

工學碩士 學位論文

複合新素材에 의한 無缺陷 FRP 절연봉의
開發에 관한 연구

A Study on the Development of Zero-defect FRP
Insulating Rod by Composite Materials

指導教授 金 允 海

2004年 2月

韓國海洋大學校 海事産業大學院

기계시스템工學科

朴 炳 吉

工學碩士 學位論文

複合新素材에 의한 無缺陷 FRP 절연봉의
開發에 관한 연구

A Study on the Development of Zero-defect FRP
Insulating Rod by Composite Materials

指導教授 金 允 海

2004年 2月

韓國海洋大學校 海事産業大學院

기계시스템工學科

朴 炳 吉

本 論 文 을 朴 炳 吉 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함 .

主 審 : 工 學 博 士 文 慶 萬 印

委 員 : 工 學 博 士 李 明 勳 印

委 員 : 工 學 博 士 金 允 海 印

2004年 2月

韓 國 海 洋 大 學 校 海 事 產 業 大 學 院

기 계 시 스템 工 學 科

朴 炳 吉

목 차

Abstract	iii
제1장 서론	1
1.1 연구배경	1
제2장 복합재료의 개요	5
2.1 강화섬유	5
2.2 수지	13
2.3 복합재료 성형공법	22
제3장 실험 방법	29
3.1 공법선정	29
3.2 원자재 선정	30
3.3 구조해석	33
3.4 실험 시료 제작 공정	49
제4장 실험 결과 및 고찰	57
4.1 실험 규격	57
4.2 기계적 특성 실험	59

4.3 전기적 특성 실험	75
제5장 결 론	103
참고문헌	105
감사의 글	106

Abstract

An insulator is installed to support and insulate between an electrical pole and wire. Outmoded insulator of porcelain type has some defects. It has high-weight and flash & destruction often happen because of increasing of leak-current by high surface-energy of it. So now polymer insulator is developed to solve these demerits.

In Korea, polymer insulator is manufactured, but the core of polymer insulator, FRP rod is not manufactured because of problem of manufacturing technology (eg. low speed of manufacturing and bubble, etc.) Now the whole quantity of FRP rod is imported in Korea.

The localization of rod is studied in this paper. This FRP rod has the length 370mm, diameter 17.2mm, and is manufactured by pultrusion with glass & epoxy resin on this paper.

Five different kinds of pultrusion speed (100, 200, 300, 400, 500 mm/min) is applied to this development rod. This purpose is to study the characteristic of rod according to different speed and the best condition of mass-production.

And this development rod is tested on the specification "Standard Technical Specification of Korea Electric Power Corporation (ES) and Canadian Electrical Association (CEA), American National Standard for Insulator (ANSI), International Electrotechnical Commission (IEC)"

From this study, we can know the maximum speed is 500mm/min.

Forwards, I will study about Ø22mm insulator for power transmission, Ø40mm insulator for railroad besides this development rod 'Ø17.2mm'.

제1장 서론

1.1 연구배경

전선을 지탱하고 절연하기 위하여 전봇대 등에 다는 여러 모양의 기구를 흔히 애자(碍子, Insulator)라하며 종류에는 재질에 따라 자기애자(Porcelain Insulator), 유리아자(Glass Insulator), 폴리머애자(Polymer Insulator) 등이 있고 용도에 따라 배전용 현수애자, 송전용 현수애자, 라인포스트 애자, 철도용 장간애자, TR208애자 등이 있다.

지금까지 많이 사용되어지고 있는 자기애자(Porcelain Insulator)는 높은 중량에 의해 작업이 용이하지 못하고 표면에너지가 커서 발수성이 적어 누설전류가 증가되어 잦은 섬락 및 파괴가 일어나곤 했다. 또한 파괴 시 폭파에 의해 발생된 파편은 인명 및 재산 등의 2차 사고가 일어나는 문제점을 안고 있었다.

이런 단점을 보완하기 위해 현재는 자기질의 약 15~20% 경량으로 생산, 보관, 운반, 설치작업 등이 용이하고 표면에너지가 작고 발수성이 좋아 같은 환경조건에서 누설전류가 작고 트래킹성이 적게 일어나며 가격이 저렴한 폴리머애자(Polymer Insulator)가 개발되어 보급중이다. 폴리머애자의 구조는 중심은 무결함 FRP 절연봉으로 되어있고 외부는 Polymer(EPDM, Silicon)로 구성되어 있다.

앞서 언급했듯이 배전 및 송전용 애자는 과거 자기(Porcelain)형에서 선진국형인 폴리머(Polymer)형으로 변환함에 따른 수요가 급증할 것으로 예상되므로 애자의 핵심부품인 품질과 생산성이 우수한 무결

함 FRP 절연봉의 개발은 시급한 문제이다.

초고압용 FRP 절연봉의 수요는 크게 증가하고 있지만 국내에서 사용하여온 인발성형방식으로 제조한 FRP 절연봉의 경우 실험용으로는 일부 국내에서 생산을 하여 사용하고 있지만 절연봉 내부의 기포를 완전히 제거하지 못하고 있고 이러한 기포들은 균열(Crack)발생의 원인이 되어 인장강도를 약화시키고 균열(Crack)사이로 누설전류가 흘러 절연파괴가 일어나게 만든다. 이러한 기포를 제거하기 위해서는 생산속도가 현저히 떨어져 거의 분당 10mm 안팎의 생산속도를 보이고 있으므로 생산성에서도 문제점으로 나타나 실제 제품에서 적용할 경우에는 품질상의 문제로 인해 전량을 수입하여 사용하고 있다. 초고압 전력기기에 사용되고 있는 조작기용 FRP 절연봉도 전량 수입에 의존하고 있다.

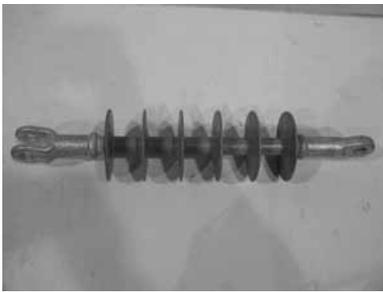
품질과 생산성이 우수한 무결함 FRP 절연봉을 개발하게 되면 수입 대체는 물론 수출까지 가능하여 그 파급효과는 매우 크다고 볼 수 있다.

FRP 절연봉이 사용되어지는 규격으로는 배전용 현수애자의 지름은 17.2mm, 송전용 현수애자는 지름 22mm, 철도용 장간애자는 지름 40mm등이 있다. 여기서는 배전용 현수애자에 사용되어지는 직경 17.2mm 무결함 FRP 절연봉의 개발과 국산화에 목표를 두고 있다.

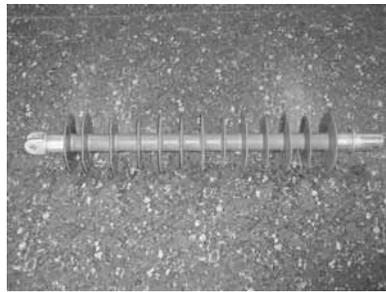
무결함 FRP 절연봉 개발 규격은 다음 Table 1과 같다.

Table 1. Development specification.

