

금형 열전도율에 따른 핫스탬핑 공정 냉각 특성 연구

이경훈^{1,#} · 정민음¹ · 석주성² · 서창희³

Research on the Cooling Characteristics of Hot Stamping Process with Thermal Conductivity Die Steel

K. Lee, M. U. Jung, J. S. Seok, C. H. Suh

(Received March 23, 2018 / Revised May 11, 2018 / Accepted May 14, 2018)

Abstract

In this study, the cooling characteristics of dies were investigated in the hot stamping process of front pillars for automobile. Two identical dies were manufactured out of tool steels with different thermal conductivities. The dies were designed with curved channels for uniform cooling of the blank. Computational fluid dynamics (CFD) simulations were also carried out, which can consider the heat transfer among the coolant, die, and blank. Measured and simulated thermal histories of dies were compared, and it was shown that high conductivity tool steel has an excellent cooling capacity compared to conventional tool steel.

Key Words : Hot Stamping, Cooling Channel, CFD, Thermal Conductivity, Tool Steel

1. 서 론

최근 자동차 산업에서는 해마다 강화되는 연비 규제 및 충돌 법규 강화로 인해 경량화 및 고강도화를 동시에 만족시키기 위한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 그 중에 각광받고 있는 기술이 핫스탬핑(hot stamping) 공법이다. 최근에는 고강도 제품을 냉간 성형하던 일본에서도 성형성 한계에 부딪쳐 핫스탬핑에 대해 많은 관심을 가지고 있으며, 자동차 차체에 적용하기 위한 많은 사항들을 검토 중에 있다. 핫스탬핑이란 590MPa급의 인장강도를 가지는 보른강 소재를 성형하기 용이한 900℃ 정도로 가열한 후 냉각수가 순환되고 있는 금형에서 성형과 동시에 냉각시키는 공법이다. 오스테나이트 상에서 마르텐사이트 상으로 변태시켜 1.5GPa급의 인장강도를 가지는 초고강도 제품을 얻을 수 있다. 금형을 이용

한 고온 성형과 급속 냉각이 핫스탬핑 기술의 핵심이며, 시간을 많이 차지하는 냉각 공정이 특히 중요하다. 성형은 약 1초 내외로 완료되지만, 성형 후 금형 내에서의 소재 냉각 공정은 보통 10초 내외 정도 소요되기 때문이다. 또한, 성형 후 치수 변형 저감 및 형상 동결화를 유지하기 위해서는 균일한 냉각을 통하여 제품의 치수정밀도를 확보하는 것이 요구된다.

블랭크를 균일하게 냉각하는 첫 번째 방안으로 효과적인 냉각 채널 설계가 있고, 두 번째로 금형 소재의 변경을 통한 냉각 효율의 증가가 있다. 효과적인 냉각 채널의 설계를 위해 다양한 방식의 채널 형태가 제안되어 적용되고 있다. 가장 일반적으로 사용되는 직선형 채널방식은 금형 제작이 용이하나 채널과 금형 표면 간의 거리가 일정하지 않아 균일한 냉각에 부적합한 구조를 가진다. 금형 외곽 형상을 따라 냉각 채널을 제작하는 곡선형 채널 방식은 채널과 금형 간의 거리가 일정하여 균일한 냉각 분포를 제공하나 대형 금형의 경우 금형 분할 부위의

1. ㈜솔루션랩

2. ㈜신화에스티

3. 대구기계부품연구원

Corresponding Author: Solution Lab, Email:klee@solution-lab.co.kr

냉각 부재로 인한 국부적인 냉각 불균일을 야기한다. 또한 직선형 채널 방식에 비해 사용 중 누수 등의 문제점으로 적용에 한계를 지닌다.

