

유한요소해석을 이용한 핫스탬핑 공정시 발생하는 온도 이력 및 상변태 해석

윤승채[#] · 김도형¹

Analysis of Phase Transformation and Temperature History during Hot Stamping Using the Finite Element Method

S. C. Yoon, D. H. Kim

(Received January 23, 2013 / Revised May 7, 2013 / Accepted May 13, 2013)

Abstract

Hot stamping, which is the hot pressing of special steel sheet using a cold die, can combine ease of shaping with high strength mechanical properties due to the hardening effect of rapid quenching. In this paper, a thermo-mechanical analysis of hot stamping using the finite element method in conjunction with phase transformations was performed in order to investigate the plastic deformation behavior, temperature history, and mechanical properties of the stamped car part. We also conducted a fully coupled thermo-mechanical analysis during the stamping and rapid quenching process to obtain the mechanical properties with the consideration of the effects of plastic deformation and phase transformation on the temperature histories at each point in the part. The finite element analysis could provide key information concerning the temperature histories and the sheet mechanical properties when the phase transformation is properly considered. Such an analysis can also be used to determine the effect of cyclic cooling on the tooling.

Key Words : Hot Stamping, Finite Element Method, Cyclic Cooling, Phase Transformation, Temperature History

1. 서론

최근 자동차 분야의 지속적인 원자재 가격 상승과 전세계적으로 강화되고 있는 자동차 안전 규제에 효과적으로 대응하기 위한 차량 경량화 및 차체 충돌 안전성이 높은 차량의 연구 개발이 활발하게 진행되고 있다. 이에 따라 많은 연구 그룹에서는 자동차 시장에서의 급변하는 시장 환경에 대해 국제적 경쟁력을 갖추기 위한 수요자 중심의 자동차 생산 및 신차 개발 기술에 집중하고 있다. 이와 같은 다원적인 요구에 효과적으로 부응하기 위해 자동차 주요 구조부

재에 고장력강판의 적용 비율을 높이고자 하는 연구가 적극적으로 이루어지고 있다[1~14]. 이로 인해 기존에는 고장력강판에 대해 냉간 성형 공정을 통해 차체 주요 구조부재를 제조하는 기술이 연구되어왔으나, 고장력강판의 성형 시 발생하는 스프링백 현상 및 높은 하중 발생으로 인한 금형 수명 단축 등의 물리적 현상들이 동반됨으로 소재를 비롯한 공정 및 성능에 이르기까지의 다양한 연구가 선행되어야 하는데, 자동차 개발 추세에 대한 대응이 적절하지 못한 실정이다[1~6]. 이를 극복하기 위해 많은 관련 연구가 진행되고 있는데, 무엇보다 소재개발 측면에서는

1. 현대하이스코 기술연구소 선행연구1팀
Corresponding author : Hyundai HYSCO, Advanced Technology R&D team 1, E-mail: scyoon@hysco.com

알루미늄합금[7], 마그네슘합금[8] 등의 경량 소재의 활용이 두드러지고 있다. 알루미늄 및 마그네슘의 경우, 강에 비해 차체 중량을 줄이는데 효과적인 측면을 가지고 있는 반면, 가격 경쟁력이 낮고 성형성이 철강소재에 비해 우수하지 못함으로 적용 가능한 차체 부품이 제한적이다. 이와 달리 공정개발 측면에서는 하이드로포밍, 용접블랭크 및 핫스탬핑 공정들의 연구개발이 이루어지고 있는데, 그 중 핫스탬핑 공정은 열간 성형을 통해 강도와 연신을 충분히 확보할 수 있는 장점 때문에 많은 각광을 받고 있다[8~23].

특히, 핫스탬핑 공정의 경우 냉간 상태에서 이루어지는 것과 달리 충분한 고온 상태인 Ac3 변태 온도에서 성형이 이루어짐으로 소재 연신율을 충분히 활용할 수 있기 때문에 성형성에 대한 제한이 적을 뿐만 아니라 소재의 열처리 효과를 부여함으로 고온에서의 완전 오스테나이트 조직에서 마르텐사이트 조직으로의 변태를 통해 성형시 발생 가능한 스프링백을 최소화하는 동시에 최근 자동차 개발 기술 추세에 부합하는 초고강도 특성을 얻을 수 있음으로 이와 관련된 소재 및 제조 공정에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 핫스탬핑과 같은 성형 및 열처리가 복합적으로 이루어지는 공정의 경우 다양한 공정 조건이 존재함을 고려해야 하는데, 이는 가공 공정 조건에 따라 그 소재의 기계적 특성이 의존적으로 다르게 발생하기 때문이며 이와 같은 공정을 통해 최적의 성능을 얻기 위해서는 그 공정 조건 및 변수에 관한 연구가 반드시 선행되어야 할 필요가 있다[10, 24~37].

이에 본 연구에서는 그 동안 소재에 대해 국한적으로 이루어졌던 연구에서 벗어나 열처리 공정시 발생하는 소재의 상변태 현상에 대해 유한요소해석을 통해 물리적 특성을 고찰할 뿐만 아니라, 반복적으로 수행되는 핫스탬핑 공정으로 인해 누적되는 금형 온도 변화에 대해 고찰하고자 한다[10, 24~37].

