

가공배선용

부하개폐기

Bushing 개발

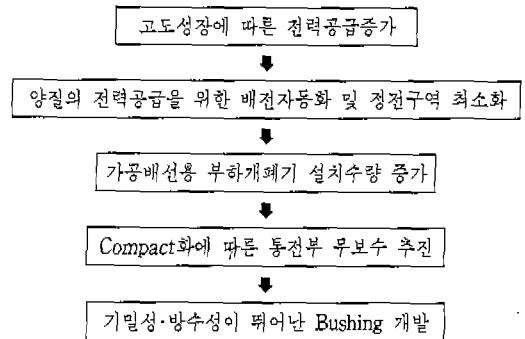
정 현 진

(주)광명기전 기술연구소

1. 서언

국내 각종 산업의 고도 성장과 이에 수반되는 전력수요가 급진적으로 신장되어감에 따라 전력 공급의 신뢰성 향상은 급후 더욱더 중요한 과제가 되어가고 있다. 이에 따라 공급자측에서는 양질의 전력을 공급하기 위하여 배전자동화 및 정전구역 최소화를 위해 구간 구간 개폐가 가능한 가공배선용 부하개폐기를 점차적으로 더 많이 설치하고 있다. 이 개폐기는 주상에 설치되는 관계로 소화성이 뛰어난 SF₆가스를 내부에 충전시켜 Compact화하고 있으며, 여기에서 통전부에 해당되는 Bushing은 SF₆가스가 충전된 내부 구조물과 외부 공기와의 절연유지 및 방수성 그리고 높은 기계적 강도를 갖추도록 하고 있다. 그러나 현재 개폐기를 제작하는 각 업체에서는 개폐기 개발시마다 국내 각 애자제작업체에 기밀성, 방수성에 초점을 맞춘 개발을 요구하여 Bushing의 국산화를 위한 노력을 계속 추진하여 왔으나 자기제(Pocelain)의 큰 수축률에 따른 치수 불균일 및 기밀유지를 위한 연마기술 부족 등으로 실패를 거듭하여 왔다. 이러한 원인으로 인하여 개폐기용 Bushing을 전량 수입제품에 의존하고 있는

실정이다. 본 연구에서는 자기제 대체사용이 가능한 절연소재 Polymer Concrete를 이용하여 Molding화, Compact화, 조도의 우수성에 따른 기밀유지 가능한 Bushing을 개발하고자 시도하였다. 여기에 사용되는 Polymer Concrete로는 우수한 절연내력을 갖고 있으며 또한 장시간 이용하여도 절연능력이 감소하지 않고 절연물의 경년 변화가 없는 Mold Bushing을 위한 조성비를 연구, 적용하여 전계해석 및 구조해석을 통한 개폐기 Bushing설계 및 제작후 특성시험을 실시하였다. 특성시험은 전기적, 기계적, 가공배선용 부하개폐기 적용시험을 실시하여 자기제(Porcelain) 대체로서 Polymer Concrete의 신뢰성을 증명하고자 하였다.



2. 기술개발의 기초이론과 시험

가. Polymer Concrete의 조성비

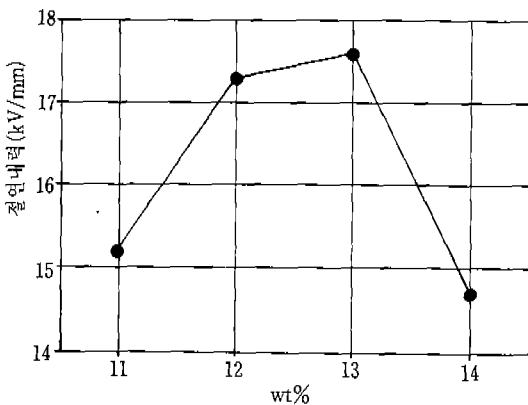
Polymer Concrete(이하 PC)의 구성재료인 무기재료와 유기재료의 조성은 전기적, 기계적, 물리적 특성의 최적조건에 맞도록 하고, 가공배선용 부하개폐기 Bushing의 특성중 외함과 Bushing접촉 부위인 O-ring 설치 부위의 기밀유지 및 최소 수축률을 갖출 수 있는 조성이 되도록 한다. 즉, 무기재료 중 작은 미세입자의 wt%를 높이며 유기재료중 희석제이면서 수축률과 관계가 깊은 Styrene Monomer의 양을 줄인다. 유기재료 저점도의 불포화 폴리에스터와 스티렌 모노머를 합친 값은 수지의 양이라 볼 때 그 비율을 11~14%까지 변화시켜 작업성이 가장 좋고 특성도 뛰어난 비율을 찾으려 하였다. 이때 경화제인 M.E.K.P.의 양은 최대량 사용하여 시험하였다. 시험결과는 표 1 및 그림 1, 2와 같으며, 결과에서 알 수 있듯이 수지의 양에 따른 PC의 특성은 전기적, 기계적 특성변화를 가짐을 알 수 있다.

