

변압기설계 및 동작원리(I)

김 정 호

(한국전기전자시험검사소 시험연구부장)

1. 서 론

trans는 전압을 올리고 내리는 종의 장치로서 교류에만 작동한다.

trans는 2개 이상의 coil을 공통자로에 결합시킨 것으로 coil 한쪽에 교류 또는 ripple current를 흘리면 다른쪽 coil엔 자력선 변화에 따르는 전류 변화가 생겨 coil turn수에 비례하는 전압이 유기 되는 것을 이용하는 장치이다.

trans는 용도에 따라 고주파(RF-Radio Frequency)와 저주파(AF-Audio Frequency)로 구분하며 고주파용은 core가 공심 또는 ferrite로 되어 있다.

저주파용의 trans는 si강판이나 permalloy(자심 재료의 일종으로 nickel 40~90%와 Mn, Fe의 합금)등의 철심을 많이 사용한다.

trans의 종류는 전자기에 사용하는 power trans를 비롯하여 neon trans, 점화용 trans, 용접용 trans, 중간주파 trans, pulse trans, flyback trans 등 상당히 많지만, 주파수별로 크게 나누면 앞에서 논한 바와 같이 고주파와 저주파 trans로 구분 된다.

전력공급을 목적으로 한 가정용 소형 변압기나 전자기기용의 power trans, neon trans 등은 저주파 trans이고 중간주파 trans나 pulse trans 및 fly back trans는 고주파용의 trans이다.

저주파 trans는 audio용을 제외하고는 대부분

전원주파수 전용이며 가정용 소형 변압기는 전력 공급을 목적으로 한 power trans의 일종이다.

1KVA를 중심으로 만들어진 가정용 소형 변압기는 주로 220V를 110V로 낮추는 down trans인데, 전압 조정과 경보장치를 겸한 것도 있다.

1950년대(6.25 전란 당시)에는 전압 사정이 엉망이었는데 진공관식의 미제 radio를 듣기 위해서 전압조정이 가능한 소형의 승압 trans가 많이 유행하였었다. 당시의 trans 입력측은 100V이고 출력은 117V였다. case는 지금처럼 철 case가 아니고 나무 상자로 된 case였기 때문에 누자속의 영향을 많이 받았다.

당시는 전시상황으로 모든 것이 부족한 상태였기 때문에 지금처럼 정상적인 규격의 trans는 기대할 수 없었고 모든 것이 변칙적이었다.

말이 나왔으니깐 한마디 하지만 당시에 core는 미군쓰레기에서 나오는 ratio box의 철band를 잘라 사용하였는데, 과류를 막기 위해서 철 band에 varnish를 발라 사용하였었다.

이렇게 해서 만들어진 trans는 나무로 만든 상자에 넣어 시판되었는데 trans의 수명은 길어야 한달이었다.

그러나 radio의 news 때문에 이 엉터리 trans는 불티나게 팔렸었다. (당시는 전시상황을 radio news에 매달리는 길 밖에 없었다.)

전화 cable을 분해하여 사용하던 coil(?)은 너무

가늘어서 3~5가닥씩 합쳐서 사용하였으나 varnish를 잘못 바른 곳은 short되기도 하였다.

3~5가닥중 어느 한 가닥만 short되는 경우는 측정이 불가하여 모르고 사용하였고 열이 너무 심하여 얼마 못가서 곧 타버리곤 하였다.

2. Trans 설계에 필요한 공식

trans를 설계할 때는 여러가지 참작하여야 할 사항이 많이 있지만 core의 크기나 coil의 굵기 및 전압에 따르는 coil의 회수 등을 정하는 문제가 제일 중요하다.

core의 단면적이나 coil의 굵기 및 coil의 회수는 표 1의 공식을 이용하면 편리하다.

〈표 1〉 Trans설계 공식

core의 단면적: $S \approx 1.3\sqrt{1.11ps/\mu}$ (cm ²) ①
공식 coil의 직경: $0 \approx \sqrt{I/2}$ (mm) ②
coil의 회수: $N \approx \frac{18V}{4.44 \cdot F \cdot B \cdot S} (T)$ ③

V: 전압(V)	I: 전류(A)
Ps: 2차측 피상전력(VA)	F: 주파수(Hz)
μ : 능률(70~90%)	B: 자속밀도(gauss/cm ²)

1) Core의 단면적

core의 단면적은 그림 1과 같이 coil이 감기는 철심의 크기로서 표 1의 공식 ①을 이용하면 용량별 core의 단면적 크기를 쉽게 구해 낼 수 있다.

