

유한요소해석을 이용한 열간프레스성형 적용 로어 컨트롤 암의 성형품질 조건 최적화

손 현 성* · 최 병 근

POSCO 기술연구원 가공연구그룹

Optimization of Conditions of Forming Quality for Hot-press-formed Lower Control Arm Using Finite Element Analysis

Hyunsung Son* · Byungkeun Choi

Metal Forming Research Group, POSCO Technical Research Laboratories, 699 Gumho-dong, Gwangyang-si, Jeonnam 545-090, Korea

(Received 13 January 2010 / Accepted 9 July 2010)

Abstract : Hot-Press-Forming (HPF), an advanced sheet metal forming method using stamping at a high temperature of about 900°C and quenching in an internally cooled die set, is one of the most successful forming process in producing crash-resistant parts such as pillars and bumpers with complex shape, ultrahigh strength, and minimum springback. To optimize conditions of a forming quality in HPF process and secure a safe product without any failures, such as fractures and wrinkling, the simulations based on the coupled thermo-mechanical analysis for a hot-press-formed lower control arm are applied with Taguchi's orthogonal array experiment. Three factor variables - the friction coefficient, blank shape, and hole location for burring - are selected to be optimized. The most effective condition of a forming quality for a hot-press-formed lower control arm is suggested. The simulation results are confirmed with experimental ones.

Key words : Hot-Press-Forming(HPF, 열간프레스성형법), Taguchi's orthogonal array experiment(다구치 직교배열 실험법), Coupled thermo-mechanical analysis(열-소성 연계해석), Lower control arm(로어 컨트롤 암)

1. 서 론

최근 자동차의 충돌성능 및 연비 향상을 위해 철강재료의 초고강도화 및 마그네슘 등과 같은 경량 신소재에 대한 관심이 집중되고 있다.¹⁾ 하지만, 소재가 고강도화 될수록 소재 연신이 떨어져 프레스 성형성이 악화되는데 이를 회피하기 위한 열간 판재 프레스 성형공법인 Hot-Press-Forming(HPF)은 B, Mo, Cr 등의 원소를 첨가하여 경화능을 향상시킨 강재를 Ac3 변태점 이상 상태인 약 900°C의 고온으로 가열한 다음, 특별 제작된 HPF 금형을 이용하여 한

번의 공정으로 열간성형함과 동시에 급냉하여 초고강도 제품을 제조하는 성형법이다.²⁾ 코일(coil)로부터 블랭킹(blanking)된 블랭크를 노(furnace)에서 약 10여분 동안 약 900°C의 온도로 가열하는 가열공정(Heating), 로봇 등을 이용하여 가열된 판재를 냉각장치된 프레스로 이송하는 운반공정(Transfer), 약 650~850°C 고온에서의 성형공정(Forming), 금형내부의 냉각수에 의한 냉각공정(Quenching), 그리고 성형된 부품의 후속공정(Laser Cutting)으로 HPF은 이루어지며 Fig. 1은 주요 공정의 장비 구성을 나타낸다. 또한, HPF 강재의 가공이력은 Fig. 2와 같고 일반적으로 평균 인장강도 1500MPa의 Martensite 조

*Corresponding author, E-mail: hsson@posco.com

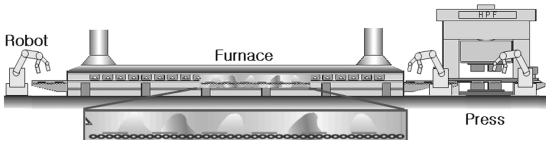


Fig. 1 Configuration of HPF facility

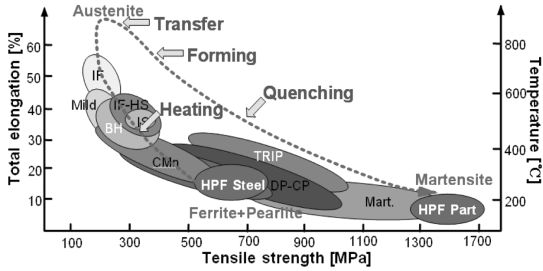


Fig. 2 Tensile strength and microstructure change during HPF process in Fig. 1

직을 형성한다.