또한, 전기적 특성에 대한 시험은 PC제조작업에 작업성이 가능한 최소량을 사용하는 것이 가

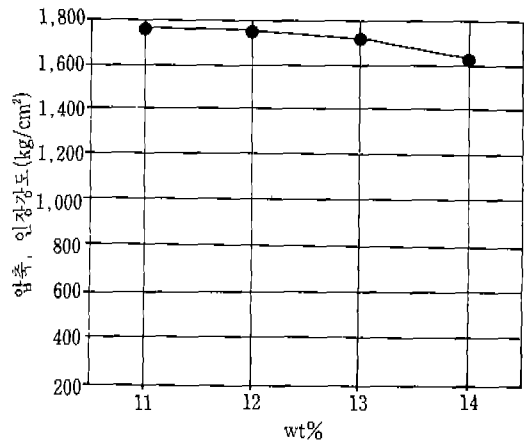
장 좋은 절연내력을 가짐을 알 수 있었고 기계적 특성 측면으로는 수지량이 많을수록 압축강도는 나빠지고 인장강도는 좋아짐을 알 수 있었다. 본 시험에서 수지량의 최적조건은 13wt%이었다. 그에 따른 유기재료, 무기재료의 조성비는 다음과 같다.

〈표 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



〈그림 1〉 절연내력 특성치



〈그림 2〉 압축, 인장강도 특성치

• 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	18.8%
⑤ Silica 5	6.1%
⑥ Hydrated Alumina	12.4%
⑦ TiO ₂	2.1%

• 유기재료 •

① Resin(UP)	93%
② Styrene Monomer	3.3%
③ Coupling Agent	1.9%
④ Curing Agent	0.9%
⑤ 첨가제	0.8%

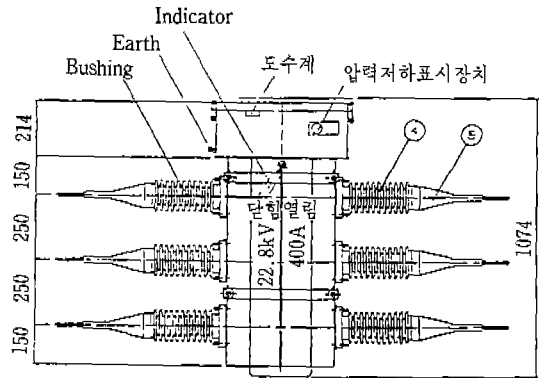
상기 조성재료의 유기, 무기재료의 비율은 wt%로 87% : 13%일 때 제작되었으며, 이때의 PC의 각종 특성은 다음과 같다.

- 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 압축강도(Compression Strength) 1750kg/cm²
- ⑥ 인장강도(Tensile Strength) 300kg/cm²
- ⑦ 굴곡강도(Flective Strength) 700kg/cm²

나. 부하개폐기 Bushing의 역할

Bushing은 내부 Gas층과 외부 공기절연간의 기밀과 통전이 가능하도록 설치되며 기밀을 위하여 O-ring을 탱크에 장착하여 완전 밀봉구조로 한다.

또한 통전부와 접속부는 구출선 방식으로 절연 내력이 우수한 Mold Corn 부착 절연전선을 사용하여 절연성, 방수성, 기계적 특성이 우수해야 한다. 한편 Bushing의 재료 자체도 옥외 사용조



<그림 3> 가공배선용 부하개폐기 형상

건에 부응토록 하기 위하여 흡습이나 열에 의한 변형이 되지 말아야 한다.

다. 가공배선용 부하개폐기의 구조

가공배선용 부하개폐기는 22.9kV-Y 가공선로에 설치되며, 구조는 크게 외함, 기계장치 내장함, 조작기구, 안전장치로 구분하며 형상은 그림 3과 같다.

