옥외용 몰드기기의 기술동향

(The Technical Trend of Molded Power for Outdoor Use)

조국희* · 장창호 · 박진만
(Kook-Hee Cho · Chang-Ho Jang · Jin-Man Park)

Abstract

Today's electrical facilities demand improvements from the standpoints of non-inflammability, simple maintenance and inspection, safety and operating rationalization. The molded power with numerous special features that meet these various demands is acclaimed by all users and has a record of numerous applications.

Its applications are expected to expend further in the future.

1. 서 론

최근 전력수요는 전 지역으로 증가되고 있는 실정이다. 이에 따라 변전 및 수 배전 설비가 도시 내에서 다양한 장소에 설치되고 있어, 이러한 설비에 대한 방재성 및 안정성의 요구가 높아지고 있다. 이런 상황 아래 전력기기에 관해서는 지금까지 주로 사용되어 온 유입식 기기를 대신해, 난연성 기기로서의 몰드형 기기의 설치가 증가하고 있어, 한층 더 그 적용 범위를 확대하기 위한 기술개발이 진행되고 있다. 1940년대 후반부터 방재에 대한 요구의 고조, 절연재료의 발달과 함께 유럽에서는 온도상승 한도를 높게 할 수 있는 건식기기가 개발되었고, 1960년대는 뛰어난 수지류의 개발과 함께 몰드기기가 양산화 되기 시작하였다. 일본에서는 1950년대 후반부터 폴리에스텔 수지에 의한 몰드기기의 제작이 시작되어, 화재에 대해서 절대적인 안정성이 요구되는 빌딩 등에 적용하여 현재는 에폭시 수지 몰드가 주체가 되어 일반화되어 있다[1]. 이와 같이 몰드기기는 1960년대 후반부터 연구가 본격적으로 시작되어 1970년대 초에 실용화되면서 오늘에 이루고 있다. 에폭시 수지 등의 합성수지를 주형화해 얻을 수 있는 몰드 절연은, 전기절연성 및 기계특성 등에 뛰어난 특성을 나타내는 것으로부터 전기 기기의 넓은 분야에 적용되고 있다. 예를 들면 애자, 부싱, 몰드 변압기, 몰드 변성기(PT, CT 등), 공기 절연을 주체로 한 큐비클 형태의 개폐장치의 공기 절연부분을 에폭시 수지로 몰드 한 고체절연 개폐장치 및 가스 절연 기기용 각종 절연 스페이서 등이 있다. 이러한 몰드 기기는 주요부가 고체의 절연물로 구성되어지고 있기 때문에, 높은 절연성을 가진다. 그 때문에 기기의 제조에서의 품질관리 및 기기의 보수점검 입장으로부터 기기의 내부상태를 진단하는 기술이 매우 중요해진다.

본 논문에서는 몰드형 변류기(CT) 및 몰드형 계기용 변압기(PT)를 중심으로, 몰드기기에 있어서 절연 열화와 특성에 대해 설명하고 기술적 동향에 대해 살펴보았다[2].

2. 본 론

2.1. 기술 동향

유입식 기기가 현재까지 주류를 이루고 있지만 수배전 설비의 고신뢰성 측면과 오일의 환경오염, 염분 등에 의한 외함의 부식 및 누유 등이 문제로 되고 있다. 따라서 화재에 대한 안정성 및 유지보수의 경제성과 편리함에 대한 요구가 증가되어 최근 국내 몰드 기기의 생산량은 년 평균 50% 이상 신장되고 있다. 몰드 기기는 건식 기기의 일종으로 난연성을 구비한 에폭시 몰딩부와 공기층의 복합절연으로 구성되어 있다. 유입식 기기에서 몰드 기기로 대처되고 있는 것은 가격에 비해 에너지 절감, 안정성, 환경측면, 소형 경량화 및 간편한 유지보수 점검 등 여러 가지 장점으로 수요가 증가하고 있기 때문이다. 몰드 기기는 에폭시 수지로 몰딩 되어 권선 내부에 아크가 발생하여도 발화되지 않을 뿐 아니라, 화재 발생한 경우 자기 소화되는 특성이 있으므로 최근 유입식 기기에서 빈번히 일어나는 폭발사고는 전혀 예상할 수 없으며, 주위에 화재가 발생할 경우 연소될 염려가 없으므로 유입식 기기에 비해 소화설비 등 부대설비를 극히 간소화 되므로 시설공간의 축소가 가

