

전극봉의 와이어 체결 유무에 따른 자유 벌징 금형의 액중방전성형 실험을 통한 SUS430 소재의 성형성 비교

장윤호¹ · 김민석² · 김 정^{3, #}

Experimental Comparison of Electrohydraulic Forming of SUS430 with Free Bulging Die Depending on Wire of Electrodes

Y. H. Jang, M. S. Kim, and J. Kim

(Received October 10, 2023 / Revised October 24, 2023 / Accepted October 25, 2023)

Abstract

Electrohydraulic forming(EHF), one of the high-speed forming method, can supplement the weak point of previous forming process such as deep-drawing and electromagnetic forming. Indeed, EHF is time-consuming process during installing wire before experiment that hard to apply to industry. In this research, applying wireless electrode, the formability of SUS430 sheet was compared through EHF experiments using wire-installed electrode and the other, wireless. Although the power was a little lacking, the advantages of the experiment using wireless electrode could be confirmed with checking the optimal location of electrodes where the plasma is generated and comparing free-bulging height depending on former and later condition of electrodes with performing several single and multistage experiments for same voltage, 6 kV.

Keywords : High speed, Electrohydraulic forming, Wireless electrode, Free bulging, Formability, Experimental result

1. 서론

최근 자동차와 항공기 등 운송수단의 개발에 있어 환경규제에 따라 연료 효율을 높이는 추세이다. 이에 따라 운송수단은 경량화를 이루는 방식으로 연구가 진행되고 있다[1]. 상기와 같은 운송수단 등의 골격과 외피를 이루는 판재를 성형하기 위해서 프레스와 금형을 활용한 딥드로잉(deep-drawing) 방식이 주로 사용되고 있다[2]. 고강도강, 알루미늄 합금, 마그네슘 합금 소재와 같은 경량 소재를 드로잉 방식으로 성형 시, 소재의 낮은 성형성과 성형 후 탄성 복원에 따라 성형하고자 하는 결과물과 실제 결과물에 차이가 존재하며, 이를 해결하고자 하는

연구가 계속해서 수행되고 있다[3].

기존 드로잉 방식의 낮은 성형성(formability)을 해결하기 위한 방법으로 고속 성형 방법 중 하나인 액중 방전 성형(electrohydraulic forming)이 존재한다[4].

고강도강인 stainless-steel 중 오스테나이트 계열인 SUS300계열은 상대적으로 페라이트 계열인 SUS400 계열에 비해 더 나은 성형성을 보이므로, 상대적으로 높은 가격임에도 불구하고 많이 사용된다. 그러나 고속 성형을 통해 상대적으로 성형성이 좋지 않은 저렴한 400 계열에서도 높은 성형성을 확보할 수 있다.

이에 따른 빠른 성형 속도와 관성효과(inertia effect)는 소재가 금형과 충돌하며 발생하는 압축 응력을 발생시켜 소재 내부 공극의 생성, 성장을 억제 시킴으로써 성형성을 향상시킨다[5].

액중 방전 성형은 작동 유체의 유압으로 소재를 성형시키므로 온전한 성형 과정동안 균일한 성형력

1. 부산대학교 항공우주공학과, 박사과정

2. 부산대학교 항공우주공학과, 석사과정

3. 부산대학교 항공우주공학과, 교수

#Corresponding Author: Dept. Aerospace Engineering, Pusan Nat'l Univ.,
E-mail: greatkj@pusan.ac.kr, ORCID: 0000-0002-7292-7441

을 가할 수 있어, 기존 고속 성형 방식의 단점인 소재에 가해지는 짧은 성형력과 빠른 성형 속도에 의한 바운싱 현상(bouncing effect)과 불균형한 성형력을 해소할 수 있다[6]. 그러나 매번 실험마다 작동 유체 내부에 있는 전극봉(electrode) 사이에 체결되어 있던 와이어(wire)를 새로 장착해 주어야 하기 때문에 이를 위해 작동 유체를 배수시키고 다시 급수해야 하므로, 시간적으로 매우 비경제적이다.

본 논문에서는 와이어를 장착하는 시간을 줄임으로써 액중 방전 성형의 단점을 해소할 수 있을 것이라 판단하였다. 상기의 단점을 해결하기 위해 와이어를 장착하지 않는 전극봉을 설계하였으며, 각각의 성형성을 비교하기 위해 동일한 자유 벌징(free-bulging) 금형(die)과 챔버(chamber), 1T 두께를 갖는 SUS430 시편을 이용해 기존 와이어를 사용하는 액중 방전 성형 실험과 와이어를 사용하지 않는 액중 방전 성형 실험을 수행한 후, 자유 벌징 높이를 각각 비교하는 연구를 수행하였다.

2. 액중 방전 성형 장치(EHF)

2.1 액중 방전 성형 장비의 구조

본 연구에 활용하기 위해 사용된 연구실 내에 보유하고 있는 액중 방전 성형 장치(EHF)는 Fig. 1과 같다.

