

# Zig-Zag 권선에 의한 내철형 주상변압기 개발에 관한 연구

(A study on the Development of the Shell-type Pole Transformer Using the Zig-Zag Winding)

민윤홍\* · 신대철

(Yun-Hong Min · Dae-Chul Shin)

## 요 약

본 논문에서는 세계최초로 내철형 주상변압기 코일의 권선을 일반적인 권선방법에서 Zig-Zag(가칭) 권선방법으로 설계 제작하는 방법을 제안하였으며, 또한 바니시 함침공정을 생략하고 단락강도 및 절연내력을 향상시킬 수 있는 내철형 변압기용 권선의 신프레임 구조개발 내용을 제안하였다.

기존의 주상변압기 권선방법에 비하여 전기절연 측면에서 층간 절연지의 사용매수 및 두께를 획기적으로 절감할 수 있는 장점이 있다. 또한 원가절감과 손실저감 및 단락기계력 대처능력이 우수함을 검증하였으며 국내전력회사 배전계통 주상변압기에 유용하게 활용할 수 있다.

## Abstract

In this thesis, we would show how to lay out and produce the shell-type transformer using the world's first Zig-Zag winding way, instead of a general winding. Also, we omit the progress of varnish-impregnation, so that we could develop the new shell-type transformer winding which improves the short-circuit characteristics and dielectric strength.

It has a copernican effect to reduce the thickness and the number of insulation papers, as compared with a general winding transformer. We would prove that it is far superior in cost reduction, loss reduction, and mechanical force of short-circuit. And eventually you must find it useful in the pole transformer for power distribution in the domestic power companies.

Key Words : Zig-Zag winding coil, Pole transformer varnish nonimpregnation, Short-circuit test

## 1. 서 론

\* 주저자 : 호서대학교 전기공학과 박사과정,  
한국전력공사 안산지점  
Tel : 031-412-6283, Fax : 031-412-6279  
E-mail : myh9032@kepco.co.kr  
접수일자 : 2007년 6월 12일  
1차심사 : 2007년 6월 18일, 2차심사 : 2007년 7월 31일  
심사완료 : 2007년 8월 3일

현재 한국전력공사 배전계통의 최말단 전력설비인 배전용 주상변압기는 권철심형으로서 대부분 A종 절연물(Cellulose)을 사용한 절연방식으로 일반고객에게 전력을 직접 공급하는 최말단 전력변환 기기로서 전력사업에 있어 매우 중요한 설비중의 하나이

다. 또한 전주위에 설치되는 단상주상 변압기가 주류를 이루고 있으며 2006년 12월 기준으로 약 178만 여대가 운전되고 있다. 주요 배전기자재 중 주상변압기는 고장 등으로 인한 정전은 고객에 대한 양질의 서비스 및 고품질의 전력을 제공하는데 큰 지장을 초래하고 있다. 한국전력공사의 자료에 의하면 1997년부터 2005년까지 시행된 변압기류의 시험검사사에서 총 22,330건의 시험 검사 중 675건의 불합격이 발생하여 9년간 평균 3.02[%]의 불합격율을 보이고 있으며, 1998년도에는 1,047건의 시험검사사에서 56건의 불합격이 발생하여 5.3[%]의 불합격율을 나타내어 9년간의 평균치 이상의 불합격율을 나타내고 있다. 이는 배전용 기자재의 시험검사 평균 불합격율이 2.5[%]인 점을 감안하면 약 2배에 이르는 수치이다. 배전용 변압기 불합격 유형별로 보면 단락강도시험 불량률이 201건('95~'05년)에 26.4[%]로 크게 점유하고 있어 문제에 대한 심각성을 일깨워주고 있다. 이는 단락강도와 관련한 설계 및 제작기술이 선진국에 비해 크게 낙후되어 있는 것으로 분석이 되어진다. 또한 뇌임펄스 내전압시험(24.8[%]), 유도내전압시험(13.2[%])등 바니시 함침에 따른 전기적, 기계적으로 가혹한 조건이 주어졌을 때 절연부분에서 가장 취약한 면을 보이고 있어 국내 제조업체의 제품설계 및 품질에 문제가 있음을 알 수 있다. 따라서 현재의 배전용 주상변압기는 주로 절연 및 단락강도 특성이 취약한 상태로 제작되고 있으며 이로 인하여 변압기 수명에 지대한 영향을 끼치고 있는 것으로 나타났고 경제적 손실 및 품질개선이 시급하며 주상변압기의 고장억제 및 신뢰도 향상을 위하여 우리의 환경에 알맞은 새로운 모델의 환경친화형 배전용 주상변압기 개발이 필요하게 되었다[1-3].