능하다. 유입식 기기는 절연유의 여과, 교체가 항상 요구되며, 건식 기기는 먼지나 습기 등에 의해 절연내력에 영향을 받으므로 유지보수에 많은 단점이 있으나, 몰드 기기는 유지보수에 부담이 적고 운전중에 권선 내부에 먼지 등 이물질의 침입 우려가 없을 뿐 아니라 장시간 운전 정지 후, 재 사용 할 때에도 흡습의 염려가 없으므로 보수 및 점검이 매우 용이하다. 절연 특성이 우수한 에폭시 수지로 권선이 몰딩 되어 임펄스 성능이 우수해 신뢰성이 높으며, 권선 도체를 에폭시 수지와 열 팽창계수가 거의 같은 재질을 사용하므로 기온의 변화나 부하의 변동으로 인한 수지층의 균열이 발생하지 않으며, 장시간에 걸쳐 우수한 절연특성이 지속적으로 유지되어 신뢰성이 높다. 몰드 기기의 권선은 도체와 일체화 몰딩으로 권선의 열 용량이 크고 권선의 온도상승이 낮아 단시간 과부하 내량이 크므로 전철, 용접기, 발·변전 설비, 압연설비 및 원전설비 등 순시 피크 부하가 걸리는 설비에 유효하게 적용할 수 있다. 에폭시 수지로 몰드된 권선을 일체형으로 할 수 있으므로 기계적 강도는 매우 견고하며, 운반중의 진동과 단락전류에 의해 생기는 전자 기계력 및 그 밖의 이상 진동에서도 문제가 되지 않는 견고한 구조이다.

2.2. 몰드 기기의 특징

몰드 기기는 전압 및 용량에 적용한계가 있지만, 코일 전체를 수지로 함침 함에 따라 유입식이나 가스식과 같은 냉각 및 절연을 위한 특별한 매체가 불필요하며 다음과 같은 특징을 가진다.

(a) 난연성

난연성으로 자기 소화성을 가지는 수지로 몰드되기 때문에, 발화할 가능성은 극히 적고, 또 만일 발화해도, 전원 또는 화재원 으로부터 분리하면 자연스럽게 불길도 소멸해, 화재가 확대되는 것은 없다.

(b) 우수한 내습성

코일 표면이 수지로 덮여 있기 때문에 흡습에 의한 절연열화가 거의 없고, 오손에도 강하기 때문에, 열악한 분위기에서도 그 영향을 받지 않는다. 먼지가 부착해도 절연저하가 거의 없고, 또 부착한 먼지의 제거도 용이하다.

(c) 경년

수지로 몰드되기 때문에, 기계적 강도가 크고, 내진성에도 우수하다. 또 단락 기계력에 대해서도 큰 안전율을 가지고 있다.

(d) 보수 및 점검의 용이

유입기기와 같이 절연유의 보수 및 점검이 필요 없고, 건식 기기와 같이 장시간 휴지 후, 통전 전에 제습 건조 등도 불필요 하다. 코일 표면이 수지로 함침 되어 있기 때문에 유지 보수 작업이 매우 간단하다.

2.3. 몰드 기기에 사용되는 절연재료

몰드 기기에 사용되는 주요한 절연재료는 표 1에 나타내었다.

표 1. 절연재료
Table 1. Dielectric material

사용 부위	사용 재료
도체 피복	내열 에나멜, 아라미드지
몰드 재료	기 재 : 유리포, 부직포, 아라미드지 수 지 : 에폭시 수지 충진재 : 실리카 분말, 마이카 분말, 알루미나 분말, 유리섬유 분말 경화제 : 산이 없는 물질, 아민류 기타 첨가제 : 경화 촉진제, 착색제, 가소제
지지 부품	유리 에폭시 적층판 불포화 폴리에스텔 FRP류 에폭시 성형품 포리에스텔 성형품 페놀 레진 성형품

(a) 기재

금형이 아닌 성형방식에는 몰드코일을 제작하는 경우에, 코일에 감아 수지층을 형성시키기 위해 기본이 되는 섬유질 재료이며, 이것에 수지를 함침 또는 코팅해서 사용한다.

