

# 국부가열효과를 활용한 다점성형공정기술

박지우<sup>1, #</sup>

## Multi-point Dieless Forming Technology Using Local Heating Effect

J. W. Park

(Received October 29, 2021 / Revised January 19, 2022 / Accepted March 17, 2022)

### Abstract

The multi-point dieless forming technology is one of flexible forming technologies that can form 3D curved surfaces of various shapes utilizing a lot of punch arrangements. A new technology that can simultaneously apply high-temperature forming and flexible forming technology by fusing local heating effect to such multi-point dieless forming technology was proposed in the present study. A simple local heating multi-point dieless forming apparatus was fabricated to confirm the applicability of this new technology. This equipment was designed to be used as a heat source by inserting heating cartridges in the head of the multi-point punch. Cartridges were used for all individual punches. Using the manufactured equipment, the time to raise the temperature to the target temperature and the surface temperature of the punch head part in contact with the plate were measured. In addition, forming experiments were carried out according to sheet material temperature (100 °C, 200 °C, and 300 °C) to obtain forming results for each condition. The applicability and feasibility of this technology were confirmed through experimental results.

**Keywords :** Multi-point dieless forming, Local heating effect, Heating cartridges, Experimental study

## 1. 서 론

우리나라 제조업의 상당수를 차지하는 판재성형 공정은 현재 자동차·조선·항공기 관련 산업군에 필수적인 공정이다. 가장 기본적인 프레스 성형 공정은 타겟의 형상에 맞는 금형을 제작하여 필요한 숫자만큼 찍어내는 공정기술이다. 이러한 프레스 성형 공정은 쉽고 간단하게 원하는 형태의 곡면형상을 만들어 낼 수 있다는 장점을 가지지만, 타겟의 형태가 조금만 바뀌어도 제작된 금형의 설계를 변경하여 새로운 금형을 재생산해야 되는 단점이 존재한다. 이러한 단점을 극복하기 위해 금형의 형태가 가변적으로 변하는 가변성형기술에 관한 연구가 많이 수행되어왔다[1, 2]. 가변성형기술은 하나의 금형, 혹

은 제작장치를 활용하여 다양한 형태의 타겟 형태를 제작하기 위해 형상이 고정되지 않은 금형을 활용하여 성형품을 제작하는 방식으로, 다점성형공정[3,4], 비정형롤판재성형공정[5,6] 등이 이에 속한다. 이러한 가변성형공정기술을 활용하여 다품종소량생산체계에 적합한 다양한 연구가 진행되고 있으며, 점점 늘어나는 추세를 보이고 있다.

최근 정부의 탄소중립 정책에 대응하기 위한 다양한 연구가 시도되고 있다[7,8]. 6대 뿌리기술 분야 중 직접적으로 탄소와 연계되어있는 재료기술 관련 분야에서는 탄소의 총량을 감소시키는 방향으로의 연구가 수행되고 있지만, 소성가공과 관련된 분야에서는 직접적인 탄소저감효과를 보여주는 것이 쉽지 않다. 다만, 간접적으로 공정에 필요한 에너지를 저감하는 등의 방식으로 필요한 연구에 대한 고민이 지속적으로 이루어 지고 있다.

1. 한국생산기술연구원, 탄소경량소재응용연구그룹, 선임연구원  
# Corresponding Author : Korea Institute of Industrial Technology,  
E-mail : pjwoo@kitech.re.kr  
ORCID : 0000-0002-2240-5370

이러한 정책에 발맞추어 본 논문에서는 다품종소량생산체계에 적합한 가변성형기술에 국부가열 효과를 접목시켜 필요한 부분만 가열하여 형상동결성을 향상시키고, 에너지를 절약할 수 있는 방안으로 국부가열 가변성형공정 기술에 관한 연구를 진행하였다.

기존의 다점성형공정에 관한 연구들을 살펴보면 다점펀치와 전자기 성형을 결합하여 다점 전자기 성형 공정의 성형가능성을 확인하는 연구[9]와 스트레치 공정과의 접목을 통해 탄성회복을 저감시켜 형상동결성을 확보하는 연구[10] 등이 수행되었다. 또한, 다점펀치를 활용하여 H빔 밴딩 공정 설계에 관한 연구[11] 및 다점펀치에 쿨링 시스템을 삽입하여, 핫 프레스 포밍공정으로 활용가능성을 확인하는 등의 연구[12]가 수행되었다. 이외에도 탄성회복 보상을 위한 다점성형공정 연구[13, 14] 및 성형불량 저감을 위한 연구[15, 16] 등이 활발히 수행되었다. 이러한 다양한 연구와 더불어 개별 펀치를 국부적으로 가열하여 성형을 수행하는 국부가열 가변성형 기술은 박판재의 가장 큰 문제 중 하나인 탄성회복을 저감시켜 판재성형공정에서의 형상동결성을 확보할 수 있는 중요 기술로 예상된다.

