

가공배선용 부하개폐기(SF₆형) Bushing 개발

1. 서 론

국내 산업의 고도 성장과 이에 수반되는 전력 수요가 급진적으로 신장 되어감에 따라 전력 공급의 신뢰성 향상은 급후 더욱더 중요한 과제가 되고 있는 실정이다. 이에 따른 공급자측에서는 양질의 전력공급을 위하여 배전 자동화 및 정전구역 최소화를 해야 하므로 가공배선용 부하개폐기를 점점 더 많은 수량을 설치 하고 있다.

이 개폐기는 주상에 설치하는 관계로 소호성이 뛰어난 SF₆가스를 내부에 충전시켜 Compact화 되고 있으며, 여기에 통전부에 해당되는 Bushing은 SF₆가스가 충전된 내부 구조물과 외부 공기와의 절연유지 및 방수성 그리고 기계적 강도를 갖추어야 한다. 그러나 개폐기 제작을 하는 각사에서는 개폐기 개발 시 마다 국내 각 애자업체에 기밀성, 방수성에 초점을 맞춘 개발을 의뢰하여 Bushing의 국산화를 위한 노력을 계속적으로 추진하여 왔으나 자기제(Porcelain)의 많은 수축에 따른 치수 불균일 및 기밀유지를 위한 연마기술 부족등으로 실패를 거듭하여 왔다. 그러한 원인으로 인하여 개폐기용 Bushing를 전량수입 제품에 의존하고 있다.

그러하여 본 연구에서는 자기제 대체 사용이 가능한 절연소재 Polymer Concrete를 이용하여 Molding화, Compact화, 조도의 우수성에 따라 기밀유지 가능한 Bushing을 개발하고자 한다.

또한 우수한 절연내력을 갖는 Polymer Concrete 이용으로 장시간 이용하여도 절연 성능이 감소하지

않고, 절연물의 경년변화가 없는 Mold Bushing을 위한 조성비를 연구하여 적용하고, 전계해석 및 구조해석을 통한 개폐기 Bushing설계 및 제작 후 특성시험을 실시하였다. 특성시험은 전기적, 기계적, 가공배선용 부하개폐기 적용 시험을 실시하여 자기제(Porcelain)대체로써 Polymer Concrete의 신뢰성을 증명하고자 한다.

2. 기술개발의 기초이론과 시험

2.1 Polymer Concrete의 조성비

Polymer Concrete(이하 PC)의 구성재료인 무기재료와 유기재료의 조성을 전기적, 기계적, 물리적 특성의 최적조건에 맞으며 가공배선용 부하개폐기 Bushing의 특성중 외함파 Bushing접촉 부위인 O-ring취부 부위의 기밀유지 및 최소 수축율을 갖출 수 있는 조성이 되도록 한다.

즉, 무기재료 중 작은 미세입자의 wt%을 높이며 유기재료중 희석제이면서 수축율과 관계가 깊은 Styrene Monomer의 양을 줄인다. 유기재료 저점도의 불포화 폴리에스터와 스티렌모노머를 합친 값은 수지의 양이라 볼때 그 비율을 11~14%까지 변화시켜 작업성이 가장 좋고 특성도 좋은 비율을 찾도록 하였다.

이때 경화제인 MEKP의 양은 최대로 하여 시험하였다.

시험결과는 Table 1.과 Graph 1,2와 같으며 결과

에서 알 수 있듯이 수지의 양에 따른 PC의 특성은 전기적 기계적 특성변화를 가짐을 알 수 있다. 너무 작은 양의 수지는 작업이 어렵고 기공의 발생이 많아지기 때문에 전기적 특성 및 강도가 저하됨을 알 수 있다.

또한, 전기적 특성에 대한 시험은 PC제조 작업에 작업성이 가능한 최소량을 사용한 것이 가장 좋은 절연내력을 가짐을 알 수 있고 기계적 특성 측면으로는 수지 양이 많을수록 압축강도는 나빠지고 인장강도는 좋아짐을 알 수 있다.

본 시험에서 수지 양의 최적 조건은 13w%였다. 그에 따른 유기재료, 무기재료의 조성비는 다음과 같다.

