

핫프레스 포밍 공정에서의 열전달 특성에 대한 연구

이승열¹ · 이경훈[#] · 임용희² · 정우창³

Study on Heat Transfer Characteristic in Hot Press Forming Process

S. Y. Lee, K. Lee, Y. H. Lim, W. C. Jeong

(Received January 17, 2013 / Revised February 28, 2013 / Accepted March 11, 2013)

Abstract

The heat transfer characteristics between die and sheet and die and coolant are important parameters in hot press forming process. The determination of the quenching time that guarantees full martensitic transformation requires proper understanding of these heat transfer characteristics. The contact area changes drastically during the quenching process due to volume changes of both die and sheet by temperature drop as well as phase transformation. Several types of modeling techniques are tested in order to select the most suitable. The effect of quenching time as well as die heat conductivity on martensitic transformation is investigated and predictions are compared to experimental results.

Key Words : Hot Press Forming, Elasto-plastic Finite Element Analysis, Heat Transfer Characteristic

1. 서론

최근 자동차의 연비향상을 위한 추세에 따라 알루미늄, 플라스틱, 마그네슘 등 여러 경량소재들이 자동차 차체 및 주요 부품에 사용되고 있다. 그러나 아직까지 자동차를 구성하는 부품의 약 65% 이상은 철강 재료가 차지하고 있으며 다른 경합소재와 비교하여 우수한 생산성, 가공성, 조립성, 도장성, 재활용성 등으로 우수한 가격 경쟁력을 가지고 있다. 최근 들어서 자동차의 경량화와 승객의 안전성 확보차원에서 새로운 고강도 고기능 철강소재가 개발되어 활용이 확대되어 가고 있는 추세이다. 그러나 소재가 고강도화 될수록 소재의 연신율이 떨어져 프레스 가공 공정에서의 파단 불량률이 많아져 이를 회피하기 위해 블랭크 홀더력 제어기술, 윤활 제어기술, 하이드로

포밍가공, 레이저 가공기술 등과 같은 새로운 가공기술들이 개발되고 있다[1]. 그 중 핫프레스 포밍(Hot Press Forming, HPF)은 강판을 900°C 이상의 고온으로 가열한 후 상온의 금형으로 성형함과 동시에 급랭하여 강도를 증가시켜 초고강도 부품을 제조하는 성형 방법이다. 성형성이 우수한 고온의 상태에서 성형이 이루어져 복잡한 형상의 부품을 성형할 수 있고 상변태를 통해 고강도의 제품을 얻을 수 있다. 최종 제품에서 1,500MPa 전후의 인장강도를 갖게 되므로 자동차 경량화와 동시에 점차 강화되는 충돌법규를 만족시킬 수 있는 가장 효과적인 기술로 크게 각광받고 있는 기술이다[2]. 핫프레스 포밍은 1975년에 스웨덴의 SAAB Hardtech 사에서 개발한 이후 수십 종의 자동차 부품에 대하여 유럽과 미국의 차종을 중심으로 개발 적용되고 있으며 현재까지 국내외에서

1. (주)솔루션랩

2. (주)신화

3. 대구가톨릭대학교

Corresponding Author : Solution_Lab, E-mail:klee@deform.co.kr

활발한 연구가 진행되고 있다[3, 4].

핫프레스 포밍 기술의 난점은 금형 설계 및 냉각채널 설계 기술과 공정 설계 능력이 현장에서의 숙련된 기술자의 Know-how에 많이 의존 하고 있다는 점이다. 이러한 점을 극복하기 위하여 유한요소법을 이용한 연구가 활발하게 진행되고 있다[5~8]. 핫프레스 포밍 공정에서의 양산을 고려한 가장 중요한 설계 변수는 사이클 타임으로 이를 결정하기 위해서는 적절한 켈칭 시간의 예측이 요구 된다. 켈칭 공정의 예측을 위해서는 이의 수치 해석 모델과 금형과 소재, 금형과 냉각수간의 열전달 특성에 대한 이해가 필요하다.