2. 구성 모델 및 유한요소 해석

핫스탬핑 성형시 발생하는 현상들은 열전달을 비롯한 관재의 소성변형 및 급랭으로 인한 상변태를 동반하게 되는데 이와 같은 현상들은 서로 독립적으로 발생하는 것이 아니라 상호 영향을

주는 결합의 문제이기 때문에 전반적으로 고려된 해석이 요구된다[16~31]. 기존의 열전달과 변형현상만 결합하는 해석을 통해 냉각속도를 산출하고 이를 기반으로 하는 연속냉각곡선으로부터 국부적 미세조직 및 기계적 성질을 도출하는 형태의 반 결합상태의 해석법을 활용하였으나 [16~20], 본 연구에서는 상변태까지 고려 가능한 완전결합해석법을 추구하고자 하였다. 확산 형태의 상변태를 결합하는 해석 방식을 활용하였는데, 이를 위한 구성 모델의 경우 이전의 상의 내부에서 새로운 상의 핵 생성 및 성장을 기반으로 하고 있으며 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다 [24~28].

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\bar{P} - P}{TR} \quad (1)$$

여기서 P는 상분율이며, t는 시간, T 온도, \bar{P} 는 평형상태의 상분율, TR은 시간 지연 항으로 표현 가능한 동시에 온도의 함수로 나타낼 수 있다. 실제적으로 여러 상변태가 소재 내부에서 발생하기 때문에, 그에 따른 발생률은 다른 상 생성에 의존하게 된다. 따라서 식 (2)와 같이 각 생성 속도를 나타내는 것이 가능하다.

$$\frac{dP}{dt} = -\sum_{j \neq i} A_{ij}(j = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

여기서 A_{ij} 는 상 i에서 j로의 시간에 따른 변태를 표현할 수 있으며, A_{ij} 의 항은 변태 현상을 의미하는 K에 의존적으로 생성되는 것을 식 (3)과 같이 알 수 있다.

$$A_{ij} = (K_{i \rightarrow j} P_i) - (K'_{i \rightarrow j} P_j) \quad (3)$$

$K_{i \rightarrow j}$, $K'_{i \rightarrow j}$ 는 상 i에서 j로 변태하는 현상을 의미하며 식 (4)와 같이 온도와 냉각 속도에 의존적으로 표현할 수 있다. 여기서 F는 각 변태현상에 대한 가중치 변수에 해당한다.

$$\begin{aligned} K_{i \rightarrow j} &= K(\Theta)F(\dot{\Theta}) \\ K'_{i \rightarrow j} &= K'(\Theta)F'(\dot{\Theta}) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $P_{eq}(\Theta)$ 과 $\tau(\Theta)$ 로 또한 사용될 수 있는데, 이는 평형상태의 분율과 시간지연의 항이고, 각 상들의 총 합이 1임을 고려하여 식 (5)과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_{ij} = \underbrace{K_{i \rightarrow j}}_{\frac{P_{eq}}{TR}} - \underbrace{(K_{i \rightarrow j} + K'_{i \rightarrow j})}_{\frac{P_2}{TR}} P_j \quad (5)$$

앞에서 언급한 바와 같이, $K_{i \rightarrow j}$ 는 위의 식으로부터 식 (6)와 같이 표현이 가능하다.

$$K_{i \rightarrow j} = \frac{P_{eq}}{TR} \quad (6)$$

이를 대입하여 P_2 와 $K'_{i \rightarrow j}$ 로 다시 정의하여 식 (7)과 같이 표기할 수 있다.

$$K'_{i \rightarrow j} = \frac{I}{TR} - \frac{P_{eq}}{TR} = \frac{I - P_{eq}}{TR} \quad (7)$$

식 (7)으로부터 TR 를 구하기 위해 정리하여 식 (8)과 같이 표현할 수 있으며, 이를 기초로 각 $K_{i \rightarrow j}$, $K'_{i \rightarrow j}$ 을 온도와 냉각속도의 함수로 나타낼 수 있다.

$$TR = \frac{I}{K_{i \rightarrow j} + K'_{i \rightarrow j}} \quad (8)$$

앞에서 언급한 식 (7)과 (8)을 통해 TR 의 함수에 대해서 각 항을 대입하여 식(9)과 같이 표현이 가능하게 되고, 냉각 속도에 따른 변태에 대한 가중치 변수 F , F' 를 도입하여 정리가 가능하다. 여기서 F , F' 가 같다고 가정하면, 식 (10)와 같이 상 생성율을 정리할 수 있다 [24~28].

$$TR = \frac{\tau}{P_{eq} F + (I - P_{eq}) F'} \quad (9)$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{P_{eq} - P}{\tau(\Theta)} F(\dot{\Theta}) \quad (10)$$

생성되는 상 P 가 평형상태로 가까워지거나, τ 가 크고 F 가 작을 때, 새로운 상의 생성 속도는 작아지게 되고, 여기서 τ 는 주어진 온도에서의 냉각속도의 영향을 따라 반응하게 된다. 본 구성 모델의 경우 실제 연속냉각곡선의 실험[16]과 비교함을 통해 구체적인 가중치 인자들을 설정해야 한다 [28].

한편, 마르텐사이트 변태경우 경우 상 생성이 냉각되는 시점의 온도에 의존적으로 반응하며, Koistinen-Marburger의 이론에 기초하여 식 (11)과 같이 나타내었다[22~31].

$$P(\Theta) = P(I - e^{b(\Theta - Ms)}) \quad (11)$$

여기서 P 는 냉각됨에 따라 발생하는 상변태 가능 분율이며, Ms 와 b 는 상변태 시작 온도와 생성율을 각각 나타내는 항이며 실험적 결과를 기반으로 그 값을 얻을 수 있다.