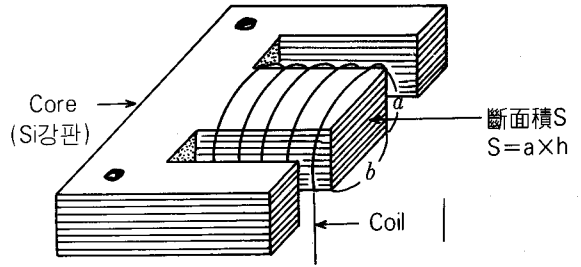
필요한 용량의 단면적 크기를 사전에 산출해서 표 2와 같이 VA-cm² curve를 그려 두면 사용하기에 편리하다.

표 2는 능률을 90% 정도로 보았을 때를 산출한 것으로 표 1의 공식 ①을 이용해서 100VA~1000VA 까지만 그린 것이다.

core의 단면적은 표 1의 공식 ②에 의해서 구하지만 trans가 복권선이 아니고 단순선인 경우, 단순히

※ core의 단면적 $S \approx \sqrt{1.11ps/\mu}$ (cm²)

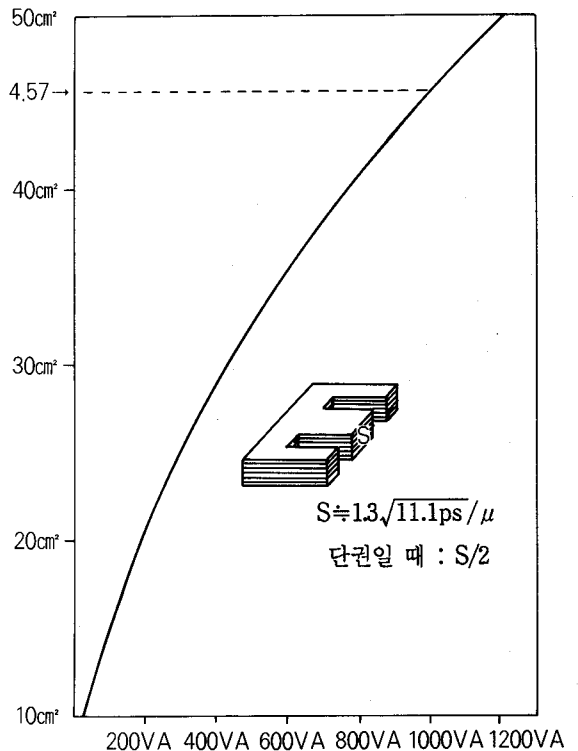
$S \approx 1.3\sqrt{1.11ps \times 100/\mu} = 14.4$ (cm ²)	$S \approx \sqrt{1.11ps \times 600/\mu} = 35.4$ (cm ²)
$S \approx 1.3\sqrt{1.11ps \times 200/\mu} = 20.4$ (cm ²)	$S \approx \sqrt{1.11ps \times 700/\mu} = 38.2$ (cm ²)
$S \approx 1.3\sqrt{1.11ps \times 300/\mu} = 25.0$ (cm ²)	$S \approx \sqrt{1.11ps \times 800/\mu} = 40.8$ (cm ²)
$S \approx 1.3\sqrt{1.11ps \times 400/\mu} = 28.9$ (cm ²)	$S \approx \sqrt{1.11ps \times 900/\mu} = 43.3$ (cm ²)
$S \approx 1.3\sqrt{1.11ps \times 500/\mu} = 32.3$ (cm ²)	$S \approx \sqrt{1.11ps \times 1000/\mu} = 45.7$ (cm ²)



〈그림 1〉 Core의 단면적

중간 tap만을 꺼내서 쓴다면 반으로 줄어들게 된다.
그리고 부하가 항상 full로 걸리는 것이 아닐 때는 몇 % 감안하여 설계치를 더 줄일 수 있다.

