

연자성재료의 기술 현황과 연구 동향

기술해설 1

The Present Technical Condition and A Trend of Research for Soft Magnetic Materials

양계준 박용관,

(Yong-Kwan Park, Kea-Joon Yang)

Key Words(중요 용어) : Soft Magnetic Materials(연자성재료), Soft Ferrite, Permalloy, Sendust, Amorphous magnetic alloy (비정질 자성 합금), Magnetic Head, Core

1. 서 론

자성 재료는 여러 산업 분야에서의 기초 소재로서 최근 전자공업의 눈부신 발전과 함께 급속한 성장이 이루어졌으며, 산업계에서는 장래의 성장에 큰 기대를 걸고 있는 분야이다. 일반적으로 자성 재료는 hysteresis 특성에 따라 혹은 응용 분야에 따라 경자성재료(hard magnetic materials)와 연자성재료(soft magnetic materials)로 분류되어지며 그 구분은 반자화에 필요한 자화의 세기인 보자력(Hc)을 척도로 하는데 연자성재료는 보자력이 0.005~수 0e의 범위로서 자화반전이 용이한 특성을 이용한 것이다. 또한 연자성재료는 크게 페라이트계와 금속 합금 재료로 나누어지는데, 기존 재료의 특성 향상과 새로운 재료의 개발을 통하여 특성이 향상되어 왔다. 특히 최근들어 고화질의 영상 기술과 고음질의 음성 기술, 위성 방송 및 고밀도 정보 기록 등과 같이 전자, 통신기기의 고기능화, 경박단소화에 부응하여 고성능 연자성재료의 수요가 확대되고 있다. 이에 따라 산업용은 물론 민생용에 이르기까지 기존의 연자성재료의 특성 향상이 요구됨에 따라 자성 재료의 생산 업체는 단순히 재료의 공급뿐만 아니라 응용 제품, 기기 분야와 긴밀하게 협력하여 기술의 발전을 이루고 있으며, 응용 제품으로까지 사업을 전개하고 있는 실정이다.

이런 요구에 따라 자성 재료의 생산 기술이나 연구 방향은 소형화와 함께 고특성화가 진행되고 있으며, 위성통신 특히 위성 방송의 시작과 함께 GHz 수준의 microwave device에 소요되는 연자성 재료의 발전과 자기 기록 기술의 진전, 새로운 자기 기록 방식 등이 향후 자성 재료 분야의 새로운 주류를 형성할 것으로 예상된다. 여기서는 대표적인 연자성재료인 Soft 페라이트, 퍼멀로이, 센더스트와 비정질 자성합금계의 특성과 용도를 살펴 봄

으로써 현재의 기술현황을 알아보고 그 문제점 해결과 특성개선을 위한 연구동향에 대하여 검토하여 보기로 한다. 또한 연자성재료 일반에 걸쳐 용도별 분류와 각 응용기술 분야에서의 기술동향 및 전망에 대하여 소개 하고자 한다.

2. 연자성재료의 기술 현황과 연구 동향

2-1. Soft 페라이트

페라이트는 산화제2철(Fe^{3+})과 다른 금속과의 화합물로 Netherland의 Philips연구소에서 Verway와 Snoek이 Ferrite magnet의 자기적 특성과 결정 구조에 대하여 연구한 이후 1948년 프랑스의 Neel이 종래의 강자성론과 상자성론에는 해결되지 못한 ferrimagnetism에 관한 이론 정립하였다. 또한 H. A. Kramer와 P. W. Anderson에 의해 초교환 작용기구가 받아들여져 페라이트가 현대 초단파 통신 및 회로에서 필수 요소임을 증명하였고 그 응용 분야가 확대 발전되어 가고 있다.

연자성 재료로서 페라이트가 많이 사용되는 이유는 금속 자성 재료에 비해 약 10^6 배인 $10^2 \sim 10^{10} \Omega \cdot cm$ 의 높은 비저항값을 가지기 때문에 와전류손실이 아주 적고 제조 방법의 측면에서도 분말 야금법에 의해 만들 수 있으므로 소형 또는 임의의 복잡한 형상으로 만들 수 있으며 소결체이므로 산화 부식을 받지 않아 내식성이 뛰어난 장점을 가지고 있기 때문이다. 그러나 산화물이기 때문에 금속 자성체에 비하여 자기적 특성인 초투자율(initial permeability)은 1/10, 자속밀도는 1/3정도로 낮아서 저주파 대전력용 자성 재료로서는 부적당하며, Tc(Curie temperature)도 금속 자성체에 비해서 낮은 것이 단점으로 지적되고 있다.

현재까지 사용되어 온 페라이트의 제조 기술로는 건식법(dry process)과 습식법(wet process)이 있는데 건식법은 원료분체의 혼합물을 가소, 분쇄

하는 것으로 원료로서는 해당 성분의 산화물 또는 탄산염 등을 가열 분해시켜서 산화물이 되는 염을 사용한다. 일반적으로 소결용 분체의 화학 조성과 상구조는 최종 제품인 소결체와 같거나 거의 유사한 것이 좋으므로 가스 공정에서는 고체 반응이 매우 중요한 인자가 되며, 이때 원료 분체의 반응성이 분체가 된다^[11]. 또 가스와 분체는 소결용 분체의 성질을 지배하는 결정적 요인으로 알려져 있다. 공업적으로 널리 사용되고 있는 분말 혼합법의 경우는 불순물 혼입 방지의 어려움과 1300℃ 이상의 고온을 요하는 고체 반응^[12] 등의 어려움이 있다.

습식법은 성분 금속 원소를 포함하는 용액으로부터 몇 단계의 화학 공정을 거치므로 건식법에서 처럼 고온을 거치지 않고도 소결용 분체를 만드는 방법이다. 현재까지 보고된 제조 방법은 혼합 염의 열분해^[3, 6], alkali 첨가 또는 alkoxide의 가수분해에 의한 용액의 공침전^[7, 11], 용액의 spray가열^[12, 14], 수열 처리^[9, 10], 저온화학법^[13] 등이 있다. 최근의 습식법은 미세한 입자와 고온의 화학적 균일성이 요구되는 경우에 예비 처리, 성형 그리고 소결조건을 적당히 설정함으로써 건식법에 비해 월등한 소결체를 만들 수 있으나 조절 면이나 대량생산시 다량의 물로 처리해야 하므로 경제성과 환경오염이 해결해야 할 과제로 대두되고 있다. 현재 이용되고 있는 대표적 soft 페라이트의 특성을 살펴보면 표 2-1과 같다.

표 2-1. 대표적 soft 페라이트의 특성

구분	사용 주파수	μ_i	$\tan \delta / \mu_i \times 10^{-4}$	T _c (℃)	B _{ms} (G)	B _{ms} (G)	IL(Oe)
Mn-Zn계 고투자율	1~100 KHz	10000	< 7 (10KHz)	> 120	4000	900	0.09
		7500	< 6.5 (10KHz)	> 130	4200	400	0.07
		5000	< 6.5 (10KHz)	> 130	4200	1350	0.1
Mn-Zn계 저손실	1~1000 KHz	2000	< 2.5 (100KHz)	> 130	3500	800	0.25
		1300	< 1.2 (100KHz)	> 200	4650	1000	0.45
		800	< 8 (500KHz)	> 230	4000	1700	1.2
Mn-Zn계 고포화자기	1~100 KHz	4500	< 20 (100KHz)	> 200	4600	1100	0.2
		2500		> 230	5100	1170	0.15
		3900		> 200	4800	1500	0.2
Ni-Zn계	1~50 KHz	2900	< 28 (1MHz)	> 280	3300	2500	1
		70	< 40 (1MHz)	> 350	3000	2000	6
		25	< 150(10MHz)	> 450	2200	1200	14

soft 페라이트의 특성별 이용 분야는 각 특성에 따라 물질과 용도가 정해지는데 그 내용을 간략히 정리하여 보면 표2-2와 같다.

soft 페라이트는 여러 가지 요인에 의해 자기적 특성이 결정되는데 크게 나누어 보면 내인적 특성(intrinsic properties)과 외인적 특성(extrinsic properties)으로 구분할 수 있다.

(1) 내인적 특성은 조직의 변화에 민감하게 의존하는 특성인데 spin-spin, spin-궤도간의 상호관계에 기인하며 물질의 기초적 자기 특성을 결정지으며 조성 변조와 첨가물을 이용하여 자기적 특성을 제어하므로써 결정된다. 결정되는 자성의 예로는 결정 자기 이방성(magneto-crystalline anisotropy), 자기 비틀림(magnetostriction), 포화자화, Curie 온도, 고투자율의 온도 의존성, 자기여효(disaccommodation) 등을 생각할 수 있는데 각 내인적 특성 제어를 위한 연구 동향을 개략적으로 검토하여 보기로 한다.

■ 결정 자기 이방성 : 조성 변화와 첨가물의 고용을 통하여 자기이방성계수(K₁)를 0에 접근시킴으로써 자벽의 이동이 용이하게 됨에 따라 자구 성장 및 자화회전을 이용하여 고투자율을 향상시키고자 하는 방향으로 진행되고 있다.

■ 자기 비틀림 : 역시 조성을 변화시키고 첨가물 고용을 통하여 자기 비틀림 계수 λs를 0에 접근시키면 자벽이동에 의한 탄성에너지가 감소되고 자구 회전이 용이해지는 것을 이용하여 투자율을 향상시키고자 하는 것이다.

■ 포화자화 : 초교환 상호작용을 증대시킬 수 있도록 조성 변조와 첨가물을 고용시킴으로써 포화자화를 증가시키고자 하는 것이다.

표 2-2. soft 페라이트의 이용 특성별 분류

이용 특성	분진	용도
고투자율	Mn Zn ferrite Ni Zn ferrite	자심재료
적사각형 이라극선	Mg ferrite γ-Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , CrO ₂	기록용 자심재료
자기왜 (비틀림)	[(CuO) _x (NiO) _{1-x}](Co ₂ O ₃) ₂ (Fe ₂ O ₃) ₂ x=1~0.25, y=0~0.05	소음과진동차
microwave 특성	YIG, ferroplana Li ferrite	gyrator isolater
쌍 자기특성	Ortho ferrite garnet	레이저 기록
고사기손실	Spinel ferrite ferroplana	전파 흡수체
자구특성	Ortho ferrite garnet	대용량 비휘발성 소자
Curie온도	Mn Zn Cu ferrite	삼온 스위치

■ Curie 온도: 초교환상호작용과 격자 결합 에너지를 증감시켜 Curie온도를 변화시키고자 하는 방법을 시도하고 있는 경향이다.

