

열유동 해석을 통한 핫프레스 포밍 금형의 냉각 성능 평가

이경훈^{1, #} · 이재진² · 서창희³

Evaluation of Cooling Capability of Hot Press Forming Die with Thermal CFD Simulation

K. Lee, J. J. Lee, C. H. Suh

(Received May 4, 2016 / Revised July 8, 2016 / Accepted July 13, 2016)

Abstract

CFD simulation with FlowVision[®] is used to evaluate the capability of cooling channel in hot press forming dies. Two different types of cooling channels, dry drilled and pocket types are considered for comparison. Two different approaches for simulating cooling channel are considered. One is single-phase velocity calculation for coolant only and the other is multi-phase thermal and velocity calculation for die, blank and coolant all together. Both approaches show better cooling performance in pocket type cooling channel. Also both approaches show their own effectiveness in designing cooling channel of hot press forming dies.

Key Words : Hot Press Forming (HPF), Cooling Channel, CFD, FlowVision, Dry Drilled Type, Pocket Type, Turbulence

1. 서론

최근 자동차산업에서 경량화 및 고강도화의 추세로 점점 핫프레스 포밍으로 성형한 부품의 사용이 늘어나고 있다. 핫프레스 포밍은 고강도 철강 소재를 약 900℃ 정도로 가열한 후 금형을 사용하여 성형하는 동시에 소재를 냉각시켜 초고강도 특성을 얻는 공법이다. 핫프레스 포밍 기술의 핵심은 금형을 사용한 성형과 냉각분야이며 특히 가장 시간을 많이 차지하는 부분이 냉각시간이다. 예를 들면, 성형은 약 1초 내외로 완료되지만, 성형 후 소재의 냉각에 보통 7~10초 정도 소요된다. 또한, 성형 후 변형 저감을 위해서는 균일한 냉각을 통하여 제품의 치수정밀도를 확보해야 한다. 따라서 짧은 시간에 균일한 냉각이 이루어지는 것이 가장 중요하다.

핫프레스 포밍 금형의 냉각성능과 관련된 초기 연구로는 유동해석을 하지 않고 채널을 히트싱크로 두고 금형과 채널과의 열전달만을 고려해서 채널의 위치에 따른 금형 냉각성능을 평가하는 시도들이 있었다[1~3]. 그리고 냉각채널의 유동해석만을 수행하여 채널에서의 냉각수 속도분포를 사용하여 채널의 성능을 검증하려는 시도들도 있었다[4]. 하지만, 이러한 연구들은 실제 금형과 냉각수의 유동 상태에 따른 열전달을 정확히 표현하지 못하는 단점을 가지고 있었다. 최근에는 단순한 형태의 금형을 대상으로 블랭크와 금형의 열전달과 냉각수의 유동특성을 동시에 고려하는 연구들이 진행되고 있다[5, 6]. 하지만 여전히 실제 형상의 금형을 대상으로 블랭크와 금형의 열전달과 냉각수의 유동을 동시에 고려하여 연구는 수행되지 않고 있다.

1. ㈜솔루션랩

2. ㈜신화에스티

3. 대구기계부품연구원

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

본 연구에서는 자동차용 프론트 필러를 대상으로 냉각수 유동해석을 통하여 설계된 냉각채널의 성능을 확인하고 더 나아가 금형 및 블랭크를 포함한 열유동 해석을 통하여 핫프레스 금형의 냉각성능을 비교 평가할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

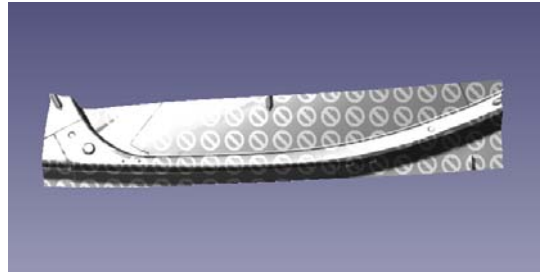
특히, 본 연구에서는 냉각채널 설계 시 사용되는 대표적인 두 가지 접근 방식인 건드릴 타입과 포켓 타입의 장단점을 보여주어 냉각채널 설계의 적절한 시점에서의 적용을 제안하였다.

