

아몰퍼스 합금과 전원회로 응용

■ 김철진 / 한라대학교 전기전자제어공학부 교수

1. 아몰퍼스 합금

일반적으로 물질을 구성하는 원자는 열역학적 안정 상태에서 그 물질 특유의 기본격자의 결정 배열을 갖는데 반해, 아몰퍼스 물질은 원자배열이 규칙적 질서를 갖지 않으므로, 원자가 규칙적으로 정연한 구조를 갖는 결정에 대응하여 비정질(非晶質) 또는 무정형의 의미로 사용되고 있다.

아몰퍼스 합금(Amorphous Alloys)은 1960년대 후반에 개발된 고효율 특성을 나타내는 신기술 재료라 할 수 있으며, 구성금속의 원자배열이 불규칙한 비정질 상태의 합금으로 급속응고 공정을 통해 액체상태의 합금을 급냉하여 제조함으로써 결정화되지 않은 유리과 유사한 구조를 갖는다.

아몰퍼스합금은 합금이 되는 구성 원소의 종류와 그 조성비를 기준으로, 천이 금속과 비금속이 20-30% 정도의 원자 조성을 갖는 비금속 합금, 금속과 금속계의 합금으로서 원자 반경이 크게 다른 원자의 조성 및 희토류와 철족계의 합금 등으로 분류할 수 있다.

아몰퍼스의 생산에는 각종 주변 기술을 이용하여 매초 백만도 정도의 급속한 응고기술을 사용하며, 재료의 미세한 결정은 전통적인 금속이나 합금재료와 전혀 다른 특성을 나타낸다.

이러한 기술은 전통 야금 공업기술과 금속 재료학

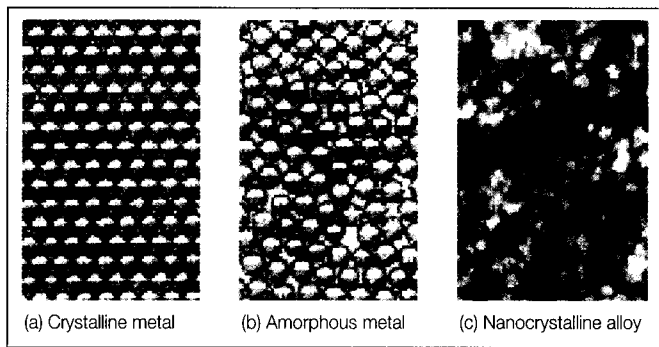


그림 1-1 금속과 아몰퍼스 합금의 결정 구조

의 일대 혁명이라 할 수 있으며, 아몰퍼스 및 나노결정(nano-crystalline)합금은 뛰어난 자성을 나타내고, 강도와 경도가 높으며, 내마모성, 내식성과 높은 열전도성을 나타내는 특징을 갖는다.

다음의 그림 1-1은 금속과 아몰퍼스 합금의 결정 구조를 나타낸 그림이다.

그림(a)와 같이 일반적인 결정금속(Crystalline metal)은 고체에서의 원자가 주기에 따라 배열되어 질서가 있으며, 그림 (b)와 같이 아몰퍼스(Amorphous metal)는 고체에서의 원자는 주기적으로 배열되어 있지않고 긴 쪽으로 질서가 없는 특징을 나타내고 있으며, 그림 (c)의 나노결정 합금(Nanocrystalline alloy)은 입자크기가 100 [nm]미만의 나노결정으로 구성되어 있다.

