

균일 강도 핫스탬핑 부품의 제조를 위한 냉각채널 최적 설계 및 V-벤딩 공정에서의 적용

Optimal Design Method of the Cooling Channel for Manufacturing the Hot Stamped Component with Uniform Strength and Application to V-bending Process

임우승¹, 최홍석¹, 남기주¹, 김병민^{2,✉}
Woo Seung Lim¹, Hong Seok Choi¹, Ki Ju Nam¹ and Byung Min Kim^{2,✉}

¹ 부산대학교 정밀가공시스템 전공 (Precision Manufacturing Systems Division, Pusan National Univ.)

² 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.)

✉ Corresponding author: bmkim@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-3074

Manuscript received: 2010.9.6 / Accepted: 2010.10.19

In recent years, hot-stamped components are more increasingly used in the automotive industry in order to reduce weight and to improve the strength of vehicles. In hot stamping process, blank is hot formed and press hardened in a tool. However, in hot stamping without cooling channel, temperature of the tool increases gradually in mass production thus cannot meet the critical cooling rate to obtain high strength over 1500MPa. Warpage occurs in the hot stamped component due to non-uniform stress state caused by unbalanced cooling. Therefore, tools should be uniformly as well as rapidly cooled down by the coolant which flows through cooling channel. In this paper, optimal design method of cooling channel to obtain uniform and high strength of the component is proposed. Optimized cooling channel is applied to the hot press V-bending process. As a result of measuring strength, hardness and microstructure of the hot formed parts, it is known that the design methodology of cooling channel is effective to the hot stamping process.

Key Words: Hot Stamping (핫스탬핑), Cooling Channel (냉각 채널), Triangular Method (삼각 기법), Uniform Strength (균일 강도), Energy Balance Principle (에너지 평형 법칙), V-bending (V-벤딩)

기호설명

Re_{in} = Reynolds' Number at inlet of cooling channel

Re = Reynolds' Number

ν = Kinematic viscosity (m^2/s)

T_i = Initial temperature of the blank ($^{\circ}C$)

T_e = Ejection temperature of the blank ($^{\circ}C$)

T_w = Temperature of the cooling water ($^{\circ}C$)

t_c = Cycle time (s)

γ = Specific weight of the water (kgf/m^3)

f = Friction coefficient in turbulent flow

t = Thickness of the blank (m)

ρ = Density of the water (kg/m^3)

l = Length of the cooling channel (m)

\dot{Q}_h = Heat transfer rate per hour from blank to tool (kcal/h)

\dot{Q} = Heat transfer rate per hour from tool to coolant(kcal/h)

C_{p1} = Specific heat of the blank (kcal/kg $\cdot^{\circ}C$)

A_e = Surface area of the blank (m^2)

T_m = Average temperature of tool surface ($^{\circ}C$)

α_{TB} = Heat transfer coefficient between tool and blank

(kcal/m²·h·°C)

α_{TC} = Heat transfer coefficient between tool and coolant

(kcal/m²·h·°C)

v = Velocity of the coolant (m/s)

λ_m = Thermal conductivity of the tool(kcal/m·h·°C)

α = Heat diffusion rate(kcal/m·h·°C)

d = Diameter of the cooling channel (m)

1. 서론

최근 자동차 제조업계에서 차량의 충돌 성능 향상과 차체 경량화에 대한 요구가 증가함에 따라 핫스탬핑(Hot Stamping) 공정에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다.^{1,2} 핫스탬핑은 보론강판을 A_{C3} 변태점 이상 가열하여 성형한 후 금형 내에서 급냉시켜 마르텐사이트 조직을 얻음으로써 인장강도 1,500MPa 이상의 초고강도 제품을 제조하는 성형 기술이다.^{3,4} 그러나 핫스탬핑 공정에서는 성형 횟수의 증가에 따라 금형의 온도가 지속적으로 상승하게 된다. 보론강의 임계냉각속도는 35°C/s 로 알려져 있으며⁵ 금형의 온도가 높은 상태에서 핫스탬핑을 수행할 경우, 냉각속도가 이보다 낮아지게 되어 마르텐사이트보다 연질인 베이나이트 및 페라이트 조직이 석출되는 문제점이 발생한다. 따라서 금형을 충분히 냉각시키기 위해 금형 내에 냉각 채널을 적절히 배치하여야 한다.

핫스탬핑은 일반적인 성형과는 달리 냉각 공정이 추가되므로 사이클 타임(cycle time)이 길다. 따라서 생산성 향상을 위해서 냉각시간을 최대한 줄이는 것이 중요하다. 또한, 제품이 불균일하게 냉각될 경우 부품 내의 조직 및 강도 차이가 발생하고 이것이 심할 경우에는 응력의 불균일에 기인한 뒤틀림이 일어나기도 한다. 따라서 냉각 채널의 위치와 형상의 최적화를 통해 이러한 문제를 해결해야 한다.⁶

지금까지 사출성형 및 다이캐스팅 분야에서 냉각 채널 설계 방법에 대해 많은 연구가 이루어져 왔다. Park 등⁷은 금형을 분할하여 각 부분에 설치되는 냉각 채널의 크기 및 위치를 개별적으로 최적화하여 냉각 성능과 균일성을 향상시켰고, Rao 등⁸은 냉각수 속도, 온도 및 금형재료의 열전도도를 고려한 간단한 수식을 통해 냉각 속도를 최소화 할 수 있는 모델을 개발하였다. 또한 Lin 등⁹은 소재의 형상 인자와 에너지 평형 조건을 적용하여

복잡한 형상의 제품 생산 시에도 간이 계산을 통해 냉각 채널을 최적화할 수 있는 알고리즘을 개발하였다.

