

전자기 성형법에 대하여

李 宗 洙

대전기계창 소재 5실



●1947년생
●소성역학 및 소성가공을 전공하였으며, 특히 P/M, RSP, 초소성을 이용한 신소재가공에 관심을 가지고 있다.

1. 머리 말

전자기 성형이란 고강도의 자기장을 이용하여 고속(15~300m/s)으로 금속을 성형하는 기술이다. 즉, 자계가 갖는 에너지를 직접 금속의 성형에 이용하는 성형법으로 일반적으로 고속도 가공법(explosive, electro-hydraulic, pneumatic-mechanical, electro-magnetic pulse forming)이라 불리는 가공 기술의 한 가지이다. 전자기 성형 기술은 1960년 경 미국에서 개발 및 실용화로의 노력이 경주되어 산업적, 이론적으로 많은 발전이 있었고 일본에서도 1970년 초반에 이 분야의 연구가 시작하여 현재 활발히 연구되고 있는데, 금속의 성형, 체결, 조립 등의 작업에 이용되어 자동차 산업, 항공 산업, 전기 산업과 병기 산업 등에서 많이 이용되고 있다. 한편 우리나라에서는 아직 연구 발표된 사례가 없는 실정인데, 몇몇 업체 및 연구소에서 성형 장비를 도입하고 연구를 시작하려는 시점에 있으므로 본 글에서 그 성형 원리 및 가공 특성에 대해 소개한다.

2. 성형 원리 및 방법

(1) Lorentz의 힘

자기장으로 인하여 전류가 흐르는 도체가 받은 힘은 로렌츠 힘의 방정식에서 다음의 식(1)로 표시된다(그림 1).

$$F = I \vec{dl} \times \vec{B} \quad (1)$$

여기서, I 는 도체에 흐르는 전류, dl 은 도체의 길이, B 는 자속밀도이고 F 는 힘으로서 dl 과 B 에 의해 정의되는 면에 수직하다. 전자기 성형에서 이 힘이 성형력(가공력)이 되는데, 이 힘이 크기 위해서는 도체에 흐르는 전류 I 와 자속밀도 B 가 커야함을 알 수 있다. 자기장이 도체에 의해 흐르는 전류에 의해 생성되고, 강자장 효과(ferromagnetic effect)를 무시하면 힘은 전류의 제곱에 비례하게 된다. 기 유도와 자기 압력과의 관계는 다음과 같다.

$$P = \frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{\mu_0 H^2}{2} \quad (2)$$

여기서, H 는 자기장 세기 P 는 압력이고 μ_0 는 진공 투자율이다.

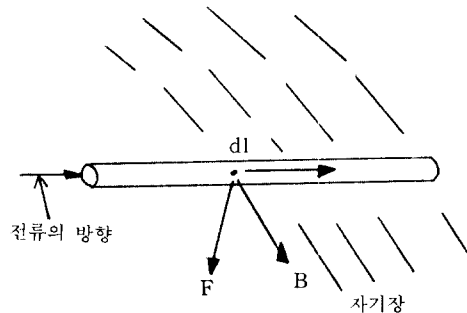


그림 1 자기장 속에서 전류가 흐르는 도체에 작용하는 힘

(2) Faraday의 법칙

임의의 폐회로에서 자속이 시간에 따라 변화하면 기전력이 유도되는데 이 회로내의 유도기전력은 그 회로를 지나는 자속의 시간 변화율과 같고 방향이 반대이다. 이를 패러데이 법칙이라고 하는데 식으로 표시하면 다음 (3)식과 같다. 여기서 ϵ 는 유도기전력, ϕ 는 자속이고 t 는 시간이다.

$$\epsilon = -\frac{d\phi}{dt} \quad (3)$$

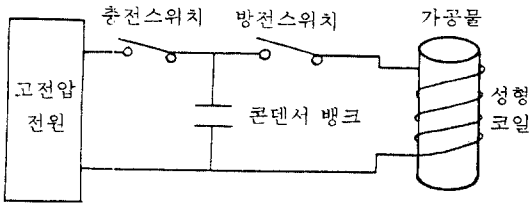
전자기 성형에서 이 식은 솔레노이드 내에 갑자기 전류가 흘러 자속이 생기면 이 자속 변화로 인하여 주위의 가공물에 기전력이 도체인 가공물에 전류가 흐르게 되며 이 전류가 식 (1)에서의 전류 I 이다. 따라서 큰 전류를 얻기 위해서는 가공물이 고유 저항이 작은 양도체가 되어야 하고 시간당 자속 변화가 크기 위해서는 충격적으로 방전을 해야함이 전자기 성형의 선결 조건임을 알 수 있다.

(3) 성형력의 발생

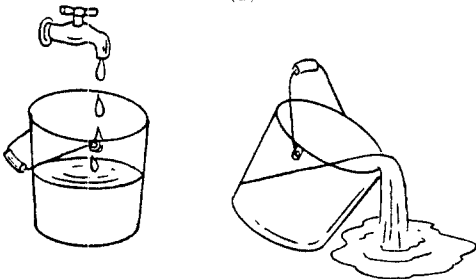
앞서 언급한대로 전자기 성형은 자계가 갖는

에너지를 이용하여 고속도로 금속을 성형하는 기술이다. 충분한 가공력을 얻기 위해서는 강력한 자계가 필요하며 보통은 순간적인 강자계가 이용된다. 그것은, 적당한 형태(축전기, 발전기, 축전지 등)로 축적된 에너지를 순간적으로 코일에 방출시키는 것에 의해 얻는 것이 가능하지만, 장치가 취급의 편의상 일반적으로는 축전기에 충전시켜 축적된 전기에너지를 충격대전류로서 코일에 흐르게 하는 방식을 이용한다. 그림 2(a)는 전자기 성형 장치의 기본적 회로 구성이다.