2. 연구 내용과 방법

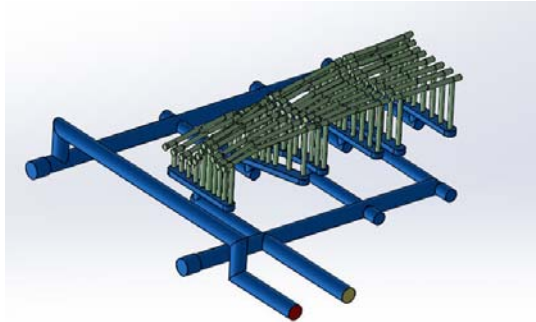
냉각 채널의 냉각 성능은 냉각수의 온도와 속도에 의해 결정된다. 핫프레스 포밍의 냉각 공정 중에 냉각수의 온도 증가(20℃ 내외)는 블랭크의 온도(700~900℃)에 비하면 그다지 높지가 않아 그 영향이 미미하다 할 수 있다. 따라서 채널 위치에 따른 냉각수의 속도가 냉각 성능을 좌우할 수 있는 가장 일반적이 지표가 된다. 냉각채널 설계 시 블랭크와 채널 사이의 거리에 따른 냉각 효과를 무시할 경우 냉각 채널의 유동 해석만으로 냉각 채널의 설계상의 문제점 또는 오류를 파악할 수 있어 효율적이 접근 방법이 될 수 있다. 이러한 접근 방법은 모델링과 해석 시간이 짧아 수 분내에 결과를 확인하고 설계에 반영할 수 있기 때문에 채널 초기 설계 단계에 적용하는 것이 가능해 보인다.

하지만 냉각 채널의 냉각 성능을 잘 파악하기 위해서는 냉각 채널의 냉각수와 금형간, 가열된 블랭크와 금형간의 열전달을 동시에 해석하여 실제 제품의 냉각되는 온도를 예측하는 것이 요구된다. 앞에서 언급한 냉각수의 유동만을 고려한 해석에 비하여 블랭크와 냉각채널과의 간격에 따른 소재 냉각의 불균일성, 냉각 채널간의 간격에 따른 금형 냉각의 불균일성 등을 확인할 수 있어 금형 설계의 성능 검증에 매우 효과적이다.

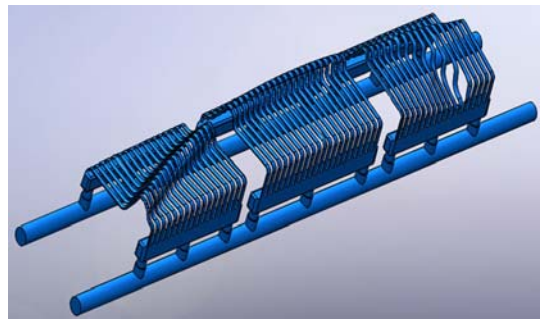
본 연구에서는 동일한 제품에 대하여 두 가지 타입의 냉각채널을 설계하고 위에서 언급한 두가지 접근 방법으로 두 가지 타입의 냉각채널의 냉각 능력을 상대 비교하고자 하였다. 냉각채널은 직선형 드릴을 사용하여 제작되는 건드릴 타입과 금형 외부 곡면을 따라 내부를 밀링 가공하여 금형과 냉각채널간의 간격을 일정하게 유지한 포켓타입 두 가지를 고려하였다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 1 Model (a) sheet, (b) dry drilled type cooling channel and (c) pocket type cooling channel

3. 해석 모델 및 격자 구성

Fig. 1 (a)에서는 성형이 완료된 블랭크 소재 형상을 나타냈으며, Fig. 1 (b)와 (c)에는 각각 건드릴 타입과 포켓 타입의 냉각채널 형상의 일부를 나타냈다. 건드릴 타입의 경우 상하 각각 2개의 분리된 입출구를 가진 채널로 설계되었고 그림에는 하형 좌측 채널을 보여주고 있다. 포켓타입의 경우 상하 각 1개의 입출구까지 채널로 설계되었고 그림에는 하형 채널을 보여주고 있다.

