

전자기 성형의 원리와 응용



이 동 녕 (서울대 금속공학과 교수)

- '61. 2 서울대 공과대학 금속공학과 졸업
- '66. 2 서울대 대학원 금속과 졸업(석사)
- '67. 12 Univ. of Washington 금속공학과(석사)
- '71. 1 Vanderbilt Univ. 재료과학 및 공학(박사)
- '66. 9 Univ. of Washington, Research Assistant
- '68. 2 Vanderbilt Univ. Research Fellow
- '70. 12 한국과학기술연구소 연구원
- '74. 10 서울대학교 금속공학과 조교수
- '79. 4 서울대학교 금속공학과 부교수
- '84. 4 서울대학교 금속공학과 교수

1. 서 론

전자기 성형은 자기 펄스성형이라고도 하는데 강한 전자기장을 직접 응용하여 금속을 성형하는 고속 성형법의 일종이다. 성형코일에 펄스를 통과시켜 기계적 접촉없이 금속을 성형한다. 이 전자기 성형법은 자동차 산업, 장치 산업, 항공 산업, 전기 산업, 원자력 산업, 방위 산업 등에서 관과 판, 관과 다른 부품을 한 단계에서 조립하는데 주로 사용되며 관의 세이핑과 판재의 얇은 성형에도 사용된다. 큰 전기 전도도를 가진 금속은 직접 성형할 수 있지만 전기전도도가 좋지 않은 금속도 전기전도도가 좋은 드라이버(driver)의 도움으로 성형할 수 있다.

이 성형법의 기본은 미국 특허 2,976,907(1958)에 기술되어 있고 이 방법과 장치의 여러가지 관점에 대한 특허도 많다. 미국에서는 1960년 경 개발 및 실용화의 노력이 경주되어 산업적이나 이론적으로 많은 발전이 있었고 일본에서도 1970년 초반에 연구가 시작되어 현재 활발히 연구되고 있다. 우리나라는 국방과학연구소의 지원에 의하여 1988년 6월 서울대학교에서 처음으로 연구가 시작되었으며 1990년 8월 이 분야의 연구로 첫 박사학위 취득자가 생기기도 하였다. 현재 이 성형법을 활용하는 산업체도 있으나 아직은 요람기에 있는 실정이다.

여기에 전자기 성형법의 원리, 특성, 장치, 응용 등에 대하여 간단히 소개하고자 한다.

2. 원 리

자기장으로 인하여 전류가 흐르는 도체가 받는

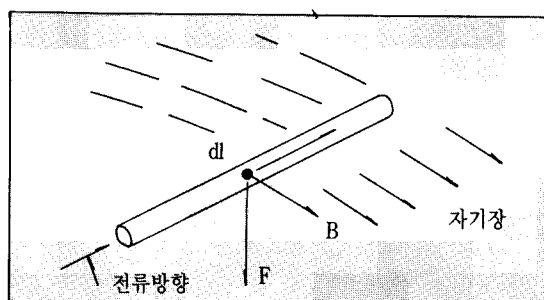


그림 1) 자기장 속에서 전류가 흐르는 도체에 작용하는 힘

힘(로렌즈 힘)은 다음식으로 표시된다(그림 1).

$$F = i(dl \times B) \quad (1)$$

여기서 F는 힘, i는 도체에 흐르는 전류, dl은 도체의 단위길이 벡터, B는 자속밀도(벡터)이다. 따라서 힘 F는 dl과 B로 정의되는 면에 수직이다.

전자기 성형에서 이 힘이 성형력이 되는데 큰 힘을 얻기 위하여 도체에 흐르는 전류와 자속밀도가 커야함을 알 수 있다. 성형하고자 하는 물체에 자장과 전류를 부여하기 위한 방법을 이해하기 위하여 Faraday의 법칙을 고려한다. 임의의 폐회로에서 자속이 시간에 따라 변화하면 이 폐회로에 기전력이 유도되는데 이 회로내의 유도기전력은 그 회로를 지나는 자속의 시간의 변화율과 같고 방향이 반대이다. 이를 Faraday의 법칙이라고 하는데 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\varepsilon = -d\phi / dt \quad (2)$$

여기서 ε 는 유도기전력, ϕ 는 자속이고 t는 시간이다. 식(2)의 “-”부호는 유도기전력과 자속의 시간 변화율의 부호가 반대임을 뜻한다. 솔레노이드(성형코일)안에 전류가 갑자기 흐르면 시간에 따라 변화하는 자장이 생긴다(전이 자장). 이 전이 자장으로 인하여 주위에 있는 가공하고자 하는 물체(도체)에 Faraday의 법칙에 의하여 전류가 흐르게 되며 이 전류가 식(1)의 전류 i이다. 이 전류와 자장에 의하여 물체에 힘이 미친다. 이 힘을 이용하여 물체를 성형하는 것이 전자기 성

형이다.

전자기 성형기의 기본회로를 그림 2에 나타내었다. 전자기 성형기는 코일을 통하여 축전기 뱅크를 방전시켜 높은 전류가 흐르고 이 때문에 높은 자기장이 발생한다. 기계를 작동할 때는 축전기를 미리 정한 전압에까지 천천히 충전(보통 2~6초)시킨 다음 적당한 스위치로 작동코일 통하여 방전시킨다. 방전은 보통 10~20 μ s 동안에 일어나기 때문에 매우 짧은 시간에 매우 높은 전류와 동력이 발생한다(그림 3). 그림 3에서 자기 압력 P가 전류 i의 2승에 비례함에 주목하라. 축전기의 전압은 8kV 정도이고 최대 방전전류는 축전기 뱅크의 크기에 따라 다르지만 대부분의 산업용 성형기는 100~400kV 정도이고 주기 T는 약 100 μ s이다. 그림 3에서 보는 바와 같이 전류(따라서 전압)은 요동하면서 급속히 감쇄한다. 이 방전전류로 인하여 그림 4에서와 같이 코일속에 자기장이 생긴다. 만일 코일 속에 그림 5에서와 같이 알루미늄 관 같은 전기 전도체를 넣으면 코일에 의하여 생긴 자기장으로 인하여 전도체에 유도전류가 생긴다. 이 유도전류 때문에 자장이 도체속을 침투하지 못하여 도체와 코일사이에 한정되어 자기장의 밀도가 증가한다.