해석 조건으로는 성형 후 급랭의 시간은 15초 설정하였고, 이송시간은 대략 8초로 고려하였다. 블랭크의 초기 온도는 약 930℃로 설계하였고, 성형을 위한 급형 속도는 약 350mm/s로 가정하였으며, 제품의 전체 높이가 약 60mm임을 감안할 경우, 전체 성형 시간은 약 0.17초에 해당하게 된다. 또한 사용한 판재의 재료소화 단계를 5 수준으로 하였으며, 초기 요소 크기는 약 10mm이다. 본 연구에서 사용된 소재는 최근 핫스탬핑용으로 많이 활용되는 있는 보론강을 기준으로 하였고, 주요 조성은 0.2C-0.1Si-1.4Mn-0.5Cr-0.01Mo-0.002B이다[14~22]. 보론의 경우, 미소량만으로 결정립계의 편석을 유도하여 강의 경화능을 크게 증가시키는 것으로 보고된 바가 있다[14~22]. 이와 같은 실험적 기반을 바탕으로 상용 코드인 Pam Stamp를 활용하여 핫스탬핑 공정을 해석하였다[17, 20]. 차량 경량화를 위해 적용되고 있는 차체 주요구조부재와 유사한 형태를 가지는 금형을 대상으로 하였으며, Fig. 1은 핫스탬핑의 성형해석을 위한 개략도를 나타낸 것이다. 해석에 사용된 금형 재질은 S45C로 하였으며, 열전도도는 약 43W/mk, 열용량은 473J/KgK, 그리고 밀도는 7850Kg/m³이며 탄성계수는 210GPa로 하였다. 공정이 진행되는 분위기 온도는 약 20℃로 일정하게 하였으며, 참고 문헌[16]를 근거로 판재와 공기 사이의 열전달계수는 20W/m²K로 하였고 판재와 금형 사이의 열

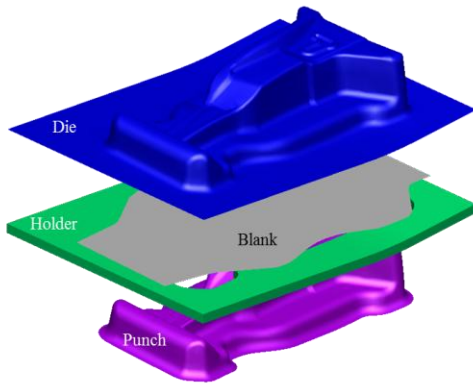


Fig. 1 Hot stamping illustration

Table 1 Thermal properties of boron steel at various temperatures[16]

Thermal Conductivity	Temp.	400	600	800	1000
	W/mK	39.8	34.3	26.4	27.2
Specific Heat	Temp.	400	600	800	1000
	J/KgK	590	741	821	821
Thermal Expansion Coefficient	Temp.	400	600	800	1000
	$10^{-6}/K$	13.87	14.72	12.11	13.67

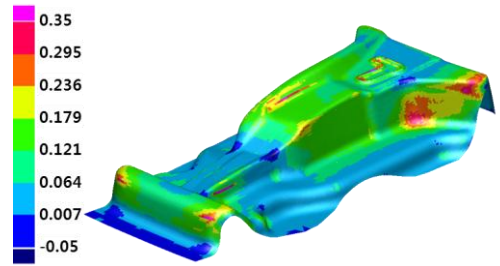
전달계수는 약 $650W/m^2K$ 로 사용하였다. 반면, 보론강의 열적 특성을 온도의 함수로 표 1과 같이 표기하였다[16]. 또한 열간 성형임을 고려하여 마찰은 약 0.3의 값을 활용하였으며, 이때 발생하는 기계적 특성은 기존에 연구된 결과를 바탕으로 참조하여 수행하였다[16~20].

3. 결과 및 고찰

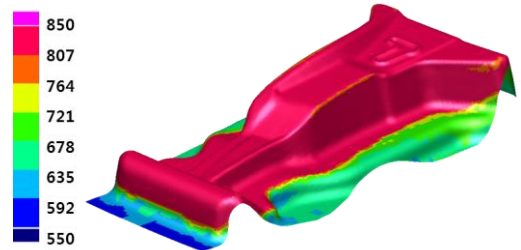
3.1 핫스탬핑 공정에 따른 판재의 온도 및 상변태

Fig. 2는 핫스탬핑 공정 중 급랭 공정이 시작되기 직전의 프레스 공정이 완료된 상태의 결과이다. (a)는 전체적인 두께 감소율을 나타내며, (b)는 온도 분포를 나타내고 있다. 두께 감소율이 대략 35% 정도 발생되는 것을 확인할 수 있으나, 본 공정이 완료된 실물 (c)와 비교하여 볼 때, 파단으로부터 양호한 결과임을 알 수 있다[17, 20].

또한 온도 분포의 경우, 판재가 홀더 부분과 상부 급형에 먼저 접촉하는 영역에서 1차적으로 선



(a) Thinning distribution



(b) Temperature distribution at end of stamping process



(c) Experimental result of mini size car part

Fig. 2 Calculated and experimental geometry of hot stamping process

냉각이 시작되는 것을 관찰할 수 있으며, 급랭 공정 전에는 전반적으로 판재의 온도가 마르텐사이트 변태 온도 이상의 높은 값으로 분포하고 있음을 알 수 있는데, 그 온도가 국부적으로 대략 $650^{\circ}C$ 까지 냉각되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3은 핫스탬핑 공정에서 냉각 공정까지 완료 후 전체적인 온도 분포를 나타내는 것인데, 전체적인 온도 분포가 약 $70\sim 130^{\circ}C$ 범위의 분포를 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 보다 전체적인 냉각 공정에 의한 온도 분포를 고찰하기 위해 Fig. 4와 같이 급랭에 따른 초 단위의 온도 분포를 나타내었다. 냉각이 시작되기 직전인 0초일때는 판재에서 홀더 부분과 접촉하는 영역에서 먼저 냉각되고 있음을 알 수 있으며, 시간이 경과함에 따라 판재 전체적으로 온도가 급속도로 냉각되는 것을 확인