열유동 해석은 범용 CFD 소프트웨어인 FlowVision을 사용하였다. FlowVision은 복잡한 형상을 가지는 열유동 문제에 적합한 해석 프로그램으로 설계된

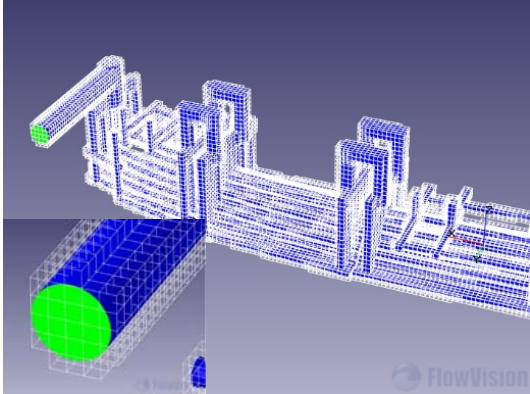


Fig. 2 Grid generation with adaptation

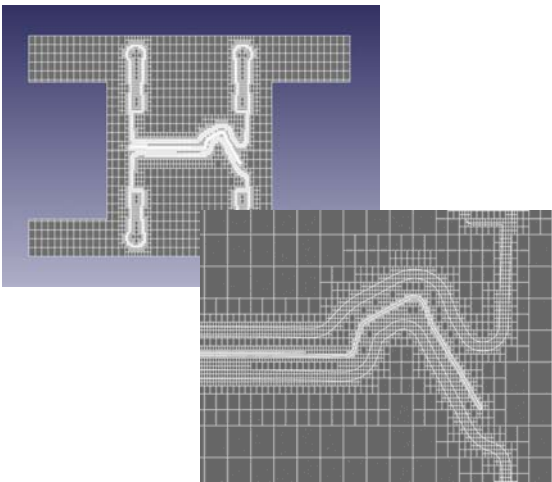


Fig. 3 Grid generation with adaptation for pocket type cooling channel model

냉각채널의 CAD 모델을 해석 모델에 포함시켜 자동 격자 구성을 제공한다. FlowVision에서 제공하는 SGGR(sub-grid geometry resolution)은 곡면 형상을 격자의 일부로 사용함으로써 기존의 CFD 소프트웨어에 비하여 수 배 적은 수의 격자를 사용하는 것을 가능하게 한다. Fig. 2는 냉각수의 유동만을 고려한 단상 해석 시 건드릴 타입의 냉각채널 격자모델이다. 원형 단면을 격자의 일부로 사용하여 전체 격자의 수를 일반적인 유동해석 식에 비하여 1/10 수준으로 감소시킬 수 있었다.

블랭크, 금형, 냉각채널을 모두 고려한 3상 해석 모델 구성 단계는 먼저 금형, 블랭크 및 냉각 채널 형상을 확보한다. 금형의 경우 제품 부위를 포함한 상하금형을 합친 형상을 확보한다. 확보된 형상을 FlowVision에 금형, 제품, 채널 순으로 순차적으로 불러들인다. 프로그램은 자동으로 형상간의 간섭을

체크하고 확인한다. 각 형상에 Adaptation 가중치를 부여하면 자동으로 격자 구성을 완성할 수 있다. Fig. 3은 포켓타입 모델의 구성된 격자 단면을 보여주고 있다. 제품에는 Adaptation level 3을 냉각채널에는 Level 2를 적용한 결과이다. 건드릴 타입과 포켓 타입 각각에서 전체 격자 수는 모두 600만개 내외로 사용되었다.

4. 해석 조건 및 결과

4.1 단상 유동 해석

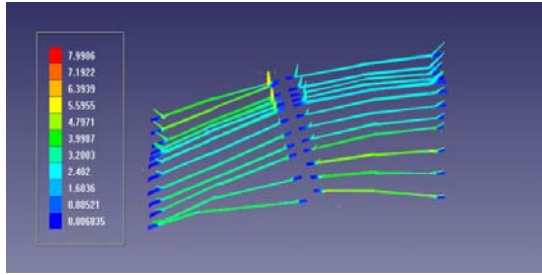
냉각수는 Newtonian Fluid로 가정한 물을 사용하였고 난류 모델로 K-epsilon 모델을 사용하였다. 경계 조건은 유입부에 3.3bar의 압력을 유출부에 1.0bar의 압력을 부가하였다. 유입부의 압력 3.3bar는 사용 장비의 규격에서 파악하였다.