상기의 철강재료를 이용한 초고강도화에 의한 경량화는 자동차 차체의 보강재에 널리 적용되고 있는 추세이다. 또한, 차량무게의 30%를 차지하는 새시(chassis) 중 현가장치 부품인 일체형 로어암(one-piece lower-arm)에도 경량화에 대한 관심이 확대되어 HPF를 적용한 시작품을 제작한 바 있다.^{3,4)} 하지만, HPF 성형공정은 열에 의한 공정변수로 인해 일반 상온상태의 스탬핑(stamping) 보다 작업조건 설정이 복잡하고 이론적 및 해석적 방법에 의한 연구도 초기 단계인이라 기술적으로 해결해야 할 점들이 많다.⁵⁻⁷⁾

한편, 금형과 블랭크 간의 고온상태의 마찰연구를 위해 가열장치를 부착후 평면마찰과 쥘드로잉마찰 실험한 결과, 소재, 온도, 산화스케일 등의 조건에 따라 상온상태의 마찰계수 범위보다 훨씬 넓은 0.3~0.6의 고온 마찰계수 값을 도출하였다.^{5,8)} 그 중 HPF 공정 특성을 최대한 묘사하기 위해서 윤활제 또는 방청유 도포 없이 실시한 평면마찰 연구⁸⁾에서 고온에서 생성되는 산화 스케일의 크기가 클수록 마찰계수 감소가 일어나며 50~150 μ m의 스케일 범위에서 0.4~0.5의 값을 갖는다고 밝혔다.

본 연구에서는 HPF 성형공정에서 초기블랭크 형상, 버링부홀 위치, 마찰계수와 같은 인자를 설계 및 공정변수로 설정후 제품의 성형품질 조건에 미치는

영향을 다구치 직교배열 실험법(Taguchi's orthogonal array experiment)⁹⁾으로 분석하고, 제한된 조건 범위 내에서 가장 좋은 성형품질을 얻을 수 있는 최적성형 조건을 설정하고자 한다. 또한, 실험을 통하여 얻어진 값과 비교하여 그 유효성을 평가하고자 한다.

2. HPF 공정의 유한요소해석

유한요소해석이 일반 상온상태의 스탬핑 공정에 있어 자동차부품을 개발하는데 있어 중요한 도구로 널리 이용되고 있듯이, 근래 주목받고 있는 HPF 부품개발에도 확대 적용이 가능하다.¹⁰⁾ 고온상태의 판재를 성형하는 동안 소재의 소성변형, 소재와 금형간의 열전달, 냉각에 의한 상변태 현상이 발생한다. 이러한 열-소성-상변태 현상은 각각 독립적으로 발생하는 것이 아니라 상호 연계되어 있다. 따라서, 정확한 해석을 위해서는 모든 현상을 상호 연계된 상태로 고려해야 되지만, 계산시간 증가 및 수치적 불안정성 때문에 열전달과 소성변형만을 고려하는 열-소성 연계 해석방법이 합리적이다. 즉, 열해석은 내연적(implicit)방법, 소성해석은 외연적(explicit)방법으로 분리하여 순차적 연계해석 방법(sequential coupling method)으로 접근하였다.^{4,11)}

Fig. 3은 2.8mm 두께를 갖는 HPF 강재의 일체형 로어암의 열-소성 연계해석을 위한 블랭크와 금형의 유한요소 모델 배치를 나타내며, 상세 해석 물성치는 기발표된 문헌^{4,12)}과 동일하다.

HPF 공정은 통상 2초 정도의 성형단계(forming)

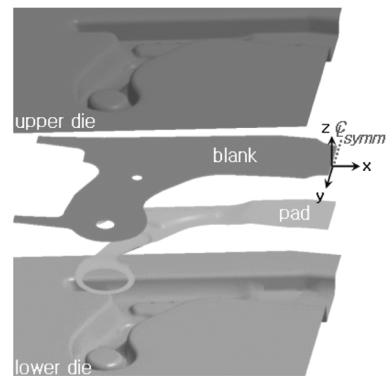


Fig. 3 Tool setup position of finite element model

와 15초 동안의 냉각단계(quenching)로 이루어지지만, 본 연구에서의 성형불량 발생을 억제하기 위한 최적 조건 도출은 성형단계만이 연관성이 있어 성형직전 블랭크 초기온도 780°C, 금형 온도 75°C로 가정한 성형단계의 열-소성 연계 해석으로 국한하였다.