핫스탬핑 공정의 냉각 채널 설계에 관하여 Steinbeiss 등¹⁰은 진화 알고리즘 기반의 사출 금형 냉각 채널의 최적화 배치 방법을 핫스탬핑 공정에 적용하였고 Hoffmann 등¹¹은 그 결과를 바탕으로 열-기계적 해석과 열해석 결과를 비교하여 열해석만으로도 냉각 채널 설계의 최적화가 가능함을 보였다. 또한, Nam 등¹²은 냉각 채널 최적화를 위해 실험계획법을 기반으로 공정변수의 영향도를 평가하였으며 냉각 특성에 유체의 유동조건과 채널과 벽면 사이의 거리가 가장 중요함을 밝혔지만 채널의 거리에 따른 금형의 강도 문제는 고려되지 않았다.

본 연구에서는 균일하면서도 높은 강도를 가진 핫스탬핑 제품의 제작을 위한 냉각 채널 설계 방법을 제시하였다. 이를 위하여 에너지 평형 법칙¹³을 적용하여 냉각 성능을 충분히 발휘할 수 있는 냉각 채널의 위치를 확보하였다. 또한, 성형 시 냉각 채널의 위치에 따라 금형에 가해지는 응력을 고려함과 동시에 균일한 냉각을 위해 삼각 기법(Triangular method)을 이용하여 채널의 배치를 수행하였다. 최적화된 냉각 채널을 핫프레스 V-벤딩 금형에 적용하였으며 인장강도, 경도, 조직 등을 평가한 결과, 균일하면서도 높은 강도를 가진 제품을 제작할 수 있었다.

2. 설계 변수의 결정

2.1 초기 조건

본 연구에서의 냉각채널 최적화 방법은 에너지 평형법칙^{9,14}을 기반으로 하였다. 따라서 소재가 금형에 가하는 열전달량과 냉각수가 금형으로부터 흡수하는 열량이 같다고 가정하였다. 소재로부터 금형으로의 열전달량을 계산하기 위해 고려한 초기 조건은 소재의 초기 온도(T_i), 소재 취출 온도(T_o), 냉각 사이클 타임(t_c) 및 냉각수 온도(T_w)이다.

2.2 금형 벽면의 평균 온도

생산 횟수가 증가하여도 금형 벽면의 평균 온도(T_m)가 일정하게 유지된다고 하였을 때, T_m 은 다음의 식을 통해 계산된다.^{14,15}

$$T_m = \frac{T_e \frac{4}{\pi} e^{-\frac{t_c \pi^2 \alpha}{l^2}} - T_i}{e^{-\frac{t_c \pi^2 \alpha}{l^2}} - 1} \quad (1)$$

$$\alpha_{TB} = \frac{1}{\frac{\delta}{\lambda_m} + \frac{1}{\alpha_{TC}}} \quad (4)$$

2.3 냉각 채널의 직경

일반적으로 냉각효율의 증가를 위해서는 난류 유동이 필요하다. 따라서 냉각 채널의 직경이 커지면 난류 유동을 위해 필요한 냉각수 유량이 증가하게 된다. 반면 직경이 너무 작으면 냉각 효율을 위하여 배치해야 할 채널의 개수가 증가할 뿐만 아니라 채널의 가공 시, 여러 가지 문제가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 소재 두께에 따라 통상적으로 적용되는 채널의 직경을 이용하였으며 Table 1 에 그 범위를 나타내었다.⁹

Table 1 Selection of cooling channel diameter

Blank thickness, t(mm)	Cooling channel Diameter, d(mm)
t ≤ 2	8 ≤ d ≤ 10
2 < t ≤ 4	10 < d ≤ 12
4 < t ≤ 6	12 < d ≤ 14

2.4 냉각수의 유동

냉각 효율을 위해서는 냉각수의 난류 유동이 중요한데, 이를 위해 요구되는 레이놀즈 수는 일반적으로 4,000 이상으로 정하고 있다.¹⁶ 레이놀즈 수가 증가할 수록 냉각 효율은 증가하지만, 그 값이 10,000 을 초과할 경우 냉각 효율의 증가율보다 압력 강하가 더 커져 냉각수 펌프의 필요 용량만을 증가시키게 된다. 따라서 본 연구에서 적용한 레이놀즈 수의 범위는 4,000 이상 10,000 이하이다.

한편, 원형 직선 관에서의 수두 손실을 고려하면서 냉각수의 난류 유동을 가능하도록 하는 최소 레이놀즈 수와 그에 따른 냉각수의 속도는 각각 식 (2)와 (3)에 의해 계산된다.

$$Re_{in} = \sqrt{\frac{(Re_{thr})^2 \cdot \gamma}{\gamma - \gamma fl/d + gfl\rho/d}} \quad (2)$$

$$v = \frac{Re \cdot \nu}{d} \quad (3)$$

2.5 냉각 채널과 금형 벽면 간의 거리

소재와 금형 간의 열전달계수(α_{TB})는

와 같이 나타내어지며, 이 때 금형과 냉각수 간의 열전달율(α_{TC})은

$$\alpha_{TC} = 5.69 \times 10^{-4} \cdot (3210 + 43 \cdot T_{water}) v^{0.8} / d^{0.2} \quad (5)$$

과 같이 된다. 냉각채널과 금형 벽면 간의 거리(δ)를 구하기 위해서는 α_{TB} 를 알아야 한다. α_{TB} 는 다음과 같은 관계식으로부터 구할 수 있다. 즉, 1 시간당 소재가 금형으로 가하는 열전달량

$$\dot{Q}_h = W_l \times C_{pl} \times (T_i - T_e) \quad (6)$$

와 냉각수가 금형으로부터 흡수하는 열량

$$\dot{Q} = A_e \cdot \alpha_{TB} \cdot (T_m - T_{water}) \quad (7)$$

를 동일하다고 하면 식 (5), (6) 및 (7)을 통해 충분한 냉각 성능을 위해 확보되어야 할 채널 중심으로부터 벽면까지의 최대 거리(δ)는 식 (8)과 같이 계산된다.

$$\delta = \lambda_m \cdot \left[\frac{A_e (T_m - T_{water})}{\dot{Q}_h} - \frac{1}{\alpha_{TC}} \right] \quad (8)$$

여기서 A_e 는 소재의 표면적으로 가정한다. 식 (8) 은 채널 중심으로부터 벽면까지의 거리(δ)보다 떨어진 위치에 냉각 채널을 배치할 경우 요구되는 냉각 성능을 발휘할 수 없다는 것을 나타낸다.