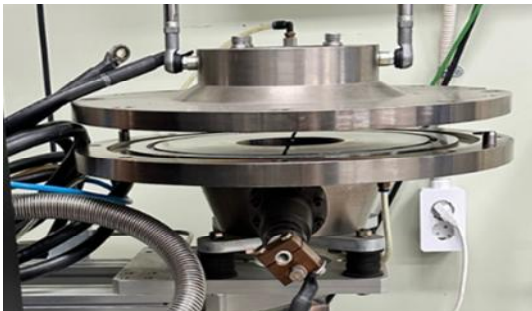


Fig. 1 Electrohydraulic forming machine (PNU33)

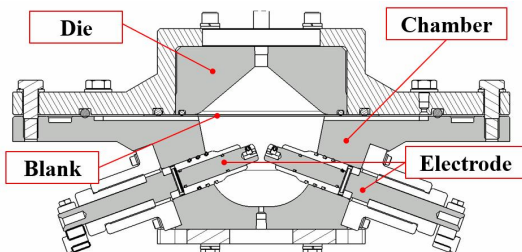


Fig. 2 Schematics of electrohydraulic forming machine

Fig. 2와 같이 금형, 작동 유체의 배수와 급수가 가능한 챔버, 그 사이에 시편(specimen)이 위치하며, 챔버 내부에는 커패시터로부터 방전된 전기 에너지가 흐르게 되는 1쌍의 전극봉으로 구성되어 있다.

전극봉 사이에는 와이어가 연결되어 있으며, 커패시터를 급방전시키면, 순간적으로 고전류가 흐르게 되어 와이어의 중앙부에 전기 에너지가 집중된다. 와이어가 순간적인 고압, 고온에 노출되어 용융 및 폭발이 이루어지며 이온화된 기체 플라즈마가 발생하는데 이 때 발생하는 충격파는 작동 유체를 거동시키며 시편을 성형시킨다.

2.2 와이어 체결 전극봉

와이어를 장착할 수 있는 전극봉은 Fig 3과 같은 구조로 이루어져있다. 순간적으로 방전되는 고전류에 의해 와이어가 전극봉으로부터 이탈하게 되면 와이어와 챔버가 충돌하며 단락(short)이 발생할 수 있으므로 볼트를 이용하여 전극팁(electrode-tip)과 함께 체결하였다.

액중 방전 성형에 있어 같은 출력 전압에서 일정한 성형력을 내기 위해서는 와이어의 재료가 동일해야 하고, 와이어의 길이와 소재로부터 와이어 중앙부의 높이가 일정해야 한다. 이는 경험적으로 액중 방전 성형의 성형력을 결정 짓는 변수로써 Fig. 4

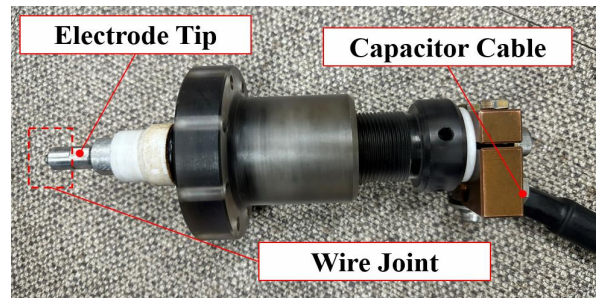


Fig. 3 Wire electrode of electrohydraulic forming

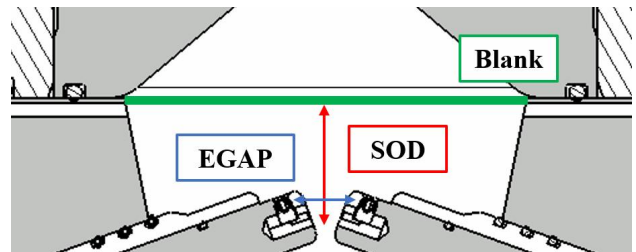


Fig. 4 Schematic concept of electrode-gap and stand of distance

와 같이 EGAP(electrode-gap), SOD(stand of distance)라 칭한다. 그러나 와이어를 손으로 직접 체결하게 되므로, 매 실험 마다 일정한 EGAP, SOD를 맞추어 와이어를 체결하기 위해서는 많은 시간이 소모된다. 본 실험 장비는 경험적인 연구를 통해 최적의 성형력이 나오는 EGAP과 SOD를 확보하였다.

2.3 와이어리스(wireless) 전극봉

본 연구를 위해 설계한 와이어리스 전극봉은 와이어 체결 전극봉과 같은 구조에서 와이어가 장착되는 부분을 팁(tip)으로 교체하였다. 와이어리스 전극봉의 구조는 Fig. 5와 같다. 팁은 기존 와이어 체결 전극봉과 동일하게 Al6016-T6 소재를 통해 제작하였다.