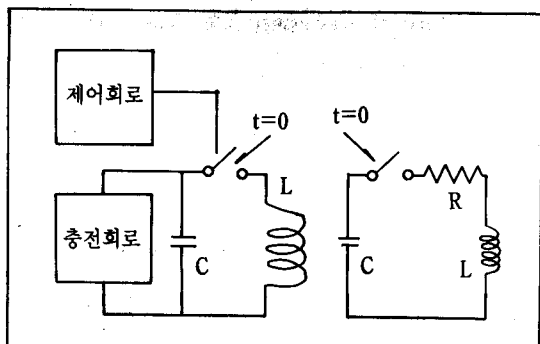


그림 2) 전자기 성형장치의 기본회로와 등가회로도. C는 에너지 저장축전기, L은 회로 인덕턴스, R은 회로저항

이 유도전류와 자기장 사이의 상호작용으로 도체에 압력이 작용한다(그림 1과 그림 5). 이 압력은 전류의 2승에 비례하기 때문에 그림 3에서와 같이 압력도 요동하면서 감쇄한다. 이 압력

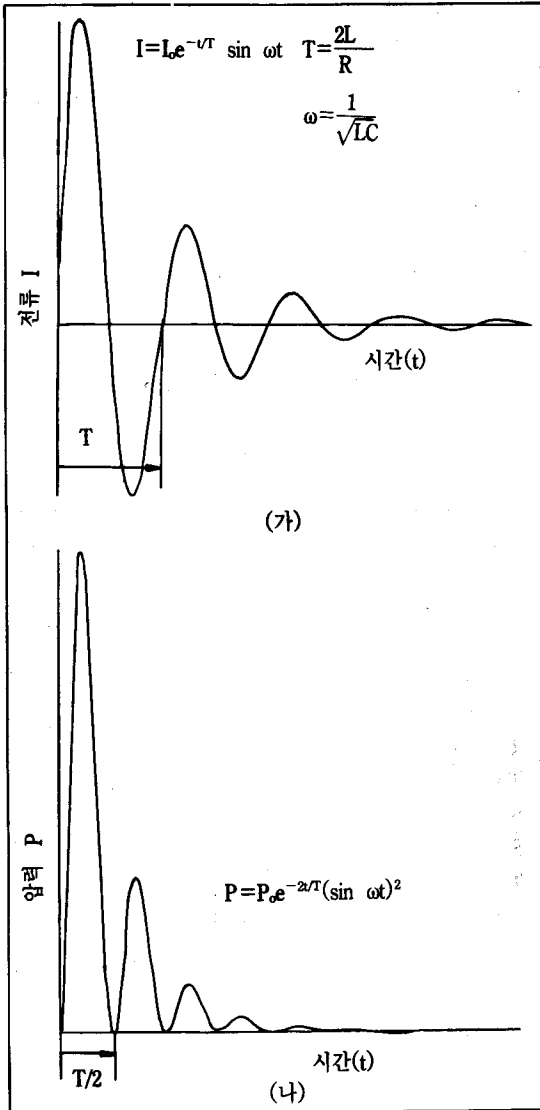


그림 3) (가) 전자기 성형 방전때의 전형적인 충전파형과 (나) 압력파형

펄스가 재료를 항복시킬 수 있을 정도로 크면 재료는 영구변형을 할 것이다.

실제로는 작업은도에서 금속이 완전한 도체(저항이 0인 도체)가 아니기 때문에 자기장이 금속관속으로 침투하게 되는데 그 정도는 금속의 비저항 표1에 의하여 결정된다. 짧은 펄스가 효율적이기 위하여서는 피가공재의 재료 표면에서의 얇은 층(표피깊이)에 국한 하여야 한다. 재료의 벽두께와 표피 깊이를 비교함으로써 전자기 성형의 적합

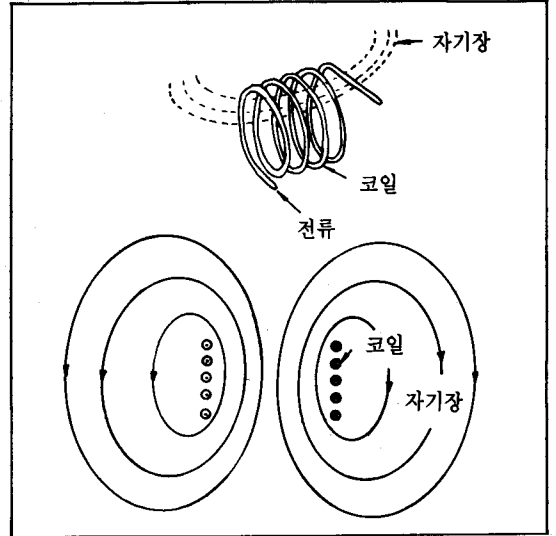


그림 4) 코일에 흐르는 전류로 인하여 생긴 자기장

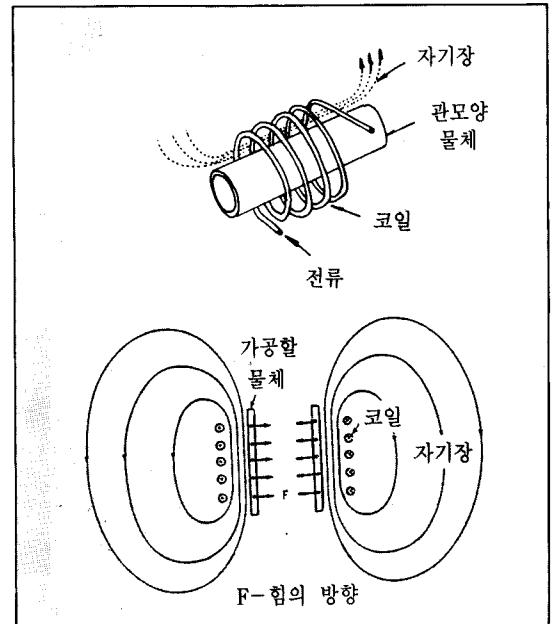


그림 5) 코일에 흐르는 전류로 자기장이 생겨 피가공물(도체)에 작용하는 힘의 방향

여부를 결정하는데 도움이 된다. 표피 깊이 δ 는 다음 식으로 표현된다.

$$\delta = [2\rho / (2\pi f\mu)]^{1/2} \quad (3)$$

여기서 ρ 는 비저항, μ 는 투자율, f 는 주파수이다.

표 1) 중요 공업 금속재료의 비저항 ρ (μ ohm cm)

재 료	ρ	재 료	ρ
Al		Mo	5.2
1100-0	2.9	Pt	10.7
2024-0	3.5	Ag	1.6
2024-T3	5.8	강	
2024-T6	4.5	10xx	12
2219-T37	6.2	11xx	14.3
2219-T62	5.7	13xx	17
3003-0	3.4	23xx	28.4
3003-H18	4.3	40xx	19
5052-ALL	4.9	41xx	22.3
6061-0	3.8	43xx	30
6061-T4	4.3	48xx	30
6061-T6	4.3	51xx	21
7075-T6	5.7	61xx	21
7178-T6	5.6	스테인리스 강	
Be	5.0	오스테나이트 계	69~79
Be-구리, Berylco 25	7.9	페라이트 계	60~67
황동		마르텐사이트 계	40~72
70%, 달금	6.2	Ta	12.4
80%, 달금	5.4	Th	18
납이 들어감	6.6	Sn	11.6
적, 85%, 달금	4.7	Sn-Pb-Sb 합금	25.6~28.7
황, 달금	6.4	Ti	
청동, 90%, 달금	3.9	공업용 순도	48~57
Cb	14.2	5Al-2.5Sn	157
Cu		6Al-4V	172
달금	1.72	8Al-1Mo-1V	199
경질	1.77	W	5.5
Au	2.35	V	25
Hf	35	연철	12
Pb	22	Zn	6.1
Mg		Zr과 그 합금	40~74
MIA	5		
AZ31B	9.2		
AZ61A	12.5		
AZ80A	14.5		

식(3)의 관계를 중요한 금속재료에 대하여 그림 6에 나타내었다. 성형될 재료의 벽두께는 표피깊이와 같거나 크도록 주파수를 선택하는 것이 보통이다. 이 법칙은 엄격하지 않고 자장의 상당부분이 재료속으로 확산해 들어가는 것이 허용될

수도 있고 표피두께가 벽두께보다 아주 큰 경우도 있다. 전자기 에너지를 효과적으로 이용하기 위해서는 성형코일과 피가공재의 간극을 작게하고 피가공재의 비저항이 $15m$ ohm-cm 이하인 것이 바람직하다.