일반적으로 고온 성형에서의 열전달은 금형과 소재 간의 접촉에 의한 열전달을 통해 이루어진다. 이를 위해서는 금형과 소재 간의 접촉 상태에 대한 정확한 파악과 압력에 따른 열전달 계수의 정의를 요구된다. 소재는 가열과정에서 팽창되고 상온의 금형과의 접촉에 의해 수축되며 상변태에 의해 다시 팽창된다. 프레스의 압하 방향과 일치하는 접촉면의 경우는 소재 수축 시에도 금형과의 접촉이 유지되지만 측벽과 같이 프레스의 압하 방향과 수직인 경우는 소재 수축에 따라 접촉을 상실하게 된다. 접촉의 상실에 따라 소재는 상변태에 요구되는 냉각속도를 확보하지 못하여 켈칭 이후에 요구되는 물성을 확보하지 못하게 된다. 정확한 켈칭 공정의 예측을 위해서는 이러한 접촉 상태의 변화를 적절히 모델링하는 것이 요구된다.

금형 소재의 열전도 특성 또한 켈칭 시간의 결정에 영향을 미칠 수 있다. 스페인에서 개발된 금형 소재의 경우 열전도도가 60W/m.k에 이르고 있어 현재 국내에서 사용되고 있는 STD61 종의 24W/m.k에 비하여 2.5배에 가까운 열전도도를 보이고 있다. 본 연구에서는 이러한 금형 소재의 사용에 따른 켈칭 속도의 감소 효과를 알아보고자 한다.

2. 핫프레스 포밍 공정의 이론적 고찰

상변태와 변형적 측면에서 해석적으로 고려할 현상은 켈칭 공정에서 있어 온도에 의한 체적의 감소 외에도 상변태 과정에서의 체적변화를 고려해야 한다(식1, 2). 즉 오스테나이트로부터 펄라이트, 마르텐사이트, 페라이트, 베이나이트 등 부생성물이 만들어지며 겪게 되는 결정구조의 변화(마

르텐사이트의 경우에는 FCC → BCT)에 따른 체적의 변화가 고려되어야 정확한 열처리 거동을 모사할 수 있다. 그리고 변태과정 중 외부에서 작용하는 하중이 항복강도 이내인 경우에도 영구변형을 가져오는 변태소성도 고려사항이 될 수 있다(식3). 여기서는 Desalos에 의해 제안된 모델을 사용하였다[9].

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{\theta} = \alpha(T - T_0)\delta_{ij} \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{rr} = \sum \beta_{IJ} \dot{\xi}_J \delta_{ij}, \quad \beta_{IJ} = \frac{v_J - v_I}{3v_I} \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{pp} = \frac{3}{2} K_{IJ} h(\xi_J) \dot{\xi}_J s_{ij}, \quad h(\xi_J) = 2(1 - \xi_J) \quad (3)$$

여기에서 $\dot{\epsilon}_{ij}^{\theta}, \dot{\epsilon}_{ij}^p, \dot{\epsilon}_{ij}^{\theta}, \dot{\epsilon}_{ij}^{rr}, \dot{\epsilon}_{ij}^{pp}$ 는 각각 탄성변형, 소성변형, 온도, 변태에 의한 체적변화 그리고 변태소성에 의한 변형율속도 성분을 나타낸다.

$\lambda, F, \alpha, T, T_0$ 는 각각 비례계수, 소성포텐셜, 열팽창계수, 온도, 기준온도, $\beta_{IJ}, v_J, \dot{\xi}_J, s_{ij}$ 는 각각 I 상에서 J상으로 변태 시 길이팽창계수, J상의 체적, J상의 변태 체적속도, 편차응력을 의미한다.

열전달 측면에서는 변태과정 중의 잠열의 발생과 변형에 의한 소성가공열을 고려해주어야 한다(식4).

$$\rho C \dot{T} = \frac{\partial}{\partial x_i} (K \frac{\partial T}{\partial x_i}) + \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^p + \sum L_{IJ} \dot{\xi}_J \quad (4)$$

여기에서, $\rho C, K, L_{IJ}$ 는 각각 열용량, 열전도계수, I 상에서 J으로 변태 시 발생하는 잠열을 나타낸다[10].