와이어 체결 전극봉과 동일한 실험 조건을 형성하기 위해서 동일 입력전압을 사용하였다. 팁이 실험 과정에서 점점 마모되기 때문에, 동일한 EGAP을 유지하기 위해서는 전극봉을 챔버 방향으로 전진시켜야 한다. Fig. 6과 같이 입력 전압에 따라 깎여 나가는 정도를 확인하고, 챔버 외부에서 전극봉을 전진시킬 수 있도록 설계하였으며, 완전히 마모된 팁은 손쉽게 교체할 수 있도록 설계하였다.

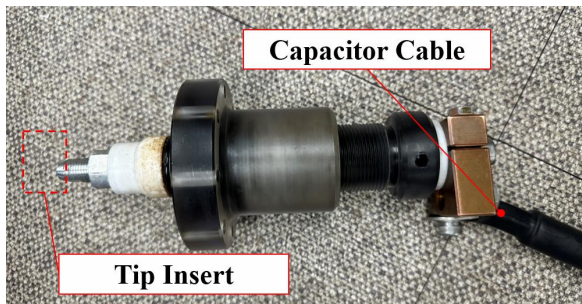


Fig. 5 Wireless electrode of electrohydraulic forming

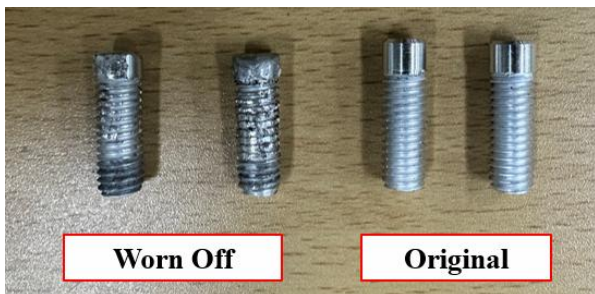


Fig. 6 Original and worn off tip of wireless electrode

3. 와이어 체결 전극봉을 이용한 실험

3.1 성형력 발생 최적 위치의 실험 조건

두 전극봉 사이에서 와이어는 각각의 전극팁에 볼트로 체결되어 있다. 와이어의 두께는 0.1 mm 이며, 전극팁, 전극봉과 동일한 Al6016-T6 소재이다.

본 장비에서 최고의 성형력을 낼 수 있는 EGAP과 SOD로 와이어를 위치시켰으며, Table 1은 와이어 체결 전극봉을 이용한 액중 방전 성형을 위한 실험 조건을, Fig. 7은 와이어가 체결된 전극봉의 모습을 보여준다. 실험 소재는 1T 두께의 SUS430 시편을 사용하였다.

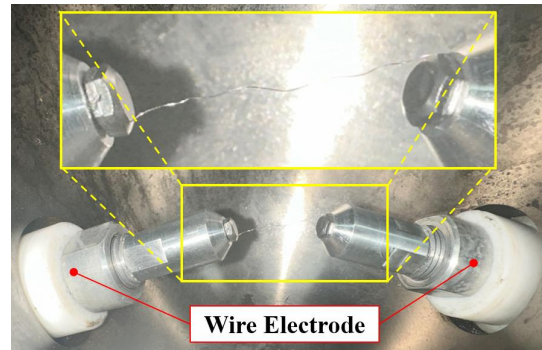


Fig. 7 Wire installed electrode in chamber of electrohydraulic forming



Fig. 8 Result of free bulging experiment with wire electrode at 6kV

3.2 와이어 체결 성형 실험 결과

Table 1과 동일 조건으로 와이어 체결 전극봉을 이용해 총 3개의 시편에 대한 단일 액중 방전 성형을 수행하였다. 본 성형 실험은 기존에 연구를 수행하고 있던 실험 방식으로, 4절의 와이어리스 전극봉을 사용하였을 때의 자유 벌징 높이를 비교하기 위해 수행되었다. 액중 방전 성형이 이루어진 시편 중, 가장 자유 벌징 높이가 높은 시편을 Fig. 8에 나타내었다. 첨점(peak point)에서의 최대 자유 벌징 높이는 25.4 mm로 측정되었다.

Table 1 Comparison of measured roughness data

| EGAP (mm) | SOD (mm) | Input Voltage (kV) |
|-----------|----------|--------------------|
| 20 | 35 | 6 |

4. 와이어리스 전극봉을 이용한 실험

4.1 EGAP에 따른 성형 실험 조건

와이어 체결 전극봉을 대체한 와이어리스 전극봉은 Fig. 9와 같이 전극봉이 단방향으로 움직일 수 있게 설계되어 있기 때문에, SOD는 EGAP에 따른 종속변수이다. EGAP이 감소할 수록 SOD 또한 감소하게 되므로, 자유 벌징 높이가 가장 높게 나오는 EGAP을 찾기 위한 Case Study를 수행하였다.

3절과 동일하게 1T 두께의 SUS430 시편을 사용하였으며, 입력 전압 6 kV 조건에서 EGAP을 8개의 Case로 나누어 총 3회씩 실험을 수행하였다.