2.6 금형의 최대 유효 응력 계산

냉각 채널을 가진 금형에 가해지는 최대 응력은 주로 냉각 채널 중심에서 금형 벽면까지의 거리와 채널의 직경에 영향을 받고, 응력 집중에 의해 냉각 채널을 가지지 않은 금형에 가해지는 응력보다 더 높은 응력을 받는다. 본 연구에서는 핫스탬핑 금형의 항복 여부를 파악하기 위해 Fig. 1 과 같이 간략한 모델에 대한 유한요소해석을 통하여 냉각 채널이 설치된 금형에 가해지는 최대 유효 응력을 계산하였다.

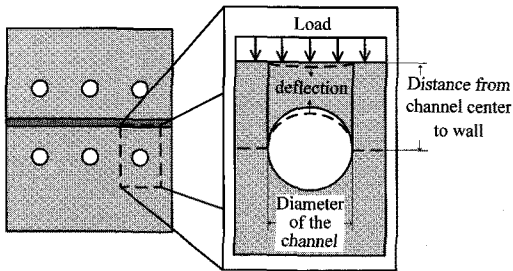


Fig. 1 Simplified model for evaluating stress acting on the hot stamping tool

2.7 냉각 채널의 개수

냉각 채널의 길보기 면적(A_c)은 제품의 표면적(A_e)과 같거나 넓어야 한다고 가정하면 냉각 채널의 개수는 다음 식과 같이 표현될 수 있다.^{8,9}

$$n \geq A_e / (\pi \cdot d \cdot l) \quad (9)$$

3. 삼각 기법을 이용한 냉각 채널의 배치

냉각 채널 간의 거리 및 냉각 채널과 금형 벽면간의 거리가 결정되면 그 형상은 Fig. 2 에 나타낸 바와 같이 각도(θ)를 가진 삼각형을 이루게 된다. 본 연구에서는 θ 를 이용하여 냉각 채널의 간격을 결정하는 삼각 기법(Triangular Method)을 제안하였다. Fig. 3 은 V-벤딩 금형에서의 냉각 채널 배치 시 삼각 기법을 이용한 절차를 나타낸 것이다.

먼저 열 집중을 고려하여 180° 보다 작은 각도를 가지는 코너부에 δ 만큼 오프셋(offset)한 위치에 냉각 채널을 우선 배치한다(①). 다음으로 직선 형상 표면부의 오프셋 선을 따라 삼각 기법을 이용하여 냉각 채널을 순차적으로 배치한다(②). 소재 바깥부분을 기준으로 냉각 채널이 배치되지 않은 부위에 채널을 배치한 후 직선 형상 표면부의 오프셋 선을 따라 배치한다(③). 표면부에 배치한 채널 개수가 필요 냉각 채널 개수에 미치지 못할 경우, 채널 간 거리가 최대가 되는 곳 사이에 냉각

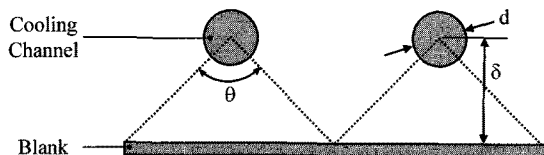


Fig. 2 Determination of distance between cooling channels by triangular method

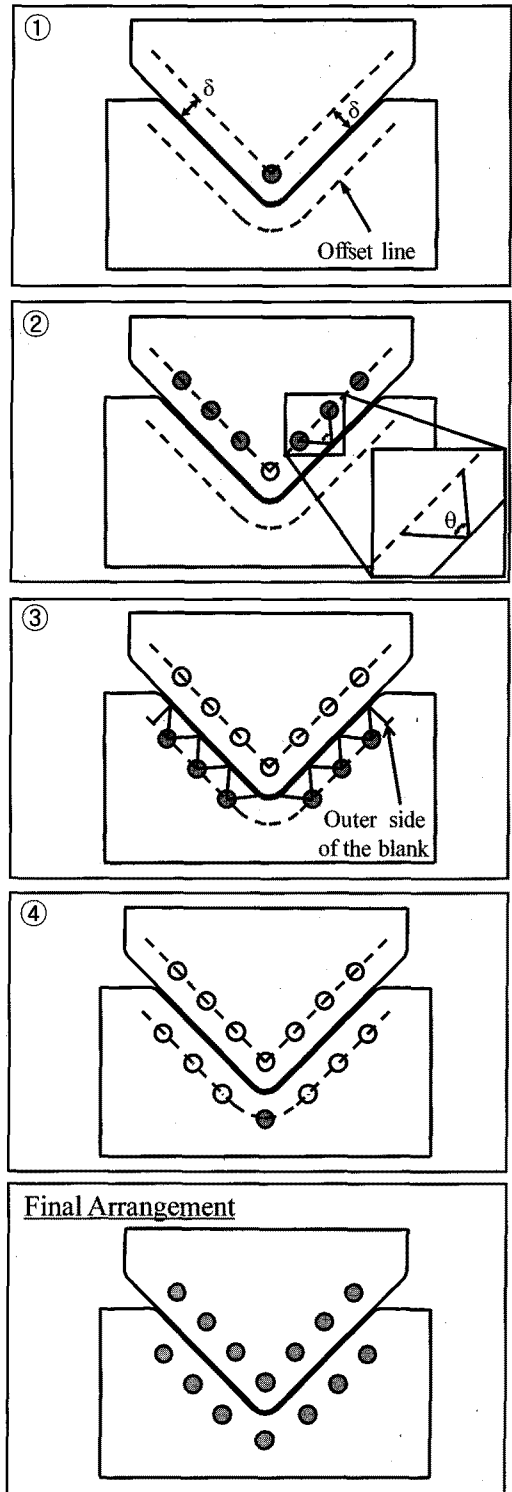


Fig. 3 Design procedure of the cooling channel for V-bending tool by triangular method

채널을 추가로 배치하고 직선 형상 표면 부가 있을 경우 오프셋 선을 따라 추가로 배치한다(④). 여기서 θ 에 의해 배치된 냉각 채널 개수가 식 (9)에서 구한 요구 냉각 채널 개수보다 적을 경우 각도를 감소시키고 많을 경우에는 각도를 증가시켜 재배치한다. 이런 방식으로 찾은 최적 배치각을 적용해 비교적 균일한 냉각이 수행될 수 있다.