라. Bushing의 구조

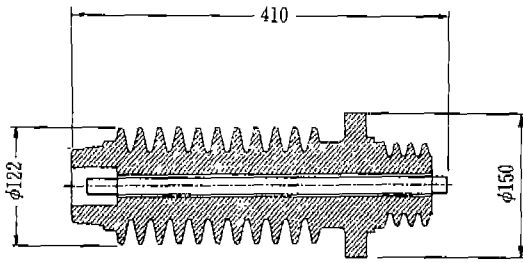
기존 자기체 Bushing의 문제점을 크게 세가지 방법으로 개선하였다.

① 절연파괴

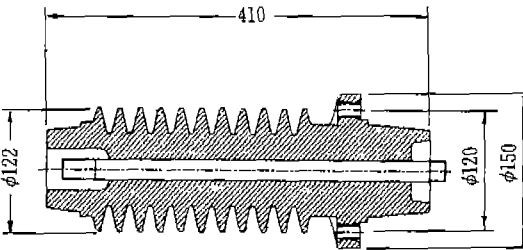
Bushing 내부의 도체와 절연재료 사이의 공기층으로 인한 절연파괴는 PC를 이용한 Molding으로 도체와 절연물 사이의 공기층을 완전 제거할 수 있다(그림 4,5 참조).

② Gas 누설

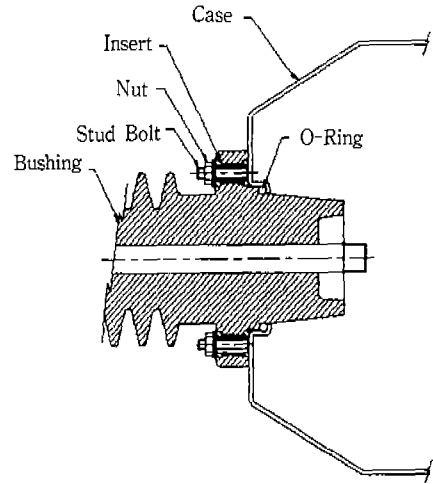
도체와 O-ring 접촉 부위의 Gas 누설은 자기체 Bushing의 연마면이 고르지 못한 관계로 발생되나 본 개발에서는 완전 Molding을 통한 누설 방지 및 재료 자체의 뛰어난 표면 조도를 이용한



<그림 4> 기존 Bushing의 조립형상



<그림 5> PC를 이용한 Molding형



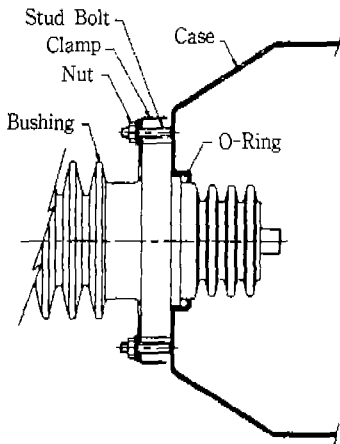
<그림 7> 금구 삽입 방식

에 삽입, Molding하여 전계 완화하였다(그림 6, 7 참조).

공정 축소가 가능하다.

③ 전계집중

설치를 위한 Clamping 방식에 따른 전계집중 및 절연파괴는 PC의 주입시 설치용 금구를 내부



<그림 6> Clamp 설치 방식

마. 전계해석을 통한 Bushing형상 분석

(1) 전계해석의 응용 기준

가공배선용 부하개폐기 내부의 SF₆가스 충전 압력에 절연물 연면 및 가스중의 전계해석 결과치의 값은 표 2의 값보다 작을 경우에 가스압의 적용이 가능하다.

(2) 기존 자기제 Bushing의 전계해석

기존 자기제 Bushing의 연면 전계강도는 수치로 계산하여 보면 다음과 같다.

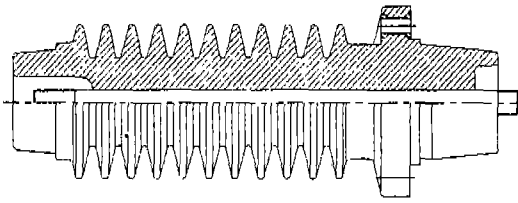
$$150\text{kV}(\text{충격내전압}) \times 0.26 = 39\text{kV/mm}$$

가스중의 Bushing과 외함 사이에 분포되는 전

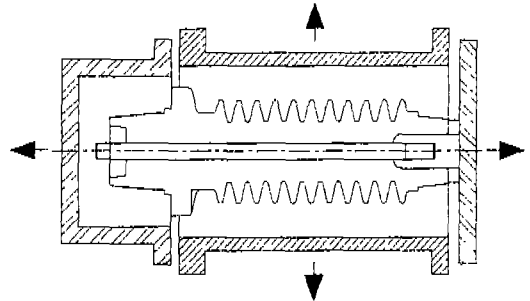
<표 2>

(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
절연물 연면	8.76	10.38	10.98	11.85	12.40



<그림 8>



<그림 9>

계강도는 다음과 같다.