따라서 이러한 문제를 해결하기 위하여 장기간 작업공정을 개선하면서 연구한 결과 바니시 함침공정을 생략하고 단락강도 기계력 강화와 절연증가 또한, 코일 및 코아의 고유특성을 최대한 활용할 수 있는 내철형 코일프레임과 변압기 제조에 따른 조립작업의 편의성과 제품 신뢰성을 증진시킬 수 있는 변압기 코일의 권선을 일반적인 권선방식에서 Zig-Zag 권선방법으로 국내 최초로 개발하여 기존 주상변압기 권선방법 보다 중간절연지의 사용매수 및 두께를 획기

적으로 절감할 수 있을 뿐만 아니라 원가절감과 손실저감 및 단락기계력을 강화하는데 성공하게 되었다.

본 논문에서는 Zig-Zag 권선에 의한 내철형 주상변압기 개발에서 가장 기술적으로 문제될 수 있는 절연, 단락특성 및 프레임 설계에 대하여 설명하고 시제품에 대한 일반 특성시험과 단락강도 시험 결과를 서술하였다.

## 2. 시제품 변압기 설계 및 제작

### 2.1 시제품 변압기 개발목표 및 설계사양

본 내철형 Vamish 무함침 주상변압기의 설계조건은 종래의 제작방식의 문제점을 개선한 것으로서 권선설계의 변화로 절연 및 단락시 기계력을 크게 높이고 코일프레임의 기계력을 증가시키는 공법으로 단락강도 강화와 바니시 비함침으로 인한 원가절감과 환경친화적으로 근로자의 안전과 환경오염의 근절로 인한 친환경적 제품의 개발을 목표로 하였으며 또한, 본 연구에서는 단락강도가 향상되고, 경량화 및 절연내력 향상에 중점을 두어 설계한 내철형 변압기를 시제품으로 제작하였으며 제작한 변압기의 용량은 100[kVA], 정격 1차 전압 13200[V], 2차 전압 230/115[V]급 변압기이다. 이 변압기는 상용되고 있는 기존의 표준형 변압기와 특성을 비교하였다. 본 연구를 위해 설계 제작한 시제품 변압기의 정격 및 특성은 표 1과 같다.

표 1. 시제품 변압기 정격  
Table 1. Rating of Sample transformer

구 분	설 계 조 건	
상수 및 주파수	1φ60[Hz]	
정격용량	100[kVA]	
정격전압(1차, 2차)	13.2[kV]/ 230[V]-115[V]	
정격전류(1차, 2차)	7.58[A] / 434.8[A]	
[%]임피던스	3.2±10[%](2.8~3.52[%])	
온도상승	권 선	55[°C] 이하
	절연유	50[°C] 이하
코일 권선방법	Zig-Zag 권선	
특성(규격)	무부하전류	: 1.4[%]이하
	무부하손실	: 185[W]이하
	전압변동율	: 1.3[%]이하
	효 율	: 98.6[%]이상

## 2.2 시제품 변압기의 권선설계

### 2.2.1 권선의 턴수 설정

본 연구에서 시제품 배전용 주상변압기 권선에 사용되는 주 재료로서 도체에는 주로 동(Copper)을 사용하고 절연물에는 셀룰로이드계 A종 절연재료를 적용하여 손실을 줄이면서 최대부하에 대응하고 또한 단락강도 성능향상에 역점을 두고 좀더 콤팩트하게 권선설계를 하였다. Volt/Turn은 일정하게 정해지는 것이 아니라 변압기의 종류 및 규격 여자전류 등에 따라 변하게 된다. 본 설계에서 Volt/Turn의 설정은 2차 턴수를 V/T으로 나누어 정수의 값을 취하면 26T(=230/8.83)이고 분할교차 및 철손값을 고려하여 2차 턴수를 26T(Turn)으로 설정하고 1차 턴수는 총 1,560턴(780\*2)에 11층(그림 2 참조)으로 하였으며 층간절연은 다이아몬드지 2매를 사용하였다.