최근에는 자성체를 이용하는 각종 산업 분야에서 규소강, 퍼멀로이(Permalloy)합금, 페라이트

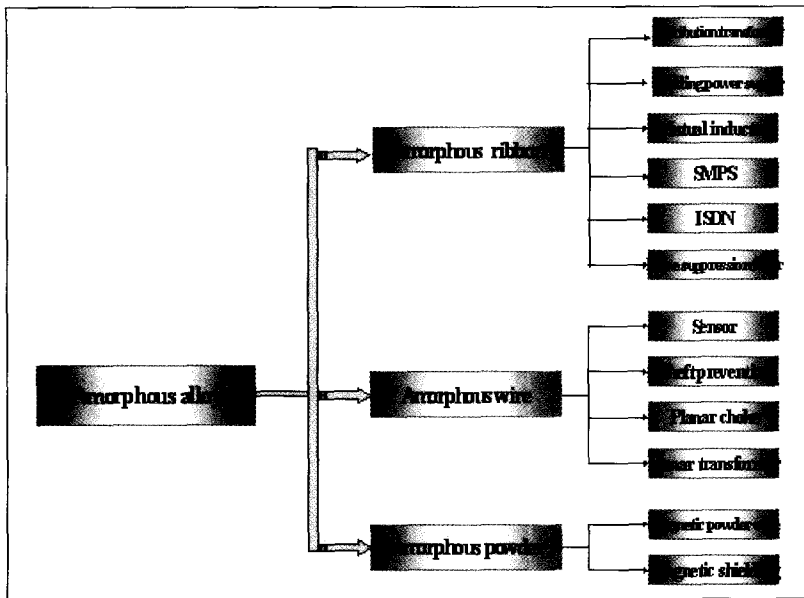


그림 1-2 형태에 따른 아몰퍼스 합금의 응용

인버터(Inverter), 스위칭 전원 공급장치, 누전보호기, 노이즈 필터(Filter), 통신장치(ADSL/ISDN) 등을 들 수 있다.

응용의 측면에서 아몰퍼스 합금을 분류하면 리본형(ribbon), 선형(wire) 분말형(powder) 등으로 분류할 수 있으며, 리본형태의 경우는 배전용 변압기, 용접기용 전원, SMPS, 노이즈 필터, ISDN 등에 주로 사용되며, 선형의 경우는 센서, 평면의 초크(choke) 및 평면 트랜스포머 등에 적합하며, 분말형의 경우는 자기차폐(shield) 등에 적합하다.

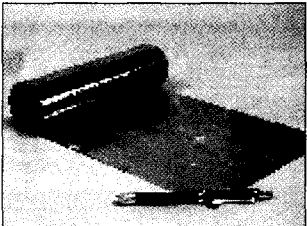


(Ferrite)계 등 전통적인 연자성 재료의 코어 부품을 체적이 작고 효율이 높으며 에너지 절약 등의 장점을 갖는 아몰퍼스 합금으로 대체하는 경향이 두드러지게 나타나고 있다.

아몰퍼스 합금의 적용이 활발하게 적용되는 분야로는, 변압기, 인덕터(Inductor), 리액터(Reactor),

다음의 그림 1-2는 형태에 따른 아몰퍼스 합금의 응용분야를 나타낸 그림이다.

다음의 표1-1은 리본형상의 아몰퍼스 합금의 전자적 특징과 응용 분야를 요약하여 나타낸 것이다.

표1-1. 리본형상의 아몰퍼스 합금의 전자적 특징과 응용

	철계 아몰퍼스 리본	철계 나노크리스탈 리본	코발트계 아몰퍼스 리본
특징	높은 자속밀도 (1.56T) 고투자율 저손실(규소강판의 70%이하)	높은 자속밀도 (1.25T) 고투자율(40×10 ⁴) 페라이트에 비해 저손실	중급자속밀도 (0.5-0.8T) 고투자율(40×10 ⁴) 페라이트에 비해 저손실
응용	배전용 트랜스포머, 20KHz 이하의 트랜스포머 인덕터 및 리액터용 코어	전력용, 접지 검출용 인덕터, 고주파 SMPS 용 트랜스포머	고주파 SMPS용 트랜스포머, 필터용 인덕터, 고주파 가포화 리액터 방범용 센서
형상			

2. 기본 특성

일반적인 자성체는 인가된 전원의 주파수에 따라 자구가 변화되며, 변화에 소요되는 자기에너지인 히스테리시스(hysteresis) 손실이 존재하게 된다.

아몰퍼스 합금은 본질적으로 결정 자기 이방성이 없는 비정질 구조를 갖고 있어 자구의 유동성이 우수하고 낮은 보자력과 높은 투자율 특성을 갖기 때문에 기존의 규소강판 코어에 비해 자화가 쉽게되어 코어의 손실을 약 75% 이상 줄일 수 있어 효율의 향상을 기할 수 있다.