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

결론적으로 자기 Bushing 자체만으로는 전계가 가혹하여 사용이 불가능하다.

따라서 Bushing의 내·외부에 고가이며 공정시간도 많이 필요한 반도체성 페인트(Semiconductive Paint)를 도포하여 사용하게 된다.

(3) PC Bushing의 전계해석

PC Bushing의 연면 전계강도는,

$$150\text{kV}(\text{충격내전압}) \times 0.07675 = 11.5\text{kV/mm}$$

이고,

가스중의 PC Bushing과 외함 사이에 분포되는 전계강도는,

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

이다.

따라서 PC Bushing의 Gas 내에서 사용압력은 1.7kg/cm 이상이면 충분하다.

바. 가공배선용 부하개폐기 Bushing 설계

PC특성에 맞는 개폐기 Bushing 설계치는 다음과 같다.

- ① 도체와 Insert의 재료 및 치수
 - i) 도체 : $\phi 20 \times 410\text{mm}$ Cu
 - ii) 설치 Hole(Insert) : STS 304
- ② Bushing의 최소 두께 : 25mm
- ③ Bushing의 최대 취약부위 크기 : $\phi 90\text{mm}$

- ④ Bushing의 최대 취약부위 강도 $> 400\text{kgf}$
- ⑤ Insert부위의 강도 $> 1000\text{kgf}$
- ⑥ Shed의 각도 $\alpha = 13.5^\circ$
- ⑦ 연면누설거리(Leakage Creepage Distance) $L_d = 720\text{mm}$
- ⑧ Bushing의 형상 : 그림 8 참조

3. 가공배선용 부하개폐기 Bushing 제작

가. Bushing금형 설계

(1) Master, Shell설계

Master는 주입방향을 수직으로 감안하여 3 Parting구분 설계되었으며 Shell도 Master와 같이 3 Parting 설계하였다(그림 9 참조).

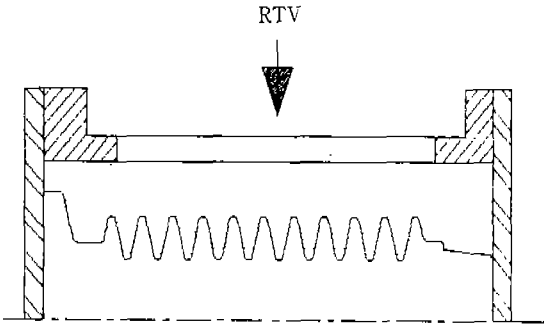
(2) Rubber 주입

설계 제작된 Master, Shell의 3 Parts를 각각 조립하여 Rubber 주입구에 Rubber를 주입하였다(Rubber Mold 제작 : 그림 10 참조).

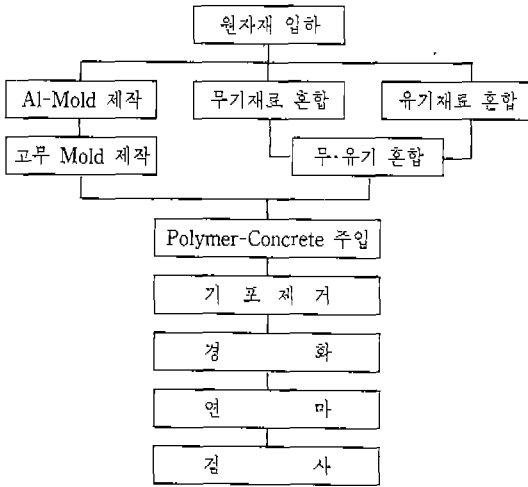
(3) Bushing 제작

제작 공정도는 다음 그림 11 과 같다.

공정에서 혼합은 무기재료와 유기재료가 잘 섞일 수 있도록 만능혼합기를 사용하였으며, 혼합시 발생하는 기포를 제거하기 위해 혼합물을 진



<그림 10>



<그림 11>

공상대로 하고 주입시에도 진공과 진동을 이용하여 내부 기포가 제거된 Bushing 제작이 가능토록 하였다.

4. 특성시험 및 고찰

PC의 최적조건에 맞는 조성을 이용한 Bushing 시험을 크게 전기적, 기계적 부하개폐기 적용으로 분류하고 특성시험방법은 관련규격 한전 PS 151-170, IEC 137, IEC 265에 따라 실시하였다.