■ 고투자율 : 온도 의존성의 제어는 초교환 상호

작용의 변화를 이용하여 Curie온도를 변화시키는 방향과 결정 자기 이방성의 변화를 통하여 투자율의 2차 peak값을 제어하여 이를 이용하는 방법이 연구되고 있다.

(2) 외인적 특성은 구조에 민감하게 의존하게 되는데 내인적 특성에 부가하여 입경, 입계, 표면, 기공의 종류와 성질에 주로 기인하는 특성이다. 초투자율(initial permeability), 보자력, 잔류자속밀도, 자기 손실 등 실용상 중요한 자기적 특성이다. 여기서는 외인적 특성 제어를 위한 기본 원리와 접근 방향을 개략적으로 살펴보기로 한다.

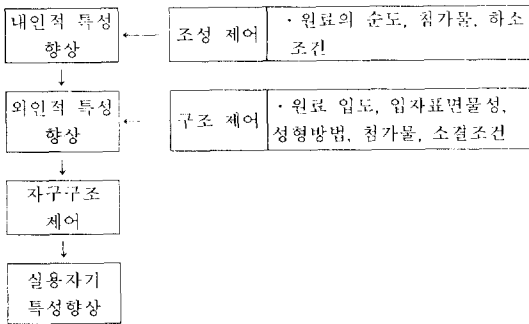


그림 2-1. Mn-Zn ferrite의 고성능화를 위한 원리적 방안

- 초투자율 : 입자가 크고 내부에 기공이 없을수록 자벽의 이동이 용이하여 지므로 결정립의 크기나 기공을 제어하여 투자율을 향상시키는 방향으로 연구되고 있다.
- 보자력 : 초투자율과 상대적으로 자벽이동이 용이하게 됨에 따라 보자력이 감소하게 되므로 소결 조건을 변화시킴으로써 제어를 도모하는 방향으로 연구가 진행되고 있다.
- 잔류자속밀도 : 소결분위기를 제어하거나 소결촉진제를 첨가함으로써 구조를 치밀하게 하여 단위 부피당 자기 모멘트를 증가시켜 이를 통하여 잔류자속밀도를 증가시키려는 시도가 이루어지고 있다.
- 자기 손실 : 투자율의 증대에 부가하여 비저항을 증가시키면 와전류손이 감소하는데 이를 극소화하기 위하여 입계표면적을 증가시키는 방법, 입계를 절연체화 하는 방법, 조성에 미량의 첨가물을 넣어 비저항을 증가시키는 방법 등이 모색되고 있다.
- 자기여효 연구에 있어서는 시간 경과에 따른 자기 특성(특히 투자율)의 열화 원인이 산화 제2철(Fe^{3+})과 전자가 합쳐져 산화 제1철(Fe^{2+})이 되는 가역 반응과 이온의 초과와 공핍이 만나게 될 때

일어나는 것으로 이를 개선하기 위한 방안이 모색되고 있다.

한 예로 Mn-Zn 페라이트의 여러 가지 특성제어를 이용한 고성능화 연구 동향을 요약하면 그림 2-1과 같다

2-2. 퍼머로이(permalloy)⁽¹⁶⁾

퍼머로이(Permalloy)는 35-90% Ni-Fe계 2원 합금 및 여기에 Mo, Cr, Cu, Nb 등 다른 원소들을 첨가한 다원계 고투자율 합금의 총칭이다. 이 합금은 연자성재료 중 높은 직류 투자율과 낮은 자기 이력 손실을 가지고 있으며, 가공성과 안정성도 우수하여 변압기, 자기 헤드, 스위칭 전원 및 철드재료로서 광범위하게 사용되고 있다. 그러나 최근 연자성 페라이트 및 비정질자성 합금과 같은 경쟁 재료들의 개발에 의해 그 중의 상당 부분을 점유하고 있다.

퍼머로이는 1923년 미국 Bell연구소의 Elmen⁽¹⁷⁾이 78% Ni-Fe 합금을 600°C로 부터 급냉하는 방법을 사용하여 고투자율을 얻은 이래 Mo, Cr, Cu 등을 첨가한 다원계 합금에 관한 연구가 활발히 진행되었다. 초기에는 합금의 조성 변조를 통한 특성의 제어 및 탐색이 주요 연구 대상이었으나 1940년대 이후에는 고순도 수소 annealing, 진공 용해 등 정밀 제조 기술을 이용하여 Supermalloy, Ultraperm 10 등 고투자율 합금들이 개발되었고 압연 자기 이방성, 일축 자기 이방성 등을 활용한 Isoperm, Permax, Satmumetal 등 새로운 자성 합금들도 개발되었다. 60-70년대에는 자기 헤드에 응용이 될 수 있는 Nb, Ta를 첨가한 Hardperm 및 석출 경화 현상을 이용한 Tufperm 등의 고경도 내마모성합금들이 개발, 실용화되어 사용되고 있다.

퍼머로이의 또 다른 흐름은 1955년 Blois가 퍼머로이 박막의 자화반전에 관한 연구를 발표한 이후 기억 매체 및 자기 헤드에 응용할 수 있는 퍼머로이 자성박막에 관한 연구가 활발히 이루어졌다. 이러한 노력의 결과 중 하나가 1979년 미국 IBM 3370 및 3380기종에 채용한 박막자기헤드의 코어 재료인 퍼머로이 도금박막이다. 이후 80년대에는 물리적 증착기술(PVD)을 활용한 퍼머로이 박막과 다른 자성 재료 및 절연체 등과 조합한 다층구조(multilayered structure)재료에 관한 연구개발이 활발히 이루어져 최근에는 고성능 전자부품에 등장하기 시작하고 있다.

퍼머로이는 가공이 쉬우므로 얇은 판재로부터 선재, 봉재, 분말 등 여러 가지 형태로 제조할 수

있고, 기상 증착(vapor deposition) 및 도금에 의해 박막(thin film)으로도 만들 수 있다. 현재의 주요 응용 분야는 박판에 집중되어 있고 이 분야는 오랜동안의 기술개발에 의해 거의 성숙 단계에 있으나, 앞으로는 박막자기헤드, 고성능 센서 등 새로운 첨단 부품용 재료로서 성장이 기대된다.

현재 사용되고 있는 퍼머로이의 종류와 제조법을 개략적으로 살펴보면 종류는 조성, 열처리 방법에 따라 그 특성이 다르게 되나 크게 표2-3과 같이 6종류로 나눌 수 있다. 퍼머로이 중 그 용도가 가장 광범위하고 수요가 큰 재료는 C급 퍼머로이(PC)이다. 80 Ni 퍼머로이로 총칭되는 이 실용 합금의 조성은 세분한다면 수십 종이나 된다.

높은 초투자율과 히스테리시스의 양호한 각형비를 이용하는 자심 재료의 경우 대부분 압력이 가해지지 않도록 하여 물드에 넣어 제조하고 있다. 주요 용도는 각종 변압기, 변성기, 계전기, 자기철드재, 자기 헤드, 자기충족기 등이다. 자기 헤드에 퍼머로이가 사용되는 것은 우수한 투자율 및 냉간가공성에 있으나, 주행태이프와의 접촉에 의한 마모에 대해 약하므로 Nb, Ta, Si등을 첨가하여 경도를 약 2배(Hv 200) 정도로 만든 Hufperm 등이 응용 자기헤드로서 많이 사용되고 있다.

퍼머로이를 비롯한 합금계 자심 재료는 저항율이 작으므로 주파수의 증가와 함께 와전류 손실(eddy current loss)이 커져 고주파 영역에서의 사용이 한정된다. 보통 사용 주파수(50-60Hz)로부터 오디오 주파수 영역(최고20KHz)까지의 용도에는 퍼머로이가 가장 양호한 자심 재료가 된다. 퍼머로이는 냉간가공이 용이하므로 매우 얇은 박판까지 압연할 수 있으며, 현재 박막의 두께에 접근하는 4.5 μ m 두께의 박판까지 제조 가능한 것으로 보고되고 있다. 재료의 와전류손실은 두께에 반비례하므로 이 극박 퍼머로이를 사용한다면 보다 높은 주파수에 대응할 수 있으므로 퍼머로이의 응용 영역을 확대할 가능성이 있다. 다만 이 경우 관간의 절연층으로 인해 집적율(stacking ratio)이 떨어지게 되므로 실용적으로는 10 μ m 정도로서 수 MHz의 주파수에 대응하는 펄스(pulse) 자계에서 사용하는 경우도 있다고 알려지고 있다. 그러나 박판화할수록 제조 비용이 급증하므로 경제성이 종합적으로 고려되어야 한다.

