

## 폴리머 애자용 FRP 코아의 기술동향



이철호  
(평일산업(주) 기술연구소장)

### 1. 서론

최근 배전선로 및 송전선로에서 폴리머 애자의 사용이 활발해지고 있다. 미주를 비롯한 외국의 경우 뿐 아니고 국내에서도 기존의 자기 애자를 대체하는 폴리머 애자의 설치가 급격히 증가하고 있다. 이 폴리머 애자의 일반적인 구조는 FRP를 코아로 하고 그 표면을 갖 형상의 옥외 고분자 재료로 피복하고 코아의 양단에 취부 굽구를 설치하는 방법이다. FRP 코아는 가장 중요한 절연을 유지하면서 폴리머 애자의 기계적 하중을 유지하는 역할을 한다. 만약 가벼우면서도 기계적 인장력이 우수한 FRP 복합재료가 없었다면 폴리머 애자의 출현은 어려웠을 것이다. 폴리머 애자에 대한 관심이 높아지면서 중요한 원재료인 코아에 대한 품질의 중요성이 더욱 요구되고 있으며 이러한 관점에서 본고에서는 폴리머 애자용 FRP 코아에 대한 제반 기술 동향을 기술하였다.

FRP는 fiber(glass) reinforced plastics를 약한 것으로서 '플라스틱을 섬유로 보강한다'라는 의미이다[1]. 강하고 가벼우며 섬유를 수지로 굳게 하여 일정한 형상으로 성형한 것으로 생각할 수 있다. 따라서 2 이상의 소재로서 개개의 소재보다는 우수한 특성을 나타내는 복합재료(composite materials)가 된다. FRP는 사용 용도에 따라 여러 가지 성형법으로 만들 수 있다. 비교적 많이 사용되는 방법은 hand lay-up 법,

spray-up 법, filament winding 법, premix 법 등이 있으나, 본 고에서의 관심은 역시 폴리머 애자용 코아를 제조하는 인발(pultrusion)법이다. 인발성형법은 일정한 단면적을 가진 제품을 길이 방향으로 연속적으로 제조할 수 있으며 인발 제품의 전기적 용도로는 사다리, 부스바 지지대, 케이블 트레이, 퓨즈 튜브, switch actuator 등이 있다[2].

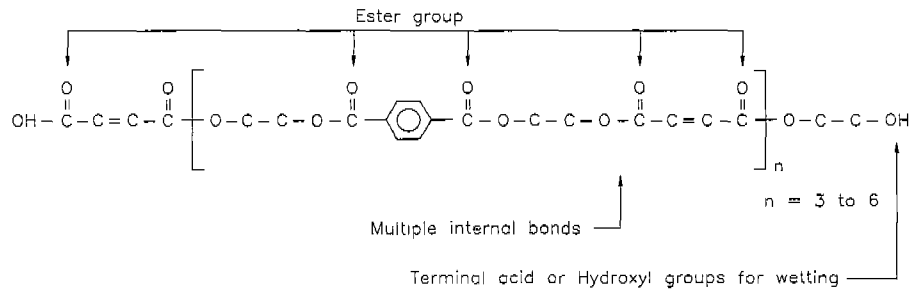
FRP 코아의 특성은 주로 고분자 수지와 유리 섬유로 구성되는 원재료 및 성형방법에 따라 크게 좌우된다. 따라서 본고에서는 수지시스템과 유리섬유에 대하여 기술하였으며 성형방법을 개괄적으로 살펴보고 폴리머 애자에 있어서 요구되는 특성에 대하여 기술하였다.

### 2. 수지 시스템

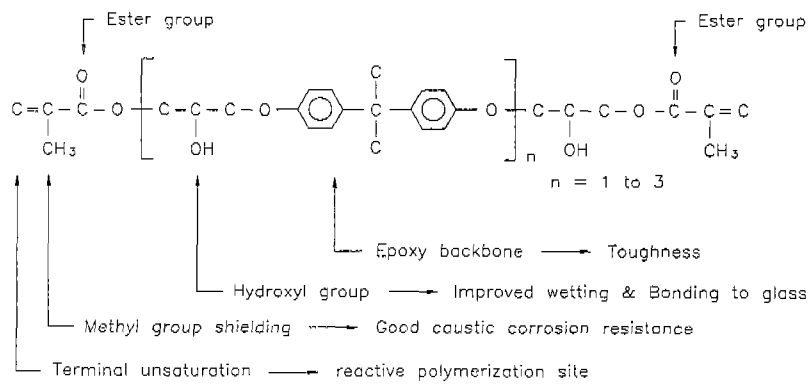
고분자 매트릭스(matrix) 수지는 기본적으로 우수한 물리적 특성 및 전기적 특성을 가져야 하며 보강재인 유리섬유와의 우수한 친화력을 가지고 결합되어야 한다. 폴리머 애자용 매트릭스 수지로는 불포화 폴리에스테르, 비닐 에스테르 및 에폭시 수지가 널리 사용되고 있다. 각 수지 매트릭스의 화학적 조성을 그림 1에 나타내었다.

