

지하철 변전실용 진공주형형 몰드변압기의 난연성 확인에 관한 연구

(A Study on the Confirmation of non-flammability of the Cast Resin Mold Transformer in Subway Substation)

정용기* · 장성규** · 곽희로***

(Young-Ki Chung · Seong-Kyoo Jang · Hee-Ro Kwak)

요 약

본 논문에서는 최근 사용이 증가하고 있는 몰드변압기의 난연성을 확인하기 위해 연소시험을 하였다.

먼저 지하철 변전소의 몰드변압기 설치현황과 호선 및 제작사별로 정류기용변압기와 고압배전용 변압기의 장애현황에 대하여 조사하였다. 다음으로 수평가열로내에 실제 몰드변압기의 고압 권선부를설치하고, KSF 2257 (건축구조 부분의 내화시험방법 : 1993)의 표준 가열 온도 곡선에 의해 가열하였다. 몰드변압기의 연소특성을 파악한 결과, KSF 2257 연소시험곡선에 의한 완전연소까지는 78분이 소요되었으며, 착화후 수평로 가열을 중지한 후 화염의 진행상황을 확인한 바 화염의 진행이 되지 않았으며, 자기소화특성을 나타냄으로써 몰드변압기의 난연성 및 자체 소화성을 확인할 수 있었다.

본 연구 결과 몰드변압기의 사고는 단락및 과부하 등에 의한 화재사고 보다는몰드내 다른원인에 의해 사고 진전이 확대됨을 확인 할 수 있었다.

Abstract

This dissertation has confirmed the non-flam mability of cast mold transformer that is increasingly used lately.

As a research progress, the investigation has been performed on the installation status and each line of the subway system which have the most mold transformer accidents, and the impediment status of the transformer for rectifier and the high-voltage distribution transformer per each manufacturer. Then, a high voltage mold of the actual mold transformer has been installed in the horizontal heating furnace and the heat has been applied by the standard heating temperature curve of KSF 2257(Fireproof testing meth-

*정회원 : 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사과정

**정회원 : (주)하이텍 전력기술단 소장

***정회원 : 숭실대학교 전기공학과 교수

접수일자 : 1998. 3. 1

od of the construction structures : 1993). Accordingly, the combustibility of the mold transformer based on the test results has been found that 78 minutes has been required for the complete burning per the KSF 2257 combustion test curve and that, after stopping the heat application of the horizontal furnace after ignition, the flame progress has not been made but shown as the self-extinguishing characteristics when the flame progress has been checked. Thus, the non-flammability and self-extinguishability of the mold transformer have been confirmed.

The result of this dissertation has indicated that the accident involving mold transformer has been progressed and expanded by the dielectric breakdown or void due to the crack in the mold rather than a fire accident caused by a short-circuit or an overload.

1. 서 론

최근 고밀도화 되어 가는 도시지역에 설치된 전기 설비에 대한 안전도 측정은 해를 거듭할수록 엄격해져 왔다. 과거에는 배전계통에서 안전상 중요한 역할을 담당하는 변압기에 난연성이 요구되는 곳에, 아스카렐이나 실리콘유, 와니스형 건식변압기를 사용하였다. 그러나, 환경보존 측면에서 이들 절연유를 사용한 변압기의 사용이 금지된 이후, 전 등급에서 채용된 와니스형 건식변압기의 보수유지와 검사는 유입변압기보다 훨씬 엄격해졌다. 그래서, 보수유지가 용이하고 절연유가 필요하지 않은 난연성 건식변압기의 수요가 증가되고 있다.

몰드변압기의 권선부는 에폭시수지 내에 주형되어 있으므로, 난연성이다. 더구나 절연등급은 고절연강도를 지닌 에폭시수지를 사용함으로써, 와니스형 건식변압기보다 규모와 중량 및 소음을 줄일 수 있고, 많은 전기, 기계적 특성을 향상시킬 수 있다. 몰드변압기는 도입 이후, 이러한 이점으로 인해 대단한 호평을 받아 왔으며, 현재 유입변압기를 대신하여 지하철, 대형건축물 등의 전력 공급설비에 그 수요가 확대되어 가고 있다.