다른 형태를 가진 퍼머로이에 대해 검토하여 보면 봉재의 퍼머로이는 초기에 용력 자기 변환센서 용으로 수중의 탐지 기능을 보유한 소나(sonar)와 가변지연선, 조음과 말진 장치에 사용되었으나 세라믹계의 압전소자가 개발, 보급되면서 그 시장의

표 2-3. 퍼머로이의 종류와 자기적 특성

종류	재료명	주성분 (%)	μ_0 ($\times 10^3$)	μ_m ($\times 10^3$)	B ₁₀ (kG)	Hc (Oe)	ρ ($\mu\Omega$ cm)	Tc (°C)	D (g/cm ³)	주용도
퍼머로이 A급 (70~80% Ni)	78-Permalloy	78.5Ni	10.0	105	0.02	0.02	16	600	8.60	계전기 자극판
퍼머로이 B급 (40~50% Ni)	45-Permalloy	45Ni	4.5	60	15.0	0.08	45	500	8.25	계전기 트랜스변성기, 자기철드, 헤드
	Hipernik	50Ni	4.5	100	15.5	0.03	45	500	8.25	
	Monimax	47Ni, 3Mo	2.0	35	14.5	0.1	49	-	-	
	Sinimax	43Ni, 3Si	3.0	35	11.0	0.1	85	-	-	
	Radiometal	45Ni, 5Cu	2.0	20	15.6	0.4	55	-	-	
Briperm	40Ni, 11Cr	15.0	50	5.5	0.02	100	130	8.12		
퍼머로이 C급 (70~80% Ni과 특수성분 포함)	1040Alloy	72Ni, 14Cu, 3Mo	40.0	100	6.0	0.02	56	-	8.76	계전기, 트랜스변성기, 자기철드, 헤드, 자기충족기
	Mumetal	77Ni, 5Cu, 4Mo	70.0	200	7.0	0.01	60	350	8.62	
	Cr-permalloy	78.5Ni, 3.8Cr	12.0	62	8.0	0.05	65	-	-	
	Mo-permalloy	79Ni, 4Mo	50.0	200	8.5	0.015	55	460	8.72	
	Supermalloy	79Ni, 5Mo	100.0	600	8.0	0.005	60	410	8.77	
Hardperm	79Ni, 9Nb	125.0	500	6.0	0.002	75	350	8.75		
퍼머로이 D급 (35~40% Ni)	35-Permalloy	36Ni	3.0	20	13.0	0.2	75	230	8.15	트랜스, 변성기
퍼머로이 E급 (45~55% Ni)	Del tamax	50Ni	0.5	200	15.5	0.1	40	500	8.25	리액터, 자기충족기
기 타	각형히스테리시스 퍼머로이	81Ni, Mo	--	590	6.2	0.008	60	410	8.72	리액터
	Nimalloy	79.5Ni, 20.5Mn, 77Ni, 19.5Mn, 3.5Nb	21.7, 33.7	92, 482	2.0, 8.0	0.005, 0.01	56, 50	-, -	-, -	헤드

대부분을 잃게 되었다. 그러나 80년대 들어 가스렌지의 안전장치에 채용되면서 다시 새로운 수요 확대의 기회를 맞고 있다.

최근 퍼머로이의 연구, 개발의 방향은 형태를 박막으로 하여 새로운 용도를 개척하고 있다. 그 중의 대표적인 것이 유도형(inductive) 및 자기저항형(MR)의 박막자기헤드와 엔코더(encorder)등의 자기센서분야이다. 박막자기헤드용 재료로서는 도금법으로 제조되는 IBM 대용량 컴퓨터의 하드 디스크용 자기 헤드와 재생전용의 MR헤드가 중심이 되고 있으며, 단층막 뿐만 아니라 다른 재료와 복합한 구조의 다층막재료도 PVD기술을 이용하여 제조되고 있다. 또한 MIG(metal-in-ga)헤드의 웨라이트와 샌더스트의 중간층, 수직기록매체의 Co-Cr막 아래의 seed층으로도 이용이 되고 있다. 자기센서분야는 주로 자기저항 효과(magnetoresistance effect)를 이용하며 위치 검출, 회전수 측정 등의 용도에 제품화되고 있다.

2-2-1 제조 기술 동향

(1) 판재의 제조 기술

퍼머로이판재의 실제 생산 공정은 제조 회사에 따라 약간의 차이는 있으나 일반 공정으로 생산할 경우 다음과 같은 주요 공정을 거치게 된다.

1) 진공 용해

진공 용해의 목적은 금속이 산소 및 질소 등에 오염되는 것을 막고 금속 내에 존재하는 불순물을 제거하는 것이며, 대기 중에서 최적의 탈산, 탈황조건보다 진공용해의 경우가 불순물의 함유량이 1/3 - 1/10 정도로 감소된다. 유도용해는 용탕을 교반하는 것이 가능하므로 탈가스효과가 좋으며 균일한 조성을 얻을 수 있는 장점이 있다. 도가니로 열충격이나 오염도면에서 마그네시아(Magnesia)도가니가 가장 유리하다.

2) 가공 공정

퍼머로이합금판재는 보통 단조, 피삭, 열연, 산세, 일차 냉연, 중간 소둔, 이차 냉연, 광휘 소둔, 레벨링(leveling), 슬리팅(slitting)순으로 제조된다. 그러나 단조 공정이나 산세 공정이 생략되는 경우도 있다.

3) 열처리 공정

퍼머로이합금의 열처리 공정은 자기 특성을 얻는데 조성과 함께 가장 중요한 공정이며, 전 공정을 통해 엄밀한 제어가 필요하다. 모든 종류의 퍼머로이합금은 열처리방법에 따라 다음의 세 가지 주요 방법으로 처리되고 있다.

① 가열 - 유지(고온) - 급냉 - 유지(저온) - 급냉

: 78.5% Ni 2원합금, TMS, Tufperm 등과 같은 석출경화형합금 등에 적용

② 가열 - 유지(고온) - 서냉(600℃ 부근까지) - 속도 조절 냉각(300℃까지) - 급냉

: 일반PC, PCS급 퍼머로이에 일반적으로 적용

③ 가열 - 유지(고온) - 서냉(상온까지)

: PB, PD, PE급 퍼머로이에 일반적으로 적용

실제의 경우 재료의 제조 업체는 열처리 전의 상태로 공급하게 되고, 후가공업체들이 부품의 형태로 가공한 후 열처리하게 된다. 퍼머로이합금의 특성 제어를 위한 열처리 방법으로 연구되고 있는 주요 사항은 수둔 온도와 시간, 수소의 순도 및 공급량, 냉각 속도의 조절 방법, 재료의 packing 및 취급 방법 등이다.

(2) 박막의 제조 기술

현재 박막자기헤드로 실용화되고 있는 IBM사의 제품에는 도금 방법으로 제조한 퍼머로이 박막이 채용되고 있지만 최근의 박막재료의 제조에는 도금 법보다 PVD기술을 이용하는 편이 성분 조절이 쉽고 박막의 두께 제어가 용이하며, 결정립 크기의 제어 역시 쉬운 장점을 가지고 있으므로 주로 sputtering을 중심으로 한 PVD기술이 중심을 이루고 있다. 이 중 가장 널리 이용되는 기술이 RF magnetron방식의 스퍼터링기술이다. 스퍼터링기술에서는 단층 막의 경우에는 타겟의 수가 한개, 다층 막의 경우에는 두 개 이상의 타겟를 채용하게 되며, 기판의 재질로는 유리, 알루미늄, TiC 등이 많이 사용되고 있다. 플라즈마의 생성을 위한 이온화 가스로는 주로 Ar이 사용되고 있으며, 가스 압력은 $10^{-4} - 10^{-2}$ torr범위이다. 제조된 자성 박막은 적절한 열처리에 의해 내부응력의 제거 및 자구 구조의 제어를 하여 사용 목적에 적합한 자기 특성을 얻게 된다. 상업적 생산을 위해서는 가급적 짧은 시간 내에 박막을 제조하는 것이 중요하므로 고속 증착장치의 개발도 연구 개발의 중요한 항목으로 대두되고 있다. 표 2-4에 퍼머로이를 비롯한 연자성박막합금의 제조 기술에 관한 주요 내용을 정리해 나타내었다.

이상에서 퍼머로이 연자성합금에 관한 여러 기술 동향을 살펴보았다. 우리 나라의 퍼머로이 수요는 자기 헤드, ZCT, 소형 변압기와 같은 각종 전자 부품과 가스렌지 안전장치 등에 연간 약 100억 원 규모로 생각되고 있다. 그러나 이 재료는 진공 용해, 정밀제어암연 등 기술적인 면이 필요하고 투자 규모가 상대적으로 크다는 점에서 아직 국산화가 이루어지지 못하고 있다. 그러나 향후 퍼머로이

와 유사한 제조 기술을 가지고 있는 Alloy 42, Invar, 유리봉착합금 등 그 니켈계 기능성 합금들과 연계시켜 생산에 착수한다면 충분한 경제적 가능성이 있다고 생각된다.

또한 최근 새로운 분야로 대두되고 있는 박막재료도 현 시점에서 연구 개발에 착수해 볼 필요가 있다고 생각된다.

표 2-4. 연 자성 박막재료의 제조 기술

항 목	제 조 기 술
박막형성방법	Sputtering <ul style="list-style-type: none"> · DC 2극 sputtering · RF(Magnetron)2극 sputtering · Conventional · Reactive · Facing target sputtering · Ion beam sputtering · Batch · Cassette · Load lock · In-line · WINDING
	Ion Beam mixing Molecular beam epitaxy(MBE) Plating
Target 수	1개(단층막), 2개(다층막)
Substrate 재료	Glass substrate Al ₂ O ₃ coated ceramic substrate Al ₂ O ₃ - TiC substrate, etc

2-3. SENDUST 재료

센더스트는 1937년 일본의 増本, 山本⁽¹⁸⁾에 의해 발견된 이래 Fe-Si-Al계 금속간 화합물의 총칭으로 사용되고 있다. 최근 기록 매체로서 metal tape이 도입됨에 따라 자기 테이프의 기록 밀도가 현저히 상승하였고 이에 대응하는 자기헤드측에도 상응하는 성능 향상이 강력히 요구되어 그 해결을 위한 중요 소재의 하나로 센더스트가 주목의 대상이 되고 있다.

센더스트는 투자율이 매우 높고, 자속밀도가 클 뿐 아니라 내마모성도 우수하여 이상적인 자기 헤드나 core용 전자성재료로 기대를 모으고 있으나 주조시 기공이 발생하기 쉽고 취성이 높아 가공이 어렵기 때문에 그 용도가 제한되어 있었다. 따라서 초기에는 압분자심으로 고주파 인덕터에 이용되었고 현재는 고급 오디오 헤드나 8mm VTR 화상 헤드등 일부 고급헤드에만 사용되고 있는 실정이다. 이를 해결하기 위한 방안으로 가공 기술의 개발을 통하여 가격의 저렴화가 수반된 고품질화가 실현된다면 그 응용 범위는 더욱 확대될 수 있을 것이다. 최근 기술개발을 위한 방향과 연구 동향 역시 가공기술의 개선과 새로운 제조기법의 개발

에 초점을 두고 진행 되고 있다. 여기서는 센더스트의 최근 기술 현황과 특성개선을 위한 파라미터를 검토하여 봄으로써 연구동향을 소개하기로 한다.