또한, 아몰퍼스 합금은 규소강판의 이하의 박막으로 전기저항이 규소강판에 비해 약 3배 정도로 크기 때문에 유기된 전압에 의한 와전류 손실이 매우 적고 고주파 특성이 우수하며 기계적 강도가 강하고 탄성이 높은 특성을 갖는다.

다음의 그림 2-1은 각종 연자성 재료의 주파수에 대한 자속 밀도 특성을 비교하여 나타낸 그림이다.

그림으로부터 아몰퍼스 합금은 페라이트에 비해 자속밀도가 높고, 규소강판에 비해 고주파 동작이 우수한 것을 알 수 있다.

아몰퍼스합금은 본래 화학적 활성이 높아 금속 속 에 부동화막을 형성하기 쉬운 *Cr*이나 *Mo* 등의 금속

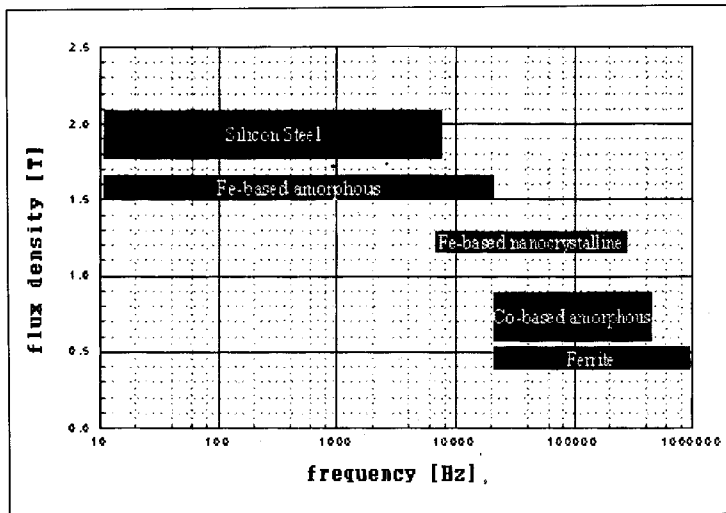


그림 2-1 각종 연자성 재료의 주파수 특성

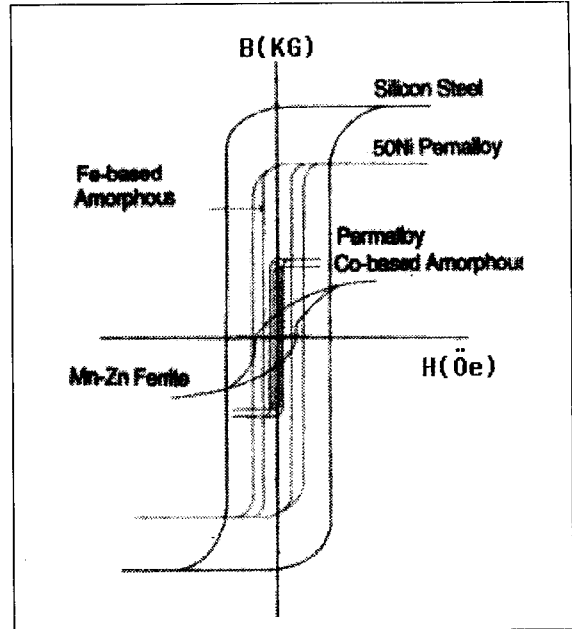


그림 2-2 각종 자성체의 자화특성

을 첨가함으로써 내식성이 우수하고, 기계적으로는 결정 재료에 비해 현저하게 높은 강도와 경도를 가지나, 생산공정에서 가공이 어려운 특징이 있다.

다음의 그림 2-2는 각종 자성체의 자화특성을 나타낸 그림이다. 그림으로부터, 철계의 아몰퍼스 코어는 저주파 응용에 적합한 규소강판에 비해 자화에 따른 히스테리시스 손실이 현저히 적고, *Mn-Zn*계의 페라이트 재료에 비해 고투자율 특성을 나타내는 것을 알 수 있다.

다음에 제시하는 표 2-1은 각종 연자성재료의 전자기적 특성을 나타낸 것이다.

그림 2-3은 자기회로에 일반적으로 응용되고 있는 자성재료의 주파수에 따른 자속밀도의 특성을 나타낸 그림이다. 그림으로부터, 규소강판의 경우는 1[KHz]이하의 저주파 응용에 적합하며, 페라이트의 경우는 고주파 응용에 적합하나 자속밀도는 아몰퍼스 합금에 비해 낮은 것을 알 수 있다.