#### 2.1 불포화 폴리에스테르 수지

## Isophthalic Polyester



## Bisphenol A Vinyl Ester



## Bisphenol A Epoxy Resin

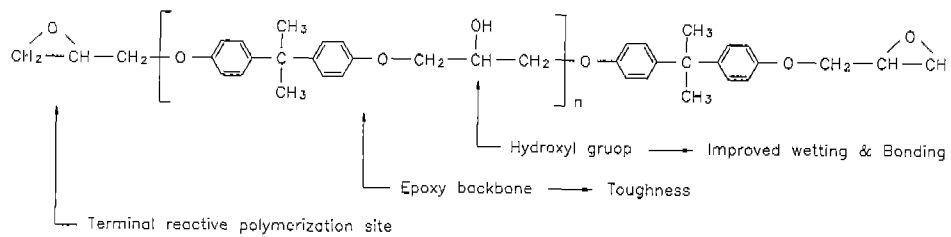


그림 1. FRP용 수지 매트릭스의 화학조성.

표 1. 폴리에스테르에 사용되는 디카르복시산.

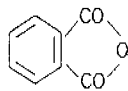
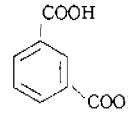
	명 칭	구 조 식	특 성
불포화산	Maleic anhydride	$\begin{array}{c} \text{HC-CO} \\ \parallel \\ \text{HC-CO} \end{array} \begin{array}{l} \diagup \\ \diagdown \end{array} \text{O}$	중합반응온도로 전위하여 푸마르산으로 된다
	Fumaric acid	$\begin{array}{c} \text{HOCH} \\ \parallel \\ \text{HCOOH} \end{array}$	강도가 우수
포화산	Adipic acid	HOOC-(CH <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> -COOH	
	Phthalic anhydride		표준
	Isophthalic acid		내수 · 강도 · 내약품성 우수

표 2. 폴리에스테르에 사용되는 2가알콜.

명 칭	구 조 식	특 성
Ethylene glycol	HO-CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -OH	표 준
Propylene glycol	$\begin{array}{c} \text{HO-CH-CH}_2\text{-OH} \\   \\ \text{CH}_3 \end{array}$	스티렌과의 상용성을증가시킴
1,3-Butylene glycol	$\begin{array}{c} \text{HO-CH-CH}_2\text{-CH}_2\text{-OH} \\   \\ \text{CH}_3 \end{array}$	
Diethylene glycol	HO-CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -O-CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -OH	
Dipropylene glycol	$\begin{array}{c} \text{HO-CH}_2\text{-CH-O-CH-CH}_2\text{-OH} \\   \qquad \qquad   \\ \text{CH}_3 \qquad \qquad \text{CH}_3 \end{array}$	

불포화 폴리에스테르는 복합재료의 매트릭스로서 가장 널리 사용되는 열경화성 수지이다. 폴리에스테르는 분자 내에 에스테르 결합을 가지고 있는 고분자 화합물의 총칭으로 카르복시기(-COOH)와 히드록시기(-OH)의 결합이 주축을 이루고 있으며 양 물질의 종류나 경화제에 따라 여러 종류가 있다. 불포화 폴리에스테르 수지는 디카르복시산(dicarboxylic acid)과 다가알콜을 폴리축합시킨 액상의 에스테르 축합물(불포화폴리에스테르)에 비닐화합물 첨가중합한 삼차원적 가교 중합체이다. 또한 물성을 개량하기 위하여 불포화산 뿐만 아니라 포화산도 병용되고 있으며 이에 사용되는 원료를 표 1과 2에 나타내었다[3].