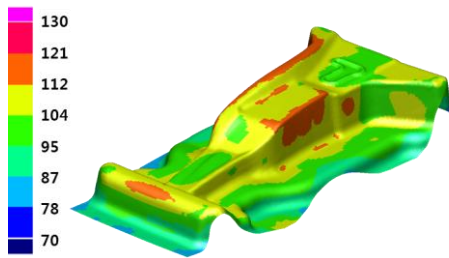
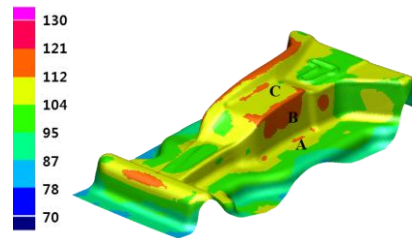


Fig. 3 Calculated temperature distribution after quenching process



(a) Tracked points on the blank

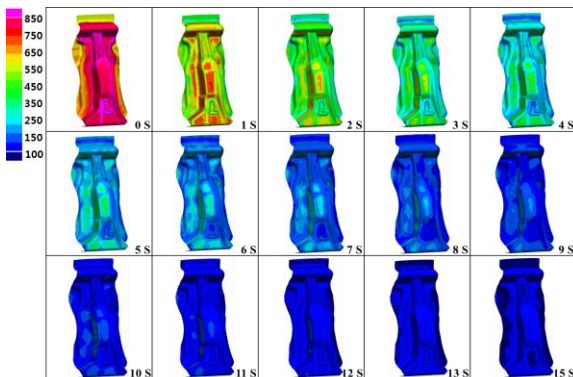
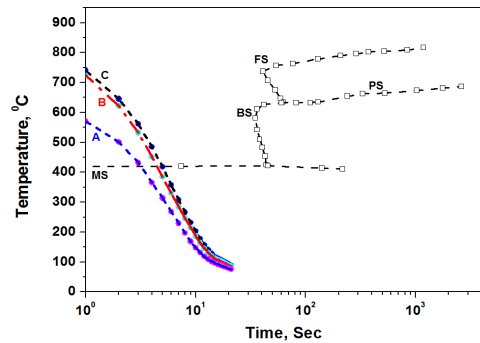


Fig. 4 Calculated temperatures distributions at various process times on the blank part

할 수 있다[17]. 또한 약 8 초 이후에는 부품의 전체적인 온도 분포가 마르텐사이트 변태시작 온도 이하로 냉각되는 것을 관찰할 수 있으며 점차적으로 냉각속도가 둔화되는 것을 확인할 수 있었다. 약 11초 구간에서는 성형 완료된 부품의 가장 상부 부분에서 최종적으로 온도가 가장 늦게 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 대략 12초 이후에는 전체적인 부품의 온도 분포가 150℃ 이하로 나타나는 것을 확인할 수 있다[16,17,20]. 이를 보다 명확히 확인하고자, Fig. 5에서는 최종 공정 완료된 부품의 온도 분포를 각각 A, B, C 지점에서 표기하였으며, 본 연구를 위해 실험적으로 사용된 연속냉각곡선과 핫스탬핑 시 발생하는 각 지점에서의 온도 변화를 함께 표기하였다. A 지점의 경우, 가장 먼저 냉각된 홀더와 접촉을 하기 때문에 프레스 공정 이후에 온도가 대략 560℃까지 냉각되며 이후 급속하게 온도가 냉각되는 것을 확인할 수 있다. 반면, B와 C 지점은 매우 유사한 형태를 나타내고 있음을 알 수 있는데, B 지점의 경우,

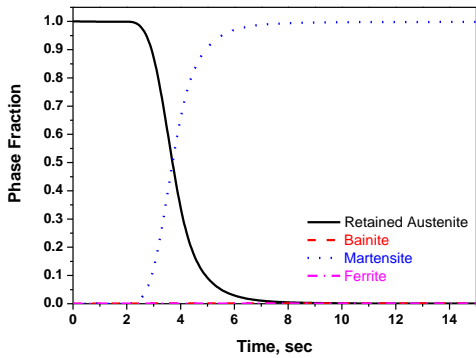


(b) Continuous cooling temperature curves of the boron steel

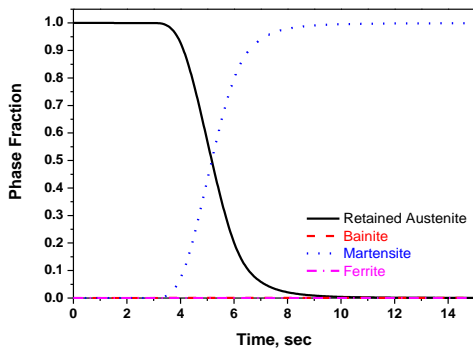
Fig. 5 Calculated temperature point tracking on the blank at the hot stamping process

먼저 마르텐사이트 변태 온도에 도달하고 이후에 C 지점이 마르텐사이트 변태 온도에 도달하여 상변태가 진행되는 것을 알 수 있다.