표 2-1. 각종 연자성재료의 전자기적 특성

Basic performance comparison of various soft magnetic materials

Materials	Silicon Steel	Permalloy		Ferrite Mn-Zn	Amorphous Alloy		nano-alloy
		50Ni	80Ni		Co-based	Fe-based	
Saturation Induction, B_s (G)	20,000	15,500	7,400	0.5	5,800	15,600	12,000
Coercive Force, H_c (Oe)	0.5	0.15	0.03	0.1	0.005	0.03	< 2 A/m
Initial Permeability, μ_i	1,500	6,000	40,000	3,000	60,000	5,000	
Maximum Permeability μ_m	20,000	60,000	200,000	6,000	1,000,000	50,000	60,000
Electric Resistivity, ρ ($\mu\Omega/cm$)	50	30	60	10 ⁻⁶	120	130	130
Curie Temperature, T_c (°C)	750	500	500	140	255	415	550
Crystallization Temp. T_x (°C)	-	-	-	-	530	550	-
Square rate, B_r/B_s (%)	-	-	-	30	90	-	80

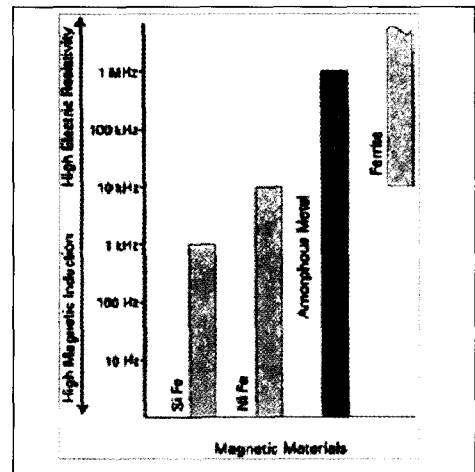
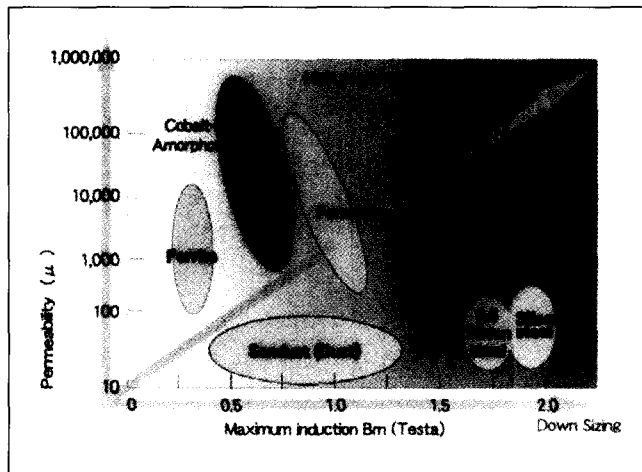


그림 2-3 각종 자성재료의 주파수에 따른 자속밀도 특성

한편, 철계 아몰퍼스재료의 경우는 저주파 영역에서 부터 약 20 [KHz]이하의 중간 주파수대역의 응용에, 철계 나노결정구조(nanocrystalline)의 경우는 약 200 [KHz]이하의 주파수응용에, 코발트계 아몰퍼스는 수십~수백의 동작용역에 적절하게 응용될 수 있다.

3. 생산기술

50/60 [Hz]의 저주파 전원이 전력기기에 인가됨에

따라 철심에는 무부하 상태에서도 자화에 따른 히스테리시스 손실과 유기 기전력에 의한 와전류 손실이 발생한다.

다음의 그림3-1은 전기기기에 대표적으로 적용되는 규소강판 코어 및 아몰퍼스 코어를 사용한 경우의 자화특성을 비교한 그림으로, 동일 조건에서 아몰퍼스를 사용한 경우가 자화손실이 현저히 저감되어 에너지 절감 효과를 기대할 수 있다.