(b) 수지

몰드 코일에는 전기적, 기계적 특성, 접착성 등에 우수한 에폭시 수지가 사용된다. 에폭시 수지는 종류가 다양하며 표 2와 같이 분류할 수 있는데 일반적으로 사용되고 있는 것은 에피·피스형 수지이다.

그 외에는 특별한 경우에만 사용되며 이러한 수지는 충진재, 경화제와 조합하여 다양한 종류 및 성질을 얻을 수 있다.

(c) 충진재

몰드 수지에는 표 1에 나타낸 것과 같은 무기질의 충진재가 일반적으로 사용된다. 수지에 혼합하는 것으로 선팽창 계수를 작게 해 권선도체의 선팽창 계수에 접근할 수 있으므로, 몰드 코일의 내 크랙성이 향상한다. 충진재의 양을 많게 하면, 무기질 성분이 많아지므로, 난연 성능은 향상되지만, 혼합물 점도가 높게 되어, 작업성이 나빠지기 때문에 적당한 배합량이 선정된다.

(d) 경화제

몰드 수지를 경화 시키기 위해 경화제가 사용된다. 산무수물계(酸無水物系)는 가열경화형으로 수축이 적고, 내노화(耐老化) 특성이 뛰어나 전기적 및 기계적 특성도 양호하다. 방향족 아민계는 고온 경화(80~150℃) 형태로 열 변형 온도가 높아 내 약품성도 양호하다.

(e) 가소제

가소제를 적당량 첨가하는 것으로, 코일 도체나 금속부품 등의 매입물에 첨가하여 수지의 전류응력 및 열응력을 완화시키고, 크랙의 발생을 방지하는데 효과가 있다.

2.4. 에폭시 수지의 특성

(a) 일반 특성

에폭시 수지는 경화 후는 고체 절연물이 되어 전기적, 기계적으로 뛰어난 성능을 얻을 수 있다. 표 2에 대표적인 피스형 에폭시 수지의 기계적 및 물리적 특성예를 나타내었으며, 같은 수지에서도 충전재의 유무에 따라, 특성이 크게 다르다는 것을 확인 하였다.

표 2. 에폭시의 특성

Table 2. Characteristics of epoxy

항 목		무 충진제 수지	충진재 혼합수지
인장강도(kgf/㎟)		5.5	8
압축강도(kgf/㎟)		14.5	20.5
굴곡강도(kgf/㎟)		13	11.5
충격강도(kgfcm/㎠)		11	5.5
비중		1.2	1.85
선팽창계수(20~50℃)(10^{-6}/℃)		67	30
휨 탄성율(kgf/㎟)		475	1.59
Brinell 경도		20	33
열전도율(kcal/mh℃)		0.101	0.798
열변형 온도(Martens)(℃)		70	82
유전정접(20℃)(%)		0.4	3.2
비유전율(20℃)		3.3	4.1
체적저항율(10^{15}Ω · cm(20℃))		4,000	700
조성	수지(CY205)	100	100
	경화제	100	100
	가소제	10	10
	경화촉진제	1	1
	충진제	-	400
경화조건		80℃,8시간+130℃,8시간	

(b) 난소성

몰드 코일에 이용하는 에폭시 수지에는 무기물의 충진재 등이 배합되기 때문에, 산소지수가 30 정도 혹은 그 이상이 되어 공기 중에서는 연소가 계속되지 않고 난연성을 갖고 있다.(산소지수 20 이하에서는 공기 중에서 연소가 계속 된다.) 내연성 시험에서 길이 127㎜, 폭 및 두께 12.7㎜에 성형된 시료를 수평으로 유지해, 화염을 시료에 30초간 접촉시키고, 불길을 없앤 후의 연소시간과 연소거리를 측정해, 시료의 연소 거리가 25㎜ 이하인 경우는 불연성, 25㎜를 초과하는 100㎜ 이하의 경우는 자소성(自消城), 180초간 이상 화염이 사라지지 않는 경우는 가연성으로 판정하지만, 몰드 코일은 자소성을 가지는 것은 물론이며, 그 이상의 불연성을 가지는 것도 제작되고 있다.