산 성분은 일반적으로 포화산과 불포화산과의 비를 조절하여 만든다. 포화산 또는 무수물은 단단함, 경도, 인장, 굴곡, 압축, 충격강도, 열적, 화학적 저항성 및 가교도를 조절하기 위해 사용된다. 불포화산 또는 무수물은 모노머와 공중합을 형성케 하는 불포화 이중결합을 제거하며 상업적으로는 말레인산이 주로 사용되는데 그 성분이 많으면 가교 반응이 많이 일어나 내열성은 좋아지나 취성이 생기며 인장강도가 떨어진다. 불포화도가 감소하면 이중결합이 감소하게 되고 가교 결합이 감소하게 되어 유연성이 증가하고 신율이 증가하며 열변형온도는 감소하게 된다. 반대로 불포화도가 증가하면 경도가 높아지고 딱딱해지며 높은 열변형온도를 갖게 된다[4]. 반응성 용매로 사용되는 모노머인 비닐화합물로는 스티렌, 비닐톨루엔, -메틸스티렌, -클로로스티렌 등이 있지만 스티렌이 높은 용해도, 낮은 점도 등으로 널리 사용된다. 스티렌의 단점으로는 가연성, 유독성 휘발물질의 배출이며 가격이 다소 높은 점도 있다. 모노머의 기능은 불포화 그룹과 반응하여 경화반응을 일으키게 하는 것으로서 과잉의 모노머는 폴리에스테르 결합 사이에 폴리스티렌이나 긴 측쇄를 형성하고 높은 발열을 일으키고 성장 시간을 길게 한다. 따라서 스티렌 모노머의 함량을 증가하면 경화된 수지 내에 가교점 사이의 공간을 증가시켜 단단함이 감소되게 한다. 즉, 강한 수지에서는 적정 스티렌 함량으로 굴곡강도, 인장강도, 모듈러스, 열변형온도가 최대로 되고 반대로 유연한 수지에서는 스티렌의 첨가로 수지가 강하게 된다. 이상과 같은 특성 및 저렴한 가격 때문에 주로 배전급 폴리머 애자용으로는 주로 불포화폴리에스테르 수지를 채용한 코어가 널리 사용되고 있다[5].

## 2.2 비닐에스테르 수지

최근 폴리머 애자용으로 사용이 증가하고 있는 수지로서 기계적 특성은 에폭시와 비슷하고 경화 과정은 폴리에스테르와 비슷하다. 불포화 모노카르복시산(주로 메타크릴산 또는 아크릴산)과 다관능기의 에폭시 수지와와의 에스테르화 반응에 의해 제조된다. 사용되는 에폭시로는 비스페놀 에폭시, 에폭시 노블락, 사이클로알리파틱 에폭시 등이다. 스티렌, 비닐톨루엔, -메틸스티렌 등의 여러 가지 모노머가 비닐에스테르 수지와 공중합하여 제품이 생산될 수 있으며 스티렌이 가장 널리 사용된다 [3]. 가격이나 성능을 고려할 때 중간 성능을 보임으로 최근 각광받고 있다.

## 2.3 에폭시 수지

에폭시 수지는 분자 내에 2개 이상의 에폭시기를 가지고 있는 화합물이며 열경화성 수지의 일종으로서 경화제 또는 촉매 존재하에서 실온 혹은 가열하면 삼차원적인 구조로 된다. 경화제 또는 촉매를 가하지 않고 가열하면 경화하지 않으며, 이 점이 다른 열경화성 수지와 다른 점이다. 에폭시 수지는 페놀과 아세톤으로부터 제조된 비스페놀A와 에피클로로하이드린으로부터 제조되며 일반적으로 DGEBA(diglycidyl ethers of bisphenol A)라고 불린다. 저점도의 폴리글리콜 수지나 알리파틱 디에폭시 수지를 첨가함으로써 유연성이 향상되어 내충격성, 열충격성, 신장율을 향상할 수 있으나 내열성이나 내화학성, 내용제성 등은 저하될 수 있다. 에폭시기는 반응성이 풍부하므로 경화제에 의해 3차원화하여 경화하며 경화제로서는 주로 1차 또는 2차 아민, 산무수물, 폴리아미드 등이 사용되고 있다 [1, 6]. 에폭시를 수지로 하여 FRP 코어를 제조하면 기계적 특성, 열적 특성이 모두 우수하므로 송전급 폴리머 애자를 중심으로 사용되고 있으나 가격은 가장 비싸다.