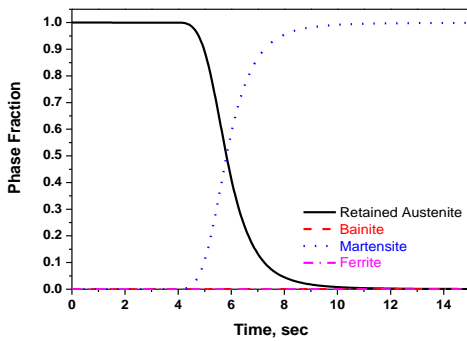
Fig. 6은 Fig. 5에서 표기한 A, B, C 지점에서의 시간에 따른 각 생성 상분율을 그래프로 나타내었다. A 지점에서는 약 2.4 초경에 마르텐사이트 변태가 시작되어 약 8 초에 완료가 되는 것을 확인할 수 있으며, 그 이외의 상들은 거의 발생하지 않음을 알 수 있다. B 지점의 경우에는 약 3.2 초에 마르텐사이트 변태가 시작되어 약 9.5초에 완료가 되는 것을 확인할 수 있으며, 마지막으로 C 지점의 경우에는 Fig. 5와 마찬가지로 가장 늦게 변태가 시작되어 약 11초 이후에 완료가 되는 것을 알 수 있었다. 전체적으로 마르텐사이트 분포가 지배적으로 분포하게 되며 그 이외의 상의 경우에는 매우 미미한 정도 분포하게 됨으로 전체적인 물성에 큰 영향이 없을 것으로 사료된다. Fig. 7은 핫스탬핑 공정이 완료된 이후에 상분포를 나타낸 것으로 (a)는 잔류 오스테나이트, (b)는 페라이트, (c)는 마르텐사이트이며, (d)는 베이나이트 분포이다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 전반



(a) Phase transformation at A Position



(b) Phase transformation at B Position



(c) Phase transformation at C Position

Fig. 6 Phase transformation fraction curves at various times (a) A position, (b) B position, (c) C position

적으로 마르텐사이트 조직이 분포하는 것을 확인할 수 있으며, 베이나이트는 국부적으로 약 0.0001% 이하로 존재하며, 페라이트 역시 0.00001% 이하로 국부적으로 발생되는 것으로 확인할 수 있는데,

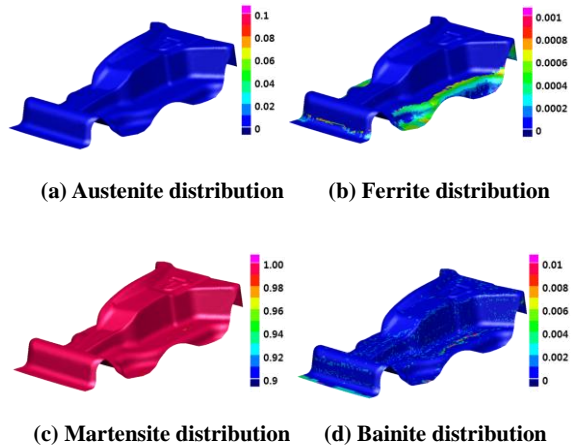


Fig. 7 Calculated phase transformation distribution after hot stamping process (a) retained austenite, (b) ferrite, (c) martensite, (d) bainite

이는 수치적 오류 인자로 판단할 수 있기 때문에 핫스탬핑 공정 완료 후 본 관제 부품의 경우 전체적인 마르텐사이트 조직을 가지게 되는 것으로 사료된다.

3. 2 핫스탬핑 공정에 따른 금형 온도 변화

기존의 해석에 있어서는 금형을 수냉으로 냉각시키기 때문에 온도가 크게 변화되지 않는다고 가정하여 해석 결과를 도출하였으나, 최근 차체 부품의 품질 및 금형 수명에 대한 보다 다양하고, 신뢰도 높은 결과가 요구됨에 따라 본 가공 공정에서 금형의 온도 변화를 고찰하고자 하였다. 일반적으로 금형의 표면에서 약 6mm 정도 깊이에 해당하는 곳에 수냉 채널이 존재함을 감안하여 본 연구에서는 6mm 두께를 고려한 Shell 타입의 요소를 통해 금형의 온도 변화를 해석하였다[10, 35~37]. Fig. 8은 각 초단위로 상부 금형의 온도 분포가 변하는 것을 나타낸 것으로 초기 약 70℃에 해당하는 금형의 온도가 핫스탬핑 공정 중 냉각 공정이 진행되어짐에 따라 관재로부터의 영향으로 온도가 증가 후 다시 감소하는 현상을 관찰할 수 있다. 또한 온도 해석 결과를 통해 약 70~150℃의 분포를 가지고 있음을 알 수 있다. 이를 보다 명확히 고찰하기 위해 Fig. 9는 핫스탬핑이 1회 공정 완료 후 A~E 지점을 각각 표기하여 열 변화 이력을 추적한 것이다. 관재와 홀더가 가장 먼저 접촉하는 A의 경우 온도가 약 95℃까지 상승 후 다시 감소하는 추세를 나타내며, 상부 금

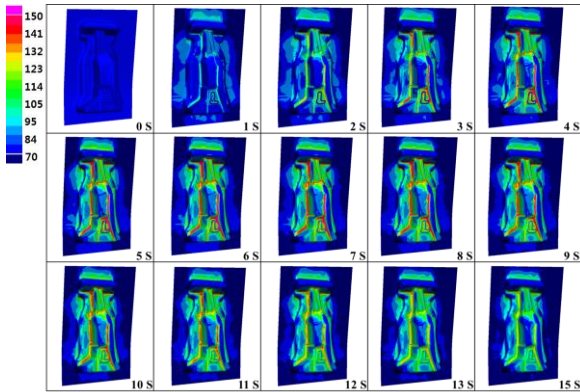
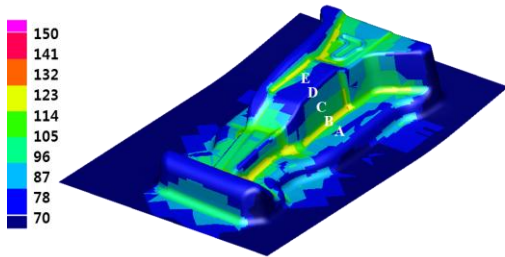
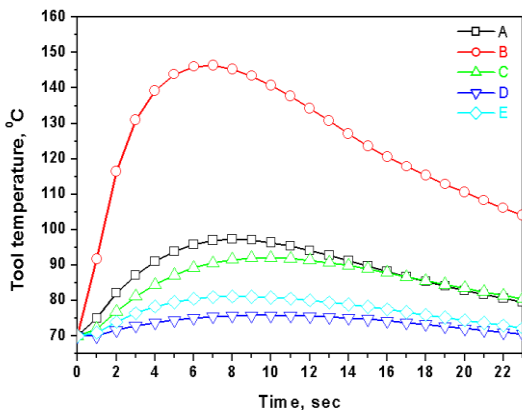