Length (mm)	Diameter (mm)	Material of core	Tensile load (kg)	Remarks
370	17.2	Epoxy	7,000	Polymer Dead-end Insulator (Type B)



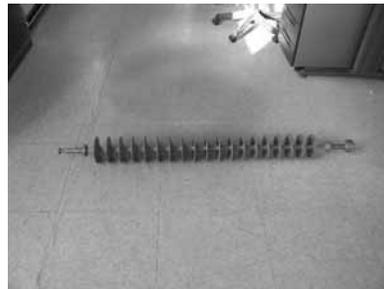
**Fig. 1 Polymer
Dead-end insulator.**



**Fig. 2 Polymer
Insulator for railroad.**



**Fig. 3 TR208
insulator.**



**Fig. 4 Polymer
power transmission
insulator.**

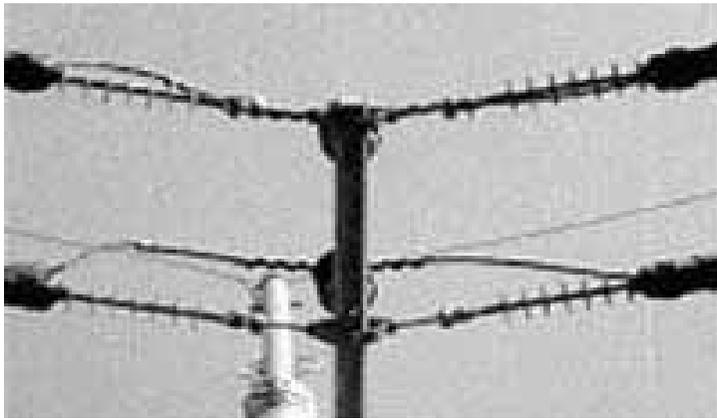


Fig. 5 The polymer dead-end insulator installed in distribution line.

제2장 복합재료의 개요

2.1 강화섬유 (Reinforced fiber)

2.1.1 성상

인조광물섬유는 Man-made mineral fibers(MMMF)를 말하는데 이는 유리, 자연석과 같은 광물질로 제조된 인조섬유를 총칭한다. 인조광물섬유는 그 원료에 따라 슬래그면(slag wool), 암면(rock wool) 그리고 유리면(glass wool)과 유리섬유(glass filament) 및 고령토로 제조되는 세라믹 섬유 및 알루미늄 산화물이나 다른 금속 산화물로 만들어지는 것 등으로 구분되는데 여기서는 유리면과 유리섬유를 통칭하는 인조유리섬유(Man-made vitreous fibers, MMVF)에 국한하여 기술한다. 유리섬유는 일반적으로 유리로 만들어지고 직경이 6~15 μm 의 섬유상 형태로 길이 : 폭의 비가 3 : 1 이상인 물질을 가리키는데 환경 중에서 물리적 힘을 받아 가로로 절단되어 짧아진다. 유리섬유는 단열이나 방음 등 일상생활에 밀접하게 다양한 형태로 사용되어 일상생활 공간에 분포하고 있으나 대부분은 유리섬유가닥을 접착하고 꼬거나 유리면을 이불솜과 같이 충전하여 내부공간에 수납되어 실이나 두루마리(Mat) 형태로 존재하며 외부로 유출되지 않는다. 제품에 함유된 유리섬유는 단열이나 방음과 같은 목적으로 사용된 경우에는 유리단섬유가 목적에 따라 일정한 두께를 지니는 층상으로 수납되며 유리강화플라스틱과 같은 제품에서는 직물형태로 플라스틱 기질 안에 배치되는 형태로 존재한다. 유리장섬유의 경우에는 직물형태로 직조하거나 직조하지 않고 바로 사용하기도 하는데

타이어 등의 강화재에는 Cord 형태로 사용된다. 실 형태의 Yarn은 유리 장섬유를 수십-수백 가닥씩 Binder로 결합시킨 것으로 전기절연 피복재 등에 사용되며, 직조하고 Binder로 결합시켜 여러 층으로 성형한 Mat는 유리섬유의 길이가 50 mm 정도로 짧은 Chopped strand mat와 자르지 않고 만든 Continuous strand mat가 있다.

Milled fiber는 유리장섬유를 미세하게 분쇄하여 제조한 것으로 수지에 충전시켜 성형제품을 생산하는데 쓰인다. 유리섬유의 수용성은 유리섬유를 제조하는 원료 유리의 화학적 조성에 따라 다르나 수분과 접촉이 제한된 제품 안에서는 용해가 제한되며 환경 중에서도 수용성이 낮아 생체조직이나 환경 중에서 잔류성이 상당히 높다.

2.1.2 특성

유리섬유가 인체건강에 영향을 미치는 요인은 화학적 특성과 물리적 특성에 기인한다. 녹는점은 유리면의 경우 1150℃ 전후이고 유리장섬유의 경우 1300℃ 내외이다. 밀도는 2.5 g/cm³ 부근이며 냄새나 물에 대한 용해도는 거의 없는데 환경이나 인체 중의 잔류성과 작용성을 결정하는 화학적 주요인은 물에 대한 용해도와 첨가제로 사용되는 첨가제이고 물리적인 주요인은 섬유가닥의 집합체 형상과 개별 섬유가닥의 두께와 길이이고 표면구조에 따른 인체영향 조사 자료는 없다. 유리중의 대부분을 차지하는 Silicate유리는 불산(HF)을 제외하고는 실온에서 대부분의 액체나 기체와 거의 반응하지 않기 때문에 유리섬유가 환경이나 인체 중에 장기간 존재하는 경우에는 물이 잔류성에 영향을 미치는 중요한 화학적 요인이 된다. 물은 유리섬유 중의 알칼리 이온을 용출시키고 규소와 산소 결합을 분해하여 용해시킨다. 유리섬유에서 알칼리 이온이 용출되는 것은 수용액이 약산성이나 중성일 때 발생하며 알칼리성 수용액에서는 규소와 산소 결합이 분해되어 산성이나 중성 용액에서보다 용해가 보다 급격히 일어난다. 첨가제로 사용되는 Binder는 주로 Phenol-formaldehyde resin을 기본으로 하는데 최종 생산물 중량의 12%까지 포함되기도 한다. 이 이외의 Binder로 Melamine resin, Silicone, Mineral oil 등이 사용되기도 한다.

2.1.3 제법

장섬유는 유리구슬을 고온에서 녹인 후 연속적으로 작은 구멍으로 불어내어 섬유형태로 뽑아내어 만드는데 섬유의 직경은 뽑아내는 속도가 빠를수록 작아지며 보통은 직경 5~24 μm 굵기의 유리섬유(filament)로 만들어진다. 단섬유를 제조하는 경우에는 고압의 공기를 불어서 만드는 Blowing법과 고속회전을 이용하는 Rotary 원심법이 있다. Blowing방법에서는 장섬유를 만드는 것과 같이 연속적으로 작은 구멍으로 고온에서 녹인 유리를 뽑아내면서 고압의 바람이나 증기를 불어내어 직경이 10~20 μm 인 유리섬유를 얻게 되는데 굵기가 일정하지 않고 섬유화가 되지 않은 섬유양단이 있는 유리가시를 많이 함유하고 있어 사용에 불편하다. Rotary원심방법으로 제조하는 경우에는 고온에서 녹인 유리를 벽면에 구멍이 있는 원통에 넣고 돌려 원심력에 의하여 유리섬유가 뽑아져 나오게 하는데 최근에는 원통이 이중으로 되어있는 이중 원심법을 많이 사용한다. 이 방법으로 만들어진 유리섬유는 Blowing법에 의하여 제조된 것보다 가늘고 굵기가 균일하다.