## 3. 유리섬유

유리섬유가 FRP에 있어서 중요한 강화재로 사용되는 것은 다음과 같은 특성이 있기 때문이다.

- 인장강도, 탄성계수가 크다.
- 치수안정성, 내열성이 우수하며 불연성이다.
- 흡수성이 적고 약품에 침식되지 않는다.
- 전기절연성이 좋다.
- 표면 처리하여 수지와 잘 접착하게 된다.

유리섬유의 종류는 여러 가지가 있으나 코어용은 주로 E(electrical grade) 글라스이다. E-글라스는 예부터 전기 모터와 전기 기기들에 감아서 사용한 유리섬유로서 그 조성은 표 3과 같다 [5].

폴리머 애자용 FRP 코어로는 일반적으로 유리섬유의 함량

표 3. E-글라스 섬유 조성.

화학 조성	중량비(%)
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0~10
CaO	16~25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12~16
SiO <sub>2</sub>	52~62
MgO	0~5
Na <sub>2</sub> O 및 K <sub>2</sub> O	0~2
TiO <sub>2</sub>	0~1.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05~0.8
F	0~1.0

은 70~75%. 모노 필라멘트의 직경은 5~20 μm가 사용되고 있다. 유리섬유가 복합재료로서 강화 효과를 발휘하기 위해서는 고분자 수지와의 계면에서의 강한 결합이 필요하다. 그러나 유리섬유의 단면은 원형이고 표면이 매끈하기 때문에 특별한 표면처리가 필요하다. 일반적으로 유기규소화합물(silane)이 사용된다. 유리섬유 생산 공정중에서 필라멘트가 백금 부식을 통과하면서 각각의 모노필라멘트에 결합제(binder)가 분무되어 다발로 묶어지는데 과량의 결합제로 인해 필라멘트 다발에서 모노필라멘트들이 서로 뭉치면서 내부에 연속적인 기공이 있을 수도 있기 때문에 전기적으로는 좋지 않은 영향을 미칠 수도 있다.

## 4. 인발성형법

인발성형 기술은 미국에서 1950년대에 개발되어 70년대를 거치면서 본격적으로 자리잡기 시작하였다. 이러한 개발 역사는 폴리머 애자의 개발 역사와 비슷한 시기에 이루어짐으로서 폴리머 애자의 발전에 크게 기여하게 되었다. 인발성형은 연속 섬유에 수지를 함침시켜 단면이 일정한 형상을 지닌 가열된 금형을 통하여 경화시키면서 연속적으로 제품을 성형하는 방법이다. 인발성형기는 유리섬유 스펀(spool), 수지함침통, 금형, 인발기 및 절단기 등으로 구성된다. 유리섬유는 가이드를 거치면서 점점 좁혀지고 수지함침통을 거치면서 유리섬유에 수지가 함침된다. 수지가 함침된 유리섬유는 가열된 금형을 통과하면서 복합재료의 형상이 유지될과 동시에 경화되며, 금형을 빠져나온 제품은 인발기에 의해 연속적으로 당겨지고 절단기에 의해 원하는 길이만큼 절단되어 원하는 제품으로 된다. 그림 2에 인발성형기를 나타내었다.

인발성형에 있어서 가장 중요한 기술은 수지 배합비, 섬유 배치, 금형온도 및 인발 속도 등이다 [2]. 수지의 선정은 가장 중요한 문제이며 제품의 경화속도, 기계적 특성, 열적 특성 등

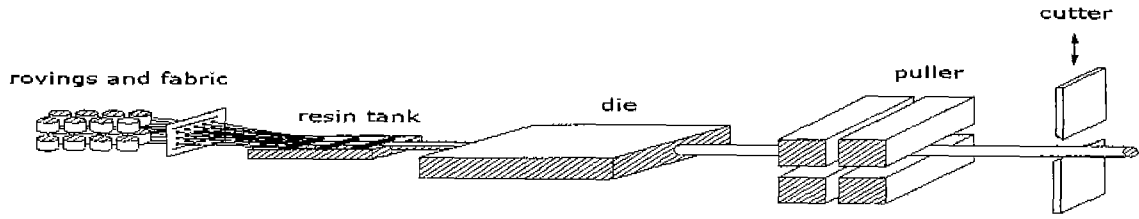


그림 2. 인발성형기.