다점성형공정은 다수의 펀치 배열을 활용하여 금형을 구현하기 때문에 각각의 펀치를 제어하는 기술이 요구된다. 이러한 다점성형공정의 특징을 기반으로 각 펀치에 열원을 장착하여 특정 부위만을 국부적으로 가열할 수 있다. 이는 기존의 판재 전체를 가열하여 성형을 수행하는 핫 프레스 포밍(Hot press forming)이나 열간 단조(Hot forging) 등의 공정과의 가장 큰 차별점으로, 특정 영역만을 가열하는 방식으로 활용될 수 있기 때문에 국부적으로 에너지 저감효과를 가질 것으로 예상된다. 따라서, 본 연구에서는 가변성형기술 중 하나인 다점성형공정기술에 국부가열효과를 적용시킨 국부가열 다점성형공정기술(Local heating multi-point dieless forming, LHMDF)을 제안하고, 해당 기술을 활용한 축소형 국부가열 다점성형공정 장비를 활용해 본 기술의 효과를 확인하였다.

## 2. 국부가열 다점성형공정

### 2.1 국부가열 다점성형공정 기본 개념

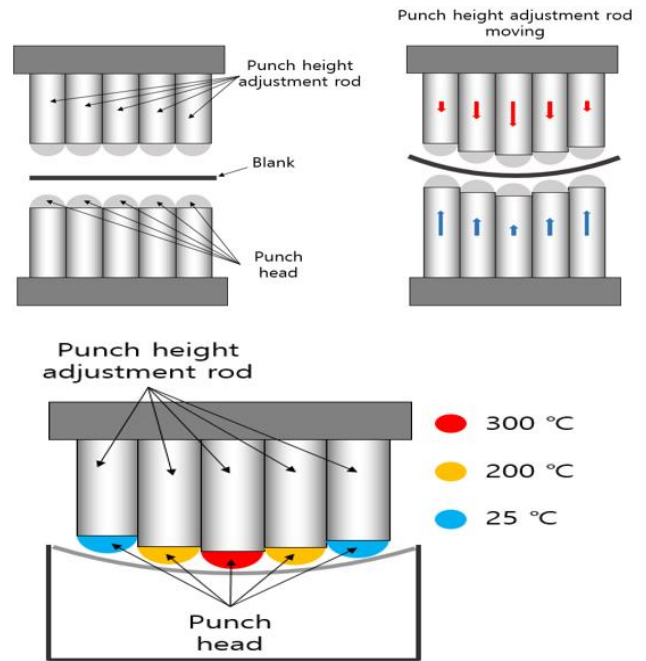


Fig. 1 Schematic illustration of LHMDF

국부가열은 국부적인 영역에 열을 가해준다는 의미로, 특정 영역에 열원을 부착하여 해당 부분을 가열하는 효과를 의미한다. 몇몇 고온 단조 공정에서도 치 등을 활용하여 금형 자체에 열을 가해주어 온도를 상승시키거나, 금형 내에 열원을 장착하고 해당 부분을 중심으로 가열을 시키는 방식의 공정을 활용하고 있다. 하지만, 이러한 방식의 경우 금형의 형태가 고정되어 있기 때문에, 또 다른 제품을 생산하기 위해서는 새로운 금형을 제작해야 하므로 비용이 커지는 단점이 존재한다. 본 연구에 활용된 다점성형공정 같은 경우, 다수의 펀치 배열을 활용하여 다양한 형태의 목적곡면을 구현하기 때문에 금형 제작비가 상당부분 절감되는 효과가 있다. 또한, 국부적으로 가열을 하기 위해, 개별 펀치의 끝 부분에 열원을 추가하여 설계자가 원하는 위치에 가열 효과를 부여할 수 있다.

Fig. 1 에 국부가열 다점성형공정 기술의 개념을 도시하였다. Fig. 1 에서도 확인할 수 있듯이, 각 펀치의 위치를 조절하여 원하는 목적곡면 형상을 구현하여 성형공정을 진행하게 된다. 여기서 개별 펀치 부분에 열원을 부착하여 가열을 통해 성형품과 맞닿는 전체 부분의 온도를 상승시킬 수 있으며, 각각의 펀치 온도를 조절하여 국부적으로 원하는 형태의 가열을 수행할 수도 있다.