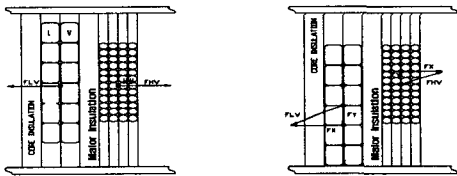


그림 1. 1, 2차 권선간의 축방향힘 균형 및 불균형상태  
Fig. 1. Balanced and unbalanced radial forces between primary and secondary coils

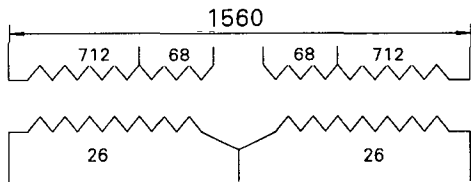


그림 2. 1, 2차 권선 회로도  
Fig. 2. Circuit diagram of primary, secondary windings

표 2는 본 시제품에 대한 1, 2차 도체로 선정된 자료이다. 또한 단락특성 향상을 위하여 그림 1과 같이 고압 및 저압코일의 권선이 균일하게 분포할 수 있도록 권선의 중심높이를 최소화하여 일치시켜 축방향 기계력의 분포를 검토하여 설계하였다.

표 2. 1차 및 2차 권선 선정  
Table 2. Election of primary winding and secondary winding

구 분	1차권선	2차권선
정격전류	7.58	434.8
도체종류	PEW	지권 평각선
도체크기	φ1.9	3.6×11.0×4본
단 면 적	2.835[mm <sup>2</sup> ]	78.1×2[mm <sup>2</sup> ]
전류밀도	2.67[A/mm <sup>2</sup> ]	2.78[A/mm <sup>2</sup> ]

일반적으로 도체의 전류밀도는 Cu의 경우 1.5~3.3[A/mm<sup>2</sup>] 정도로 설정하나 본 연구에서의 시제품 변압기의 권선온도상승 제한치는 55[K]로서 다이아몬드지를 포함 A종 절연물을 채택하였으며 저손실화 추구 등으로 전류밀도는 2.67~2.78[A/mm<sup>2</sup>]로 설계함으로써 권선제작에 투입되는 동량을 줄이고자 하였다. 변압기 권선 설계한 데이터를 정리하면 그림 2와 같다.

### 2.2.2 권선 코일의 Zig-Zag 권선방법 개발적용

현재 한국전력공사에 사용 중인 주상변압기 코일의 일반적인 권선방식을 획기적으로 절감하면서 Zig-Zag 권선방법으로 세계최초로 개발하여 전압인가시 층간절연지 사이에 권취되어 형성되는 코일 권선층간에 전위차가 항상 동일하게 형성되는 안정성을 갖게 되며 기존 주상변압기 권선방법보다 층간절연지의 사용매수(층당 4장→2장) 및 두께를 획기적으로 절감하면서 절연내력을 규격화할 수 있으며, 경량화를 추구할 수 있는 유용함이 있으며, 도체의 점적율을 높여 권선의 콤팩트화를 실현하고 단락기 계력에 대한 내력증대 및 권선의 절연효과를 증대시킬수 있다. 그림 3은 기존변압기용 권선코일의 일반적인 방법을 나타내고 있다.

그림 3과 같이 종래의 코일권선은 층간절연지 사이에 두고 코일을 권선하여 코일 권선층을 형성시키되 교번되게 권선시키는 방식을 사용하고 있다. 그런데 종래 코일 권선방식을 갖는 변압기는 전압인가시에 코일간 방향성의 차이로 층간 코일 권선층 사이에 전위차가 차이가 나는 문제점이 있었다. 또한, 변압기는 전압 인가시에 유도 내전압이 1차측에

Zig-Zag 권선에 의한 내절형 주상변압기 개발에 관한 연구

서 40,000[V]를 견디어야 하는 규격을 갖추어야 하는데 상기 40,000[V]에 대한 절연을 위해 1매당 500~600[V]의 절연내력을 갖는 층간절연지를 코일 권선층 사이에 배치하여 층간 절연을 수행하여야 한다. 하지만 종래에는 코일 권선 층간의 층간 전위차가 동일하게 형성되지 않음에 따라 이를 해소하기 위하여 층간절연지의 매수를 늘려 유도내전압의 규격을 맞춰가고 있으나 이는 권선코일의 두께를 높이는 문제점 및 중량의 증가로 변압기의 경량화를 저해시키는 문제점으로 지적되고 있다.