3. 핫프레스 포밍 공정의 개요

핫프레스 포밍 공법은 고온에서의 양호한 성형 특성을 이용하여 성형한 후 급속냉각을 통하여 마르텐사이트 조직을 얻음으로써 강관의 강도를 향상시키는 공법이며, 전형적인 핫프레스 포밍 공정을 통한 소재의 특성을 Table 1에 나타내었다.

핫프레스 포밍 공정은 일반적으로 소재를 오스테나이트 영역으로 가열하여 소재의 조직을 오스테나이트로 변태 시킨 후 빠르게 금형으로 이동

Table 1 Tensile properties before and after hot press forming

	YS(MPa)	TS(MPa)	El(%)
As received	~400	~600	~26
As formed	~1,280	~1,530	~8

시킨다. AC₃ 변태온도는 탄소함량이 증가하면 낮아지며 탄소 함량이 0.2wt% 정도인 소재는 900°C 이상 가열하여야만 안정적으로 오스테나이트 조직을 얻을 수 있다. 이송이 완료되어, 금형 위에 안착된 블랭크는 이송과정에서 100~200°C 정도 온도가 하강하게 되며, 약 800°C 내외에서 성형이 이루어진다. 약 2초 정도의 성형 과정 후, 금형에 설치된 냉각 홀을 통하여 냉각이 이루어져 조직은 마르텐사이트로 변태하게 되며, 금형을 그대로 유지하여 소재가 약 100°C 내외가 될 때까지 퀴칭이 이루어지도록 한다. 이때 금형 내부에 설치된 냉각홀에 의해 이루어지는 퀴칭을 다이 퀴칭이라고 한다[11].

4. 유한요소 해석

4.1 해석에 필요한 물성 확보

HPF 공정 해석에 필요한 물성을 확보하기 위하여 물성계산 소프트웨어인 JMatPro를 사용하였다. 이는 CALPHAD(Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry)법에 기반한 열역학계산 프로그램의 일종이다. 이 프로그램의 작동 기본 구조는 각 상에 대한 여러 열 물리적 물성 및 기계적 물성에 대한 기초물성을 데이터베이스로 가지고 있으면서, 특정 물성을 모델링하는 식에 따라 각각의 상의 물성을 계산한다. 열역학계산결과에 따른 평형상태에서의 상의 분율과 물성을 조합하여 전체 물성을 계산하게 된다. 또한, 변태를 나타내는 TTT/CCT 선도를 계산하여 줌으로써, 상변태 관련 여러 물성의 확보가 가능하다. HPF 공정해석에서 사용한 재료는 자동차 강판용 보론강이다.

4.2 해석 모델

본 연구의 유한요소해석은 상용 소프트웨어 DEFORM-3D를 이용하였으며, 해석 모델은 Fig. 1에 나타내었다. 제품의 최종 형상은 모자 형상으로 평면부와 측벽부로 구성되어 접촉에 따른 냉

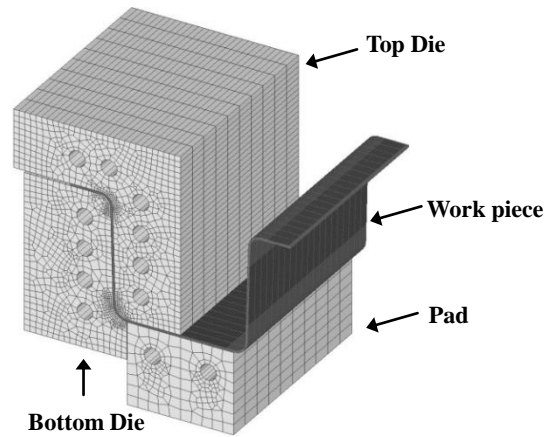


Fig. 1 The hexahedron mesh used for FE analysis

각 특성 파악에 적합하다. 금형은 상금형, 하금형, 패드로 구성되어 있으며, 금형에는 냉각 채널이 모델링 되어 있다. 소재의 크기는 가로144mm, 세로135mm, 두께1.4mm이다. 해석에 사용된 요소 수는 상금형 7,230개, 하금형 6,670개, 패드850개, 소재 14,120개이며, 소재와 금형 모두 8절점 육면체 요소를 사용하였다.