금형의 냉각 채널 설계와 관련하여 직선형 채널에 균일한 온도와 일정한 열전달 계수를 적용하고 금형 내의 열전달 해석을 통해 블랭크의 냉각 효과를 검토한 연구들이 수행된 바 있다[1,2,3]. Han 등은 냉각 채널의 유동해석만을 수행하여 냉각수 속도 분포로 채널의 냉각 성능 검증을 시도하였다[4]. 그러나, 이러한 연구들은 금형 내의 열전달 특성과 냉각수의 유동에 따른 열전달을 정확히 표현하지 못하는 단점을 지닌다. 최근에는 단순한 형태의 금형을 대상으로 블랭크와 금형의 열전달, 냉각수의 유동 특성을 동시에 고려하는 연구들이 시도되고 있다[5, 6]. Lee 등은 실물 크기의 금형을 대상으로 직선형 냉각 채널과 곡선형 냉각 채널의 냉각 성능을 비교하는데 있어, 블랭크, 금형 및 냉각수의 유동을 고려한 열유동해석을 시도하였으며, 냉각수의 속도에 의한 금형 열전달 효율을 고려하여 보다 정확한 해석적 결과를 보여주었다[7]. 다만 실험과의 비교가 없어 두 채널 타입에 따른 수치해석 결과로 상대적 비교만을 볼 수 있었다. 금형 소재의 변경을 통한 냉각 능력 향상에 대한 연구는 그다지 많이 이루어지지 않았다. Kum 등은 수입 금형 소재인 로발마사의 고열전도율 소재를 열전달해석에 적용하여 기존 STD61 대비 냉각 시간 단축 효과를 보고하였다[8]. Cha 등은 열유동해석을 통해 새로운 합금의 열전도율 변화에 따른 냉각 능력 향상을 보고하였다[9]. 최근의 핫스탬핑 공정 적용의 확대에 따라 선진사의 고열전도율을 가진 금형 소재가 도입되고 테스트되고 있지만 정량적인 수치를 확인할 수 있는 실험 결과가 보고된 바는 없다.

본 연구에서는 선진사의 고열전도율 금형 소재와 기존의 STD61을 사용하여 곡선형 냉각 채널을 가진 동일한 금형을 제작하고 시제품을 생산함으로써 금형 소재 변경에 따른 금형 냉각 효과를 검증하고자 한다. 또한 해석적 측면에서도 측정된 실험 결과를 바탕으로 보다 블랭크 온도의 정량적 예측이 가능한 열유동해석 방안을 수립하려 한다.

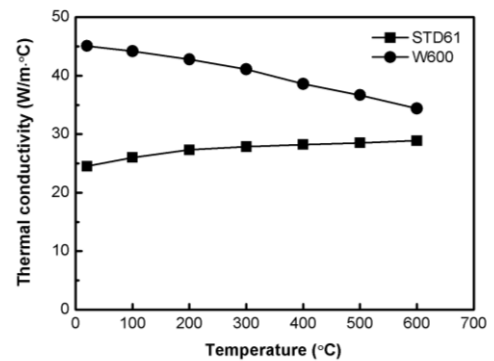
2. 연구 방법

2.1 고열전도 금형 소재의 선정

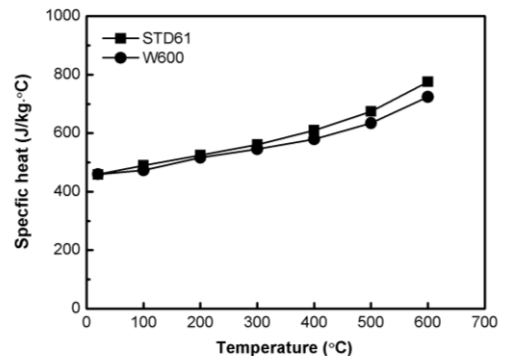
대상 금형 소재로는 오스트리아 뵘러 사의 제품군을 검토하였다. 열간 금형강으로는 W600과 W360이 대상이 되었다. W360은 STD61의 변형 강종으로 STD61에 비해 높은 내마모성과 열전도율을 가지고 있으며, W600은 STD61에 비해 내마모성은 다소 약하지만 매우 높은 열전도율을 보인다. 두 강종 모두 슬래그의 전기 저항열을 이용한 ESR(Electro Slag Remelting) 공법으로 제작하였다. 편석을 최소화하여 순도가 높고 조직이 치밀한 장점이 있다. Table 1은 STD61과 검토 대상 금형 소재의 조성이다. W600은 기존 STD61에 비해 Cr 대신 Mo과 Ni 및 W의 함량이 높다. 본 연구에서는 열전도율에서 명확한 차이를 보이는 W600을 선정하여 연구를 진행하였다.