일반적으로, 아몰퍼스 금속재료는 용융금속을 초당 약 1백만도의 냉각속도로 급냉시켜 리본형태로

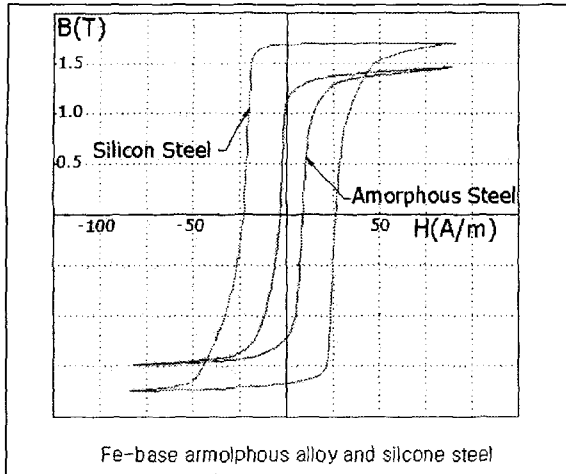


그림 3-1 규소강판 및 아몰퍼스 코어의 자화특성 비교

만들어지며, 매우 높은 냉각속도로 만들어지기 때문에 리본의 두께는 일정 범위로 제한될 수밖에 없으며 대체로 30[μm]정도의 두께를 갖는다.

이러한 새로운 생산기술은 기존의 생산공정에서 주조나 단조 또는 압연 및 열처리 등의 공정을 제거하여 에너지 절감을 기할 수 있다.

다음의 그림 3-2는 생산공정의 개념과 주상변압기용 아몰퍼스 코어를 생산하는 실제 생산하기 위한 생산설비를 나타낸 그림이다.

아몰퍼스 합금을 제조하기 위해서는 액체를 급속 냉각하는 것이 일반적이나, 이 방법 외에도 액체상 응고 제어법, 기체상 응고 제어법, 고체상 반응 제어법, 벌크 처리법 등이 있으며 각각 다음과 같은 특징을 갖는다.

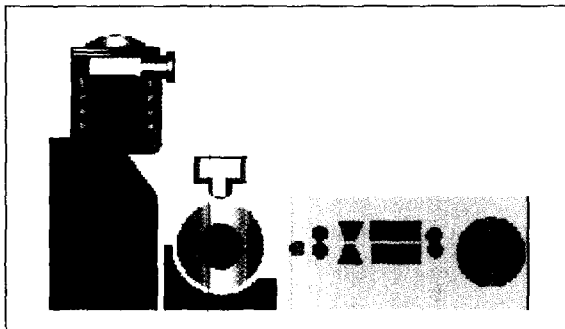


그림 3-2 생산공정의 개념과 아몰퍼스 코어 생산설비

(1) 액체상 응고 제어법

이 방법은 합금의 용융물을 급냉하여 원자가 규칙적 배열을 갖는 결정상태로 되기 위한 시간에 제한을 가함으로써 열역학적 평형구조인 결정을 취하지 못하고 동결되어 고체의 비정질 상태가 되는 원리를 이용한 제조 방법을 의미한다.

액체상 응고 제어법은 가장 일반적으로 사용되는 제조법으로 1950 년대에 단일 롤(roll)방법이 고안된 이후 박막띠를 양산하는 제조기술이 확립되어 현재 두께 30 [μm], 폭 20 [cm]정도의 박막 리본을 양산하고 있다.

또한, 1980년에는 회전 수중 방습법이 개발되어 가는 선(wire) 형태의 아몰퍼스 재료를 만들 수 있게 되어 최대지름 0.2 [mm]의 연속선이 수만 [m] 단위로 만들어지고 있다.

한편 분말을 만드는 각종의 원자화법의 기술개발로 수십~수백[μm] 정도의 입자가 만들어지고 있다.

(2) 기체상 응축 제어법

종래에는 주로 스퍼터(sputter) 기술로 박막을 제조하여 왔으나 최근에는 초미립자나 다층막, 나노복합막과 같은 특수 박막의 제조가 가능하게 되었다.

초미립자는 미리 기판 위에 고밀도의 돌기를 만들고 그 위에 합금을 스퍼터에 의해 퇴적시켜 초미립자를 생성하는 방법이며, 다층막은 복수의 타겟(target)을 사용하여 서로 다른 아몰퍼스 합금을 나노미터 정도의 두께로 교대로 퇴적시킨 것이며, 나



노복합막은 2종의 아몰퍼스 재료를 나노미터 단위로 혼합시킨 것으로 어느 것이나 다기능성을 가진 재료로서 기대되고 있다.