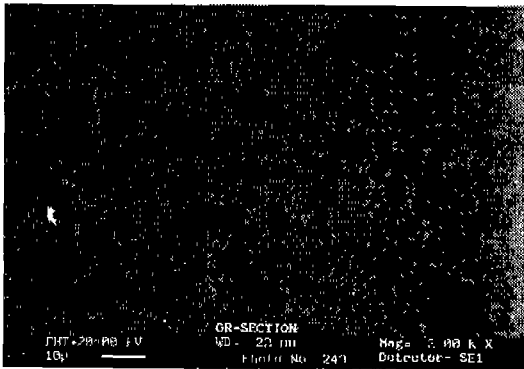


그림 3. 전자현미경 사진 (축방향과 수직 단면).

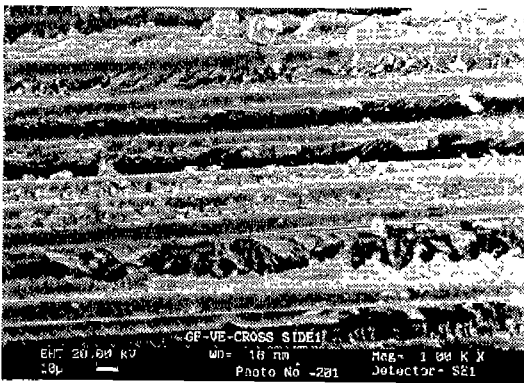


그림 4. 전자현미경 사진 (축방향 단면)

많은 부분과 관계된다. 섬유들의 균일한 배열은 강도를 높일 수 있으며 섬유가 서로 교차되면 정전기가 발생하여 기공의 원인이 되기도 하므로 유리섬유 가이드의 설계가 중요하다. 특히 폴리머 애자용 FRP 코아의 경우 제품에 크랙이 있으면 기계적 강도의 저하뿐 아니라 흡수에 의한 절연 특성의 저하로 큰 문제가 될 수 있다. 코아에서 축 방향의 크랙은 코아의 바깥 부

표 4. 각 수지별 성형 특성 비교.

수지시스템	폴리에스테르	비닐에스테르	에폭시
수지	이소프탈릭, 비스페놀A	비닐에스테르	에피클로로하이드린/비스페놀A
개시제	유기과산화물	유기과산화물	아민, 산무수물
중합특성	발열전 겔화	발열전 겔화	겔화전 발열
수축율	7-10%	5-8%	1-6%
계면접착	낮다	보통	높다
인발속도	보통	약간늦다	매우늦다
성형성	보통	약간어렵다	매우어렵다
수지온도	25~50℃	25~50℃	50~55℃
금형온도	115-160℃	120-175℃	150-230℃
충전제함량	0-35%	0-35%	-
내부이형제	0-2%	1-4%	-

분이 내부보다 빨리 경화될 때 생성되며 금형 온도가 인발 속도에 비해 높거나 인발 속도가 금형 온도에 비해 낮을 때 생성된다. 바깥 부분이 경화되어 결정되면 코아 내부에서 경화 중 수축이 발생하여 중심부에 축방향의 크랙이 발생한다[7]. 물론 수지 종류에 따라 성형 기술도 크게 달라지게 되며 다음 표 4에 각 수지별 성형방법의 차이점을 요약하여 정리하였다 [2]. 폴리에스테르 수지의 경우 수축이 훨씬 심하여 에폭시 수지보다 크랙 생성이 쉽다. 그림 3에는 인발 방향과 수직 방향으로 자른 단면의 전자현미경 사진이며 그림 4는 축방향의 단면 사진으로 유리섬유에 수지가 함침되어 있는 형상을 볼 수 있다.