Fig. 8 Calculated temperatures distribution at various process times on the die part



(a) Tracked positions on the die



(b) Tool temperature history at each positions

Fig. 9 Calculated temperature distribution on the die tool part after hot stamping process

형의 측면부인 C 지점 역시 온도가 상승 후 약 10초 이후에 다시 감소하는 것을 알 수 있으나 B 지점 같은 경우에는 온도가 급속히 증가하여 약 150°C까지 증가하는 것을 알 수 있고 공정 완료

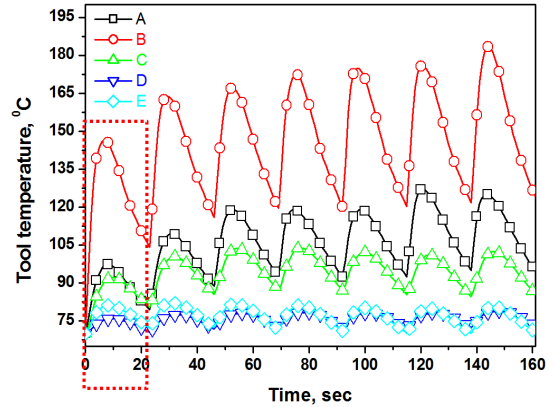


Fig.10 Tool temperature history as a function process time at each position on the die part during the cyclic cool hot stamping process

이후에도 약 100°C의 온도가 유지되고 있음을 확인할 수 있다. 그 외의 영역에서는 전반적으로 약 100°C이하로 유지되는 것을 관찰할 수 있다.

한편, 일반적인 프레스 공정은 1회 공정으로 끝나는 단속 공정이 아니라 양산성을 고려할 경우, 반복적으로 진행되는 공정이기 때문에, 단 1회의 공정으로 얻어진 결과를 전반적인 금형의 온도 분포로 평가하기에는 부족한 면이 있다[35, 36].

이에 본 연구에서는 반복 냉각으로 금형의 온도 변화를 고찰하고자 하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 핫스탬핑 공정을 15초, 판재 이송 시간을 8초 고려하여 총 23초간의 온도 변화를 1회로 규정하였으며, 이를 토대로 본 연구에서는 7회의 반복 냉각을 통해 온도 분포를 확인하고자 하였다. Fig. 10은 약 7회 반복공정을 수행한 이후에 Fig. 9에서 표기한 각 지점들의 온도 변화 이력을 추적한 그래프이며, 점선으로 Fig. 9에 해당하는 영역을 표기하였다. 먼저 본 금형에서 하부에 해당하는 A 지점의 온도 변화는 약 3회까지 증가하는 경향을 나타내었으며 그 분포는 약 95~120°C 사이에서 일정한 추세로 온도 변화가 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 반면, 본 금형의 측면부에 해당하는 C 지점은 약 90~100°C에 이르는 온도 분포가 반복적으로 이루어지고 있으며, 다른 부위와 같이 약 3회 이후에 일정한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이와 유사하게 Fig. 10의 금형의 상부에 해당하는 D, E는 대체적으로 낮은 온도 분포에서 일정한 경향을 나타내고 있으며, 초기 1회에는 D, E 지점이 온도 차이가 존재하나 3회 이

후에는 매우 유사한 형태의 그래프 변화를 나타내고 있다. 반면 B 지점의 경우, 온도의 변화율이 상당히 크게 나타나는 것을 관찰할 수 있는데, 1회 공정 완료 이후에도 100℃ 이상 금형의 온도가 유지되었으며 약 3회 반복공정까지 온도가 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 또한 온도의 증감의 분포가 국부적으로 다르게 발생할 수 있으나 대략 약 60℃에 해당하는 것을 관찰할 수 있다. 따라서 가장 많은 온도 변화가 나타나는 지점은 B, A, C, E, D 순으로 열거할 수 있으며, 이에 따라 판재의 냉각속도에 미치는 온도 영향이 다르게 발생되어 기계적 특성에 영향을 줄 수 있을 것으로 사료되며 이와 관련하여 향후 금형 온도 분포 변화로 인해 발생하는 누적되는 열 피로 특성 및 효과적인 냉각채널 설계에 대해 고찰하고자 한다.

4. 결론

최근 차량 경량화 연구의 일환으로 소재 분야에서 높은 고장력강으로의 대체를 위해 많은 연구가 이루어지고 있으며, 이와 관련하여 효과적인 경량화 및 충돌 특성 향상을 위한 연구가 다양한 방식으로 성취되고 있다. 특히 핫스탬핑 공법은 기존의 고장력강의 냉간 성형 시 발생하는 여러 단점들을 극복할 수 있는 공정을 제공함으로써 많은 각광을 받는 동시에 최근 차량 개발 경향과도 매우 부합되고 있다. 본 연구에서는 가공 공정에 의존적으로 반응하는 소재의 기계적 특성을 예측하고자 유한요소해석을 통해 핫스탬핑 공정 시 발생하는 금형 온도 변화 및 판재의 상변태 해석을 결합하여 그 결과를 고찰하였다.

