

# 국부가열을 이용한 핫스탬핑 공정에서 Tailor Rolled Blank의 스프링백 예측

심규호<sup>1</sup> · 김재홍<sup>1</sup> · 김병민<sup>#</sup>

## Springback Prediction of Tailor Rolled Blank in Hot Stamping Process by Partial Heating

G. H. Shim, J. H. Kim, B. M. Kim

(Received September 23, 2016 / Revised October 27, 2016 / Accepted November 4, 2016)

### Abstract

Recently, Multi-strength hot stamping process has been widely used to achieve lightweight and crashworthiness in automotive industry. In concept of multi-strength hot stamping process, process design of tailor rolled blank(TRB) in partial heating is difficult because of thickness and temperature variation of blank. In this study, springback prediction of TRB in partial heating process was performed considering its thickness and temperature variation. In partial heating process, TRB was heated up to 900°C for thicker side and below  $A_{c3}$  transformation temperature for thinner side, respectively. Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov(JMAK) equation was applied to calculate austenite fraction according to heating temperature. Calculated austenite fraction was applied to FE-simulation for the prediction of springback. Experiment for partial heating process of TRB was also performed to verify prediction accuracy of FE-simulation coupled with JMAK equation.

**Key Words** : Tailor Rolled Blank(TRB), Hot Stamping, Springback Prediction, Partial Heating Process, FE-simulation, Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov(JMAK) Equation

## 1. 서론

최근 자동차 산업에서는 강화된 환경규제에 따라 경량화 및 충돌성능을 확보하기 위해 핫스탬핑(hot stamping) 공정이 적용되고 있다. 핫스탬핑 공정은 900°C의 분위기 온도에서 완전 오스테나이트화된 소재를 냉각채널이 있는 금형으로 이송 후, 성형과 냉각을 동시에 진행하여 초고강도 제품을 제작하는 공정이다[1]. 핫스탬핑 공정에서 소재 내부의 오스테나이트 조직은 대부분 마르텐사이트 조직으로 변태되어 1.5GPa급의 높은 인장강도를 가진다. 하지만 핫스탬핑 공정으로 제작된 초고강도 부품은 연성이

낮아 충격흡수 부재로 부적합하다.

따라서, 이종강도의 확보가 가능한 핫스탬핑 공정에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[2]. 최근에는 이종강도의 구현 방법 중, Tailor rolled blank(TRB)를 이용한 국부 가열 핫스탬핑 공정이 자동차 산업에 적용되고 있다. 이 공정은 가변으로 소재를 압연한 TRB[3]를 사용하기 때문에 경량화 효과를 극대화할 수 있고 소재 국부 가열에 따른 이종강도의 확보가 가능하다는 장점이 있다. 그러나, TRB를 이용한 소재 국부 가열 공정이 소재의 두께 및 온도 편차가 발생하기 때문에 공정 설계를 위한 정밀한 스프링백 예측이 필수적이다.