4.3 해석개요

핫프레스 포밍 공정은 가열로에서 꺼내서 프레스로 이송할 때 냉각, 프레스에서의 성형, 금형 내에서의 냉각에 의한 퀴칭으로 이루어진다. Table 2에 각 공정에서의 조건과 시간을 요약하였다. 본 공정의 전체 사이클 시간은 대략 30초로 설정되어 있고 가열 후 이송에 9초, 프레스의 하강과 상승에 각 2초, 퀴칭에 6초가 소요된다. 본 해석에서는 910°C의 소재를 9+2초간 공랭 열전달로 가정하고 이후 6초간의 퀴칭 해석을 진행하였다. 실제 공정에서는 4초 만의 퀴칭으로 전체 마르텐사이트 조직을 얻을 수 있는 것으로 파악되었다.

해석 방법에 따른 열전달 특성을 파악하기 위하여 Table 3과 같이 객체 타입 별 해석 모델을 사용하였다. Type-1 모델은 접촉 열전달계수를 8N/sec/mm/C을 사용하였고, Type-2,3 모델은 접촉 열전달계수를 압력의 함수로 정의하였다. 압력에 따른 접촉 열전달계수는 J.Cu 등[12]에 의해 연구되었으며, Table 4에 나타내었다. 냉각수의 열전달계수는 유속에 비례한 특성이 있다고 알려졌다. 본 연구에서는 장비의 유량과 파이프의 직경을 사용하여 냉각수의 유속을 구하고 J. Cu 등[12]에

Table 2 Simulation procedure of hot press forming

	Operation	Comment
1	Heat Transfer from Furnace to Press	t=0~11sec, T _{furnace} =910°C, T _{environment} =20°C
2	Press Forming	t=11~11.7sec
3	Quenching	t=11.7~17.7sec, T _{water} =20°C

Table 3 Types of the object for FE analysis

	Object Type
Type-1	Sheet : Rigid Die : Rigid
Type-2	Sheet : Deformable Die : Rigid
Type-3	Sheet : Deformable Die : Deformable

Table 4 Coefficient of heat transfer

Pressure	Coefficient of heat transfer
5[MPa]	1.5[N/sec/mm/C]
10	2.0
15	3.0
20	4.0
25	4.25

계산된 그래프를 사용하여 열전달계수를 1N/sec/mm/C로 가정하였다. 소재는 가열로에서 910°C로 가열된 상태로 해석을 진행하였으며, 금형의 초기 온도는 20°C, 냉각수 온도는 20°C로 유지하도록 하였다. 성형 공정의 펀치 속도는 120mm/sec으로 성형해석을 진행하였으며, 퀘칭 공정 중에 프레스의 압하력은 250톤을 유지하도록 하였다.

5. 결과 및 분석

5.1 성형공정 해석

가열로에서 910°C로 가열된 소재를 11초 동안 공기 중에서 냉각시킨 후 0.7sec 동안 성형 공정을 모사한 결과 Fig. 2와 같이 접촉 상태와 더불어 성형 직후 소재의 온도 분포를 확인할 수 있다. 소재의 온도 분포는 접촉상태에 따라 최대 766°C에서 최소 666°C로 분포하는 것으로 확인되었다.

