

# 층간 단락된 3상 몰드변압기의 소손 패턴 및 금속 조직 해석

최 충 석

전주대학교 소방안전공학과

(2010. 6. 16. 접수 / 2010. 11. 29. 채택)

## Analysis of the Damage Patterns and Metal Structure of 3 Phase Mold Transformers to which Interlayer Short-circuits have Occurred

Chung-Seog Choi

Department of Fire Safety Engineering, Jeonju University

(Received June 16, 2010 / Accepted November 29, 2010)

**Abstract :** The purpose of this study is to analyze the damage patterns and metal structure of 3 phase mold transformers collected from places where accidents have occurred. Compared to an oil-immersed transformer, a mold transformer has the advantage of requiring a smaller installation area and can be kept clean, while its disadvantages include the fact that abnormal symptoms of an accident are difficult to discover and its repair is impossible. The capacity of the mold transformers collected from places where accidents have occurred was 200kVA with primary voltages being F23,900V, R22,900V, 21,900V, 20,900V, 19,900V, etc., as well as secondary voltages being 380V, 220V, etc. It was found from the analysis on the diffusion of combustion in the damaged mold transformers that fire occurred first inside the U-phase primary winding and that carbonization and heat were diffused to V-phase and W-phase in V-pattern. In addition, from the analysis on the cross-sectional structure of the metal of the melted high voltage winding using a metallurgical microscope, it was found that the boundary surface, voids, and columnar structure were formed when an interlayer short-circuit had occurred. Therefore, even though it is not possible to find the cause for the occurrence of an interlayer short-circuit at the inner side of the primary winding, it is thought that, due to the thermal energy generated when the short-circuit occurred, the heat source was diffused to the upper side and outside, causing a secondary accident.

**Key Words :** metal structure, mold transformer, interlayer short-circuits, V-pattern, columnar structure, boundary surface

### 1. 서론

전기를 생산하는 직류발전기나 교류발전기는 1830년대에 개발되었으나 변압기(transformer)는 그보다 늦은 1856년 발레이(Cromwell Fleetwood Varley)가 철선으로 둥근 다발을 만들고 그 둘레에 동선 감은 것이 최초의 변압기이다. 오늘날과 같은 실용적인 변압기는 1882년 가라이드(Lucien Gaulard) 및 기브스(Josiah Willard Gibbs)가 철심의 둘레에 권선을 감아 전압을 변환하였다. 발전기나 전동기가 기계에너지와 전기에너지의 상호 작용을 하는 회전기인데 변압기는 하나의 회로에서 교류 전력을 받아 전자 유도 작용(electro magnetic induction)

에 의해서 이것을 같은 주파수의 교류 전력으로 변환해서 다른 회로에 공급하는 기기를 말한다. 변압기는 철심과 권선의 관계에서 내철형(core type)과 외철형(shell type)으로 구별된다. 내철형은 권선이 철심을 둘러싸는 모양으로 되어 있고, 외철형은 철심이 권선을 둘러싸는 모양이다. 변압기의 철심은 규소를 약 4% 포함한 규소 강판을 겹쳐 쌓은 성층 철심이 보통이지만 특히 철손이 적은 것을 필요로 하는 배전용 변압기의 철심에는 권철심도 사용된다. 철심의 두께는 보통 0.3~0.6mm, 철심의 표준 크기는 915×1,830mm이다. 변압기 권선은 철심 위에 피복 권선을 감는 형태에 따라 직권(direct-wound)과 형권(former-wound) 등이 있다. 형권 코일(former-wound coil)에는 원통 코일(cylindrical coil), 원판형 코일(circular disc coil) 및 직사각형 코일 등이 있다. 일반적으로 변압기는 회전 부분이 없으므로 용