(c) 함침성

에폭시 수지로 코일을 몰드하는 경우, 절연성능을 향상시키기 위해서는 코일 내부 혹은 보강 섬유간에 수지를 충분히 함침시키는 것이 필요하고, 이 때문에 수지는 함침성이 좋은 것이 요구된다. 일반적으로 수지 점도가 1,000cP 이상에서는 유리 섬유간에 충분한 함침은 어렵고, 300cP 이하이면 양호하게 함침시킬 수 있다. 수지의 점도는 수지의 종류와 충진재의 성분, 입자의 크기, 첨가량 및 수지 온도에 의해 변화하기 때문에, 필요로 하는 전기적, 기계적 및 열적 성능에 따라 수지나 충진재를 선정해야 하며 그림 1이 수지와 경화제를 혼합한 함침용 수지의 점도-온도 특성이다.

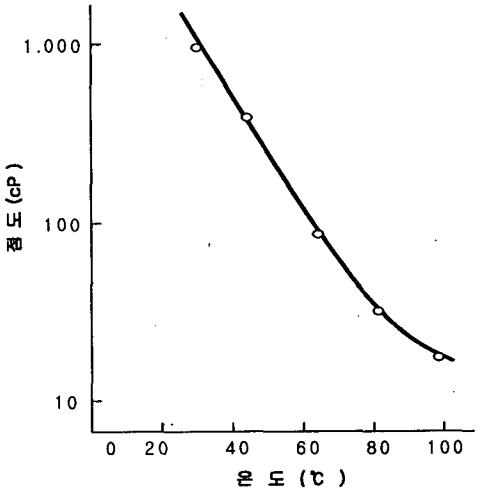


그림 1. 점도와 온도의 특성

Fig. 1. Characteristics of viscosity-temperature

(d) 내열성

에폭시 수지가 장시간 고온에 노출되면 열분해나 산화 분해 등에 의해 변질되므로 전기적 및 기계적 강도가 저하되므로, 내열성을 검토할 필요가 있다. 내열성의 평가는 굴곡강도, 절연파괴 전압, 가열 중량감소 등에 대해 내열성 평가를 시험하여, 정해진 수명(end point)에 도달하는 시간과 온도(절대온도)와의 관계를 대수 눈금상에 플롯한 내열 그래프에 의해 평가하는 방법으로 수행되고 있다. IEC-216에서는 충진재를 혼합하는 경우에, 굴곡강도 및 절연파괴 강도에 대해 초기치의 50%로 저하한 시점을 end point로 하고 있다. 또, DIN-16946에서는 무기 분말을 충진재로 혼합하는 경우, 굴곡강도로 7.5kgfcm/㎠, 가열 중량 감소에서는 1.2%를 내열평가의 한계치로 하고 있다.

그림 2는 열 열화와 유리 전이 온도의 상승관계 일례를 나타내고 있다. 이 수지에 대해 140℃, 160℃에서는 열화 일수에 대한 유리 전이 온도의 상승이 적고, 온도에 의한 차이가 거의 없지만, 160℃을 넘는 온도 영역에서는 온도가 높아질수록 열화 일수에 대한 유리 전이 온도의 상승 현상이 현저하게 나타났다. 표 3은 에폭시 수지 종류이며, 그림 3(a)에는 에폭시 수지의 열 중량 곡선의 예를 나타내었다.