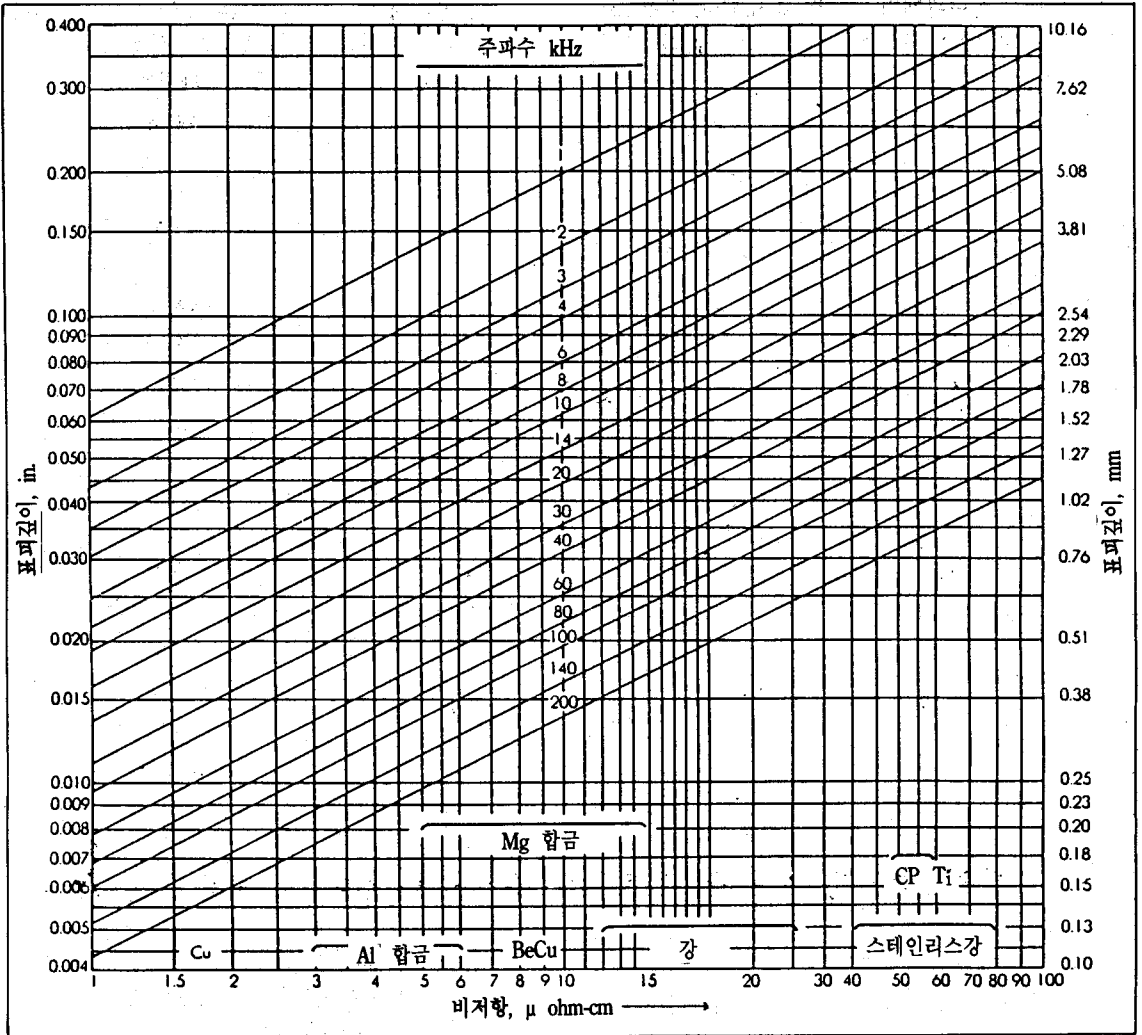


그림 6) 재료의 비저항과 표피깊이의 관계

3. 에너지 전달과 성형속도

$$\dot{U}_{max} = (Pt)^2 / (2m) \quad (4)$$

그림 3에서 보는 바와 같이 자기 또는 전류 임펄스의 연속 감쇄로 인하여 압력도 연속적인 감쇄형태로 나타난다. 첫번째 압력펄스는 뒤따르는 펄스보다 훨씬 크기 때문에 유용한 일을 한다. 자기 임펄스의 지속시간이 매우 짧기 때문에 요구되는 성형을 하기 위해서는 펄스기간동안 재료에 운동에너지를 부여할 수 있을 정도로 압력이 충분히 높아야 한다. 만일 재료가 구속되어 있지 않고 항복강도가 0이라면 재료가 전달될 수 있는 최대에너지는 재료가 받는 운동에너지와 같다.

여기서 P는 지속시간이 t인 하나의 펄스기간 동안의 평균압력이고 m은 재료의 단위 면적당 질량이다.

펄스기간동안 재료의 운동에 대한 저항때문에 펄스기간동안 전달되는 에너지의 양은 감소한다. 효율을 높이기 위해서는 최대압력이 펄스기간동안 재료의 정적항복강도를 능가하고 기타의 구속을 극복하는데 필요한 압력보다 최대압력이 여러배 더 커야 한다. 대부분의 전형적인 응용에서는 최대압력이 정적항복응력의 3~8배 정도이다. 결국

피가공물의 질량관계가 가장 중요하다. 다른 조건이 같다면 얇은 부품이 두꺼운 부품보다 성형하기 쉽다.

그림 7은 그림 8의 벽이 얇은 연질 알루미늄관의 전자기 성형에서의 재료의 압력, 속도, 변위 사이의 관계의 한 예를 보여준다. 재료가 현저히 움직이기 시작하기 전에 재료의 항복압력을 초과할 정도로 압력이 증가한다. 이 기간중 코일과 물체 사이의 간극에서 자기에너지가 증가한다. 물체가 움직이기 시작하면 자기장으로부터 에너지를 얻고 이 에너지는 급속히 움직이는 재료 속에 저장된 운동에너지로 변환한다. 이렇게 하여 재료 자체는 변형된다. 속도는 최대압력 뒤에 최대값에 도달한다. 펄스 전체를 통하여 전류손실로 인하여 약간의 전자기 에너지가 빼앗기고 이 에너지가 물체와 코일에서 열의 형태로 나타난다.