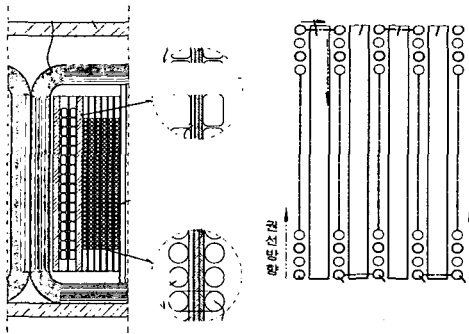


그림 3. 변압기용 코일의 일반적인 권선공정  
Fig. 3. General winding for coil of a transformer

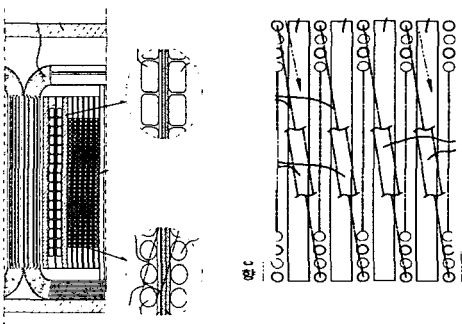


그림 4. 변압기용 권선코일의 Zig-Zag 권선방법 상세도  
Fig. 4. The detail drawing for zig-zag coil winding of a transformer

그림 4는 본 연구에서 적용한 변압기용 권선코일의 Zig-Zag(가칭) 권선방법을 나타내었다. 그림 4와 같이 상기코일 권선층은 코일의 권선을 하측단부에서 시작하여 상측방향으로 권선해가면서 상측단부에서 권선을 정지하여 권선층을 형성되게 하고 층간

절연지를 상기 권선층 위에 적층한 다음 상기 권선층의 코일을 대각선의 하측방향으로 이동시켜 대각선 연결부를 형성되게 하며, 다시 하측단부에서 권선을 시작하여 상측방향으로 권선해가면서 상측단부에서 권선을 정지하여 다시 권선층을 형성되게 하는 연속적인 반복구성으로 절연내력에 필요한 다수의 권선층을 형성시키되 상기 각각의 권선층마다 그 권선의 시작이 한 방향에서 형성되도록 일렬 권선되게 구성하는 것을 특징으로 시제품을 제작하였다.

그림 5는 100[kVA] 내절형 변압기용 권선코일의 Zig-Zag 권선방법에 의한 제작 장면을 보여준다.

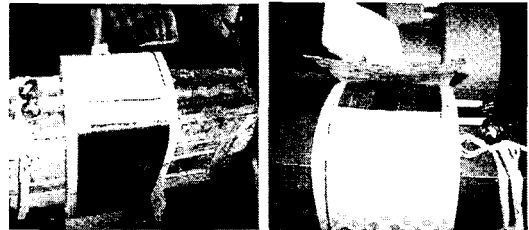


그림 5. 변압기용 권선코일의 Zig-Zag 권선장면  
Fig. 5. The picture showing the detail drawing for zig-zag coil winding

그림 4 및 그림 5와 같이 각각의 권선 층마다 그 권선의 시작이 한 방향에서 시작되도록 일렬 권선하여 권선코일에 대한 코일 권선층을 형성시킴으로써 각 권선 층간 동일방향성에 의해 전압 인가시 동일한 방향으로의 전류흐름을 유도하게 되므로 권선층간 전위차가 항상 동일해지는 이점을 발휘하게 되며 권선층간을 연결하는 대각선 연결부에 절연용 탭튜브를 삽입하여 결합함에 의해 상기 대각선 연결부에서 작용될 수 있는 자계의 반작용 영향력을 각 권선층간에서 상쇄시키는 기능을 하게 된다.

또한 기존과는 달리 변압기의 절연내력을 갖추에 있어 층간절연지의 사용매수를 절감시킬 수 있을뿐만 아니라 사용되는 층간절연지의 두께를 얇게 할 수 있으며 권선층간의 자계에 대한 영향력 배제 및 층간절연지의 절감으로 권선코일의 두께를 축소시킬 수 있어 변압기의 전반적인 중량을 절감시키는 유용함을 발휘하게 된다. 표 3은 변압기 권선설계최종 결과치이다.