(1) 기존에 반 결합상태에서 진행되어 온 해석에 대해 상변태 해석을 결합하여 열-온도-상변태에 해당하는 완전결합을 통해 판재와 금형에서 국부적으로 발생하는 현상을 고찰하고자 하였으며, 상변태 및 온도 변화에 있어서 국부적으로 다른 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있는데, 특히 금형의 홀더와 접촉하는 영역은 온도 변화 및 상변태가 선행적으로 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

(2) 본 연구에서 활용한 공정에서는 전체적으로 마르텐사이트 조직을 얻을 수 있을 것으로 사료되며, 국부적으로 부품 온도변화 양상이 다르게 발생되어지나, 보론강의 특성상 대부분의 영역에서 마르텐사이트 조직을 얻을 수 있음을 예측할

수 있었다.

(3) 핫스탬핑 공정은 반복적으로 이루어지는 공정으로서, 단일 해석으로는 그 온도 변화를 분명하게 예측하기 어려울 것으로 판단되며 이를 위해 반복 냉각 해석을 통한 금형의 온도 변화를 고찰하였다. 금형의 여러 지점에서 국부적인 온도 변화가 발생됨을 확인할 수 있으며, 온도 증감 폭이 큰 금형 영역에서 대략 60℃에 해당하는 것을 확인할 수 있었다.

REFERENCES

- [1] A. Nasser, A. Yadav, P. Pathak, T. Altan, 2010, Determination of the Flow Stress of Five AHSS Sheet Materials(DP 600, DP 780, DP 780-CR, DP 780-HY and TRIP 780) using the Uniaxial Tensile and the Biaxial Viscous Pressure Bulge (VPB) Tests, J. Mater. Process. Technol., Vol. 210, No. 3, pp. 429~436.
- [2] I. Mejía, A. Bedolla-Jacuinde, C. Maldonado, J. M. Cabrera, 2011, Hot Ductility Behavior of a Low Carbon Advanced High Strength Steel (AHSS) Microalloyed with Boron, Mater. Sci. Eng., A, Vol. 528, No. 13-14, pp. 4468~4474.
- [3] C. Nikhare, P. D. Hodgson, M. Weiss, 2011, Necking and Fracture of Advanced High Strength Steels, Mater. Sci. Eng., A, Vol. 528, No. 6, pp. 3010~3013.
- [4] T. Uemori, T. Okada, F. Yoshida, 2000, FE Analysis of Springback in Hat-Bending with Consideration of Initial Anisotropy and the Bauschinger Effect, Key Eng. Mater. Vol. 177-180, pp. 497~502.
- [5] D. W. Leu, 1997, A Smplified Approach for Evaluating Bendability and Springback in Plastic Bending of Anisotropic Sheet Metals, J. Mater. Process. Technol., Vol. 66, No. 1-3, pp. 9~17.
- [6] R. M. Cleveland, A. K. Ghosh, 2002, Inelastic Effects on Springback in Metals, Int. J. Plast., Vol. 18, No. 5-6, pp. 769~785.
- [7] M. M. Moshksar, S. Mansorzadeh, 2003, Determination of the Forming Limit Diagram for Al 3105 Sheet, J. Mater. Process. Technol. Vol. 141, No. 1, pp.138~142.
- [8] H. Takuda, T. Yoshii, N. Hatta, 2005, Modelling of Formula for Flow Stress of a Magnesium Alloy AZ31 Sheet at Elevated Temperatures, J. Mater.