1. 부산대학교 기계공학부

# Corresponding Author : School of Mechanical Engineering, Pusan National University, E-mail : bmkim@pusan.ac.kr

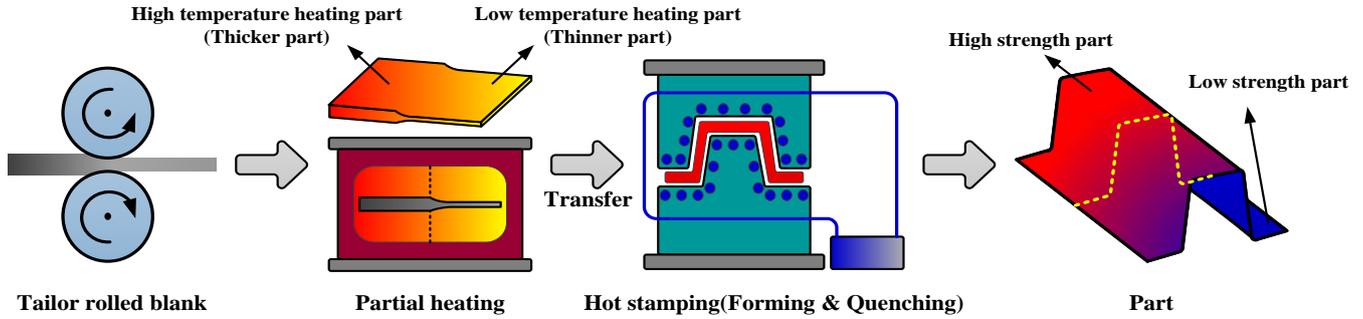


Fig. 1 TRB Hot stamping process by partial heating

일반적인 핫스탬핑 부품의 스프링백 예측에는 K-V[4]모델과 이를 수정한 A-O 모델[5] 등이 사용된다. 이러한 모델은 냉각속도에 따른 상분율을 계산하고, 각각의 상에 대한 부피 팽창량을 고려하여 스프링백을 예측하게 된다. 또한, Lee 등[6]은 예측 정밀도를 향상시키기 위하여 상변태 소성모델을 사용하여 상변태가 스프링백에 미치는 영향에 관한 연구를 하였다. 하지만 기존의 연구들은 주로 일반적인 핫스탬핑 공정에 대해 수행되고 있으며, 이중강도 구현을 위한 핫스탬핑 공정에 대한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 TRB를 이용한 국부가열 핫스탬핑 공정에서의 스프링백을 예측하였다. 국부가열 공정에서 소재의 가열온도에 따른 오스테나이트 분율을 예측하는 것이 중요하다. 오스테나이트의 분율 예측은 Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov(JMAK) 식을 사용하였고 그 결과를 유한요소해석에 적용하였다. 유한요소해석 결과를 검증하기 위해 TRB를 이용한 국부가열 핫스탬핑 실험을 수행하였으며, 예측 및 실험 결과를 비교 평가하였다.

## 2. 스프링백 예측

### 2.1 국부가열 TRB 핫스탬핑 공정

국부가열 TRB 핫스탬핑 공정을 Fig. 1에 도식화하였다. 이 공정은 TRB의 두께 편차에 따른 경량화 효과를 기대할 수 있고, 가열 온도 제어에 따른 충돌성능을 향상시킬 수 있다. 국부가열 TRB 핫스탬핑 공정에서 TRB는 국부적으로 온도 제어가 가능한 전기로를 이용하여 가열된다. 가열된 소재는 금형으로 이송하여 성형과 냉각을 동시에 진행하여 최종 제품을 생산하게 된다. 하지만, TRB가 국부가열되는 과정에서 저장도부는 전체 오스테나이트화 되지 않

기 때문에 스프링백이 크게 발생한다. 스프링백을 방지하기 위해서는 정확한 예측이 필수적이며, 이를 위해서는 오스테나이트의 분율을 예측하는 것이 중요하다.

### 2.2 오스테나이트 분율 예측

본 연구에서는 오스테나이트의 분율을 예측하기 위해서 JMAK 식을 이용하였다. JMAK 식은 핵생성 및 성장을 모사한 경험식으로 가열이력에 따른 오스테나이트의 분율을 예측할 수 있으며 식 (1)[7]과 같이 정의된다.

$$X_a = 1 - \exp\left(-A \cdot t^n \cdot \exp\left(\frac{-E}{RT_c}\right)\right) \quad (1)$$

여기서,  $n$ 은 Avrami 지수,  $A$ 는 빈도 인자,  $E$ 는 상변태에 필요한 활성화 에너지,  $t$ 는 가열 시간,  $R$ 은 기체상수(8.3143J/K · mol),  $T_c$ 는 가열 온도이다. JMAK 식의 상수를 확보하기 위해서는 가열 조건에 따른 오스테나이트 분율의 측정이 요구된다.

본 연구에서는 오스테나이트의 분율을 측정하기 위해 가열된 시험편을 즉시 수냉하여 생성된 마르텐사이트의 분율을 오스테나이트 분율로 판단하였다. 마르텐사이트의 분율을 측정하기 위해 LePera 에칭법을 이용하였으며, 에칭된 시험편의 미세조직은 광학현미경(optical microscope; OM)을 이용하여 관찰하였다. 확보된 JMAK 식의 상수는 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Material constants for JMAK equation

Material constants	Values
$n$	0.58
$A$	$2.19 \times 10^8$
$E(J/mol)$	$202.47 \times 10^3$