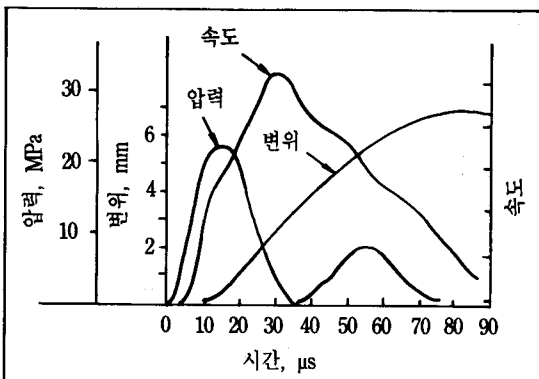


그림 7) 지름 50.8mm, 두께 1.524mm인 연질 알루미늄관의 전자기 성형에서의 압력, 속도, 변위 사이의 관계

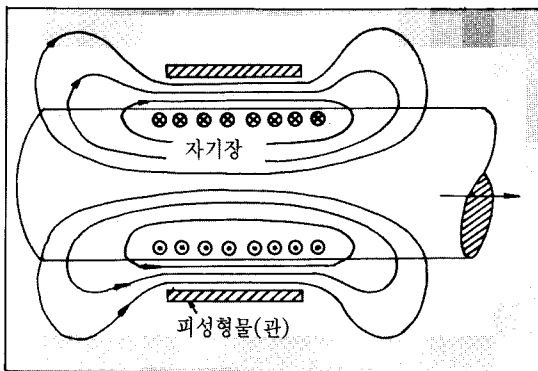


그림 8) 확관을 위한 코일과 관의 배열

그림 8의 관이 지름 50.8mm, 두께 1.524mm인 연질 알루미늄관이고 알루미늄의 항복강도가 100 MPa이라고 가정하면, 관을 소성확장변형 시키는데 필요한 압력은 식(5)을 이용하여 6.3 MPa로 계산된다.

$$P = 2\sigma h / D \tag{5}$$

여기서 P는 관의 벽면에 수직으로 작용하는 압력, σ 는 관의 원주방향으로 작용하는 응력, h는 관벽의 두께, D는 관의 지름이다. 만일 코일이 10 kHz의 방전주파수에서 8 MA/m의 자기 펄스를 발생시킨다면(이것이 전형적인 값이다). 그림 6 으로부터 표피깊이가 약 1mm이므로 관벽의 두께보다 작다. 8 MA/m의 자기 세기는, 식 (3)에 의하여 40 MPa의 압력에 대응한다. 이 압력은 근사적으로 25 μ s의 기간과 42 MPa의 최고압력을 가진 등가사각펄스로 대치할 수 있다. 등가압력 펄스란 실제의 감쇄사인펄스와 같은 보멘텀을 재료에 가할 펄스인데, 실제 펄스 모양을 적분하여 얻는다. 코일에 의하여 발생하는 42 MPa의 압력 중에서 35.7 MPa의 압력이 재료를 다이쪽으로 가속시키는데 이용된다.

재료의 최종속도는 다음 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$v = Pt / m \tag{6}$$

여기서 P는 압력, t는 펄스의 기간, m은 재료의 단위면적당 질량이다. 위의 예에서 $P=42 \times 10^6 \text{ Pa}$, $t=25 \times 10^{-6} \text{ s}$, $m=1.524 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2$ 이므로 $v=225 \text{ m/s}$ 가 얻어진다(AI의 비중은 2,700kg/m³이다). 그러므로 두께 1.524mm의 알루미늄 면적 1m²(4.1148 kg)에서 $0.5 \times 4.1148 \times 225^2 = 133782 \text{ J}$ 의 운동에너지가 성형에 사용될 수 있다. 이 때문에 재료가 다이와 부딪힐 때 감속되어 엄청나게 큰 압력이 발생한다. 만일 알루미늄 관이 0.25mm 이동한 후 정지하게 되면 평균 535 MPa($133782 \div 0.00025 = 535 \times 10^6$)의 압력을 내게 된다.

위의 계산은 간단한 경우의 근사값을 구하는데 도움이 되는 예이지만 복잡한 경우에는 유한요

소법을 이용한다. 전자기장과 동적변형에 대한 유한요소해석이 중요한 연구 분야가 되고 있다.

4. 전자기성형의 특징

(1) 자기장에 의하여 물체에 압력이 가하여지기 때문에 물리적 접촉 없이 성형을 할 수 있다. 자기장은 부도체를 통과하기 때문에 비금속 피복이나 컨테이너를 통하여 성형할 수 있다. 그리고 기계적 접촉이 없기 때문에 마찰이 없고 따라서 윤활제가 필요 없으며 금형자국이 없다. 그러므로 물체를 성형이나 조립작업을 하기 전에 표면 마무리를 할 수 있다.

(2) 이 성형법은 구리, 알루미늄, 황동, 저탄소강, 몰리브덴 등과 같은 어떠한 양도체($15\mu\text{ ohm cm}$ 이하인)에도 적용할 수 있다. 스테인리스강과 같이 작은 전기전도도를 가진 금속에 높은 자기압력을 가하기는 어렵지만 이런 재료도 자기 펄스에 잘 반응하는 알루미늄 중간재(driver라고 함) 뒤에 위치시켜 요구하는 모양으로 성형할 수 있다.

(3) 재래식 금속성형방법과는 달리 금속성형의 대부분이 압력 펄스가 끝난 후에 이루어진다. 압력 펄스 중 금속이 급속히 가속되어 큰 운동에너지를 얻고 이 운동에너지 때문에 재료가 실제로 성형된다. 그리고 조립체의 부품들 사이에 접촉이 매우 잘 이루어지고 다이의 모양대로 성형이 잘된다.

(4) 조립될 재료들의 질량의 비가 상대적 강도나 탄성 특성보다 훨씬 중요할 수 있다. 정적인 힘은 전자기 성형법에서는 아무런 관여를 하지 않기 때문에 비교적 얇은 구조물로 다이를 지지할 수 있다.

(5) 자기장은 압축된 가스와 아주 흡사한 거동을 한다. 재료와 성형코일 사이의 간격의 변화에 비교적 무관한 균일한 압력이 얻어진다. 관모양 재료의 스웨이징과 확관작업에서 아무런 토크가 작용하지 않는다.

(6) 자기장을 모든 피성형체의 윤곽에 맞는 꼴로 만들기가 쉽지 않다. 일반적으로 임의로 선택한 면적에 높은 압력을 가하면서 그 바로 인근 영역에 낮은 압력을 가하는 것이 불가능하다.