2-3-1 자기 헤드용 센더스트

앞에서 간략히 언급한 바와 같이 자기 헤드 재료로서 센더스트 합금이 주목을 받게 된 이유는 고보자력 테이프의 기록 헤드로서 강한 자계를 발생시킬 수 있도록 높은 자속밀도를 갖는 것과 노이즈가 작을 것, 내마모성이 좋을 것이 요구되기 때문이다. 센더스트 합금을 자기 헤드에 최초로 실용화한 것은 방송용 VTR 이고 오디오 분야에 있어서는 메탈 테이프의 출현에 의해 나타났으며 헤드칩에 센더스트를 사용하고 코어에는 퍼머로이와 페라이트를 사용한 헤드가 실용화되었다. 현재까지의 센더스트 합금의 가공 기술은 압연이 곤란하기 때문에 ingoit로부터 절단 연삭 연마에 의해서 헤드로 가공하는 것이 보통이었으나 자기 헤드로서 유용한 센더스트 재료를 얻기 위해 여러 가지의 연구가 시도되고 있다. 그 개발 상황을 검토하여 보면 운용 단가, 제조 단가의 절감 측면과 특성 향상으로 나누어 생각해 볼 수 있다.

제품화된 재료의 운용 가격의 절감은 헤드의 내마모성과 내식성의 향상을 통하여 실현시킬 수 있는데 이를 위하여 표면에 산화층을 형성시키는 방법과 특정 원소를 첨가하는 방법을 사용하고 있다. 센더스트 입자 표면에 산화물을 생성시키면 표면 20μm 까지 마모성을 향상시킨다. 또한 플라즈마를 이용하여 조밀한 층을 얻는 방법 등도 보고되고 있다. 그런데 센더스트를 실용 헤드 재료로 한 경우 내식, 내마모성이 상대적으로 페라이트에 비해 낮기 때문에 이를 해결하기 위한 방안으로는 센더스트에 Cr를 첨가하면 내마모성이 개선되고 6.5% Cr첨가로서 마모량은 약 1/5로 줄어들고 내식성도 향상된다. 또 Ti을 첨가하면 경도를 증대시키고 Ti와 Cr의 복합 첨가는 내마모성을 개선한다. 희토류(Ce,La)등의 원소를 첨가하면 결정립이 현저히 미세화(50μm)되고 가공시 그라인딩과 칩핑이 감소한다.

제조 가격의 절감면으로는 가공성 향상을 위하여 연삭성 향상, 막관 제조를 통한 기능 개선을 시도하고 있다. 연삭성향상을 위하여는 결정립을 미세화 함으로써 기공으로 인한 결함을 개선시키는 방향으로 진행되고 있는데 진공 원심 주조법과 용탕 주조법에 의해 용탕 응고시 고압을 걸고 급냉하면 결정립의 성장을 억제하여 기공이 작은 치밀

한 재질이 얻어진다.

박판 제조는 가공성향상면과 함께 특성개선면에서 있어서도 중요한 요소로 최근 주목을 받고 있는 부분이다. 박판의 형상으로 센터스트계 합금을 얻으면 종래의 가공 방법에서 벗어나 소성가공이 가능하기 때문이다. 박판을 이용한 기술은 Adams가 분말 야금 기술에 의해서 sheet를 만드는 것에 성공한 이후 자기 특성은 주조 재료에 비해서 일반적으로 낮고 특히 Bs가 낮은 것이 문제점이었다. 이를 개선하기 위한 연구의 결과로 1976년 山本은⁽¹⁹⁾ Ni를 첨가함으로써 냉간 가공 가능한 슈퍼 센터스트 (6% Si 4% Al 3.2% Ni)를 찾아냈다. 이는 1,250 °C 중소순후 700°C부터 자장 가운데서 중소순하면 급냉처리한 것에 비해 5.3배의 $\mu m = 165,000$, $B_m=10,900G$, $\rho=100\mu\Omega\text{-cm}$ 가 얻어졌다. 또한 소량의 Nb를 첨가함으로써 연간 압연이 가능하게 되었고, Fe-5.0 Si-7.0 Al-0.25Nb 합금 박판은 종래의 가공 방법을 이용한 센터스트와 동등한 주파수 특성을 나타낸다. 이 합금은 자왜가 약간 큰 몰드 특성에 약하다 또 Cr, Ti, Mo 과의 복합 첨가도 연간 압연성을 개선시킬 수 있다는 것이 보고되어 있다. 이와 같은 소성 가공성의 개선에 의해 집적 박판상의 헤드 피스를 얻기 위한 가공법도 연구되어 왔다. 또 한가지의 시도로는 아몰 피스를 재제하는 액체 급냉법을 이용해서 직접 센터스트 리본박판을 얻는 방법도 개발되고 있다. 이 리본은 두께가 40 μm 임에도 불구하고 가소성을 갖는다. 이외에도 자기 헤드의 제작에 있어서 라미네이트 접착 등에 의한 몰드 특성 열화도 문제점으로 제시되고 있다. 몰드 특성은 자왜와 관련이 있고 자왜정수가 0에 가까운 음의 범위에서 양호한 것으로 알려지고 있다. 또 자왜에 의해서 몰드특성은 다른 온도 의존성을 나타낸다. 이상과 같이 자기 헤드로서 유용한 센터스트 재료를 얻기 위해 여러 가지의 개발이 행해져 왔다. 이들의 내용을 정리하면 표 2-5와 같다.

2-3-2. 박막 센터스트계

여기서는 스퍼터링과 증착법에 의한 Fe-Al-Si계 박막 센터스트의 성막 조건에 따른 제품의 특성 결정 요인을 살펴보고 이 분야에서 이루어 낸 연구를 소개함으로써 연구개발의 배경과 동향을 정리해 보겠다.

(1) 스퍼터링에 의한 성막

스퍼터에 의한 Fe-Al-Si계 합금막의 연구는 NHK의 紫谷⁽²⁰⁾의 연구를 시작으로 하여 田村(日立家研)⁽²¹⁾, 梅崎(三菱中研)⁽²²⁾, 村上(日立金屬)⁽²³⁾ 등에

표 2-5. 자기 헤드용 센터스트의 개발상황

목 적	재 료 의 개 선 점		대 책
유용가격 절감	헤드마모 대책	내마모성 향상 내식성 향상	표면층의 산화 표면처리 프라즈마 응용 분사법
			Cr 첨가
			Ti 첨가
			원소첨가 기타 특수 원소첨가
			급속도화
제조가격 절감	가공성 향상	연삭성향상	기공으로 인한결함 개선 결성립 미세화
			급형개발을 통한 주조법개선 원공 원심 주조법 용탕주조법
			라미네이트 구성을 하는 core제법
			조급냉법
			압연가능 Ni첨가 Nb첨가
특성 향상	고주파 특성향상 몰드에 의한 특성 열화 방지	자왜특성 제어	조성과 첨가물에 의한 변조

의해서 보고되고 있다.

■ 기관

막을 지지하고 또 막의 특성에 기여하는 의미에 있어서 기계 가공의 정도 용이성을 좌우하는 기관 재료의 선택은 중요하다. micro order이상의 두꺼운 막을 성막할 때는 막과의 열 팽창 계수 α 의 차에 의해 응력을 받기 때문이다. 최근 HOYA,II 電硝子등에 있어서 $\alpha=130 \times 10^{-7}/deg$ 이상의 결정화 글래스 기관의 개발도 진척되고 있고 II立金屬의 MnO, NiO의 소결기관도 주목받고 있다.

■ 조성 속도

마그네트론 스퍼터 방법에 의해 고속 스퍼터링이 가능하다. 그 속도는 1000A/min이다.

■ 막 두께 방향의 조성 분포

5 μm 정도의 두께에서는 조성 분포는 없다고 보고되어 있다. 그러나 스퍼터링 시간이 길어지면 각 원소의 스퍼터링 효율이 달라지기 때문에 막막 두

계의 증가와 함께 Si, Al부족, Fe과잉의 조성 변화를 하게된다. 모재 Si 9.5wt% Al 5.4wt%에 대해 막 두께 40 μ m에서 Si 2.7wt% Al 0.8wt%로 된다는 결과가 있다.

■ 타겟 조성과 막 조성

성막후의 조성은 모재에 비해서 Si, Al모두 % order로 감소하는 경향이 있다. 만드는 막의 성막 조건에 의해 감소 정도는 다르므로 적절한 조건 제시를 요한다. 보자력(Hc)도 타겟 조성에 따라 변화하는 요소이다.

■ 열처리 효과

성막후 열처리에 의해 막의 보자력, 투자율 등의 자기 특성이 개선되어 진다. 600 $^{\circ}$ C에서 1시간 이상 하나로 보여진다고 생각된다. 이 효과는 결정성장 에 의한 것으로 판단되고 있다.

■ 자기 특성의 막 두께 의존성

막두께의 증가와 함께 길정이 성장해 감에 따라 Hc는 감소한다. 한편 막 두께가 증가하면 막의 내부 응력이 급격히 상승하고 투자율 효과에서 Hc를 증가시키는 방향으로 움직인다. 이것은 과도 상태에서 Hc를 최소로 하는 상태가 일기 때문이라고 설명할 수 있다.

■ 결정 구조

막의 결정 구조를 x선 회절을 이용하여 조사하면 α -Fe의 회절상과 격자에 상당하는 선이 관측되고 α -Fe와 유사한 bcc구조에서 AlSi가 소격자를 구성하고 있는 것이 판명되었다. 격자 정수는 286 \AA 이다.

■ 전기 저항

모재의 85 $\mu\Omega$ -cm정도에 비해서 성막후에는 100 $\mu\Omega$ cm이상 140~150 $\mu\Omega$ cm로 높은 값을 나타낸다. 결정입계가 절연층으로서 작용하고 있기 때문이라고 생각할 수 있기 때문이다.

■ 막의 경도

모재의 Hv=530 정도의 비해 성막후에는 640으로 경도가 증가하고 이것은 결정 입자 치수가 작아 지므로 되는 것에 기인한다고 보고되었다.

(2) 증착법에 의한 성막

증착법에 의한 성막은 Fe, Al, Si가 증착이 가능한 각 원자의 증기압에 큰 차가 있어 막의 조성 제어가 곤란하기 때문에 이 연구에는 山本(日人) 등에 의한 것과 村松 (SHARP연구소) 에 의한 보고가 있는 정도이다. 조성 제어를 잘 행하면 성막속도가 스퍼터 방법에 비해 크게 취할 수 있는 것이 하나의 이점이다. 표2-6에 연구 동향을 정리하였다.