3. 직교배열실험

3.1 품질 특성 및 목적함수 선정

고품질의 제품을 낮은 비용과 빠른 납기를 이루기 위한 R&D 단계에서의 생산성 향상을 위한 엔지니어링 방법으로 제조 현장에서 품질혁신의 도구로 잘 알려진 다구치 직교배열 실험법이 있다.⁹⁾ 적용을 위해서는 먼저 최적화 하여야 할 목적함수를 선정하여야 하는데, 일체형 로어암의 HPF 성형단계에서 성형불량 발생을 억제하기 위한 최적 조건을 구하는 것을 목적으로 한다.

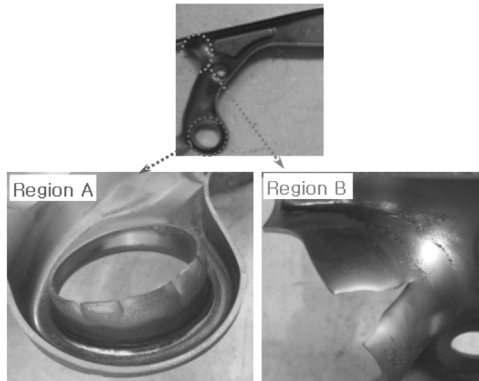


Fig. 4 Critical region of one-piece lower-arm

즉, Fig. 4에 도시된 바와 같이 제품불량 발생에 대한 척도로 평가되는 임계부위의 두께변형률 ϵ_t 을 최소화하는 것으로 달성할 수 있다. 즉, 이 문제는 망소특성(smaller-the-better) 형태의 문제가 된다. 최적화하여야 할 품질특성으로 제품 파단 부분에서의 두께방향 변형률의 절대치를 택하였다. 따라서, 최소화할 목적함수로서 S/N 비(η , signal to noise ratio)는 다음 값과 같다.

$$\eta = -10 \log [|\epsilon_t|^2] \quad (1)$$

3.2 제어인자 및 수준 선정후 실험

일반 상온상태의 스탬핑 공정과 유사하게, 열간상태의 HPF 공정의 가공성에 영향을 주는 인자들은 재료 고유 인장특성, 마찰 등의 공정변수와 금형 및 블랭크 형상에 대한 설계변수 등 여러 가지가 있다. 본 연구에서는 HPF 공정변수로 상온상태보다 2~3 배 이상인 마찰계수(A)를,⁸⁾ 설계변수로 버링(bur-ring)부를 별도 추가공정 없이 한번에 성형할 경우 불량발생 가능성이 높은 영역(Fig. 4의 Region A)인 버링부의 홀 위치(Fig. 5의 hole position, B)를 성형품질에 영향을 미치는 주요인자로 선정하였다. 또한, 일반 상온 스탬핑 공정에서도 로어암 부품 성형시 크랙 발생이 높은 곳(Fig. 4의 Region B)과 연관성이 있는 초기 블랭크 형상(Fig. 5의 blank shape, C)을 설계변수로 추가하였다. 단, 블랭크의 모든 치수는 고온의 열팽창효과가 고려되었고, 버링부 성형을 위한 하형 금형 외경과 블랭크 홀 내경 사이의 비는 2로 고정하였다.

계산의 효율화를 위해 한 인자에 대한 수준은 3으로 택하여 Table 1에 정리하였고, 버링부의 홀 위치 (B)와 블랭크 형상(C)의 인자에 대한 3수준의 형상 차이는 Fig. 5에 도시하였다. 여기서, 45°방향의 홀 중심 변위 2.0mm는 블랭크를 금형 위에 정위치 시킬 때 필요한 가이드 홀($\Phi 20$)과 관($\Phi 16$) 간의 차이에 의한 값으로 버링부의 홀 위치 B 인자와 연관성이 있다. 또한, 일반 상온 스탬핑 공정에서도 크랙 발생이 높은 곳의 블랭크 형상인 C 인자의 값은 성형시 변형저항을 최소화하면서 성형후 스크랩으로 처리되는 양을 최소화하는 것을 고려하여 평균 5.2mm 간격으로 설정되었다.