표 3. 변압기 권선설계 결과  
Table 3. Result of transformer winding design

구 분	1 차	2 차	
권 선	용 량	100[kVA]	100[kVA]
	정격전압	13,200[V]	230[V]
	정격전류	7.57[A]	434.8[A]
	사용도체	PEW $\Phi$ 1.9	지권평각동선 3.6×11.0×4본
	단면적/전류밀도	2.835/2.67	156.2/2.78
	권 선 폭	146[mm]	160[mm]
	층간전압	1,930[V]	39[V]
	층간절연 두께	IKP 0.18×2[mm]	IKP 0.18[mm]
	권선적고	26.2[mm]	16.2mm
	총 턴 수	1,560[T]	26[T]
	중 심 장	871[mm]	698[mm]
	권선길이	1,362[m]	19.7[m]
	권선중량	34.4[kg]	27.4[kg]
	권선저항(75℃)	9.63687[ $\Omega$ ]	0.0026444[ $\Omega$ ]
	저 항 손	554[W]	500[W]
부 하 손	582[W]	571[W]	

### 2.3 시제품변압기의 철심설계

철심은 자기회로를 구성하는 핵심적인 구조의 하나로서 자속의 흐름을 원활하게 하기 위해 입자의 결정구조가 압연방향으로 배열된 방향성 규소강판을 사용하였으며 철심의 와전류 손실을 최소화하기 위하여 강판의 두께를 얇게(0.3[mm])하였으며 기존 표준형 주상변압기의 손실보다 더욱 줄이기 위해 청정도, 잔류응력, 표면조도를 개선한 저손실형 PH-06 급을 사용하여 중량 및 무부하손을 개선하였다. 표 3에서 계산된 권선폭과 권선의 적고에 의해 철심의 창구가 결정되며, 주어진 무부하손 및 철심재료의 종류, 작업방법에 의해 자속밀도와 철심의 단면적이 결정된다. 시험 제작품의 자속밀도는 16,813[Gauss]

표 4. 설계특성 및 규정치 비교  
Table 4. Comparison of designed characteristics and standard

항 목	규정값	설계값
무부하전류 $I_0$	0.7[%]이하	0.25[%]
무부하손 $W_i$	209[W]이하	183[W]
전압변동율 $\epsilon$	1.3[%]이하	1.197[%]
효 율 $\eta$	98.6[%]이상	98.68[%]
[%]임피던스	2.88~3.52[%]	3.195[%]

로 설계하였고 코아의 재질은 PH-06/0.3[t]를 사용하여 설계한 철심의 설계특성 및 규정치는 표 4와 같다.

철심의 기계적 설계결과는 표 5와 같고 주어진 규정에 모두 만족하므로 종합 설계표 대로 제작하였다.

표 5. 변압기 철심설계 결과  
Table 5. Result of transformer core design

구 분	설 계 치
Core 폭	210[mm]
권관두께	99[mm]
단 면 적	197.505[cm <sup>2</sup> ]
창구크기	102×186[mm]
외형크기	297×384[H]
중 심 장	87.57[cm]
중 량	132.31[kg]
재 질	PH-06, 0.3[mm]
자속밀도	16,813[Gauss]

### 2.4 시제품 변압기의 단락강도 설계

그림 6에서 100[kVA]까지는 J사의 표준형 주상변압기의 수평기계력(Horizontal Force Fhs)을 계산한 결과이고 변압기 용량이 커질수록 정격전류가 커지므로 그림과 같은 선형관계가 나타나고 있다.

Vertical Force에 있어서 고압코일 및 저압코일의 기자력 중심점이 일치한다면 축방향의 기계력은 없다고 할 수 있으나 실제에 있어서는 탭권선의 존재, 층간의 권선 높이의 차이, 저압권선 1턴의 높이차이 등에 의해 두 코일간의 기자력 중심점은 어떤 변위값 d를 갖게 된다. 그림 7은 주상변압기의 권선부 단면도를 나타낸 것이다. 전원측에서의 안정화 처리시 과도한 압축으로 인하여 절연이 취약함을 알 수 있다.