즉, 성형코일과 축전기를 충전하기 위한 고전압 전원, 에너지 축적부로서의 축전기 탱크 및 충전 방전 스위치로 이루어지는 충격 대전류 발생 장치와 이 외에 보조장치로서 제어 회로 및 경보 회로로 구성된다. 축전기에 충전된 에너지를 순간적인 대전류로 어떻게 방전시키는지를 쉽게 이해하기 위해 그림 2(b)에서처럼, 수도꼭지에서 조금씩 떨어지는 물을 필요한 만큼 충분히 물통에 채워넣은 후, 물통을 갑자기 비워 버리면 짧은 동안에 많은 양의 물이 한꺼번에 쏟아질 것이다. 전자기 성형도 이와 똑같

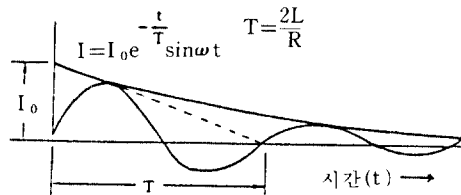


(a)

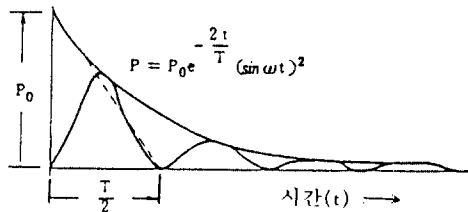


(b)

그림 2 전자기 성형의 기본적 회로 구성(a), 물통을 이용한 상사도(b)



(a)



(b)

그림 3 전자기 성형 방전시의 전형적인 전류파형(a), 압력파형(b)

은 원리를 이용한다. 즉, 방전스위치를 열고 충전스위치를 닫아 축전기를 충전시킨 후, 충전스위치를 열고 방전 스위치를 닫으면 충격대전류가 성형코일에 흘러 순간적인 강자계가 형성되는 것이다. 전자기 성형기를 작동할 때는 축전기를 미리 정한 전압(보통 8kV)까지 서서히 충전(2~6초 정도)시킨 다음 코일을 통해 방전시키면 그림 3(a)와 같은 감쇠 전동 전류가 발생하게 된다. 전류에 있어 이 감쇠는 코일과 가공물에서의 저항열과 가공물 자체에 한 일로 인한 에너지 손실을 의미하는 것이다. 방전 전류의 최대치는 축전기의 저장 능력에 따라 다르지만 산업계에서 이용되고 있는 기계는 보통 100~400kA 정도이고 주기 T는 100 μ sec 정도이다. 이 전류로 인해 그림 4(a)와 같이 코일 속에 자기장이 생성된다. 이 자기장은 코일 주변에 의해 영향을 받는다(그림 4(a), (b), (c)). (여기서 유동선은 등 자력선을 포함하는 경계를 나타내고, 좁은 공간은 높은 자기장 세기를 나타낸다.) 즉, 코일 내에 절연체가 있다 하더라도 [그림 4(a)] 아주 고주파수인 경우를 제외하고는 코일내의 자속밀도는 거의 균일하게 되어 자기장의 통과에 영향을 주지 못한다. 반면에 가공물로 알루미늄 같은 전도체가 코일내에 삽입되면 [그림 4(b)] 코일에 생성된 자기장으로 인해 전도체에 전류가 유기된다. 이 유도 전류 때문에 자기장이 도체인 가공물 내부로 침투하지 못하여 가공물과 성형코일간의 환상의 좁은 공간에서의 자속밀도가 현저하게 높게 된다. 이 유도 전류(코일에 흐르는 전류와 반대 방향이다)와 자기장 사이의 상호작용으로 가공물에 균일한 내측 방향의 압력(힘)이 작용하는 것이다(그림 4(c)). 이 압력은 전류의 제곱에 비례하므로 압력도 진동하면서 감소한다(그림 3(b)). 이 압력 펄스가 가공물의 항복 강도보다 크면 가공물은 소성변형하게 된다. 코일과 가공물 사이에는 재래식 성형에서와 같은 물리적 접촉이 없다. 가공물의 최종 형상은 압력 펄스의 크기, 가공물의 강도와 기

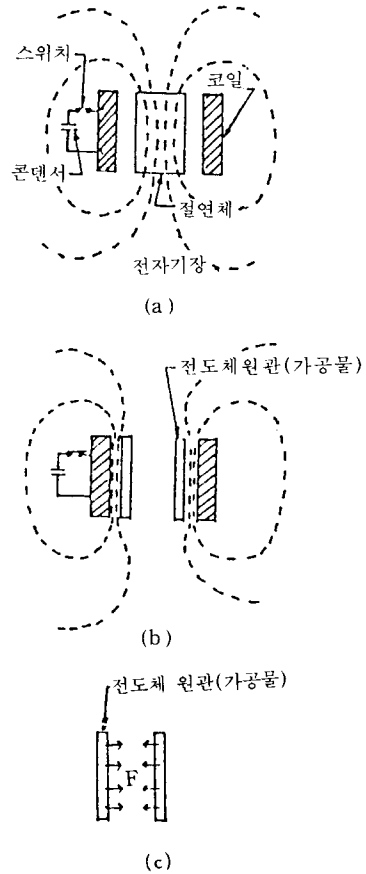


그림 4 코일 내에 절연체, 전도체가 삽입된 경우의 전자기장(a), (b) 전도체(가공물)이 받는 힘의 방향(c)

하학적 형태, 그리고 금형의 형태에 의해 좌우된다.