〈Table-1〉 수지 사용량에 따라 제작된 시료의 특성 시험표

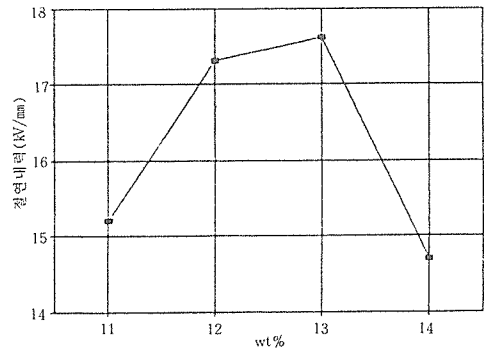
특 성	수지농도	11wt%	12wt%	13wt%	14wt%
	시 편				
절연내력 (kV/mm)	1.	15.3	17.1	17.7	14.5
	2.	15.0	17.2	17.6	14.5
	3.	15.3	17.6	17.5	15.1
	평 균	15.2	17.3	17.6	14.7
압축강도 (kg/cm ²)	1.	1,765	1,755	1,700	1,640
	2.	1,760	1,750	1,730	1,635
	3.	1,755	1,760	1,730	1,615
	평 균	1,760	1,755	1,720	1,630
인장강도 (kg/cm ²)	1.	255	280	300	330
	2.	250	285	320	350
	3.	275	290	310	345
	평 균	260	285	310	335
작 업 성		나쁘다	안좋다	좋다	아주 좋다

무기재료

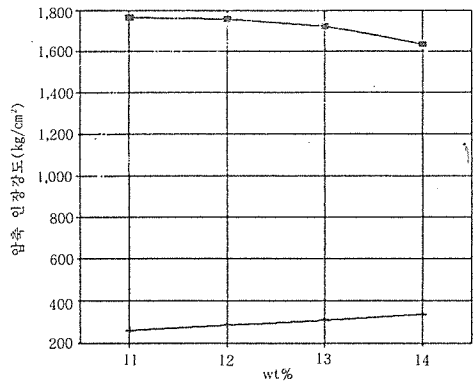
- 1) Silica 1 (Grade 1) 34.2%
- 2) Silica 2 (Grade 2) 18.5%
- 3) Silica 3 (Grade 3) 7.9%
- 4) Silica 4 (Grade 4) 18.8%
- 5) Silica 5 (Grade 5) 6.1%
- 6) Hydrated Alumina 12.4%
- 7) TiO₂ 2.1%

유기재료

- 1) Resin(Unsaturated Polyester) 93%
- 2) Styrene Monomer 3.3%
- 3) 결 합 제(A-174) 1.9%
- 4) 경 화 제(MEKP) 0.9%
- 5) 첨 가 제 0.8%



〈Graph 1〉 절연내력 특성치



〈Graph 2〉 압축, 인장강도 특성치

상기 조성 무기재료와 유기재료의 총비율 wt%로 87%, 13%일때 제작된 PC시편의 각종 특성은 다음과 같다.

- 1) 절연내력 (Dielectric Strength) 18kV/mm
- 2) 내아크특성 (Arc Resistance) 250~300sec
- 3) 유전상수 (Dielectric Constant) 4.3~4.5

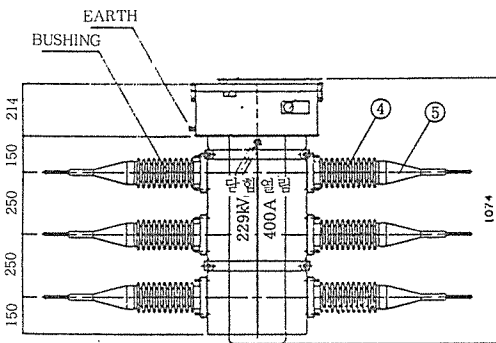
- 4) 유전정접(Dissipation Factor) 0.013~0.033
- 5) 체적 저항율(Volume Resistivity)
2x10¹⁵ chm/cm
- 6) 내오손 시험(Surface Withstand)
0.4~0.52kV/cm
- 7) 압축강도(Compression Strength) 1,750kg/cm
- 8) 인장강도(Tensile Strength) 300kg/cm
- 9) 충격강도(Impact Strength) 0.17ft-lb/in-w
- 10) 굴곡강도(Flective Strength) 700kg/cm
- 11) 열팽창 계수(Thenmal Expansion)
16~26x10⁻⁶/°C
- 12) 열전도도(Thenmal Conductive)
11.6BTu-in/ft² Hr°F