2.1.4 주요 강화섬유

일반적인 유리섬유에는 알칼리금속 함유율이 1% 이하인 Borosilicate 유리로 생산되는 E-Glass와 알칼리 금속을 다량 함유하는 유리인 Soda-Lime-Silicate 유리로 만든 C-Glass와 A-Glass가 있다. 내산성이 높은 C-Glass는 저가의 A-Glass에 Al_2O_3 을 2~3% 첨가하여 생산되고, A-Glass는 가격이 저렴하여 보통의 방음 재료나 단열 재료의 단섬유로 주로 사용된다. S-Glass는 고온에서 높은 기계적 강도가 요구되는 항공기나 로켓의 모터 케이스의 보강 재료로 사용되는데 산화마그네슘(MgO)의 함량이 높다. AR-Glass는 Na_2O 와 ZrO_2 의 함량이 높다. 유리섬유를 만드는 각종 유리의 화학적 조성은 Table 2와 같다.

Table 2. Specification of glass fiber.

Component	E-Glass	C-Glass	A-Glass	S-Glass	Cemfil	AR Glass
SiO ₂	55.2	65.0	72.0	65.0	71.0	60.7
Al ₂ O ₃	14.8	4.0	2.5	25.0	1.0	-
B ₂ O ₃	7.3	5.0	0.5	-	-	-
MgO	3.3	3.0	0.9	10.0	-	-
CaO	18.7	14.0	9.0	-	-	-
Na ₂ O	0.3	8.5	12.5	-	11.0	14.5
K ₂ O	0.2	-	1.5	-	-	2.0
Fe ₂ O ₃	0.3	0.5	0.5	trace	trace	trace
F ₂	0.3	-	-	-	-	-
LiO ₂	-	-	-	-	1.0	1.3
ZrO ₂	-	-	-	-	16.0	21.5

2.1.5 용도

유리면은 용도에 따라 두루마리나 단열판(Board) 또는 Pipe Cover 등으로 가공하는데 표면에 알루미늄이나 크라프트지를 덧붙여 가공하기도 한다. 두루마리로 가공된 것은 다양한 형태의 제품에 단열 및 흡음재로 들어가는데 밀도가 32kg/m^3 으로 단열판보다 가볍고 신축성이 높다. 단열판으로 사용되는 것은 32kg/m^3 이상의 밀도로 신축성이 두루마리보다 적는데 판상으로 주로 건축물의 단열 흡음재로 사용된다. Pipe cover는 밀도가 50kg/m^3 이상 되게 원통형으로 성형된 것으로 스팀이나 냉매 등이 흐르는 관의 단열에 주로 사용된다. 유리섬유는 Textile glass라고도 하는데 용도에 따라 직경이 3~25 μm 정도의 범위를 갖는다. E-Glass는 전기분야에도 사용되나 섬유강화플라스틱(FRP; Fiber reinforced plastic)이나 다른 복합재료에 널리 사용되고 있다. A-Glass는 E-Glass에 비하여 물이나 화학물질에 대한 침식에 약하나 E-Glass가 개발되기 이전에 주로 사용되었다. C-Glass는 E-Glass에 비하여 산과 알칼리에 대한 내식성을 강화한 것으로 납축전지에 주로 사용된다. AR-Glass는 알칼리에 대한 저항성이 크고 시멘트와 콘크리트의 보강재로 사용된다. 유리섬유는 가공형태에 따라서도 다양한 제품이나 목적으로 사용되는데 Yarn은 전기절연피복재, 강화재, 기타 합성섬유의 혼합재 등에 사용되며 이를 직조한 Yarn cloth는 방화용피복 등에 사용하며 폭이 좁고 얇게 직조한 Yarn tape는 절연테이프 등에 사용한다. 유리섬유를 직조한 Mat는 판상의 단열재나 방음재로 쓰이며 이를 제품의 형태에 따라 성형하여 자동차 등 내장재 등에도 사용한다. 유리섬유 가닥을 여러 가닥으로 새끼 형태로 꼬아 만든 Roving은 복합재료의 강화재나 타

이러한 강화재 등에 사용한다. 유리미세섬유(Glass microfiber)라고도 하는 특수목적의 유리섬유는 직경이 1 μm 이하로 주로 특수 항공 산업이나, 미세여과여재, 특수종이 등의 제조에 사용된다.

2.2 수지(Resin)

앞서 언급한 유리섬유가 보강재로써 하중을 견디는 요소라면, 이들 각각의 섬유를 제자리에 고정시켜서 구조적인 모양을 이루게 하는 것은 기지재료인 수지이다. 또한 전단하중일 때에는 주로 기지재료인 수지가 하중을 지탱하므로, 그 기계적 성질이 매우 중요하며, 파괴진행에 결정적인 영향을 미친다. 또, 대부분의 섬유가 외부요소 즉 열, 화학물질 등에 대해 안정되어 있으므로, 이러한 외부요소에 대한 수지의 저항성이 중요하다.

대표적인 수지 재료로는 에폭시수지, 불포화폴리에스테르수지 (unsaturated polyester resin), 고온용으로 주로 사용되는 페놀수지, 폴리이미드 수지, 기타 열가소성 수지 등이 있다.

2.2.1 불포화폴리에스테르 수지(Unsaturated polyester resin)

폴리에스테르수지는 포화 폴리에스테르와 불포화 폴리에스테르 두 가지로 나눌 수 있다. 포화폴리에스테르(saturated polyester)는 필름의 제조나 사출성형 등에 쓰이는 열가소성 수지이고, 불포화 폴리에스테르 수지는 복합재료의 기지재료로 주로 사용되는 열경화성 수지이다. 불포화 폴리에스테르는 사용이 간편하고 우수한 특성 때문에 주로 유리섬유와 함께 범용 복합재료의 기지재료로 아주 많이 사용되고 있는데, 흔히 접하는 소위 'FRP(fiber reinforced plastics)'의 대부분은 폴리에스테르 수지를 기지재료로 하여 만들어진다.

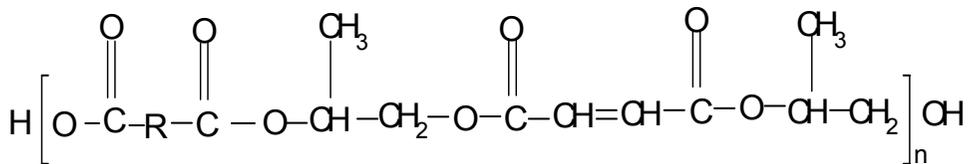


Fig. 6 Chemical Structure of Unsaturated polyester resin.