4. 냉각 채널 최적 설계 순서

순서 1: 초기 조건 설정

제품의 마르텐사이트 변태가 가능한 임계 냉각 속도(35°C/s)를 고려하여 소재의 초기 온도(T_i), 소재의 취출 온도(T_c) 및 사용자가 원하는 냉각 사이클 타임(t_c)을 결정한다. 이 때, 소재는 균일한 온도 분포를 가진다고 가정한다.

순서 2: 금형 벽면의 평균 온도 계산

식 (1)을 통해 금형 벽면의 평균 온도를 계산한다.

순서 3: 냉각 채널 직경 결정

Table 1 을 참고하여 소재의 두께에 따른 냉각 채널의 직경을 결정한다.

순서 4: 냉각 채널 피 설치 금형의 강도해석

냉각 채널이 설치되지 않은 금형을 가지고 성형해석을 수행한 후, 금형에 가해지는 최대 유효 응력을 구한다.

순서 5: 레이놀즈 수 및 유속 계산

식 (2)와 (3)을 통해 냉각수의 난류 유동이 가능한 레이놀즈 수 및 유속을 계산한다.

순서 6: 소재로부터 금형으로의 열전달량 계산

식 (6)을 이용하여 단위 시간당 소재로부터 금형으로의 열전달량을 계산한다.

순서 7: 채널 중심에서 벽면까지의 거리 계산

식 (8)을 이용하여 냉각성능을 고려한 최대 채널 중심에서 벽면까지의 거리를 계산한다.

순서 8: 금형에 가해지는 최대 유효 응력 계산

채널 직경과 벽면으로부터의 거리를 이용하여 Fig. 1 과 같은 해석 모델을 구성하고, 이에 대해 강도해석을 수행한다. 이 때의 금형 벽면에 가해지는 하중은 순서 4 로부터 얻은 금형의 최대 유효응력으로 한다. 이를 통하여 냉각 채널 직경 및 채널 중심에서 벽면까지의 거리에 따라 금형에 가해지는 최대 응력을 계산할 수 있다.

순서 9: 냉각 채널 설치된 금형의 안전성 판정

금형에 가해지는 최대 응력이 금형 재료의 항복 응력을 초과할 경우 레이놀즈 수를 증가시켜 순서 5 부터 반복한다. 식 (8)에 의해 계산된 δ 는 임계 냉각 속도를 위한 거리이므로 이보다 멀리 떨어진 위치에 채널을 배치할 수 없기 때문이다.

순서 10: 냉각 채널 개수 계산

식 (9)를 통해 부품 냉각에 필요한 최소 필요 냉각 채널 개수를 계산한다.

순서 11: 냉각 채널 배치

삼각 기법을 이용하여 냉각 채널을 균일하게 배치한다.

순서 12: 냉각 성능 평가

열해석을 수행하여 냉각 종료 후의 소재 평균 온도와 초기 공정조건으로 설정한 취출 온도를 비교하여 냉각 성능을 평가한다. 냉각 종료 후의 소재 평균온도가 취출 온도보다 높을 경우 레이놀즈 수를 증가시켜 순서 5 부터 반복을 수행한다.

순서 13: 냉각 균일성 판정

냉각 후 소재 최대 온도와 최소 온도를 비교하여 냉각 균일성을 판정한다. 두 값의 차가 50°C를 초과할 시 레이놀즈 수를 증가시켜 순서 5 부터 반복 수행하고 초과하지 않을 시 최적화를 완료한다.

5. V-벤딩 공정에의 적용

5.1 V-벤딩 공정 조건

본 연구에서 제시한 냉각 채널의 설계 방법을 V-벤딩 공정에 적용하였으며 고려된 초기 조건 및 공정 변수를 Table 2 에 나타내었다.

5.2 V-벤딩 금형의 냉각 채널 최적화

냉각 채널의 최적 설계 방법을 V-벤딩 금형에 적용하는 과정에 대해서 설명하도록 한다. 우선 소재로부터 금형으로의 열전달량을 계산하기 위한 초기 조건인 소재의 초기 온도(T_i), 소재 취출 온도(T_c), 냉각 사이클 타임(t_c)을 고려하여 계산된 금형의 평균 온도(T_m)는 135°C이다. 또한 냉각 채널의 직경(d)은 소재의 두께가 1.7mm 임을 참고하여 8mm 로 결정하였다.

Fig. 5 에 유한요소해석을 통해 냉각채널이 설치되지 않은 금형에 가해지는 응력 분포를 나타내었다. 냉각 채널이 없이 핫스텝핑을 수행하였을 경우 금형에 가해지는 최대 응력이 국부적으로 약 500MPa 가량 나타남을 알 수 있다.

