

# 옥외 주상용 몰드 변압기의 적용 기술

한 세 원, 조 한 구  
한국전기연구소 전략기술연구단

## The Applied Technology of Mold Transformer for Outdoor Use

Se-Won Han, Han-Goo Cho  
Advanced Electrical Materials Group, *KERI*

**Abstract** - Insulator systems using resin casting apparatus are useful to realize the high capacity, small size, and combined electric power equipments, and are expected to bring various advantages. In Korea, epoxy resin molded apparatus have been restricted to indoor uses till now. On the other hand, in Europe, molded insulators and transformers and so forth have been practically used since the former half of 1960's. Recently, investigation on epoxy resin materials and molded apparatus for outdoor use have been intensively carried out. Probably, this is because electric power outdoor apparatus such as distribution transformer can be given multi-functions by using outdoor epoxy resin compound. This study describes the trend on the development of epoxy mold transformers, and important technologies applied for outdoor use.

### 1. 서 론

몰드 변압기는 코일을 몰드 재료로 일체 성형시켜 만든 고체 절연 방식 변압기이다. 몰드 변압기는 약 20년 전 개발되어 사용하고 있으며 난연성과 컴팩트화의 장점이 있어 그 수요가 확대되는 추세이다. 일본, 유럽, 미국 등지에서는 에폭시 수지로 만든 다양한 형태의 몰드 변압기 제품이 개발되고 있다. 몰드

변압기의 주 절연에 적용되는 몰드 소재는 내열성, 기계적 강도, 내크랙성 등을 갖는 에폭시 수지가 최적으로 알려져 있다. 이러한 에폭시 수지는 크게 i) epichlorohydrin bisphenol type와 ii) cycloaliphatic glycidylester type 2 종류로 나눌 수 있으며 내 오손성, 내 후성 등의 특성은 후자가 보다 우수하다.

몰드 변압기의 우수한 특성을 옥외에 적용하기 위해서는 적절한 몰드 수지의 선택과 배합, 성형 기술, 열응력 해석 기술 외에 중요 요소 및 제품의 내구성을 확보할 수 있는 장기 신뢰성 시험과 평가 등 중요한 기술이 개발되어야 한다. 여기서는 몰드 변압기를 옥외용으로 적용하기 위한 주요 기술에 관해 선진국의 사례와 자료를 소개하고 이와 관련한 국내의 옥외용 몰드 변압기 적용 기술에 관해 소개하고자 한다.

### 2. 에폭시 몰드 수지

#### 2.1 에폭시 수지

각종 권선이나 콘덴서, 도체, 고전압 지지용 금구류 등과 같은 충전부와 주절연을 구성하는 고체의 수지 재료를 일체 성형하는 것을 몰드라고 정의한다.

현재 몰드 절연에 이용되는 재료는 불포화 폴리에스테르 수지, 에폭시 수지, 폴리우

레탄 수지 등이 있다. 이들 중 가장 중요한 것은 에폭시 수지이다. 초기 불포화 폴리에스테르 수지를 많이 사용하였으나 최근에는 특성이 우수한 에폭시 수지가 주종을 이룬다.

에폭시 수지는 분자중의 에폭시 기를 2개 이상 가진 화합물로 고전압 기기의 몰드에는 분자량이 300(액상)에서 1000(고상) 정도의 것이 사용된다. 에폭시 수지 단독으로는 가열하여도 경화하지 않지만 경화제 등의 첨가물을 원재료와 혼합하면 중합 반응이 진행되어 3차원의 가교 구조가 구성되면서 고체 절연물이 된다. 몰드는 다양한 종류의 원재료를 혼합 사용한다. 몰드 특성의 우열은 배합 기술로 결정된다고 해도 과언이 아니다. 표 1은 각종 기기별 사용 몰드 소재를 소개한 것이다.

표 1. 에폭시 몰드 수지 종류와 용도

용도	일반전기기기	내오손기기	육외용
절연종류	B종	B, F종	B종
제조법	일반주형	일반주형법 합침법	일반주형법 합침법
사용예	애자, 절연통	몰드변압기 몰드변성기	몰드변압기 몰드변성기
특징	일반 절연용	내크랙성 내트래킹성	내후성 내크랙, 트래킹성
수지 사용 온도	110-105℃	85-110℃	95℃

## 2.2 몰드 변압기 제조법

몰드 변압기의 제조 방법을 그림 1에 나타내었다. 몰드 변압기가 장기 신뢰성을 갖기 위해서는 적절한 주형 방법을 적용하는 것이 필요하다. 일반적으로 금형 방식으로 동시에 진공 주형으로 합침하는 방법이 사용된다.