2.2 부하개폐기 Bushing의 역할

Bushing은 내부 Gas층과 외부 공기 절연간의 기밀과 통전이 가능하도록 설치되며, 기밀을 위하여 O-ring을 탱크에 장착하여 완전 밀봉구조로 한다. 또한 통전부와 접속부는 구출선 방식으로 절연 내력이 우수한 Moldcorn부착 절연 전선을 사용하여 절연성, 방수성, 기계적 특성이 우수해야 한다. 한편 Bushing의 재료 자체도 옥의 사용 조건에 부응하기 위하여 흡습이나 열에 의한 변형등이 되지 말아야 한다.

2.3 가공 배선용 부하 개폐기의 구조

가공 배선용 부하 개폐기는 22.9kV-Y 가공전선로에 설치되며, 구조는 크게 외함, 기계 장치 내장함, 조작기구, 안전장치로 구분되며 형상은 다음과 같다.



가공배선용 부하개폐기 형상

2.4 Bushing의 구조

기존 자기계 Bushing의 문제점을 크게 3가지 방법으로 개선하였다.

문 제 점	해 결 방 안
1. Bushing 내부의 도체와 절연재료 사이의 공기층 절연과피	PC를 이용한 Molding으로 공기층 완전제거
2. 도체와 O-ring 접촉 부위의 Gas 누설문제	Molding을 통한 누설 방지 및 재료 자체의 뛰어난 표면조도를 이용한 공정축소
3. Clamping 방식에 따른 전계 집중 및 절연 파괴	취부용 금구를 PC재료 내부에 삽입 Molding하여 전계완화

PC : Polymer Concrete

2.5 전계 해석을 통한 Bushing 형상 분석

2.5.1 전계 해석의 응용기준

가공 배선용 부하 개폐기 내부의 SF₆가스 충전 압력에 절연물 연면 및 가스중의 전계해석 결과치의 값은 아래 표 보다 작을 경우에 가스압의 적용이 가능하다.

(단위 : kV/mm)

가스압(kg/cm)	0.5	1.0	1.2	1.5	1.7
SF ₆ 가스중	8.09	10.42	11.33	12.68	13.57
절연물연면	8.76	10.38	10.98	11.85	12.40

2.5.2 기존 자기제 Bushing의 전계해석

기존 자기제 Bushing의 연면의 전계강도는 수치로 계산하여 보면 다음과 같다.

$$150\text{kV(충격내전압)} \times 0.26 = 39\text{kV/mm}$$

가스중의 Bushing과 외함사이 분포되는 전계강도는 다음과 같다.

$$150\text{kV(충격내전압)} \times 0.131 = 19.65\text{kV/mm}$$

결론적으로 자기 Bushing 자체만으로는 전계가 가혹하여 사용이 불가능하다. 따라서 Bushing의 내,외부에 반도체성 Paint를 Coating하여 사용하고 있다.

2.5.3 Polymer Concrete Bushing의 전계해석

PC Bushing의 연면의 전계강도는,

150kV(충격내전압) × 0.07675 = 11.5kV/mm 이고, 가스중의 PC Bushing과 외함사이 분포되는 전계강도는,

$$150\text{kV(충격내전압)} \times 0.08812 = 13.2\text{kV/mm이다.}$$

따라서 Polymer Concrete Bushing의 Gas내에서 사용압은 1.7kg/cm 이상이면 충분하다.

2.6 가공 배선용 부하 개폐기 Bushing의 설계

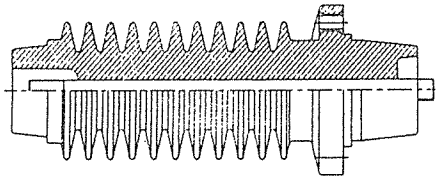
Polymer Concrete 특성에 맞는 개폐기 Bushing 설계치는 다음과 같다.