4.2 EGAP에 따른 성형 실험 결과

EGAP이 1 mm인 경우 팁이 근접하여 단락이 발생하였으며, 9 mm 이상에서는 방전된 전기 에너지로부터 발생하는 충격파가 작동 유체에 전혀 전달하지 못하였다.

EGAP이 늘어날수록 팁과 플라즈마의 거리가 멀어짐에 따라 팁의 마모량이 작아지는 것을 확인할 수 있으며, 더 큰 자유 벌징 높이를 획득하였다.

EGAP을 1 mm 단위로 나누어 case study를 수행한 결과, 연속적인 자유 벌징 높이와 팁 마모도에 있어 유의미한 차이가 없었다. 따라서 전극봉이 마모됨에 따라 변화된 EGAP과 최대 자유 벌징 높이 측정 결과 중 홀수 Cases를 Table 2에 나타내었다. 자유 벌징 실험 결과는 Fig. 10과 같으며 최대 벌징 높이를 비교하기 위한 측면을 Fig. 11에 나타내었다.

최대 자유 벌징 높이가 와이어 체결 전극봉을 사용했을 때보다 낮으므로, 같은 조건에서 실험을 반복하여 와이어 체결 전극봉을 이용한 자유 벌징 높이와 동일하거나 더 높은 자유 벌징 높이를 만들어 내기 위한 실험을 추가 수행하였다.

4.3 와이어리스 전극봉의 연속 실험

4.1 절에서 나온 결과에 따라 7 mm의 EGAP조건으로 실험을 수행할 시, 와이어리스 전극봉에 장착하기 위해 설계된 팁은 약 10회 정도 연속적인 실험

Table 2 Bulging height and reduction of EGAP at 6kV

| EGAP (mm) | 3 | 5 | 7 | 9 |
|----------------------|------|------|------|---|
| Max Bulge Height(mm) | 16.5 | 19.8 | 22.9 | - |
| ROE* (mm) | 2.1 | 1.7 | 1.1 | - |

* Reduction of EGAP

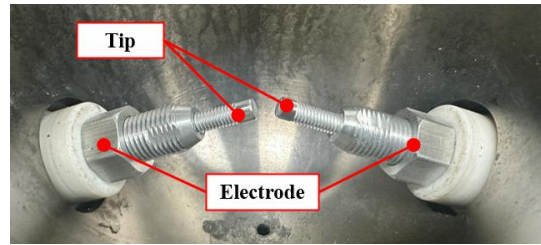


Fig. 9 Wireless electrode in chamber of electrohydraulic forming

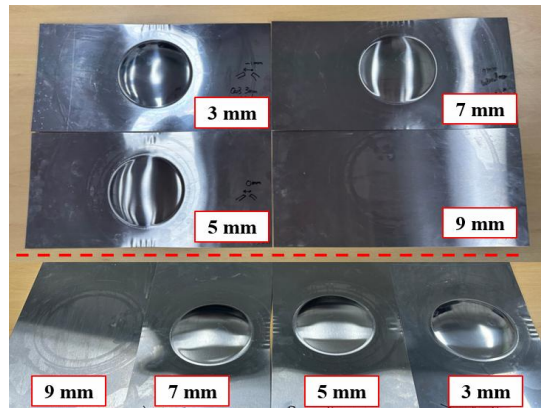


Fig. 10 Result of EGAP case study for free-bulging experiment of wireless electrode at 6 kV

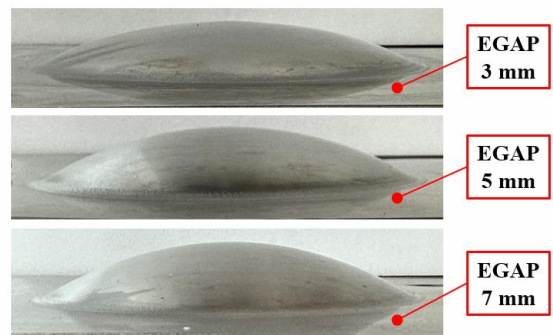


Fig. 11 Side view of figure 10's experimental result

수행이 가능하다. 팁의 머리부분 길이를 더 늘리면, 훨씬 더 많은 실험 수행이 가능해진다.

3절의 동일한 입력 전압 6 kV와 단일 실험에서,

와이어를 사용하는 전극봉을 이용한 자유 벌징 성형 높이는 와이어리스 전극봉을 이용해 확인한 높이 대비 31.08 % 낮은 성형 높이를 보여준다. 따라서 동일한 성형 결과를 만들어내기 위해서는 와이어를 사용하는 전극봉 대비 상대적으로 높은 전압을 걸어주거나, 연속 실험을 수행해야 한다.

기존 액중 방전 성형 실험 과정은 와이어 체결, 급수, 프레스를 이용한 가압(blank holder force), 방전, 배수, 급형 분리 과정으로 이루어진다. 와이어를 체결하는 과정이 실험 시간의 대부분을 차지하게 되는데, 와이어리스 전극봉을 활용하면, 급수, 프레스를 이용한 가압 후 충전과 방전만을 반복하면 계속해서 성형이 가능하며, 와이어를 체결하는 과정에서의 시간을 줄일 수 있다.