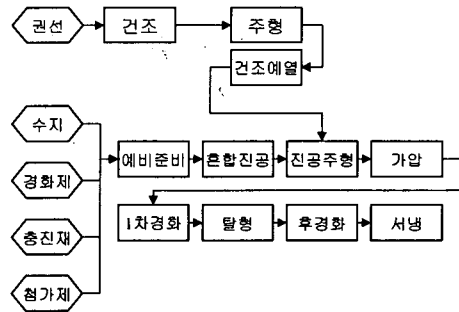


그림 1. 몰드 변압기 제조 공정

그림 1은 이 제조법에 의한 고압 코일의 제조 공정을 나타낸 것이다. 각 공정에서 온도, 압력, 처리 시간을 적절히 관리하는 것이 중요하다. 몰드 변압기에서는 다음과 같은 강점을 갖도록 몰드 배합을 조절 제조된다.

- ◇ 강점 1 : 불연성(충진재로 실리카 분말을 약 65wt% 첨가하여 내연성 시험으로 난연성을 확인)
- ◇ 강점 2 : 내 트래킹 우수(환상지방족계 에폭시 수지를 채용. 내 트래킹 시험(IEC 112 성능 확인)
- ◇ 강점 3 : 내 크랙성 향상(몰드 절연에서 가장 중요한 요소로 배합 선택 외에 설계, 제법 등 여러 가지 면의 검토가 필요)
- ◇ 강점 4 : 합침성 개선(권선 간 절연을 확실하게 하기 위해서는 합침성이 우수한 배합 선택과 제조 시 작업 조건의 엄격한 관리 요구)

## 2.3 내 크랙성의 향상

몰드 절연은 오일 절연과 비교하여 우수한 절연성을 가지고 있으나 오일 절연과 비교하여 절연 회복성은 없다. 그러므로 몰드 변압기에 크랙이 발생하는 중대한 사고로 발전할 가능성이 있다.

요인	대책
외부 열응력에 의한 변형	분자량 큰 수지, 경화제 사용
금구류/수지/도체 간 부정합 (열사이클 열응력)	열팽창계수 작은 수지 충진재 양 증가 금구류와 열팽창계수 정합
불균일한 내부 응력 변형	분자량 큰 수지 사용 경화 종료 후 서냉 열전도를 향상
금형/금구류 형상적 응력집중	금구 설계, 수지 두께 조절 완충층 설계 보강재료 이용

표 2. 크랙 발생 요인과 대책

따라서 개발 단계에 이러한 크랙 발생 요인을 파악하여 엄밀한 대책을 세워 내 크랙성이 우수한 제품으로 설계 제조되어야 한다. 표 2에 크랙 발생 요인과 대책을 정리하였다.

몰드 수지의 내크랙성은 매입 볼트 시험법, 냉열 시험으로 확인한다. 육각 볼트를 수지 중에 매입하여 고온과 저온의 냉열 사이클을 주어 크랙이 발생할 때까지 과정을 점검하는 방법이다. 철제 육각 볼트 시험편에는 10 사이클 이상, 알루미늄제 육각 볼트 시험편에는 15 사이클의 열 충격에 대한 내성을 갖는 배합 조건으로 몰드 변압기를 제조한다.

실제 제품의 내 크랙성은 몰드 코일을 이용한 다음과 같은 냉열 시험과 냉동 시험으로 검증한다. 단순한 크랙 발생 유무를 확인하는 것 외에 심각한 열 충격을 가한 전후의 충전기기에 요구되는 제반 특성을 동시에 시험하여 몰드 절연의 약점을 확인한다.

◇ 냉열 시험 :

0~0.5℃ 얼음물 중↔100℃ 수증기 중 2시간 : 3 사이클

◇ 냉동 시험 : -20℃ 기중에 48시간 방치

또한 최근에는 컴퓨터 시뮬레이션 기법을

이용하여 비정상적인 요소에 대해서도 열전도 해석을 실시하여 최대 주응력 분포를 해석하기도 한다.

### 2.4 몰드 수지 함침 특성

몰드 코일의 제조에 있어서 권선의 내부에 공극이 남는데 몰드 수지가 충분히 함침되는 상태에서 경화되는 것이 중요하다. 주절연인 몰드 수지를 주형을 따라 동시에 권선 내부에도 함침이 이루어지도록 하는 “진공 주형 동시 함침법”과 같은 고도의 제법이 사용된다. 이 방법을 가능하게 한 것은 수지의 반응성, 점도 시간 특성, 경화 온도, 진공과 가압에 따른 적절한 관리 기술이 조합되어야 한다.

### 3. 몰드 변압기 시험 평가

몰드 기기에 대해 요구되는 성능을 표 3에 요약하였다.