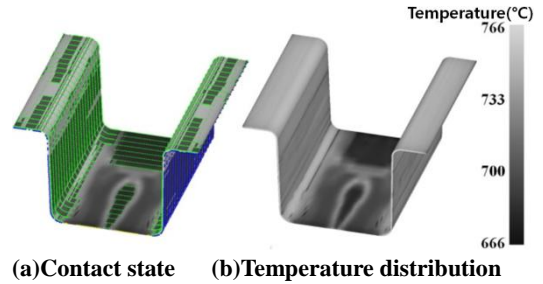


Fig. 2 Contact and temperature distribution after forming process

5.2 퀘칭공정 해석

퀘칭 공정의 해석 방법은 소재의 변형을 무시하고 금형과 소재를 모두 강체로 모델링하는 방법 (Type-1), 소재만을 변형체로 모델링하는 방법 (Type-2), 금형 소재 모두를 변형체로 모델링 (Type-3)하는 3가지 방법을 고려하였다. 금형과 소재를 모두 강체로 모델링하는 경우 성형 완료 시점의 접촉 상태 또는 전체 접촉을 가정하고 열전달 해석을 진행한다. 열전달 계수의 설정은 압력의 함수로 정의가 불가능하여 적절한 상수값의 결정을 필요로 한다. 해석시간이 짧은 장점이 있으나 접촉상태의 변화를 고려할 수 없다. 금형 및 소재를 모두 변형체로 고려한 경우는 퀘칭 공정 중에 발생하는 금형 및 소재의 체적 변화에 따른 접촉 상태의 변화를 정확히 예측할 수 있으나 과도한 해석 시간이 요구된다.

퀘칭 공정 해석은 6초 동안 금형에 의한 냉각 해석을 진행하였다. 해석 방법에 따른 접촉점 상태를 Fig. 4에 나타내었다. 소재와 금형 모두 변형체인 경우 초기 1초까지는 소재가 수축하면서 소재 측면부분의 접촉점이 일부 유실되다가 1초 이후 3초까지 상변태에 의한 체적 증가로 측면부의 접촉 영역이 증가하는 것을 관찰할 수 있었다.

반면 소재만 변형체인 경우 1초 이후부터 접촉점이 계속 유실되어 6초 냉각 동안 접촉점이 90% 이상 유실되는 것을 확인하였다. 이로부터 온도의 증가에 따른 금형 팽창의 고려가 요구됨을 확인할 수 있다. 소재와 금형 모두 강체인 경우는 전체 접촉을 가정하였다.

사용된 DEFORM V10.1의 경우 접촉으로 인식된 위치에서만 열전도가 발생하여 미세한 틈에 의한 접촉 유실 영역에서는 실제보다 적은 열전달이 이루어지는 것으로 판단된다. V11.0에서는 일정 간

격의 경우 열전도를 허용하는 기능이 추가된다고 알려져 있어 추후 보다 정확한 해석이 가능하리라 생각된다.

해석 방법에 따른 냉각 능력 특성을 파악하기 위하여 소재의 마르텐사이트 분율을 시간에 따라 추적하였다. 추적 위치는 Fig. 3에 나타냈으며 소재의 평탄 부분, 측벽 부분으로 각각 선택하였다.

소재, 금형 모두 변형체인 경우 Fig. 6-(a)에 나타내었다. 퀴칭공정 3.5초 이후 4개 지점 모두 99% 이상 마르텐사이트로 상변태 됨을 확인하였다. P.1, P.4지점은 프레스의 압하 때문에 접촉점 변화가 없어 상대적으로 빠른 시간에 마르텐사이트 변태가 이루어졌으나, 소재의 측벽부분인 P.2, P.3지점은 접촉점 변화로 인해 상변태 되는 시간이 다소 차이가 있다. Fig. 6-(b)는 소재만 변형체인 결과로 접촉점 소실로 인하여 퀴칭 공정 모사에 실패하였다. Fig. 6-(c)는 모두 강체인 경우의 결과로 2.5초 만에 99% 이상 마르텐사이트로 상변태됨을 보여 주었다. 이때 사용된 열전달계수 8 N/sec/mm/C 은 Table 4의 압력의 함수를 고려할 때 상당히 높은 값으로 빠른 상변태 결과를 나타내었다.

가장 취약 지점인 P.3에서 Type-3 모델 결과와 유사한 결과를 얻도록 열전달계수를 1~8 까지 변화시켜가며 Type-1 해석을 반복하였다. 해석 결과 열전달계수 3N/sec/mm/C일때 Type-3으로 해석한 결과와 유사한 상변태 거동을 Fig. 5와 같이 보여 주었다. 해석시간의 단축을 위한 방안으로 강체-강체 모델링의 사용과 적절한 열전달 계수의 사용도 가능하리라 판단된다.