즉, 적합한 다구치 직교배열은 Table 2와 같은 4개의 제어인자와 3수준을 갖는 문제에 대한 L_9 직교배열이다. 다구치 직교배열 실험후 확인실험을 실시함으로써 제어인자들 사이의 교호작용의 존재여부

Table 1 Factors and their levels for numerical simulation

Factor	Levels		
	1	2	3
A (Friction coefficient, μ)	0.40	0.45	0.50
B (Hole position)	1	2	3
C (Blank shape)	1	2	3

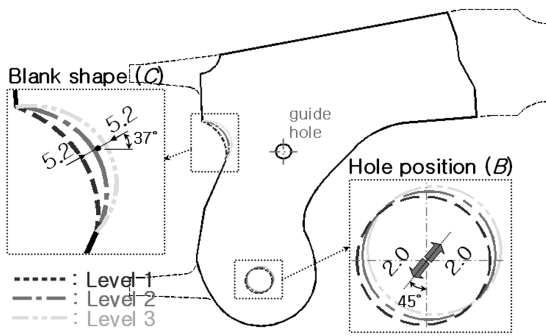


Fig. 5 Different shapes of three levels for hole position (B) and blank shape (C)

를 파악할 수 있다. 만일, 최적조건 하에서 예측된 응답이 측정치와 일치하지 않는다면, 이는 곧 교호작용이 크게 작용한다는 것을 의미하고, 양자가 잘못되면, 교호작용은 별로 중요하지 않고 다구치 직교배열실험이 적절했음을 의미한다.

3.3 실험 결과 및 고찰

L_9 직교배열에 따라 각각 열-소성 연계 해석한 경우의 임계영역(Fig. 4의 Region A와 B) 주위에서 얻은 최대 두께변형률과 이 값으로부터 계산한 목적함수 값을 Table 2에 함께 정리하였다.

Table 2 Matrix experiment of numerical simulation with L_9 orthogonal array from Taguchi's array table

exp. No	Column number and factor assignment			Observation of thickness strain	
	A	B	C	ϵ_t	η [dB]
1	1 (0.40)	1	1	-0.395	8.08
2	1 (0.40)	2	2	-0.397	8.02
3	1 (0.40)	3	3	-0.435	7.24
4	2 (0.45)	1	2	-0.399	7.97
5	2 (0.45)	2	3	-0.438	7.17
6	2 (0.45)	3	1	-0.431	7.30
7	3 (0.50)	1	3	-0.440	7.14
8	3 (0.50)	2	1	-0.476	6.45
9	3 (0.50)	3	2	-0.401	7.94

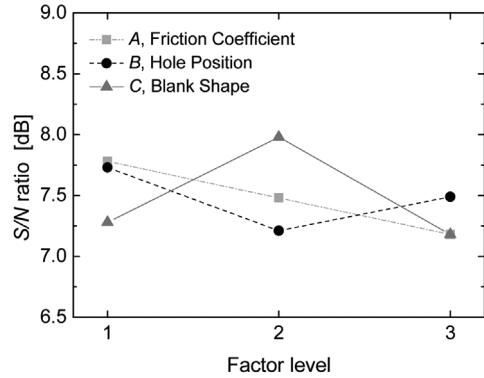


Fig. 6 Variation of S/N ratio according to factor level

Fig. 6은 목적함수 값을 이용하여 각 인자의 수준 변동에 따른 목적함수의 변화를 보여주는 평균분석(Analysis of Mean, ANOM) 결과이다. 즉, 마찰계수(A)는 1수준, 버링부의 홀 위치(B)는 1수준, 블랭크형상(C)은 2수준에서 최적목적함수가 얻어짐을 알 수 있다.

분산분석(Analysis of Variance, ANOVA)의 결과는 Table 3에 나타내었다. 각 인자에 대해 3수준으로 결정되는 제곱합(sum of squares)은 식 (2)에 의해 계산된다.

$$3(m_{j1} - m)^2 + 3(m_{j2} - m)^2 + 3(m_{j3} - m)^2 \quad (2)$$

여기서, m 은 $1/9 \sum \eta_i = 7.48$ [dB] 로, 9회 해석결과로부터 계산되는 η_i 의 평균값이다. 또한 m_{ji} 는 $1/3 \sum (\eta_j)_i$ 로 주어지는 j 인자에 대해 i 수준($i=1,2,3$)에서의 평균 η 값이다.

분산분석 결과를 보면 C인자의 영향이 전체 제곱합의 합(total sum of squares)에 대해 54.5%로 가장 크고, A인자는 25.8%, B인자는 19.6%의 영향을 미친다.