## 2.2 국부가열 다점성형공정 장비

Fig. 2 에 다점성형공정의 개별 펀치 형상을 나타내었다. 해당 그림에서도 확인할 수 있듯이, 개별 펀치는 펀치 헤드(Punch head)와 펀치 높이 조절 막대(Punch height adjustment rod)로 구분되는데, 이 펀치 높이 조절막대는 펀치 스크류(Punch screw)와 펀치 바디(Punch body)로 구성되어있다. 기본적으로 펀치 스크류를 사용하여 개별 펀치의 높이를 조절하며, 이를 위해서는 충분한 펀치 바디 길이가 보장되어야 한다. 펀치 바디 끝부분에 펀치 헤드를 부착시키며, 해당 펀치 헤드 부분에 열원을 공급하여 가열이 진행되는 방식으로 설계를 하였다.

국부가열효과가 다점성형장비에 원활히 적용이 되는지를 확인하기 위해 간이형 국부가열 다점성형장비를 제작하였다. 해당 장비는 위아래로 3 × 4의 펀치 배열로 구성되어 있으며, 개별 펀치는 40 mm × 40 mm 의 크기로 설계되었다. 펀치 곡률반경은 500 mm 로 설계하여 성형면에 원만하게 닿을 수 있도록 하였다. 열원은 펀치 헤드부에 가열카트리지를 삽입하여 판재와의 접촉면이 열전도를 통해 성형펀치가 원활히 승온될 수 있도록 설계하여 국부가열을 적용시켰다. 온도 제어는 PID 방식의 제어를

활용하였으며, 사용자가 목표 온도를 설정하고 가열을 시작하면 열원 카트리지가 승온되며 열전도에 의해 펀치 헤드 온도를 상승시키는 방법으로 가열이 진행된다.

## 3. 성형실험

### 3.1 승온 시간 및 펀치 가열 온도

국부가열효과는 국부적인 영역에 열을 가해준다는 의미로, 특정 영역에 열원을 부착하여 해당 부분을 가열하는 방식이다. 본 연구에 활용된 국부가열 다점성형장치는 개별 펀치에 열원을 부착하여 판재와 맞닿는 지점까지 충분히 가열이 될 수 있도록 하였으며, 모든 펀치를 가열하거나, 특정 펀치만 선택하여 가열할 수 있다. 본 연구에서는 가열 효과를 확인하기 위해 모든 펀치에 열을 가하여 실험을 수행하였다.

일반적으로 열간 단조 성형 공정에서 판재 및 금형을 목표 온도까지 가열하기 위해 짧으면 30 분, 길게는 2 시간에 가까운 시간이 소요된다. 본 연구에서는 간이형 국부가열 다점성형장비를 활용했기 때문에, 금형의 치수가 작은 편에 속한다. 목표 온도까지 승온하는데 걸리는 시간이 주요 변수 중 하나로 판단되며, 이에 따른 목표 온도까지의 승온 시간은 길지 않을 것으로 예상된다. 따라서, 목표 온도까지의 승온 시간과 펀치 외부 온도를 측정하여 대략적인 승온 절차에 드는 시간적 비용을 확인하였다. 온도 측정에는 HIOKI 社의 데이터 로거 및 온도 센서를 활용하였으며, 100 °C, 200 °C, 300 °C 를 목표 온도로 설정하여 목표 온도까지 도달하는 시간을 측정하여 확인하였다.

열원에 장착된 센서가 목표 온도에 도달하는 시간은 온도 별로 각 51.74 초, 67.53 초, 129.62 초로 측정되었다. 대략 1 분에서 2 분 정도의 센서상 승온 시간이 걸리는 것으로 확인하였으나, 실제로 펀치 표면 온도가 가열되기까지는 열전도를 고려해볼 때 시간이 필요할 것으로 예상되며, 약 5 분의 가열 시간을 통해 펀치 승온 온도를 측정하였다. 펀치 외부에 온도 센서를 부착하여 측정한 결과, 5 분 이후 각 온도 조건 별 펀치 온도는 약 72 °C, 172 °C, 275 °C 로 확인되었다. 열원에서 설정한 온도와 펀치 표면 온도는 대략 25 °C 에서 30 °C 수준의 편차가 나타났다. 이는 실제 열원과 펀치와의 열전도 차