- (1) 도체와 Insert의 재료 및 치수
 도체 (Conductor): $\phi 20 \times 410\text{mm}$ 타프피치등
 취부 Hole(Insert): 스테인레스강
- (2) Bushing의 최소 두께: 25mm
- (3) Bushing의 최대 취약부위 크기: $\phi 90\text{mm}$
- (4) Bushing의 최대 취약부위 강도: >400kgf
- (5) Insert 부위의 강도: >1000kgf
- (6) Shed의 각도: $\alpha = 13.5^\circ$

(7) 연면누설거리(Leakage Creepage Distance)

: Ld = 720mm

(8) Bushing 형상

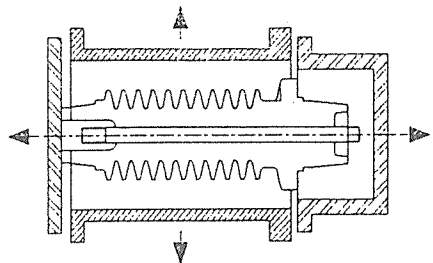


3. 가공배선용 부하개폐기 Bushing 제작

3.1 Bushing 금형 설계

3.1.1 Master, Shell 설계

Master는 주입방향을 수직으로 감안하여 3Parting 구분설계 되었으며 Shell도 Master와 같이 3Parting 설계하였다.

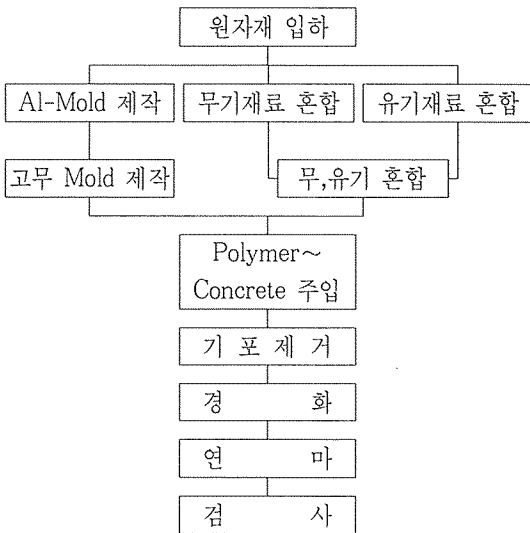


3.1.2 Rubber 주입

설계 제작된 Master, Shell의 3Part를 각각 조립하여 Rubber 주입구에 Rubber를 주입하였다. (Rubber Mold 제작)

3.2 Bushing 제작

제작 공정도는 다음과 같다.



공정도에서 혼합은 무기재료와 유기재료를 잘 섞일 수 있도록 하였으며 혼합시 발생하는 기포를 제거하기 위해 내부를 진공이 되게 하며, 주입시에도 진공과 진동을 이용하면 내부기포가 제거된 Bushing 제작이 가능하다.

4. 특성시험 및 고찰

Polymer Concrete의 최적조건에 맞는 조성을 이용한 Bushing 시험을 크게 전기적, 기계적, 부하개폐기 적용으로 분류하고, 특성시험 방법을 관련규격 한전 PS151-170, IEC 137, IEC 265에 따라 실시하였다.

4.1 Bushing의 전기적 특성시험

Bushing 단품의 전기적 특성을 크게 6항목으로 하여 시험하였다. 그 특성은 아래와 같다.

구 분	기 준 치	특 성
상용주파내전압	60kV	70kV ↑
충격파내전압	150kV Bil	166kV Bil ↑
부분방전시험	19kV "10"pC	25kV "0"pC
온도상승시험	65° ↓	40° ↓
tanδ 시험	0.02 ↓	0.008 ↓
절연저항시험	1000MΩ ↓	∞

상기와 같은 결과는 기존 사용되어지는 가공 배선용 부하개폐기 자기제 Bushing 보다 전기적으로 안정됨을 알 수 있다. 이와 같이 좋은 특성을 갖는 사유는 첫째 외부에서 Clamping하는 방식을 Insert을 이용하여 취부함으로 전계를 완화시켜 내전압 및 부분방전에서 좋은 특성을 가질 수 있고 또한 Bushing의 도체를 Molding하는 관계로 공극이 존재하지 않아 매우 전기적으로 안정됨을 알 수 있다.