표 2-6. 증착법에 의한 박막 센더스트 연구 동향

구분	山本 등에 의한 연구(日人)	村松 등에 의한 연구 (SHARP 日研)
성막 방법	저항가열법에 의한 진공증착법	전자 빔에 의한 증착법
증착 source	6~15wt% Si 5.5wt% Al bal.Fe	20~35 wt% Si 1~6 wt% Al bal.Fe
성막 조건	1~5 $\times 10^{-6}$ Torr중, 기판온도 300 $^{\circ}$ C	$\sim 10^{-6}$ Torr중, 기판 온도 400 $^{\circ}$ C
성막속도(A/min)	~ 2800	3000 ~ 6000
막 두께 [μ m]	~ 0.5	~ 5
기판 재료	현미경용 cover glass	결정화 glass
분화속도(명도[G])		11000
보자력 [Oe]	5 이하	1 이상
초 투자율	~ 1500 (과대투자율)	2000이상
비저항 [$\mu\Omega$ cm]		70~85
비어커스 정도		600
격자 정수(\AA)		286
열처리	500 $^{\circ}$ C 진공중	600 $^{\circ}$ C (진공중 또는 N ₂ 중)

2-4. 비정질 자성 합금⁽²⁴⁾

비정질 자성 재료는 1967년 Duwez와 Lin이 최초로 Fe₇₃P₇C₁₀ 합금에 대해 보고한 이래 새로운 자성 재료로서 종래의 대표적인 전자성재료인 페라이트, 퍼머로이, 센더스트 등과 달리 원자배열상의 결정구조를 갖지 않은 새로운 실용 전자성 재료로서 연구의 대상이 되고 있다. 현재 많은 에너지 변환용 재료, 제어소자 및 개조소자 등에 응용되어 기존기기의 특성을 향상시키고 있으며 새로운 응용방식의 개발이 진행되고 있다. 비정질 합금은 통상의 결정 재료와는 달리 역학적 비평형 상태에 있으며 이러한 상태를 상온에서 실현시키는 것이 중요한 연구과제중의 하나이고 지금까지는 다양한 액상, 고상, 기상 비평형 고체화 방법이 사용되고 있다. 또 제조 방법에 따라 재료의 형상과 조성이 특징지어지고 이에 의해 독특한 물성이 나타나게 된다. 여기서는 이러한 비정질 합금의 제조방법의 기술적 현황과 특성, 응용에 대하여 검토하고 연구 동향을 개설한다.

비정질합금을 제조하는 방법은 형성시 물질 상

태의 변화 과정에 따라 표 2-7과 같이 분류할 수 있다.

표2-7. 비정질 합금의 제법^(25, 27)

process	method	product
melt quenching	single roll twin roll	ribbon & sheet
		particle dispersed sheet
		clad sheet
	spinning	fiber & wire
		multi wire & rope net & composite
atomizing	powder	
deposition	evaporation	thin film
	sputtering	thin & thic film
		ultra fine powder
	plating	thick film
plated sheet		
solid reaction	mutual diff.	bulk & powder
	hydrogenation	
surface coating	laser scanning	coated bulk
compaction	shock wave	bulk
	HP & HIP	
joining	ultrasonic wave	parts
	shock wave	
	laser melting	

2-4-1. 조성

상온에서 안정한 비정질 금속은 원칙적으로 다 원소 합금계에서만 제조 가능하며, 현재까지 나타난 합금유형중 연자성 재료로 중요성을 지니는 것은 약 15-35 at% 의 반금속 원소 (B, C, Si, P 등) 를 함유하는 금속-반금속형 (Fe-B, Co-B 등)과 10 at% 전후의 초기전이금속 (Ti, Zr 등)을 비정질 형성 원소로 하는 금속-금속형 (Fe-Zr, Co-Zr 등)이며, 실용 비정질 합금은 비정질 형성능, 물리적 성질등을 고려하여 3원계 이상으로 조합하는 것이 보통이다.

2-4-2. 비정질 합금의 특성

(1) 비정질 합금의 일반 특성⁽²⁵⁾

비정질 금속은 원자 배열이 무질서하여 slip 면 또는 벽개면이 없고 상온에서 높은 강도와 경도를 나타내며 인성이 높다. 그리고 원자의 불규칙 배열로 인해 전기저항이 크며, 표면의 화학적 활성이 높다. 또 내방사선 손상 및 촉매작용 등에도 우수한 특성을 나타내는 것으로 보고되고 있다.

(2) 일반적 자성^(25,28,31)

비정질 합금의 연자성의 그의 특징적 구조에 큰 의존성을 갖게 되므로 표 2-8에 구조적 특징과 자기적 성질의 관련성을 간략히 나타내었다.

비정질 합금은 원자의 불규칙 배열로 인하여 결정 자기 이방성(K)이 소실되어 있으며, 결정에서 일반적으로 존재하는 공공, void, 전위, 개재물 등의 구조 조직상의 결함이 존재하지 않아 보자력(Hc)이 낮으며, 이에 따라 적은 자기 이력 손실(P_b)을 나타낸다. 또 비정질합금은 전기저항(ρ)이 크고, 비정질 형성을 위한 조건 때문에 시료 두께가 극히 작으므로 와전류손실(P_e)이 작아진다. 이의 결과로서 비정질 합금은 종래의 금속 연자성 재료에 비해 고주파손실이 현저히 감소하며 일정 투자율 영역이 고주파수 대역까지 확대된다.

표 2-8. 비정질합금의 구조와 자기적 성질의 연관성

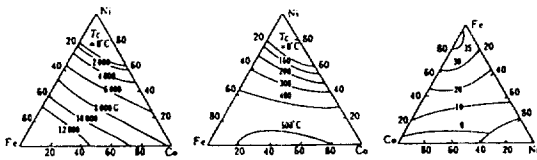
구 조	자 기 적 성 질
불규칙 원자배열 (등방성)	결정 자기 이방성(K)의 소실, 낮은 자기이력손실(P _b)과 와전류손실(P _e)
구조결합의 불안정성 (균질성)	낮은 보자력(Hc), 낮은 이력손실(P _h)
구조의 단범위 규칙성 (화학적 규칙의 변화)	포화자왜(λs), 큐리온도(Tc)의 열처리 효과
유도가가능한 단범위 규칙성 (화학적 단범위 규칙의 유도)	유도자기이방성(ku)의 생성

또 비정질 연자성 합금은 구조적으로 등방적이므로, 자장 열처리나 응력열처리 등에 의해 소량의 유도 이방성(K_u)이 주어지게 되면 용이하게 그 방향으로 현저한 자성의 특성 변화를 나타낸다. 이러한 현상을 이용하여 자기이력곡선에 변화를 주어 와전류 손실 및 투자율 특성을 제어할 수 있다. 그런데 비정질 합금이 액체냉매에 의해 금속 응고할 경우, 용탕 puddle 내의 큰 온도구배, 국소적 냉각 속도의 차, 과냉액체와 응고 계면에 발생하는 전단 응력등으로 인해 국부적인 원자의 이방적배열 및 내부응력이 발생하여 국소자기이방성을 유기한다. 스핀터링의 경우도, 막의 성장 과정에서 밀도 및 조성의 불균일성에 의한 국소자기 이방성이 발생하게 되는데 이와 같은 이방성의 존재는 연자성의 열화를 초래하게 되어 결정화 온도 이하의 적정 열처리로 이러한 불균일성을 완화시켜 연자성을 개선하는 방안이 사용된다.

3-3. 자성의 조성 의존성^(25,29,31)

그림 2-2는 금속-비금속형(Fe,Co,Ni)-Si-B계 비정질 금속의 포화자속밀도(Bs), 큐리온도(Tc), 포화자왜(λs)의 Fe/Co/Ni 조성비 의존성을 나타내고 있다. 이 그림에서와 같이 Co측에서는 λs=0

의 조성이 존재하는 반면 λs 가 30×10^{-6} 정도의 Fe계 비정질합금은 규소강에 대해서는 작으나 약 1.6T 정도의 큰 Bs 값을 보인다. 한편 금속-금속형(Fe,Co,Ci)-Zr 계 비정질 합금의 경우로서 Fe측에서는 Bs가 급격히 낮아져, 오히려 Co측에서 더 큰 Bs를 가지며 또 $\lambda s=0$ 도 존재한다. 따라서 금속-금속형에서는 주로 Co를 주성분으로 하는 조성에서 그 응용이 검토된다. 이와 같은 결과를 바탕으로, 주요한 비정질 연자성 합금의 유형을 분류하면 다음과 같다.



(a) 고포화자속밀도 Bs (G) (b) Curie온도 Tc(°C) (c) 자재정수 λs

그림 2-2. (Fe,Co,Ni)₇₈Si₈B₁₄ 비정질 합금의 Bs, Tc, λs

(1) 고포화자속밀도-저철손 합금(Fe계)
현재까지 알려진 이 합금계의 대표적인 조성은

Fe-B-Si, Fe-B-C 인데 이 중 Fe-B-Si계는 가장 높은 비정질형성능과 열적 안정성 및 낮은 철손을, Fe-B-C계는 큰 포화자화를 나타낸다. Fe-B-Si계는 비교적 높은 포화자화와 열적안정성 그리고 낮은 철손을 보인다. 표 2-9는 이들 Fe계 고 Bs합금의 자기적 성질을 나타내고 있는데, 특히 철손(P)이 방향성 규소강보다 월등히 낮아 에너지 절약형 재료임을 보이고 있다.

(2) 고포화자속밀도-고투자율 합금(Fe(Cr,Nb,계)⁽³⁰⁾)

$\lambda s=30 \times 10^{-6}$ 정도의 Fe계 비정질 합금은 상용 주파수 대역(50~60Hz)에서는 철손이 극히 작으나, 투자율(특히 초투자율)이 낮아 고주파 손실이 크다. 이때 Fe-B-Si계에 Cr, Mo, Nb등을 소량 첨가하면 Bs가 어느 정도 감소하나 λs 가 10×10^{-6} 이하로 대폭 감소하여, 가공시 응력이 가해져도 성능 열화가 적으며 고주파수 영역에서 낮은 손실특성을 나타내게 된다.

(3) 저자왜고투자율 합금(Co계)

Co-반금속 및 Co-Nb, Ta, W, Mo는 λs 가 부의 값을 나타내지만, Co를 Fe, Mn으로 치환하든가 반금속 및 Nb, Ta, W, Mo를 Zr, Y, Ti, Hf등의 금속으로 치환하면 λs 는 정의 방향으로 변화한다.