Table 1 Chemical composition of die steels (wt%)

	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ni	W
STD61	0.39	1.10	0.40	5.20	1.40	0.95	-	-
W360	0.50	0.20	0.25	4.50	3.00	0.55	-	-
W600	0.32	0.10	0.25	-	3.30	-	2.00	1.80



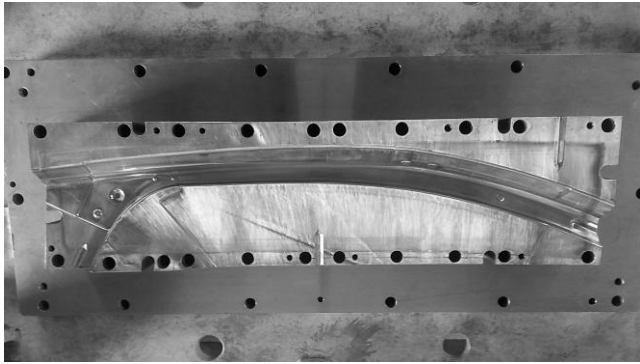
(a) Thermal conductivity



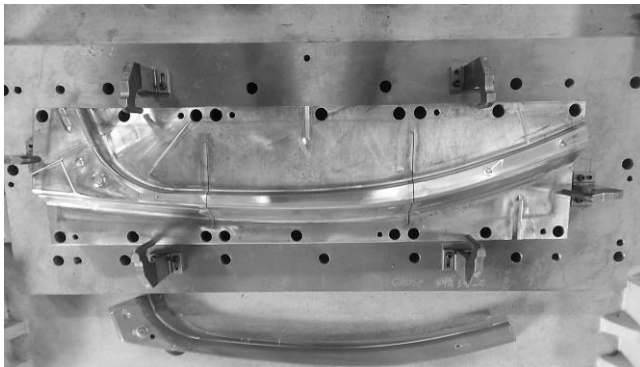
(b) Specific heat

Fig. 1 Thermal properties of STD61 and W600

해석에 사용된 금형의 열물성들은 열역학 기반 물성 계산 프로그램 JMatPro를 사용하여 계산하였다. 계산된 열물성 중 대표적으로 열전도율과 비열을 Fig. 1에 나타내었다. 열전도율은 W600이 STD61에 비하여 상온에 서는 2배 가까이 높게 나타났으며 비열은 약간 낮은 수준을 보였다.



(a) Upper die



(b) Lower die

Fig. 2 Manufactured hot stamping die for front pillar.

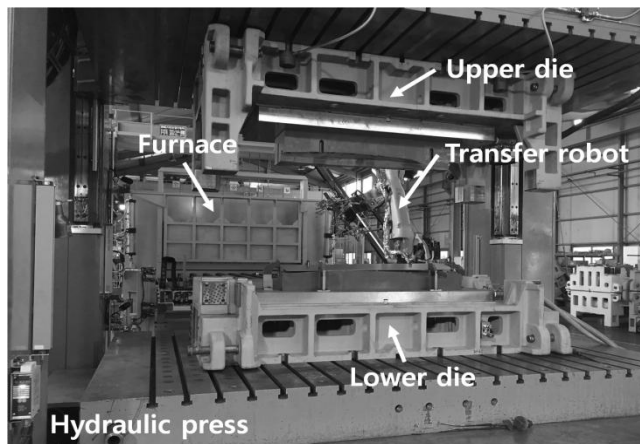


Fig. 3 Hot stamping equipment.

2.2 금형 제작 및 실험

본 연구에서의 대상 부품은 자동차용 프론트 필러(front pillar)이다. STD61과 W600 소재를 사용하여 동일한 금형을 제작하였으며, 곡선형 냉각 채널을 가진다. 그 형상을 Fig. 2에 나타내었다. 제작된 금형을 가지고 Fig. 3에 나타난 핫스탬핑 설비로 시제품 제작 및 실험을 진행하였다. 가열로에서 가열된 블랭크를 로봇을 사용하여 금형으로 이송하였다. 블랭크가 금형에 안착 후 유압프레스를 사용하여 700톤의 하중으로 성형하였으며, 이후 금형을 닫아둔 상태로 블랭크를 냉각하였다. 냉각 시간은 1~10초로 조절하였으며, 냉각이 완료되면 금형을 열고 열화상 카메라로 블랭크의 온도를 측정하였다.

2.3 열유동해석

핫스탬핑 금형의 냉각 성능은 냉각 채널과 형상면과의 거리, 냉각수의 온도와 속도에 의해 결정된다. 핫스탬핑 공정 중에 냉각수의 온도 증가는 20°C 내외로 블랭크 소재를 오스테나이트화(austenitization) 하기 위해 가열하는 온도 (약 900°C)에 비하면 높지가 않아 그 영향이 미미하다. 따라서 채널 위치에 따른 형상면과의 거리 및 냉각수의 속도가 냉각 성능을 파악할 수 있는 가장 일반적이 지표가 된다.