\* To whom correspondence should be addressed.  
enetck@naver.com

량이 크게 되면 시스템 내부에서 발생하는 열의 처리가 중요한 문제가 된다. 건식 변압기(dry type transformer)의 냉각은 자연식과 풍냉식 등이 있으며, 유입 변압기(oil-immersed type transformer)는 자연식, 풍냉식 및 수냉식 등이 있다. 유입 변압기는 변압기의 냉각 효율은 우수하나 설치 공간이 넓어지고 지속적인 오일의 교환 및 관리가 필요하다. 반면에 건식 변압기는 설치 공간이 유입 변압기보다 작지만 발생된 열이 쉽게 방사되지 못한다는 단점이 있어서 대용량에는 적합하지 않다. 그런데 최근에 상가, 빌딩, 아파트 등에 설치되는 변압기는 유입식보다 건식이 많이 설치되고 있다. 몰드 변압기(mold transformer)는 절연 재료의 충전 형식에 따라 분말 충전제(실리카) 또는 섬유충전제(glass mat) 등이 있다. 몰드 변압기(mold transformer)는 기존의 유입식 변압기에 비해 설치 공간이 작을 뿐만 아니라 냉각용 기름을 사용하지 않으므로 청결하게 관리할 수 있다. 그러나 변압기 운용 중에 발생하는 열을 적절히 방출하는데 제한이 있고 이상 징후를 조기에 진단 또는 점검으로 발견하기가 어렵다는 한계점이 있다. 또한 변압기 사고가 발생하면 수리 및 보수가 현실적으로 불가능하므로 교체하는 시간과 비용이 많이 필요하다. 즉 변압기가 설치된 전기설비는 다른 어떤 에너지보다 에너지 활용도가 높고 발열 요소를 갖고 있어서 제어를 잘못하는 경우 층간단락, 과부하, 접촉(속) 불량, 누전, 반단선, 트래킹 등에 의한 사고가 발생할 수 있다<sup>14)</sup>.

따라서 본 본문에서는 사고 현장에서 수거된 22.9kV 3상 몰드변압기의 소손 패턴 및 소손된 권선의 금속 조직 특성을 분석하여 사고원인 규명을 위한 과학적 근거를 제시하고 PL 분쟁 해결을 위한 책임의 한계를 밝히고자 한다.

## 2. 관련 이론

전기 에너지의 전자 유도 현상을 응용하여 전압의 변환에 이용되는 변압기는 정지 기기이지만 시스템이 운용될 때 필연적으로 철심(iron core)에서 철손(iron loss)이 발생한다. 변압기의 철손을 줄이기 위해서는 규소 강판을 겹쳐 쌓은 성층 철심이 사용된다. 변압기의 권선이나 그 밖의 도전 부분을 적절하게 절연하지 않으면 대형 사고가 발생하므로 변압기의 용량 및 사용 환경에 따라 절연의 종류 및 허용최고온도가 규정되어 있다. 철심은 생김 모양에 따라 I 형 철심, E 형 철심 및 권형 철심 등

으로 분류된다. 그리고 철심의 연결은 겹치기 접합법(lap joint)과 맞대기 접합법(butt joint)이 있으며, 겹치기 접합법을 사용하면 자속의 흐름을 비교적 원활하게 유지할 수 있다. 표 1은 한국산업규격(KS C 2516)에서 요구하고 있는 방향성 규소 강대의 자기적 성질을 나타낸 것이다<sup>5,6)</sup>.

Table 1. Magnetic properties of silicon steel strips used for transformers

기호	종 류 두께 [mm]	밀도 <sup>(1)</sup> [g/cm <sup>3</sup> ]	철손 <sup>(2)</sup> [W/kg]	자속 밀도 <sup>(3)</sup> [T]
			$W_{1760}$	$B_{10}$
G 09	0.03	7.65	1.76 이하	1.79 이상
G 10	0.30		1.94 이하	1.77 이상
	0.35		1.99 이하	
G 11	0.30		2.14 이하	1.74 이상
	0.35		2.19 이하	
G 12	0.30		3.36 이하	1.71 이상
	0.35		2.41 이하	
G 13	0.35		2.64 이하	1.68 이상

- 주 (1) 밀도는 시험편의 단면적을 계산하는데 사용한다.  
 (2) 철손의  $W_{1760}$ 는 주파수 60[Hz], 최대 자속 밀도 1.7[T] 인 경우의 철손을 표시한다.  
 (3) 자속 밀도의  $B_{10}$ 은 자화력 1,000[A/m]에 있어서의 자속 밀도를 나타낸다.