둘째로는 자기제와는 달리 외부에 Semi-Conductive Paint를 도포함으로써 안정된 구조가 되나 Polymer Concrete제 Bushing은 도포 없이도 부분방전에 안정됨으로 장시간 사용시 문제가 발생되지 않는다. 이것은 원가절감 효과 및 향후 발생하는 Semi-Conductive Paint 노후로 인한 문제점을 사전에 예방할 수 있는 효과를 갖는다.

셋째로는 PC의 재료 열팽창 계수가 내부 Molding되는 금구류 그 값과 유사하여 장시간 사용시에도 전기적 특성변화가 없다.

4.2 Bushing의 기계적·화학적 특성

전기절연용 Bushing으로서의 기계적 강도인 굽힘 내하중 시험과 가스기밀 관련된 Bushing 표면의 온도, 장시간 사용에 따른 온도변화 적용시험인 온도 사이클 시험, 내부 Silica의 흡습정도를 시험하는 흡습시험에 대하여 시험하였다.

	기 준 치	특 성		기 준 치	특 성 치
굽힘내하중 시험	102kgf	615kgf	압력시험	5kgf/cm ²	7kgf/cm ²
조 도 시 험	원주:2.0 이하 축:2.0 이하	0.4818 0.4164	내충격시험	10cm 높이에서 낙하	이상무
온도사이클 시험	-20℃ - 20hr 상온 - 2hr 90℃ - 2hr 3 cycle	시험후 P.D시험 25kV "0"pC	가스누설시험	1.5kgf/cm ² 에서 1.0×10 ⁻⁵ cc/sec 이하	2×10 ⁷ cc/sec
흡 습 시 험	시험액 150kg/Ccm ³ 12시간 이상	이상없음	외기 온도에 따라 내부 압력이 상승할 시 견딜 수 있는가에 대한 압력시험 결과 방압변이 파괴되는 5 kgf/cm ² 보다 2kgf/cm ² 높은 7kgf/cm ² 까지 이상이 없음을 확인 하였다. 또한 조도시험과 관련한 가스 누설 시험에서도 매우 좋은 결과를 얻을 수 있었다.		

모든 결과는 기존 사용 되어지고 있는 자기제 Bushing보다 특성이 우수하며, 안정됨을 알 수 있었다. 특히 조도 특성에서 기존 자기제는 후처리(연마)를 통하여 평균값이 0.9136 정도이나 본 기술개발에서 제작 되어진 Bushing은 후처리 전혀 없이 0.4491로 가공 배선용 개폐기 장시간 사용시 40년 이상을 가스누설에 대해 보증할 수 있는 좋은 결과를 얻었다.

4.3 개폐기 적용 시험

Bushing 단품 시험이 불가하고 가공 배선용 부하 개폐기에 취부하여 시험 가능한 특성에 대하여 시험한 것으로 압력시험, 내충격 성능, 가스누설 시험이 이에 해당한다.

5. 결 론

Polymer Concrete 조성에 관한 연구, 가공 배선용 부하 개폐기 특성연구, Bushing의 요구 기능 연구(강도, 전계해석 등), 시료제작용 설비 설치, 시험용 기기설치, 금형 설계, 시제품 제작을 실시 하였다. 그후 제작 되어진 가공 배선용 부하 개폐기 Polymer Concrete제 Bushing 단품에 대한 전기적, 기계적 화학적 특성시험 실시한 후 결과가 기존 사용되어지고 있는 수입 자기제 Bushing 보다 우수함을 입증 하였고 또한 실제 기존 가공 배선용 부하 개폐기 Bushing을 취부하여 시험 가능한 사항에 대하여 실시한 바, 모든 특성이 우수함을 입증 하였다.

〈용어해설〉

VE(Value engineering)

가치있는 제품을 만들어 내기 위한 기업 경영기법.

소비자가 바라는 가치있는 상품을 제조하기 위해 인사·생산·마케팅·경영 각 부분에 소비자를 중심에 놓고 고품질·원가절감·신제품 개발 등에 나서는 기법이다.