(4) 성형조건

실제로 사용되는 가공물인 어떠한 금속도 작업온도에서 완전한 전도체가 아니므로(저항이 0인 재료가 아니므로) 자기압력은 긴 시간동안 유지되지 못하며 자기장은 금속의 고유저항에 의해 정해지는 어떤 속도로 금속내로 스며들어가서 결국 자기장 압력은 내부 압력과 평형을 이루게 되므로 정미 힘(net force)이 0으로 감소된다. 그러므로 효과적인 성형을 하기 위해서는 가공물 내로 침투하는 자기장의 침투가

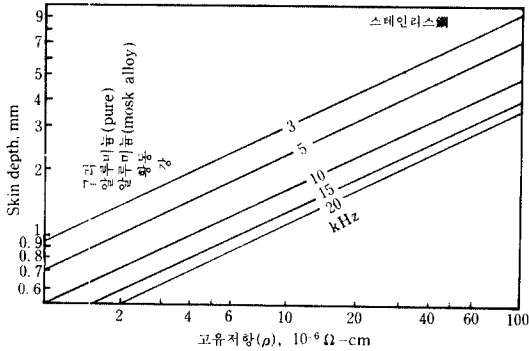


그림 5 주파수에 대한 가공물의 고유저항과 skin depth의 관계

skin depth라는 얇은 층에 한정되므로 짧은 펄스(100~200μsec)가 사용되어야 한다. 따라서 재료의 벽두께와 skin depth를 비교함으로써 전자기 성형의 적합여부를 결정할 수 있다. 그림 5는 재료의 고유저항과 skin depth 사이의 관계를 나타낸 것이다. skin depth δ는 다음 식으로 표현된다.

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu\pi f}} \quad (4)$$

여기서 ρ와 μ는 재료의 고유저항과 투자율이고 f는 전류의 주파수이다. 일반적으로 skin depth가 재료의 벽두께보다 작아지도록 주파수를 선택해야 한다.

축전기에 저장된 에너지는 성형코일을 포함한 회로계의 전기 저항에 의해 주울 열로 일부 소비되어 성형코일의 전기적 에너지로 옮겨가는 비율이 감소한다. 발생하는 전자기 에너지는, 성형코일의 인덕턴스와 그 외의 구성요소의 인덕턴스로 분배되므로, 성형에 유효한 전자기 에너지를 높이기 위해서는 성형코일보다 성형코일 이외의 인덕턴스를 가능한 작게 하여 성형코일에 에너지를 집중시키는 것이 필요하다. 이를 위해 축전기, 스위치 또 이들을 접속하는 도선의 배선의 인덕턴스를 가능한 작게 하는 것이 좋다. 또한 전자기 에너지를 효과적으로 이용하기 위해서는, 성형코일과 가공물과의 간극(air gap)을 작게 하여 상호유도 계수

를 크게 하고 고유저항이 작은 재료를 사용하는게 좋다. 가공물의 고유저항은 15μΩcm 이하인 것이 바람직하고 또 가공물은 연속적으로 전류가 흐를 수 있도록 해야 한다. 예로, 가공물에 길이 방향의 흠이 존재하면, 전류 흐름이 방해되어 자기장이 찌그러져서 성형력을 현저히 감소시키게 되어 성형이 불가능한 경우도 있다. 가공물의 특정부분에 국부적으로 강력한 압력을 작용하기 위해 3.3에서 후술할 자속집중기를 이용한다.

3. 장 치

3.1 전자기 성형기

여기서는 전술한 바와 같이 에너지 저장 탱크로서 축전기를 이용하는 표준형 전자기 성형기에 대해 기술한다. 이 성형기의 기본적 회로 구성은 그림 2(a)에 나타냈으며, 그 주요부분은 동력 공급 장치, 에너지 저장 축전기, 제어 회로, 축전기의 성형 코일로의 충격 방전을 위한 스위치 장치, 그리고 전달선과 버스로 구성된다. 축전기를 충전시키기 위하여, 동력 공급장치나 충전회로에서 교류전류를 직류 고전압 전류로 변환시킨다. 성형 코일로 에너지를 최대한으로 전달하기 위해서 동력 공급 장치에서의 내부 저항과 인덕턴스를 아주 낮게 해야 한다. 상용되는 표준형 성형기에서 축전기는 2~100 kJ의 정격 에너지 용량을 가지며, 용량이 12 kJ 이상인 경우는 2kJ을 단위로 용량을 확장하고 있다. 축전기 탱크는 3kJ로 정격되어 있지만, 보통 최대 2kJ로 작동시키는데 축전기 당 최대 피크 전류는 35kA이다. 이러한 작동 조건에서 기대 수명은 몇 백만 충·방전 사이클이다. 각 축전기는 펄스용으로 특별히 설계된 각각의 이그니트론(ignitron)이라는 스위치 장치를 통해 parallel-plate bus(또는 저 인덕턴스 동축 케이블)로 스위칭하고 있다. 축전기는 일정-전류 정류계를 통해 충전된다. 탱크에 저장된 에너지는 전압 계측회로로 정확히 측정할 수 있다. 그리고나서 미리 설정된 전압에

도달되고, 충전 사이클이 끝나면 스위치(이그니트론)는 자동적으로 또는 외부적인 펄스에 의해 축전기를 성형 코일로 방전시키도록 작동하게 된다. 에너지 저장 장치는 임펄스 동안 최대의 에너지가 성형 코일로 전달되도록 그 내부 언덕턴스가 아주 낮게 설계되어야 한다. 장비는 그 생산 속도에 맞춰 펄스 반복율을 갖도록 설계되어야 하는데, 작업을 자동화하여 반복율을 더 빨리 할 수 있지만 충전 방전회로의 특성과 시스템의 냉각 부품의 열 발산율에 의해 제한된다. 또한 장비에 사용되는 최대 전압은 절연체의 전압을 받으며, 대개는 10kV를 견딜 수 있게 만들지만, 작동시 전압은 장비 수명을 길게 하기 위해 최대 약 8kV 수준으로 한다. 통상 작업시 작동 전압 수준을 수시로 바꿀 필요가 있으므로 제어회로를 내장시킨다.