본 연구에서는 6 kV 동일한 입력 전압 조건으로 와이어 체결 전극봉 실험 결과 대비, 동일하거나 더 높은 자유 벌징 높이를 만들어내기 위해 몇 회의 실험이 필요한지를 확인하였다.

4.4 연속 실험 수행 조건

기존 와이어 체결 전극봉을 이용한 최대 자유 벌징 높이에 비해 와이어리스 전극봉을 이용하면 상대적으로 낮은 높이를 보여주었다. 따라서 동일한 입력 전압 6 kV로, EGAP을 7 mm로 유지시키며, 팁 무교체, 작동 유체를 배수하지 않는 조건 그리고 프레스 가압을 유지시킨 상태로 연속 실험을 수행하였다.

연속 실험은 3 가지의 case로 나누어, 3결과 동일한 3개의 SUS430 1T 소재를 1회(single), 2회(double), 3회(triple) 연속으로 각각 3회씩 총 9번의 실험으로 이루어졌다.

4.5 연속 실험 횟수에 따른 성형 결과

동일한 실험 조건에서 첫 번째 성형 실험 수행 후 가장 높은 벌징 높이를 보였다. 실험 횟수가 늘어날수록 자유 벌징 높이 증가율이 감소하며 상대적으로 소재 유입량이 커지는 것을 확인하였다.

연속 3회 실험 시, 마지막 실험에서 높이가 거의 증가하지 않는 것을 확인하였다. 시편의 침점과 플라즈마 사이의 거리 증가로 인해 시편에 가해지는 정수압(uniform pressure)이 작동 유체의 마찰로 감소되고, 성형력이 줄어들어 높이 증가량이 감소하게 된다.

연속 2회 실험 시 자유 벌징 높이는 25.8 mm에 도달하였다. 기존 와이어 체결 전극봉을 사용한 실험

결과보다 0.6 mm 더 높은 자유 벌징 높이를 보였다. 연속 2회 실험을 수행한 결과는 와이어 체결 전극봉을 이용해 단일 시험을 수행한 실험 결과보다 소재 유입이 더 크게 일어났다. 연속 3회 실험을 수행한 소재의 자유 벌징 높이는 연속 2회 실험을 수행한 결과 대비 0.2 mm 정도로 유의미한 차이를 확인할 수 없었다. 침점과 플라즈마 사이의 거리가 클 수록 더 큰 입력 전압을 가하여 실험을 수행하거나 플라즈마가 발생하는 전극봉의 위치를 조절하여 높은 성형력을 확보할 수 있다.

Table 3과 Fig. 12는 각 case 별로 1회, 2회, 3회 연속 실험을 통해 나타나는 자유 벌징 높이로 와이어 체결 전극봉으로 단일 실험을 수행한 자유 벌징 높이와의 차이를 보여준다. Fig. 13은 각 case 별로 연속 실험을 수행하여 총 3 개의 시편 중 가장 큰 자유 벌징 높이를 만들어 낸 소재를 나타내며, Fig. 14는 연속 실험 결과와 와이어 전극봉을 이용한 단일 실험 결과를 각각의 단계에서 비교한 측면 성형 결과이다. Fig. 15는 와이어리스 전극봉을 이용한 연속 2회 실험 결과와 와이어 체결 전극봉의 단일 실험 결과를 나타낸다.

Table 3 Bulging height of consecutive experiments (mm)

| Iteration | | 1 | 2 | 3 |
|--------------------|----------------|------|------|------|
| Wire Electrode | Bulging Height | 25.4 | - | |
| Wireless Electrode | Bulging Height | 22.9 | 25.8 | 26.0 |
| | Var* | 22.9 | 2.9 | 0.2 |
| - | Gap | -2.5 | 0.4 | 0.6 |

*Variation of height with previous sequence

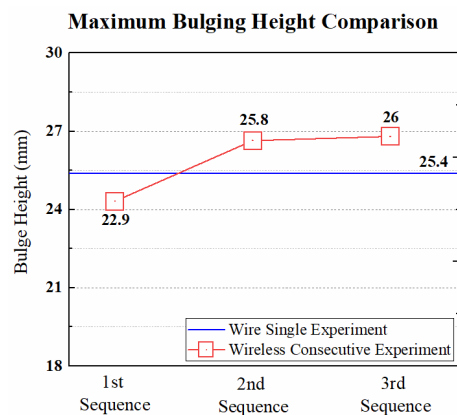


Fig. 12 Comparing maximum bulging height of wire electrode and wireless electrode