(7) 자기 펄스에 의하여 얻어지는 압력은 기계적

성형에서의 평균압력에 비하여 매우 높을 수 있지만, 최대압력은 코일 재료의 강도에 의하여 제한되며, 코일 재료는 기계적 강도는 물론 전기전도도를 고려하여 선택하여야 한다. 그러므로 허용최대전력은 전단, 편칭, 업세팅 작업에서 보통 사용되는 압력보다 훨씬 작다.

(8) 전자기성형법에서 반복속도는 움직이는 부품의 기계적 관성에 의하여 제한을 받지 않는다. 자기 펄스의 시간조정을 10^{-6} 초의 정확도로 제어할 수 있으며 기계를 1분당 수천회의 반복속도로 작동할 수 있도록 만들 수 있다. 자기 펄스의 크기는 전자적으로 매우 정확히 제어할 수 있다.

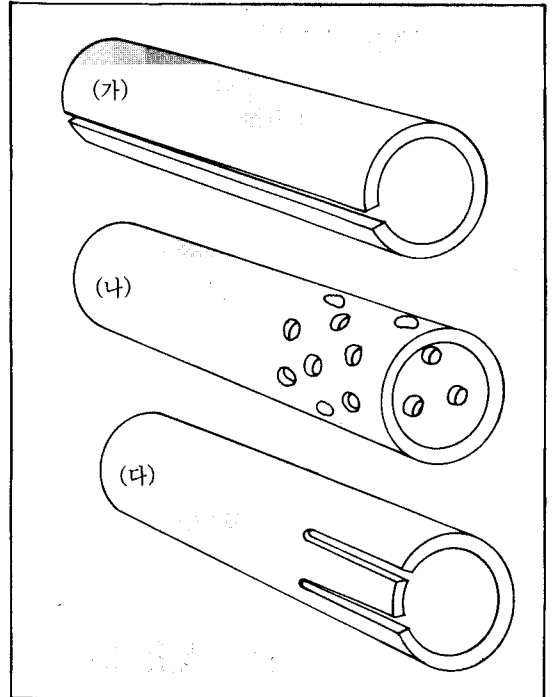


그림 9) 전자기성형에 영향을 주는 관모양 물체의 설계관점

(9) 자기 펄스의 전형적인 유효기간은 $10\sim 30\times 10^{-6}$ 초이고 압력은 350 MPa에까지 이를 수 있다. 이 성형법의 전체효율은 40%에까지 이를 수 있으나 5~15%가 보통이다.

(10) 재료의 모양은 성형할 면적이 링, 튜브, 평평한 재료상의 둥근 면적과 같이 하나의 폐루

프를 형성하여 유도전류가 흐를 수 있도록 하여야 한다. 만일 가공할 관에 그림 9 (가)와 같이 세로 틈이 있으면 전류의 흐름을 방해하여 성형힘이 감소하고 고르지 못하게 된다. 그림 9 (나)와 같이 작은 구멍이 뚫려 있을 경우에는 전류의 흐름이 별 방해를 받지 않기 때문에 성형이 가능하다. 그림 9 (다)와 같이 관의 끝에 깊은 틈이 있으면 전류의 흐름이 방해를 받아 고르지 못한 압력이 작용하게 된다.

5. 성형 장치

5.1. 에너지 저장 및 제저장치

전자기성형을 다양하게 응용하기 위하여서는, 크기와 동력에 관한 한, 기계가 융통성을 갖도록 만들 필요가 있다. 송전선의 손실과 도체사이에 간헐 힘 등을 고려하면 비교적 높은 전압 에너지 저장계를 사용하는 것이 바람직하고, 반면 주어진 자기플럭스를 코일 속에 부여하는데 필요한 전압을 고려하면 전압이 낮아야 한다. 검정된 부품의 이용도와 이의 기대수명을 조사한 결과 약 10 kV의 전압이 선택되었다. 이 전압과 비교적 작은 피가공품을 맞추기 위하여 중복하여 낀 코일을 사용한다.

모든 전자기성형기계가 가지고 있는 공동 특징은 다음과 같다.

(1) 기계의 대기상태에서는 축전기가 충전되지 않는다. 그러나 모든 제어회로는 작동할 준비가 되어 있다.

(2) 기계를 작동하면 축전기는 상당히 균일한 속도로 충전된다.

(3) 축전기의 전압은 안정한 참조전압과 비교하는 별도의 감지회로를 이용하여 측정한다.

(4) 미리 정한 충전전압에 도달하면 충전회로는 축전기와 단절되고 축전기는 작동코일을 통한 이그니트론(ignitron)에 의하여 방전된다.

이러한 계통을 통하여 축전기에 최소의 응력이 걸리고 최고의 인사안전이 보장된다. 또한 일 임펄스의 반복적 정확성이 높아진다.

5.2. 코일과 자속집중기

성형코일의 3가지 기본 종류를 그림 10에 나타내었다. 그림 10 (가)는 축관성형 코일, (나)는 확관성형 코일, (다)는 평판성형코일이다. 저장된 에너지를 효율 좋게 사용하기 위하여 스트레이 인덕턴스를 최소로 하고 플럭스 집중을 피하도록 코일을 설계한다.

자기장 모양은 자속집중기(field shaper)로 제어하는 것이 보통인데, 자속집중기는 성형코일과 피가공물 사이에 위치하여 성형코일에 의하여 유도되어 피가공물에 에너지를 전달한다. 그림 11은 재료의 어떤 영역에 힘을 집중시키기 위하여

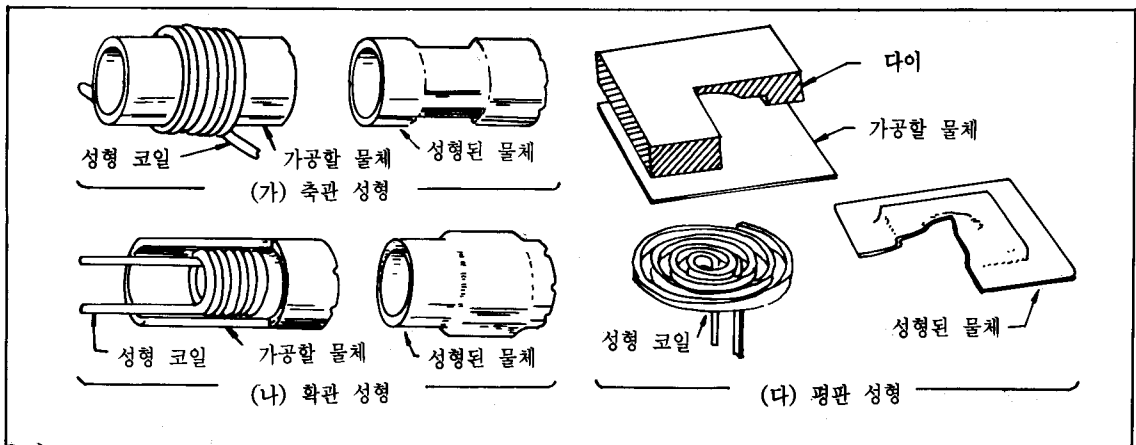


그림 10) 전자기성형의 3가지 기본방법 (가) 축관성형 (나) 확관성형 (다) 평판성형

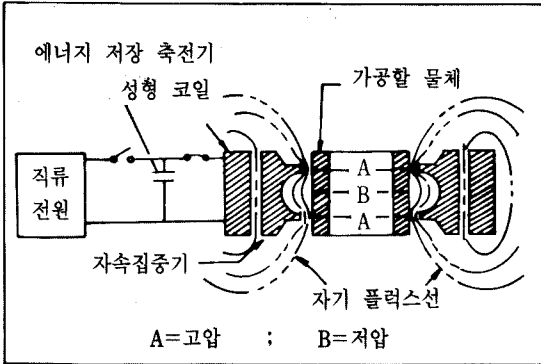


그림 11) 전자기성형체를 사용할 때의 자기장 모양

사용한 자속집중기의 설명도이다. 자속집중기를 사용함으로써 요구하는 영역에 높은 국부성형압력을 가할 수 있을 뿐 아니라 성형코일의 약한 부분에 높은 압력을 주는 것을 막음으로써 성형코일의 수명을 길게 할 수 있다.