몰드변압기의 장점으로는 다음과 같은 것을 들 수 있다[1~3].

- (i) 에폭시를 주로 하는 고체절연물에 실리카 등의 무기물을 충전, 배합하였으므로, 난연성이 있다.
- (ii) 고압측과 저압측 권선이 각각 수지로 주형되어 있기 때문에, 기계적으로 견고하며, 이차측의 단 시간 완전단락에도 견딜 수 있을만큼 단락전류에 강

하다.

(iii) 권선의 열용량 및 온도상승시정수가 크기 때문에, 단시간 과부하 내량이 크다.

(iv) 권선간 절연거리, 절연구성층이 얇으므로, 전체가 소형화되고, 중량에 대해서도 권선간 및 그 주위가 고체절연물 이외의 장소는 기름 대신 공기로 되어 있기 때문에, 그만큼 경량화된다.

(v) 변압기 전체가 소형·경량화되어 있어, 철심 및 권선에서 발생하는 손실을 저감할 수 있다.

(vi) 음의 발생원인 철심에서 발생하는 소음이 몰드권선에 의해 차음되므로, 와니스형 건식변압기에 비해 소음을 줄일 수 있다.

(vii) 권선을 비롯한 대부분의 구성부가 흡습성이 적은 에폭시에 의해 주형되어 있어, 내진, 내습성이 우수하다. 또한 주위조건으로부터의 영향이 적으며, 장시간의 운전 휴지기에도 불구하고, 쉽게 운전을 할 수 있고, 보수점검이 용이하다.

최근 유입변압기가 몰드변압기로 대체되어 날로 그 수요가 증가되고 있으나, 실제 몰드변압기의 난연성에 대해서는 학문적인 적절한 연구가 이루어지지 않았다.

따라서 본 논문에서는 몰드변압기의 장애현황을 조사 분석하고 몰드변압기의 연소실험을 통해, 몰드변압기의 난연특성을 분석하였다.

2. 지하철의 유입 및 몰드변압기의 설치 현황

2.1 지하철 변압기 설치현황

A시의 지하철 변압기 설치현황은 1996년 기준으로 총수량 171대로 정류기용 변압기 128대, 고압배전용 변압기 43대이었다. 정류기용 변압기는 총 128대중, 유입식 77대, 몰드식 51대가 설치되어 있다. 고압배전용 변압기는 총 43대가 설치되었으며, 이중 유입식은 28대, 몰드식은 15대가 설치되어 있다.

2.2 지하철 변압기 장애현황

1) 정류기용 변압기

A시의 지하철에 설치되어 있는 정류기용 변압기 총 128대중, 장애현황을 형식별, 제작사별, 호선별 및 연도별로 조사하였다.

표 2.1 정류기용 변압기의 형식별 장애현황
Table 2.1 Failure as types of transformer for rectifier

형식	설치수량 [대]	장애건수 [건]	비고
계	128	51	
유입자냉식	77	2	C사 1건, E사 1건
몰드식	51	49	A사 49건

A시의 정류기용 변압기의 형식별 장애현황을 보면, 표 2.1과 같으며, 표에서 보면, 유입자냉식 변압기는 총 77대중 2건만 사고가 발생하였으나, 몰드식 변압기는 총 51대중, 49대가 사고발생하여, 거의 대부분 장애가 발생하였음을 알 수 있다.

표 2.2 정류기용 변압기의 제작사별 장애현황
Table 2.2 Failure as manufacturer of transformer for rectifier

제작사	설치수량[대]	장애건수[건]
계	128	51
A사	54	49
E사	2	1
C사	3	1
H사	54	-
F사	1	-
G사	11	-
D사	3	-

A시의 정류기용 변압기의 제작사별 장애현황은 표 2.2와 같다. 표에서 보면, A사의 제품이 54대중 49대가 사고 발생하여, 가장 많은 장애가 발생되었음을 알 수 있다.