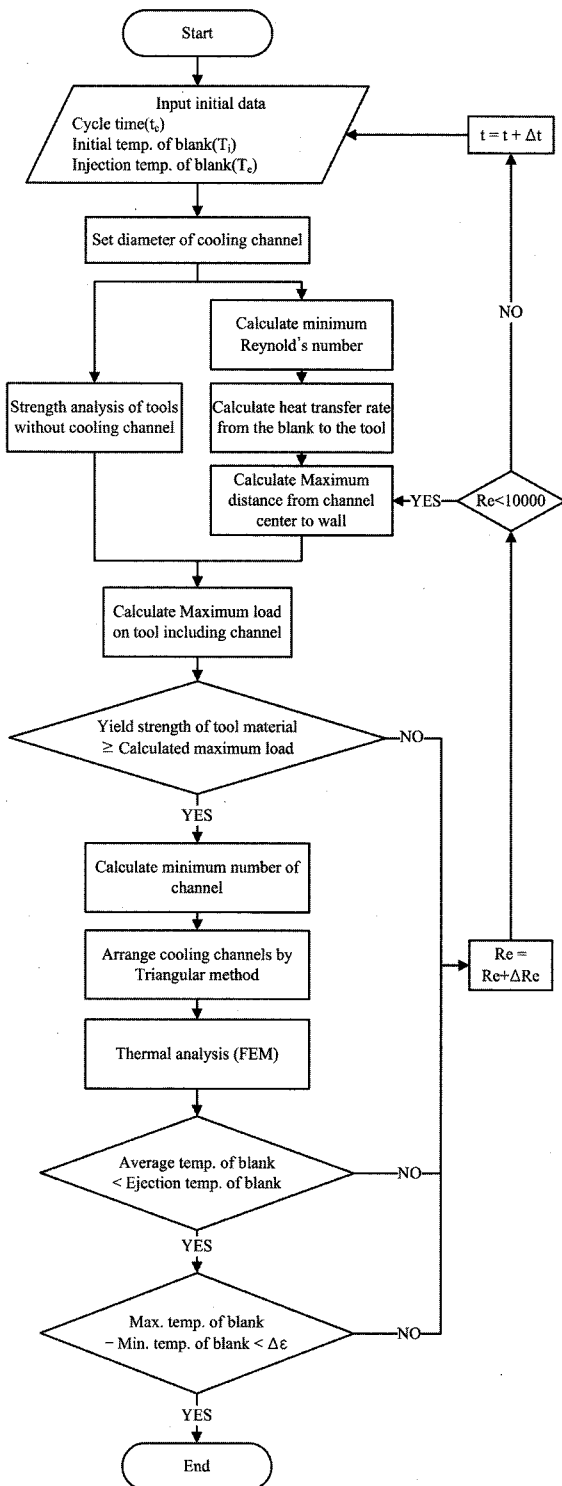


Fig. 4 Flow chart for optimal design of cooling channel

Table 2 Considered design parameter for optimizing cooling channel in hot press V-bending

Design parameters	Value
Initial temperature of the blank, T_i	800 (°C)
Ejection temperature of the blank, T_e	200 (°C)
Temperature of the coolant, T_w	20 (°C)
Cycle time, t_c	15 (sec)
Die material	STD61
Blank material	Boron steel
Blank size	160mm(W)× 150mm(L)× 1.7mm(t)
Specific heat of blank, C_{p1}	0.142 (kcal/kg °C)
Heat conductivity of die material, λ_m	29 (kcal/m·h °C)

한편, 냉각수가 난류 유동하기 위한 최소 레이놀즈 수는 4,000 이지만 관내의 마찰을 고려하여 계산하면 냉각 채널 입구에서의 레이놀즈 수(Re_m)는 4032 이다. 또한 채널 직경이 8mm 일 때, 냉각수의 속도(v)는 0.5m/s 이다. 1 시간 동안 성형되는 제품의 중량(W_1)은 75.12kg/h 이고, 이 때 소재로부터 금형으로의 열전달량(Q_h)은 6,400kcal/h 이다. 금형과 냉각수 간의 열전달계수는 2,490kcal/m²h°C이며, 이를 바탕으로 계산된 채널 중심에서 금형 벽면까지의 거리(δ)는 13.4mm 이다.

Fig. 6 은 냉각 채널의 직경 8mm, 금형 벽면까지의 거리 13.4mm, 금형 벽면에 가해지는 압력을 500MPa 로 하여 강도해석을 수행한 결과이다. 해석 결과 금형에 작용하는 최대 응력은 1,170MPa 로써 금형재료의 항복강도인 1,300MPa 보다 작으므로 안전하다고 판단할 수 있다.

한편, 냉각 채널의 개수는 12 개로 계산되었으며 이를 삼각기법을 적용하여 배치하였을 경우 가장 균일하게 배치할 수 있는 최적 배치 각(θ)은 85°로 결정되었다. Fig. 7 에 V-벤딩 금형에 배치된 최적의 냉각 채널 위치를 나타내었다.

6. 해석 및 실험적 검증

6.1 유한요소해석

최적화된 냉각 채널을 가진 금형에 대해 10cycle 의 V-벤딩 해석을 수행하였다. 유한요소해석은 DEFORM 2D v9.01 을 사용하였으며 해석 조건은 Table 2 에 나타난 바와 같다. Fig. 8 에 10cycle