표 2-9. 대표적인 Fe 계 고포화자속밀도 비정질 합금의 자기적 성질

조 성(at%)	Bs	Hc(Oe)	Br/Bs	Tc(°C)	Tx(°C)	P(w/kg)	$\rho (\mu \Omega \cdot \text{cm})$
Fe Si B	1.56	0.03	0.85	415	550	0.2(1.4/60)	130
Fe B Si C	1.61	0.04	0.9	447	480	0.1(1.4/60)	155
Fe B C	1.78	0.15				0.5(1.7/60)	
방향성 규소강	2.0	0.1	0.7	740	-	0.9(1.4/60)	47

*각 합금의 자성치는 최적 열처리 후의 값

표 2-10. 대표적인 Co계 고투 자율 비정질 합금의 자기적성질

조 성(at%)	형 상	Bs(T)	Hc(mOe)	μe (1kHz)	Tc(°C)	Tx(°C)	$p(\mu \Omega \cdot \text{cm})$	$\lambda s(x 10^{-6})$
Co Fe Si B	박대	0.80	6	8500	440	490	134	~0
Co Fe Ni Si B	"	0.54	2	120000	210			
Co Fe Ni Nb si B	"	0.71		~10000	420			
Co Nb Zr	박막	0.93	50	3500**		530		2
Co T Zr	"	1.2	10	7000*		450		0.02
퍼멀로이		0.77	10	30000	460		60	~0
샌더스트		1.0	50	20000	500		80	~0
페라이트		0.4	20	20000	180		3×10^6	

*1MHz **10MHz

이러한 현상을 비정질 합금으로 K도 동시에 0이 되어 있으므로 일반적으로 극히 높은 투자율과 낮은 보자력을 나타내며, 또 비전기저항이 크고 박대 또는 박막 형상을 지니므로 인하여 와전류손실이 적어서 MHz대의 고주파 영역까지 우수한 자성 특성이 유지된다. 표 2-10은 대표적인 Co계 비정질 합금의 조성 및 자기적 특성을 정리한 것이다.

(4) 고자왜 합금 (Fe(Co)계)

Fe계 및 이에 소량의 Co를 첨가한 비정질 합금은 열처리후 약 40×10^{-6} 의 큰 자왜를 나타내면서 투자율이 높고, 또 표2-11에 보이는 바와 같이 고자왜 결정 금속 및 페라이트 등과 비교하여 훨씬 큰 전기기계결합계수(k)를 가진다.

이에 따라 Fe계 고자왜 비정질 합금은 자왜 및 자왜의 역효과가 현저히 크며, 초음파의 발생 및 전달이 용이한 (즉, 결정입계에 의한 감쇄가 없다.) 특성을 지닌다. 한편, Fe계 고자왜 비정질 금속 세션(Fe-Si-B계)는 급냉상태에서 표면과 중심부 사이에 작용하는 응력효과에 의해 자기적 쌍안정(bistable)구조를 갖게 되어 Barkhausen효과와 Matteucci효과를 나타내어 미소교류자계($> 0.080\text{Oe}$)에 대해 넓은 주파수 범위(0.01Hz~10KHz)에 걸쳐 날카로운 펄스 전압을 유지한다.

표 2-11. Fe계 고자왜 금속의 특성

조 성	$\lambda s (\times 10^{-6})$	k
비정질 $\text{Fe}_{70}\text{Si}_{10}\text{B}_{20}$	~34	0.75
$(\text{Fe}_{85}\text{Co}_{15})\text{Si}_{10}\text{B}_{10}$	44	> 0.60
결정 Ni	33	0.15~0.31
Fe-Co-V	70	0.2~0.37
Ni-Cu-Co femite	28	0.25~0.35

(5) 고투자율 고평화자속밀도 미결정 합금(Fe(Cu,Nb)계)⁽³²⁾

최근에 개발된 비정질 합금의 변형으로서, 액체 급냉법으로 제조한 철계 Fe-Cu-Nb-Si-B 비정질 합금을 적정 열처리로 결정화시키면 bcc α -Fe 구조를 지니는 10nm전후의 초미세 결정립조직으로 변하며, 이때 Co계 고투자율 비정질 합금에 비견되는 연자성을 나타내면서 훨씬 큰 Bs가 얻어진다. 또한 결정 상태이므로 비정질보다 높은 열적안정성 및 경시안정성을 가진다. 표 2-12는 이 합금의 조성 및 자기 특성을 나타내고 있다.

이상 비정질 연자성 합금의 제조 및 특성, 응용에 관해 개략해 보았다. 현재 이 재료의 우수한 특성을 살려 실용화가 급속히 진행되어가고 있으나,

표 2-12. Fe계 초미세결정합금의 자기적 성질

조 성	Bs (T)	Hc (mOe)	μ (1k)	loss (kw/m ³)	λs
Fe-Cu-Nb-Si-B	1.24	7	100000	280	2.1
Fe-Si-B비정질 합금	1.41	86	60000	460	27
Co-Fe-Si-B	0.53	4	80000	300	~0

특허문제 및 재료의 경제성 문제등으로 인하여 당초 기대했던 것보다는 광범위한 사용이 지연되고 있다. 향후 사용 주파수의 광대역화에 의한 MHz용 자성 재료, 센서재료 등에서 한층 다양한 실용화가 기대된다.

3. 연자성재료와 응용

지금까지는 soft 페라이트, 퍼머로이, 센터스트, 비정질 자성합금계 각각의 기술 현황과 연구 동향에 대하여 살펴보았다. 본 장에서는 연자성재료의 전반적인 분류와 용도에 따른 분야별 응용에 대하여 검토하여 봄으로써 연자성재료의 전체적인 기술의 발전 방향과 전망에 대하여 소개하기로 한다.

3-1 연자성재료의 특성

일반적으로 연자성재료가 갖는 기능과 재료 측면에서 분류하면 표 1과 같다.

표 3-1. 연자성재료의 분류

분류	재 료	종 류
기능상 분류	core 재료	switching 재료, power trans., rotary trans., DY(deflection yoke)
	head 재료	audio, video, computer
	기타 재료	자기저항재료, 자왜재료, EMI 재료, 초고주파재료, 정자재료, 기타
재료별 분류	산 화 물	Mn-Zn Ferrite(sintered, single crystal), Ni-Zn Ferrite, Mg-Zn Ferrite, 기타
	금 속 계	amorphous(Fe 기, Co 기), bulk(permalloy, 규소강, 순철 등), thin film(sendust, amorphous), 기타

또한, 응용 분야에 따라 표3-2와 같이 radio, TV, VTR을 중심으로 한 민생 기기 분야, 오디오, 비디오 및 computer의 정보 기록을 담당하는 자기 헤드 분야, 통신 및 microwave device 등과 같은 산업용 분야 그리고 기타 자기저항 재료, 자왜재료, power trans.와 motor 등의 기타 분야로 나눌 수 있다.

표 3-2. 전자성재료의 응용

응용 분야	종 류
민생용 기기 분야	D.Y., Rotary trans., 안테나, 동주 core, FBT
자기 헤드 분야	Audio, Computer, Card reader, Video
산업용 분야	Magnetic core, Isolator, Circulator, Switching 전원, 고주파 trans., Microwave device
기 타 분야	EMI, Motor, power trans., Shield, 자재전동차

3-2. 응용 기술의 전망

1990년대에 주시되고 있는 전자성재료 및 관련 부품의 핵심 기술은 여러 가지가 있다. 즉,

- 고주파화 및 digital화에 대응하는 기술로써 고주파 재료 및 관련 설계 기술
- 소형화와 복합화 기술
- 고밀도화와 박막화 기술
- 가공 및 제조 기술의 진보에 따른 고정밀도화 기술
- Noise 대책 및 실장 평가 기술
- 대량생산 및 소량 다품종 제품의 고품질 양산 기술
- 회로 설계, 재료 설계 및 system 등의 software 기술

등을 들 수 있으며, 전자성재료의 응용측면에서 요구되는 특성과 기술개발의 전망을 살펴보기로 한다.

3-2-1 민생용 분야

민생용의 자심 재료 분야에서는 1989년부터 개시된 ED(extended definition) TV 방송과 조만간 실행될 것으로 전망되고 있는 HD(high definition) TV 방송에 대응하여 TV의 편향 yoke(D.Y)는 고화질에 따라 고주파화되고 있으며, 대형화에 따라 high-power화 되고 있는 경향으로 되어 core재료에 대해 요구되는 특성도 대형화, 고주파화, 고정도화에 대응하는 재료의 개발이 관건이다. 또, fly back trans.에서도 고주파화에 대응하고 저손실의 재료 개발이 이루어지고 있다. 또한, 위성 방송이 부분적으로 방송되면서 이러한 고화질의 영상 기술과 관련된 재료의 개발이 시급히 요청되고 있다. 이러한 대표적인 민생기기의 특성변화는 표 3-3에 나타내었다.

그리고 rotary trans.의 수요는 더이상 증가하지 않고 있으나, Hi-Fi화 DAT(digital audio tape recorder)의 등장과 S-VHS의 실용화에 따라 고음

질, 고화질에 대응하는 고주파 재료의 개발이 진행되고 있다. 또 카메라 인체형 VTR에서 볼 수 있듯이 구조의 소형화에 의해 동축형의 비율도 증가하는 경향이 있다.

회로 부품의 소형, 경량화에 따라서 SMT(surface mounting tech.) 및 noise 대응을 위한 페라이트 core는 chip 형태화되고 복합화 제품의 전개에 의하여 고정밀도는 물론 inductance, capacitance의 안정된 내진압과 강도와 온도계수등 여러 가지 정수에 대하여 자동화에 적합한 core의 규격이 엄격해지고 있어, 생산자 측은 여러 가지 제조 방법, 재료 개발 및 회로 설계 개발에 노력하고 있다.

3-2-2. 산업용 분야

산업용 분야에서는 digital 통신 network이 본격적으로 운용되기 시작하고 있어 1990년대 초반에는 FAX, 이동 통신 단말기기, 다기능 전화기, cordless 전화기 및 텔레비전 전화 등의 단말기를 중심으로 시장이 활발하게 될 것으로 전망되고 있다. 따라서 각 장치에 이용되고 있는 interface trans.와 국용 전화기, PBX 단말기용 DC-DC converter 등에 고부사용인 고성능 Mn-Zn 페라이트가 이용되고 있으며, 최적의 형상 설계가 검토되고 있는 단계이다.