Table 3 ANOM and ANOVA table from matrix experiments along L_9 orthogonal array

Factor	Average η by level [dB]			Degree of Freedom	Sum of Squares	Contribution [%]
	1	2	3			
A	7.78*	7.48	7.18	2	0.54	25.8
B	7.73*	7.21	7.49	2	0.41	19.6
C	7.28	7.98*	7.18	2	1.14	54.5
Total	-			6	2.09	100

(1) Overall mean of η is 7.48 [dB]

(2) * Indicate the optimum level

다. 이와 같이 분산분석을 하는 목적은 목적 함수에 미치는 각 인자의 영향에 대한 상대적 크기를 결정하고 오차를 고려하여 그 정도를 평가하는데 있는데, 본 결과에서는 오차로 볼 수 있는 인자는 없으며 최적화된 $A_1B_1C_2$ 경우에 대한 열-소성 연계해석이 추가로 필요하여 실시하였다.

즉 실험계획법을 통해 최적화된 조건($A_1B_1C_2$)의 해석결과와 동일조건에 대한 실험결과를 Fig. 7 및 Fig. 8과 같이 나타내었다. 즉 성형시 불량발생 가능성이 높아 설계변수로 설정한 버링부의 홀 위치(Fig. 5의 hole position, B)와 초기 블랭크 형상(Fig. 5의 blank shape, C)에 대해 최적화된 조건하의 성형 비교결과이다. 여기서, 실험측정값은 Fig. 9의 시작금형을 이용하여 제조한 부품의 임계영역(Fig. 4의 Region A와 B) 주위를 측정하는 것이다.

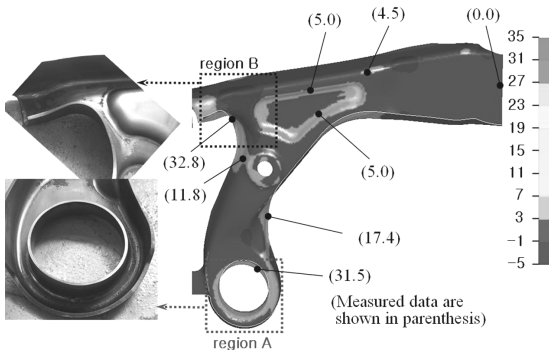


Fig. 7 Thinning comparison of experiment with numerical simulation of optimal conditions ($A_1B_1C_2$) for critical region A & B in Fig. 4

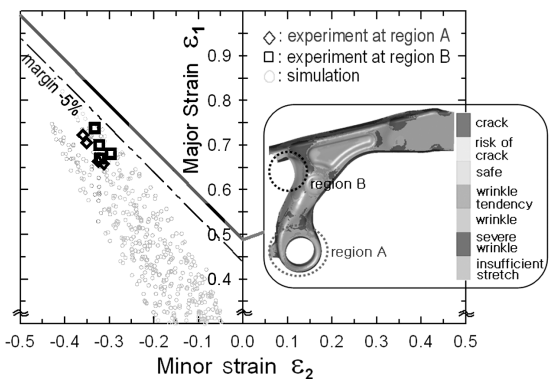


Fig. 8 FLD comparison of experiment with numerical simulation of optimal conditions ($A_1B_1C_2$) for critical region A & B in Fig. 4

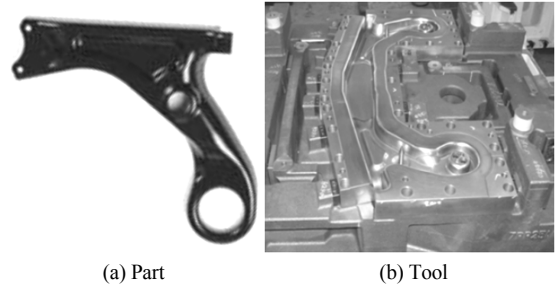


Fig. 9 One-piece lower-arm part manufactured in HPF process and its prototype tool

그 결과, 초기 블랭크 형상의 최적조건하에서 고온의 높은 마찰계수에도 불구하고 파단과 같은 성형불량 없이 재료 유동이 적절히 일어났다. 인장강도 980MPa이상의 초고강력강을 사용하여 복잡한 형상의 로어암 부품을 다단의 드로잉(drawing) 공정으로 나누어서 성형하지 않고 일회의 공정으로 성형한다는 것은 열간성형의 우수한 연신율로 인해 가능함을 의미한다. 그리고, 금형 외경과 블랭크 홀 내경 사이의 비가 2인 버링부 생성을 위해서는 드로잉 공정후 별도의 추가공정을 거쳐야 하지만 버링부의 홀 위치의 최적선정으로 인해 소재의 고온 연신을 최대한 활용한 단축인장 모드로 변형을 유도하여 양호한 제품을 제조할 수 있다. 해석상 성형한계도의 변형률 분포는 일축인장 변형모드를 따라서 위치하였으며 열간성형된 제품의 변형률 측정값도 일축인장 영역에 있었다. 또한, 실험 및 해석상의 변형률 양자 모두 파단 발생의 한계를 나타내는 성형한계곡선에 거의 도달하는 값이지만, 통상적인 성형한계곡선의 5% margin 영역에는 변형률이 존재하지 않아 불량 없이 최종 열간프레스성형 제품을 얻을 수 있었다. 즉 이는 성형품질 조건을 위한 변수가 타당함을 의미한다.