Table 2. Comparison on properties according to transformer insulation method

구 분	몰드변압기	건식변압기	유입변압기
기본 절연	고체	기체	액체
절연체	에폭시수지 + 무기물 충전제	공기, MICA	크라프트지 광유물
내열계급	- B종 120℃ - F종 150℃	H종 180℃	A종 105℃
권선허용온도 상승온도	- 금형 75℃ - 무금형 150℃	102℃	- 절연유 55℃ - 권선 50℃
단시간 과부하 내량	200%, 15분	150%, 15분	
전력 손실	작다.	작다.	크다.
소 음	중	대	소
연소성	난연성	난연성	가연성
흡습성	낮음	보통	높음
방열 특성	낮음	보통	좋음
시스템 진단	보통	우수	우수
내습성, 내진성	흡습 가능	흡습 가능	강함
단락 강도	강함	강함	매우 강함
외형 치수	소	대	대
중 량	적음	보통	무거움
충격파 내전압, 22kV	95kV	95kV	150kV
설치 면적	좁음	보통	넓음
운전 경비	없음	없음	필요

Table 3. Comparison on characteristics according to mold transformer fabrication method

방식	특징	몰드변압기의 특성
금형 방식 (주형 몰드)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 주형법, 함침법, 함침주형법, FRP 주형법 등이 사용됨</li> <li>- 단락강도(BIL)가 우수함</li> <li>- 변압기의 신뢰성이 높음</li> <li>- 특수 제작이 어렵고, 가격이 비쌌</li> <li>- 고도의 주형 기술이 필요함</li> </ul>	
무금형 방식 (함침 몰드)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 금형 방식의 단점을 보완한 방식</li> <li>- 개별 사양의 제작이 가능함</li> <li>- 대형의 경우 금형 방식보다 경제적인</li> <li>- 보수 및 점검이 어려움</li> <li>- 단락강도(BIL)가 낮음</li> <li>- 대용량, 네트워크 변압기에 적합하다.</li> </ul>	

Table 2는 산업 현장에서 보편적으로 사용되고 있는 유입변압기, 건식변압기와 몰드변압기의 특성을 비교하여 나타낸 것이다. 어떠한 변압기도 모든 항목에서 우수한 성능을 발휘하는 것은 없다. 따라서 전기설비의 정격 용량, 사용 환경, 부하의 특성 등을 종합적으로 분석하여 변압기를 선정하게 된다. 최근에 설치 공간이 좁고 부하변동 및 부하율이 낮은 상가, 아파트, 빌딩 등에서 몰드 변압기의 사용이 증가되고 있다<sup>5,6)</sup>.

전기설비에 설치되는 몰드 변압기는 큐비클 내에 수납이 가능한 22.9kV 수전설비에 많이 채용되고 있다. 몰드 변압기의 가장 큰 단점은 시스템 운용 중에 발생하는 열을 적절하게 방사시키기가 어렵다는 것이고, 변압기에서 발생하는 이상 현상 또는 징후를 적절하게 진단하는데 한계가 있다는 것이다. 일반적으로 몰드 변압기의 절연은 주형 몰드를 이용한 금형 방식과 함침 몰드를 이용한 무금형 방식 등이 있다. Table 3은 몰드변압기의 절연 방식의 특징에 대해서 나타낸 것이다<sup>5,6)</sup>.

### 3. 원인 분석 및 판정

본 연구를 위해 사고 현장에서 수거된 3상 몰드 변압기의 1차측 특별 고압은 F23,900V, R22,900V, 21,900V, 20,900V, 19,900V 등이며, 2차측 저압은 380/220V이다. 특별고압용 3상 몰드변압기의 제작은 한국산업규격 KS C 4311을 준용되었으며, Table 4는 주요 사양을 나타낸 것이다.

몰드 변압기의 용량은 200kVA이며, ○○ 중공업의 제품으로 1차측의 절연은 B 등급이며, 2차측은 F 등급이다. Fig. 1은 사고로 소손된 3상 몰드 변압기의 실제 사진을 나타낸 것이다. 변압기의 1차측은 특별고압 22.9kV를 효율적으로 수전할 수 있

Table 4. Specifications of 3-phase cast-resin mold transformers collected from places accidents occurred

Description		Specification
Manufacturer		○○ Heavy Industries Co., LTD.
Phase		3
Insulation resistance	1st	2,000MΩ
	2nd	500MΩ
Frequency		60Hz
Standard		KS C 4311
Withstanding voltage	1st	50kV / 60sec
	2nd	3kV / 60sec
Rated Capacity		200kVA
Rated H. V		22,900V
Rated L. V		380/220V
Rated Current	1st	5.04A
	2nd	303.87A
Load	impedance	937V / 4.09%
	loss	3,184W
No load	current	2.99A / 0.98%
	loss	1,035W
Insulation class		B / F