표 3. 몰드 절연 기기의 요구 성능

절연특성	기계적특성	열적특성	화학적특성
절연내력 내전압수명 부분방전특성 내트래킹성 내아크성	인장, 압축강도 내크리프(변형) 응력 열충격강도 내크랙성	난연성 열변형특성 열열화, 분해 열응력 분포	내후성 내유성 내수성

몰드 변압기에 요구되는 기본 성능을 요약하면 표 4와 같다.

일반특성	내전압	부분방전	내환경성	열적특성	기계적
효율 전압변동 무부하전류 하전류 부하손실	상용주파 유도 뇌임펄스	개시전압 감쇄전압 방전전하	내습 내크랙 내오손	절연종류 온도상승 풍냉 과부하내량	단락강도 내진강도

표 4. 몰드 변압기 요구 성능

몰드 변압기는 내부 도체와 권선을 전부 에폭시 수지로 피복되어 있기 때문에 절연부 내부 상태를 확인하기 위해서는 분해 확인하는 방법이 곤란하다. 따라서 제조상 품질관리, 결합 요인 및 열화 요인 점검을 위해서는 비파괴 방법으로 평가하는 것이 필요하다. 진단 가능한 비파괴 검증 방법을 표 5에 나타내었다.

표 5. 열화 요인과 비파괴 진단법

열화요인	발생증상	진단법
수지 함침 불량	절연 저하 기계적 강도 저하	X선 투과법 와전류탐상법 초음파 탐상법
내부크랙 불순물 침투	부분 방전 이상	X선 투과법 초음파 탐상법 부분 방전 측정법
금속 이물질	부분 방전 이상	와전류 탐상법
용접 불량 권선 불량	온도 상승 열열화 수지 강도 저하	열전대 온도 측정 광파이버 온도 측정 적외선 건 측정
크랙 조립 불량	기밀 누설	He 누설 시험법

개발된 몰드 변압기는 표 6과 같은 평가 항목으로 전기적 특성과 신뢰성을 확인하게 된다.

표 6. 몰드 변압기 전기적 특성 평가 항목

	일반시험	참고시험
항목	구조시험 절연저항측정 권선저항측정 변압비시험 극성시험 각변위시험 무부하시험 단락임피던스시험 전압변동률, 효율 내전압시험 부분방전시험 소음시험 단상평형도시험 온도시험	단락시험 절연내력확인시험 내크랙성시험(냉열시험) 냉동시험 내오손시험 내진시험

옥외용 기기는 옥내용과 비교하여 자외선, 비, 바람, 오손과 같은 가혹한 자연 환경에

노출되기 때문에 이러한 자연 조건 하에서 고전압 스트레스에 잘 견디도록 제조되어야 한다. 더욱이 몰드 변압기는 부하 전류에 의한 발열 스트레스에 대한 내구성도 요구된다. 따라서 이러한 문제에 대한 옥외용 몰드 변압기의 장기 신뢰성을 검증하기 위해서는 옥외 조건 하에서 정격 전압으로 연속 과전하면서 1.2~1.5배의 정격 전류로 시험한다. 이때 저압단 및 고압단 코일의 온도 상승을 동시에 감시한다. 몰드 변압기의 옥외 적용에 위해서는 내후성과 표면 절연성능을 검증하는 것이 필요하다. 여기서 몰드 변압기의 과전 시험을 옥외 조건 하에서 실시하면서 시험편에 대한 과전 폭로시험을 병행하여 시험한다.

일반적으로 몰드 변압기의 표면 절연 파괴는 발생하지 않는다. 가혹한 전압 스트레스가 가해지는 고압 단자부 근처에도 트래킹이나 마모(erosion)와 같은 현저한 열화는 확인되지 않지만 일사면과 코일의 발열에 의한 고온부의 표면에는 처클링이 확인되는 것이 보통이다.

무기 재료와는 달리 유기 고분자를 이용한 고분자 재료는 경년 열화가 발생한다. 따라서 에폭시 수지를 이용한 몰드 재료를 옥외용으로 적용하기 위해서는 절연 성능의 수명을 추정하는 것이 필요하다. 절연 재료의 수명을 추정하기 위해서는 과전 폭로 시험 결과와 인공 가속 시험 결과와의 관계를 검토하여야 한다. 인공 가속 시험의 경우 특히 자연 조건과 등가성을 갖도록 가속 배율을 결정하는 것이 중요하다. 한 예로 일본 TAKAOKA의 옥외용 몰드 변압기에 대한 과전 폭로시험에서 재료의 절연 열화와 가장 관련이 깊은 것은 표면 조도로 나타났다. 따라서 시편의 과전 폭로 시험과 MGR 시험에서 얻어진 표면 조도와 관계를 보면 그림 2와 같다. 표면 조도는 과전 시간에 따라 선형적인 관계를 갖는 것을 알 수 있다.