그림 12는 자속집중기의 원리를 나타낸다. 성형코일에 전류를 흘리면 자속집중기의 바깥표면에 성형코일의 전류와 반대방향으로 유도전류가 생기고, 이 유도전류는 자속집중기의 틈에 의하여 안 표면으로 계속 흐른다. 그림에서 보는 바와 같이 안 표면의 유도전류도 성형코일의 전류방향과 반대이다. 이 유도전류에 의하여 피가공물 표면에 또다른 유도전류가 생겨 성형이 이루어진다. 그러므로 성형코일과 자속집중기의 전기적 결합상태를 하나의 코일로 생각할 수 있다. 자속집중기도 성형코일과 마찬가지로 강도가 크고 전기전도도가 큰 재료가 좋다. Be 동이나 경화된 Al 합금이 사용되고 있다.

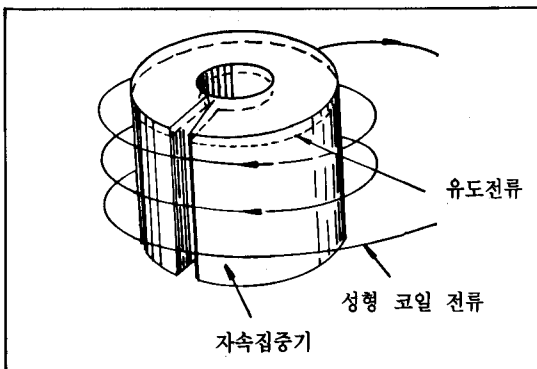


그림 12) 자속집중기에 흐르는 전류의 방향

코일과 자속집중기의 설계에서 세가지 주인자는 크기, 자기특성 및 강도이다. 이것들의 설계이론은 매우 까다롭다. 왜냐하면 성형코일은 10~100 μ s 지속하는 펄스동안 대량의 전기에너지의 반복적인 방전을 받아야 하고 350 MPa이나 되는 균일한 성형압력을 발생하여야 하기 때문이다.

단기간의 측관 및 환관작업은 표준 코일과 교환가능한 자속집중기를 사용하여 편리하고 다양하고 경제적으로 이루어질 수 있다. 작업수명을 길게 하기 위해서는 고정 자속집중기를 가진 코일을 사용하여야 한다. 표준 설계를 한 다양한 코일이 있으며 특별히 설계한 코일은 훨씬 비싸다.

코일의 종류와 응용에 따라 수리나 교환을 할 때까지 수만에서 수백만번 작업을 할 수 있다.

6. 응용

전자기성형은 주로 관을 확장하거나 압축하거나 성형하는데 사용되며, 원뿔모양, 회전타원체 모양, 평평한 모양의 물체를 만들고, 한 단계에서 조립 작업을 하는데도 효과적으로 사용된다.

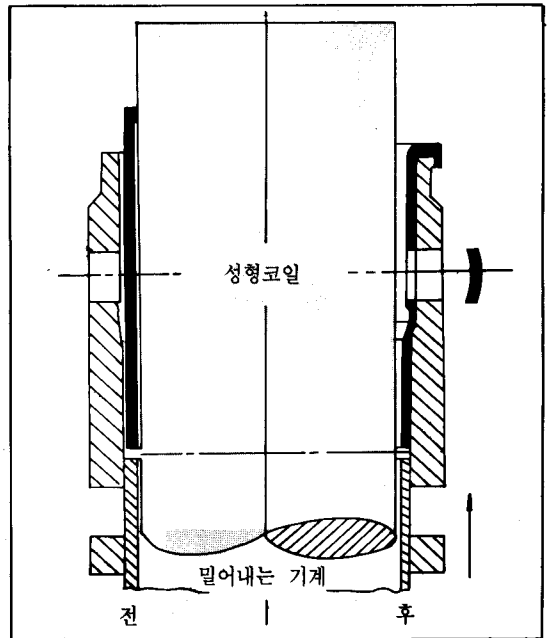


그림 13) 관에 2개의 가로구멍과 관끝을 등글게 하기 위한 장치설명도

(1) 성형

대부분의 성형작업은 재료를 다이쪽으로 압력을 가하여 성형한다. 때로는 여러 복잡한 작업들을 간단한 치구로서 동시에 할 수 있다. 그림 13은 하나의 다이를 이용하여 2개의 가로 구멍과 끝이 등갈게 굽어진 관을 한번의 작업으로 만드는 것을 보여준다. 성형할 때 재료와 다이의 충돌로 표면 성질이 개선되는 경우가 종종 있다.

(2) 압축, 인장, 토크 부하를 위한 접합부

관 모양의 부재를 자기 스웨이징하여 용구 끝에 접합할 수 있다. 항공기 제어봉과 같이 인장이나 압축을 받도록 설계된 응용의 경우에는 재료 끝에 홈을 파고 이것을 둘러싼 관을 이 홈에다 스웨이징한다. 응력집중을 피하기 위하여 홈의 치수를 적당히 함으로써 보통 사용되는 리벳 설계품의 강도와 같거나 능가하는 접합부를 얻을 수 있다.

토크 부하용 접합부는 이빨 모양의 돌기에 관 모양 부재를 스웨이징하여 만든다. 토크관의 지름이 76mm, 두께가 1.7mm일 경우, 이러한 접합부를 만드는데 필요한 에너지는 48 kJ 정도이다. 이러한 접합부를 토크와 피로시험을 하면 관자체보다 강하다는 것이 증명된다. 접합과 관련된 어닐링을 피할 수 있기 때문에 접합부가 우수한 피로특성을 나타낸다.

접합될 부품사이에 적당한 재료배합을 선택하고 접합부의 준비에 조심을 하면 금속과 금속 사이를 밀봉할 수 있다. 그러나 일반적으로 O링 같은 밀봉재를 사용하는 것이 좋다.