전원용 분야에서는 산업용뿐만 아니라 민생용까지도 연관되어 있으며, 범용 단말기를 중심으로 switching 전원의 필요가 계속 증가하고 있다. 이러한 고주파용 switching 전원의 core 재료로서는 비정질 합금과 페라이트가 이용되고 있는데 페라이트는 투자율을 향상시키는데 한계가 있으나, 산화물이기 때문에 와전류 손실을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있으며, 비정질 합금의 경우 새로운 제조 방법이 개발되고 있어 주파수 대응 재료로써 유력시되고 있다.

페라이트의 경우 결정입장, 첨가물, HIP 등의 방법을 이용하여 고주파 대역에서 손실을 줄이는 방법이 시도되고 있으며, 1 MHz이상에서 실용 가능한 Mn-Zn 페라이트가 등장하고 있다.

또한, 비정질 합금으로서는 500 MHz까지의 변환 주파수에 대응하는 제품이 실용화되고 있으며 연구 단계로는 진공중 조립냉 방식으로 판의 두께를 얇게 제조하는 것에 성공하여 1 MHz에서도 실용화될 수 있을 것으로 기대되고 있다.

이와 같은 switching 전원은 고주파 대응 재료의 개발과 함께 소형, 경량화가 이루어지고 있다. 한편, 위성통신의 발달과 함께 GHz 수준의

표 3-3. 주요 민생용 제품의 특성 동향 및 연 자성 재료의 요구특성

분 야	필 요 조 건	성 능	관련 연자성재료의 요구 특성	
TV 수상기	- 대형화 - 고화질화 - 고주파화 - 다기능화 - digital 화	- high power - 저손실 온도상승대책 - low noise화 - low loss 화 - focus 성능 향상	편향 yoke	- 대형, 고정도화, 다품종소량화 - 고주파화 : HD : 33.75 KHz ED : 15.73~33.75 KHz
				- 재료의 고성능화 - 방사 noise 대책 - 고주파화
Video	- 고화질화 - 고대역화 - digital 화 - 소형화	- multi-head 화 - 다 channel 화 - 부품 소형화	자기 head	- 고주파화, 고주파 high μ - multi-head 화 - high Bs : MIG head
			회전 trans.	- 고주파화 - 고주파 high - 고정도, 농축화
Audio	- 고음질화 - 고주파(digital)화	- Rotary head	자기 head	- MIG head - 고주파화(4.7 MHz)

microwave device 분야도 향후 기대되고 있는 분야이며, 국내에서는 고주파에 관련된 연자성재료 분야의 연구 개발이 미흡한 상태에 머물러 있어 이러한 분야에 많은 관심이 절실하게 요청되고 있다.

3-2-3. 자기 헤드 분야

자기 헤드 기술의 응용 분야는 audio 분야, VTR 분야와 computer 분야로 나눌 수 있으며, card reader와 같은 특수용도의 head도 이용되고 있다. 자기헤드의 각 분야에서는 고기능화와 고밀도 기록화의 요구에 부응하여 기록매체와 함께 자

기헤드 기술이 성장하고 있으며, 시장의 성장도 기대되고 있다. 이러한 자기헤드 재료는 기본적으로 표3-4와 같은 특성을 필요로 하고 있다.

(1) Audio 분야

Audio 헤드는 기존의 analog 방식에서 헤드기술은 이미 어느 정도 극점에 달하고 있으며, 최근에는 부품의 자동화에 역점을 두어 헤드의 방위각 (azimuth) 무조정화가 요구되고 있다.

또한 고음질화의 고밀도화의 추구를 위한 음성 carrier의 digital화가 진행되어 DAT가 실용화 되면서 기록 주파수도 4.7 MHz로 고주파화 되었고,

표 3-4. 자기 HEAD 재료의 특성

특 성 내 용	관 련 사 항
광범위 주파수에서의 투자율 (μ)이 클 것	Head efficiency의 증가
보자력(Hc)이 작을 것	Hysteresis 손실의 감소
포화자속밀도(Bs)가 클 것	고보자력 기록매체의 자화 및 고기록 밀도화
고유저항비(ρ)가 클 것	와전류손실의 감소, Head efficiency 증가
내마모성이 좋을 것	Head 수명 증가
Media와 접촉주행시 noise가 발생하지 않을 것	재생 출력의 SNR 향상
온도상승에 의한 특성 변화가 없을 것	Media의 고속 주행에 대응
가공에 의한 특성 변화가 없을 것	Head 제작공정에서 요구되는 사항

테이프도 보자력이 높은 metal tape를 채용하고 있다. 기존의 페라이트 core로써는 보자력이 높은 tape에 대응하여 기록과 재생이 다소 문제가 되므로 DAT 헤드는 페라이트(Mn-Zn 페라이트 단결정) core의 gap 부위에 Bs값이 높은 sendust나 비정질 metal 막을 sputtering하여 사용하는 MIG형 헤드가 채용되고 있다.

(2) Video 분야

Video 헤드는 영상용과 음성용 및 control용이 있는데, 영상용은 VTR의 고화질의 영상 정보의 기록과 재생을 위하여 고주파화 되고 있으며 그에 따라 영상 헤드는 향후 많은 변화가 있을 것으로 예상된다.

기존의 1/2 inch VTR은 Mn-Zn 페라이트 단결정 core을 이용하고 있다. 또한, 1989년대부터 Hi-band 8mm VTR이 등장하면서, 8mm VTR은 고보자력의 metal 증착 tape를 사용함에 따라 DAT에서와 같이 MIG형이 사용되고 있다. 한편, 기존의 VTR로부터 고화질화, 고S/N비 및 Hi-Fi 음성신호를 선호하는 경향에 따라 현재 S-VHS가 새롭게 등장하고 있는데, S-VHS에서는 기존의 VTR(1/2 inch 형)의 기록 주파수가 4.5 MHz인데 반해 7 MHz 정도의 고주파를 이용하고 있으며, tape는 기존의 Co-doped γ -페라이트를 이용하는 관계로 Mn-Zn 페라이트 단결정 core에 double azimuth를 채택한 헤드가 나왔으나, Hitachi사에서는 최근에 비정질 합금을 multi-layer로 제조한 MIG 형을 개발하여 채용하고 있다.

그림 3-1에는 기존의 Mn-Zn 페라이트 단결정과 sendust 막 및 비정질 막의 주파수 특성의 비교를 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 sendust와 비정질 단일막을 40 μ m 두께로 형성한 경우에는 Mn-Zn 페라이트 단결정보다 고주파 특성이 떨어지지만, 얇은 막을 multi-layer로 제작한 경우에는 우수한 고주파 특성을 갖는다. 또한, S-VHS tape에서는 그림 3-2에 나타낸 바와 같이 비정질과 페라이트 헤드의 출력 특성 비교에서도 비정질 재료가 다소 특성 우위를 나타내고 있는데, 이는 MIG헤드의 높은 Bs와 고주파 특성에 기인한 것으로 color S/N비는 3 dB, 휘도 S/N비를 5 dB 이상 개선할 수 있어 향후 비정질 multi-layer 헤드가 많이 이용될 것으로 전망되고 있다.

Camcorder 헤드의 경우에는 기존의 1/2 inch VHS 용 헤드를 축소시킨 VHS-C형과 8mm VTR용 헤드가 이용되고 있으며, 최근에는 S-VHS용 헤드를 채택하여 이용하고 있다. 그리고 S-VHS가 차세대

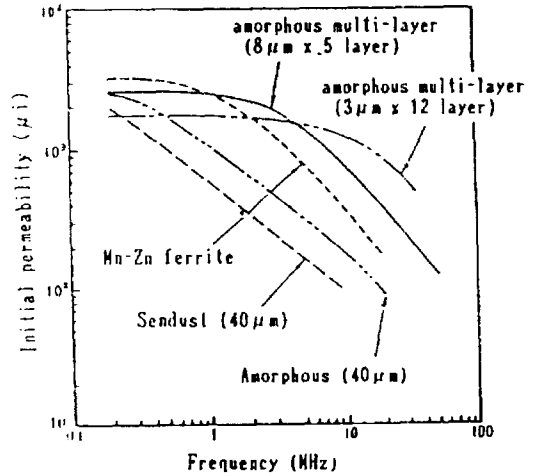


그림 3-1. Head 재료의 고주파 특성

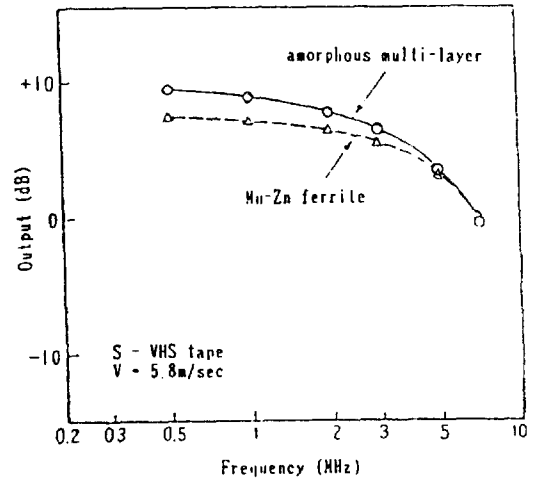


그림 3-2. Head의 주파수에 따른 상대 출력의 변화

의 VTR로써 향후 큰 수요가 예상되고 있으나, 현재에는 방송용으로만 사용되고 있는 digital VTR도 곧 수요가 폭발적으로 증가될 것으로 예상되는 HD TV와 함께 큰 수요가 예상되고 있다. 이러한 digital VTR용 헤드는 주파수가 20 MHz 정도이므로 sendust와 같은 금속막을 다층화한 박막 헤드가 채용될 것으로 예상되고 있으며 기관으로는 비자성의 ceramic이 이용될 전망이며 일부에서는 ceramic 기관에 sendust막을 4-layer로 제조한 헤드를 시제품으로 발표하고 있는 추세이다. 이와 같은 VTR용 헤드는 VTR set 시장과 직접적으로 관계되는데 그림 3-3에는 가정용 거치형 VTR과 Camcorder 시장에서 S-VHS의 발전 추세를 나타내었다.