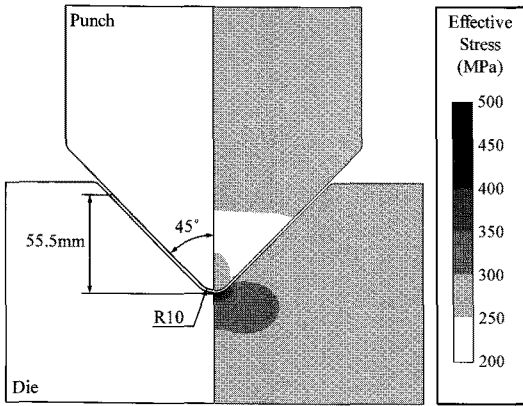


Fig. 5 Stress distribution acting on V-bending die without cooling channel

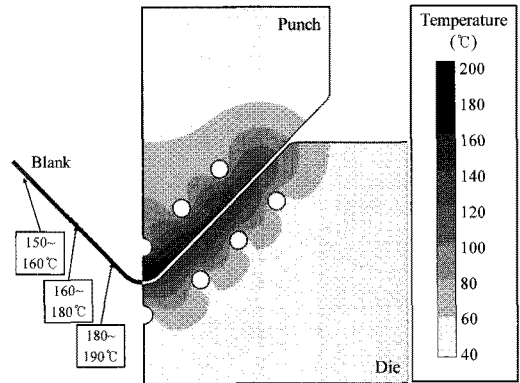


Fig. 8 Temperature distribution of tool and blank with optimized cooling channel

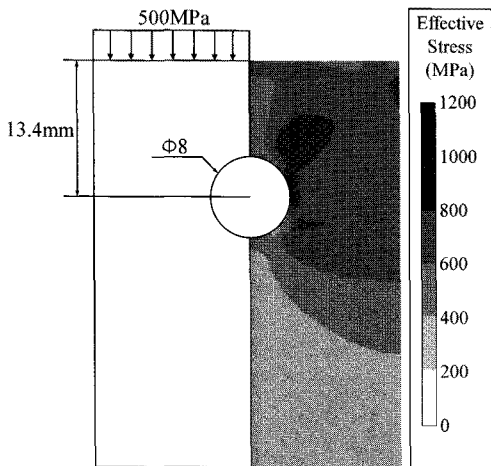


Fig. 6 Stress distribution acting on the die considering diameter and position of cooling channel

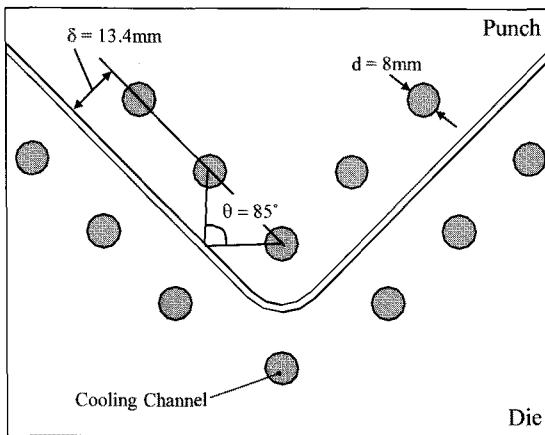


Fig. 7 Optimized cooling channel for V-bending die

열해석 후의 금형 온도 분포를 나타내었다. 초기 조건으로 설정한 취출 온도는 200℃이고 해석을 통해 얻은 냉각 종료 후의 소재 평균 온도는 175.3℃로서 냉각 성능은 충분하다고 판단할 수 있다. 또한, 냉각 후 소재 최대 온도와 최소 온도의 차는 38.2℃로서 설정된 기준인 50℃보다 작으므로 냉각 균일성도 충분하였다.

6.2 기존 연구결과와의 비교

본 연구에서의 냉각채널 최적 설계 방법과 Nam 등이 제시한 설계 방법을 비교해 보았다. Nam 등¹²은 V-벤딩 공정에서의 냉각 채널 설계시, 실험계획법을 이용하여 냉각채널의 직경, 금형 벽면과 채널 간의 거리 및 냉각 채널 간의 거리의 비를 1:1.5:4 로 결정하였으며 난류 유동 조건이 우수함을 주장하였다. 동일한 유량에 의하여 각각 10cycle 의 핫스텝을 수행하였을 경우, Fig. 9 에 나타낸 바와 같이 본 연구에서 설계한 방법에 의해 소재의 평균 온도를 30℃가량 저감시킬 수 있을 뿐만 아니라 제품 내의 최고 및 최저 온도의 차를 30% 이상 감소시킴으로써 냉각 성능과 균일성을 모두 확보할 수 있었다.

6.3 실험적 검증

냉각 채널 설계 방법의 타당성을 검증하기 위해 V-벤딩 실험을 수행하였다. Fig. 10 에 실험 장치를 나타내었다. 소재는 전기로에서 910±10℃로 가열된 후 금형으로 이송되며 성형 시 온도는 약 750℃로 측정되었다. 성형이 완료된 후 냉각은 약 15 초 동안 수행되었으며 취출 및 다음 소재의 성형 기간 동안 휴지(Dwelling) 시간이 약 15 초 정도

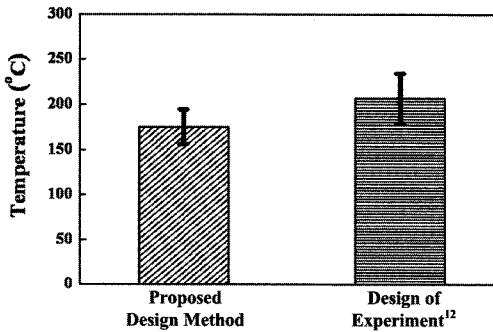


Fig. 9 Temperature of the blank after 10th cycle hot press V-bending with respect to two cooling channel design method

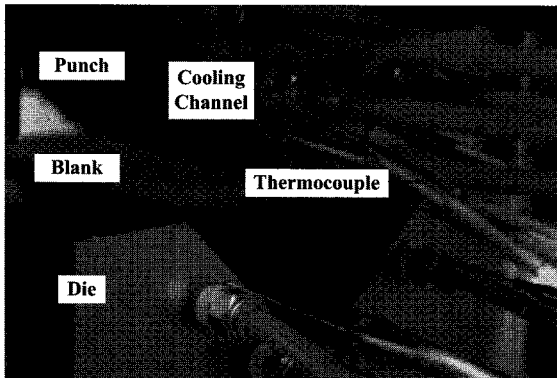


Fig. 10 Experimental apparatus for hot press V-bending experiment

소요되었다. 실험은 10cycle 연속 공정으로 수행되었으며 최적화된 냉각 채널 및 실험계획법에 의해 설계된 냉각 채널의 V-벤딩 두 조건에 대해 모두 실험하였다.