- Process. Technol., Vol. 164-165, pp. 1258~1262.
- [9] M. Merklein, J. Lechler, T. Stoehr, 2009, Investigations on the Thermal Behavior of Ultra-High Strength Boron Manganese Steels within Hot Stamping, *Int. J. Mater. Form.*, Vol. 2, No. 1, pp. 259~262.
- [10] M. G. Lee, S. J. Kim, H. N. Han, W. C. Jeong, 2009, Application of Hot Press Forming Process to Manufacture an Automotive Part and its Finite Element Analysis Considering Phase Transformation Plasticity, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 51, No. 11-12, pp. 888~898.
- [11] M. Merklein, J. Lechler, M. Geiger, 2006, Characterisation of the Flow Properties of the Quenchenable Ultra High Strength Steel 22MnB5, *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, Vol. 55, No. 1, pp. 229~232.
- [12] R. Kolleck, R. Velt, M. Merklen, J. Lechler, M. Geiger, 2009, Investigation on Induction Heating for Hot Stamping of Boron Alloyed Steels, *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, Vol. 58, No. 1, pp. 275~278.
- [13] H. Liu, X. Lu, X. Jin, H. Dong, J. Shi, 2011, Enhanced Mechanical Properties of a Hot Stamped Advanced High-Strength Steel Treated by Quenching and Partitioning Process, *Scr. Mater.*, Vol. 64, No. 8, pp. 749~752.
- [14] Y. Chang, Z. Meng, L. Ying, X. Li, N. Ma, P. Hu, 2011, Influence of Hot Press Forming Techniques on Properties of Vehicle High Strength Steels, *J. Iron. Steel Res. Int.*, Vol. 18, No. 5, pp. 59~63.
- [15] H. N. Han, C. G. Lee, C. S. Oh, T. H. Lee, S. J. Kim, 2004, A Model for Deformation Behavior and Mechanically Induced Martensitic Transformation of Metastable Austenitic Steel, *Acta Mater.*, Vol. 52, No. 17, pp. 5203~5214.
- [16] H. S. Kim, M. H. Seo, S. J. Kim, S. C. Baik, W. J. Bang, H. R. Lee, 2001, Finite Element Analysis and Experimental Investigation on the Thermal Deformation Behavior of Steel Sheets during Press Hardening, *J. Kor. Inst. Met. Mater.*, Vol. 39, No. 9, pp. 1076~1083.
- [17] H. H. Bok, M. G. Lee, H. D. Kim, M. B. Moon, 2010, Thermo-mechanical Finite Element Analysis Incorporating the Temperature Dependent Stress-Strain Response of Low Alloy Steel for Practical Application to the Hot Stamped Part, *Met. Mater. Int.*, Vol. 16, No. 2, pp. 185~195.
- [18] A. Turetta, S. Bruschi, A. Ghiotti, 2006, Investigation of 22MnB5 Formability in Hot Stamping Operations, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 177, No. 1-3, pp. 396~400.
- [19] M. Merklen, 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.
- [20] H. H. Bok, M. G. Lee, E. J. Pavlina, F. Barlat, H. D. Kim, 2011, Comparative Study of the Prediction of Microstructure and Mechanical Properties for a Hot-stamped B-pillar Reinforcing Part, *Int. J. Mech. Sci.* Vol. 53, No. 9, pp. 744~752.
- [21] Z. W. Xing, J. Bao, Y. Y. Yang, 2009, Numerical Simulation of Hot Stamping of Quenchable Boron Steel, *Mater. Sci. Eng., A*, Vol. 499, No. 1-2, pp. 28~31.
- [22] D. P. Koistinen, R. E. Marburger, 1959, A General Equation Prescribing the Extent of the Austenite-Martensite Transformation in Pure Iron-carbon Alloys and Plain Carbon Steels, *Acta Metall.*, Vol. 7, No. 1, pp. 59~60.
- [23] S. Phadke, P. Pauskar, R. Shivpuri, 2004, Computational Modeling of Phase Transformations and Mechanical Properties during the Cooling of Hot Rolled Rod, *J. Mater. Process. Technol.* Vol. 150, No. 1-2, pp. 107~115.
- [24] J. B. Leblond, J. Devaux, J. C. Devaux, 1989, Mathematical Modelling of Transformation Plasticity in Steels I: Case of Ideal-plastic Phases, *Int. J. Plast.*, Vol. 5, No. 6, pp. 551~572.
- [25] J. B. Leblond, 1989, Mathematical Modelling of Transformation Plasticity in Steels II: Coupling with Strain Hardening Phenomena, *Int. J. Plast.*, Vol. 5, No. 6, pp. 573~591.
- [26] J. B. Leblond, G. Mottet, J. C. Devaux, 1986, A Theoretical and Numerical Approach to the Plastic Behaviour of Steels during Phase transformations-I. Derivation of General Relations, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 34, No. 4, pp. 395~409.
- [27] J. B. Leblond, G. Mottet, J. C. Devaux, 1986, A Theoretical and Numerical Approach to the Plastic Behaviour of Steels during Phase Transformations-II. Study of Classical Plasticity for Ideal-plastic Phases, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 34, No. 4, pp.

- 411~432.
- [28] J. B. Leblond, J. Devaux, 1984, A New Kinetic Model for Anisothermal Metallurgical Transformations in Steels Including Effect of Austenite Grain Size, *Acta Metall.*, Vol. 32, No. 1, pp. 137~146.
- [29] T. Reti, Z. Fried, I. Felde, 2001, Computer Simulation of Steel Quenching Process using a Multi-phase Transformation Model, *Comput. Mater. Sci.*, Vol. 22, No. 3-4, pp. 261~278.
- [30] T. Reti, G. Bagyinszki, I. Felde, B. Verö, T. Bell, 1999, Prediction of As-quenched Hardness After Rapid Austenitization and Cooling of Surface Hardened Steels, *Comput. Mater. Sci.*, Vol. 15, No. 1, pp. 101~112.
- [31] M. Umeoto, A. Hiramatsu, A. Moriya, T. Watanabe, S. Nanba, N. Nakajima, G. Anan, Y. Higo, 1992, Computer Modeling of Phase Transformation from Work-hardened Austenite, *ISIJ Int.*, Vol. 32, No. 3, pp. 306~315.
- [32] H. Z. Zhao, X. Liu, G. Wang, 2006, Progress in Modeling of Phase Transformation Kinetics, *J. Iron. Steel Res. Int.*, Vol. 13, No. 3, pp. 68~73.
- [33] N. J. Luiggi, A. E. Betancourt, 1997, Kinetics of Simultaneous Two Phase Precipitation in the Fe-C System, *Metall. Mater. Trans. B*, Vol 28, No. 1, pp. 161~168.
- [34] S. J. Jone, H. K. D. K. Bhadeshia, 1997, Kinetics of the Simultaneous Decomposition of Austenite into Several Transformation Products, *Acta Metall.* Vol. 45, No. 7, pp. 2911~2920.
- [35] 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.
- [36] D. Lorenz, K. Roll, 2005, Modeling and Analysis of Integrated Hot Forming and Quenching Processes, *Advanced Mater. Res.*, Vol. 6-8, pp. 787~794.
- [37] Ö. N. Cora, K. Namiki and M. Koç, 2009, Wear Performance Assessment of Alternative Stamping Die Materials Utilizing a Novel Test System, *Wear* Vol. 267, No. 5-8, pp. 1123~1129.