냉각 성능을 잘 파악하기 위해서는 냉각 채널의 냉각수와 금형 간, 가열된 블랭크와 금형 간의 열전달을 동시에 해석하여 실제 블랭크 소재가 냉각되는 온도를 예측하는 것이 요구된다. 블랭크, 금형, 냉각수 3개의 대상물이 연계된 열전달해석 방식을 본 연구에서는 3상 해석이라 칭하기로 한다. 이 3상 해석은 냉각수의 유동부터 블랭크 소재의 온도 분포까지 확인할 수 있어 금형 설계의 성능 검증을 위한 엄밀한 모델이라 할 수 있다.

Fig. 4에 하형(lower die)에 적용된 곡선형 냉각 채널 형상을 나타내었다. 냉각 채널들이 직선적이지 않으며, 금형의 형상면을 따라서 곡선형으로 설계되어 있음을 알 수 있다. 상형(upper die)도 동일한 방법으로 냉각 채널을 설계하였다.

이전 연구에서 핫스탬핑 공정의 냉각 해석을 블랭크, 금형, 냉각수 간의 상호 열전달을 고려한 3상 해석으로 진행한 바 있다[7]. 냉각수는 입구와 출구의 압력 차이(입구 3.3bar, 출구 1.1bar)에 의해 유동이 발생하고 금형을 냉각한다. 금형과 블랭크는 접촉된 상태에서 열전도에 의해 열전달이 이루어진다.

각 상의 초기 조건은 테스트 조건과 유사하게 설정하기 위해 실험에서 측정된 값을 적용하였다. 가열된 블랭크의 온도는 금형에 안착시키는 이송 과정 동안 냉각이 일어나는 것을 고려하여 성형 직전에 열화상 카메라로 측정된 평균온도인 475℃를 사용하였다. 금형과 냉각수의 초기 온도는 양산 공정이 아닌 테스트 상황을 적용하여 20℃로 설정하였다.

열유동해석에서는 고체와 고체 간의 접촉에 따른 열전달 현상을 완전 접촉에 따른 열전도로 표현한다. 따라서 금형과 소재 간의 접촉에서 열전도가 실제보다 과도하게 일어난다. Fig. 5는 FlowVision®의 SGGR(Sub-Grid Geometry Resolution) 기능으로 나눈 격자 단면이다. 형상의 경계를 사용한 그리드를 생성함으로써 전체적인 그리드 수를 줄일 수 있다. 금형, 블랭크, 냉각 채널의 그리드가 각 상 별로 구분되지만 그 사이는 틈 없이 완전 접촉 상태로 접촉된 것을 볼 수 있다. 따라서 실제 공정에서 나타나는 금형과 블랭크 간의 부분 접촉을 표현할 수 없다. 이러한 이상적인 접촉 조건은 블랭크와 금형 간의 과도한 열전달을 발생시켜 블랭크의 냉각을 과도하게 계산되도록 한다. 이를 보완하는 방법으로 블랭크와 금형 간의 접촉 열전달 계수를 보정하는 방법을 사용하였다. 접촉 열전달 계수는 압력에 영향을 크게 받는 것으로 알려져 있으며, 조건 변화에 따른 특성 연구가 진행되었다[10,11,12]. 700톤의 압력을 가하는 본 실험에서 금형이 받는 압력은 14.5MPa이며, 그에 따른 접촉 열전달 계수는 3,000 W/m²℃로 판단된다. 해당 접촉 열전달 계수를 해석에 적용하여 금형과 블랭크가 접촉하는 면의 경계 조건으로 적용하였다.

3. 결과

Fig. 6에 STD61과 W600 금형 소재를 적용했을 경우에 냉각 시간에 따른 블랭크 온도 해석 결과를 나타냈다. STD61에 비해서 W600의 경우에 전반적으로 냉각 성능이 우수하다. 블랭크의 냉각이 시작되는 초기에는 유사한 온도를 나타내다가 냉각 시간이 증가할수록 온도 차이는 증가한다. 10초의 공정시간 동안 W600을 사용한 금형이 블랭크를 22℃ 더 냉각시킨다. 온도를 기준으로 비교하면 STD61로 10초간 냉각한 온도를 W600을 사용하면 7초가 소요된다.