정류기용 변압기의 호선별 장애현황을 보면, 표 2.3과 같으며, B호선의 경우, 49대의 설치수량중 47대의 장애가 발생하여, 가장 많은 사고가 발생하였으며, C호선에서는 문제점을 보완하여, 한 건의 장애도 발생하지 않았다.

표 2.3 정류기용 변압기의 호선별 장애현황
Table 2.3 Failure as lines of transformer for rectifier

호선	설치수량[대]	장애건수[건]
계	128	51
A호선	9	2
B호선	49	47
C호선	38	-
D호선	32	2

정류기용 변압기의 연도별 장애현황을 보면, 표 2.4와 같으며, 매년 1건에서 최고 7건까지 발생하였고, 연평균 4건 정도의 장애가 발생하였음을 알 수 있다.

표 2.4 정류기용 변압기의 연도별 장애현황
Table 2.4 Annual failure of transformer for rectifier

연도	'83~'85	'86	'87	'88	'89	'90	'91	'92	'93	'94	'95	'96	
건수	51	11	4	1	6	3	3	2	2	5	7	3	4

2) 고압배전용 변압기

A시의 고압배전용 변압기 총 43대중, 장애현황을 형식별, 제작사별, 호선별 및 연도별 장애현황을 조사하였다. 고압배전용 변압기의 형식별 장애현황은 표 2.5와 같다.

표에서 보면, 유입자냉식 변압기는 28대 설치수량중, 1건의 장애만 발생하였으나, 몰드식 변압기는 설치수량 15대중, 16건의 장애가 발생하여, 설치수량보다도 장애건수가 더 많음을 알 수 있다.

표 2.5 고압배전용 변압기의 형식별 장애현황
Table 2.5 Failure as types of transformer for high voltage distribution

형 식	설치수량 [대]	장애건수 [건]	비 고
계	43	17	
유입자냉식	28	1	
몰 드 식	15	16	1대가 2번 이상 장애발생

고압배전용 변압기의 연도별 장애현황을 보면, 표 2.6과 같으며, 연평균 1건의 장애가 발생하였음을 알 수 있다.

표 2.6 고압배전용 변압기의 연도별 장애현황
Table 2.6 Annual failure of transformer for high voltage distribution

년 도	계	'83~'84	'85	'87	'88	'89	'90	'91	'92	'93	'94	'95	'96
건 수	17	6	3	-	1	1	1	-	1	1	-	3	-

고압배전용 변압기의 제작사별 장애현황은 표 2.7과 같으며, 특정사인 H사의 25대 설치수량중, 14건이 장애가 발생하여, 문제점이 있음을 알 수 있다.

표 2.7 고압배전용 변압기의 제작사별 장애현황
Table 2.7 Failure as manufacturer of transformer for high voltage distribution

제 작 사	설치수량[대]	장애건수[건]
계	43	17
A 사	8	2
E 사	2	1
C 사	2	-
H 사	25	14
F 사	3	-
G 사	2	-
I 사	1	-

고압배전용 변압기의 호선별 장애현황은 표 2.8과 같으며, 정류기용 변압기와 마찬가지로 B호선의 경우에, 14대의 설치수량에도 불구하고, 장애건수는

15건이나 되었으며, 이후 C, D호선의 경우, B호선의 문제점을 보완하여, 1건의 장애도 발생하지 아니하였음을 알 수 있다.

표 2.8 고압배전용 변압기의 호선별 장애현황
Table 2.8 Failure as lines of transformer for high voltage distribution

호 선	설치수량[대]	장애건수[건]
계	43	17
A호선	3	2
B호선	14	15
C호선	14	-
D호선	12	-

2.3 지하철 변압기 장애원인 조사분석

A시의 지하철 A호선~D호선의 변압기 장애의 원인을 조사·분석한 결과는 다음과 같다.