6.3.1 제품의 강도 평가

제품의 강도를 평가하기 위해 1, 5, 9cycle 후의 V-벤딩 시험편에서 각각 3 개씩의 인장 시험편을 제작하여 인장강도를 측정하였다. 실험계획법을 통해 설계된 냉각 채널의 금형으로 V-벤딩 한 시험편의 평균 인장강도는 각각 1,673MPa, 1,601MPa, 1,595MPa 로 나타났으며 본 연구에서 설계한 냉각 채널을 이용한 시험편의 평균 인장강도는 각각 1,613MPa, 1,621MPa, 1,595MPa 였다. 따라서 실험계획법에 의한 설계 및 본 연구에서 최적화 한 냉각 채널 설계 방법 모두 V-벤딩 후 제품의 강도는 상당히 높음을 알 수 있다.

6.3.2 냉각 균일도

제품의 냉각 균일도는 V-벤딩 시험편의 거리에 따른 단면의 경도를 측정함으로써 평가하였다. 경도는 마이크로비커스 경도 측정기를 사용하였으며 제품의 중앙으로부터 1mm 간격으로 측정하였다. 또한 균일도의 정량적인 척도는 경도의 산포를 통해 알 수 있으므로 표준편차를 구하여 비교하였다.

Fig. 11 에 두 냉각 채널 설계 방식에 의해 제작된 V-벤딩 시험편의 거리에 따른 경도 분포 및 표준편차를 나타내었다. 실험계획법에 따른 냉각 채널을 이용한 제품의 경도는 평균 Hmv 500 가량을 나타내었으나 약 20mm 간격으로 경도가 저하되는 구간이 발생하였는데 이는 냉각 채널 간의 거리가 최적 설계법에 비해 비교적 멀리 떨어진 위치에 배치되었기 때문으로 판단된다. 반면, 최적 설계법에 의한 제품의 경도는 큰 산포를 발생시키지 않고 거의 균등한 경도 분포를 나타냄을 알 수 있다. 이를 통해 본 연구에서 제시한 냉각채널 최적 설계 방법이 실험계획법에 의한 방법에 비해 균일성 측면에서 우수하다고 할 수 있다.

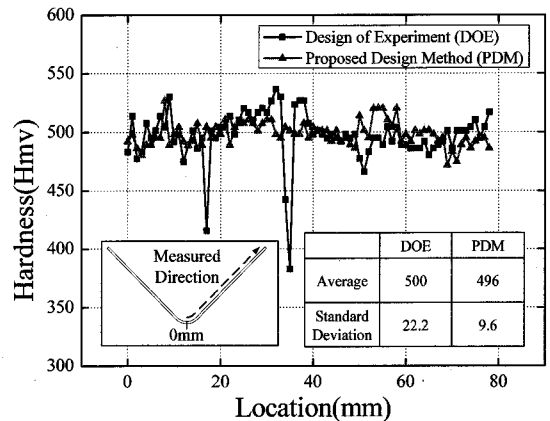


Fig. 11 Hardness distribution of V-bent parts with respect to different cooling channel design methods

6.3.3 조직 분석

Fig. 12 에 실험계획법 및 본 연구에서 제시한 최적 냉각 채널 설계법에 의해 제작된 V-벤딩 시험편의 조직 사진을 나타내었다. 두 시험편 모두 침상의 마르텐사이트가 형성되어 있는 것을 알 수 있으며 1,600MPa 이상의 제품 강도를 나타내는 것을 입증하고 있다.

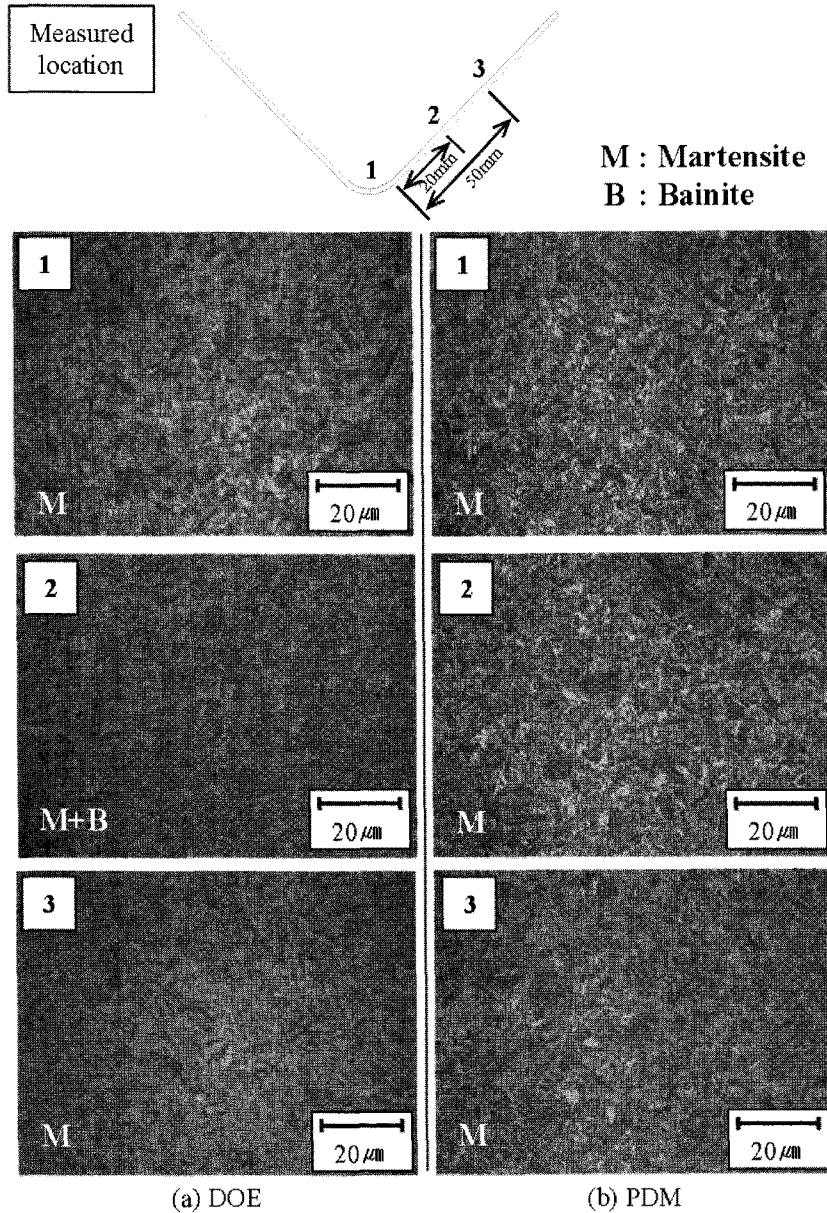


Fig. 12 Microstructure of hot v-bent parts with respect to different cooling channel design methods