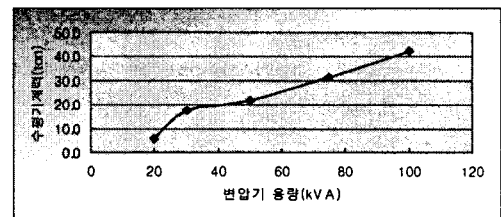


그림 6. 표준형 주상변압기의 수평기계력  
Fig. 6. Horizontal forces operated on a standard pole transformer

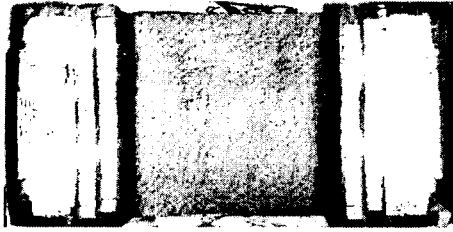


그림 7. 주상변압기의 권선부 단면  
Fig. 7. The cross section for winding parts of a transformer

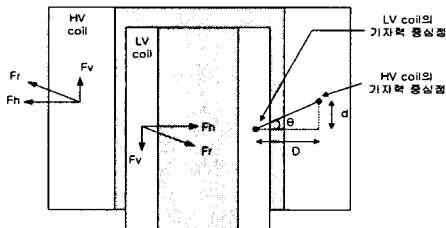


그림 8. 기자력 중심점 불일치 축방향기계력의 발생  
Fig. 8. Operating vertical forces when discording the central-point of ampere turn

그림 8은 고압 및 저압코일의 권선이 균일하게 분포한다고 가정한 경우이다. 이러한 경우 권선의 중심높이만 일치시키면 두 권선의 기자력 중심점은 일치하게 된다. 왜냐하면 권선이 균일하게 분포한다는 것은 기하학적 중심점과 기자력 중심점이 일치하게 되기 때문이다. 그러나 그림 7과 같이 실제의 권선은 균일한 분포를 갖지 않으므로 그림 8에서는 두 권선의 분포가 일정하다고 가정한 대신 두 권선의 중심점에 대해 어떤 변위 d를 갖게 배치하여 축방향 기계력의 분포를 검토하고 있다[4-6].

그림에서 Fr은 두 권선의 기자력 중심점이 불일치하여 d라는 변위가 존재하게 됨으로써 실제로 두 권선에 작용하는 반발력으로 그 크기는 앞서 계산한 반경방향 기계력과 같다. 따라서 Fr은 수직성분 Fv와 수평성분 Fh로 나뉘어지며 축방향 기계력은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\sin \theta = \frac{d}{\sqrt{D^2 + d^2}}$$

$$F_v = F_r \sin \theta = F \frac{d}{\sqrt{D^2 + d^2}} \text{ 이므로,}$$

$$F_v = \frac{4\pi}{9807} \left( \frac{NI_n}{\%Z} \right)^2 \frac{M_l}{a} \frac{d}{\sqrt{D^2 + d^2}} \text{ [kgf]} \quad (3.1)$$

d : 고압 및 저압권선의 기자력 중심점의 수직변위

D : 고압 및 저압권선의 기자력 중심점의 수평변위

$$D = b + \frac{a+c}{2}$$

식 3.1에서 계산된 축방향 기계력은 철심의 한 각 (leg)에서 발생하는 힘이다. 그림 9는 반경방향의 기계력(그림 8참조)으로부터 기자력 중심점의 수직변위 d값을 1[mm]에서 5[mm]까지 변화시켰을 때의 축방향 기계력을 계산한 결과이다. 100[kVA] 변압기의 경우에는 1.6[ton]에서 7.7[ton]까지 그 힘이 변하고 있으므로 권선의 설계 및 제작시 고압 및 저압권선의 기자력 중심을 일치시키는 것이 얼마나 중요한가를 알 수 있다.

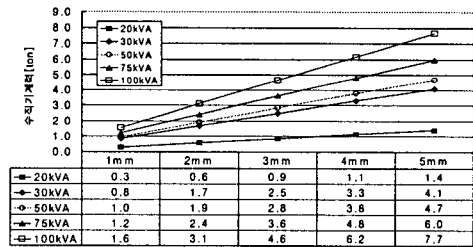


그림 9. 수직변위 d에 따른 축방향 기계력변화  
Fig. 9. The change of axial mechanical forces as a result of vertical displacement d

본 연구에서는 시제품 설계시 수직변위 d값을 약 2[mm] 이내로 설계하여 제작하였다. 따라서 3.1[ton] 이내 프레임 기계적 강도를 적용하였다.