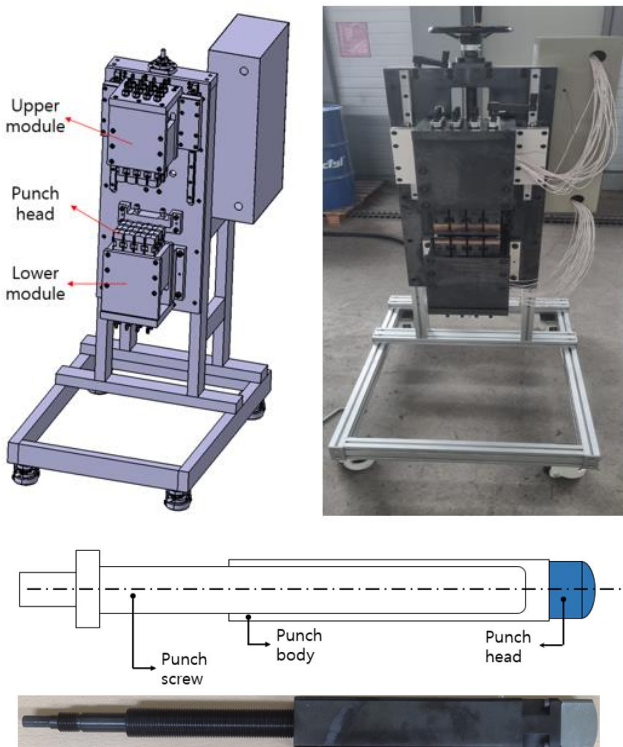


Fig. 2 Schematic illustration of LHMDF

이에 의해 이런 결과를 나타낸 것으로 보이지만, 해당 결과는 금형을 서로 떨어뜨린 상태에서 하나의 펀치를 측정하여 나온 결과이기 때문에 실제 성형 실험을 수행할 때에는 판재의 온도가 목표 온도와 근접한 값이 측정될 것으로 예상된다.

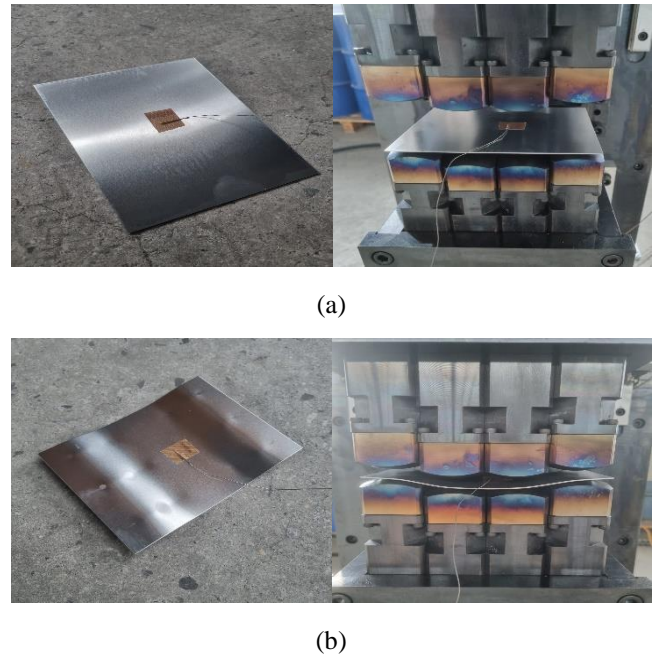
이러한 국부가열 효과를 적용한 다점성형공정에서 박판재 성형에서 가장 큰 문제 중 하나인 탄성회복 발생을 저감시킬 수 있을 것으로 판단되며, 해당 승온 온도에 따라 탄성회복 발생량이 감소할 것으로 예상된다. 따라서 특정 온도 조건에 따라 성형된 곡판재의 최대 성형 높이를 측정하여, 각 조건별 성형결과를 비교 분석하여 국부가열을 적용시킨 다점성형공정의 효과를 확인하였다.

### 3.2 성형 실험 수행

앞장에서 언급된 실험 조건 및 내용을 기반으로 실제 성형 실험을 수행하였다. 성형에 활용될 재료는 120 mm × 160 mm 의 크기를 가지는 알루미늄(Al 5052) 재질을 사용하였으며, 1 mm 의 초기 두께를 가지는 판재를 활용하였다. 실질적으로 성형공정에서 중요한 변수는 판재의 온도이며, 본 연구에서 가열 카트리지를 활용한 판재가열효과를 확인하기 위해 실제 초기 블랭크의 표면 온도를 측정하였다. 실제 성형 실험 절차는 다음과 같다.

- (1) 목적곡면을 성형하기 위한 개별 펀치 높이를 계산한 후, 계산된 높이에 맞도록 개별 펀치 높이를 조절한다.
- (2) 높이 세팅이 완료된 후, 사용자가 원하는 온도로 설정한 후 해당 온도까지 승온시킨다.
- (3) 원하는 온도(목표 온도)까지 승온이 완료되면, 판재를 삽입한다.
- (4) 상부모듈 조절 장치를 활용해 상부 금형을 하강시켜 하부 금형과 맞닿도록 성형을 수행한다.
- (5) 가열된 개별 펀치가 판재에 충분히 열을 전달할 수 있도록 사용자가 지정한 시간까지 대기한다.
- (6) 원하는 시간까지 가열이 완료되면, 상부모듈을 다시 상승시킨 후, 가열을 중지하고 성형을 끝낸다.