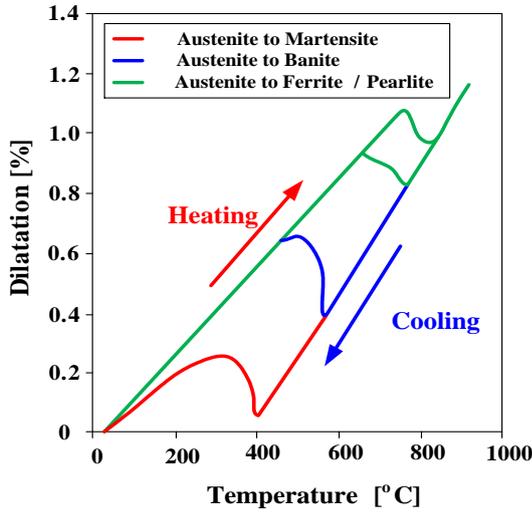


Fig. 2 Schematic illustration of dilatation according to phase transformation[8]

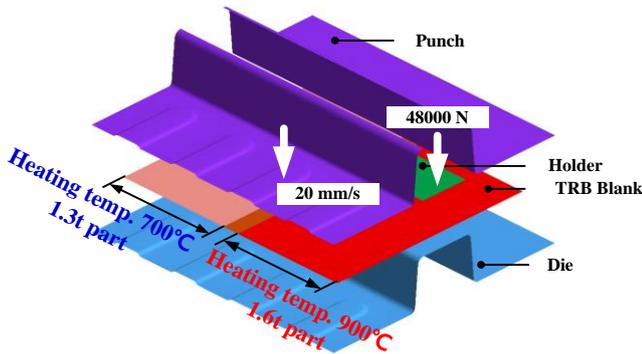


Fig. 3 FE-model for hat shape

### 2.3 상변태를 고려한 스프링백 예측

일반적인 강을 가열 및 냉각하게 되면 격자구조가 변하게 되며, 이는 소재의 체적 변화에 영향을 미치게 된다. Fig. 2에 가열 및 냉각에 따른 각 상의 부피 변화를 도식적으로 나타내었다. 소재의 체적 변화는 내부의 응력에 영향을 미치며, 이에 따라 스프링백의 발생량이 변화된다. 따라서, 핫스탬핑 공정의 유한요소해석 시에 상변태 및 부피변화를 고려하는 것이 중요하다.

상변태를 고려한 스프링백 예측은 상용해석프로그램인 LS-Dyna(R7.1.2)를 사용하였다. 상변태가 발생하지 않는 저장도부의 경우, 재료모델로 MAT\_106을 사용하여 온도 및 변형률 속도에 따른 응력변화를 고려하였다. 또한, 상변태가 발생하는 고강도부의 경우, MAT\_248을 사용하여 온도 및 변형률 속도의 영향뿐만 아니라 각 상에 대한 물성, 그리고 상

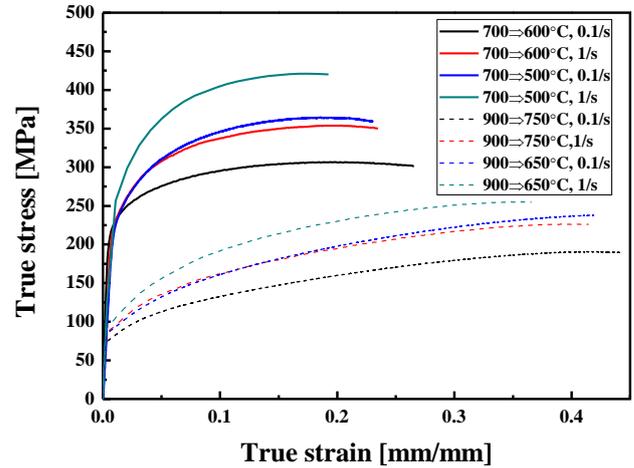


Fig. 4 High temperature true stress-true strain curve

변태에 따른 영향까지 유한요소해석에 고려하였다.