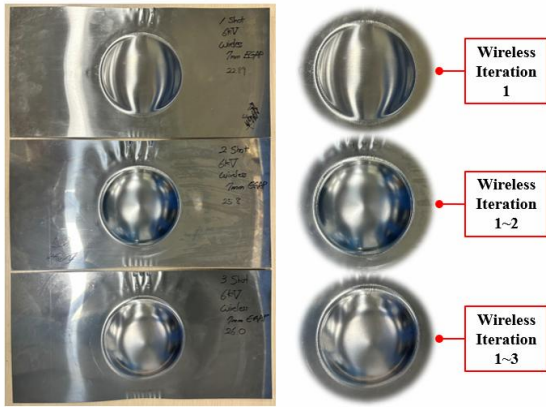


Fig. 13 Comparing maximum bulging height of wire electrode and wireless electrode

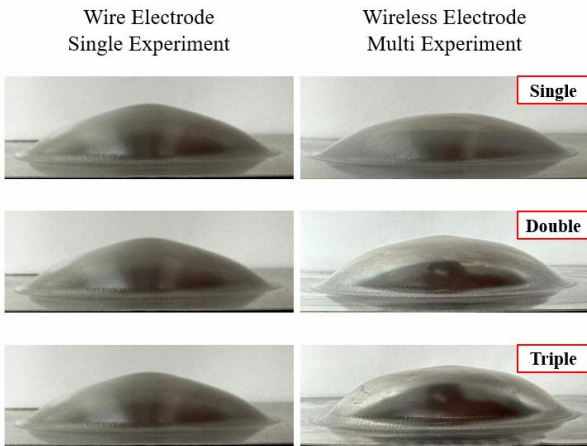


Fig. 14 Comparing bulging height of wireless electrode with single experiment of wire electrode

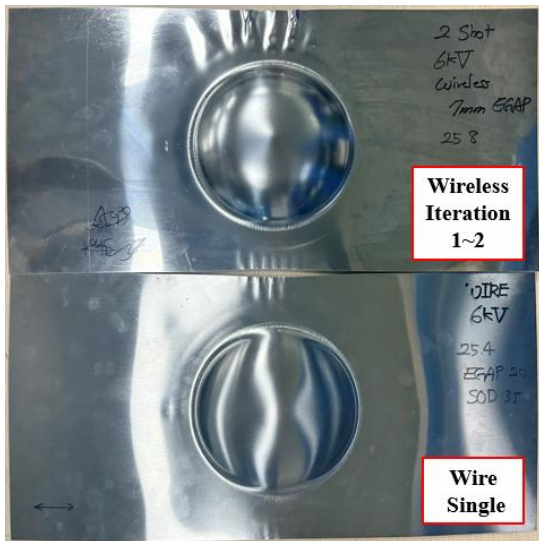


Fig. 15 Experimental result at second sequence of wireless electrode and wire electrode at 6 kV

5. 각 전극봉의 실험 소요 시간

5.1 전극봉 별 실험 과정 및 시간

액중 방전 성형 공정에 있어 와이어 체결 방식, 와이어리스 두 가지 전극봉의 실험 소요 시간을 측정하는 실험을 수행하였다. Fig. 16은 와이어 체결 방식 전극봉의 단일 및 연속 실험 과정을 나타내는 순서도이며, Fig. 17은 와이어리스 전극봉의 단일 및 연속 실험 과정을 나타내는 순서도이다.

두 순서도에서 금형과 챔버의 체결, 즉 시편을 눌러주는 blank holder force 역할은 프레스를 사용하지 않고 볼트 체결을 통해 가압하였으므로, 해당 과정에서 소요되는 시간은 무시하였으며, 전극봉의 와이어 체결 유무에 상관없이 동일하다고 가정하였다.

와이어 체결 전극봉의 경우 전극팁에 와이어를 체결하는 시간이 실험 과정의 대부분을 차지하는 것을 확인할 수 있으며, 매번 와이어 장착을 위해 실험 마다 작동 유체를 급수, 배수해 주어야 하므로 이에서도 많은 시간이 소요된다. 와이어리스 전극봉은 와이어의 부재에 따라 와이어를 체결하는 과정, 와이어 체결을 위해 작동 유체의 급수 및 배수 과