불포화폴리에스테르수지는 글리콜(glycol), 불포화 이염기산(unsaturated dibasic acid), 포화 이염기산(saturated dibasic acid), 반응성 단량체(reactive monomer) 등의 4가지 성분으로 구성되어 있다. 가장 많이 사용되는 글리콜은 프로필렌글리콜(propylene glycol)인데, 이것은 현재 생산되고 있는 대부분의 불포화 폴리에스테르수지에 사용되고 있다. 불포화산(unsaturated acid)으로 흔히 말레산

(maleic acid)을 주로 사용하는데, 이 불포화산은 가교반응(crosslinking)이 일어나게 하므로 그 성분이 많으면 가교반응이 많이 일어나 내열성은 좋아지나 취성이 생기며, 인장강도가 떨어진다. 포화산으로는 orthophthalic anhydride가 많이 사용되는데, 결정화되는 것을 방지하여 수지를 투명하게 만든다. 단량체는 용매로서 수지의 점도를 저하시키며, 폴리에스테르 사슬을 가교(crosslinking)하는 역할을 한다. 단량체로는 스티렌(styrene)이 가장 많이 사용되며, 가격도 싸고 점도도 낮다.

보통 불포화 폴리에스테르 수지는 촉매(일반적으로 peroxide)를 섞으면 즉시 화학반응이 일어나 경화되나, 단량체에 용해된 후에는 촉매 없이도 경화되는 경향이 있다. 이를 방지하기 위해서는 위에 언급한 4가지 주성분외에 억제물(inhibitor)이 첨가된다. 이렇게 여러 가지 성분으로 이루어지는 불포화 폴리에스테르 수지는 그 성분의 선택 및 배합비율에 따라 성질과 응용분야가 현저히 달라지며, 다음과 같이 7가지로 분류된다.

1) 범용폴리에스테르 수지 (general purpose resins)

orthophthalic anhydride와 maleic acid, propylene glycol의 혼합으로 만들어진다. 현재까지 FRP 선박의 건조 등에 많이 사용되고 있으며, 그밖에 우리 주위에서 많이 쓰이는 대부분의 FRP제품에 사용됨.

2) 내화학성 수지 (chemical resistant resins)

isophthalic anhydride를 사용하면 내화학성은 중간정도가 되고 propylene glycol을 neopentyl glycol로 바꾸어 사용하면 내화학성은

더욱 높아진다. 내화학적 수지는 주로 배관, 탱크, 반응조 등의 수지로 많이 사용된다.

3) 난연성 수지 (flame-resistant resins)

건물 등에 사용되는 폴리에스테르 수지는 화재의 위험 때문에 반드시 난연성이어야 한다. 보통 프탈산(phthalic acid) 대신 할로젠화 이염기산을 사용하면 이러한 성질을 얻을 수 있다.

4) 저스티렌 방출 수지(low styrene emission resins)

적층작업 중 스티렌 증기의 방출을 낮추어 작업조건을 개선하기 위해서는 수지의 스티렌 농도를 낮추거나 왁스 등의 첨가물을 넣는 방법이 있다.

5) 저수축성 수지 (low shrinkage resins)

일반적인 폴리에스테르 수지에는 스티렌이 약 35% 정도 섞여 있는데, 경화된 후에는 약 8%의 수축이 일어나게 된다. 단량체로 스티렌 이외의 다른 것을 쓰면 수축률은 저하되나, 점도가 올라가는 등 문제점이 생긴다. 수축률을 낮추기 위해서는 보통 poly vinyl acetate계의 열가소성 수지를 첨가한다.

6) 가요성 수지 (flexible resins)

이 수지는 경화 후에도 고무처럼 말랑말랑한데, 이것은 포화산의 일부 또는 전부를 dibasic aliphatic acid로 대신하면 얻을 수 있다.

7) 내후성 수지 (weather-resistant resins)

폴리에스테르 수지가 햇볕에 노출되었을 경우, 자외선으로 인한 황화현상을 방지하기 위하여 자외선 흡수제를 첨가한다. 이런 종류의 수지는 주로 겔코트용 또는 옥외 구조물용으로 사용한다.

2.2.2 에폭시 수지 (Epoxy resin)

에폭시 수지(epoxy resin)는 현재 복합재료의 기지재료로 가장 많이 쓰이고 있다. 에폭시는 높은 강도, 우수한 내구성 및 접착성, 내화성, 그리고 경화 반응 동안에 생성물이 없는 점 등 때문에 각광받고 있는 기지재이다. 또한 에폭시 수지는 경화되면 전기 절연성이 매우 우수하여 전기, 전자 부품용으로도 많이 사용된다.

에폭시는 2개 이상의 에폭시기(epoxide)를 함유하고 있는 분자의 통칭이다. 경화되기 전에는 점도가 아주 낮은 액상에서 고상에 이르기까지 형태가 다양하나, 적당한 경화제를 첨가하고 가열하면 중합반응이 일어나 경화된다. 보통 경화제로 일차 아민이나 이차 아민, 유기 anhydride 등을 많이 사용한다. 그 밖에 촉매로는 3 불화보론(boron trifluoride) 등을 사용하며, 점도를 낮추기 위해 희석제를 첨가한다. 에폭시는 접착제 및 적층용 등의 수지로서 가정용 및 공업용으로 많이 사용된다. 에폭시는 용도에 적합하도록 특성을 변화시키기 위해 그 성분을 변화시킬 수 있는데 희석제, 가소제, 충전제(filler), 강화제(reinforcement), 촉진제 등을 혼합한다. 특히, 에폭시는 폴리에스테르가 경화반응 중 수축률이 아주 큰 데 비해, 체적 수축률이 1~2%에 불과하다는 장점이 있으며, 충전제의 첨가로 수축률을 거의 0에 가깝게 만들 수 있다. 적층용 에폭시 수지는 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 액상의 수지로서 적층에 많이 사용되며, 둘째로는 분자량이 낮은 고상의 수지로 프리프레그 제작에 많이 쓰인다. 에폭시 수지의 주재 및 경화제에도 여러 종류가 있는데, 주재는 크게 bisphenol A, glycidyl esters, glycidyl amines, novolacs, 브롬화 수지 등의 5가지로 나눌 수 있으며, 주재를 종류별로 간단히

분류하면 다음과 같다.

1) 비스페놀 A (bisphenol A)계수지

최초로 만들어진 에폭시 수지이며, 현재 생산되고 있는 에폭시의 대부분은 비스페놀 A (bisphenol A)계 수지로 구성되어 있다. 이 수지는 bisphenol A와 epichlorohydrin을 반응시켜서 얻게 되는데, 그 혼합비를 변화시키면 다른 수지도 얻을 수 있다.

2) 글리시딜 에스테르(glycidyl ester)

이 종류의 수지는 그렇게 많이 이용되지는 않으며 bisphenol A에 비해 점도가 낮고 내후성이 좋은 이점이 있다. 이 종류의 수지는 anhydride계 경화제와 함께 사용되며, 진공함침 (vacuum impregnation), 적층 및 성형용으로 사용된다.

3) 글리시딜 아민(glycidyl amine)

범용으로 이용되지는 않으나 고온에서의 강도가 좋고 방사선에 대한 저항성이 높다는 장점이 있어 X선 필름 카세트의 탄소/에폭시 복합재료 패널이나 NMR CT용 베드 패널 수지로 응용되기도 한다. 필라멘트 와인딩이나 수적층용으로 많이 사용된다.