단상 유동해석의 결과는 전체적인 속도 분포를 검토하고 요구되는 속도에 못 미치는 영역을 검토하는 과정으로 진행되었다. 냉각수의 열전달 계수는 냉각수 속도의 2차 함수에 비례하며 대략 최소 요구 속도 2.0m/s의 경우 10kW/m²K을 보여준다[7].

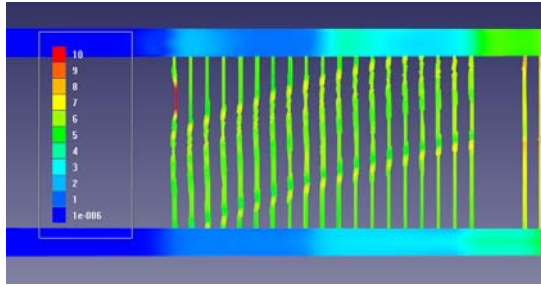
최소 요구 속도는 유사한 냉각 해석을 열전달 계수와 냉각수 온도를 부여한 열전달 해석을 수행한 경우 10kW/m²K의 열전달 계수의 경우 충분한 냉각이 이루어져 최소 속도 요구 조건 기준으로 사용하고 있다.

Fig. 4는 두 가지 타입 냉각 채널의 전체적인 속도 분포를 보여준다. 건드릴 타입의 경우 4개의 냉각 채널 중에서 상부 좌측 채널의 결과를 나타냈다. 포켓 타입의 경우는 상부 채널 전체를 해석하여 결과를 표시하였다. 전체적인 속도는 건드릴 타입의 경우 2~4m/s, 포켓 타입의 경우 5~7m/s의 값을 보여주었다. 건드릴 타입의 경우 채널 직경이 12mm인 것에 비하여 포켓 타입은 11mm 직경의 반원으로 채널이 설계되어 있어 이에 따라 상대적으로 높은 속도 값을 보여주었다. 냉각수의 속도만으로 판단해 볼 때 포켓타입이 더 좋은 냉각 성능을 보일 것으로 예상할 수 있었다. 두 타입 모두 최소 요구 속도인 2m/s는 만족하였다.

냉각 채널의 냉각 성능은 층류에 비해 난류에서 훨씬 높게 나타나는 것으로 알려져 있다. Michael Stricker 등[8]은 냉각 채널에 내부에 스프링과 같은 방해 요소를 삽입하여 난류를 유도하여 냉각 성능을



(a)



(b)

Fig. 4 Velocity distribution for (a) dry drilled and (b) pocket type cooling channel model

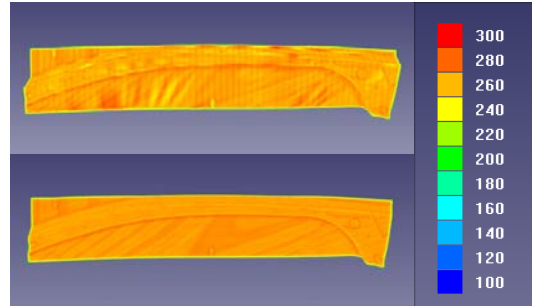
향상 시킬 수 있다고 보고하고 있다. 난류의 평가 지표인 난류 에너지값을 비교해 보면 건드릴 타입의 경우 대략 $0.1\text{m}^2/\text{s}^2$ 반면 포켓 타입의 경우 $0.3\sim 0.6\text{m}^2/\text{s}^2$ 정도의 값을 보여주고 있어 포켓 타입이 월등히 우수한 냉각 성능을 가질 것으로 예측할 수 있다.

채널 설계 측면에서도 포켓 타입의 경우 Fig. 4 (b)에서와 같이 가장 좌측 채널에서 극히 좁은 채널이 설계된 것을 해석 결과를 통해 쉽게 확인할 수 있어 설계 오류를 확인할 수 있었다. 건드릴 타입의 경우 곡선부의 채널 설계에서 복잡한 분기에 따른 온도 불균형을 확인할 수 있었다.