가. 조사대상인 지하철 부하내용은 아침, 저녁 출·퇴근시간의 경우, 정상부하의 200[%] Peak를 기록하고 있으며, 과부하시 변압기의 전자력에 의한 응력 변화로 인해, 상당한 소음과 진동을 수반하고 있었다.

나. A시 지하철 초기에 설치한 몰드변압기는 수입품과 국내제품 거의 모두 가동중의 사고로 인하여 교체되었으며(특히, 진공합침형 사고건수는 거의 100[%]), 우수한 외국제품도 예외가 아닌 것을 미루어 볼 때, 그 이유가 내부 보이드나 제작상의 결함적인 것보다는 과부하시에 발생하는 권선과 철심에 작용하는 반복된 응력변화로 내부크랙이 발생되어, 크랙이 점점 커지면서 절연과괴가 발생하는 것으로 판단된다.

다. 조사된 사고 몰드변압기의 경우, 사고시 화재나 다른 사고로 확대되는 예는 거의 없어, 화재에 대한 문제는 전혀 없는 것으로 판단된다.

3. 연소시험 및 결과

3.1 개요

시험일자 : 1997년 12월 9일

가열시간 : 2시간 내화가열

시험장소 : 방재시험 연구소

전기설비에 사용되는 특고압 몰드변압기 시험체에 대하여 KSF 2257(건축구조 부분의 내화시험방법 : 1993)의 가열시험방법을 응용한 2시간 가열시험을 실시하였다.

3.2 시료

시료는 정격용량 50(kVA)인 배전용 특고압 단상 몰드변압기의 고압권선부로 실험하였으며, 표 3.1에 시료의 규격을 나타내었다.

표 3.1 시료 사양

Table 3.1 Specification of specimen

구	분	시 방
규격	외경	380[mm]
	내경	314[mm]
	높이	640[mm]
	무게	31[mm]
시료 성분	Resin	CY205 (Araldite F)
	Hardener	HY905
	Flexibilizer	DY040
	Accelerator	DY062
	Color paste	DW0133 (red)

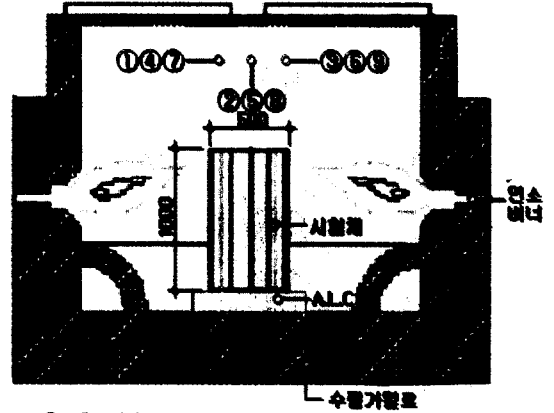
3.2 시험방법

시료를 그림 3.1과 같은 수평가열로에 설치하여, 시료가 초기 착화될 때까지 수평가열로 내부의 측정온도가 건축구조의 내화시험 방법(이하 KSF 2257)에 규정된 그림 3.2의 가열온도곡선과 같이 가열하였다.

육안에 의해, 최초 착화가 확인되면, 가열을 중단하고, 시료에 착화된 화염이 자체 소멸할 때까지의 시간을 측정하였으며, 시료에 착화된 화염이 완전소멸한 후, 재가열하여, 시료가 완전연소할 때까지 가열하여 완전연소 시간을 측정하였다. 본 실험에 사용된 수평가열로를 그림 3.1에 나타내었으며, 수평가열로 내에 그림과 같이 시료를 설치하였다. 수평가열로 내의 온도 측정용 열전대의 위치를 ①~⑨에 나타내었다.