4) Novolac

노블락은 페놀과 포름알데히드를 산용액에 반응시켜 얻는데, 가장 간단한 노블락은 고분자량의 비스페놀 F이며 에피클로로하이드린을 함께 반응시켜 글리시딜 에테르 노블락을 생성한다. 화학약품 및 고온에서 우수한 성질을 보유한다는 장점이 있는 반면, 파괴 변형률이

상당히 낮아진다는 단점(1 ~1.5%)이 있다. 프리프레그용, 필라멘트 와인딩용, 수적층용으로 쓰이며, 프리프레그용의 경화제는 주로 방향성 디아민과 3불포보론 계통이 쓰이고 필라멘트 와인딩 및 수적층용 경화제로는 anhydride가 많이 쓰인다.

5) 브롬화 수지

브롬이 들어있어 난연성(flame resistance)을 나타내며 주로 난연성 인쇄회로기판 등을 만드는데 많이 쓰인다. 아민계와 anhydride계가 있다.

2.2.3 고온용 수지(High temperature resin)

고온용 복합재료의 기지재료로 널리 사용되는 수지에는 페놀(phenol), 폴리이미드(polyimide) 수지 등이 있다. 이들 수지는 고온에서 잘 분해되지 않고 분해되더라도 서서히 분해되므로 강도를 오랜 시간 유지할 수 있다.

1) 페놀수지

페놀수지(phenol resin)는 1900년대 초부터 사용되어 온 역사가 아주 오래된 수지로 페놀과 포름알데히드를 합성시켜 얻는다. 이들은 novolac과 resole이라고도 하는데, 성형할 때 온도와 압력을 동시에 가해 주어야 한다. resole은 알칼리 상태에서 페놀을 포름알데히드와 반응시켜 얻는다. novolac은 산성에서 포름알데히드를 페놀과 반응시켜 얻으며, 경화 반응 때 hexamin을 첨가시켜주고 동시에 열도 가해야 한다. 페놀수지는 약 260℃까지 사용가능하고 내수성이 우수하며 가격이 저렴하다는 이점이 있다.

2)폴리이미드 수지

폴리이미드 수지(polyimide resin)는 고온용 수지 중에서 가장 대표적인 수지이며, 개발된 수지 중에서 가장 고온에서 안정한 수지의 하나인데, 약 316℃ 정도에서도 구조재로 사용할 수 있다. 폴리이미드에는 응축형과 첨가형의 두 가지 종류가 있다.

2.3 복합재료의 성형공법

2.3.1 개요

섬유강화 복합재료는 그 제조방법이 일반 금속재료와는 매우 다르다. 섬유강화복합재료의 제조방법은 주로 그 기지(matrix)가 되는 물질에 따라 달라지는데, 기지재료가 열경화성 수지일 경우와 열가소성 수지일 경우, 또 금속이나 세라믹일 경우, 각각 최고의 기계적 성질과 경제성을 얻기 위하여 전혀 다른 공정이 사용된다. 또한 복합재료는 일단 성형이 되면 필요에 따라 절단하거나 구멍을 뚫는 정도의 간단한 후가공만을 하므로, 제품의 형상에 따라 각기 다른 성형방법을 채택하여야 한다. 현재 일반화되어있는 복합재료의 성형법을 보면 다음과 같다.

- 1) 핸드레이업법(hand lay-up)
- 2) 필라멘트와인딩(filament winding)성형법
- 3) 인발(pultrusion)성형법
- 4) 오토클레이브(autoclave)성형법
- 5) 오픈몰드(open mold)성형법
- 6) SMC(Sheet molding compound) 성형법
- 7) RTM(Resin Transfer Molding) 성형법
- 8) 열프레스 성형법
- 9) 회전성형법

등의 크게 9가지 성형법을 들 수 있겠다.

1) 핸드레이업(Hand lay-up)공법

가장 일반적으로 많이 사용되는 공법이다. 몰드위에 매트와 수지를 이용하여 말 그대로 손으로 적층하여 경화시켜 제품을 만드는 방법으로 크기가 큰 제품을 비롯하여 가장 손쉽게 이용할 수 있는 공법이다.

FRP(섬유강화 복합재료, Fiber Reinforced Plastic)공법 중 가장 오래되었으며, 미려한 제품을 얻을 수 있다는 장점이 있으나 작업자의 숙련도에 의해 제품의 질이 크게 영향을 받는다.

제품의 강도는 타 공법에 비해 크지 않으며 복잡한 형상도 만들 수 있다는 장점이 있다.

스프레이를 이용하여 성형하는 방법도 있다.

핸드레이업법에 사용되는 보강재는 유리섬유매트(glass fiber chopped strand mat) 및 직조로빙(woven roving)이 있으며 기지재로는 폴리에스테르수지, 비닐에스테르, 에폭시 등이 널리 사용된다.

2) 필라멘트와인딩(Filament winding) 공법

수지가 함침된 연속섬유를 회전하는 심축위에 감아서 주로 파이프나 압력용기, 로켓 모터 케이스 등과 같은 축대칭 복합재료 구조물을 제작하는 방법이다. 필라멘트 와인딩 성형은 심축의 회전속도와 섬유의 공급위치를 이동시키는 캐리지(carrage)의 속도를 조절하여 일정한 와인딩 각도와 패턴으로 수지가 함침된 연속섬유를 심축에 감을 수 있는 성형기를 이용한다. 와인딩 각도는 심축의 방향과 거의 일치하게 감는 축방향 와인딩(longitudinal winding)에서 축에 거

의 수직으로 감는 원주방향 와인딩(hoop winding)까지 심축 회전속도와 캐리지 이동속도 비에 따라 조절된다. 와인딩 방법에는 수지를 섬유에 함침 시키는 시기에 따라 습식 와인딩법과 건식 와인딩법을 구분되는데, 습식 와인딩법은 와인딩하는 과정에서 섬유가 수지 함침용기(resin bath)를 통과할 때 수지가 함침되어 바로 심축에 감는 방법이며, 건식 와인딩법은 이미 수지가 섬유에 함침되어 경화가 일부 진행된 단계로 된 프리프레그 로빙(prepreg roving)을 심축에 감는 방법이다. 설계상의 두께까지 와인딩 되면 와인딩된 심축을 와인딩기에서 떼어 내어 경화로 안의 회전축에 걸고 회전시키면서 경화시킨다.

와인딩된 제품을 경화 사이클에 따라 경화시킨 후에 심축을 탈형시키고 필요에 따라 표면을 가공하는 과정이 일반적인 필라멘트 와인딩 성형과정이다.

필라멘트 와인딩 섬유로는 표면이 특수 처리된 유리섬유를 주로 사용한다. 기지재료로는 에폭시, 폴리에스테르, 비닐에스테르 수지가 주로 사용된다. 초기에는 주로 성형기의 형상이 선반형태의 체인구동형이었으나 최근에는 다축운동이 가능한 컴퓨터 제어 성형기가 개발되어 사용되고 있다.



Fig. 7 4 axis Filament winding machine.