앞장에서 설명한 대로 온도 제어기의 온도 측정 센서는 개별 펀치 내의 가열 카트리지에 부착되어 있기 때문에, 실제 판재와 맞는 부분의 온도와는 어느 정도 차이를 보일 것으로 판단된다. 따라서, 실제 설정 온도에 따라서 판재에 가해지는 온도가



**Fig. 3 Experiment set with thermal sensor**

**(a) before experiment, (b) after experiment**

어떻게 나타나는지를 확인하기 위해 판재에 온도센서를 부착하여 실제 판재 온도를 측정하였다. Fig. 3에 온도 센서가 부착된 판재의 성형 전 후 형상을 나타내었다. Fig. 3(a)의 경우 성형을 수행하기 전 판재의 형상이며, Fig. 3(b)의 경우 성형을 수행하고 난이후의 형상이다. 설정 온도를 100 °C, 200 °C, 300 °C로 지정하였을 경우, 실제 판재의 온도를 확인하였고, 측정은 실험 절차의 3 번부터 6 번까지 과정에서 설정 온도를 입력변수로 두고, 판재 측정 온도를 출력변수로 하여 실험을 진행하였다. 온도측정은 판재를 삽입한 직후 시작하여 5 분간 대기시간을 두고 판재가 충분히 가열될 수 있도록 하였다. 사용한 데이터 로거의 sampling interval 은 1 초 간격으로 데이터를 획득하였으며, 5 분(300 초)이 지난 이후 상부 금형을 상승시키고 측정을 종료하였다.

Fig. 4에 측정된 온도 결과를 정리하여 도시하였다. 해당 데이터에서도 확인할 수 있듯이, 설정 온도에 비하여 실제 측정 온도는 다소 낮게 나오는 경향이 나타나는데, 이는 가열 카트리지의 온도와 개별 펀치의 온도가 열 전도시간에 따라 약간의 차이를 보이기 때문으로 판단된다. 또한, 판재 표면 온도는 1 분 이후로는 크게 변화하지 않으며 선형

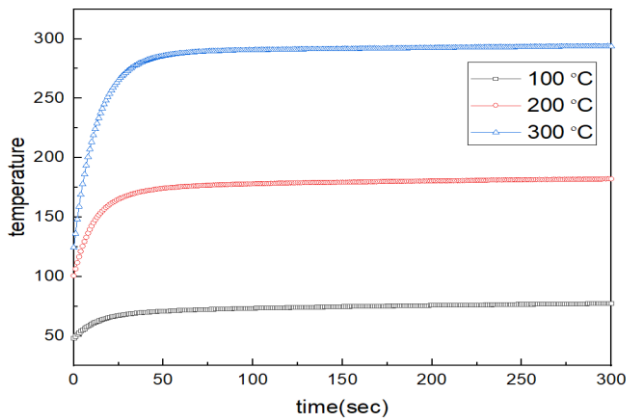


Fig. 4 Time-Temperature history for each condition

적으로 매우 완만한 상승 곡선을 나타내는데, 이는 실제 판재의 온도가 성형 이후 1 분 이내에 목표치와 근사한 온도까지 도달하며, 그 이후로 상승되는 값은 크지 않음을 확인할 수 있다. 가열시간 1 분(60 초)을 기준으로 각 설정 온도 조건에 따른 판재 측정 온도를 확인해보면, 100 °C 의 경우 약 71.7 °C, 200 °C 의 경우 약 175.5 °C, 300 °C 의 경우 약 287.7 °C 의 결과를 나타낸다. 추가적으로 최종 측정 시간인 5 분을 기준으로 측정온도를 확인해보면, 100 °C 의 경우 약 77.5 °C, 200 °C 의 경우 약 182.1 °C, 300 °C 의 경우 약 293.7 °C 의 결과를 나타낸다. 이는 1 분 이내 목표 온도까지 충분한 가열이 진행되고, 그 이후로도 판재의 온도상승이 지속되지만, 온도 상승 효과는 미미함을 확인할 수 있다. 따라서, 추가적인 성형 실험을 수행하기 위해서는 최소 1 분 이상의 가열시간을 유지하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

