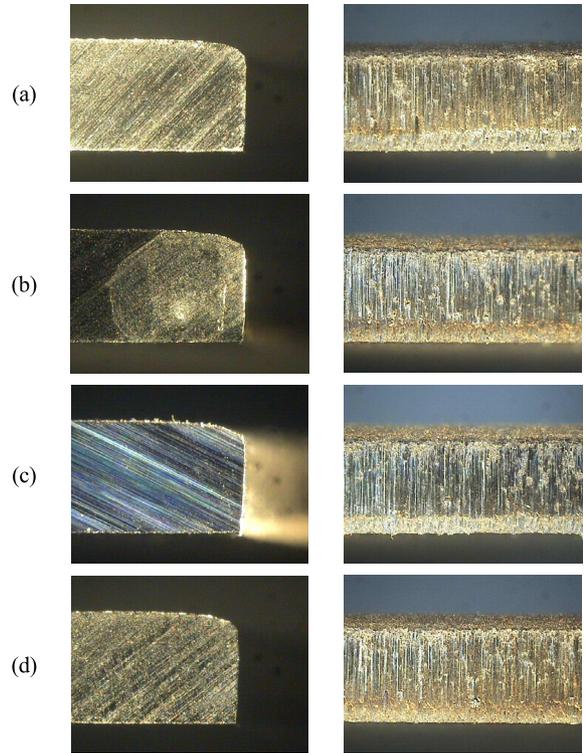


Fig. 4 Sheared surfaces by position when applying shearing angle 0°; (a) Section 1(①, ②), (b) Section 2(③, ④), (c) Section 3(⑤, ⑥), (d) Section 4(⑦, ⑧)

에서 확인할 수 있다. Fig. 5의 전단각 2°펀치를 사용한 단면 사진을 살펴보면 개별 측정 위치에서도 늘림면, 전단면, 파단면의 두께 방향 분율이 변화되는 것이 확인된다. 이는 전단각으로 인해 소재와 펀치의 접촉이 펀치를 두고 순차적으로 진행되어 위치별 전단부의 온도 편차에서 기인된다고 판단된다. 또한 전단 메커니즘이 초기 접촉부의 펀치 유입 이후 원주 방향으로 뜯겨지듯이 전단이 되어 높은 파단면 분포와 불균일한 전단면 분포를 보인다고 판단된다. 이러한 불균일한 분포는 펀치 형상부의 전단각에 의해 피어싱 공정 중 펀치의 반경 방향으로 발생하는 불균형한 하중에 의해 심화된다.

3.2 치수 정밀도 평가

3.2.1 평가 방법

일반적으로 피어싱 공정에서 전단각이 있는 원추형, 베벨형 등의 펀치를 적용하면 목표 대비 치수가 커지는 문제점이 발생한다. 핫스탬핑 소재의 열간 피어싱 공정의 경우 고온 공정으로 상온 대비 500 °C 수준의 온도 편차에 의한 열수축으로 피어싱 후 소재의 치수불량이 심화될 가능성이 있다. 핫스탬핑 소재는 오스테나이트에서 마르텐사이트로 상변태 과정에서 3.2 %의 부피 팽창이

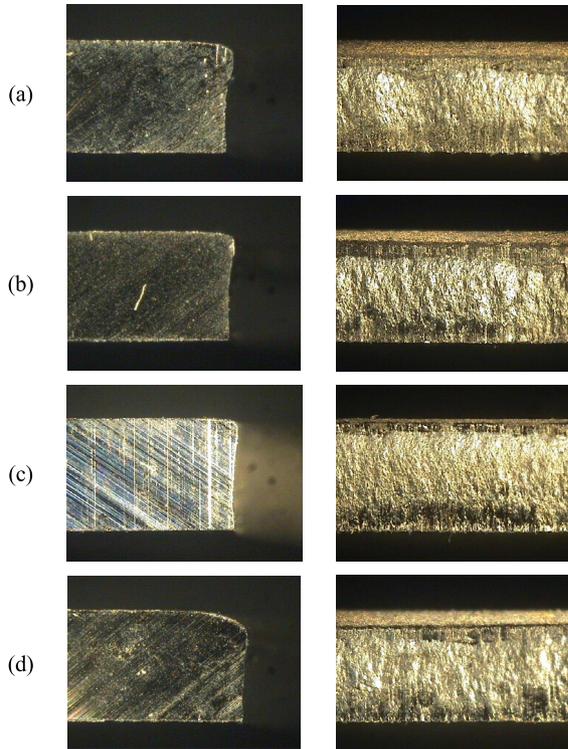


Fig. 5 Sheared surfaces by position when applying shearing angle 2°; (a) Section 1 (①, ②), (b) Section 2 (③, ④), (c) Section 3 (⑤, ⑥), (d) Section 4 (⑦, ⑧)

발생한다.⁹⁾ 본 논문의 전단시점 온도인 550 °C는 마르텐사이트 변태 시작 및 종료 온도 대비 높아 상변태에 의한 치수 변화가 발생할 수 있다. 이를 확인하기 위하여 접촉식 삼차원 측정기를 이용하여 성형품 상면을 기준으로 0.6 mm 하단에 위치한 전단면에서 가공된 홀의 직경과 진원도를 평가하였다.