3) SMC(Sheet molding compound) 성형법

대량생산에 많이 사용되는 성형방법으로 압축성형법을 들 수 있는데 이것은 복합재료 원재료를 가공하여 중간형태의 재료인 프리프레그를 만든 뒤 금형에 넣고 압력과 열을 가하여 성형하는 방법으로 그 중간 재료의 형태에 따라 SMC (sheet molding compound) 또는 BMC(bulk molding compound) 성형법으로 부른다. SMC는 보강섬유에 페이스트를 함침시켜 유연성이 있는 박판 형태로 만든 것으로서 이것을 금형에 넣고 프레스로 약 4~18MPa로 가압하여서 금형을 120~180℃로 가열하여 제품을 생산한다.

SMC성형에는 고압이 사용되므로 금형 및 프레스의 가격이 비싸지만 성형시간이 비교적 짧아 대량생산에 적합한 공법이다.

BMC는 SMC와 유사하나 그 형태가 박판 대신에 덩어리(Bulk) 형태로 되어 있어 복잡한 3차원 형상의 성형에 적합하다. 연속 보강섬유를 사용할 수 없어서 강도가 떨어진다는 단점이 있다.

4) RTM (Resin Transfer Molding) 성형법

복합재료의 고속 대량생산의 방법으로 SMC, BMC 등이 많이 응용되어 왔으나 장비 및 금형의 가격이 비싸서 생산량이 많지 않거나 또는 설계가 자주 변경되는 경우에는 경제성 문제로 적용이 어려웠다. 그 밖에도 빠른 경화반응 때문에 높은 생산성을 갖는 고분자기지 복합재료 제조방법으로 RIM(Reaction Injection Molding), RRIM(Reinforced Reaction Injection Molding), RTM(Resin Transfer Molding) 등을 들 수 있다. RIM이나 RRIM 등은 단섬유

복합재료 성형에 주로 사용되는 반면, 단섬유뿐만 아니라 장섬유 보강 복합재료 성형에도 가능한 RTM은 원하는 형상의 금형 안에 보강섬유 프리폼(preform)을 넣고 주입구를 통하여 수지를 금형 안에 주입한 후 금형 안을 진공으로 유지하면서 열과 압력을 가해 성형하는 것이다. RTM 성형법은 다른 공정에 비하여 상대적으로 낮은 압력과 진공에 의하여 성형되므로 양질의 제품생산을 가능하게 할 수 있으며, 비교적 높은 보강섬유 함유율(50wt%까지)과 빠른 제조시간(12분 이하)의 장점이 있다.

5) 인발 성형법

인발(pultrusion)성형은 연속섬유에 수지를 함침시켜 단면이 일정한 형상을 지닌 가열된 금형을 통하여 경화시키면서 연속적으로 제품을 성형하는 방법으로 긴 튜브, 봉 및 채널 등과 같이 길이방향으로 똑같은 단면을 가진 제품을 제조하는데 사용된다. 인발성형은 보강섬유 스푼(spool), 수지함침통(resin bath), 가열금형, 인발기 및 절단기 등으로 구성된다. 보강섬유 스푼로부터 공급되는 보강섬유가 수지함침통을 거치면서 보강섬유에 수지가 함침된다. 수지가 함침된 보강섬유는 가열된 금형을 통과하면서 복합재료의 형상이 유지됨과 동시에 경화되며, 금형을 빠져 나온 복합재료 제품은 인발기에 의하여 연속적으로 당겨진다. 성형된 복합재료 제품은 절단기에 의하여 원하는 길이만큼 절단되어 최종 완성된다.

인발성형에 있어서 가장 핵심적인 기술로는 수지 배합기술, 섬유분포 제어기술, 금형온도 제어기술 및 내식성 등과 관계있을 뿐만 아니라, 수지함침성 등과 매우 밀접하다. 성형된 제품의 섬유분포가 균

일하여야 강도를 높일 수 있으므로, 섬유분포 제어 기술은 무엇보다 중요하며, 이를 위하여 섬유 가이드 장치를 잘 설계하여야 한다.

인발성형은 다른 성형법에 비하여 생산성이 높으며, 당기는 속도조절이 중요하다. 금형의 온도제어는 생산성과 기계적 특성에 크게 영향을 미치므로 매우 중요한 기술이다. 금형의 온도에 따라 금형 내에서의 경화도 변화가 달라지며 최대 경화도에 도달하기까지의 시간이 변하게 된다. 열경화성 수지인 경우 경화될 때 일반적으로 수지가 수축하게 되므로 최대 경화도에 이르는 시간이 빠르면 금형의 입구 쪽에서 경화가 모두 이루어지므로 당기는 힘이 상대적으로 줄고 최대 경화도까지 도달하는 시간이 늦을수록 금형출구 쪽에서 경화가 완성되므로 당기는 힘은 상대적으로 증가된다. 당기는 속도는 결국 금형의 온도와 당기는 힘 등을 고려하여 결정되며 생산성 향상을 위해서 당기는 속도가 가능한 빠를 수 있도록 금형의 온도 및 당기는 힘을 조절하는 기술이 무엇보다 중요하다고 할 수 있다.

인발성형의 특성상 길이방향의 섬유배열밖에 할 수 없는 기존 기술의 단점을 보완하여 섬유각도를 다양하게 성형할 수 있는 기술개발에 관심을 모으고 있다. 그리고 점도가 상당히 높기 때문에 수지함침이 용이하지 않은 열가소성 수지 복합재료의 인발성형을 위하여 테이퍼진 금형을 이용, 강압적인 압력을 가하여 수지를 함침시키면서 성형하는 열가소성 수지 복합재료의 인발성형 기술개발이 급속히 진행되고 있다.

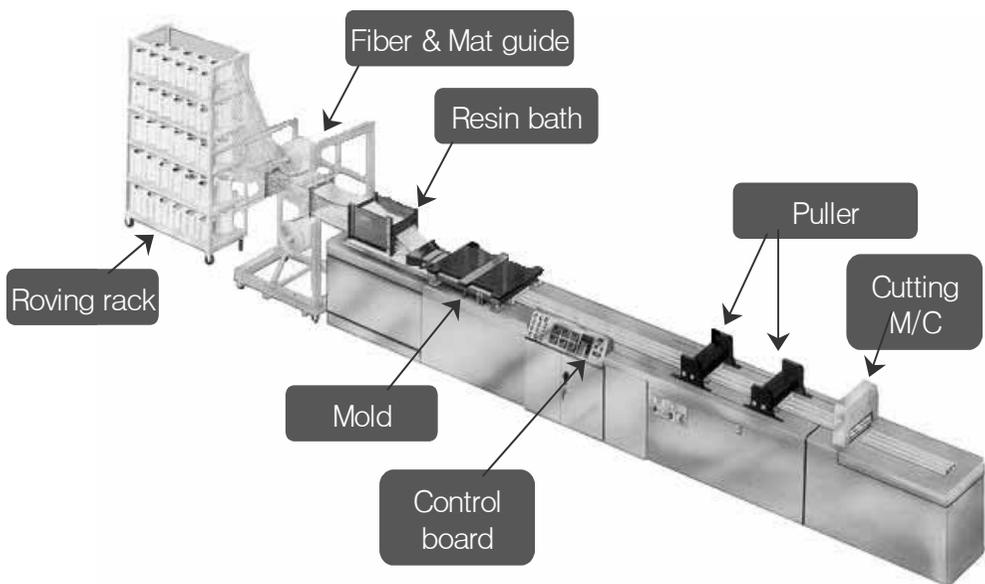


Fig. 8 Pultrusion machine.