〈표 2〉 용량별 Core의 단면적



그러나 core의 단면적을 정상적으로 줄이지 않고 cost down 측면에서 무리하게 줄이게 되면 coil의 굵기나 turn수도 줄어들 수 밖에 없게 되며 절연두께도 영향을 받게 되어 결국 불량품이라는 낙인을 찍히게 되는 경우가 생긴다.

1KVA 용량의 단권 trans로써 부하량을 60%라고 보았을 때를 예로써, core의 단면적을 한번 구해 보면 다음과 같이 되어 단면적 S가 약 13.8cm² 정도 된다.

즉 공식 $S=1.3\sqrt{1.11ps/\mu}$ (cm²)에서
 $Ps=100VA$, $\mu = 0.9$ 를 대입하여 풀면
 $S=1.3\sqrt{1.11 \times 1000/0.9} \approx 45.7$ (표 2의 A점 참조)
 ※ 단권인 경우이므로 S/2가 되어 core의 단면적은 22.9%가 된다.
 $45.7/2 \approx 22.9$
 22.9%의 60%를 보면 $22.9 \times 0.6 \approx 13.8$ 이 된다.
 ※ 계산할 때 소수점 이하는 무조건 올린다.

core의 단면적을 부하율을 참작하여 적당히 줄여주게 되면 vlot당 coil의 turn수가 증가하게 되어 coil의 굵기도 줄이지 않을 수 없는 입장에 처하게 된다.

① 와류손(eddy current loss)

도체에 변화하는 자력선이 작용하였을 때 내부에 생기는 소용돌이 같은 전류를 와류라고 하며 이 와류에 의한 전력손실을 와류손이라고 한다.

와류손을 줄이기 위해선 철심을 얇은 판으로 하여 절연을 시킨 후 합쳐서 성층철심으로 해 주면 된다.

그림 2의 (a)와 같이 core를 한개의 철심으로 하면 어느 한 순간 coil에 흐르는 전류의 방향과 반대로 철심에 와류가 생기게 된다.

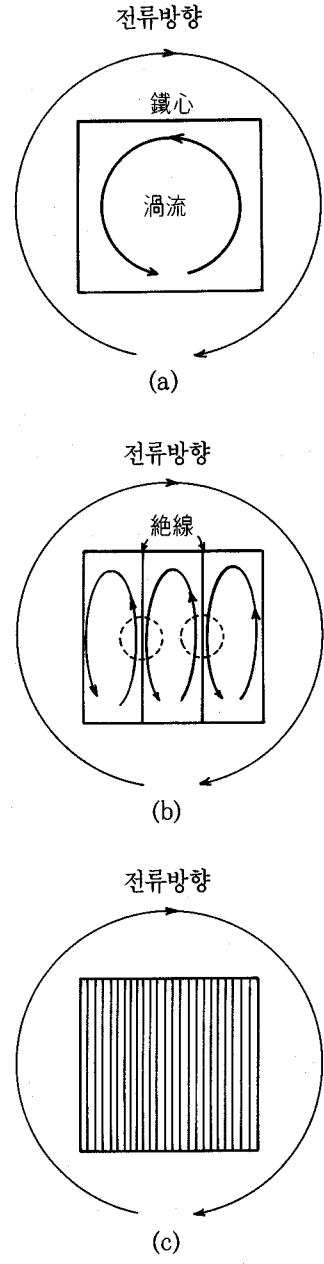
그러나 그림 2의 (b)처럼 철심을 몇 등분으로 나눈 후 접합면을 절연처리하여 주면 와류도 나뉘어져 흐르게 되며 접합부분은 와류가 서로 상쇄되어 없어지게 된다.

따라서 그림 2의 (b)는 (a)때보다 와류가 많이 줄어들게 된다.

만일 core를 그림 2의 (c)와 같이 철심을 더 얇게

나누어 절연처리를 한 후 사용하게 되면 와류는 거의 없어지게 된다.

와류손은 정상적으로 제조된 core라 할지라도 절연의 이상이 있을 때 커지게 되며 core joint 부분의 결합이 생겨 자료가 끊길 때도 일부의 세력이 와류손으로 된다.



〈그림 2〉 Core와 와류손

② Hysteresis손

전류주파수에 따라 자화력의 방향이 기적으로 변화할 때 철심에서 발생되는 열손으로써 core재질에 따라 영향을 많이 받는다.

hysteresis손의 크기는 다음 식으로 표시한다.