는 삼각 결선(Δ-connection)으로 되어 있으며, 2차측은 사용의 편리성을 높이기 위해 Y-결선(Y-connection)으로 구성하여 380/220V로 강압 배전하는 변압기이다. 수변전설비에 설치된 3상몰드변압기, 차단기(ACB), CNCV 케이블, 배선용차단기(MCCB), 접지선, 전력용퓨즈(PF), 계기용변압변류기(MOF), 울타리 등의 관련 규정 및 시험성적서 등을 종합적으로 검토한 결과 기기의 선정 및 시험은 적절한 것으로 확인되었다. 그리고 본 수변전설비는 시공된지 1년 6개월이 경과된 설비이며 숙련된 엔지니어에 의해 시공된 것으로 확인되었고, 수변전설의 울타리 및 출입구는 상시 시건장치가 되어 있는 것으로 판단할 때 부적절한 취급이 있었다는 특이 사항을 확인할 수 없었다. 또한 CCTV를 확인한 결과 외부인이 출입한 흔적 및 근거가 없었다. 사고 현장에서 수거된 변압기는 U-상의 상부와 V-상의 상부 사이가 심하게 탄화되었고, U-상과 연결된 철심 및 부스바(동대) 등에서 백화 현상을 확인할 수 있었다. 사고를 최초로 목격 한 사무실 근무자에 의하면 일상적인 업무를 보고 있던 중 CCTV 모니터 화면이 나오지 않는 현상이 반복되는 것을 발견하였다. 그래서 근무자는 CCTV가 고장이거나 혹시 이방인이 침입하여 CCTV를 만지는 것으로 판단하고 건물 내부의 CCTV를 확인하

였으나 특이 사항을 발견하지 못하였다. 또다시 반복적인 조명등의 너울거림 현상이 확인되어 건물 옥상으로 다른 설비를 확인하러 가는 도중 천둥소리와 같은 굉음을 듣고 급히 옥상으로 올라가 보니 수변전설비에서 검은 연기가 새어 나오는 것을 목격하여 소방서, 한전, 전기감리 및 시공업체 등에 연락하여 안전 조치를 하였다고 진술하였다. 수변전실에 설치되어 있는 변압기 이외의 설비는 정상적으로 작동한 것으로 조사되었다<sup>7-11)</sup>.

Fig. 2는 변압기의 소손 패턴을 해석하기 위해 나타낸 실제 사진이다. Fig. 2(a)는 화염의 확산 패턴을 상부에서 촬영한 것으로 화염은 U-상에서 발생하여 V-상, W-상으로 진행되었다. 그리고 변압기의 권선에서 전원을 인출하는 단자대가 심하게 열적 스트레스를 받은 것을 알 수 있고, 철심을 지

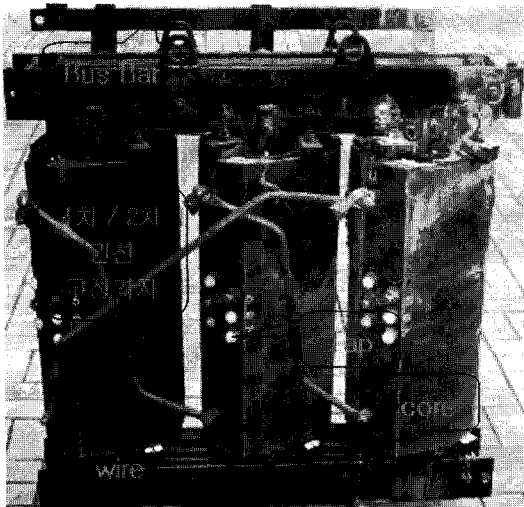


Fig. 1. Photographs of the front side of a damaged 3 phase mold transformer.

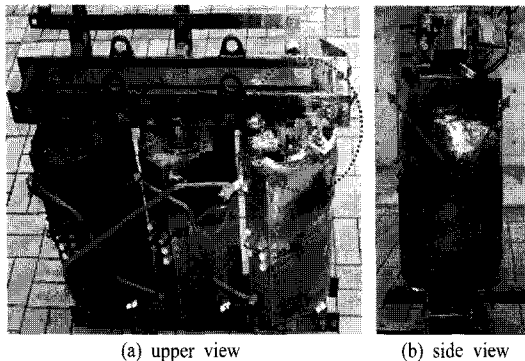


Fig. 2. Damage pattern and carbonization depth of damaged 3 phase mold transformer.