제 3장 실험 시료 제작

3.1 공법선정

무결함 FRP 절연봉을 개발하기 위해서는 앞서 살펴본 복합재료 성형공법 중에서 가장 적합한 공법으로 인발공법을 들 수 있겠다.

인발공법은 함침과 성형공정이 동시에 일어남으로써 연속생산이 가능하여 생산성이 높다.

그리고 제품의 품질이 균일하고 우수하며 금형의 외곽치수대로 제품이 성형됨으로 치수 안정성이 높다. 그밖에도 높은 인장강도를 이용하여 설계에 따라 강도조절이 가능하며 별도의 후가공이 없어 공수가 절약된다는 장점을 가지고 있다.

하지만 인장강도에 비하여 굴곡강도가 낮고 복잡한 형상의 성형이 어렵다. 상기의 내용과 같이 치수의 안정성과 높은 인장강도 및 제품의 비강도를 최대화 할 수 있는 공법으로 인발공법이 가장 적합하다.

3.2 원자재선정

3.2.1 수지선정

제2장에서 살펴본 바와 같이 복합재료는 크게 두 가지 성분으로 구성되어 있다. 하나는 하중을 견디어주는 보강섬유와 또 다른 하나는 보강섬유를 제자리에 고정시켜서 구조적인 모양을 이루게 해주는 기지재료이다. 또한 전단하중일 때에는 주로 기지재료가 하중을 지탱하므로, 기지재료의 기계적 성질이 매우 중요하며, 파괴진행에 결정적인 영향을 미친다. 또, 대부분의 섬유가 외부요소(열, 화학물질 등)에 대해 안정되어 있으므로 이러한 외부요소에 대한 기지재료의 저항성이 매우 중요하다.

Table 3은 2장에서 고찰하여본 각 수지종류별로 간단히 비교한 것이다. 이와 같이 가장 널리 사용되는 3가지 형태의 수지 중에서 무결함 FRP 절연봉에 적용하는 데에는 에폭시수지가 가장 적합하다.

그 이유로는 에폭시수지가 가지는 장점 중에 우선 기계적, 전기적, 열적특성이 우수한 수지라는 점이다.

다음 Table 4는 무결함 FRP 절연봉에 사용된 수지와 경화제 특성이다.

Table 3. The characteristic comparison with resins.

Kinds	Characteristic	Application	Remarks
UPE	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Easy to use ▪ Characteristic of it is good 	General matrix material of composite	Normal temperature hardener
Epoxy	<ul style="list-style-type: none"> ▪ High strength ▪ Good endurance ▪ Strength adhesion ▪ Good insulation 	Composite material for high strength	High temperature hardener
Phenol	<ul style="list-style-type: none"> ▪ High temperature 	Composite material for high strength at high temp.	The pressure and temp should be worked simultaneously for manufacturing

Table 4. The Characteristic of Resin and Hardener.

Division	Characteristic	Remarks
Epoxy resin (bisphenol A)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Specific gravity : 1.84 - 1.94(g/cm³) 2. Viscosity : 9,000 - 11,000 3. Flexural strength : 14.4(kg/mm²) 4. Flexural elastic ratio : 343(kg/mm²) 5. Tensile strength : 9.5(kg/mm²) 6. Elongation ratio : 7.8% 	At circumference Temp. 25
Hardener	<ol style="list-style-type: none"> 1. Weight : 9.8 - 10.1(lbs) 2. Viscosity : 9,000 - 11,000 	

3.2.2 유리섬유 선정

기계적 강도를 유지하기 위해서는 유리섬유가 보강재로써 가장 중요한 역할을 한다. 먼저 유리섬유의 형태는 여러 종류가 있으나 인발공법에 사용되는 것은 로빙(roving)이라 불리는 형태의 유리섬유이다.

FRP 절연봉과 같은 구조재를 만들기 위해서는 로빙의 굵기도 중요하다. 로빙의 굵기는 4400TEX를 선정하였다. 시제품 개발 시 사용된 유리섬유는 수분함량이 0.1%이하이고 작열감량은 0.7%인 E-glass를 사용한다.

E-glass의 탄성계수는 $7,383\text{kg/mm}^2$, 인장강도는 $34,646\text{kg/cm}^2$ 이다. 유리섬유의 물성치는 Table 5 와 같다

Table 5. E-glass specification.

Division	Property of matter	Remarks
Specific gravity	2.54	
Modulus of elasticity	$7,383\text{ kg/mm}^2$	
Tensile strength	$34,646\text{ kg/mm}^2$	
Softening point	840 °C	

3.3 구조해석

FRP 절연봉 제작을 위한 구조해석을 위하여 다음과 같이 조건을 설정하여 해석하였다. 구조해석틀은 I-DEAS를 사용하였고 FRP 절연봉을 제조하는 공법은 앞에서 선정한 인발공법으로 하였다. 수지는 에폭시, 유리섬유는 E-glass, 각 물성 값은 앞에서 선정한 재료의 시험결과값을 사용하였다.

유한요소(finite element method) 해석법을 사용하였고, 실제 해석 모델은 간소화시켰다. 이러한 간소화의 목적은 해석의 효율성을 높이기 위한 것이다. 해석을 위한 FRP 절연봉의 제품크기는 길이 370mm, 지름 17.2mm이다.

3.3.1 해석조건

해석조건은 Tetraheron(4절점)타입이며 절점수는 5,379개, 요소 수는 1,439개이다. 해석조건은 Table 6과 같다.

Table 6. Analysis condition.

Division		Contents	Remarks
Program		I-DEAS	
Equipment		Silicon Graphics(O ₂)	
Element	Type	Tetraheron - 4 node	
	Node	5379 ea	
	Element quantity	1439 ea	
Load Condition		Tensile load	※Refer to analysis result table
Boundary Condition		Fix the one side of rod surface	※Reference Fig.10

3.3.2 하중조건

하중조건은 다음과 같다.

- ①하중조건 1 : 인장하중 7,000kgf가 FRP 절연봉 상단에 작용
- ②하중조건 2 : 인장하중 9,000kgf가 FRP 절연봉 상단에 작용
- ③하중조건 3 : 인장하중 11,000kgf가 FRP 절연봉 상단에 작용
- ④하중조건 4 : 인장하중 13,000kgf가 FRP 절연봉 상단에 작용
- ⑤하중조건 5 : 인장하중 14,000kgf가 FRP 절연봉 상단에 작용

이와 같이 하중을 5가지 조건으로 잡은 것은 개발제품의 인장파괴 하중목표가 7,000kgf이상이며, 1400kgf가 일반적으로 충분히 파괴되고 남는 시점이기 때문에 적용하였다. 경계조건은 FRP 절연봉 하단으로부터 40mm지점, 즉 FRP 절연봉에 금구가 압착되는 부분을 고정하였다. 하중조건 및 경계조건은 Fig. 9와 같다.