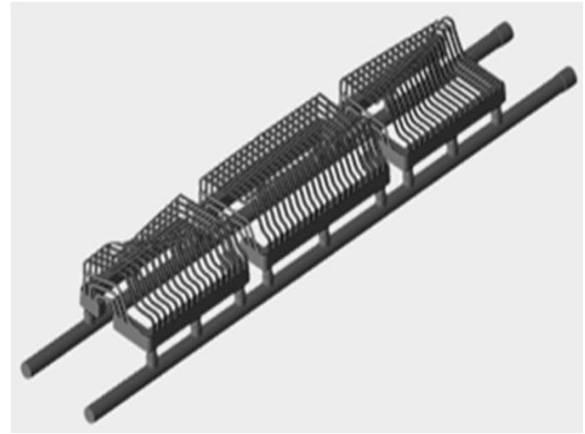


Fig. 4 Curve type cooling channel of lower die.

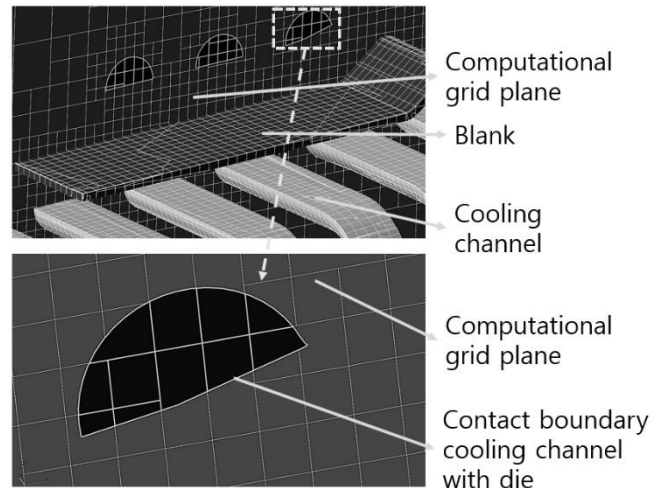


Fig. 5 Computational grid of 3-phase.

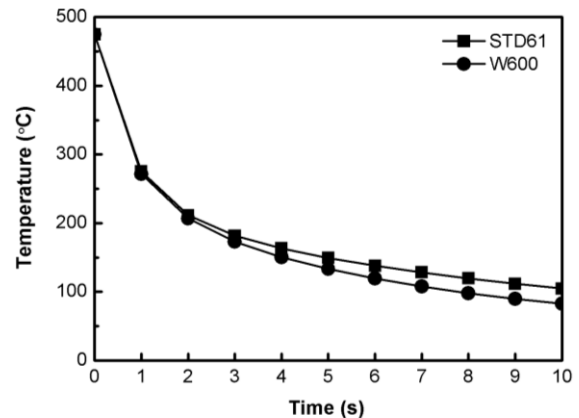


Fig. 6 Blank temperature variation with cooling time.

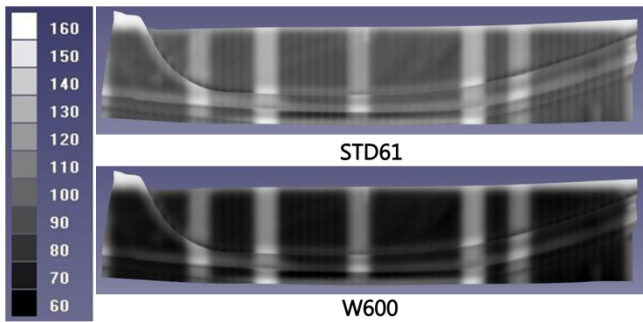


Fig. 7 Blank temperature contour at 10 second.

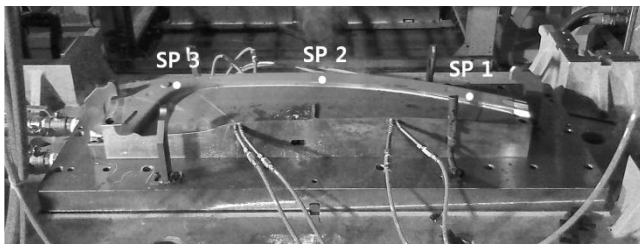
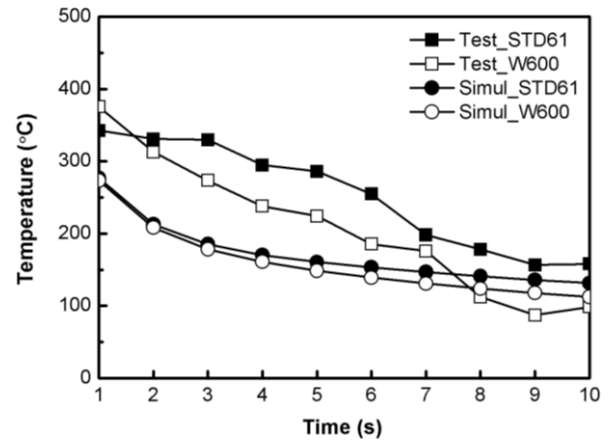