지하는 금속밴드 역시 U-상 부분에서 백화 현상이 있었던 것을 확인 할 수 있다. Fig. 2(b)는 사고 제품의 측면 사진을 나타낸 것으로 V-패턴(V-pattern)이 선명하게 형성된 것을 알 수 있다. 이와 같이 V-패턴이 형성되었다는 것은 상당시간 국부적으로 부분 방전(partial discharge)이 진행되었음을 의미한다<sup>7-11)</sup>.

Fig. 3은 소손된 3상 몰드변압기의 연소 확산 패턴을 해석하기 위해 분해된 실제 사진이다. 탄화심도는 고압측의 U-상에 형성되었으며, 화염은 U-상에 인접한 V-상을 거쳐 W-상으로 확산된 것이 확인되었다. U-상의 절연 튜브는 화열로 탄화되어 소실되었고, V-상의 절연 튜브의 상부 일부가 탄화 및 변형된 것을 알 수 있다. 또한 철심 및 동대(bus bar)의 일부가 소실 및 변형되었다<sup>7-11)</sup>.

Fig. 4는 최초의 출화 지점으로 판단되는 U-상 내부를 촬영한 실제 사진이다. 변압기의 1차측 권

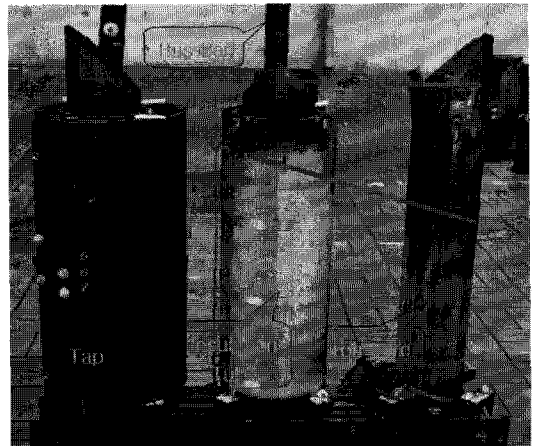


Fig. 3. Combustion diffusion pattern of damaged 3 phase mold transformer.

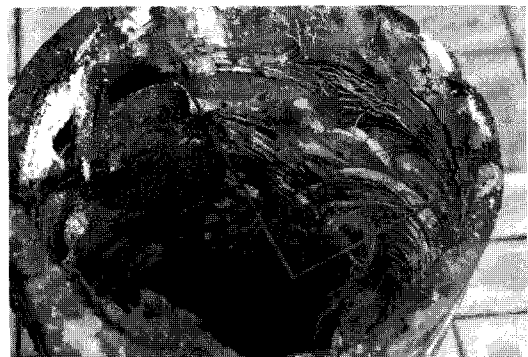


Fig. 4. Photograph of primary winding to which interlayer short-circuit occurred.

선의 내부 여러 곳에서 용융이 확인되고 V-패턴의 형상으로 탄화가 확산되었다. 즉, 어떤 이유인지는 단정할 수 없으나 최초의 발화 개소는 1차 권선의 안쪽이며, 그 때 발생한 에너지에 의해 상부 및 외부로 확산된 패턴을 보이고 있다.

Fig. 5(a)는 Fig. 4의 용융 권선을 수거하여 금속 현미경을 이용하여 분석한 금속 단면 구조이다. 단락(합선) 또는 층간 단락이 발생되었을 때 형성되는 주상 조직(columnar structure), 경계면(boundary surface) 및 보이드(void) 등이 확인되었다. Fig. 5(b)의 정상 구리 전선(동)의 금속 단면 구조와 비교하면 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 구리(동) 전선은 연신 가공으로 제작되므로 전선(도체)의 길이 방향으로 비교적 일정하게 입자들이 배열된 상태를 유지

하고 있음을 알 수 있다. 전기적인 스트레스에 의해서 용단된 구리 전선의 금속 단면 구조와 차이가 있음을 알 수 있다. Fig. 5(c)는 열적 스트레스를 받은 구리(동)의 금속 조직의 단면 구조를 나타낸 것이다. 전선(도체) 본래의 연신 구조는 없어지고 구리 단과의 불규칙적인 결정을 보이고 있다. 즉 비정질체의 전형적인 결합 구조로 무질서한 보이드(void) 및 그레인(grain)이 배열되어 있다<sup>7-11)</sup>.