3.2.2 전단각 적용에 따른 전단품 치수 정밀도 변화

Fig. 6에서 피어싱 펀치의 전단각 적용에 따른 치수를 확인할 수 있다. 평면형 펀치를 사용하는 경우 가공된 홀의 직경이 평균 19.97 mm인 반면 전단각 2° 펀치를 사용한 경우 평균 20.05 mm이다. 일반적인 피어싱 공정과 마찬가지로 핫스탬핑 소재의 급냉 중 열간 피어싱 공정에서도 가공된 홀의 치수가 증가하였으며 20 mm 홀 직경을 기준으로 100 μm 수준의 차이가 발생하였다. 이는 Fig. 4와 5에서 확인되는 바와 같이 전단각이 있는 펀치로 가공된 시험편에서는 상대적으로 과도하게 발생하는 파단면에서 기인된다.

시편별 피어싱 홀의 직경 편차도 전단각 0°기준 31 μm에서 전단각 2°적용시 54 μm으로 증가하였다. 또한 피어싱 홀의 진원도는 전단각 0°기준 0.01687에서 전단각 2°적용시 0.02325 저하되었다. 이는 전단각에 의한 펀치 변경

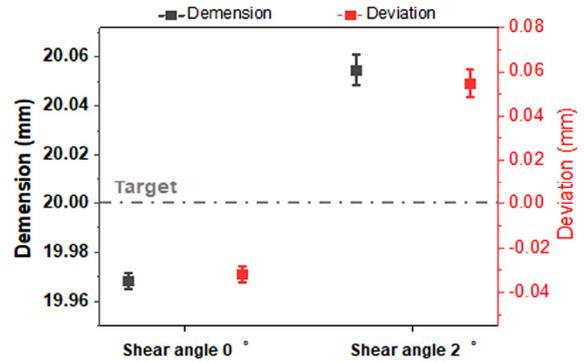


Fig. 6 Dimensional accuracy of pierced holes depending on shearing angles of the piercing punch

방향의 불균형 하중에 의해 전단면 품질이 원주 방향으로 고르지 못해 발생하는 것으로 판단된다.

4. 전단각에 따른 금형 수명 영향성 평가

4.1 전단각에 따른 전단 하중 특성

전단금형의 수명을 향상하기 위해서는 공정 중 발생하는 최대 충격하중을 저감해야 한다. Fig. 7에서는 핫스탬핑 소재의 열간 피어싱 공정에서 펀치의 전단각에 따른 전단하중을 보여준다.

피어싱 펀치의 전단각 0°조건에서는 1585 kgf, 전단각 2°조건에서는 1422 kgf의 전단 하중이 발생되어, 163 kgf 전단하중 감소효과를 확인하였다. 이에 반해 피어싱 공정 중 성형 깊이에 따른 전단력의 지속시간은 증가하였다. 펀치에 가공된 전단각은 소재와의 접촉 시점을 분할하고 작동 시간이 확장되어 전단 하중을 분산하여 최대 충격량을 감소시켜 금형 수명을 향상한다. 펀치의 형상 제어에 의한 전단하중의 저감 효과는 고강도 소재에서 효과가 높은 반면 본 연구에서 진행된 핫스탬핑 소재의 열간 피어싱에서는 상대적으로 낮은 효과가 확인되었다.

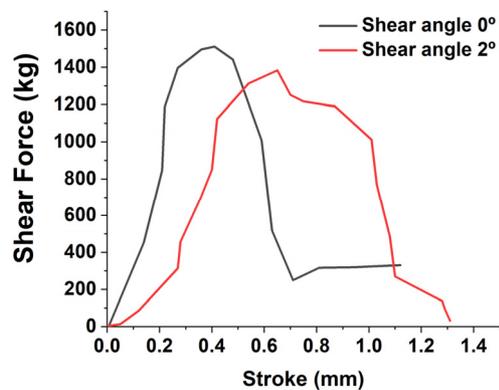


Fig. 7 Comparison of the cutting force during piercing process by using the piercing punch with the shearing angle 0° and 2°

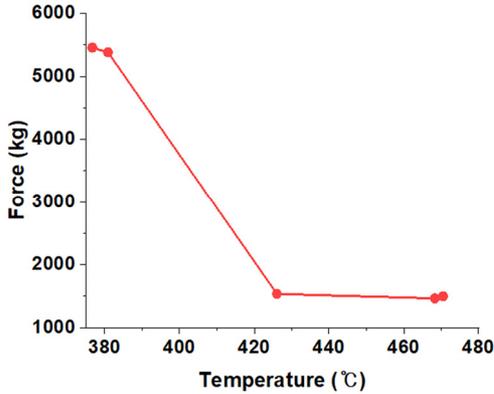


Fig. 8 The maximum cutting force of press-hardened steel with variations of piercing temperature