(3) 모터 조립

전자기성형법을 이용하여 소형모터를 조립할 경우, 여러개의 부품을 하나의 고정 공구에 놓고 자기성형법으로 접합할 때 부품과 부품사이의 상대적 위치를 정확히 유지할 수 있다. 그림 14는 이러한 방법으로 조립된 모터의 단면 설명도이다. 고정자와 회전자 사이에 간격자를 이용하여 조립과정중 그 간격이 균일하게 유지된다. 모든 부품을 조립한 후 죄임테로 스웨이징한다. 스웨이징 압력으로 테가 벨의 팔과 잘 접촉하여 수축박음과 비슷한 부하조건에 놓이게 되고 조립체의 동심성이 유지된다.

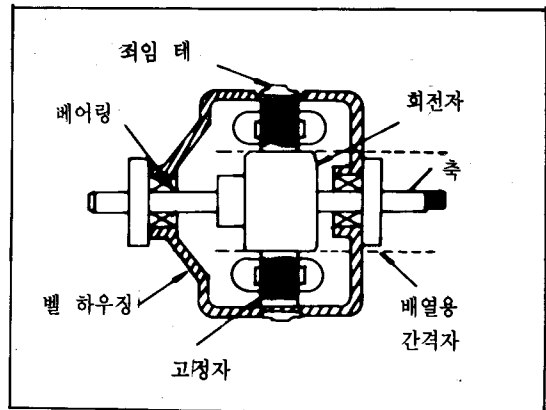


그림 14) 모터의 고정자-회전자의 동심성을 유지하면서 죄임 테를 설치하는 전자기 성형법의 설명도

재래식 방법을 이용하면, 회전자와 고정자 사이의 간격을 균일하게 유지하기 위하여 고정자 부품과 벨 양쪽 모두의 정확한 동심성을 필요로 하는 축 결합 볼트를 이용하여 모터를 조립한다. 또 다른 방법으로는 빨리 굳은 합성 레진으로 벨을 결합시키는 방법으로서, 이 방법으로 자기 조립과 비슷한 정도로 간격의 균일성을 유지할 수 있으나 아무리 빨리 굳는 레진이라도 경화시간 때문에 앞의 링 스웨이징 방법보다는 불리하다.

(4) 고무부품의 부착

자기성형법을 이용하여 금속부품과 비금속부품을 조립할 수 있다. 그림 15는 동관에 고무관을 부착시키기 위하여 고무관에 테를 스웨이징하는 방법을 보여준다. 테의 빠른 이동속도 때문에 고무가 옆으로 빠져나갈 시간이 없으며 이 때문에 테가 고무를 자르지 못하게 된다. 그 대신 힘이 안쪽의 동관에 전달되어 관이 안으로 패인다.

7. 측정 장치 및 방법

피가공물의 변형거동 및 성형기구를 밝히기 위해 시간에 따른 피가공물의 변위, 성형코일에 흐르는 전류, 피가공물에 작용하는 힘 즉 전자기 압력을 측정할 필요가 있다. 그림 16은 피가공물의 변위, 성형코일 전류와 전자기 압력을 동시에 측정하기 위한 실험장치도이다.

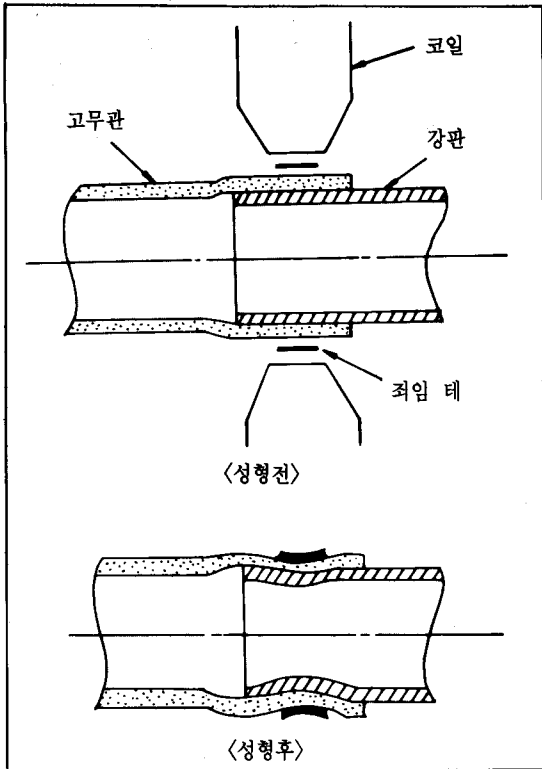


그림 15) 강판에 고무관을 부착하기 위한 전자기 성형의 전 후 설명도

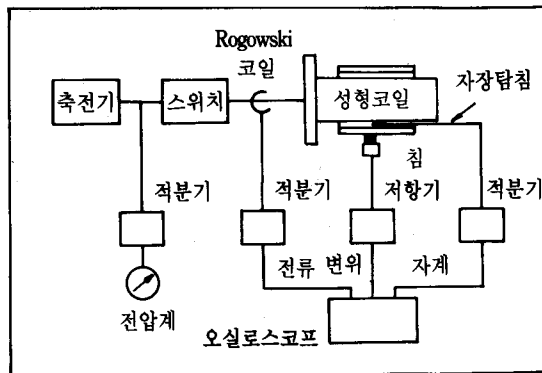


그림 16) 측정 장치

7.1. 피가공물의 변위[r(t)] 측정법

시간에 따른 변위 측정법은 그 성형양식에 따라 다르며 표 2의 방법들이 많이 이용되고 있다.

코일형식	성형양식	측정방법
슬레노이드형 코일	측판 성형	고속도 카메라 침 접촉
	확관 성형	고속도 카메라 침 접촉
평판형 코일	평판 성형	침 접촉 광전 소자

(1) 침 접촉법

침 접촉법은 모든 성형 양식에 적용시킬 수 있어 가장 널리 이용되고 있는데 주로 확관 성형에 많이 이용되고 있다. 그림 17은 침 접촉법의 원리를 나타낸 것인데, 유리 섬유로 된 지지대에 구멍을 내고 그 속에서 침이 미끄러지도록 배열한다. 각각의 침은 변형시에 피가공물과 접촉하면 측정회로의 저항 변화로 인해 오실로스코프상에 시간에 대한 전압의 변화파형이 계단 형태로 그려진다. 그림 18은 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, 전압변화와 시간과의 관계를 관의 반경 방향 변위와 시간과의 관계로 대치하는 것이 가능하다.