수평가열로의 내벽은 내화벽돌로 제작되어, 고온

에서도 견딜 수 있는 특성을 지녔다. 또한 수평가열로 내부에 시료 설치 후, 동일 재료의 내화덮개로 상부를 덮고, 내화섬유로 수평가열로와 내화덮개의 틈새를 막아 줌으로써 내부의 열기가 외부로 방산됨을 방지하였다.



* ①~⑨ : 가열로내 온도측정용 열전대 위치

그림 3.1 수평가열로
Fig. 3.1 Horizontal furnace for fire

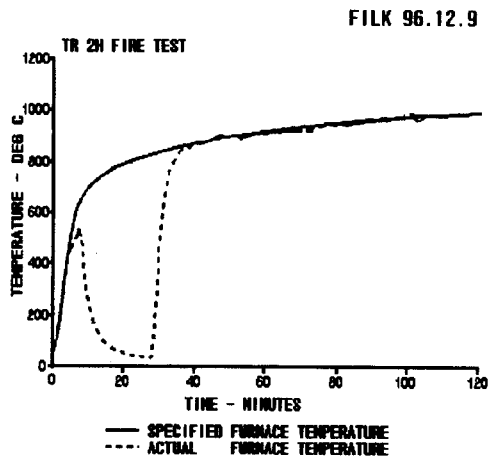


그림 3.2 가열온도 곡선
Fig. 3.2 Heating temperature curve

연소시험은 KSF 2257에 규정된 연소시험의 곡선에 일치하도록, 온도가 자동적으로 조정되는 통합시스템의 제어를 받는다. 통합시스템의 인위적인 제어가 없을 경우, 이 수평가열로는 일정시간의 경과 후에 1025[℃]의 온도를 유지하도록 되어 있다. 그림 3.2에 가열 온도 곡선을 나타내었다.

3.3 시험진행 과정

제 1단계 : 몰드변압기의 연소시험을 위한 준비단계로서, 수평가열로의 내부를 청소하고 연소버너 등의 상태를 확인하였으며, 몰드변압기의 고압권선부(이하 시료)만을 분리하여 수평가열로의 내부에 넣고 연소위치를 결정하였다.



그림 3.3 연소 전의 시료 상태
Fig. 3.3 State of specimen before firing

또한, 연소상황의 양호한 촬영을 위해 수평가열로의 양측에 보호블럭을 쌓고 내화섬유를 삽입하여, 수평가열로 내부의 화염방사에 의한 열기가 외부로 방산됨을 방지하였다. 그리고 나서 상부덮개로 수평가열로 전체를 씌워 연소시험을 위한 외부장치를 구성하였으며, 연소버너의 연료로써 사용되는 경유를 연료탱크에 주입하였다. 그림 3.3에 연소버너로 연소시키기 전의 시료 상태를 나타내었다.

제 2단계 : 제 1단계를 완료한 후 본격적인 연소시험의 최초의 단계인 제2단계를 실시하였다. 이 단계는 연소탱크에 경유가 주입되었음을 확인하고 난 후 바로 실시되었으며, 수평가열로에 대한 통합시스템에 나타나는 연소시험곡선상의 X축과 Y축의 교점에 해당한다. 그림 3.4에 수평가열로의 연소버너에 점화를 한 후 최초로 불꽃이 육안확인되었을 때의 상태를 나타내었다.

제 3단계 : 연소버너에 불꽃이 확인된 지 6분 10초만에 몰드변압기 상단이 국부착화됨을 최초로 확인하였다. 이 때 변압기 상단만이 검게 탄화된 흔적이 관측되었으며, 그림 3.5에 이 때의 시료의 상태를 나타내었다.