$Ph = y \cdot f \cdot Bm^{1.6} (W/m^3)$	
Ph : hysteresis손(W/m ³)	f : 주파수(Hz)
Bm : 최대자속밀도(Wb/m ²)	μ : hysteresis 계수
1.6 : Steinmetz's 정수	

※ Steinmetz's 정수란 단위체적당 철심 속에 생기는 hysteresis손을 나타내는 실험속으로서 Steinmetz가 제안하였다.

③ 철손(Core Loss)

철심속을 통하는 자속이 변화할 때 철심에 생기는 손실로서 열손의 일종이다.

철손은 무부하손실로서 앞에서 설명한 와류손과 hysteresis손을 합친 열손실의 일종이다.

철손을 줄이기 위해선 자성재의 두께나 재질특성 주파수 및 인가전압등에 연구 검토가 있어야 하는데 이러한 것들은 trans 제조회사가 할일은 아니다.

trans 제조회사는 cutting시 burr 처리 문제나 core의 joint문제 등 물리적인 방법 이외에 손덜 것이 없다.

④ 동손(Copper Loss)

일종의 저항손으로써 동선에 전류가 흐를 때 발생하는 joule열의 손실이다.

※ joule열 $H = I^2R(J)$ or $0.24I^2R(cal)$

동손을 줄이기 위해선 동선의 저항 성분을 줄이는 것이 우선인데 그렇게 하기 위해선 coil의 굵기를 무리하게 줄이지 말아야 한다.

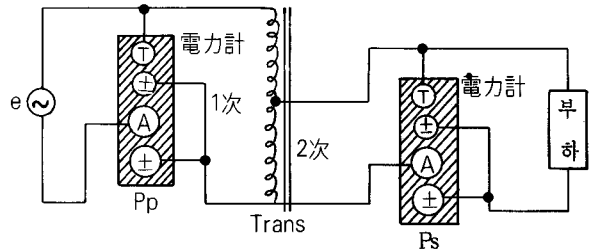
그리고 volt당 coil의 turn수도 자속밀도를 높은 쪽으로 택해서 줄이지 않도록 신경을 써야 한다.

⑤ 효율(Efficiency)

trans의 효율은 입력 대 출력의 비로써 철손(와류손과 hysteresis손)과 동손 여하에 따라 달라진다.

$$\begin{aligned} \text{효율} : \mu (\%) &= \frac{\text{출력}}{\text{입력}} \times 100 \\ &= \frac{\text{출력}}{\text{출력} + \text{동손}} \times 100 \end{aligned}$$

효율의 측정방법은 그림 3과 같이 정격 부하를 걸어준 다음 전력계를 사용하여 1차측과 2차측을 측정하여 산출한다.



※ 효율 : $\mu = \frac{Ps}{Pp}$

〈그림 3〉 효율의 측정

2) Coil의 직경

trans설계에서 coil의 직경을 구하는 문제는 core의 단면적과 coil의 turn수와 같이 상당히 중요하는데, 표 1의 공식 ②를 이용하면 간단히 계산해 낼 수 있다.

coil의 직경 : $D = \sqrt{I/2}$ (mm)

평소에 전류용량별 coil의 직경을 공식에 의해서 구한 다음, 표 3과 같이 전류(I)대 직경(D)에 대한 curve를 그려두면 작업시 수시로 파악할 수 있어 편리하다.

예를 들어서 전류용량이 5A일 때, coil의 직경 D를 구해보면 다음과 같이 된다(표 3의 A점 참조).

$$D = \sqrt{I/2} = \sqrt{5/2} = 1.581 \approx 1.59(mm)$$

I : 전류(A), D : coil의 직경(mm)

※ 소수점 이하를 올릴 때는 반올림하지 않고 그대로 올린다.

