

Polymer Concrete를

이용한

절연물 개발

김 무 응 대림공업전문대학 교수

정인성 · 정현진 (주)광명기전 선임연구원

1. 서 론

현재 국내에서 옥내·외 절연물로 사용되는 Porcelain 및 Epoxy 애자는 국내 절연물 업체의 기술낙후 및 영세성 등으로 중요한 절연물의 경우 수입에 의존하고 있다. 특히 옥외용으로 사용되는 Porcelain 애자의 경우, 원재료인 점토는 자원이 거의 고갈되고 가열공정으로 인한 손실 및 완제품화를 위한 수율이 떨어질 뿐 아니라, 금속과의 Molding시 열팽창계수가 달라 금속과의 Molding이 어렵고 또한 옥내용의 Epoxy 애자의 경우는 국내 일부 업체에서 국내 소재를 사용 생산하고 있으나 전기적 특성이 우수하지 못하여 스위스 Ciba-Geigy가 거의 독립적인 위치를 차지함에 따라 매우 고가로 조달되고 있는 실정이다.

이러한 점을 감안하여, 80% 이상의 무기질과 Polymer Binder간의 결합에 의한 Polymer Concrete를 이용하여 절연물을 개발함에 있어, 국내·외 기술현황 및 제조공법, 조성재료, 전기적, 기계적 및 물리화학적 특성에 대하여 소개하고자 한다.

2. Polymer Concrete의 기술현황

Polymer Concrete(이하 PC로 표기)에 대한 연구는 미국, 일본 등 선진국은 물론 세계적으로 수행되어 왔으며, 특히 소련과 체코에선 최초로 오염된 환경속에서 특수하게 응용되고 구조적으로 유용한 PC에 대하여 많은 연구와 발전을 이룩하였다. 근래에는 미국에서 지중선에 사용되는 Underground PC Pipe를 개발하였다. 또한 호주에서는 Weatherometer에 의한 1,472시간 동안 PC의 경년변화 시험결과, PC의 특성에 저항되지 않음을 증명하였다. 그리고 일본의 건축협회에서도 불포화 폴리에스터를 이용한 PC에 대한 연구가 실시되어 실용화 단계에 있다. 이 외에도 많은 분야에서 PC에 대한 연구가 활발히 진행되었으며, 소련에서의 연구가 특히 진보적으로 이루어졌다. 소련에서는 적절히 분급된 Aggregate(무기재료 Filler)를 혼합하였고 그 표면의 결합을 위하여 수지를 사용함으로써 침식저항성을 가져야 될 구조부속물 및 댐의 건설 등에 실제 적용하여 그 효용성을 연구하였다. 그외 독일, 일본 등지에서

<표 1> 각종 절연물 제작시 필요에너지

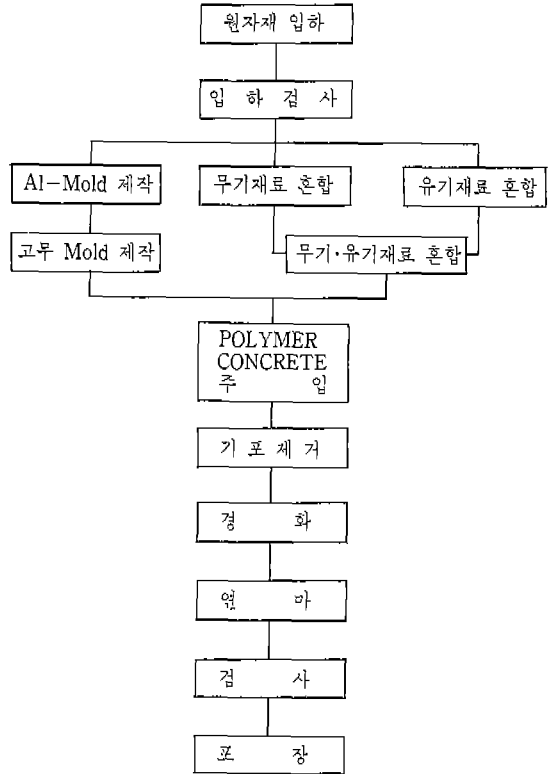
자기(Porcelain)	20,000Btu/lb*
Organics	60,000Btu/lb*
Polymer Concrete	<10,000Btu/lb*
(* Btu/lb=2.32×10 Joule/kg)	