제 4단계 : 국부착화가 확인된 지 50초만에 화염

은 상단 1/4 부위까지 진행됨을 관측하였으며, 이때 연소버너를 소화함으로써 국부착화시의 시험체의 자체 화염소멸시간을 측정하였다. 이로써 지속적으로 화염이 공급될 경우 시료는 단시간에 불꽃이 번짐을 알 수 있었다. 그림 3.6에 연소버너에 화원을 제거하기 직전의 시료의 상태를 나타내었다.

제 5단계 : 연소버너에서 화원을 제거한 지 19분 25초만에 시료의 화염은 완전히 자체소멸되었으며, 시료의 상부가 검게 탄화한 흔적이 있음을 관측하였

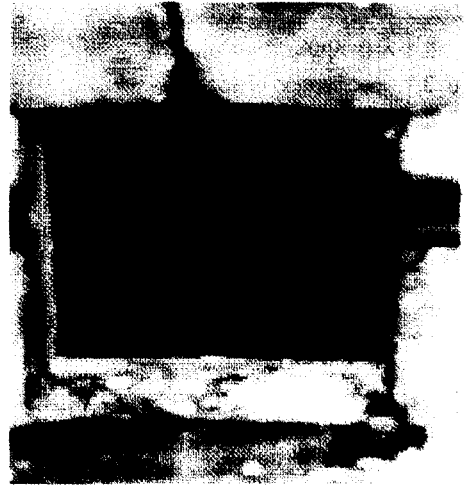


그림 3.4 연소버너에 의한 점화시의 시료 상태
Fig. 3.4 State of specimen when firing by burner

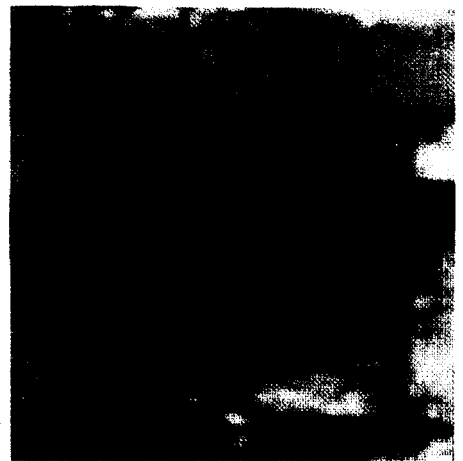


그림 3.5 시료 상단의 국부착화
Fig. 3.5 Partial firing of upper part of the specimen

다. 그림 3.7에 상부의 화염이 완전히 소화된 직후의 시료 상태를 나타내었다.

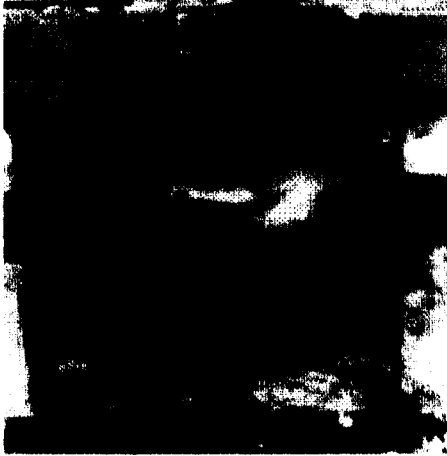


그림 3.6 화원을 제거하기 직전의 시료 상태
Fig. 3.6 State of specimen before removal of firing source

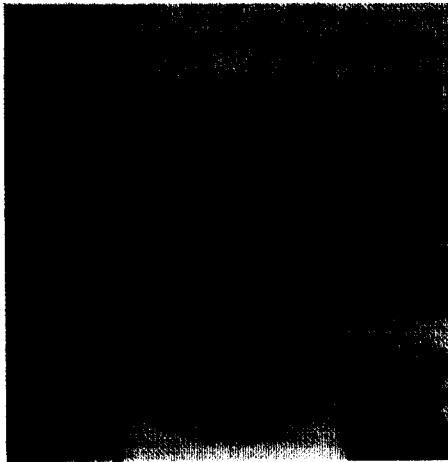


그림 3.7 상부의 소화 직후의 시료 상태
Fig. 3.7 State of specimen after fire extinguishing of upper part