## 3. 유한요소해석 및 실험 조건

### 3.1 유한요소해석 조건

스프링백 예측을 위한 유한요소해석 모델로 모자형상을 적용하였고, 이를 Fig. 3에 나타내었다. 소재 가열 온도는 TRB의 1.3t 부분을 700°C, 1.6t 부분을 900°C로 설정하였다. 또한, 천이영역은 길이방향으로 20mm를 1.4t의 두께로 구성하였으며 가열 온도는 800°C로 적용하였다. 금형은 펀치, 다이, 홀더로 구성하였으며, 각 금형에 TRB의 두께편차를 고려하여 0.15mm의 단차를 부여하였다.

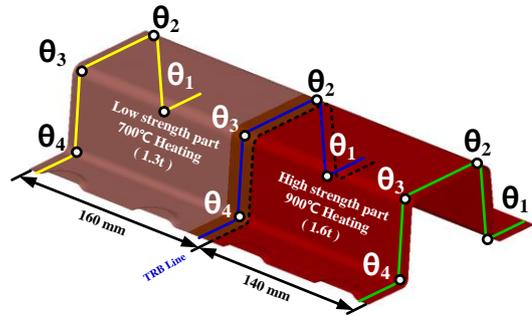
공정 순서는 실제 핫스탬핑 공정을 고려하여 가열, 이송, 성형, 냉각, 스프링백에 대해 유한요소해석을 순차적으로 수행하였다. 저장도부 및 오스테나이트 상의 물성은 Fig. 4와 같이 변형률 속도 및 가열온도에 따른 변형률-응력 곡선을 적용하였다. 또한, 오스테나이트 이외의 상에 대한 물성은 Hippchen등[9]의 연구를 참고하여 적용하였다. 소재와 대기의 열전달을 고려하기 위한 대류열전달계수는  $20\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ 을 적용하였고 금형과 소재의 열전달을 고려하기 위한 계면열전달계수는 접촉압력에 대한 함수로 입력하였다. 이와 같은 유한요소해석 조건은 Table 2에 요약하여 나타내었다.

### 3.2 실험 조건

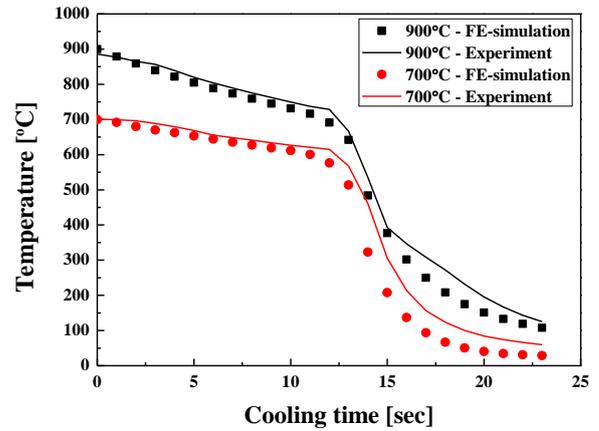
해석결과의 검증을 위해 국부가열 TRB 핫스탬핑 실험을 수행하였다. 실험장치는 성형을 위한 금형

**Table 2 Conditions of FE-simulation**

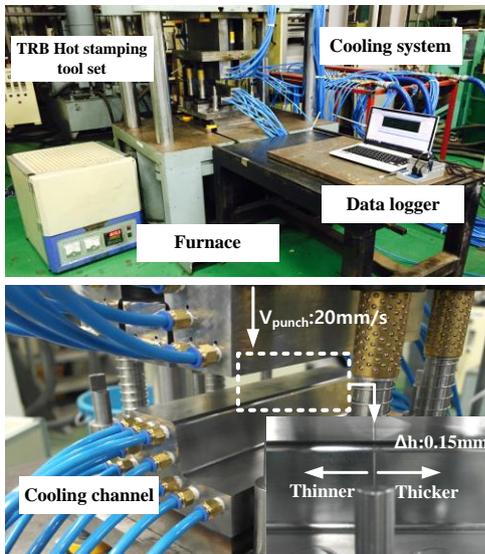
Condition		Values	
Material model		MAT_106	MAT_248
Blank size [mm]		300 x 260	
Thickness [mm]		TRB	
		1.3	1.6
Blank temperature [°C]		700	900
Poisson's ratio		0.3	
Convective heat transfer coefficient [W/m <sup>2</sup> ·K]		20	
Interfacial heat transfer coefficient [W/m <sup>2</sup> ·K]		As function of pressure[10]	
Friction coefficient [μ]		0.4 [11]	
Process time [sec]	Transfer	6	
	Forming	5	
	Quenching	10	
	Springback	1	