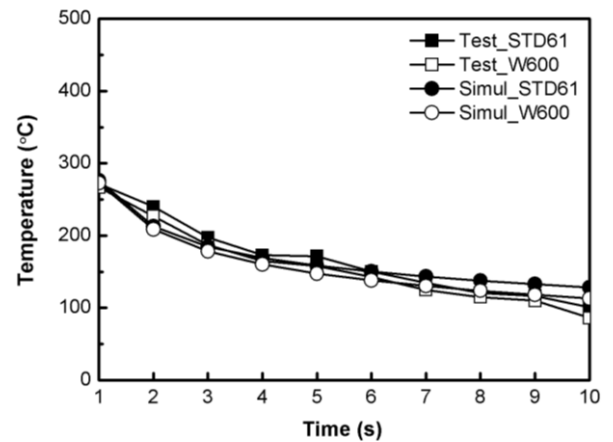
Fig. 8 Temperature measurement points.

Fig. 7은 10초의 공정시간이 되었을 때, 블랭크의 온도를 나타낸다. W600 소재 금형의 경우에는 전반적으로 블랭크 온도가 낮게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 이는 W600 소재의 열전도 특성이 우수하여 블랭크의 열을 냉각 채널 쪽으로 빨리 전달하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 곡선형 냉각 채널이 일정한 간격으로 배열되어 있어 블랭크의 온도 분포가 상당히 균일하다. 하지만 냉각 채널이 존재하는 블록 사이에 다소 넓은 구간의 온도는 비교적 높게 나타났다.

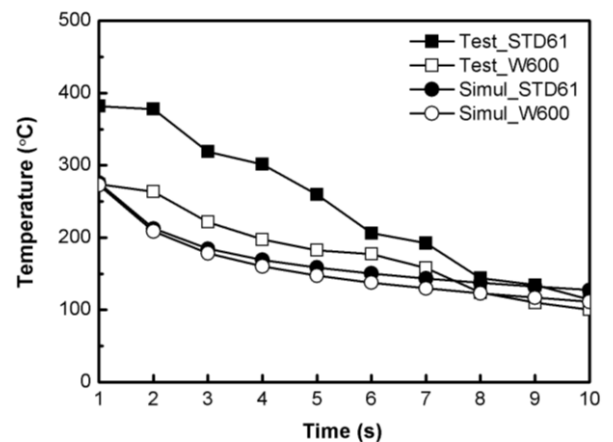
실험에서 측정된 온도 결과와 열유동해석 결과를 비교하였다. Fig. 8에 나타난 위치 SP1, SP2, SP3에서 온도를 측정하고 해석에서 동일한 위치의 온도를 추출하여 비교하였다. Fig. 9는 10초까지 냉각 시간 동안 초 단위로 온도를 측정하여 실험과 해석을 비교한 그래프이다. Test_W600과 Test_STD61은 실험에서 측정된 결과이며 Simul_W600과 Simul_STD61은 해석으로 계산된 결과를 나타낸다. 3개의 측정 위치에서 해석과 실험 모두 STD61에 비해서 W600을 사용하였을 때 블랭크의 온도가 더 낮은 것을 알 수 있다. 우수한 열전도율을 가지는 금형 소재의 사용으로도 블랭크의 냉각을 더 빠르게 할 수 있음을 알 수 있다. SP2에서는 실험과 해석이 거의 유사한 경향을 나타내고 있지만 SP1, SP3에서는 다소의