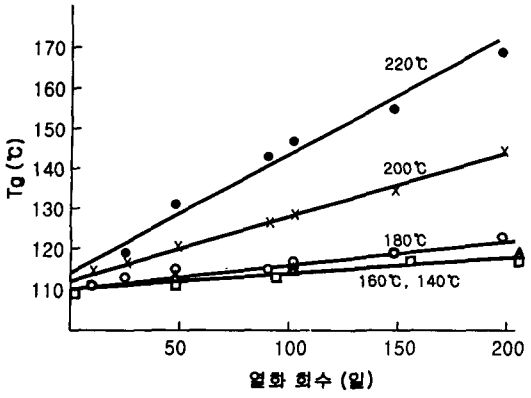
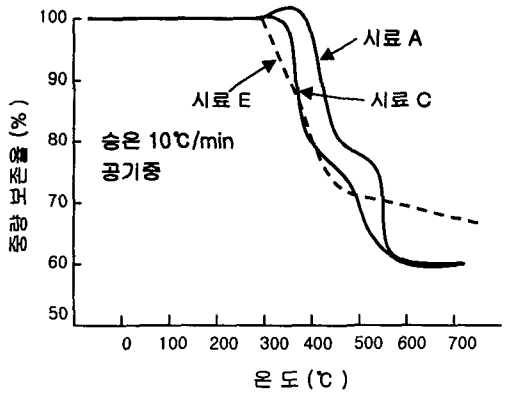


그림 2 온도와 열화(일)의 관계
Fig. 2. The leration of temperature and Aging(day)

표 3. 에폭시 수지 종류
Table 3. A kind of epoxy resin

시료	에폭시 수지	경화제	충전재
A	고체형 피스페놀계	고체형 산이 없는 물질	실리카
B	액체형 피스페놀계	고체형 산이 없는 물질	실리카
C	혼합계	고체형 산이 없는 물질	알루미나
D	혼합계	고체형 산이 없는 물질	알루미나
E	히단트인계	액체형 산이 없는 물질	알루미나

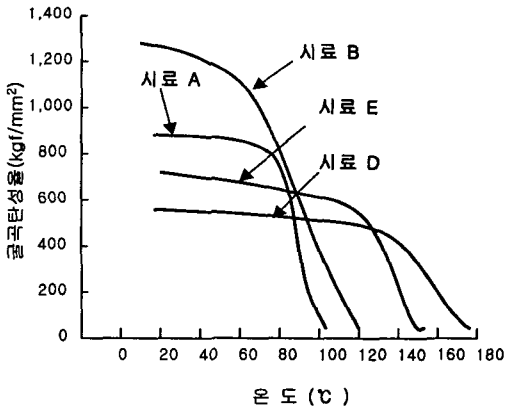


(a) 열중량곡선

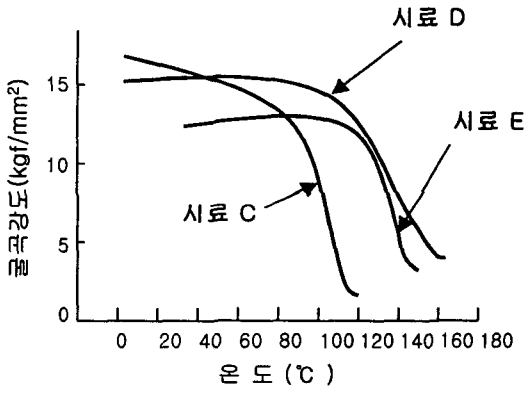
그림 3(a)에서 3 시료의 내열성 순위는 시료 A, C, E의 순서이지만, 열분해 개시온도가 250℃ 이상이므로 내열성이 우수한 것을 확인할 수 있다. 또한, 각 시료 모두 환전하게 열 분해 하지 않는 것은 충진재가 잔존하고 있기 때문이다.

(e) 온도 특성

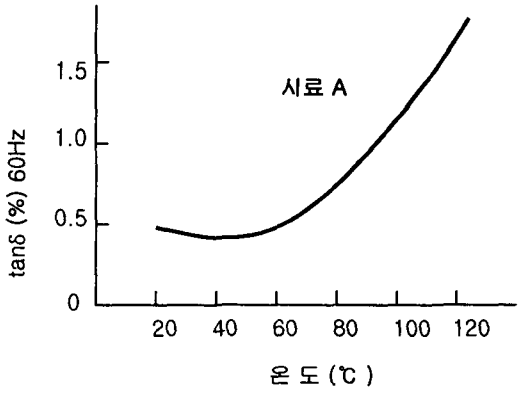
경화 후의 에폭시 수지는 온도에 의해 특성이 변화한다. 유리 전이 온도 이하에서는 무정형의 유리 형태 고체이기 때문에 높은 특성을 얻을 수 있지만, 유리 전이 온도 이상에서는 경도가 감소하는 등 여러 가지 특성이 크게 변화하므로 사용 온도 조건이 한정되어 있다. 그림 3(b)에 굴곡 탄성율의 온도 특성, (c)에 굴곡강도의 온도특성, (d)에 tanδ의 온도특성 관계를 나타내었다. 그림 3을 보면 어느 온도 이상이 되면 특성이 급격하게 저하하고 있어 유리전이온도와 일치하고 있음을 알 수 있다.