가. Bushing의 전기적 특성시험

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

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

상기와 같은 결과는 기존에 사용되어온 가공배선용 부하개폐기 자기제 Bushing보다 전기적으로 안정되어 있음을 알 수 있다. 이와 같이 좋은 특성을 갖는 이유는,

첫째 외부에서 Clamping하는 방식을 Insert이용 설치함으로써 전계를 완화시켜 내전압 및 부분방전에서 좋은 특성을 가질 수 있고 또한 Bushing의 도체를 Molding하는 관계로 공극이 존재하지 않으므로 전기적으로 매우 안정됨을 알 수 있다.

둘째로 자기제는 외부에 반도체성 페인트(Semi-Conductive Paint)를 도포함으로써 안정된 구조가 되나 PC제 Bushing은 도포없이도 부분방전에 안정되므로 장기간 사용시에도 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 금구류의 그 값과 유사하여 장기간 사용시에도 전기적 특성변화가 발생되지 않는다.

나. Bushing의 기계적, 화학적 특성

전기절연용 Bushing으로서의 기계적 강도인 굽힘 내하중 시험과 가스 기밀에 관련된 Bushing 표면의 조도, 장기간 사용에 따른 온도 변화 적

응시험인 온도사이클 시험, 내부 Silica의 흡습정도를 시험하는 흡습시험을 실시하였다.

구 분	기 준 치	특 성 치
굽힘내하중시험	102kgf	615kgf
조도시험	원주: 2.0 이하 축: 2.0 이하	0.4818 0.4164
흡습시험	시험액, 150kg/cm ³ 12시간 이상	흡습 없음
온도사이클시험	-20°C-2Hr 상온-2Hr 90°C-2Hr 3Cycle후 부분방전시험	25kV "0"pC

모든 결과는 기준에 사용되어 온 자기제 Bushing보다 특성이 우수하며 안정됨을 알 수 있었다. 특히 조도 특성에서 기존 자기제는 후처리(정밀 연마)를 통하여 평균값이 0.9136 정도이나 본 개발에서 제작된 Bushing은 후처리 전혀 없이 0.4491로, 가공배선용 부하개폐기를 장시간 사용해도 40년 이상을 가스 누설에 대해 보장할 수 있는 좋은 결과를 얻었다.

다. 개폐기 적용시험

Bushing 단품시험이 불가하고 가공배선용 부하개폐기에 설치하여 시험 가능한 것으로, 압력시험, 내충격성능, 가스누설시험이 이에 해당한다.

구 분	기 준 치	특 성 치
압력시험	5kgf/cm ²	7kgf/cm ²
내충격시험	10m 높이에서 낙하	이상 없음
가스누설시험	1.5kgf/cm ² 에서 1.0×10 ⁻⁵ cc/sec 이하	2×10 ⁻⁷ cc/sec

●참고문헌

1. 허영수 역저: "폴리 에스테르수지" 대광서림(1987)
2. 최정철 공저: "복합재료" 반도출판사(1990)
3. 강도열 저: "전기재료 물성공학" 생능(1988)
4. 공저(고전압공학연구회): "고전압공학" 형설출판사(1993)

외기 온도에 따라 내부 압력이 상승할 경우 견딜 수 있는가에 대한 압력시험결과 보호장치인 방압밸브가 파괴되는 5kgf/cm²보다 2kgf/cm² 높이는 7kgf/cm²까지 이상이 없음을 확인하였다. 또한 조도시험과 관련한 가스누설시험에서도 매우 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

5. 결론

Polymer Concrete 조성에 대한 연구, 가공배선용 부하개폐기 특성연구, Bushing의 요구기능 연구(강도, 전계해석 등), 금형설계 및 시제품 제작을 성공적으로 실시하였다. 그 후 제작된 가공배선용 부하개폐기 PC제 Bushing 단품에 대한 전기적, 기계적, 화학적 특성시험을 실시한 후 결과가 기준에 수입 사용되어온 자기제 Bushing보다 우수함을 입증하였고 또한 실제로 기존 가공배선용 부하개폐기 Bushing을 설치하여 시험가능한 시험에 대하여 실시한 바, 모든 특성에서 우수함을 증명하였다. 향후 자기제 Bushing을 수입 사용하는 가공배선용 부하개폐기 제작업체에 대하여 사용을 적극 권장함으로써 수입 대체효과가 24억 정도의 가치창출이 예상된다(*).

* 한국전력공사 지원자금으로 시행한 기술개발 사업의 결과임