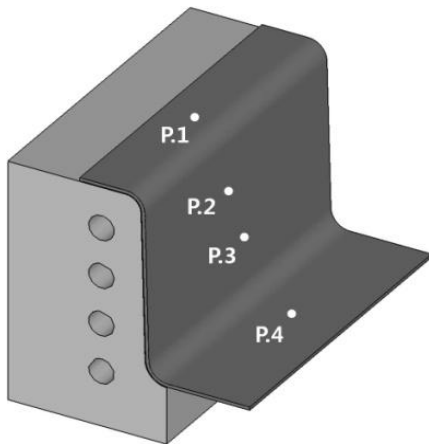
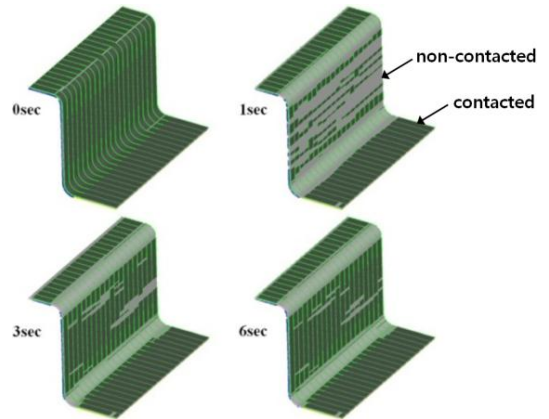
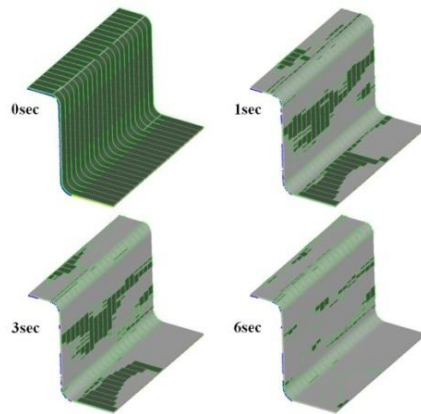


Fig. 3 Point tracking location



(a) Sheet(Deformable) – Die(Deformable)



(b) Sheet(Deformable) – Die(Rigid)

Fig. 4 Variation of contact status as a function of elapsed time during the quenching process

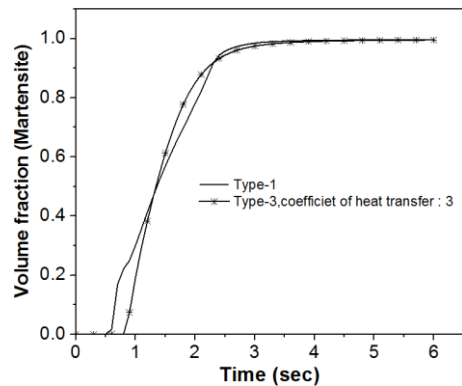
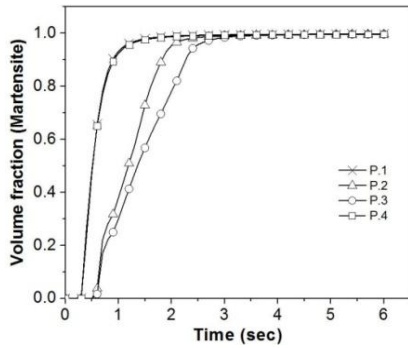
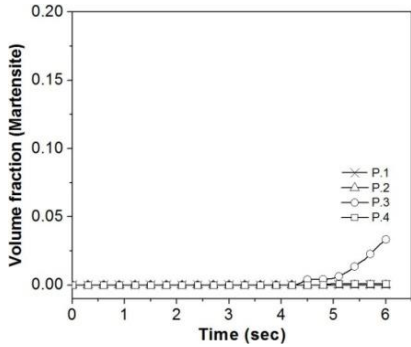