(b) 굴곡탄성율의 온도 특성



(c) 굴곡강도의 온도 특성

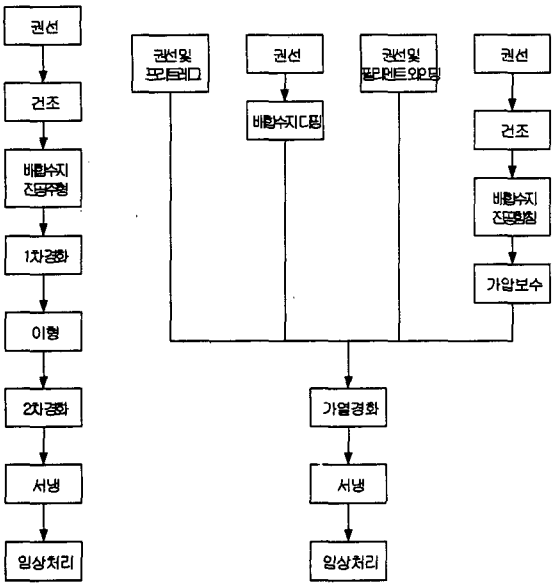


(d) tanδ의 온도 특성

그림 3. 에폭시의 온도 특성
Fig. 3. Temperature Characteristics of epoxy

(f) 성형 방식

성형방식에는 크게 그림 4와 같이 금형성형방식과 무금형 성형 방식 으로 분류할 수 있다.



(a) 금형 성형 방식 (b)무금형 성형 방식

그림 4. 제조공정

Fig. 4. Manufacture process

무금형 성형방식은 프리프레그법, 디핑법, 필라멘트 와인딩법, 함침 주형법 등이 있으며, 금형이 불 필요하기 때문에 설계의 자유도가 크고, 다기종 소량 생산에 적합하다. 프리프레그법은 미리 수지를 함침해 반경화시킨 테이프나 시트류(프리프레그)를 코일에 감은 후, 가열해 수지를 경화시키는 방법이다. 반 경화 상태의 함침수지가 초기 온도상승 시점에 용해해, 적층 테이프류가 상호 접착해 소정의 FRP 층으로 일체 성형하므로 기계적 강도가 뛰어나다. 디핑법은 코일 내외층에 유리섬유 등의 보강재를 감은 후, 수지에 함침하고, 수지를 누실시키지 않고 가열 경화시키는 방법이다. 코일 내부에까지 수지를 침투시키기 위해서 구조상의 배려가 있어야 한다. 필라멘트 와인딩법은 글래스 로핑(유리 장섬유)에 수지를 함침시키면서 코일 주위에 감은 후, 가열해 수지를 경화시키고 FRP층을 형성시키는 방식이다. 글래스 로핑의 밀착도가 좋으므로, 내크랙성이 우수하다. 함침 주형법은 도체의 주위에 섬유질의 보강재를 배치한 코일에 수지를 진공 함침하고, 표면 수지의 경화 촉진에 의해 함침된 수지를 보관하여 가열 경화하는 방법이다. 수지의 함침이 양호한 것과 섬유질의 보강효과에 의해 절연특성과 기계적 강도가 뛰어나다. 그 외에 코일의 주위를 유리 테이프로 감고, 수지를 함침한 후, 액중에 함침하여 가열 경화시키는 부유경화법, 가열한 코일에 에폭시의 분체를 분사시켜 코일 표면에 에폭시 수지층을 형성하는 에폭시 분체 도장법, 코일 표면에 고강도의 섬유질 재료를 감은 다음 표면을 수지로 경화시켜서 코일 내부에 수지를 진공 함침시키는 방법 등이 있다.