3.2 성형코일

성형코일은 가공물 표면에 순간적으로 고강도 자기장을 생성시키는 것이다. 이 성형코일의 설계는 전자기 성형의 가장 중요한 문제점 중의 하나이다. 고효율의 성형을 위해 순간 고압을 발생시키기 위한 성형코일 설계의 각종의 요인을 고려한 완전한 설계 이론은 확립되지 않았지만 일반적인 고려인자는 치수형상, 전기적 특성 및 기계적 특성이다.

(1) 치수형상

치수형상은 가공의 종류와 가공물의 크기에 의해 결정된다. 이 경우, 가공물과 성형코일과의 간극은 성형효율의 관점에서는 좁을수록 좋지만 고전압 대전류에 대한 절연내압이나 가공물의 취급상(넣고 꺼집어냄)의 편의를 고려하여 일반적으로 0.64~0.76mm 정도가 적당한 값이다.

(2) 전기적 특성

코일재료는 충격 대전류에 기의한 과대한 저항손실에 의해 효율 저하와 온도상승에 의한 손상을 낮추기 위해 그 고유저항이 $30\mu\Omega\text{cm}$ 이하인 금속으로 한정된다. 또한, 성형코일의 발열에 대해너는 수냉이나 공냉법이 고려된다.

예로, 코일도체를 관으로 하여 냉각수를 순환시키는 방법도 한 예이다. 또, 코일은 발생하는 자계의 지속시간과의 관계나 급격한 방전에 의한 콘덴서의 손상을 방지하기 위해 적당한 크기의 인덕턴스를 가져야 한다.

(3) 기계적 특성

기계적 특성은 성형코일 설계에서 가장 중요한 문제이다. 성형시 가공물에 작용하는 충격력의 반작용으로 성형코일에는 충격력이 작용한다. 이러한 충격력을 견디면서 안정성을 유지하기 위하여 성형코일은 충분한 기계적 강도와 질량을 가질 필요가 있다.

따라서 코일 도체는 기계적 강도가 크고 전기저항이 적은 베릴륨동 등을 사용하는 경우가 많지만, 이것을 수지나 강화 플라스틱으로 보강, 절연한 성형코일이 제작되고 있다. 또 성형실험이나 소량 생산을 행하는 경우에는 이상과 같은 보강된 코일 이외에 와이어나 케이블 등을 간단히 감아 만든 1회용 코일을 이용하기도 한다. 대개의 경우 성형코일은 교환 가능한 자속 집중기와 함께 이용하는 경우가 많은데 이에 대해 3.3절에서 설명하겠다.

(4) 성형코일의 종류

전자기 성형에 이용되는 가장 기본적인 코일의 형태는 솔레노이드 형의 압축 코일과 팽창 코일(그림 6(a), (b)) 및 평판형 코일(그림 6(c))이다.

(가) 압축 코일

압축코일은 그림 6(a)처럼 가공물의 외측에서 반경 내측 방향으로 가공물을 변형시키는데 사용된다. 헬리컬이나 웨이퍼(wafer) 형태로 제작되는데 특수한 형태나 자속집중기의 이용을 고려하여 일반적 형태로 설계된다. 그 용도는 주로 직경 3mm~610mm 범위의 원판 형태 가공물을 대상으로 하며, 구조물 결합, 밀봉과 결합(sealing, joining), 금속-세라믹 결합, 스퀘이징, 관 형상 단면의 감소 등에 사용된다.

(나) 팽창 코일

이것은 그림 6(b)처럼 가공물의 내측에 삽입되어 반경 외측 방향으로 가공물을 팽창시키는

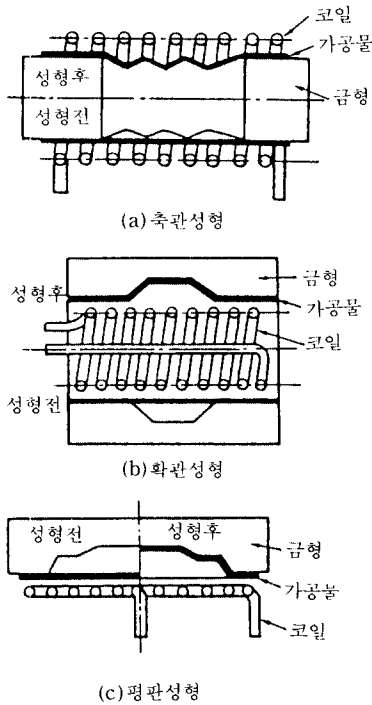


그림 6 성형 코일의 종류 및 성형 양식

데 사용된다. 압축코일처럼 이들은 응용에 따라 한번 또는 여러번 감긴 헬리컬 형태로 만든다. 팽창코일 역시 자속집중기를 이용하여 사용할 수 있다. 팽창코일은 직경 38~1820 mm의 관부품들을 벌징 및 플랜징시키는 데 이용해 왔다.

(다) 평판 코일 (flat coil or pancake coil)

평판코일은 가공물의 아래나 위에 위치하여 스파이럴 형태로 감겨져 있다(그림 6(c)). 때로는 보다 강력한 성형력을 내도록 2중 스파이럴로 감긴 코일을 사용하기도 한다. 평판형 코일에서는 그 중심부에 자기장이 작용하지 않는 영역(dead area)이 생기는데 그 영역의 크기는 그 설계조건에 따라 다르다. 평판코일은 다이와 함께 사용하여 평판의 가공물을 성형(coining, blanking, dimpling)하는데, 또한 아주 큰 부품에서 바람직하지 않은 국부 변형을 교정하는데 사용되어 왔다.