### 5. 폴리머 애자용 코아의 요구 특성

폴리머 애자용 FRP 코아의 가장 중요한 특성은 애자의 주절연물로서의 절연특성과 현수, 외팔보, 압축, 인장 등의 기계적 하중이다. 실제로는 코아의 긴 길이로 절연특성이 문제가 되는 경우는 거의 없으며 기계적 특성에 있어서도 폴리머 애자 제조업체에서 여유가 있는 크기를 설계하여 선정하므로 초기에는 큰

문제가 되지 않는다. 폴리머 애자를 장기간 사용할 때 애자의 계면을 통해 유입되는 수분이 문제가 될 수 있으므로 실제적으로는 내부에 습기가 침투하는지를 살펴보는 염료 침투 시험이 가장 중요하며 그 다음으로는 하우징의 사출 온도에 견딜 수 있는 내열성이다 [8]. 일반적으로 하우징의 사출 온도는 160~180℃ 정도이므로 이 온도에서 크랙이 없어야 폴리머 애자용으로 사용할 수 있다. 코아의 인발 생산 시 발생하는 크랙은 제품의 성능에 치명적인 영향을 미칠 수 있으며 크랙은 생산 시 육안으로도 확인할 수 있다. 또한 금구를 압착 시 FRP 코아가 깨지지 않고 균열이 생기지 않아야 하는 것이 필수적인 요건이다.

폴리머 애자용 FRP 코아의 요구 특성은 ANSI C29.11, IEC 61109, CEA LWIWG-01, IEEE 1024 및 국내 한국전력공사의 구매 규격 등의 폴리머 애자 시험 방법에 기술되어 있으며 이를 요약하면 다음과 같다. 염료 침투 시험은 FRP 시료를 길이 10 mm가 되도록 축 방향과 직각 방향으로 자른 후 축선 용액에 담그었을 때 15분 이내에 시료의 끝까지 염료가 침투하면 안된다. 수분 확산에 의한 코아의 절연성능을 평가하기 위하여 코아를 길이 30 mm로 자른 후 0.1% 소금물에 100 시간 끓인 후 12 kV의 상용주파전압을 1분간 가하여 절연과피나 섬락이 일어나지 말아야 하며 시험 중 누설전류가 1 mA 이하이어야 한다. 인장 하중은 코아의 양 끝단에 금구를 압착하여 시험하므로 금구와 코아와의 계면 압착력이 우수하게 나타나는 특성이기는 하지만 코아의 기계적 특성이 깊이 관련되어 있다. 자기 애자의 경우, 기계적 하중의 수명은 단순한 하중-시간 시험으로 평가하여 인장내하중의 120~133%의 하중으로 24 시간 가하는 것으로 평가하지만 폴리머 애자는 파괴 이하의 하중을 장시간 인가하면 결국 파괴되는 고분자 특유의 크리프(creep) 특성 때문에 경년 사용에 따른 기계적 수명이 검증되어야 한다. 코아의 하중-시간 시험은 폴리머 애자의 평균 파괴하중을 구하고 이 하중의 60%의 하중에서 96 시간 유지할 때 파괴되거나 빠지지 않아야 한다. 기계적 하중-시간 시험은 규정인장 하중의 70% 하중에서 96 시간 유지시킨 후 이 시료를 규정인장하중까지 견디는지를 확인하는 시험으로 50년간의 사용을 보증하는 시험 방법이다. 또한 인발 제품의 취약성인 비틀림에 대한 저항성을 확인하기 위하여 폴리머 애자를 규정된 토크치로 비틀림한 후 염료 침투 시험을 실시하여 이상이 없어야 한다.

최근에는 주로 송전급 폴리머 애자에서 발생하는 취성파괴(brittle fracture)가 관심의 대상이 되고 있다 [9-11]. 원어로는 '부서지는 파괴'이지만 번역할 말이 마땅치 않아 본고에서는 취성파괴라고 하였다. 이 취성파괴는 코아의 유리섬유가 산의 공격을 받아 부식되어 절단되는 현상이다. 열화 과정은 E-글라스 섬유가 산성의 환경 중에 노출되었을 때 발생되며 이것은 충격, 설치 중의 손상, 코로나 절단, 파워아크 등으로 코아가 노출되었거나 인발 과정 중에 생성된 기공에서의 부분 방전의 발생으로 내부에 산이 생성되었기 때문이다. 산성 용