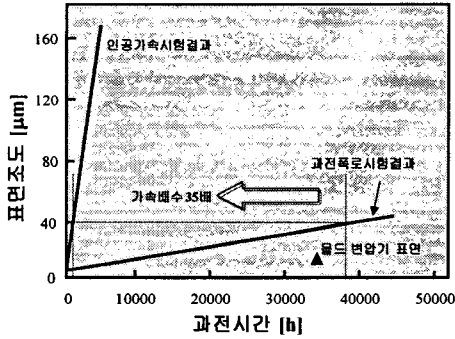


그림 2. 인공 가속 열화 시험과 과동전 시험 비교

여기서 과전 폭로 시험의 표면 조도의 최대값은 40 $\mu$ m로 환산하면, MGR 시험의 과전 폭로 시험에 대하여 약 20~240배 큰 것으로 알려져 있는데 여기 실험 결과에서는 조금 낮게 나타났다. 인공 가속 열화 시험의 5000 시간을 과전 폭로 시험 시간으로 환산하면 175,000시간이 된다. 이것은 약 20년에 해당하는 것이다.

#### 4. 옥외용 몰드 변압기 제조

##### 4.1 몰드 변압기 정격

- 단상, 50KVA, 22.9kV Y 13200/230-150V, 60Hz
- 옥외 주상용 변압기
- 적용 기준 : 한전 저손실 주상 변압기 기준
- 제반 주요 특성 : 효율 98.4%, 전압 변동율 1.4%, 무부하 전류 1.4%, 무부하 손실 127W, %임피던스 3.2%
- 절연 내전압 특성 : 상용 주파 내전압 40kV, 충격 내전압 125kV

##### 4.2 몰드 성형 방법

- 주형 설비 : 진공 성형
- 적용 수지 : 에폭시 수지

#### 4.3 시제품의 특성 평가

- 상용 주파 내전압, 유도 내전압 특성 시험 : 적정
- 효율, 전압 변동율, 무부하 전류, 무부하 손실, 임피던스 특성(표 7)

표 7. 시제품의 제반 전기적 특성

특성	설계치	시제품 특성치
효율(%)	98.45	98.49
전압 변동율(%)	1.33	1.235
무부하 전류(%)	0.5	0.43
부하 손실(W)	140	167
부하 손실(W)	643	597
임피던스(%)	3.3	3.09

#### 4.4 몰드 변압기의 열 분포 해석

- 해석 프로그램 : NASTRAN
- 해석 대상 : 실제 몰드변압기 전체의 10% 부분만(철심제외)을 모델링하여 저·고압코일(저압코일: 341W, 고압코일: 271W)의 발열량을 설정하고 외부표면 조건을 대류(온도 30 $^{\circ}$ C)로 설정

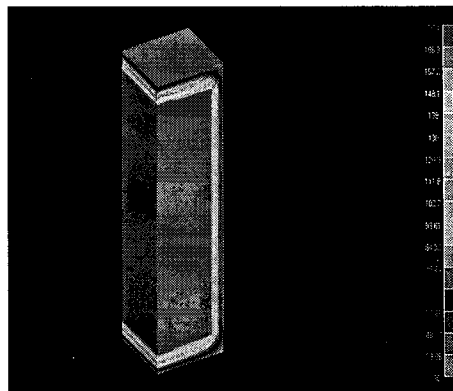


그림 3. 몰드 변압기의 열 분포 특성 시뮬레이션

## 참 고 문 헌

1. 日本 高岳 REVIEW Vol.34-2 No.112(62年 6月)
2. 日本 高岳 REVIEW Vol.39 No.2(4年 6月)
3. 日本 高岳 REVIEW Vol.32-3 No.107(60年 11月)
4. 日本 電氣評論, “新型 Mold 變壓器” 1996, 3
5. Y. Watanabe, T. Takahashi, T. Higashihara, T. Hasegawa, “Development of outdoor epoxy resin molded apparatus for distribution system” IEEE 1989, SM 628-9 PWRD
6. CIGRE WG15-06-04 “Draft method to evaluate the resistance to tracking and erosion of insulating materials for outdoor use”
7. M. Leda et al, “Testing of high polymer insulation for outdoor application review analysis and development” CIGRE SC 15, 1986 Session
8. Linden, W Pierce, “ An investigation of the temperature distribution in cast resin transformer windings” IEEE 1992, Vol.7, No.2 PWRD