제 6단계 : 완전소화를 확인한 지 55초간 시험체 전체의 연소시간 및 완전소화 시간을 측정하기 위한 재가열 준비를 실시하여 수평가열로 내부의 연소버너의 점화를 확인하였다. 이후 2분 10초만에 시료 상단의 국부착화가 재관측되었으며, 이 화염은 국부 착화가 확인된 지 1분만에 시료의 전면으로 확산되

었다. 이로써 시료는 지속적인 화염의 공급에 대해 그 확산속도는 빠름을 재확인할 수 있었다. 그림 3.8에 시료 전면으로 화염이 확산되었을 때의 상태를 나타내었다.

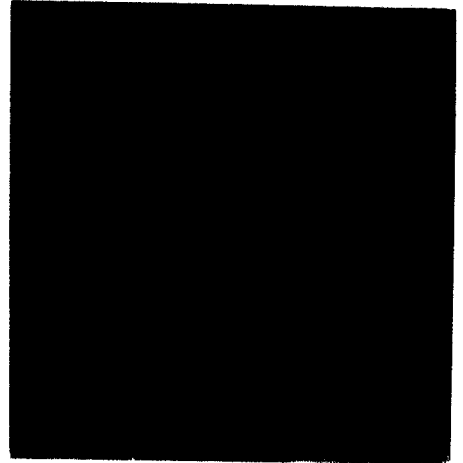


그림 3.8 화염의 전면 확산시의 시료 상태
Fig. 3.8 State of specimen when flame is spread out

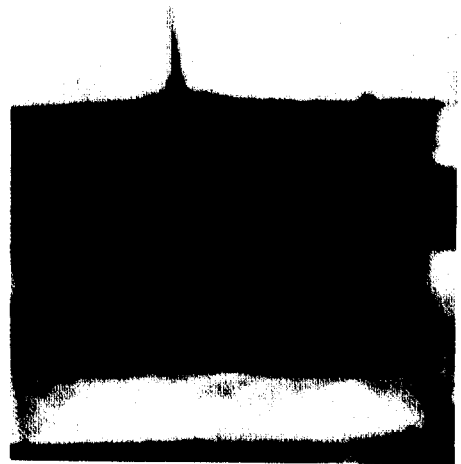


그림 3.9 완전연소 후 시료의 상태
Fig. 3.9 State of specimen after complete combustion

제 7단계 : 시료의 전면으로 화염이 확산됨을 관측하고 난 지 74분 30초만에 시료의 완전연소가 통합 연소시스템의 컨트롤러에 의해 확인되었다. 이 장치는 시료가 연소할 때 발생하는 가스에 의해 완전 연소 유무를 판별하며, 이 때 육안으로 관측한 시료의 상태는 화염이 보이지 않는 것이 관측되었으며, 이

때 연소버너의 화원을 소화하였다. 그림 3.9에 완전 연소시 화원을 제거하기 직전의 시료의 상태를 나타내었다.

상기 실험의 1단계에서부터 7단계까지의 실험에서 실제 수평가열로 내의 측정시간대별 가열온도의 측정결과를 표 3.2에 나타내었다.

3.4 시험결과

특고압 몰드변압기에 대해, KSF 2257의 시험방법을 응용한 2시간 가열시험을 실시하여, 연소특성을 파악한 결과, 동일 시료의 최초 착화시간은 6분

표 3.2 가열온도 측정결과 및 시간 · 온도 면적표
Table 3.2 Measurement of heating temperature and time · temperature area