## 2.5 시제품 변압기 제작

절연 및 단락특성이 개선된 시제품 주상변압기는 슬림형을 제외하고 현재 국내 전력회사에서 사용하고 있는 가장 큰 용량인 100[kVA] 변압기를 내철형 형태로 제작하였다. 또한 현재 배전용 변압기에서 단락기계력 향상을 위해 권선의 바나시 함침 공정을

생략하고 설계개선과 단락강도 및 절연내력 향상에 중점을 두어 국내 최초로 내철형 변압기용 권선의 신프레임 구조를 개발하여 손실저감 및 단락기계를 강화하는데 성공하게 되었다. 그리고 단락특성을 획기적으로 개선하기 위해 기계적으로 취약한 부분을 완벽하게 보완 설계하고 바니시함침 처리공정이 권선의 층간절연에 악영향을 주고 있으므로 권선의 바니시 함침 공정을 생략하고 설계 개선 및 권선의 프레임 부분을 보강하여 기계공학적 강도계산 및 구조설계를 이용한(Force Vector) 변압기용 코일 신프레임 구조를 적용하여 시제품을 제작하였다. 그림 10은 내철형 변압기용 코일 신프레임 결합 상세도를 나타낸다. 그림 11은 코일 신프레임 제작 장면을 나타내고 있다.

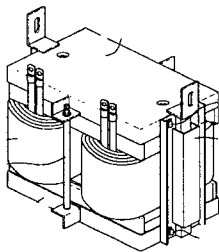


그림 10. 변압기용 코일 신프레임 결합 상세도  
Fig. 10. The detail drawing for combination coils with the new frame



그림 11. 신프레임 최종 조립된 장면  
Fig. 11. Final shows of assembling for the new frame

## 2.6 기존제품과 시제품의 원자재 특성비교

표 6은 기존제품과 시제품의 원자재 및 특성을 비교한 것이다. 층간절연물인 절연지는 5[kg], 동선은 4.4[kg], 철심은 9[kg], 절감하였으며 변압기 대당가

격은 93,000원을 절감하였다. 또한 변압기 전체적인 중량은 22[kg] 절감하여 경량화를 추구하였다.

표 6. 기존제품과 시제품 원자재 및 특성비교  
Table 6. Differences of raw materials and characteristics between the existing and model transformer

구 분		기존 제품	시제품	비 교
철 심	철 손 (W)	205	180	▽25
	CORE (kg)	142	133	▽9
권선도체	동 손 (W)	1208	1153	▽55
	동 량 (kg)	67.2	62.8	▽4.4
절 연 지	kg	16.2	11.2	▽5
변압기 가격	대당(천원)	1,850	1,757	▽93
바니시	-	함침	무함침	
합 계	전손실 (W)	1369	1339	▽30
	중 량 (kg)	217.4	195.1	▽22.3

## 3. 실험 및 결과분석

### 3.1 시제품 변압기 단락강도 실험

본 연구에서 시제품 변압기 단락강도시험 회로는 저압단자에 단락접지 사고가 발생한 것으로 가정하여 변압기의 저압단자 및 접지 축을 단락시켜 시험을 하였다. 단락전류를 공급하는 전원은 단락발전기(500[MVA])를 사용하였으며 단락강도시험은 한국 전기연구원 대전력 시험실에서 시험하였다.

### 3.2 단락강도 및 특성시험결과

본 논문에서의 시제품 변압기 단락강도 및 특성시험은 한전구매시방서와 KSC4306에 준하여 우선적으로 시험을 하였고 기준특성치의 환산온도는 75 [°C]로 하였으며 시험항목으로는 구조 및 외관검사, 절연저항시험, 상용주파내전압시험, 유도내전압시험, 충격내전압시험, 특성시험(무부하손, 전압변동율, 효율, [%z])을 진행하였다. 특성시험의 설계치 대비 결과치는 표 7과 같이 양호한 것으로 확인되었다[7-8].