### 3.3 판재의 온도에 따른 성형 결과

앞장에서 설명한 바와 같이 국부가열 성형장비를 활용하여 온도에 따라 성형결과가 어떻게 나타나는지를 확인하기 위한 실험을 수행하였다. 성형을 하기 위한 목적곡면 형상은 곡률반경이 250 mm 인 1 차곡면형상을 선정하였으며, 목적곡면 형상에 맞게 개별 펀치 높이를 계산하였다. 목적곡면이 1 차 곡면형상이기 때문에, 각 모듈에 대한 중심부 배열의 개별 펀치와 바깥부 배열의 개별 펀치 위치를 계산하여 활용하였다. 상부 모듈에서의 중심부 배열 개별 펀치 위치는 약 21.4 mm, 바깥부 배열 개별 펀치

위치의 약 28.5 mm로 계산되었으며, 하부 모듈에서의 중심부 배열 개별 펀치 위치는 약 -19.8 mm, 바깥부 배열 개별 펀치 위치는 약 -13.8 mm로 계산되었다. 이러한 개별 펀치 위치를 토대로 각 모듈의 중심부 및 바깥부 펀치 높이 차이는 각각 상부 모듈 7.1 mm, 하부모듈 6.0 mm로 계산하여 장비를 세팅하여 실험을 수행하였다.

성형실험은 25 °C (상온, 온도 가열 없음), 100 °C, 200 °C, 300 °C 온도 조건에 대해 수행하였으며, Fig. 5 에 각각의 성형 결과 사진을 나타내었다. Fig. 5(a) 는 25 °C, (b) 는 100 °C, (c) 는 200 °C, (d) 는 300 °C 조건에서 1 분간 온도를 유지한 상황에서의 성형 결과이다. 판재가 1 mm 의 얇은 두께이기 때문에 탄성회복이 크게 일어나며 성형이 거의 수행되지 않은 것을 확인할 수 있다. Fig. 5(e) 에 각 조건 별 성형 결과를 비교하여 도시하였다. 사진에서 확인할 수 있듯이, 온도 조건에 따라 확연히 다른 성형 결과를 나타내고 있다. 따라서, 가열을 통해 판재의 온도를 상승시켜 주어 실제 성형 공정을 원활히 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

실제 온도에 따른 성형 효과를 확인하기 위해 성형결과의 성형 높이를 측정하여 비교하였다. Fig. 6

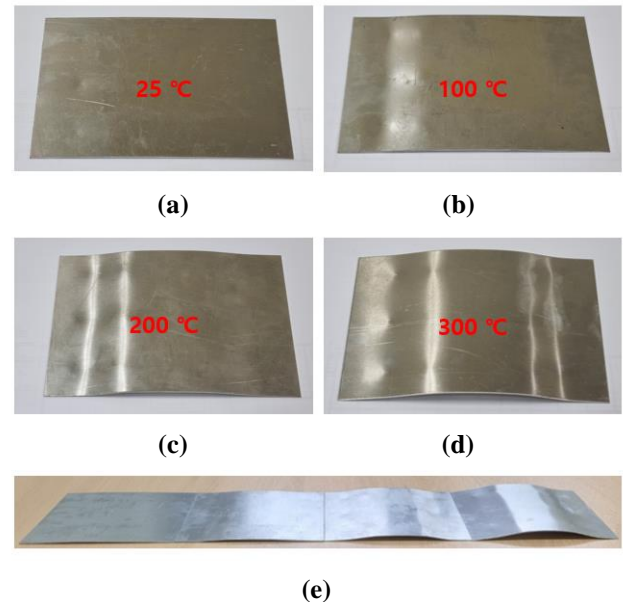
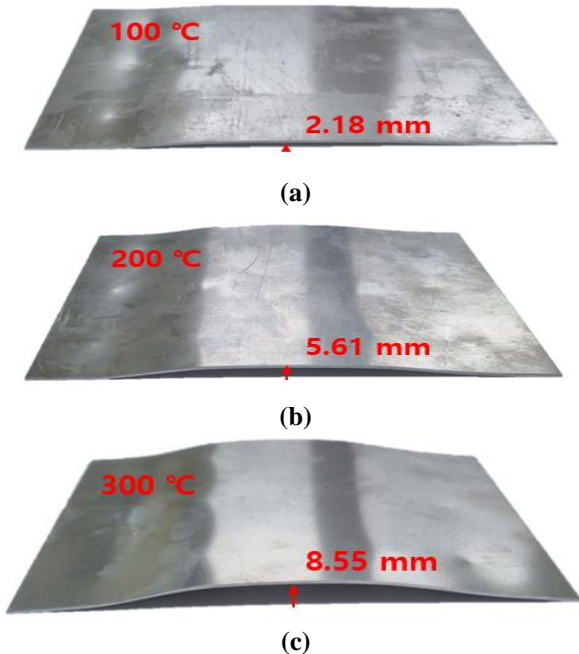


Fig. 5 Experimental results for sheet heating condition.