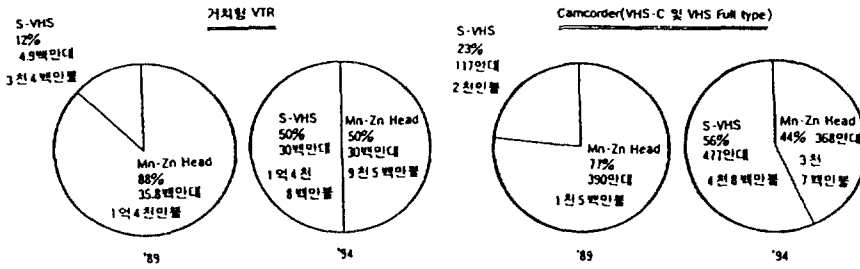


그림 3-3. 거치형 VTR 및 camcorder의 VHS비중

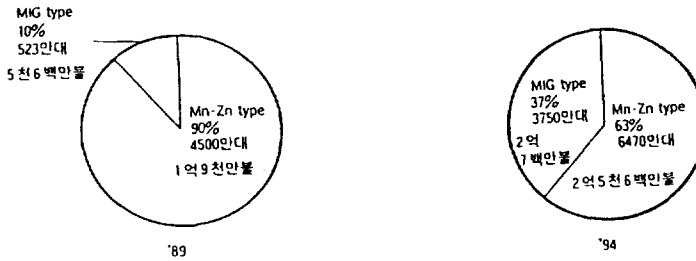


그림 3-3. MIG type 및 Mn ferrite type의 수요

그림 3-3에서 알 수 있는 바와 같이 기존의 1/2 inch VTR은 1994년에 다소 감소하고, S-VHS의 수요는 1994년에 1/2 inch VTR과 비슷한 수요로 확대될 것으로 전망되고 있으며, VTR 분야의 헤드는 그림 3-4와 같이 기존의 Mn-Zn 페라이트 단결정 헤드 수요도 확대되었지만 MIG형의 헤드의 성장이 두드러질 것으로 전망된다. 표 3-5에는 각종 헤드의 종류 및 특징을 요약하여 나타내었다.

(3) Computer 분야

Computer의 보조기억장치에서 사용되는 헤드는 보조기억장치(FDD, HDD, tape driver)에 따라 다르다. FDD 헤드는 HIP에 의한 페라이트 헤드가 주류를 이루고 있으며, 3.5 inch형의 성장이 두드러질 것으로 전망되고 있으며, HDD에서는 기존의 페라이트 헤드가 많이 이용되지만 drive와 disk의 고용량화의 추세에 따라 MIG형, composite-MIG형 및 thin film 헤드의 성장도 크게 될 것으로 예상된다. 그림 3-5에는 헤드의 종류에 따른 기록 밀도의 증가 추세를 나타내었다. 한편 tape drive에 있어서도 고소화, 고용량화를 추구하기 위하여

표 3-5. 분야별 헤드의 특징

분야	방식	헤드	특징
Audio	DAT	MIG(ferrite, sendust)	- sendust : single layer - metal tape 대응, 4.7 MHz
Video	1/2 inch VTR	ferrite	- single crystal, 4.5 MHz
	8mm VTR	MIG(ferrite, sendust)	- sendust : single layer
	S-VHS	ferrite(double-azimuth) MIG(ferrite, amorphus)	- amorphus : multi-layer - 7 MHz
	digital VTR	thin film, (sendust, amorphus)	- multi-layer, 20 MHz
Computer	FDD	ferrite	-
	HDD	ferrite, MIG thin film composite - MIG	- MR(thin film + MR)
	tape drive	ferrite, multi-gap, MIG	-

multi-channel화 하고 R DAT 방식을 채용하여 기록 밀도를 향상시키면서 소형화를 이루고 고속 access화 하고 있는 추세에 있다.

3-2-4. 특수 연자성재료 분야

특수 기능의 연자성재료 응용으로써 주목되고 있는 것은 자기저항 소자 재료와 자왜재료 및 EMI 등을 들 수 있다. 자기저항 소자는 자성 재료가 자화됨에 따라 저항의 변화가 발생하는 특성을 이용한 것으로 Fe-Ni계, Co-Ni계 합금이 많이 이용되고 있다. 이러한 자기저항 소자는 고속 정밀 제어용 motor의 회전수를 제어하고, 고밀도기록 bit의 reading에 효과적인 것으로 알려지서 고밀도 소형 모터의 회전수 제어용으로 hall 소자를 대체하고 있으며, 그림 5에 나타낸 바와 같이 HDD의 고밀도 추세에 따라 자기저항 헤드(MR 헤드)를 thin film 헤드와 복합하여, 기록은 thin film 헤드로써 inductive 방식을 이용하고 재생은 MR 헤드를 이용하고 있다. 최근 IBM에서는 MR헤드와 thin film헤드를 복합하여 제조한 헤드를 시제품으로 발표하고 있으며 고밀도기록에 대응하고 있다. 자왜재료는 자왜막막을 이용하여 외부인가 자계에 의한 표면 탄성파(SAW)를 제어하는 방식으로 magnetic-SAW를 들 수 있으며 이는 수십 MHz 이상 고주파 대역에서도 사용이 가능하여 주목되고 있는 분야이다.

한편, 최근 전파 공해에 대한 관심의 증대와 함께 EMI(전자파 차폐용) 재료의 발전도 기대되고 있다. 각종 전파 장애에 의한 noise의 제거 방법은 최근 수년 동안 현저히 발전되었으며, 특히 구미에서의 범적 규제(FCC, VDE)를 시작으로 국내(VCCI)에서도 noise에 대한 규제를 강화할 움직임을 보이고 있다. 전원 line의 전도 noise 제거용으로는 noise filter가 이용되지만, common coil에는 고부자율의 Mn-Zn 페라이트가, 또는 신호 cable 등으로부터 radiation noise 제거용으로는 고주파용 Ni-Zn계 페라이트의 수요가 높아지고 있다.

참 고 문 헌

1. 조상희 "Electronic Ceramics의 합성과 소결에 미치는 원료분체 및 혼합방법의 고찰" 대한 화학학회 제42회 추계총회 (1978)
2. E.P. Wohlfarth, "Ferromagnetic Materials" Vol.3. North-Holland Publishing Co. (1982)
3. W.J. Schulz, V.O. Deetschek, " Fine Particles, Ferrites Ultrafine Particles", p.218 Edited W.E

- Kuhn, New York, Wiley, (1963)
4. R.M. Glaister, N.A. Allen, N.J. Hellicar, Proc. Brit. Ceramic. Soc., 3, 67 (1965)
5. H. Schreeder, Z. Phys. Chem., Leipzig, 236, (1967)
6. Yu, D. Tretyaker, I. Y. Kosimskaya, and A.A. Petrova, Izv. Akad. Nauk, SSSR, Neorg. Master, 5, 1755 (1969)
7. S. Okamoto, J. Amer. Ceram. Soc., 52, 110 (1964)
8. 高田, 電氣化學, 37, 328 (1969)
9. A.N. Christensen, Mat. Res. Bull, 6, 691 (1971)
10. A.A. Giessen, Klei Keram., 20, 30 (1970)
11. T. Akachi, I. Sagano, J. Okuta and T. Tsuji, Proc., 1st, Internat'l. Conf. on Ferrites, P. 96 (1970)
12. J.G.M. Delan, Amer. Ceram. Soc. Bull., 49, 572 (1970)
13. R.F. Belt, and G.C. Florioi, ibid., 51, 123 (1972)
14. M.L. Nielsem, P.M. Hamilton and R.J. Walsh, "Ultrafine Metaloxides by Decomposition of Salt in Flame, Ultrafine Particles", P.181, Edited W.E. Kuhn, New York Wiley (1963)
15. D.W. Johnson and F.J. Schnettler, J. Amer. Ceram. Soc., 53, 440 (1970)
16. 김희중, "PERMALLOY의 제조 기술 및 자기적 특성", App. Phys. Sym. 5th, pp.49-57 (1990)
17. H.D. Arnold and G.W. Elmen, J. Mag. Mat. 195, 621 (1923)
18. 中本, 山本, 日本金屬學會誌, 1, 127 (1937)
19. 山本, 移川 : 日本金屬학회지 40, 975 (1976)
20. 紫谷, NHK 技報, 29(2), 51~106 (1977)
21. 田村, 第4回 日本應用磁氣學會概要集, p.55 (1980)
22. 梅崎, 第4回 日本應用磁氣學會概要集, p.52 (1980)
23. 第6回 日本應用磁氣學會概要集, p.189 (1982)
24. M. Umesaki et al. IEEE Trans. Mag. MAG-18 (6), 1182 (1982)
25. 村上, 録音研究會 VR65-4, p.19 (1984)
26. 노태환, "비정질 자성합금의 제조 및 응용", App. Phys. Sym. 5th, pp.49-57 (1990)
27. T.Masumoto, K.Suzuki, H.Fujumori and K.Hashimoto : Materials Science of Amorphous

- Metals(in Hapanese), Ohm Co, Tokyo(1982)
26. A.Inoue and T.Masumoto : 공업재료, 36(9), (1988) 38
27. T.Masumoto et al. : Function & Materials, 6(8) (1986)
28. H.Warlimont : Mat.Sci.Eng., 99 (1988) 1
29. K.Narita et al : アモルフラス磁性材料 の 現 狀 と問題點, 전기학회기술보고(II) 195 (1985)
30. T.Sato et al. : 응용개발진むアモルフラス金屬 材料, CMC, Tokyo, (1982)
31. F.E.Luborsky : Amorphous Metallic Alloys, Butterworth and Co., London, (1983)
32. Y.Yoshizawa et al. : J.Japan Inst. Metals, 53 (1989) 241
-

저자소개



양계준

1955년 9월 25일생. 1978년 2월 충남대 공업교육학과(전기) 졸업. 1984년 2월 충북대 전기공학과 졸업(석사). 1990년 성균관대 전기공학과 박사과정 수료. 현재 충주공업 전문대학 전자과 조교수.



박용관

1935년 9월 16일생. 1958년 2월 인하대 전기공학과 졸업. (1977년 인하대 대학원 졸업(석사). 1987년 (공박). 현재 성균관대학교 전기공학과 교수.