(a) SP1



(b) SP2



(c) SP3

Fig. 9 Temperature comparison between test and simulation at three points

차이를 난다. 이러한 차이는 실험에서 사용된 비접촉식 열화상 카메라의 측정오차, 금형과 블랭크의 국부적인 접촉 불량 등 여러 가지 실험적 오차들이 합산되어 해석과 실험의 차이를 나타냈다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 핫스탬핑 공정에서의 균일한 냉각과 시간 단축을 위한 방안으로 고열전도율 금형 소재의 영향을 검토하였다. 실제 제품을 대상으로 금형을 제작하고 시제품을 제작함으로써 금형 소재 변경에 따른 효과를 확인하였다. 고열전도율 금형 소재인 뵈흘러 사의 W600은 기존 STD61 대비 상온에서 열전도성이 약 2배 정도 우수하였으며, 실제 핫스탬핑 공정에서도 블랭크의 냉각 속도를 빠르게 하는 효과를 나타냈다. 10초 냉각 시간에서 W600이 블랭크 온도를 약 22°C 더 냉각하였다. 이런 빠른 냉각 성능은 양산 적용 시, 생산 시간 단축을 기대할 수 있다.

열유동해석의 경우 실험 결과와 다소의 차이를 나타내고 있지만 블랭크의 온도값 및 온도 분포를 거의 유사하게 예측할 수 있음을 확인하였으며, 열유동해석을 통한 냉각 시간 예측이 유용하리라 판단된다.

후 기

본 연구는 지역특화산업육성 기술개발사업-자동차 초고강도 부품의 변형제어 및 급속-균일냉각 핫스탬핑 금형시스템 개발(R0003692)의 일환으로 수행된 연구결과입니다.

REFERENCES

- [1] S. Y. Lee, K. Lee, Y. H. Lim, W. C. Jeong, 2013, Study on Heat Transfer Characteristic in Hot Press Forming Process, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 22, No. 2, pp. 101~107.
- [2] S. M. Hong, S. Y. Ryu, J. K. Park, S. J. Yoon, K. J. Kim, H. Y. Kim, 2009, *Proc. Kor. Soc. Tech. Plat. Conf.*, Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, pp. 367~370.
- [3] H. Hoffmann, H. So, H. Steinbeiss, 2007, Design of Hot Stamping Tools with Cooling System, *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, Vol. 56, No. 1, pp. 269~272.
- [4] Y. H. Han, K. Lee, C. H. Suh, J. J. Lee, Y. H. Lim, 2015, *Proc. Kor. Soc. Tech. Plat. Conf.*(editor: Y. H. Son), Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, pp. 101~104.
- [5] Y. Li, L. Ying, P. Hu, D. Shi, X. Zhao, M. Dai, 2013, The 11th Int. Conf. on Numer. Methods in Ind. Form. Process(editor: S. H. Zhang), AIP Publishing, Shenyang, China, pp. 471~177.
- [6] T. Lin, H. W. Song, S. Zhang, M. Cheng, W. Liu, 2014, Cooling Systems Design in Hot Stamping Tools by a Thermal-fluid-mechanical Coupled Approach, *Adv. Mech. Eng.*, Vol. 6, pp. 1~12.
- [7] K. Lee, J. J. Lee, C. H. Suh, 2016, Evaluation of Cooling Capability of Hot Press Forming Die with Thermal CFD Simulation, *Trans. Mater. Process.*, Vol 25, No. 4, pp. 242~247.
- [8] J. W. Kum, O. J. Park, S. M. Hong, 2016, Tough High Thermal-Conductivity Tool Steel for Hot Press Forming, *J. Kor. Soc. Manuf. Process. Eng.*, Vol 15, No 3, pp.111~114.
- [9] S. H. Cha, P. K. Seo, J. D. Nam, M. S. Ahn, K. W. Won, 2014, *Proc. Kor. Soc. Tech. Plat. Conf.*, Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, pp. 111~114.
- [10] J. Cui, C. Lei, Z. Xing, C. Li, 2012, Microstructure Distribution and Mechanical Properties Prediction of Boron Alloy During Hot Forming using FE Simulation, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 535, pp. 241~251.
- [11] P. Bosetti, S. Bruschi, T. Stoehr, J. Lechler, M. Merklein, 2010, Interlaboratory Comparison for Heat Transfer Coefficient Identification in Hot Stamping of High Strength Steels, *Int. J. Mater. Form.*, Vol. 3, No. 1, pp. 817~820.
- [12] N. H. Kim, C. G. Kang, 2010, The Prediction of Interfacial Heat Transfer Coefficient According to Contact Time and Pressure in Forging and Casting Die Materials for the Hot Press Forming, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 19, No. 6, pp. 378~386.