표 7. 단락강도 및 특성시험 결과

Table 7. Result of short-circuit and characteristic test

시험 항목		시험기준	시험 결과		
			Tap#1	Tap#2	Tap#3
임피던스	전압[V]	-	456.8	431.5	427.5
	[%IR]	-	1.159	1.185	1.218
	[%Ix]	-	3.100	3.046	3.166
	[%Iz]	3.2±10%	3.310	3.269	3.393
무부하손	[W]	209[W]		180	
무부하전류	[%]	0.7이하		0.23	
전압변동율	[%]	1.3이하		1.23	
효율	[%]	98.6이상		98.65	

#### 4. 결론

본 논문에서는 최근 수년간 자체기술로 개발된 내철형 바니시 무함침 주상변압기의 주요 설계기술의 개요와 제작기술을 기술하였다. 본 연구결과를 요약하면 다음과 같다

첫째, 설계기술 개발에 있어서 가장 중점적으로 고려되었던 점은 국가적인 에너지절감과 바니시 사용에 따른 환경오염을 근본적으로 방지할 수 있는 모델의 개발을 위하여 층간절연내력 증대와 변압기 경량화를 위하여 코일의 권선방식을 기존 제작방법인 일반권선 방법에서 세계최초로 코일의 Zig-Zag 권선방식으로 개발하여 코일 권선층간에 전위차가 동일하게 이루어질 수 있도록 함으로써 동일 조건하에서 기존보다 층간절연지의 사용매수 및 두께를 절감할 수 있었다. 또한 충격 내전압시험 등을 통하여 한전 사양서를 만족한다는 것을 입증하였으며 변압기 경량화를 추구할 수 있었다.

둘째, 코일 신프레임 구조는 단락강도 및 절연내력 향상에 중점을 두어 개발하였으며 단락특성을 개선하기위해 기계적으로 취약한 부분을 완벽하게 보완하였고 바니시함침 처리공정이 권선의 층간절연에 좋지않은 영향을 주고 있으므로 권선의 바니시함침 공정을 생략하고 설계개선 및 권선의 프레임부분을 보강하여 기계공학적 강도계산 및 구조설계를 이용한(Force Vector에 대응한 구조물) 변압기용 코일 신프레임 구조를 국내 최초로 개발하였으며 단락강도 시험결과 단락내력을 향상시켰으며 각종 성능 특

성시험을 통하여 설계 값을 검증하였다.

본 연구를 통하여 기존 표준형주상변압기에 비하여 변압기의 전반적인 중량을 10.2[%]정도(동선 4.4[kg], 절연지 5[kg]) 절감시키는 성과를 올렸으며 전기절연 측면에서 우수한 내철형 바니시 무함침 주상변압기를 개발함으로써 유입변압기 분야에서 독자적인 설계기술을 확보하였다. 또한 국내전력회사 배전계통 주상변압기에 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단되며 확보된 설계기술을 토대로 절연특성 및 열전달 특성에 대한 연구를 강화하여 본 제품의 성능향상 및 신뢰성향상 연구를 지속적으로 추진해 나아갈 계획이다.

#### References

- [1] 한국전력공사, "2007 배전실무" p4, 2007.04.
- [2] 송일근외, "주상변압기 단락특성 개선에 관한 연구"(최종보고서), 한국전력공사, pp3-5, pp. 78-79, 2002.12.
- [3] 중소기업청, "변압기코일의 권선상태 및 변형방지를 위한 친환경 비함침변압기"(최종보고서) pp.7-9, 2006.04.
- [4] 민윤홍, "저손실형 복합절연 주상변압기 개발에 관한 연구" 호서대학교 대학원, pp. 51-53, 2003.
- [5] 민윤홍, 유호근, 한종희, "변압기 품질향상대책" pp. 92-93, p186, 1996. 09.
- [6] E. W. Tipton, "Vertical Short Circuit Forces Effect of Vertical Unbalance" Westinghouse Co, pp. 21-25, 1965.
- [7] ANSI/IEEE Std C57.12.00-1993, "IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power And Regulating Transformer and IEEE Guide for Short-Circuit Testing of Distribution and Power Transformer" pp. 56-63, 1993.
- [8] 한국전력공사, "변압기 단락강도 시험규격, pp1-7, 1998.06.

#### ◆ 저자소개 ◆

##### 민윤홍 (閔允泓)

1957년 11월 4일생. 2000년 호서대학교 전기공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 1980년~현재 한국전력공사 근무.

##### 신대철 (申大澈)

1952년 3월 2일생. 1973년 건국대학교 전기공학과 졸업. 1975년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 졸업(박사). 1989~1990년 나가사키대학 visiting scholar. 1979년 ~현재 호서대학교 공과대학 전기공학과 교수.