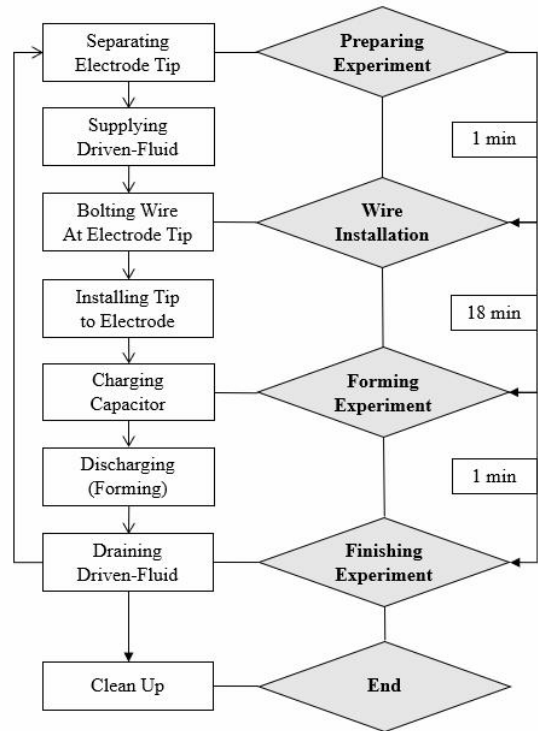


Fig. 16 Flow chart of wire electrode EHF experiment process

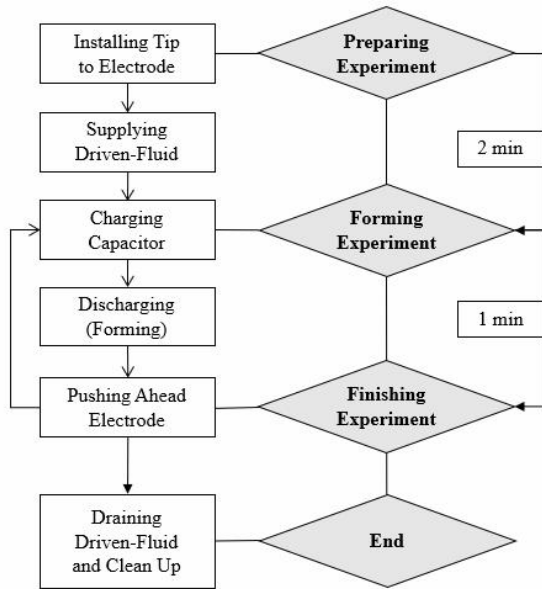


Fig. 17 Flow chart of wireless electrode EHF experiment process

정이 존재하지 않는다. 전극팁의 마모에 따라 전극봉을 전진시켜 이를 해결 가능하므로 극명한 실험 시간 단축이 이루어진다.

5.2 전극봉 별 연속 실험 시간

액중 방전 성형 공정에 있어 와이어 체결 방식, 와이어리스 두 가지 전극봉을 각각 사용했을 때 걸리는 실험 소요 시간을 측정해 보았다.

단일 실험에 있어 기존의 와이어 체결 전극봉은 실험에 20분이 소요되었으나, 와이어리스 전극봉의 경우 약 3분 정도가 소요되어 7배 이상 실험 시간을 줄일 수 있었다. 이는 와이어를 팁에 체결하는 시간과 작동 유체를 급수 및 배수하는 과정이 빠짐에 따라 시간을 단축시킴으로써 나타난다. 그러나 와이어리스 전극봉을 이용하여 단일 자유 벌징 실험을 수행할 경우 와이어 체결 전극봉 대비 자유 벌징 높이가 상대적으로 낮은 결과를 보였다. 따라서 연속 실험을 통해 유사한 자유 벌징 높이를 획득하였으며, 연속 실험에 걸리는 시간을 측정하였다.

와이어리스 전극봉을 이용할 경우, 경험적으로 획득한 팁의 삭마량을 통해 볼트로 체결되어 있는 금형과 챔버를 분해하지 않은 상태에서 실험 수행이 가능하므로, 단순히 커패시터의 충방전만 이루어질 시간만으로 연속 실험 수행이 가능하다. 실험적으로 커패시터 충방전 및 전극봉 전진에 소요되는 시간

은 1분이 채 걸리지 않았다.

6 kV 입력 전압 조건에서 1T 두께의 SUS430 시편은 와이어리스 전극봉을 사용할 시 최소 2회 연속 실험을 통해 와이어 체결 전극봉이 단일 실험으로 만들어내는 자유 벌징 높이를 획득할 수 있다. 즉 동일 입력 전압에서 연속 실험을 수행하더라도 단일 실험을 수행하는 와이어 체결 형태의 전극봉보다 더 빠른 시간 내에 원하는 높이의 성형 결과물을 획득할 수 있다는 것을 의미하며, 자동화된 프레스를 이용해 같은 형태의 성형물을 다량 성형시킬 때 더욱 효과를 보일 것을 예상할 수 있다.

Table 4는 단일 실험, 각 연속 실험 과정에 소요되는 시간을 나타내며, 이 수치들을 Fig. 18에 시각화시켜 나타내었다.

Table 4 Time of consecutive experiments (min)

| Iteration | Single | Double | Triple |
|----------------|--------|--------|--------|
| Wire Installed | 20.0 | - | - |
| Wireless | 3.0 | 3.8 | 4.6 |

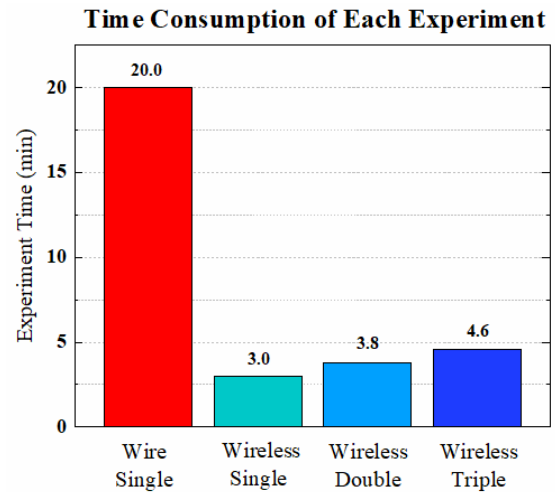


Fig. 18 Time consumption of single experiment of wire and multi experiment of wireless electrode