(3) 고체상 반응 제어법

가장 유망한 방법이라 할 수 있으며, 상온 부근의 저온에서 2종의 결정 금속의 다층막을 가열함으로써 아몰퍼스 합금을 제조하는 고체상 확산법과 금속간 화합물에 수소를 흡수시켜 아몰퍼스를 제조하는 가스 흡수법 등이 있다.

최근에는 2종 이상의 금속 분말을 고에너지 볼 밀(ball mill)로 혼합하여 아몰퍼스 합금을 생산하는 기계적 합금법이 주목받고 있다.

(4) 벌크 처리법

금속 재료 표면에 화학 도금이나 레이저 가열 등으로 아몰퍼스 합금을 입히는 방법이 있으며, 충격 충 등으로 고형화하는 방법이나 결정화가 이루어지기 직전의 온도에서 고압 소결하여 고화하는 방법이 있다.

최근에는 초음파나 가압에 의한 접합법이나 레이저

에 의한 용착 방법에 관한 연구가 이루어지고 있다.

4. 외로 응용

(1) 전원회로의 응용

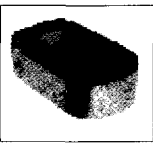
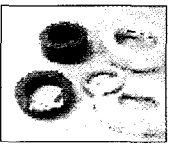


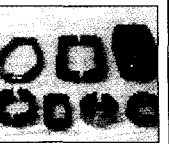
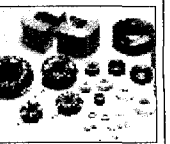
아몰퍼스 금속의 원자는 결정자기 이방성이 없으므로 자계의 변화에 따라 쉽게 회전하는 원자배열의 특성 때문에 히스테리시스손실이 적고 자속밀도가 높고 보자력이 적어, 기존의 규소강판 및 페라이트 자성체를 대체하는 신소재로서 주목받고 있으며 응용분야의 확대가 기대된다.

다음에 제시하는 표 4-1 은 각종 전원회로에서 아몰퍼스 합금의 응용과 형상을 나타낸 것이다.

아몰퍼스 합금은 고주파 대역에서의 우수한 연자성 특성으로 인해 전자부품의 소형화 고효율화를 선도하고 있으며, 스위칭 전원장치(SMPS)의 각종 부품 및 DC-DC컨버터, 인버터, 전력용 트랜스포머 등에 응용되고 있으며 기존 재료에 비하여 부품의 효율을 현저하게 증대시킨다.

다음의 그림 4-1은 스위칭 전원장치의 기본구조를 나타낸 그림이다. 그림에서 아몰퍼스 코어는 전력

표 4-1. 전원회로에서의 아몰퍼스합금의 응용

	배전용 트랜스포머	전력용 인덕터 (저주파)	트랜스포머 (중간 주파수)	고전력 트랜스포머 (고주파)	고전력 리액터	저전력 초크 (고주파)
특징	동작점(1.2-1.3T) 고투자율(무부하손실 저감)	저 주 파 용 (50 / 60Hz) 고투자율(저 코어손실)	주 파 수 : 50Hz - 10KHz 고투자율(저손실 높이 낮음)	동작주파수(100 kHz) 고투자율 저손실 높이 낮음 고효율	동작주파수(100 kHz)고투자율 저손실 온도 안정성 우수	동작주파수(200 kHz)고투자율 코어손실 최소 온도 특성 양호
응용	유입식, 건식 배전용 변압기	전력용 inductor 정밀 inductor	항공분야, 주파수 변환장치 등	고주파 전력용 SMPS용 트랜스포머 인버터 용접기 전원	고주파 전력용 SMPS 인덕터 리액터	평활용 초크 CMC 자기증폭기 Spark Killer
형상						