4. 결론

본 연구에서는 경량화 및 초고강도화 되고 있는 새시 부품 중 하나인 로어암을 대상으로 HPF 열-소성 연계해석과 다구치 직교배열 실험법을 연계하여 고온 성형품질의 최적조건을 도출하였다. 즉, 마찰계수(A)는 1수준, 버링부의 홀 위치(B)는 1수준, 블랭크 형상(C)은 2수준이 얻어졌다. 또한, HPF공정

의 우수한 성형성은 별도의 추가 성형공정 없이 한번의 성형공정만으로 버링비 2를 갖는 부품의 제조 가능성을 증명하였다. 그러므로, 고온하에서 작업이 이루어지는 HPF 공정도 열-소성 연계해석 기술을 설계단계부터 적용하여 고온 성형성을 사전 평가한다면 트라이아웃 단계에서의 시행착오와 생산과정에서의 불량률을 줄일 수 있음을 알 수 있었다.

References

- 1) W. Y. Na and S. K. No, "Forming Process and Lightweight Structure Analysis of Automotive Body and Chassis Parts," KSAE 2007 Workshop and Symposium, pp.82-106, 2007.
- 2) S. Y. Kang, J. S. Lee, J. H. Kim, H. G. Lee and K. N. Lee, "Application Trends on Automotive Parts of Press Hardening Process," Trans. Mater. Process., Vol.5, No.4, pp.263-268, 1996.
- 3) H. S. Son, H. G. Kim, B. K. Choi and Y. R. Cho, "Development of Automobile One-piece Lower-arm Part by Thermo-mechanical Coupled Analysis," KSTP 2008 Fall Conference Proceedings, pp.218-221, 2008.
- 4) H. S. Son, H. G. Kim and Y. R. Cho, "Formability Evaluation for Hot Press Formed Part using Coupled Thermo-mechanical Analysis," Numisheet 2008 (Pavel Hora) Conference Proceedings, pp.593-597, 2008.
- 5) M. Geiger, M. Merklein and J. Lechler, "Determination of Tribological Conditions within Hot Stamping," German Academic Society for Prod. Eng. Res. Devel., Vol.2, pp.269-276, 2008.
- 6) H. S. Son, H. G. Kim and B. K. Choi, "Optimization of Conditions of Forming Quality for Hot-press-formed Lower Control Arm using Finite Element Analysis," Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.2588-2592, 2009.
- 7) H. S. Choi, B. K. Kim, C. G. Kang, S. Y. Ha and D. H. Lee, "Optimization of Blank Shape for Hot Stamping of Center Pillar," Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.2439-2445, 2009.
- 8) A. Yanagida and A. Azushima, "Evaluation of Coefficients of Friction for Hot Stamping by Newly Developed Tribosimulator," IDDRG 2009 Conference Proceedings, pp.638-690, 2009.
- 9) M. S. Phadlke and G. Taguchi, "Selection of Quality Characteristics and S/N Ratio for Rubust Design," GLOBECOM 87 Meeting, pp.1002-1007, IEEE Communications Society, 1987.
- 10) M. Merklein and J. Lechler, "Investigation of the Thermo-mechanical Properties of Hot Stamping Steels," J. Mater. Proc. Technol., Vol.177, pp.452-455, 2006.
- 11) D. Lorenz and A. Haufe, "Recent Advances and New Developments in Hot Forming Simulation with LS-Dyna," Numisheet 2008 (Pavel Hora) Conference Proceedings, pp.615-620, 2008.
- 12) H. G. Kim, H. S. Son, S. Y. Kang and S. H. Park, "Thermal-mechanical Coupled Simulation on Ther Forming of Hot Press Formed Part," IDDRG 2006 Conference Proceedings, pp.349-356, 2006.