2.5. 몰드기기의 이상진전 메카니즘

(a) 몰드 절연의 열화

몰드 절연물이 기기에 적용되었을 경우, 그 절연에는 여러 가지의 스트레스(열화 요인)가 가해지게 된다. 이러한 스트레스는 열, 전압(전계), 응력 및 환경 등이다.

표 4. 절연열화와 프로세스

Table 4. Insulation degradation and process

절연 열화의 종류		요인	진행 프로세스
열 열화		열	산화, 열 분해 → 기계 강도 저하, 흡수성 증대 등
전계열화	부분방전 열화	보이드 (크랙, 기포)	산화 → 절연 두께 감소 → 관통파괴
	트리잉	돌기, 이물	
응력열화		열응력, 히트 사이클, 진동응력	크랙, 보이드 발생진전 → 전압열화
환경열화		습기등	오손, 흡습 → 트랙킹

표 4는 몰드 절연의 열화 현상을 요인별로, 그 종별과 진행 프로세스를 집계한 것이다. 이것에 의하면, 몰드 절연의 열화는 4종류로 구별된다. 여기서, 열 열화, 전압 열화 및 응력 열화는 주로 절연물 내부의 열화인데 비해, 환경 열화는 절연물 표면의 열화가 주체이다. 이러한 절연 열화는 각각 단독으로 일어나는 경우도 있지만, 보통 서로 강한 관련을 가진다. 예를 들어, 응력열화에 의한 크랙 등은 여러 가지 보이드가 발생하면, 이것은 부분방전 열화의 원인이 될 수 있다.

(b) 장해 분석

현재, 인간의 오감을 주체로 행해지고 있는 순시 점검, 각종 측정기를 이용한 보통 점검 및 정기 점검에 의해, 기기의 이음, 이취, 균열, 손상, 발청, 변색, 절연 저항 등의 감시를 하고 있다. 그 결과의 통계에서는 몰드 변성기의 전 장해건수에서 몰드 부분의 장해가 약 1/3로 제일 많고, 다음에 도체, 리드 선 관계의 순서가 되고 있는 것으로 보고 되고 있다. 최근에는, 몰드 절연 재료로서는 에폭시 수지가 주류이며, 수지 그 자체에 기인하는 장해는 매우 적게 되고 있다.

(c) 사고·장해 진전 플로우

몰드 변성기의 사고·장해 진전 플로우를 그림 5 및 6에 나타내었다. 그림에서 보면 몰드 변성기는 몰드 내부 열화보다, 몰드 표면상의 오손이나 흡습에 의한 환경 열화에 의하는 것이 많은 것으로 나타났다.