Fig. 8은 핫스탬핑 소재의 급냉 중 400~500 °C 온도 구간에서 수행된 피어싱 공정 중 발생하는 전단하중의 최대값 변화를 보여준다. 전단온도 425 °C를 기점으로 충격하중이 1500 Kgf 수준에서 5500 Kgf 수준으로 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 소재 가열시간, 냉각속도 등 공정조건에 따른 차이가 있으나 일반적으로 22MnB5 소재의 마르텐사이트 변태 개시온도는 425 °C이다. 본 연구의 전단시점인 550 °C는 시편이 마르텐사이트 상변태 전으로 비교적 강도가 낮아 피어싱 펀치에 의한 충격하중 저감 효과가 낮아 금형 수명 감소효과는 미미하다고 판단된다. 전단면 품질과 치수 정밀도의 저하가 확인된 전단각을 갖는 피어싱 펀치는 핫스탬핑 소재의 열간 피어싱에 적합하지 않은 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 핫스탬핑 소재의 급속냉각 중 피어싱 공정에서 펀치 형상에 따른 피어싱 홀의 품질과 금형수명에 관한 연구를 진행하였다. 이를 위해 전단각 0°, 2°를 갖는 펀치를 이용하여 550 °C에 피어싱 공정을 수행하여 가공된 홀의 전단면 특성, 치수정밀도, 전단하중에 대한 평가를 진행하였다.

- 1) 전단각 2°를 갖는 피어싱 펀치로 성형된 시편은 위치별 불균일 전단면 분포와 높은 파단면 분포를 보였다. 두께 대비 파단면 비율의 경우 전단각 0°조건인 18 %에서 전단각 2°에서는 74 %로 크게 증가하였다. 이는 소재와 펀치의 접촉이 피어싱 홀의 원주 방향으로 순차적으로 진행되고 공정 중 펀치의 반경 방향의 불균형 하중이 발생하여 품질이 저하된다고 판단하였다.
- 2) 가공된 홀의 직경은 전단각 2°의 피어싱 펀치를 적용한 경우 목표 20 mm 대비 확대된 평균 20.05 mm로 측정되었다. 또한 진원도는 전단각 0°기준 0.01687에서

전단각 2°적용시 0.02325로 저하되었다. 이러한 치수 정밀도 저감 또한 펀치 반경 방향의 불균형 하중에서 기인된다고 판단된다.

- 3) 550 °C에서 진행된 핫스탬핑 소재의 열간 피어싱에서는 전단각 2°의 피어싱 펀치를 적용하여도 공정 중 발생하는 전단하중 최대값의 저감효과가 낮았다.
- 4) 그러므로 핫스탬핑 소재의 급속냉각 중 진행되는 열간 피어싱 공정에서 전단각이 적용된 펀치의 사용은 가공면의 품질저하가 발생하고 금형 수명의 증대효과가 낮아 평면펀치 적용이 적합하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 중소벤처기업부 ‘선도연구기관협력기술개발사업(과제번호 : S2761747)’ 지원으로 진행하였습니다.

References

- 1) Y. J. Jeon, M. J. Song, H. K. Kim and B. S. Cha, “Effect of Hot-Stamping Process Conditions on the Changes in Material Strength,” *Int. J. Automotive Technology*, Vol.16, No.4, pp.619-627, 2015.
- 2) H. C. Lee, M. G. Kim, G. Y. Go, S. N. Han and S. Y. Park, “Development of a 1.5 GPa Grade Sideouter through Hot-stamping Process,” *Transactions of KSAE*, Vol.27, No.3, pp.193-198, 2019.
- 3) H. W. So, D. Fabmann, H. Hoffmann, R. Golle and M. Schaper, “An Investigation of the Blanking Process of the Quenchable Boron Alloyed steel 22MnB5 Before and After Hot Stamping Process,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.212, pp.437-449, 2012.
- 4) H. S. Choi, B. M. Kim, D. H. Kim and D. C. Ko, “Application of Mechanical Trimming to Hot Stamped 22MnB5 Parts for Energy Saving,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol.15, No.6, pp.1087-1093, 2014.
- 5) K. Mori, S. Saito and S. Maki, “Warm and Hot Punching of Ultra High Strength Steel Sheet,” *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol.57, No.1, pp.321-324, 2008.
- 6) K. Mori, T. Maeno and Y. Maruo, “Punching of Small Hole of Die-quenched Steel Sheets Using Local Resistance Heating,” *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol.61, No.1, pp.255-258, 2012.
- 7) Y. J. Jeon, H. S. Choi and D. E. Kim, “A Study on the Heating Time of Boron Steel in Hot Stamping Process,” *KSAE Spring Conference Proceeding*, p.1095, 2017.

- 8) D. E. Kim, Y. J. Jeon, H. S. Choi, J. J. Kang, Y. D. Kim, Y. M. Heo, J. D. Kim and S. T. Won, "An Investigation of the Trimming of Boron Nitride Steel (22MnB5) during the Die-quenching Process," *Procedia Engineering*, Vol.207, pp.1540-1545, 2017.
- 9) H. Karbasian and A. E. Tekkaty, "A Review on Hot Stamping," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.210, No.15, pp.2103-2118, 2010.