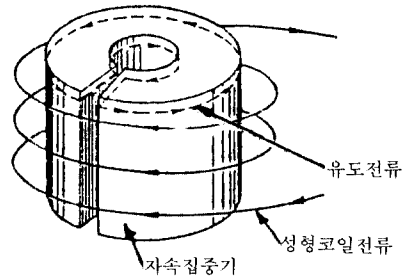


그림 7 자속 집중기의 원리

3.3 치 구

(1) 자속 집중기

자속집중기란 성형코일과 가공물 사이에 놓여져 성형코일로부터 에너지를 받아 유도작용에 의해 가공물로 전달하는 에너지 전달매체이다. 그림 7은 자속집중기의 원리를 나타낸다.

즉, 그림의 상태에서 성형코일에 전류를 흘리면 자속집중기의 외측표면에 성형코일의 전류와 반대방향으로 유도전류가 생기고, 이 유도전류는 자속집중기에 미리 가공해둔 홈(slit)에 의해 그 내측표면으로 계속 흐르게 된다. 그림에 도시한 것처럼 내측표면의 유도전류 역시 성형코일의 전류와 반대방향이다. 이 유도전류에 의해 자속집중기와 가공물 사이의 간극에 과도 자기장이 형성되고 가공물 표면에 또 다른 유도 전류가 생겨 성형이 이루어지므로 성형코일과 자속집중기의 전기적 결합상태를 하나의 코일로 생각할 수 있다. 즉 자속집중기를 이용하여 성형코일과 거의가 자속집중기로 지지되어, 자속집중기가 없는 경우에 비해 성형코일에 미치는 힘은 극히 작게 된다. 자속집중기의 설계에 대해서는 성형코일과 마찬가지로 세심한 주의가 필요한데 그 형상을 가공물의 형상에 적합하게 제작해야 한다. 또한 성형코일과의 전기적 결합상태가 좋아야 하므로 전기적 특성이 좋고(고유저항 $15\mu\Omega\text{cm}$ 이하), 성형 반력을 견딜 수 있도록 기계적 강도가 좋은 재료가 선택돼야 한다. 보통은 베릴륨동이나 경화 알루미늄 합금을 사용한다. 유도전류는 표피효과에 의해 자속집중기 내측면에는 그

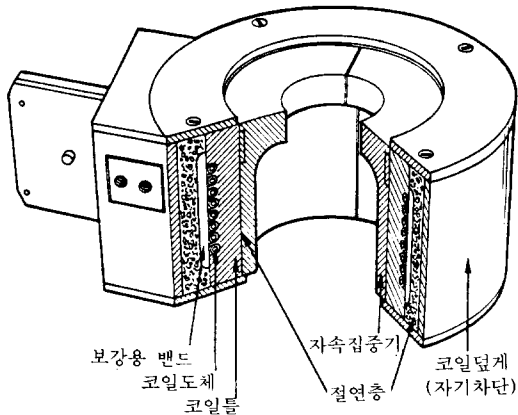


그림 8 교환 가능한 자속 집중기를 갖는 범용 압축코일의 구조

형에 따른 자력선의 분포를 형성한다. 따라서 자속집중기에 단상의 돌기를 만들어 주어 필요한 장소에 국부적인 성형력을 집중시키는 것이 가능하다. 자속집중기의 제작은 성형코일의 제작에 비해 아주 용이하며, 한 개의 성형코일로 자속집중기를 바꾸어가며 각종 치수의 가공물을 성형할 수 있다. 참고로 실용적인 성형코일의 한 예로서 교환 가능한 자속집중기를 가지는 범용 압축코일의 구조를 그림 8에 나타냈다.

이상의 자속집중기의 사용용도 및 목적을 정리하면 다음과 같다.

(가) 성형코일이 받는 힘을 대신 받아 코일의 손상을 방지하며 제작이 어렵고 값비싼 성형코일을 영구적으로 사용할 수 있게 한다.

(나) 필요한 부분에 자속을 집중시켜 원하는 모양을 성형할 수 있게 하며 성형효율을 향상시킨다.

(다) 자속집중기를 교환하는 것에 의해 치수에 따라 성형코일을 마련하지 않고도 다양한 치수의 피가공물을 성형할 수 있다.

(2) 금형

자유 성형만으로는 성형이 불가능한 특수한 형상의 부품은 외측 또는 내측의 금형을 이용하여 성형한다. 생산부품이 많지 않거나 발생

충격 압력이 낮은 경우는 알루미늄이나 황동을 사용할 수 있지만, 대량생산이고 높은 충격력이 필요할 때는 다이는 열처리하여 경화된 강으로 제작하고 표면처리가 필요하면 폴리싱해야 한다. 또한 복잡한 형상을 기계 가공하는데 요구되는 높은 비용을 감소시키기 위해 충격에 견딜 수 있고 주조 가능한 플라스틱을 금형의 라이너(덧쇠, 받침판)으로 사용한다. 또한 정밀을 요하는 부품 생산시 스프링 백 효과를 고려하여 설계할 필요가 있다.

4. 측정 장치 및 방법

가공물의 변형거동 및 성형기구를 밝히기 위해 측정해야할 실험값은 시간에 따른 가공물의 변위, 성형코일에 흐르는 충격 전류, 그리고 가공물에 작용하는 힘 즉 전자기 압력이다. 전자기 성형에서 가공물은 충격하중을 받아 극히 짧은 시간 이내에 성형이 끝나버리므로 그 변형거동은 정확히 측정하는 것은 상당히 어렵지만, 전기적 또는 광학적인 몇 가지 측정 방법이 시도되고 있다. 그림 9는 가공물의 변위, 성형코일 전류와 전자기 압력을 동시에 측정하기 위한 실험장치도이다.

(1) 가공물의 변위 $(r(t))$ 측정법

시간에 따른 가공물의 변위 측정법은 그 성형양식에 따라 다르며 표 1의 방법들이 많이 이용되고 있다.