도 건축, 기계, 전기구조물 등에의 응용연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 과정속에서 Westinghouse and Development Center에서는 1975년에 미국 전기연구소(Electric Power Research Institute : 이하 EPRI로 표기)의 후원 아래 Energy 절약의 입장에서 기존 절연물로 사용되는 자기(Porcelain)의 대체 절연물인 PC의 개발에 착수하여 1977년 PC에 대한 특성연구를 완료하였다. 또한, 개발과정에서 미국의 각 전기회사가 협력하여 각종 절연물에 응용, 보급하기에 이르렀다. 세부적으로 살펴보면 1977년 피뢰기(Lightning Arrester) Housing과 34.5kV용 Condenser Bushing을 개발하였고, 1978년에는 내오손이 요구되는 지중선 PC Pipe와 15kV급 Pin Insulator를 개발하여 실제 Field에 18개를 설치함으로써 10여년간 현장적용에 아무런 변화(문제점)가 없음을 증명하고 있다. 그 이후에도 1985년 35kV급 Air-to-Apparatus Bushing 각 기종의 개발과 아울러 각종 Insulator, Bushing, 절연지지물을 계속 개발중에 있다. 절연재료별로 제작시 필요 에너지를 비교하여 보면 표 1과 같다.

3. 제조공법

PC의 제조공법은 표 2에서와 같이 상온에서 경화가 가능하며 에너지 소모가 적을 뿐 아니라(표 1) 수율이 높아, 타절연재료에 비하여 제품화할 경우 가격이 저렴하고 재료의 80% 이상을 차지하는 무기재료인 Silica도 전량 국내 조달이 가능

<표 2> 제조공법



하여 부가가치가 높다고 할 수 있다.

4. Polymer Concrete의 조성재료

Polymer Concrete의 조성재료는 크게 두 가지로 나눌 수 있다.

그 하나는 총 조성비의 80%를 차지하는 무기재료(Inorganic Material)와 나머지 하나는 결합을 위해 사용되는 무기재료이다.

유기재료는 전체 재료비 측면에서 많은 비중을 차지하고 있고, 배합비율이 클수록 수축률이 높아지기 때문에 특성에 미치는 영향이 크므로 무기재료의 조성비율을 높여 나가는 것이 바람직하다.

가. 무기재료

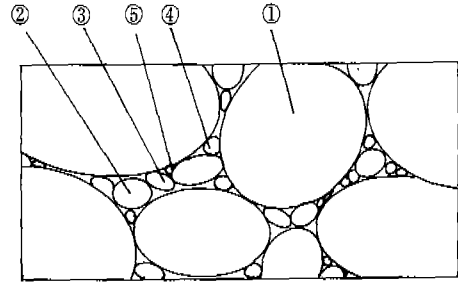
무기재료는 고순도 실리카(SiO_2), 수산화알루미늄(Al_2O_3), 이산화티타늄(TiO_2)으로 구성되는데 99% 이상이 고순도 실리카이며, 그림 1과 같은 Sieve Shake로서 Mesh 분석을 통하여 입자 크기가 각기 다른 4~5종의 무기재료를 섞는 것으로 그 내부구성은 그림 2와 같이 큰 입자가 채워진 빈 공간에 중간 크기의 입자가 채워지며, 마지막으로 아주 고운 분말상태의 입자가 채워지도록 하여 최밀 충전상태가 이루어지도록 한다.

크기가 다른 무기재료는 Round Type와 Angle Type이 있다.

Round Type은 자연현상(ex: 풍화작용)에 의하여 만들어진 입자를 말하는 것으로 가격이 저렴하고 재료의 특성이 안정된다. Angle Type은 인공분쇄에 의하여 입자의 크기를 분별한 상태에서 입자 분포가 균일하며 불순물의 정제가 필요



<그림 1> Sieve Shake



- ① 600 μm ~300 μm 크기의 입자
- ② 425 μm ~150 μm 크기의 입자
- ③ 212 μm ~106 μm 크기의 입자
- ④ 평균 입자크기 7.4 μm 내외의 정제 실리카입자
- ⑤ 평균 입자크기 3.6 μm 내외의 미세 분말입자

<그림 2> 무기재료 충전 미세구조

하다. 물론 Round Type이나 Angle Type 모두 체분석(Sieve Analysis)과 입자크기 분류가 가능하며, 사용시는 건조상태이어야 한다. 크기가 다른 무기재료(실리카)의 구조적 충전은 본 PC 재료의 특성중 하나인 금구류(ex: Conductor, Insert) 등 Molding 연구에 중요한 열팽창계수의 차이를 나타낼 수 있다. 이밖에 수산화알루미늄은 통상 절연물의 Filler로 많이 사용되는 재료로서 내아크성, 내트래킹 향상을 위해 사용되고 이산화티타늄은 옥외노출에 대한 저항력을 증진시킨다.