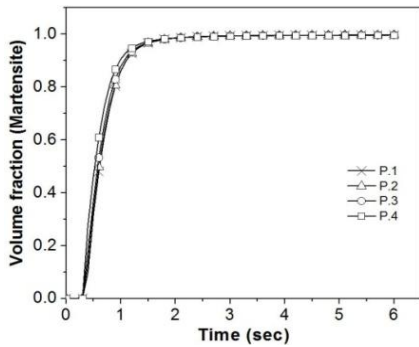
Fig. 5 Comparison of martensite volume fraction due to type-1 and type-3



(a) Sheet(Deformable) – Die(Deformable)



(b) Sheet(Deformable) – Die(Rigid)



(c) Sheet(Rigid) – Die(Rigid)

Fig. 6 Variation of the martensite volume fraction during the quenching process for different object modeling

5.3 쿼칭시간에 따른 마르텐사이트 생성량 비교

쿼칭시간을 단축할 때 P.3지점에서의 시간에 따른 마르텐사이트 생성량을 분석하였다. 쿼칭 시간은 2초, 3초, 4초로 단축하였고, 쿼칭 이후 10초까지 공랭으로 가정하여 해석하였다. 해석 결과 Fig. 7과 같이 4초로 단축한 경우 99% 마르텐사이트로

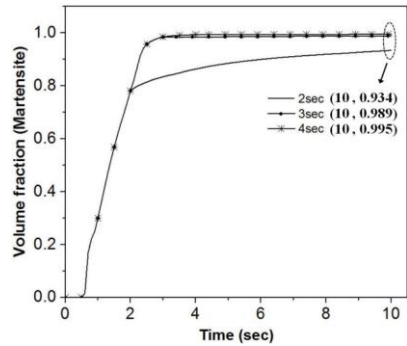


Fig. 7 Variation of martensite volume fraction due to quenching time change from 2 second to 4 second

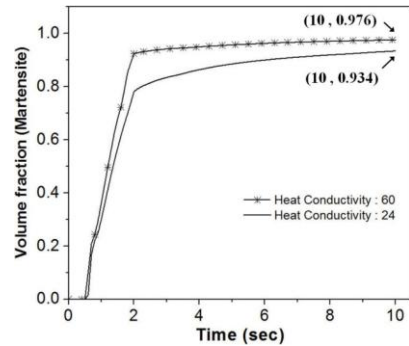


Fig. 8 Variation of martensite volume fraction due to change of heat conductivity

변태되었다. 반면 2초로 단축한 경우 93% 마르텐사이트로 변태되어 전체 마르텐사이트 조직조건을 충족시키지 못하였다. 실험에서 얻은 4초 조건과 양호한 일치를 보였다.

5.4 금형의 열전도 특성에 따른 마르텐사이트 생성량 비교

추가적으로 금형의 열전도도 능력에 따라 금형의 열전달 특성을 분석하여 열전도도가 높은 고가 금형 적용에 대한 효과를 파악하였다.

현재 일반적으로 사용되고 있는 SKT61 금형강의 경우 열전도도 24W/m.k 대비 수입 금형강의 열전도도는 60W/m.k으로 알려져 있다. 열전도도를 60W/m.k으로 변경하고 나머지 조건을 동일하게 하여 2초 쿼칭 공정 이후 10초까지 공랭으로 가정하여 해석을 진행하였다. 결과로 P.3 지점에서의 시간에 따른 마르텐사이트 생성량을 분석하여

Fig. 8 에 나타내었다. 열전도도가 24인 경우 93% 마르텐사이트로 변태되었고, 60인 경우 97% 마르텐사이트로 변태되어 full 마르텐사이트 변태 가능성을 보였다. SKT61 금형강 사용 시 99% 마르텐사이트 조직을 얻기 위한 시간이 4초인 것을 감안하면 고가의 금형강의 사용에 따른 냉각 시간의 감소는 대략적으로 2초 미만으로 평가되었다.