(a) 25 °C, (b) 100 °C, (c) 200 °C, (d) 300 °C  
(e) comparison for all condition

에 각 온도 별 성형 높이를 비교한 사진을 도시하였다. Fig. 6 에서도 확인할 수 있듯이 판재의 온도가 높으면 높을수록 성형 높이가 더 크게 나타남을 확인할 수 있다. 정확한 비교를 위해 각 높이를 측정하여 보았을 때, 100 °C 의 경우 약 2.18 mm, 200 °C 의 경우 약 5.61 mm, 300 °C 의 경우 약 8.55 mm로 측정되었다. 목적곡률반경인 250 mm를 기준으로 최대성형높이인 13.15 mm 와 비교하면, 각 조건 별 성형 높이는 대략 10.97 mm, 7.54 mm, 4.60 mm 씩 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 상대 오차 수준으로 확인해보면 100 °C 의 경우 약 83.4 %, 200 °C 의 경우 약 57.3 %, 300 °C 의 경우 약 35.0 %로 상대적으로 큰 오차수준을 나타냈다. 본 연구에서 활용된 장비는 간이성형장비이며 성형품의 크기에 비하여 장비의 편차가 매우 크고, 상대적으로 개별편치 배열의 개수가 적기 때문에 곡판재의 끝부분에서 원활히 성형되지 않고 휘어지는 현상이 발생하였다. 이러한 부분은 본 연구가 성형가능성 검토를 위한 Feasibility 개념의 연구임을 고려하면, 추후 편치배열 추가 및 장비확장을 통해 해당 문제를 해결할 수 있을 것으로 예상된다. 장비 스펙에 대한 문제를 제외하더라도, 장비의 온도 조건에 따라 탄성 회복이



**Fig. 6 Experimental results of forming height**  
(a) 100 °C, (b) 200 °C, (c) 300 °C

확연히 감소되는 경향을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 볼 때, 높은 온도에서 탄성회복 저감효과가 나타난 것으로 판단되며, 국부가열효과를 적용시킨 다점성형공정기술을 통한 고온성형공정 활용 가능성을 확인하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 다점성형공정기술과 국부가열효과를 접목시켜 새로운 가변성형기술을 제안하였다. 제안된 기술의 효과를 검증하기 위해 간이형 국부가열 다점성형장치를 제작하여 성형실험을 수행하였다. 성형실험을 통해 획득한 결론은 다음과 같이 정리하였다.

(1) 가변성형기술 중 하나인 다점성형공정기술을 활용하여 편치 헤드 부분의 열원을 통한 국부가열기술을 접목한 국부가열 다점성형공정기술은 다품종 소량생산 및 탄소중립을 위한 에너지 저감방안에 효과가 있는 공정기술로써, 그 활용성을 확인하기 위해 간이형 장비를 제작하였다.

(2) 제작된 장비를 활용하여 목표 온도까지 승온하는 시간 및 판재와 맞닿는 편치 헤드 부분의 표면 온도를 측정하였다. 300 °C 까지 승온하는데 걸리는 시간은 약 2 분 정도로 상대적으로 빠른 시간 내에 승온이 완료되는 것을 확인하였고, 편치의 표면 온도는 열원 기준 온도에 비해 30 °C 가량 낮은 분포를 나타내었다.

(3) 본 연구에서 가장 중요한 변수인 성형 중 판재 온도를 측정하기 위해 5 분간 온도를 유지시키는 조건으로 성형 실험을 온도에 따라 수행을 하였다. 실험 결과 판재의 온도는 편치 온도에 비해 목표 온도에 가까운 값으로 나타났으며, 1 분 이상의 가열 시간을 유지하는 것이 충분한 가열을 위해 필요하다고 판단하였다.

(4) 온도에 따른 판재의 성형 결과를 확인해볼 때, 온도가 높으면 높을수록 판재의 성형이 원활히 수행이 되었으며, 성형 온도 조건 별로 곡판의 형상동결성이 향상되는 효과를 확인하였다. 이를 통해 국부가열을 접목시킨 다점성형공정 기술의 활용가능성을 검토하였다.

## 후 기

본 논문은 한국생산기술연구원 기관주요사업 “2021년도 창의연구사업(신진연구자 지원사업-KITECH EI-21-0044)”의 지원으로 수행한 연구입니다.