나. 유기재료

Polymer Concrete의 유기재료의 양은 제품화했을 때의 특성과 큰 관계가 있다. 유기재료의 양이 너무 적으면 무기재료의 입자간 공극이 충전되지 못하여 기계적 강도가 떨어지게 되고, 유기재료의 양이 너무 많으면 수축률이 커지므로 경화시 깨어질 뿐만 아니라 제품치수의 불량원인이 되며 전체 재료비 점유율이 커지게 된다. 주요 유기재료는 불포화 폴리에스터수지, 경화제

< 표 3 > 유기재료의 특성

① 불포화폴리에스터 수 지	1) Resin Spec	<table border="1"> <thead> <tr> <th>항 목</th> <th>S P E C</th> <th>측 정 치</th> <th>측 정 방 법</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>외 관</td> <td>적자색 투명</td> <td>적자색 투명</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>산 가 점 토</td> <td>-</td> <td>25.5</td> <td>KSM 3331</td> </tr> <tr> <td></td> <td>2.5 ~ 4</td> <td>3.2</td> <td>KSM 3331</td> </tr> <tr> <td>* Styrene Monomer</td> <td>27 ~ 41</td> <td>40.6</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Gel Time(분)</td> <td>20 ~ 25</td> <td>35.45</td> <td>KSM 3331</td> </tr> </tbody> </table>			항 목	S P E C	측 정 치	측 정 방 법	외 관	적자색 투명	적자색 투명	-	산 가 점 토	-	25.5	KSM 3331		2.5 ~ 4	3.2	KSM 3331	* Styrene Monomer	27 ~ 41	40.6	-	Gel Time(분)	20 ~ 25	35.45	KSM 3331
	항 목	S P E C	측 정 치	측 정 방 법																								
외 관	적자색 투명	적자색 투명	-																									
산 가 점 토	-	25.5	KSM 3331																									
	2.5 ~ 4	3.2	KSM 3331																									
* Styrene Monomer	27 ~ 41	40.6	-																									
Gel Time(분)	20 ~ 25	35.45	KSM 3331																									
	*Gel Time : Resin 50g MEKP-0 0.5G																											
② 경 화 제 (MEKP) ③ 스티렌모노머 (Styrene Monomer) ④ Silane ⑤ BYK-501, 515 (소 포 제)	2) 물리적 성질(주형판)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>항 목</th> <th>측 정 치</th> <th>측 정 방 법</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>BARCOL 경 도</td> <td>43 ~ 48</td> <td>KSM 3305</td> </tr> <tr> <td>열 변 형 온 도 (°C)</td> <td>72 ~ 75</td> <td>KSM 3305</td> </tr> <tr> <td>인 장 강 도 (kgf/mm)</td> <td>8 ~ 12</td> <td>KSM 3305</td> </tr> <tr> <td>굴 곡 강 도</td> <td>14 ~ 16</td> <td>KSM 3305</td> </tr> </tbody> </table>			항 목	측 정 치	측 정 방 법	BARCOL 경 도	43 ~ 48	KSM 3305	열 변 형 온 도 (°C)	72 ~ 75	KSM 3305	인 장 강 도 (kgf/mm)	8 ~ 12	KSM 3305	굴 곡 강 도	14 ~ 16	KSM 3305									
	항 목	측 정 치	측 정 방 법																									
BARCOL 경 도	43 ~ 48	KSM 3305																										
열 변 형 온 도 (°C)	72 ~ 75	KSM 3305																										
인 장 강 도 (kgf/mm)	8 ~ 12	KSM 3305																										
굴 곡 강 도	14 ~ 16	KSM 3305																										
	<p>*Methly Ethly Ketone Peroxide를 사용하며, 경화(Curing)는 상온에서 실시 *스티렌모노머는 불포화 폴리에스터의 가교체로 사용되어 수지의 불포화기(C=C)가 경화제로 인하여 결합이 파괴될 때 탄소기가(C-) 붙어 가교성을 갖는다. *결합제(Couping Agent)로서 무기재료 입자의 표면과 유기재료의 유기기(Organic Matrix)를 결합시키는 재료이다. *독일에서 개발한 플라스틱 첨가제로서 고점도의 혼합물 내부 기포제거와 Glass Fibre의 함침속도 증가 및 반응물의 인장강도와 굴곡강도를 증가시키는 물론 전기적으로 부분방전 및 유전율에 영향을 준다.</p>																											

(MEKP), 스티렌모노머, Silane BYK-501. 515(소포제)를 들 수 있으며, 그 특성을 다음 표 3과 같이 요약할 수 있다.