**Fig. 6 Measuring point of spring-back**



**Fig. 7 Comparison of temperature history between FE-simulation and experiment**



**Fig. 5 Experiment setup for TRB hot stamping using partially heating**

및 200톤 유압프레스로 구성되어 있고 이를 Fig. 5에 나타냈다. 소재는 국부가열이 가능한 전기로를 활용하여 가열하였으며 소재의 온도측정을 위해 K-type 열전대와 데이터 로거를 사용하였다. 실험에 사용된 TRB는 폭 260mm, 길이 300mm, 두께 1.3t, 1.6t의 사

각 형상이며, 고온영역은 900°C, 저온영역은 700°C로 6분간 가열하였다. 가열된 TRB는 6초 이내에 수동으로 이송되었고, 프레스 및 금형에 의해 성형되었다. 성형이 완료된 TRB는 냉각채널이 설치된 금형에 의해 충분히 냉각되도록 하였다.

### 3.3 스프링백 측정

성형이 완료된 시편은 3차원 스캐너를 이용하여 형상을 측정하였으며, 정량적인 스프링백의 비교를 위해 NUMISHEET'93 벤치마크 문제에서 정의한 스프링백 인자를 이용하였다. 국부가열 TRB 핫스탬핑 공정을 이용하여 제작된 제품의 경우, 고강도부, 저강도부, 천이부의 스프링백 발생량이 다르게 나타난다. 따라서 Fig. 6에 나타난 각 부분에 대해 정량적 평가를 진행하였다.

## 4. 유한요소해석 및 실험 결과 비교

### 4.1 온도 이력 측정 결과

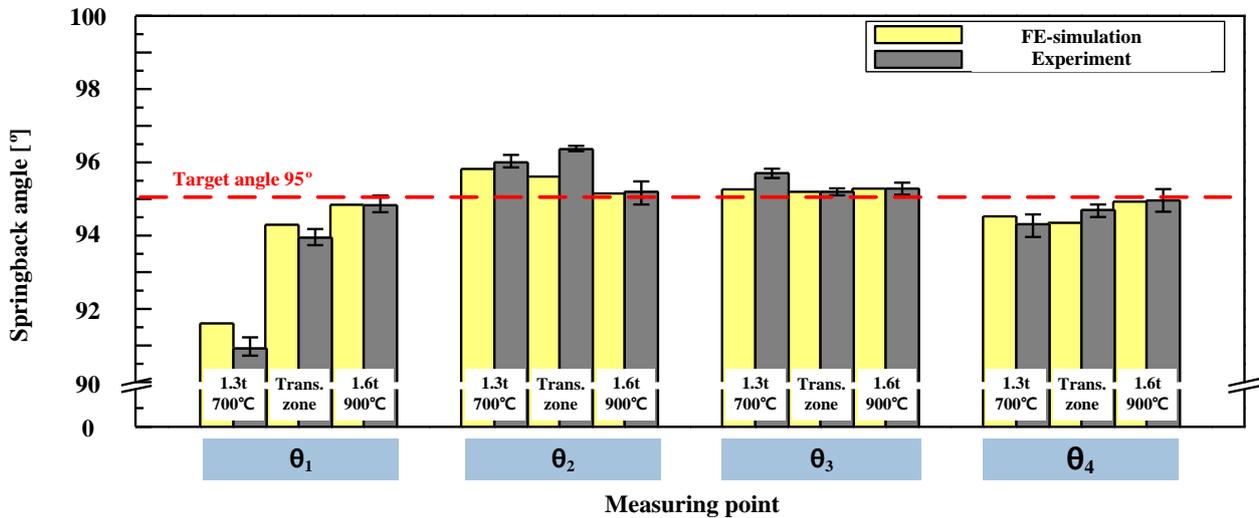


Fig. 8 Comparison of amount of spring-back between FE-simulation and experiment

유한요소해석의 예측 정밀도를 간접적으로 평가하기 위해서 고강도부와 저강도부의 온도 이력을 비교하였으며 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 온도 이력의 비교 시, 해석 및 실험 결과는 유사하게 나타났지만 측정된 온도가 해석 결과보다 근소하게 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 유한요소해석 시, 금형이 소재에 의해 가열되는 현상을 고려하지 않았기 때문으로 예상된다.