6. 결론

본 연구에서는 기존 와이어를 체결하는 액중방전 성형 실험의 큰 제약 조건인 실험 시간을 줄이기 위하여 와이어를 체결하지 않고 성형력을 낼 수 있는 와이어리스 전극봉을 설계하였으며, 1T 두께의 SUS430 시편에 대한 자유 벌징 액중 방전 성형 실험

험을 수행하였다. 기존 와이어 체결 전극봉과 와이어리스 전극봉을 이용한 액중 방전 성형 실험을 통해 최대 벌징 높이와 실험 소요 시간을 비교하였다. 와이어리스 전극봉을 사용하여 와이어를 장착하는 시간을 크게 줄일 수 있어 큰 시간 단축을 이룩 해 내었으며, 두 전극봉 사이의 거리인 EGAP을 조절하고 연속 실험을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 와이어리스 전극봉을 이용하여 가장 높은 자유 벌징 높이를 만들어내기 위한 EGAP을 선정할 시, 팁 간의 거리가 너무 짧으면 팁의 마모량이 커지고 성형력이 낮아지며, 너무 길어지면 성형력이 전혀 발생하지 않는다.

(2) 6kV 전압 조건에서 SUS430 1T 소재는 와이어리스 전극봉을 이용한 액중 방전 성형 수행 시 와이어 체결 전극봉을 이용한 액중 방전 성형에 비해 낮은 자유 벌징 높이를 가진다.

(3) 상기 실험을 연속하는 경우, 복잡하고 시간이 소요되는 과정 없이 단순히 충방전과 팁 거리 조절을 통한 2회의 연속 실험으로 단일 와이어 체결 전극봉을 이용한 실험보다 큰 자유 벌징 높이를 만들어 낼 수 있다.

(4) 연속 실험의 경우, 급방전에 따른 플라즈마 발생 위치와 소재의 침점의 길이가 길어질수록 자유 벌징 높이의 증가량은 작아진다.

(5) 6kV 전압 조건에서 와이어리스 전극봉을 사용할 경우, 작동 유체의 급수 및 배수 와이어 체결에 시간을 소모하지 않으므로 약 5.26배 시간을 절약할 수 있으며, 실험 횟수가 많아질 수록 상대적으로 실험에 더 많은 시간을 절약할 수 있다.

후 기

이 논문은 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 기본연구지원사업(RS-2023-00253462182065300001)과 교육부 및 한국연구재단의 4단계 두뇌한국 21 사업 (4단계 BK21 사업)의 지원을 받아 수행된 연구임. 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] B.S. Han, S. H. Kim, J. H. Shin, J. P. Kim, D. W. Kim, S. Y. Seong, 2022, Automotive Technology Trends and Lightweight Technology, J. of Kor. Foundry Society, Vol. 42, No. 2, pp. 97~104.
- [2] S. M. Park, D. K. Kim, S. M. Hong, 2017, Initial Blank Optimization Design of Square Can Multistage Drawing Considering Formability and Product Shape, J. of the Kor. Academia-Industrial, Vol. 18, No. 3, pp. 320~326, <https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.3.32>
- [3] M. R. Lim, H. B. Byun, Y. J. Song, J. S. Park, J. Kim, 2022, Comparative Analysis of the Formability of Electromagnetic Forming and Deep-Drawing through Finite Element Analysis, Trans. of the Kor. Society of Automotive Eng., Vol. 30, No. 8, pp. 619~628, <https://doi.org/10.7467/KSAE.2022.30.8.619>
- [4] M. N. Woo, H. G. Noh, W. J. Song, B. S. Kang, J. Kim, 2017, Development of Electrohydraulic Forming Apparatus and Its Experimental Study, Trans. of the Kor. Society of Automotive Eng., Vol. 25, No. 2, pp. 236~241, <https://doi.org/10.7467/KSAE.2017.25.2.236>
- [5] J. Kim, W. J. Song, B. S. Kang, 2013, Study on Formability Enhancement of Electromagnetic Forming using Gurson Plasticity Material Model, Trans. of the Kor. Society of Automotive Eng., Vol. 21, No. 3, pp. 98~104, <http://dx.doi.org/10.7467/KSAE.2013.21.3.098>
- [6] M. N. Woo, H. G. Noh, W. J. Song, B. S. Kang, J. Kim, 2016, Numerical Study of Electrohydraulic Forming to Reduce the Bouncing in High-Speed Forming Process, Trans. Mater. Process., Vol. 25, No. 4, pp. 261~267, <http://dx.doi.org/10.5228/KSTP.2016.25.4.261>