6. 결 론

본 연구에서는 퀴칭 해석에서의 모델링에 따른 상변태 현상의 차이를 확인하고 현실적인 상변태 현상을 예측하기 위한 방안을 제시하였다. 금형 및 소재를 모두 변형체로 모델링하는 것이 퀴칭 공정 중에 발생하는 접촉 영역의 변화를 모사하는데 필요함을 보여주었다. 금형 및 소재를 모두 변형체로 모델링한 type-1의 결과는 4초 퀴칭으로 전체 마르텐사이트를 얻을 수 있었던 실험 결과와 잘 일치하였다. 충분히 빠른 냉각속도로 마르텐사이트 변태 시작온도까지 냉각이 되면 이후의 냉각속도에 상관없이 모두 마르텐사이트로 변태되는 마르텐사이트 변태의 특성에 따라 퀴칭 시간을 단축하여 최소 3초의 퀴칭 시간을 확인하였다. 금형과 소재를 강체로 모델링하는 경우 사용된 열전달 계수에 따라 해석 결과가 결정되어 해석 결과의 신뢰성에 문제가 있을 수 있다. 적절한 열전달 계수의 결정과 사용이 요구된다.

열전도도 특성이 우수한 금형 소재의 사용으로 퀴칭시간의 단축 효과는 2초까지도 가능함을 확인하였다. 생산성의 측면에서 2초의 시간 단축은 큰 의미를 가진다고 할 수 있어 고가의 수입 소재에 대응할 수 있는 국산 소재의 개발이 요구됨을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 1.5GPa급 자동차 부품 성형용 장수금형 소재 및 후가공 기술 개발사업(10040066)의 일환으로 수행된 연구결과입니다.

참 고 문 헌

[1] H. S. Son, 2007, High Temperature Forming

Analysis for Hot Press Forming, POSCO Conf. Vol. 12, No. 2, pp. 80~85.

- [2] N. H. Kim, K. Y. Kwon, C. G. Kang, 2009, KSME Spring Conf.(editor: E. S. Lee), Kor. Soc. Mech. Eng., Daejeon, Korea, pp. 78~83.
- [3] W. J. Bang, J. Y. Nam, S. J. Kim, H. S. Kim, 2000, Proceedings of the 7th Symposium on Steel Technology, Korean Inst. Mater., Seoul, Korea, pp. 98~101.
- [4] T. Altan, 2006, Hot-stamping Boron-alloyed Steels for Automotive Parts Part I : Process Methods and Uses, Stamping J., pp. 40~41
- [5] K. P. Kang, K. H. Lee, Y. S. Kim, M. W. Ji, Y. S. Suh, 2008, Prediction of Phase Transformation of Boron Steel Sheet during Hot Press Forming using Material Properties Modeler and DEFORM-HT, Trans. Mater. Process., Vol. 17, No. 4, pp. 249~256.
- [6] M. S. Chae, G. D. Lee, K. H. Lee, Y. S. Kim, 2009, Mechanical and Forming Characteristics of High-Strength Boron-Alloyed Steel with Hot Forming, Trans. Mater. Process., Vol. 18, No. 3, pp. 236~244.
- [7] Y. S. Suh, K. H. Lee, Y. S. Kim, 2010, Application and Verification of Virtual Manufacturing to Hot Press Forming Process with Boron Steel, Trans. KSAE., Vol. 18, No. 2, pp. 61~66.
- [8] H. Karbasian, A. E. Tekkaya, 2010, A Review on Hot Stamping, J. Mater. Process. Technol., Vol. 210, No. 15, pp. 2103~2118.
- [9] Y. Desalos, F. Gunsberg, 1982, Deformations et contraintes lors du traitement thermique de pieces en acier, Report No. 902, IRSID, St-Germain-en-Laye.
- [10] K. H. Lee, E. J. Kwak, H. Y. Kim, G. D. Lee, J. K. Park, C. H. Suh, 2009, Study on the design of quenching fixture in hot press forming process, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf. pp. 337~340.
- [11] J. S. Lee, M. S. Chae, C. D. Park, Y. S. Kim, 2007, KSME Spring Conf.(editor: D. I. Kim), Kor. Soc. Mech. Eng., Busan, Korea, pp. 344~349.
- [12] 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.