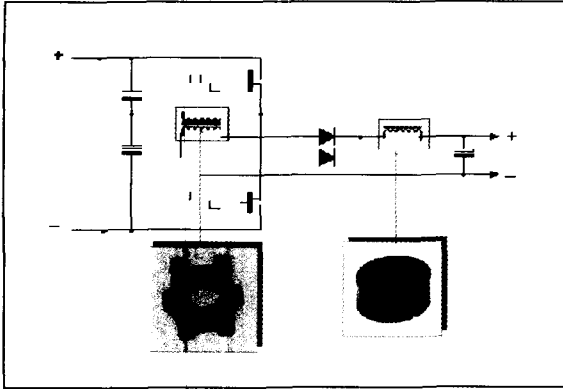


그림 4-1 스위칭 전압정자의 아몰피스 응용

용 트랜스포머 뿐만 아니라 일정한 출력 전류를 유지하는 초크(choke)코어에도 응용이 가능하며, 고각형비, 고투자율 특성을 이용하여 반도체 소자에서 발생하는 급격한 전류변화를 억제하고 노이즈를 방지하기 위한 노이즈 필터 등에 적용이 가능한 것을 알 수 있다.

(2) 자기 증폭기(Magnetic-Amplifier)

자기증폭기에 적용되는 아몰피스 코어는 반도체를 대체하여 on/off 의 스위칭 동작을 함으로써 출력단의 평균전압을 제어하기 때문에 보자력(H_c)이 적고 포화 자속밀도(B_s)가 큰 고각형 특성이 요구된다.

다음의 그림 4-2는 아몰피스 코어를 이용한 자기

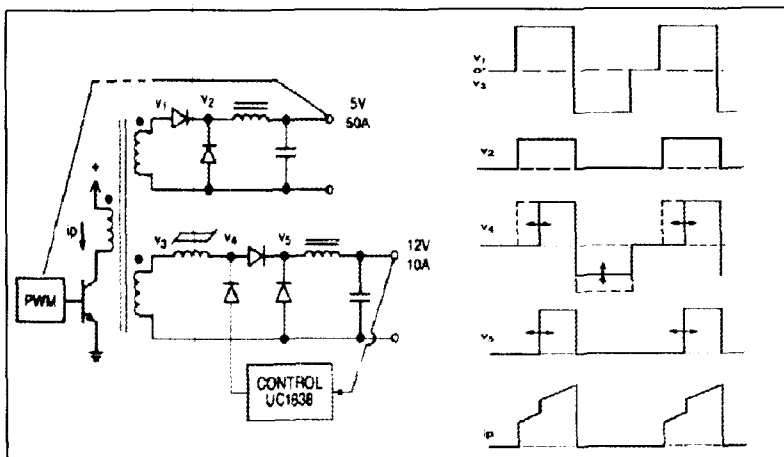


그림 4-2 자기증폭기 회로 구성 및 파형

증폭기의 기본 원리를 나타낸 그림이다.

그림에서, 출력전압이 설정치(V_{ref}) 보다 높은 경우는 IC 내부의 오차증폭기(OP-Amp)를 통하여 출력 전압의 오차가 증폭되어 아몰피스를 적용한 가포화 리액터는 고임피던스 상태를 나타내게되며, 리액터 양단의 전압강하(V_3-V_4)가 크게되고 출력전압은 설정치에 추종하게 되어 정전압을 유지하는 동작을 하게 된다.

출력전압이 설정치 보다 낮은 경우는 반대의 동작이 이루어져 가포화리액터가 포화하게 되고 리액터 양단의 전압강하가 작아짐으로써 출력전압은 정전압이 유지되는 원리를 갖는다.

자료작성에 도움을 주신 (주)모선테크 관계자께 감사드립니다.

[참고문헌]

- [1] Milan M. Jovanovic, Laszlo Huber, "Small-Signal Modeling of Magamp PWM Switch", Applied Power Electronics Conference, pp.922-928, 1997.
- [2] Audrey M. Urling, Joe Paulakonis, et al., "Modeling the Frequency Domain Behavior of Magnetic Amplifier Controlled High Frequency Switched Mode Power Supplies, Applied Power Electronics Conference, pp. 19 - 31,1987.
- [3] O.N. Nelson, "Time share mag amp", High Frequency Power Conversion Conference, pp.49-54, 1988.
- [4] Chau-Chun Wen, et al., "Magamp Post Regulator in Flyback Converter", Power Electronics Specialties Conference, pp. 333-338, 2001.
- [5] Bob Mammano, "Magnetic amplifier control for simple, low-cost, secondary regulation", Unitrode corp., app. note part7, pp1-7, 2001