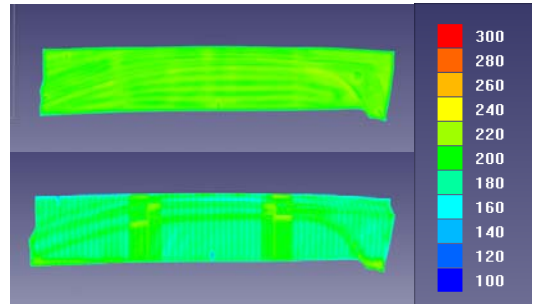
냉각수의 유동해석은 냉각수 속도의 절대값 파악을 통한 채널 성능의 검증 및 채널 설계에서의 국부적인 형상 오류 또는 건드릴 타입의 경우 분기 오류를 확인하는 용도로 사용이 적절한 것으로 파악된다.

4.2 다상 열유동 해석

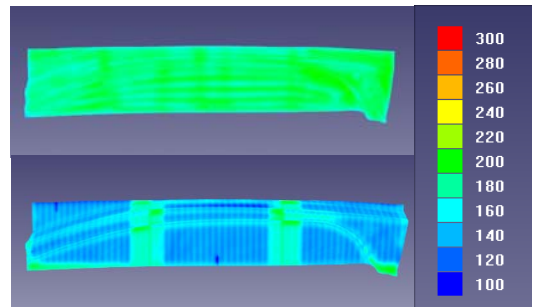
금형과 블랭크 및 냉각 채널을 포함한 전체 모델을 동시에 해석하는 다상 열유동 해석을 실시하였다. 금형은 고체 강철로 정의하였고 양산 시의 조건을 가정하여 초기 온도를 150°C 로 설정하였다. 블랭크



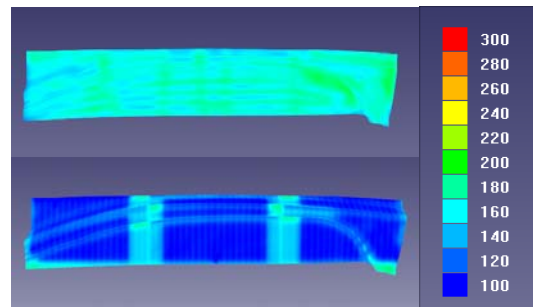
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5 Temperature distribution of product at (a) 1, (b) 3, (c) 5 and (d) 7 seconds

크 역시 고체 강철로 정의하였고 초기 온도를 900°C 로 가정하였다. 냉각채널을 흐르는 액체는 물로 정의하였고 초기 온도는 20°C 로 가정하였다. 금형과 블랭크, 금형과 냉각수간에는 Conjugate heat

transfer 조건으로 열전달을 설정하였다. 냉각수는 유동과 열전달을, 금형 및 블랭크는 열전달만을 고려하였다. 냉각채널의 입구는 3.3bar의 압력을 부가하였고 출구는 대기 조건(1.0bar)을 가정하였다. 실제 냉각 조건과 유사하게 7초 동안 냉각을 진행하였다. 3상 해석의 경우 동일한 조건에서 두 가지 타입의 냉각 채널을 사용하여 동일한 블랭크를 냉각시켜 냉각 성능을 상대적으로 비교하고자 하였다. Fig. 5는 각 1초, 3초, 5초, 7초에서의 제품의 온도 분포를 비교하였다. 전체적으로 포켓타입의 냉각채널이 건드릴 타입의 냉각채널에 비해 우수한 냉각성능을 보여주고 있다. 특히 건드릴 타입의 경우 2개의 입구를 통해 3.3bar 압력의 냉각수가 투입되기 때문에 1개의 입구를 통해 3.3bar의 냉각수가 투입되는 포켓타입과 비교한다면 포켓타입의 냉각채널이 월등히 우수한 냉각성능을 보여주고 있음을 알 수 있다.

채널 설계적 측면에서 볼 때 건드릴 타입의 채널 표면적은 상하 각각 607,444, 633,846mm²로 포켓타입의 668,524, 615,302mm² 비해 유사한 수준으로 파악되었다. 포켓타입의 경우 냉각과 무관한 수직연결관이 포함된 면적임을 고려할 때 건드릴 타입이 약간 더 넓은 냉각면적을 가지는 것으로 판단되었다. 냉각 채널과 금형 표면간의 거리는 건드릴 타입의 경우 11.0~12.6mm로 포켓타입의 10.0mm에 비해 큰 것으로 확인되었다.