액이 E-글라스 섬유와 접촉하면 유리섬유 표면의 금속 이온(Ca, Al, B, Na)과 산의 수소 이온과의 이온교환 반응으로 표면에 실리카 층만 남기고 부식현상이 발생하게 되며 표면의 수축 현상으로 표면에 인장력이 가해지고 결국 균열이 발생하게 되는 것이다 [12]. 외국에서는 송전급 애자에서 이와 같은 사례가 보고된 것이 몇 차례 있었으며 이에 대한 방지 대책으로는 산의 영향을 받지 않는 유리섬유를 사용하는 것이다. 즉, 유리섬유의 성분 중에서 산의 공격에 치명적인 보론( $B_2O_3$ )의 함량을 크게 줄인 유리섬유(ECRGLAS)를 사용한다. ECRGLAS는 유리섬유 제조 업체인 Owens Corning 사의 상품명으로서, 현재는 많은 폴리머 애자 제조업체들이 이러한 방식의 유리섬유를 사용함으로써 취성파괴 사고를 방지하고 있다. 질산이나 염산과 같은 용액에 FRP 코아를 담그었다가 인장 시험을 하는 방식으로 성능을 평가하고 있으며 만족할만한 데이터를 얻고 있다.

## 6. 결 론

FRP 복합재료는 전기 절연성능이 탁월하며 우수한 기계적 성능, 내약품성 등을 가지고 있어서 폴리머 애자류의 중심 보강재로 적용되고 있다. 최근 세계적으로는 물론이고 국내에서도 폴리머 애자에 대한 관심과 수요가 폭발적으로 증가하면서 중요한 부품 소재인 FRP 코아에 대한 관심도 증가하게 되었다. 더욱이 폴리머로 만들어지는 현수애자, 지지애자, 라인포스트 애자, 결합애자, 장간애자는 다양한 직경을 가지는 코아를 요구하게 되었고 이에 따른 코아의 개발이 필수적으로 되었다. 국내에서는 폴리머 애자 개발 초기에는 외국 제품을 수입하여 사용하였으나 수량이 증가하고 다양한 크기가 요구되는 등 납기의 문제도 있어서 국산 개발의 당위성이 크게 요구되고 있다. 따라서 코아의 원료 재료의 선정, 성형 방법 등이 구체적으로 연구되고 개발되어야 하며 우수한 품질의 코아 생산 기반을 갖추어야 할 것으로 판단된다. FRP 코아 원료의 국산화 및 성형 기술의 확보로 중전기기 기반 기술을 보유하며 정부의 부품 소재 산업 육성에도 부응하고 폴리머 애자의 장기 신뢰성 향상에 기여해야 할 것으로 기대한다.

## 참 고 문 헌

- [1] 정기현, "플라스틱 이론과 실제", 보진재, pp. 308-309, 1975.
- [2] R. W. Meyer, "Handbook of Pultrusion Technology", Chapman and Hall, New York, pp. 9-11, 1985.
- [3] 竹鼻三雄, "FRP 生産と技術", 東京, pp. 21-60, 1976

- [4] 김병선, 황병선, "섬유강화 복합재료의 가공", 고분자 과학과 기술, 제 10권 1호, pp. 20-33, 1999
- [5] T. S. MaQuarrie, "Improved Dielectric & Brittle Fracture Resistant Core Rods for Non-Ceramic Insulators", Proc. World Congress Insulator Technology, pp. 25-40, 1999
- [6] 김박윤, "에폭시수지", 대광서림, pp. 19-31, 1994
- [7] R. S. Gorur, "Outdoor Insulators", Ravi S. Gorur, Inc., Arizona, p. 198, 1996
- [8] H. Jansen, J. M. Seifert, H. C. Karner, "Interfacial Phenomena in Composite High Voltage Insulation", IEEE Trans. DEI, Vol. 6, pp. 651-659, 1999
- [9] C. Schrijver, A. Herden, H. C. Karner, "A Chemical Approach to the Dielectric Aging of Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Insulators", ETEP, Vol. 7, pp. 99-105, 1997
- [10] M. Kuhl, "FRP Rods for Brittle Fracture Resistant Composite Insulators", IEEE Trans. DEI, Vol. 8, pp. 182-190, 2001
- [11] K. Kamo, "Reproducing Tests of Brittle Fracture of Polymer Insulators", Proc. ICPADM, pp. 395-398, 2000
- [12] H. Janssen, J. M. Seifert, H. C. Karner, "Interfacial Phenomena in Composite High Voltage Insulation", IEEE Trans. DEI, Vol. 6, pp. 651-659, 1999

## 저 자 약 령

성명 : 이 철 호

❖ 학 령

1982년 인하대학교 고분자공학과 (공학사)

1995년 서울시립대 화학공학과 (공학석사)

2000년 서울시립대 화학공학과 (공학박사)

❖ 경 령

1995년 한국전기연구소

현재 평일산업(주) 기술연구소장