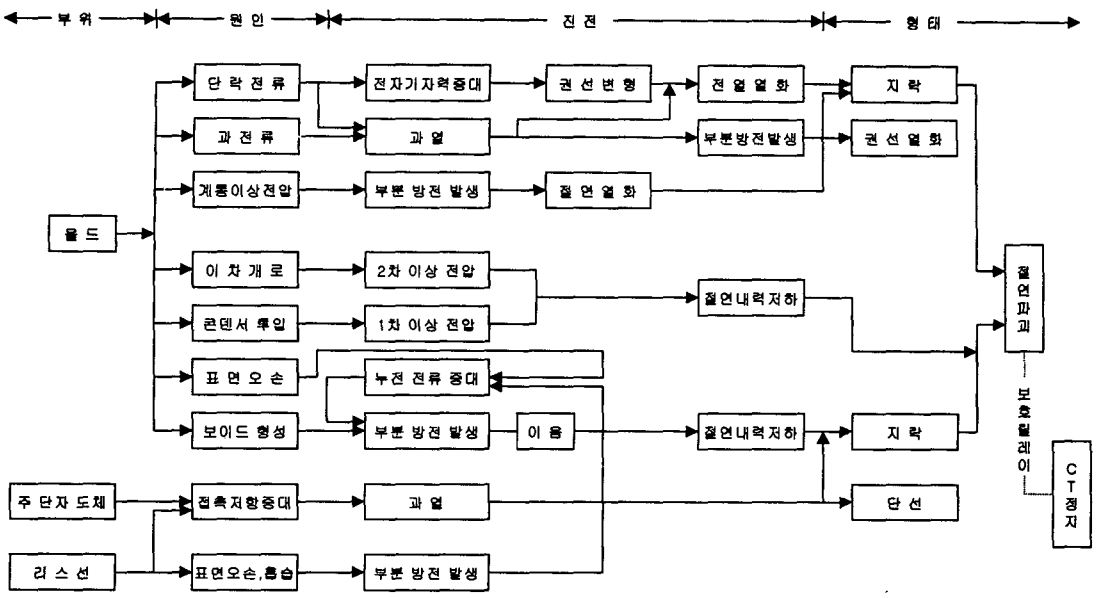


그림 5. 몰드 변류기
Fig. 5. Molded current transformer

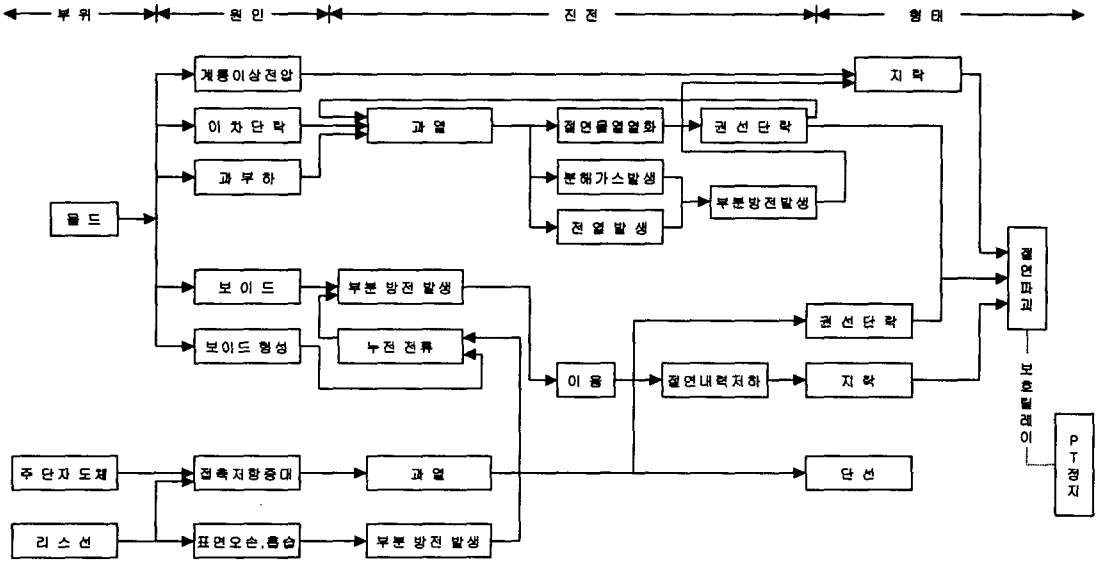


그림 6. 몰드 계기용 변압기
Fig. 6. Molded metering out fit

3. 결 론

에폭시 수지 등의 합성수지를 주형화해 얻을 수 있는 몰드 절연 기기는 전기절연성 및 기계특성 등에 뛰어난 특성을 나타나므로 전기 기기의 넓은 분야에 적용되고 있다. 그러므로 향후에는 방재성, 안정성, 불연성 및 난연성의 이유로 더 많은 수요가 예상되므로 특수한 조건하에서도 사용할 수 있는 피시품을 개발할 필요가 있다.

참 고 문 헌

[1] Takashi Hasegawa, "Application Technology of Moided Products in the Field", Takaoka Review, Vol.43, No.4, pp.66~72, 1996.

[2] Shigenori Okada, "Characteristics of Epoxy Resin Compound for Outdoor Use", Takaoka Review, Vol.44, No.2, 1997

[3] S. Kumieda, "Properties and Applications of Resin molded Transformer for Electric Power", OHM 62. 1975.

[4] P. D. Smith, "Epoxy Insulation-A New Generation of Dry Type Transformers", Polygon Industries, Toronto. 1977.

[5] A. Fernandes, "Prevision of the Thermal Behavior of Dry Type Cast Resis Transformers", Electric Power, 1992.