(가) 침 접촉법

침 접촉법은 모든 성형 양식에 적용시킬 수

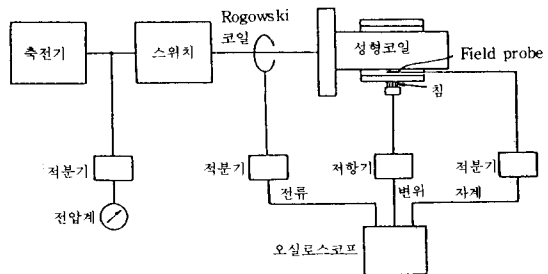


그림 9 실험 장치도

표 1 변위 측정 방법

코일형식	성형양식	측정방법
솔레노이드형 코일	축관 성형	고속도 카메라 침 접촉
	확관 성형	고속도 카메라 침 접촉
평판형 코일	평판 성형	침 접촉 광전 소자

있어 가장 널리 이용되고 있는데 주로 확관 성형에 많이 이용되고 있다. 그림 10은 침 접촉법의 원리를 나타낸 것인데, 글래스 섬유로 된 insert에 구멍을 내고 그 속에서 침이 미끄러지도록 배열한다. 각각의 침은 변형시에 관(가공물)과 접촉하면 측정회로의 저항 변화로 인해 오실로스코프상에 시간에 대한 전압 변화 파형이 계단 형태로 그려지게 된다. 그림 11은 침 접촉법에 의해 얻어진 파형의 예인데, 시간의 원점을 자계가 생기기 시작할 때 즉 성형코일에 전류가 흐르기 시작하는 시각에 둔다. 여기서 미리 침과의 거리를 정하여 두면, 전압 변화와 시간과의 관계를 관의 반경 방향 변위와 시간과의 관계로 대치하는 것이 가능하다.

침 접촉법은 다른 방법에 비해 측정장치가 간단하고 염가로 제작할 수 있는 이점이 있지만, 침과 침과의 간극을 精度있게 측정하는 것

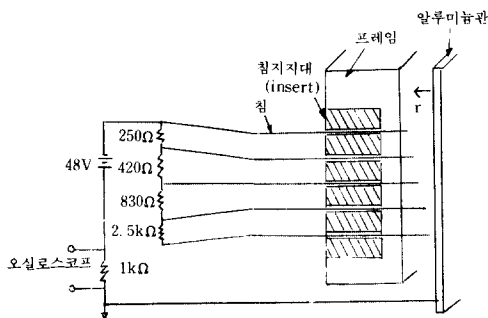


그림 10 침 접촉법의 원리

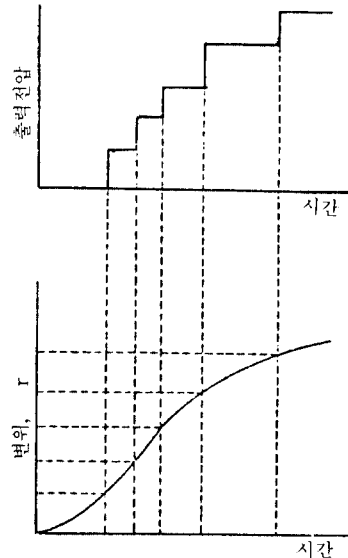


그림 11 시간에 따른 전압변화의 변위의 관계

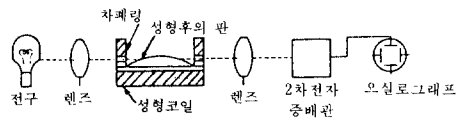
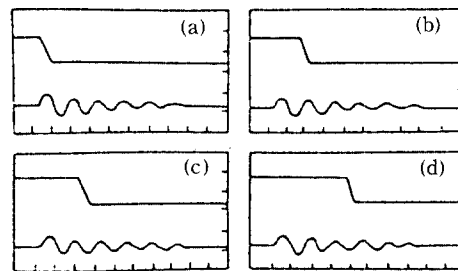


그림 12 광전 소자법에 의한 변위 측정법

과 침 상호간의 영향 등에 세심한 주의를 기울여야 한다.

(나) 광전 소자법

이 방법은 주로 평판 성형시의 변형거동을 측정하는 방법으로 이용된다. 그림 12는 그 측



횡축: 50μs/div
 콘덴서충전에너지: 0.88KJ
 격자의 위치: (a) 0.5mm, (b) 2mm,
 (c) 4mm, (d) 6mm

그림 13 광전 소자법에 의한 측정 결과의 예

정장치의 배치를 나타낸 것인데, 차폐링에 설치된 격자를 통한 빛이 금속판의 변형에 의해 차단되어 2차 전자 증폭관에 전기 신호의 변화를 나타내며 이것을 오실로 그래프로 포착한다. 격자의 위치를 바꾸는 것에 의해 판재의 변형경로가 구해진다. 빛을 이용한 측정은, 전기적인 잡음 장애가 없는 것이 장점이다. 그림 13에 이 방법에 의한 측정결과를 나타냈다. 그림 중 위의 곡선은 광전자 증폭관의 출력을, 아래 그림은 성형코일에 흐르는 전류를 표시한다.

(2) 자기 압력 $[p(t)]$ 측정법

가공물에 작용하는 압력(자기 압력)은 성형코일과 가공물 사이의 자속 밀도를 측정하여 구한다. 즉 성형코일과 가공물 사이에 아주 작은 단면적을 갖는 search 코일을 넣어 자계의 변동에 의해 search 코일에 유기되는 전압 v 를 측정하면 임의시간 t 에서 자계 H 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$H = \frac{1}{\mu_0 n S} \int_0^t v dt \quad (\text{A/m}) \quad (5)$$

여기서 μ_0 는 진공 투자율이다.

이러한 원리로, 실제로는 search 코일의 유기 전압 v 를 RC 적분회로를 통과시키고, 그 출력 전압을 오실로스코프에서 관찰하면 자계 H 가 구해진다. 그리고 성형코일과 가공물 사이의 공간에서의 자계가 가지는 단위 체적당 에너지 E 는 다음 식으로 주어지는데, 차원을 분석하면 E 가 바로 자기 압력임을 알 수 있다.

$$E = \frac{\mu_0 H^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (\text{J/m}^3 \text{ 즉 } \text{N/m}^2) \quad (6)$$

그림 14에 자속 밀도와 자기 압력의 전형적인 진동 모양을 나타낸다.