5. Polymer Concrete의 특성연구

본 연구과정에서 개발된 PC의 물성분석은 SEM 분석을 통한 내부 구조분석과 FT-IR을 통한 정량 및 동일성 확인을 실시하였다.

가. 물리·화학적 특성

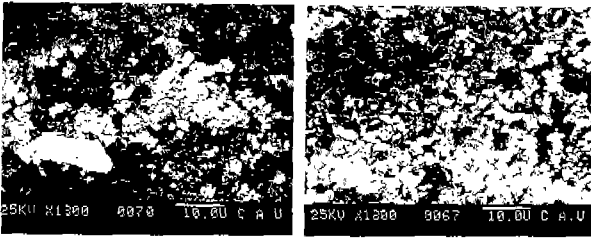
(1) SEM 분석

Polymer Concrete 제조시 핵심적 충전제로 사용되는 무기재료의 최적 합성조건을 정립하고자 5개 이상의 부구조를 알아보기 위하여 SEM

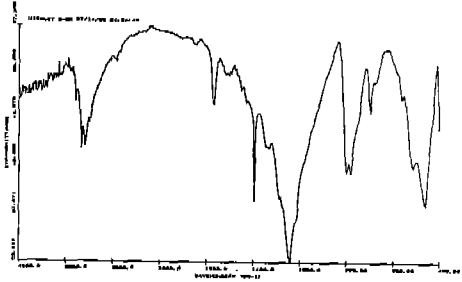
(Scanning Electron Nicroscopy)으로 촬영 분석하였다. 구조분석 사진은 그림 3과 같고, 사진에서 보는 바와 같이 크기가 작은 입자가 사이사이에 잘 충전되어 있음을 알 수 있다. 따라서 개발된 PC는 구조적으로 절연물로 사용이 적합함을 알 수 있다.

(2) 적외선 분광도법(FT-IR)

PC 복합재료의 물질의 동일성 확인, 정량분석, 유기화물 기능기의 참여 등을 분석하였다. IR-FT의 시험 Data(그림 4 참조)와 같이 실제 혼합물 내부에 C-C, CC=C, CO-H, SiO, C-H, αβ-Unsaturated, 기타의 정량분석 및 Sample간의 동일성과 기능기 참여 등을 연구하였다.



<그림 3> Polymer Concrete 재료의 SEM 사진



<그림 4> Polymer Concrete의 적외선 분광도법 시험 Data

(3) 열팽창계수(Thermal Expansion)

절연재와 접착 및 물딩된 금구류와 PC의 열팽창계수의 차이는 절연재가 파손되는 원인으로 (Crack 등) 단락 등의 엄청난 사고요인이 되므로 절연재료의 열팽창계수는 대단히 중요하다. 열팽창계수란 일정한 압력하에서 물체가 열팽창할 때, 그 팽창의 온도변화에 대한 각 재료의 체적이나 치수의 변화율을 계수로 표시한다.

$$L = l_0 C [1 + \alpha(t - t_0)]$$

L : 변화한 길이, l_0 : 최초온도에서의 길이

C : 상수, α : 열팽창계수

$t - t_0 (\Delta t)$: 온도차

α 가 열팽창계수로 시편을 제작하여 시험한 결과 복합재료 PC의 값은 $16 \sim 20 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 이다. 이 계수는 전기 절연재료에서 금구류(도체 또는 Insert)를 Molding할 때 금구류의 열팽창계수와 유사한 열팽창계수값으로 금속류 Molding하기에 가장 적절한 절연물임을 알 수 있다.

(4) 열전도도

열전도도란 물질내의 등온면의 단위면적을 거쳐 단위시간을 수직으로 흐르는 열량과 이 방향의 온도 기울기와의 비를 말한다. 일반적으로 물질에 대해서는 상수이나 온도, 압력에 따라 변화

한다. 전기 절연물에서 열전도도는 대체로 클수록 유리하다고 볼 수 있다. 왜냐하면 통전시 발생하는 온도변화를 외부로 방출하여 기기나 절연체의 내부온도를 안정되게 유지할 수 있기 때문이다. PC는 시험결과 $11.6 \text{ Btu-in/ft}^2 \text{ Hr}^\circ\text{F}$ 이다. 이 정도의 수치는 고체 절연물로서는 상당히 우수함을 알 수 있다.