#### 4. 결론

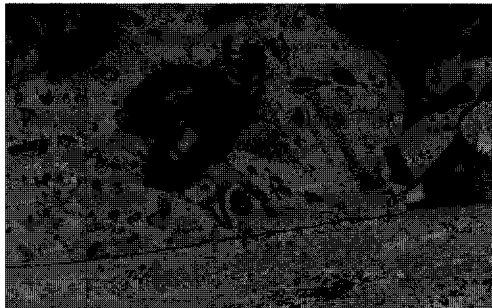
사고 현장에서 수거된 22.9kV 3상 몰드변압기의 소손 패턴 및 소손된 권선의 금속 조직을 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 산업 현장에 적용되는 변압기는 전기설비의 정격 용량, 사용 환경, 부하의 특성 등을 종합적으로 분석하여 변압기를 선정하는 것이 재해 예방에 중요한 요소로 확인되었다.
- 2) 소손된 몰드변압기의 연소 확산 패턴 분석에서 최초의 출화 지점은 U-상의 1차측 권선의 내부인 것으로 확인되었고, V-패턴의 형상으로 탄화 및 화열이 V-상, W-상 등으로 확산되었다.
- 3) 금속 현미경을 이용하여 고압측 용융 권선의 금속 단면 구조 분석에서 층간 단락이 발생될 때 형성되는 주상 조직(columnar structure), 경계면(boundary surface) 및 보이드(void) 등이 확인되었다.

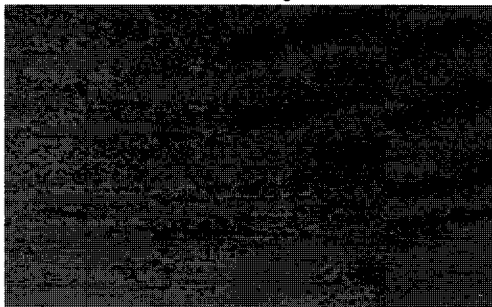
이상과 같은 결과에서 알 수 있듯이 몰드변압기의 사고 원인을 분석하기 위해서는 시스템의 운용 상태, 연소의 확산 패턴 및 용융된 권선의 금속조직 단면 등 입체적 해석이 요구된다.

#### 참고문헌

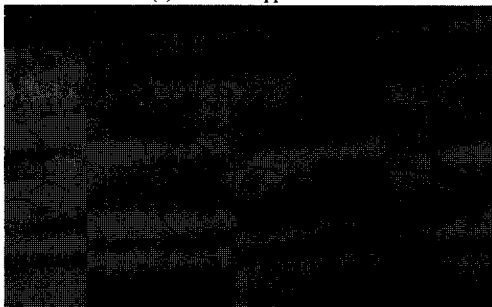
- 1) W. M. Flanagan, "Handbook of Transformer Design and Applications 2nd Edition," McGraw Hill, Chap. 1,8,11, 1992.
- 2) 고태언 외 7, "전기기기", pp. 245~368, 2007.
- 3) 손제봉 외 4, "전기기기", pp. 104~204, 형설출판사, 2007.
- 4) 최충석 외 5, "전기화재공학", 도서출판 동화기술, pp. 189~198, 202, 2004.
- 5) 한국표준협회, "한국산업규격 KS C 4311", 2002.
- 6) 한국표준협회, "한국산업규격 KS C 2516", 2002.
- 7) 최충석 외 2, "과전류에 의해 용단된 소선의 특성



(a) melted copper cable collected from the primary winding shown in Fig. 4



(b) normal copper cable



(c) copper cable imposed by thermal stress

Fig. 5. Analysis on the metal structure of copper cable.

- 해석에 관한 연구”, 한국산업안전학회 논문지, 제 19권, 제1권, pp. 60~65, 2004.
- 8) 최충석 외 2, “외부화염에 의해 소손된 비닐코드의 단락 특성에 관한 연구”, 한국화재소방학회 논문지, 제18권, 제4호, pp. 72~77, 2004.
- 9) 최충석, 김향곤, “열 스트레스에 의한 비닐절연전선의 탄화 패턴 및 결정 구조의 변화”, 대한전기학회논문지, 제57P권, 제3호, pp. 332~337, 2008.
- 10) 최충석 외 3, “직렬아크에 따른 도체의 산화물 증식 및 전압 파형 분석”, 대한전기학회논문지, 제 55P권, 제3호, pp. 146~152, 2006.
- 11) 최충석, “층간 단락에 의해 소손된 3상 몰드변압기의 패턴 해석”, 한국안전학회춘계학술대회, p.9, 2010.