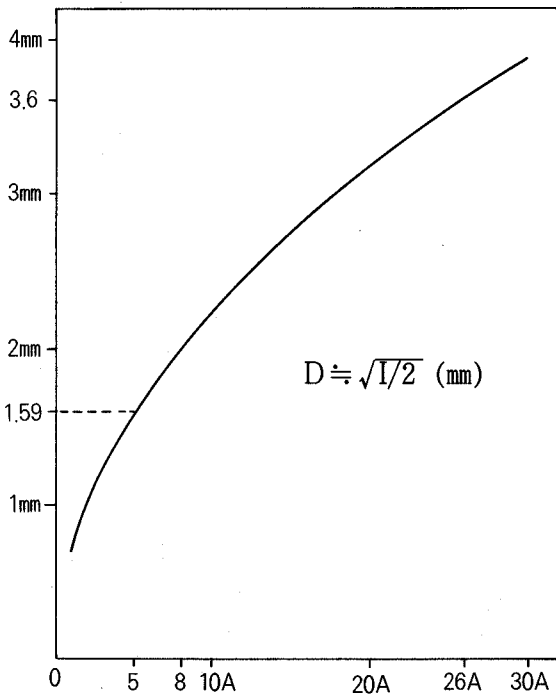
표 3을 이용해서 전류용량이 8A일 때를 구해보면

coil의 직경은 2mm가 됨을 알 수 있다(B점 참조).

또 26A일 때는 표 3에서 찾아보면 coil의 직경이 3.6mm가 되는 것을 이해할 수 있게 된다(C점 참조).

coil 굵기는 대략적인 크기를 예측할 때 편리하지만 계산하는 것 보다 정확하지는 못하다.

〈표 3〉 전류와 Coil의 직경



trans설계에서 coil의 굵기는 부하율을 참작하여 무리가 없는 범위내에서 몇 %를 줄 수 있으나 이론적인 바탕이 없이 cost down과 연루되어 임의로 줄이는 것은 삼가하여야 한다.

coil의 굵기가 기준치보다 무리하게 줄어들게 되면 동손이 증가하게 되고 여기에 철손이 합류되어 trans에서 많은 열이 발생하게 된다.

trans는 본래 열이 있게 마련이지만 지나치게 심하게, 되면 김원현상(Ging Bara 현상)이 생겨 화염의 위험이 따르게 된다.

※ 김원현상이란?

Ging Bara 또는 Gane Hara 현상이라고도 부르는데 일본의 Gane Hara(김원)씨에 의해서 세계 최초로 발견된

것으로 간단히 설명하자면 절연물이 열에 의해서 서서히 탄화되어 도체로 변하면서 short현상이 생겨 화재가 발생 하는 것을 말한다.

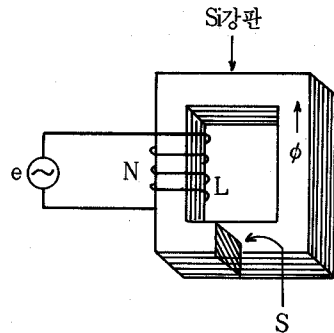
3) Coil의 회수

trans 설계에서 coil의 회수는 전압과 관계가 있는데 표 1의 공식 ③을 이용하면 쉽게 구할 수 있다.

표 1의 공식은 ③은 reactro circuit에서 산출된 것으로 (표 4 참조) 필요한 volt를 공식에서 대입하여 풀면 volt에 대한 turn수가 나온다.

volt당 coil의 turn수는 core의 단면적이 1cm²일 때 1V당 수를 알면 단면적이나 volt변동에 따라, 나누거나 곱해주면 원하는 coil의 turn수를 구할 수 있게 된다.

〈Reactro Circuit〉



$$e = -L \frac{di}{dt} = -N \frac{d\phi}{dt} \therefore d\phi = -e/n \cdot dt \dots ①$$

① 식을 적분하면

$$\phi = -Em/nfs \sin \omega t \cdot dt = Em/\omega Ncos \omega t \dots \dots ②$$

$$\text{② 식에서 } Em = \omega N\phi = \omega NBS(B = \phi/S, \phi = BS) \\ \therefore E = \omega NBS/\sqrt{2} = 4.44fBS(\text{Wb})$$

$$\text{따라서 } V = 4.44fBS \times 10^{-8}(\text{V})$$

$$\therefore N = \frac{10^8 V}{4.44fBS} (\text{T})$$

- ϕ : 자속
- ω : 각주파수(2 π f)
- N : coil의 turn수(T)
- B : 자속밀도(Gauss/cm²)
- f : 주파수(Hz)
- S : core의 단면적(cm²)
- L : inductance(H)
- V : 전압(V)

표 1의 공식 ③($N=10^8V/4.44FBS$)에서 core의 단면적 S가 1cm²이고, 전압 V가 1volt일때 coil의 turn수를 구해보면 다음과 같이 된다.