내면 가공으로 제작된 포켓타입 방식이 금형 표면과 채널간의 간격을 줄이고 채널 단면적 감소를 통한 냉각수 속도를 증가시키면서도 냉각 표면적을 건드릴 방식과 유사하게 유지할 수 있어 훨씬 더 나은 냉각 성능을 확보할 수 있었다.

다만 포켓타입의 경우 포켓을 형성하기 위하여 전체 금형을 3개로 분할하는 과정에서 분할 부위에 냉각 채널이 존재하지 않는 문제점을 가지게 된다. 이로 인하여 건드릴 타입에 비하여 불균일한 온도 분포를 보여주고 있다. 불균일한 온도 분포는 위치에 따른 상변태 시점의 변화를 초래할 수 있어 제품의 뒤틀림을 발생시키는 원인으로 작용할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 열유동 해석 기법을 이용하여 핫프레스 포밍 금형의 냉각 성능을 파악할 수 있는

방안을 제시하고자 하였다. 두 가지 다른 채널 타입을 비교하여 단상 해석 및 다상 해석 모두에서 포켓타입이 우수한 냉각 성능을 가지는 것을 확인하였다.

복잡한 금형 채널을 설계자가 직접 보면서 설계의 문제점을 파악하는 것은 숙련된 설계자라도 쉽지 않은 일이다. 특히, 건드릴 타입의 경우는 채널이 서로 교차하며 합쳐지고 분리되는 곳이 많아 서로 간의 영향을 설계자가 직관적으로 평가하는 것은 거의 불가능하다. 냉각수의 유동만을 고려한 단상 해석은 설계 상의 오류를 파악할 수 있는 유용한 도구로 사용될 수 있다. 또한 냉각수 속도 및 난류 에너지값을 분석하여 냉각 채널의 냉각 능력을 상대 또는 절대적으로 평가할 수 있다. 검토된 건드릴 타입과 포켓 타입의 경우 냉각수 속도 및 난류 에너지값 모두에서 포켓 타입이 월등히 우수한 성능을 보여주고 있었다.

금형, 블랭크 및 냉각수를 모두 포함하여 열전달과 유동해석을 동시에 진행하는 다상해석을 실시하여 두 가지 타입의 냉각 채널에 대한 상대비교를 진행하였다. 실제 냉각 시간을 고려한 해석으로 블랭크의 냉각 상태를 확인할 수 있고 전체적인 냉각 불균형을 평가할 수 있는 도구로 사용될 수 있다. 다상 해석의 경우 역시 포켓타입이 낮은 블랭크의 온도값을 보여주고 있어서 더 효과적인 냉각 방식을 확인할 수 있었다.

추후에는 포켓 타입으로 제작된 실금형으로 진행된 실험과의 결과 비교를 통하여 해석 결과의 정량적 검증을 진행하려고 한다.

REFERENCES

- [1] S. Y. Lee, K. Lee, Y. H. Lim, W. C. Jeong, 2012, Proc. Kor. Soc. Automot. Eng. Annual Conf., Kor. Soc. Automot. Eng., Seoul, Korea, pp. 2104~2108.
- [2] 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.
- [3] H. Liu, C. Lei, Z. Xing, 2013, Cooling System of Hot Stamping of Quenchable Steel BR1500HS: Optimization and Manufacturing Methods, Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 69, No. 1~4, pp. 211~223.
- [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 Numerical Methods in Industrial Forming Process(editor: S-H. Zhang), AIP Publishing, Shenyang, China, pp. 471~177.
- [6] T. Lin, H-W Song, S-H Zhang, M. Cheng, W-J 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] J. Cui, C. Lei, Z. Xing, 2012, Predictions of the Mechanical Properties and Microstructure Evolution of High Strength Steel in Hot Stamping, J. Mater. Eng. Perform., Vol. 21, No. 11, pp. 2244~2254.
- [8] M. Stricker, G. Steinbichler, 2014, Turbulence in the Cooling Channel, Kunststoffe International, 11/2014, Carl Hanser Verlag, Munich, pp. 19~22.