## REFERENCES

- [1] S. C. Heo, Y. H. Seo, H. G. Noh, T. W. Ku, B. S. Kang, 2010, Numerical Study on Effect of Using Elastic Pads in Flexible Forming Process, *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 34, No. 5, pp. 549~556.  
<https://doi.org/10.3795/KSME-A.2010.34.5.549>
- [2] Q. Q. Liu, C. Lu, W. Z. Fu, K. Tieu, M. Z. Li, X. P. Gong, 2013, Optimization of Cushion Conditions in Micro Multi-Point Sheet Forming, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 212, No. 3, pp. 672~677.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.07.015>
- [3] J. W. Park, T. W. Ku, J. Kim, B. S. Kang, 2014, Numerical Study of Aircraft Winglet Mold Manufacturing using Flexible Forming, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 23, No. 8, pp. 482~488.  
<http://dx.doi.org/10.5228/KSTP.2014.23.8.482>
- [4] I. K. Lee, S. Y. Lee, M. S. Jeong, B. M. Kim, S. K. Lee, 2018, Numerical Study on Forming Characteristics of Hot Multi-Point Forming Die, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 27, No. 4, pp. 236~243.  
<https://doi.org/10.5228/KSTP.2018.27.4.236>
- [5] J. W. Park, J. Kim, B. S. Kang, 2019, Development on a Prediction Model for Experimental Condition of Flexibly Reconfigurable Roll Forming Process, *Metals*. Vol. 9, No. 8, pp.896  
<https://doi.org/10.3390/met9080896>
- [6] J. S. Yoon, J. Kim, B. S. Kang, 2016, Deformation analysis and shape prediction for sheet forming using flexibly reconfigurable roll forming, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 233, pp. 192~205.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.02.005>
- [7] S. M. Choi, S. Y. Kim, J. H. Lim, J. W. Lee, M. K. Jeong, M. S. Kim, 2020, Calculation of Carbon Credit by Supplied Steam Quality in Industrial Cogeneration Plants, *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 44, No. 12, pp. 735~740.  
<https://doi.org/10.3795/KSME-B.2020.44.12.735>
- [8] Y. H. Hwang, J. M. Kim, G. Y. Hwang, N. T. Nam, M. J. Kim, 2021, Study on the Energy Source Matching of a Detachable Hybrid Electric Vehicle Using Dynamic Planning, *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 45, No. 4, pp. 245~251.  
<https://doi.org/10.3795/KSME-B.2021.45.4.245>
- [9] F. Feng, J. Li, R. Chen, L. Huang, H. Su, S. Fan, 2021, Multi-point die electromagnetic incremental forming for large-sized sheet metals, *J. Manuf. Process*, Vol. 62, pp. 458~470.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.12.022>
- [10] Z. Y. Cai, S. H. Wang, X. D. Xu, M. Z. Li, 2009, Numerical simulation for the multi-point stretch forming process of sheet metal, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 209, pp. 396~407.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.02.010>
- [11] X. Y. Huang, J. Zhao, G. C. Yu, Q. D. Meng, Z. K. Mu, Y. J. Liu, 2021, Multi-point flexible straightening process by reciprocating bending for metal profiles, *Tran. Nonferrous. Met. Soc. China*, Vol. 31, pp. 2039~2050.  
[https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65636-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65636-4)
- [12] I. K. Lee, S. Y. Lee, M. S. Jeong, S. K. Hwang, Y. J. Cho, B. M. Kim, D. C. Ko, S. B. Lee, S. K. Lee, 2017, *Procedia Eng.*, Vol. 207, pp. 1165~1169.  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.1047>
- [13] Q. F. Zhang, Z. Y. Cai, Y. Zhang, M. Z. Li, 2013, Springback compensation method for doubly curved plate in multi-point forming, *Mater. Des.*, Vol. 47, pp. 377~385.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.12.005>
- [14] Y. H. Seo, J. W. Park, W. J. Song, B. S. Kang, J. Kim, 2014, Flexible Die Design and Springback Compensation Based on Modified Displacement Adjustment Method, *Adv. Mech. Eng.*, Vol. 2014, Article ID 131253, pp. 1-15.  
<https://doi.org/10.1155/2014/131253>
- [15] M. Abebe, J. W. Park, B. S. Kang, 2017, Reliability-based robust process optimization of multi-point dieless forming for product defect reduction, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol 89, pp. 1223~1234  
<https://doi.org/10.1007/s00170-016-9172-5>
- [16] M. Abosaf, K. Essa, A. Alghawail, A. Tolipov, S. Su, 2017, Optimisation of multi-point forming process parameters, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol 92, pp. 1849~1859  
<https://doi.org/10.1007/s00170-017-0155-y>