나. 전기적 특성

(1) 절연내력(Dielectric Strength)

절연내력이란 절연재료가 전압에 견디어 내는 능력을 표시하는 절연파괴전압, 내전압을 총칭한다. 절연파괴전압이란 규정된 방법으로 절연재료에 전압을 가하였을 때 절연재료가 파괴되는 최소의 전압(실효치)을 말하고, 내전압이란 규정된 전압을 일정한 시간을 가하여 절연재료가 파괴되지 않았을 때의 전압을 말한다. 즉, 전기재료의 특성으로서 절연내력 시험은 상당히 중요한 특성이다. PC의 절연내력 시험은 KSC 2105(고체 전기 절연재료의 시험방법)에 따라 실리콘유중에서 시험한 결과 약 18 kV/mm 이었다. 자기제와 ($10 \sim 12 \text{ kV/mm}$) 비교하여 우수한 절연특성을 보유하고 있음을 알 수 있다.

(2) 내아크성

고체 절연물의 내아크 특성이란 스위치 개폐, 기타의 원인으로 발생되는 Arc에 절연물의 표면이 노출되면 열화가 일어나며 나중에는 절연성능을 상실하게 되는 바 이러한 Arc에 견디는 정도를 나타낸다. 시험결과는 Arc로 인하여 전극간에 도전성 탄화물의 생성으로 인한 도전로가 형성되면 단락상태가 되어 Arc는 소멸되고 이때까지의 시간측정으로 PC의 경우 250~300초이었다.

(3) 유전상수(Dielectric Constant : 유전율)

전속밀도를 D , 전기의 세기를 E 라고 하면, $D = \epsilon E$ 라는 등식이 성립되는데 이때의 비례상수 ϵ 가 곧 유전상수이다. 다만 여기서 $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_s$ 이고, ϵ_0 는 진공의 유전율이며, ϵ_s 가 상수라고도 볼 수 있다. 이 값은 대체로 적을수록 안정된 절연물이다. 본 재료의 특성치는 4.3~4.5이다. 이 특성은 기존 사용되는 자기체의 특성과 유사하다.

(4) 유전정접(Dissipation Factor : $\tan \delta$)

유전정접 시험은 절연체에 교류전압을 인가하여 측정되는 $\tan \delta$ 값으로서, $\tan \delta$ 전압특성으로 부터의 흡수, 오손, 공극 등 절연체의 상태 및 열화 정도를 알기 위한 시험이다.

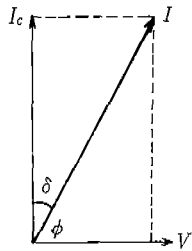
유전손실 W 를 알아보면 다음과 같다.

$$W = VI \cos \phi = I_c \tan \delta \\ = \omega C V^2 \tan \delta$$

또한 $\tan \delta$ 를 구하면

$$\tan \delta = I_r / I_c = \omega C_s R_s \text{ 이다.}$$

$\tan \delta$ 의 값 즉, 유전정접의 값은 적을수록 양호한 절연물이라고 말할 수 있다. 실제시험은 부분



방전시험기를 이용하여 $\tan \delta$ 시험기를 접속, 회로로 구성하였으며 시험결과 특성치는 0.013~0.033이었다. 이 특성은 자기체보다 3배 정도 안정된 값을 갖기 때문에 PC는 절연물로 사용되는데 유리하다.

다. 기계적 특성

기계적 특성은 크게 재료시험으로 압축, 인장, 굴곡강도와 같이 크게 세 가지로 구분할 수 있고 이 세 가지 기계적 특성은 단독으로의 의미보다 제품이 제작된 후 종합 Test되는 Cantilever Strength로 평가할 수 있다. 3가지 시험의 내용을 살펴보면, 압축강도란 시료에 압축하중을 가함으로써 발생하는 변형이나 저항을 단위면적으로 계산한 것이며, 인장강도는 시료가 견딜 부하치가 최대에 달했을 순간의 굴곡 응력을 나타낸다. 시편을 제작하여 시험한 결과 각각 압축강도 1750 kg/cm², 인장강도 300 kg/cm², 굴곡강도 700 kg/cm²이다.

시험치중 압축강도는 자기체와 유사하나 인장 및 굴곡특성이 150% 이상 좋고, 단락사고 등에 견디는 내구성이 뛰어나다.