#### 4.2 스프링백 측정 결과

본 연구에서 제시한 국부가열 TRB 핫스탬핑 공정의 유한요소해석 기법의 검증을 위해 해석 및 실험 결과로부터 측정된 스프링백 양을 비교하였다. Fig. 8과 같이 오스테나이트분율 및 상변태를 고려한 유한요소해석은 실험 결과와 최대 오차 0.7°로 우수한 신뢰성을 가지는 것으로 나타났다.

따라서,  $A_{c3}$  온도 이하로 소재를 가열하는 공정의 유한요소해석 시에 가열 조건에 따른 오스테나이트분율을 예측하고 이를 스프링백 예측에 반영하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

### 5. 결론

본 연구에서는 TRB 국부가열 핫스탬핑 공정에서 가열 조건에 따른 오스테나이트 분율을 예측하였고 이에 따른 스프링백을 예측하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 국부가열 TRB 핫스탬핑 공정에서 가열 조건

에 따른 오스테나이트 분율을 예측하기 위해 JMAK 식을 이용하였으며, 이를 위한 재료상수를 도출하였다.

(2) 국부가열 TRB 핫스탬핑 공정에서 가열 및 냉각에 따른 상변태와 각 상에 대한 물성을 고려하여 스프링백을 예측하였다.

(3) 오스테나이트분율 및 상변태를 고려한 유한요소해석은 실험 결과와 최대 오차 0.7°로 우수한 예측 정밀도를 나타내었다.

(4)  $A_{c3}$  온도 이하로 소재를 가열하는 공정에서 가열 조건에 따른 오스테나이트 분율 및 상변태 등을 고려하여야 유한요소해석의 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

### 후 기

이 논문은 2012년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2012R1A5A1048294).

### 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] M. Merklein, M. Johannes, M. Lechner, A. Kuppert, 2014, A Review on Tailored Blanks-Production,

- Applications and Evaluation, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 214, No. 2, pp. 151~164.
- [3] S. J. Jeon, M. Y. Lee, B. M. Kim, 2011, Development of Automotive Door Inner Panel using AA 5J32 Tailor Rolled Blank, *Trans. Mater. Process*, Vol. 20, No. 7, pp. 512~517.
- [4] J. S. Kirkaldy, D. Venugopalan, 1983, Proc. International Conference on Phase Transformations in Ferrous Alloys, Metall. Soc. AIME, Philadelphia, pp. 125~148.
- [5] P. Åkerström, M. Oldenburg, 2006, Austenite Decomposition during Press Hardening of a Boron Steel Computer Simulation and Test, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 174, No. 1, pp. 399~406.
- [6] M. G. Lee, S. J. Kim, H. N. Han, 2009, Finite Element Investigations for the Role of Transformation Plasticity on Springback in Hot Press Forming Process, *Comput. Mater. Sci.*, Vol. 47, No. 2, pp. 556~567.
- [7] J. W. Evancho, J. T. Staley, 1974, Kinetics of Precipitation in Aluminum Alloys during Continuous Cooling, *Metall. Trans. A*, Vol. 5, No. 1, pp. 43~47.
- [8] H. H. Bok, S. N. Kim, D. W. Suh, F. Barlat, M. G. Lee, 2015, Non-isothermal Kinetics Model to Predict Accurate Phase Transformation and Hardness of 22MnB5 Boron Steel, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 626, pp. 67~73.
- [9] P. Hippchen, A. Lipp, H. Grass, P. Craighero, M. Fleischer, M. Merklein, 2016, Modelling Kinetics of Phase Transformation for the Indirect Hot Stamping Process to Focus on Car Body Parts with Tailored Properties, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 228, pp. 59~67.
- [10] M. Geiger, M. Merklein, J. Lechler, 2008, Determination of Tribological Conditions within Hot Stamping, *Production Eng.*, Vol. 2, No. 3, pp. 269~276.
- [11] LS-DYNA Keyword User's Manual, Vol. 1, LS-DYNA R8.0