시간 [분]	KSF 2257 Furnace Temperature [°C]	Actual Furnace Temperature [°C]	Area under standard curve [°C 분]	Area under actual curve [°C 분]	Difference [%]	Tolerance (+ or -) [%]
0	20	11				
1	100	99				
2	220	195				
3	330	358				
4	440	438				
5	540	475				
6	600	494				
7	640	535				
8	665	479				
9	685	324				
10	705	245				
12	730	151				
14	750	105				
16	770	80				
18	785	65				
20	795	56				
22	805	49				
24	815	44				
26	825	41				
28	835	38				
30	840	514				
35	860	836				
40	880	875				
45	895	895				
50	905	907				
55	915	913				
60	925	926	45833	30297	-33.90	10.00
65	935	932				
70	945	934				
75	955	951				
80	965	959				
85	975	965				
90	980	974				
95	985	983				
100	990	1005				
104	994	997	87407	71667	-18.01	7.50

이 소요되었고, 자체 화염 소화시간은 19분이 소요되었다. 그 후, 2차 가열 시작 후, 가열에 의한 완전 연소까지는 78분이 소요되었다.

이 시험은 KSF 2257의 시험방법을 응용한 2시간 가열을 실시하여, 시료의 연소특성을 분석한 결과, 난연성이 입증되었다.

4. 결론

본 논문에서 몰드변압기의 연소시험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 몰드변압기의 시료를 수평가열로에서 연소시험 결과, 에폭시수지에 접화시킨 다음, 연소버너에서 화원을 제거한 후, 수평가열로 내부온도가 1,025(°C)가 넘는 환경에도 불구하고, 19분 25초만에 시료가 완전히 자체화염 소멸되어, 몰드 변압기의 에폭시가 난연성과 자체 소화성이 있음을 확인하였다.

2) 몰드변압기의 연소시험결과와 국내의 소화설비 기준을 근거로 하여, 유입변압기와 건식변압기를 구분하여, 소화설비를 하여야 한다는 타당성을 입증하였다.

3) 몰드변압기의 사고는 단락 및 과부하등에 의한 화재사고 보다는 몰드내 다른원인에 의해 사고진전이 확인됨을 확인하였다.

본 연구는 사단법인 한국소방안전협회의 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] Isamu Okada et al., "Largest Capacity in The World, 30 [kV], 7.5MVA Fuji Molded Transformer for Sendai Station, Japanese National Railways" UDC, 1992.

[2] S. Isobe et al., "Large Capacity Class-H Resin Molded Transformer, 1990, 6.

[3] 곽희로 외, 몰드변압기의 방재 및 진단용 Monitoring System 개발에 관한 연구(연구보고서), 한국소방협회, 1997, 1.

[4] 前田昌彦, モールド 壓器の今後の課題, 1993, 4.

[5] 최성호 외, 소방법령집, 형능사, 1996, 2.

[6] 지철근, 정용기, 최신 전기설비, 문운당, 1995, 1.

[7] 특수건물 화재조사 보고서, 한국화재보험협회, 1979~1987.

[8] 박동화, 정용기, 이순형, 수·변전설비의 계획과 설계, 도서출판 의제, 1995, 5.

◇ 著者紹介 ◇



정용기(鄭龍基)

1952년 3월 5일생. 1976~1978년 미국 R.M PARSON ENGINEERING CO.(L.P.L) 1995년 숭실대 대학원 전기공학과 졸(석사). 현재 숭실대 대학원 전기공학과 박사과정, 의제전기설비연구원 대표, 미국 NFPA 정회원, 전기/소방기술사.



곽희로(郭熙魯)

1942년 3월 1일생. 1967년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1978년 호주 New South Wales대 대학원 졸업(석사). 1986년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1986년 미국 MIT 방문교수, 현재 숭실대 공대 전기공학과 교수. 당학회 부회장.



장성규(張星奎)

1958년 10월 3일생. 1988년 서울산업대 전기공학과 졸. 1997년 숭실대 산업대학원 전기공학과 졸(석사). 84~87년 현대산업개발(주). 87~95년 현대건설(주). 95~97년 한빛엔지니어링 대표. 97~현재 (주)하이텍 전력기술단 소장.