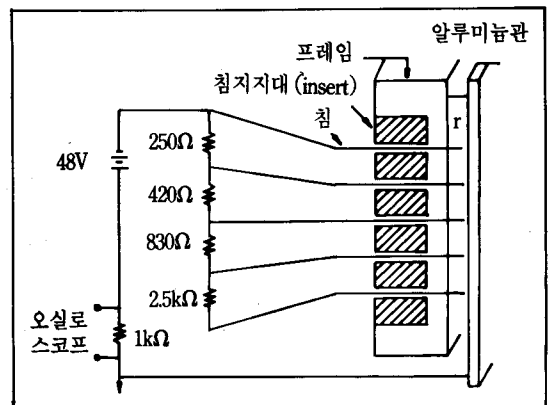


그림 17) 침 접촉법의 원리

침 접촉법은 다른 방법에 비해 측정장치가 간단하고 염가로 제작할 수 있는 이점이 있지만, 침과 침과의 간극을 정도있게 측정하는 것과 침

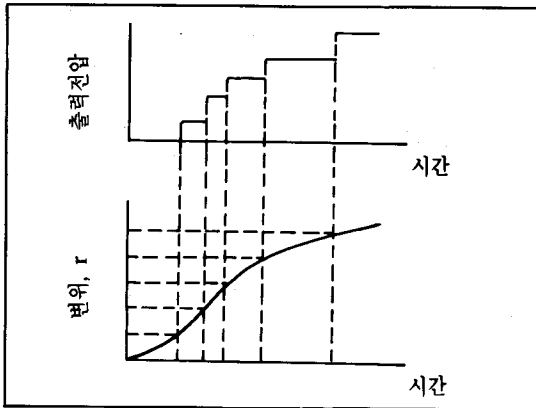


그림 18) 전압과 변위의 관계

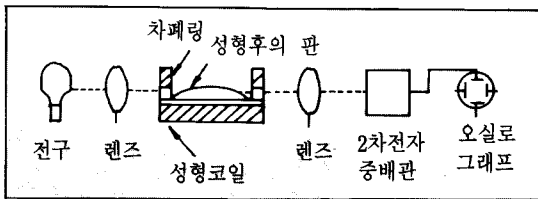


그림 19) 광전 소자법에 의한 변위 측정법

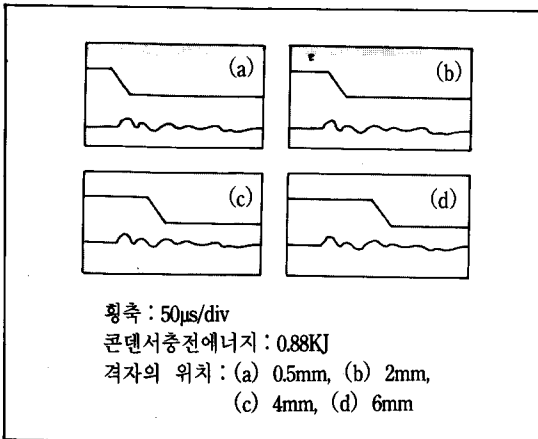


그림 20) 광전 소자법으로 측정된 결과의 예

상호간의 영향 등에 세심한 주의를 기울여야 한다.

(2) 광전 소자법

이 방법은 주로 평판 성형시의 변형거동을 측정하는 데 이용된다. 그림 19는 그 측정장치의 배치를 나타낸 것인데, 차페링에 설치된 격자를 통한 빛이 금속판의 변형에 의해 차단되어 2차

전자 증폭관에 전기 신호의 변화를 나타내며 이것을 오실로그래프로 포착한다. 격자의 위치를 바꾸는 것에 의해 판재의 변형경로가 구해진다. 빛을 이용한 측정은, 전기적인 잡음 장애가 없는 것이 장점이다. 그림 20에 이 방법에 의한 측정 결과를 나타냈다. 그림 중 위의 곡선은 광전자 증폭관의 출력을, 아래 그림은 성형코일에 흐르는 전류를 표시한다.

7.2. 자기 압력*[t]* 측정법

피가공물에 작용하는 압력(자기 압력)은 성형 코일과 피가공물 사이의 자속 밀도를 측정하여 구한다. 즉 성형코일과 가공물 사이에 아주 작은 단면적을 갖는 탐색코일을 넣어 자계의 변동에 의해 탐색코일에 유기되는 전압 *V*를 측정하면 임의시간 *t*에서 자계 *H*는 다음식으로 구할 수 있다.

$$H = \frac{1}{\mu n S} \int_0^t V dt \quad (A/m) \quad (7)$$

여기서 μ 는 진공 투자율(1.26 $\mu H/m$), n 은 코일의 감은수, S 는 코일의 단면적이다.

이러한 원리로, 실제로는 탐색코일의 유기전압 *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 다음식으로 주어지는데, 차원을 분석하면 *E*가 바로 자기 압력임을 알 수 있다.

$$E = \frac{\mu_0 H^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (J/m^3 \text{ 즉, } N/m^2) \quad (8)$$

7.3. 성형 코일 전류*[i(t)]* 측정

성형코일에 흐르는 전류는 Rogowski 코일로서 오실로스코프상에 그 적분된 신호를 측정하여 구한다.

7.4. 충전 회로의 전압의 측정

방전되기 전의 축전기 뱅크의 전압은 ohmic divi-

der를 이용한 저장형 진공관 전압계(storage type vacuum tube voltmeter)로서 측정한다.

8. 경제성

(1) 투자비

산업용 금속성형을 위한 에너지 저장뱅크는 수명을 길게하고 유지비가 적도록 만든다. 계의 부품을 정격보다 낮게하여 사용하면 수명을 상당히 길게 할 수 있다. 예를 들면, 에너지 저장 수준을 40% 감소시킴으로써 에너지 저장축전기의 수명이 100배 증가할 수 있다.

표준(시간당 600회 작업)에너지 저장 뱅크의 비용과 생산용 조종장치비를 합하여 '70년 동력 비로 kJ당 약 \$2,000이다.

(2) 운영비

기계에 사용되는 동력은 비교적 중요하지 않다. 시간당 600회 작업하는 12kJ 기계는 약 3kW의 동력을 소비한다.

축전기와 이그니트론이 주로 소모되는 부품이다. 기계의 정격대로 작업할 때 이그니트론인 경우 500,000 회수, 축전기의 수명이 2,000,000 회수인 것이 전형적인 수명이다.

코일의 비용은 응용에 따라 크게 달라진다. 간

단한 실험용 코일은 설계하여 값싸게 만들 수 있다. 오래 사용할 수 있는 생산용 코일은 설계하기도 실험하기도 어렵다. 성형코일의 기대수명은 100,000~1,000,000 회수이다. 코일의 대부분은 원래 비용의 몇분의 1의 비용으로 다시 만들 수 있도록 설계되어 있다.

참 고 문 헌

- [1] 이동녕, 신금속, 1988. 1, p.2.
- [2] 이종수, 대한기계학회지, 28권 5호, 476, 1988.
- [3] Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 3rd ed., Society of Manufacturing Engineers, N.Y. McGraw-Hill, p.17-1, 1976.
- [4] Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4th ed., Society of Manufacturing Engineers, N.Y. McGraw-Hill, vol. 1, 19-16.
- [5] 이성호, 서울대학교 박사학위 논문, 1990.
- [6] S.H. Lee and D.N. Lee, Computer Aided Innovation of New Materials, M. Doyama, T. Suzuki, J. Kihara and R. Yamamoto, eds., Elsevier Science Publishers B.V. North-Holland, 1991, 667.
- [7] Metals Handbook, vol. 4, ASM, p.256, 1969.