즉

$$N = \frac{10^8 \cdot V}{4.44 \cdot f \cdot B \cdot S} \text{ (T)에서}$$

S: 1cm², V: 1V, F: 60Hz를 대입하여 풀면

$$N = \frac{10^8 \times 1}{4.44 \times 60 \times 1 \times B} = \frac{375,375}{B(T)} \text{ 가 된다.}$$

자속밀도 B는 core 재질에 따라 다르기 때문에 여기서 결정할 수는 없지만 EI core로써 중형급 power trans용인 S14라고 가정한다면 B가 약 15,000정도 되니까 이것을 대입하여 풀면 다음과 같이 된다.

$$N = \frac{375,375}{B} = \frac{375,375}{15,000} = 25(T)$$

즉 core의 단면적이 1cm²이고 자속밀도 B가 15,000일 때 1volt당 coil의 turn수는 25T가 되는 것이다.

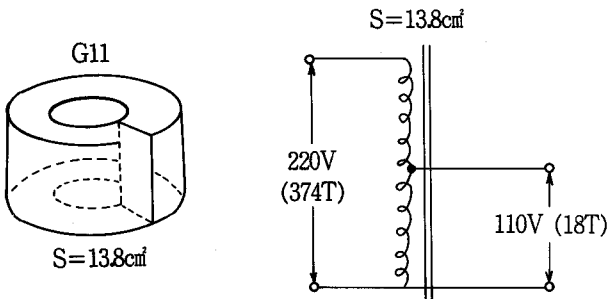
예를 들어서 core의 단면적이 13.8cm²인 troidal core의 grade가 G11로써 자속밀도 B가 1.6(T=Wb/m²=10Gauss)라고 가정하였을 때, 1차측이 220V이고 2차측이 110V라고 하면 그림 4와 같이 2차측 220V의 coil turn수는 374T가 되고 2차측 110V는 187T가 된다.

$$N(1V) = \frac{10^8 \cdot V}{4.44 \cdot F \cdot B \cdot S}$$

$$= \frac{10^8 \times 1}{4.44 \times 60 \times 16,000 \times 13.8} = 1.7(T)$$

$$N(220V) = 220 \times 1.7 = 374(T),$$

$$N(110V) = 110 \times 1.7 = 187(T)$$



〈그림 4〉 Coil의 turn수

※ core의 단면적이 13.8cm²일 때 1V당 coil의 turn수는 다음과 같이 된다.

$$N(1V) = \frac{10^8 \times 1}{4.44 \times 60 \times 16,000 \times 13.8} = 1.7(T)$$

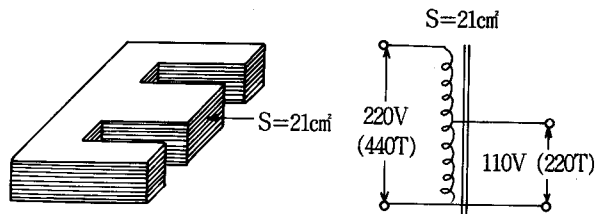
중고품의 EI type으로써 core의 정도로 보아 9,000쯤 된다고 가정하면 turn수는 훨씬 많아져서 42T나 된다.

$$N = \frac{375,375}{B} = \frac{375,375}{9,000} \approx 42(T)$$

$$[N = \frac{10^8 \cdot V}{4.44 \cdot f \cdot B \cdot S} = \frac{10^8 \times 1}{4.44 \times 60 \times 9,000 \times 1} \approx 42(T)]$$

자속밀도 B가 9,000인 경우, 그림 5와 같이 core의 단면적이 21cm²가 된다고 가정하면 1volt당 coil의 turn수는 2T가 된다.

따라서 1차측 220V는 440T 감아주고 2차측 110V는 220T 감아주면 된다.



$$N = \frac{10^8 \cdot V}{4.44 \cdot f \cdot B \cdot S} \text{ (T)}$$

〈그림 5〉 Core의 단면적과 Coil의 turn수