(3) 성형 코일 전류 $[i(t)]$ 측정

성형 코일에 흐르는 전류는 Rogowski 코일로서 오실로스코프상에 그 적분된 신호를 측정하여 구한다.

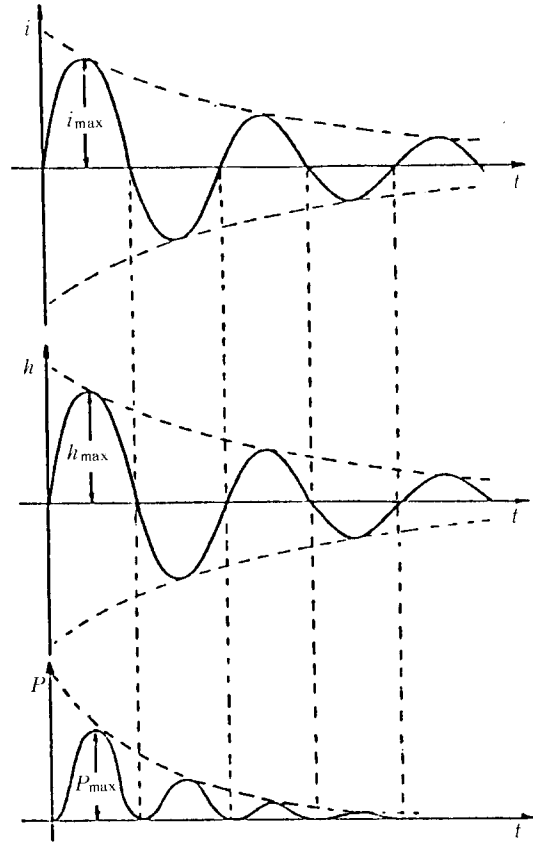


그림 14 코일전류, 코일과 가공물 사이의 자기장, 그리고 자기 압력의 전형적인 진동파형

(4) 충전 회로의 전압의 측정

방전되기 전의 축전기 뱅크의 전압은 ohmic divider를 이용한 저장 가능 형태의 진공관 전압계(storage type vacuum tube voltmeter)로서 측정한다.

5. 전자기 성형의 특징

전자기 성형의 공정상 현저한 특징은 다음과 같다.

(1) 성형은 자기장이라는 매체를 통해 압력이 가공물에 직접 가해져 어떠한 물리적 접촉없이 작업이 수행되므로 마찰이 없고 따라서 윤활제

가 필요없다. 그러므로 마무리 작업후에 성형이나 조립작업을 할 수 있다. 또한 자기장은 비전도체를 통과하기 때문에 비금속 피복이나 용기를 통하여 성형할 수 있다.

(2) 전기 전도도가 높은 가공물(예로 구리, 알루미늄, 황동, 저탄소강)일수록 큰 전류가 유도되어 큰 힘이 발생하므로 성형이 용이하다. 실용상 가공물의 고유저항(resistivity)은 $15\mu\Omega\text{cm}$ 이하이어야 한다. 스테인레스 강처럼 전기 전도성이 낮은 재료는 알루미늄이나 구리 슬리브(sleeve)같은 고 전도성 드라이버(driver)를 이용하여 성형할 수 있다.

(3) 가공물은 링, 관, 평편한 형태로 폐회로를 형성하여 유도전류가 연속적으로 흐를 수 있도록 해야 한다. 예를 들어 원통형 가공물의 경우, 성형될 영역내에 작은 구멍이 뚫려 있으면 전류의 흐름이 크게 방해받지 않기 때문에 성형에 큰 영향을 미치지 않는다. 그러나 길이 방향의 홈이 존재하면 전류흐름이 방해되어 성형력이 감소하고 고르지 않게 되어 성형이 불가능할 수도 있다.

(4) 성형의 대부분이 전기 펄스가 끝난 후에 일어난다. 즉, 압력 펄스 중 재료는 급속히 가속되어 펄스 동안 짧은 거리를 움직여 큰 운동 에너지를 갖게 되고, 차후에는 이 운동에너지로서 가공물이 성형된다.

(5) 조립 작업에 있어서 재료의 중량비가 상대적 강도나 탄성 특성보다 훨씬 중요하다. 또한 작업중 어떠한 정적인 힘도 이 공정에 관계하지 않으므로 비교적 가벼운 구조로 다이를 지지할 수 있다.

(6) 자기 충격의 타이밍을 10sec의 정확도로 제어할 수 있으며, 장비는 분당 수백번의 반복 속도로 작동하도록 만들 수 있다. 압력 충격의 크기는 매우 정확히 제어할 수 있다.

(7) 자기 충격에 의한 압력은 재래식 성형 작업에서의 평균 압력에 비해 훨씬 크다. 그러나 최고 압력은 코일 재료의 강도에 의해 제한되며, 따라서 재료는 전기 전도도는 물론 기계적 강도에 의해 선택되어야 한다. 그러므로, 허용

전자기 성형시 가능한 최고 압력은 보통 전단, 펀칭, 업세팅 작업에서 사용되는 압력보다 훨씬 작을 수밖에 없다.

(8) 자기장은 압축된 가스와 같이 작용한다. 즉 가공물과 성형 코일 사이의 간격 변화에 비교적 무관한 균일한 압력이 얻어진다. 따라서 관 모양 재료의 스웨이징과 환관 성형에서는 스피닝이나 압연에서와 같은 어떠한 토크도 가해하지 않는다.