라. 옥외축진 노출시험

옥외축진 노출시험이란 옥외에서 일광, 비, 눈 등의 자연조건의 영향을 받는 인자를 인공적으로 축진시키기 위하여 재현성이 있는 표준적 시험을 말한다. 현재 어느 나라 규격에도 절연재료의 옥외축진 노출시험에 대한 규정된 시험방법이나 결과분석에 대한 사항은 없다. 그래서 본 연구에는 Polymer Concrete 조성재료 중 내후성에 영향이 있을 것으로 사료되는 수지의 열화에 대하여 적용 가능한 규격으로 한국전기연구소에 의뢰하여 옥외축진 노출시험을 실시하였고, 시험결과 및 분

석은 다음 표 4 와 같다. 적용규격은 KSF 2274 (건축용 합성수지제의 축진노출 시험방법)에 의하여 시험한 후 KSM 3006(인장강도), KSC 2105 (고체 전기절연재료의 절연내력 시험방법)에 의한 평가를 실시하였고, 시편은 PC 재료를 Molding하여 인장강도 및 절연내력 시편을 각각 6개씩 제조 실험하였으며 실험조건을 요약하면 다음과 같다.

- ① 자외선 카본 등에서 발생하는 파장중 플라 스틱의 열화에 주로 관계되는 300~400nm (나노미터)의 파장을 유리필터를 이용하여 90% 이상이 되도록 한다.
 - ② 스프레이 물의 분사장치는 압력 0.8~1.2 kgf/cm² 이고 원칙적으로 120분중 18분을 스프레이하는 것으로 한다.
 - ③ 시험기내의 온도는 63±3°C 로 한다.
 - ④ 시험시간은 2000시간으로 한다.
 - ⑤ Polymer Concrete는 자외선 에너지 중심에서 비교할 때 축진 노출시간은 약 200시간이 1년에 상당한다.
- 본 시험결과는 표 4 와 같다.

6. 결 론

Polymer Concrete가 기존 자기제(Porcelain)이나 Epoxy보다 초·특고압 절연재료로서 사용되는데 장점에 대하여 간략히 살펴보고자 한다.

<표 4> 한국전기연구소에 의뢰한 옥외축진 노출시험 결과표

시 험 항 목	시 험 결 과	
	시 험 전	시 험 후
치 수 변 화 율	-	변화없음
겉모양의변화	-	변화없음
인 장 강 도	2.7 kg/mm ²	2.3 kg/mm ²
절연파괴강도	21 kV/mm	20.5 kV/mm

(1) Polymer Concrete의 열팽창계수가 도체나 금구류의 열팽창계수와 유사하여 도체나 금구류를 직접 Molding하는 것이 가능하며 설치시 공수절약 및 옥외 사용시 금구의 팽창계수는 Polymer Concrete가 일치시켜 Crack이 생기지 않는다.

Polymer Concrete 열팽창계수(본 연구에서 개발된) : $16\sim 26 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

특수강 열팽창계수 : $11.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

알루미늄 열팽창계수 : $23.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

(2) 유기재료의 전체 비율이 낮아 화학반응시 수축에 의한 변형이나 Crack이 거의 없다(상온경화).

(3) 무기재료에 비해 유기재료의 비율이 낮아 화학반응시 변형이 거의 없고 옥외 사용시에도 문제가 생기지 않는다.

(4) 열전도도가 다른 고전압 전기절연체에 비하여 높아 저항에 의하여 발생하는 내부의 열을 최대한 빠른 시간에 외부로 방출하여 열에 의한 절연체의 손실을 없앤다.

(5) Polymer Concrete는 내열성과 내후성이 뛰어난 무기재료의 비율이 높아 수지의 과다량으로 발생하는 열에 의한 사고나 날씨에 의한 사고를 사전에 방지할 수 있다. 또한 Polymer Concrete에 사용되는 낮은 비율의 수지불포화 폴리에스터는 일반 Boat 도장에도 사용하기 때문에 내습이나 열에 강한 수지로 내후성이나 내광성이 뛰어나다.

(6) Polymer Concrete는 내아크성이 우수하여 옥내는 물론 옥외 사용시 약조건의 날씨로 인해 부득이하게 포면 Arc가 발생될 시 절연능력 유지 특성이 어느 재료보다 뛰어나다.

(7) Polymer Concrete는 현재 널리 쓰이는 자기체에 비하여 전기적, 기계적으로 우수함을 확인하였다.