7. 결론

본 연구에서는 차체의 경량화 및 고강도화를 위해 최근 개발이 증가하고 있는 핫스탬핑 공정에서 제품의 균일하고 높은 강도를 확보하기 위한 냉각 채널의 설계 방법을 제시하였다. 제시된 방법을 V-벤딩 금형에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 에너지 평형 법칙에 기초하여 핫스탬핑 공정에서 소재가 금형에 가하는 열량이 냉각 채널을 통과하는 냉각수가 금형으로부터 빼앗아가는 열량이 같다고 가정하여 냉각 채널 설계를 수행하였다.
- (2) 냉각 채널이 없는 상태에서의 성형해석 및 강도해석을 수행하여 얻은 응력 데이터를 이용하여 냉각 채널의 직경 및 위치에 따른 금형의 항복 여부를 파악할 수 있었다.

(3) 냉각채널의 배치를 위해서는 삼각 기법 (triangular method)이 적용되었으며 이를 통해 균일한 냉각 채널의 배치가 가능하였다.

(4) V-벤딩 금형에 제시된 냉각 채널의 설계 방법을 적용한 결과, 냉각 채널의 직경, 냉각 채널과 금형 벽면 간의 거리 및 냉각 채널의 개수는 각각 8mm, 13.4mm 및 12 개로 결정되었다, 또한 삼각 기법을 적용하여 냉각 채널을 배치하였을 경우, 각도 85°에서 가장 균일한 냉각 채널의 배치가 가능하였다.

(5) V-벤딩의 유한요소해석 및 실험 결과, 냉각 강도 및 균일성 측면에서 기존의 실험계획법에 의해 설계된 냉각 채널을 적용하였을 때보다 우수한 특성을 가진 제품을 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식경제부와 한국산업기술재단의 전략기술인력양성사업 및 2010 년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2009 년-K20601000004-09E0100-00410)

참고문헌

1. Turetta, A., Bruschi, S. and Ghiotti, A., "Investigation of 22MnB5 formability in hot stamping operations," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 177, No. 1-3, pp. 396-400, 2006.
2. Hoffmann, H., So, H. W. and Steinbeiss, H., "Design of hot stamping tools with cooling system," *Annals of the CIRP*, Vol. 56, No. 1, pp. 269-272, 2007.
3. Ravier, P., Aranda, L. G. and Chastel, Y., "Hot Stamping Experiment and Numerical Simulation of Pre-coated USIBOR1500 Quenchable Steels," *SAE Technical Paper*, No. 2003-01-2859, pp. 261-266, 2003.
4. Geiger, M., Merklein, M. and Lechler, J., "Determination of tribological conditions within hot stamping," *Prod. Eng. Res. Devel.*, Vol. 2, No. 3, pp. 269-276, 2008.
5. Merklein, M., Lechler, J. and Geiger, M., "Characterisation of the Flow Properties of the Quenchenable Ultra High Strength Steel 22MnB5," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 55, No. 1, pp. 229-232, 2006.
6. Park, J. S. Kim, J. H. and Park, J. H., "A Study on the 3D Injection Mold Design Using CATIA API," *J. of KSPE*, Vol. 20, No. 12, pp. 115-125, 2003.
7. Park, H. S. and Pham, N. H., "Design of Conformal Cooling Channels for an Automotive Part," *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 10, No. 1, pp. 87-93, 2009.
8. Rao, N. S., Schumacher, G., Schott, N. R. and O'Brien, K. T., "Optimization of Cooling Systems in Injection Molds by an Easily Applicable Analytical Model," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 21, No. 5, pp. 451-460, 2002.
9. Lin, Z. C. and Chou, M. H., "Design of the Cooling Channels in Nonrectangular Plastic Flat Injection Mold," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 21, No. 3, pp. 167-186, 2002.
10. Steinbeiss, H., So, H. W., Michelitsch, T. and Hoffmann, H., "Method for optimizing the cooling design of hot stamping tools," *Prod. Eng. Res. Devel.*, Vol. 1, No. 2, pp. 149-155, 2007.
11. Hoffmann, H., So, H. W. and Steinbeiss, H., "Design of Hot Stamping Tools with Cooling System," *Annals of the CIRP*, Vol. 56, No. 1, pp. 269-272, 2007.
12. Nam, K. J., Choi, H. S., Ko, D. C. and Kim, B. M., "Evaluation of Design Parameters for Optimizing the Cooling Channel in Hot Press Bending Process," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 33, No. 11, pp. 1267-1273, 2009.
13. Han, S. J. and Huh, Y. J., "Design Analysis in a Cavity with Leadframe during Semiconductor Chip Encapsulation," *J. of KSPE*, Vol. 12, No. 12, pp. 91-99, 1995.
14. Chang, Z. Y., "Design of Injection Die," *Gau Li Book Co.*, 1985.
15. Glavill, A. B. and Denton, E. N., "Injection-Mold Design Fundamentals," *The Machinery Publishing Co. Ltd*, 1977.
16. Munson, B. R., Young, D. F. and Okiishi, T. H., "Fundamentals of fluid mechanics," *Wiley*, pp. 293-316, 541-554, 1997.