(9) 자기 충격의 유효 길이는 보통 $10\sim 30\mu\text{s}$ 정도이다. 그 압력은 50ksi의 범위까지 이룰 수 있고, 저장 에너지의 이용 효율은 40%까지 얻을 수 있지만 전자기 성형에서는 보통 5~15%이다.

6. 응용

전자기 성형의 응용은 편의상 보통 그 성형 형태에 따라 분류하게 된다. 전자기 성형의 형태는 성형코일의 형태 및 코일과 가공물과의 위치관계에 따라 기본적으로 축관성형, 환관성형과 평판성형의 세 가지 형태로 나뉘어진다. 성형 가능한 크기는 장비의 에너지 보유능력($0\sim 240\text{kJ}$)에 따라 다르나 원관의 경우 지름 $2.5\sim 1.830\text{mm}$ 이고 두께는 6mm 이하이며 보통 얇은 관이나 판재의 성형에 이용된다.

전자기 성형은 금속의 성형, 체결, 조립 등의 작업에 이용되어 자동차 산업, 항공 산업, 전기 산업과 병기 산업 등에서 많이 이용되고 있다. 이들 성형형태 및 실용화의 예를 다음 세 가지 기본 형태로 나누어 나타낸다.

(1) 축관 성형

압축 성형은 슬레노이드 형 코일내에 가공물을 두어 작업을 수행하는 것이다. 그때 자기력은 내측으로 급속하게 전달된다. 이 방법은 주로 가공물을 다른 부품과 결합하도록 하는 조립 작업에 주로 응용되고 있다. 앞에서 언급한 대로 가공물과 코일 사이의 간극이 되도록 작게 하는 것이 좋고, 코일 내측에 자속 집중기를 두어 성형하기로 한다.

이 성형법은 금속관의 내측에 들어있는 금형에 의한 성형이나 전단, 관과 관 또는 관과 축과의 접합 그리고 관 끝의 관봉(sealing) 등에 이용한다.

실용화의 예로서는, 자동차 관계 분야에서는 유니버설 조인트의 요크의 구동축으로의 부착, 연료 펌프 카바의 부착, 유리 섬유제의 전압 휴즈 조립, 모터회전자의 조립, 반사판의 성형에 이용되고 있다. 이외에 치차와 축의 접합, 핵 연료 폐기통의 밀봉, 미사일 부품과 포탄의 조립 등 넓은 범위의 산업 분야에서 다종 다양한 성형이 행해지고 있다.

(2) 환관 성형

환관 성형은 슬레노이드 코일 외측에 가공물을 두어 작업을 수행하는 것이다. 그때 자기력이 외측으로 가공물을 밀어내게 된다. 이 방법은 주로 형 성형, 전단, 관의 구멍 뚫기, 구멍 확대 가공과 플랜지 가공 등에 이용된다.

실용화의 예로서는 항공기의 엔진 덮개(nacelles)의 성형, 다관식 열 교환기의 관과 관관과의 접합, 복사기의 이승, 로올러의 제조와 플랜지 가공 등에 이용되고 있으며, 이와 알루미늄 합금관의 환관과 관벽의 구멍 뚫기 등을 동시에 행한 예가 있으며, 복합적인 성형 가공이 용이하다.

(3) 평판 성형

평판 성형에서는 스파이럴 형태로 감긴 평판 코일을 이용하며 그 위에 가공물이 놓인다. 코일을 통해 전기 펄스가 공급되면 자기력이 가공물에 작용하고 밖에 놓여진 금형에 의해 성형을 하는 것이다. 이 방법에 의해 디이프 드로잉, 전단, 엠보싱 성형 등 넓은 범위의 관재 성형을 행하는 것이 가능하다.

7. 연구방향

전자기 성형법은 금속의 고속도 성형을 응용한 접합, 체결 및 조립 등에 많이 응용되고 있는데, 앞으로는 기존의 방법으로는 성형 및 접합이 어려운 신소재 성형 및 접합 등에 많은

연구 및 효과적인 활용이 기대된다.

그러나 현재 국내 연구 실적인 전무한 실정 이므로 성형 기술의 확보를 위해서 다음과 같은 연구가 필요하리라 생각된다.

- (1) 성형 기구를 명확히 규정하기 위해 성형 프로세스를 해석할 수 있는 software의 개발
- (2) 성형 조건 수립 및 효율 향상을 위해 성형효율에 미치는 제인자의 규명
- (3) 성형 장비의 운용 조건을 결정하기 위한 성형 장비 최적 설계조건 수립
- (4) 실험치를 정확히 측정할 수 있는 측정회로 제작 및 측정 방법 연구
- (5) 가공물의 특성에 따른 재료의 성형 물성치 확보
- (6) 성형코일 및 자속집중기 형상설계법 개발 이외에 이 성형법과 관련된 기초 연구로서
- (7) 고속 성형에서의 재료의 고변형 속도 의존성 및 성형한계를 규명하기 위한 재료의 성형성 연구
- (8) 재료내의 충격파의 거동을 측정하기 위한 실험장치 개발을 들 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) Bruno, E.J., 1968, "High-Velocity Forming of Metals", ASTM, p. 155.
- (2) Dallas, D.B., 1976, "Tool and Manufacturing Engineers Handbook", 3rd ed. Society of Manufacturing Engineers, N.Y. McGraw-Hill, p. 17-1.
- (3) 鈴木秀雄, 根岸秀明, 1973, 塑性と加工, 日本塑性加工學會, Vol. 14, No. 152, p. 722.
- (4) Jansen, H., 1968, IEEE Trans. on Ind. and General Appl., Vol. IGA-4, No. 4, p. 428.
- (5) 鈴木秀雄, 1986, 金屬(日), Vol. 56, No. 7, p. 56.
- (6) 鈴木秀雄, 根岸秀, 新井洋二, 指宿力, 1973, 日本機械學會論文集, Vol. 39, No. 317, p. 432.
- (7) Magneform operation manual, Maxwell Lab., Inc.