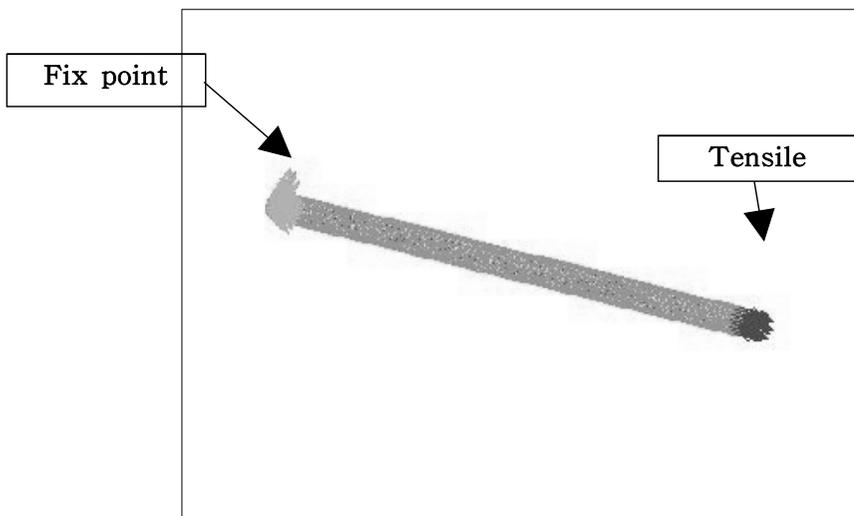


Fig. 9 Boundary condition & load condition.

3.3.3 결 론

경화된 FRP 절연봉의 허용 변형률을 2.1%(물성자료근거)로 설정하고 하기 해석결과표에 의해 2.1% 이상이 되는 14,000kgf가 적용된 경우에는 FRP 절연봉이 파괴된다는 것을 알 수 있다.

Table 7. Analysis result.

NO	Load condition	Analysis result			Reference Fig.
		Stress value (kg/mm^2)	Tensile value (mm)	Deformation ratio (%)	
1	7,000kgf	118	3.97	1.07	Fig. 10, 11
2	9,000kgf	152	5.10	1.37	Fig. 12, 13
3	11,000kgf	186	6.24	1.68	Fig. 14, 15
4	13,000kgf	220	7.37	1.99	Fig. 16, 17
5	14,000kgf	237	7.94	2.14	Fig. 18, 19

Fig. 10은 하중 7,000kgf가 FRP 절연봉에 작용할 때 응력상태 결과이다.

Fig. 11은 하중 7,000kgf가 FRP 절연봉에 작용할 때 인장상태 결과이다.

Fig. 12는 하중 9,000kgf가 FRP 절연봉에 작용할 때 응력상태 결과이다.

Fig. 13은 하중 9,000kgf가 FRP 절연봉에 작용할 때 인장상태 결과이다.

Fig. 14는 하중 11,000kgf가 FRP 절연봉에 작용할 때 응력상태 결과이다.

Fig. 15는 하중 11,000kgf가 FRP 절연봉에 작용할 때 인장상태 결과이다.

Fig. 16은 하중 13,000kgf가 FRP 절연봉에 작용할 때 응력상태 결과이다.

Fig. 17은 하중 13,000kgf가 FRP 절연봉에 작용할 때 인장상태 결과이다.

Fig. 18은 하중 14,000kgf가 FRP 절연봉에 작용할 때 응력상태 결과이다.

Fig. 19는 하중 14,000kgf가 FRP 절연봉에 작용할 때 인장상태 결과이다.

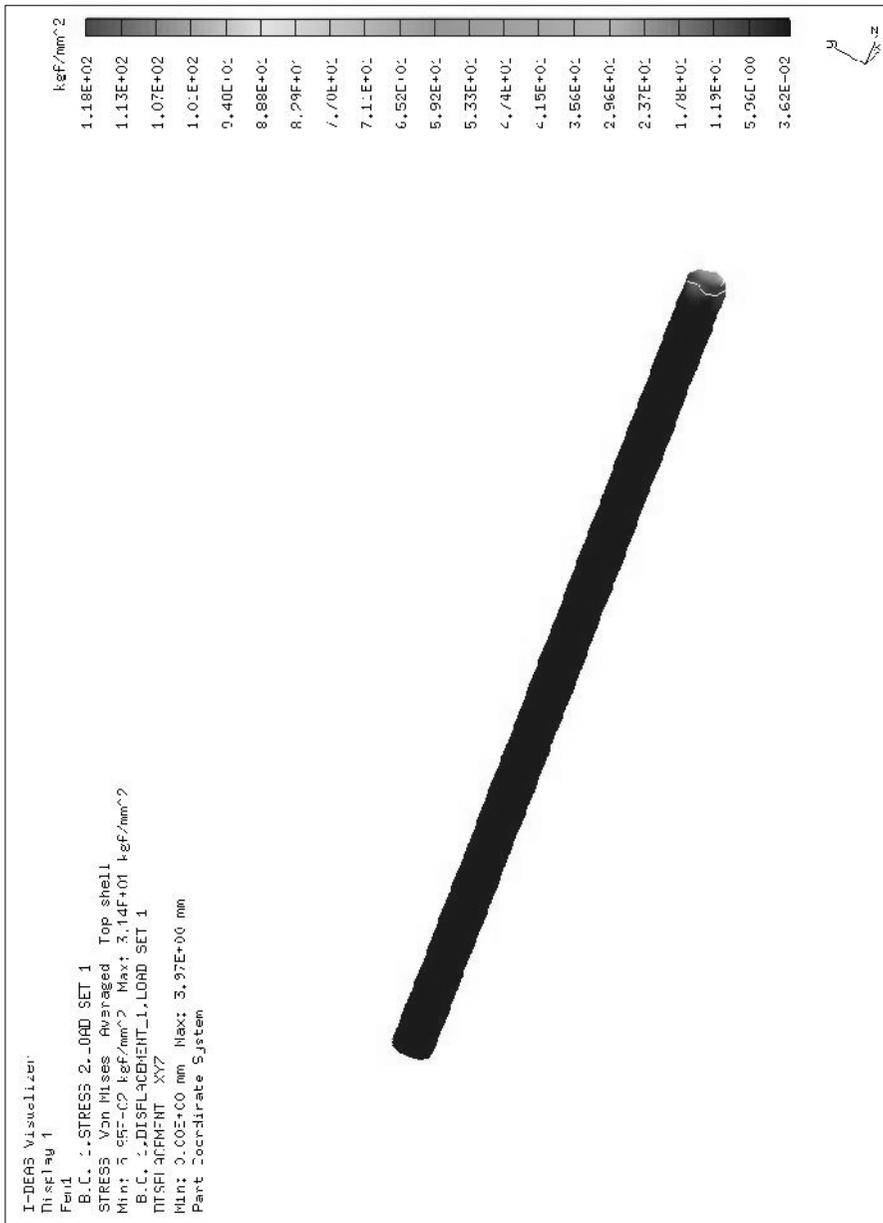


Fig. 10 Tensile result at load 7,000kg applied.

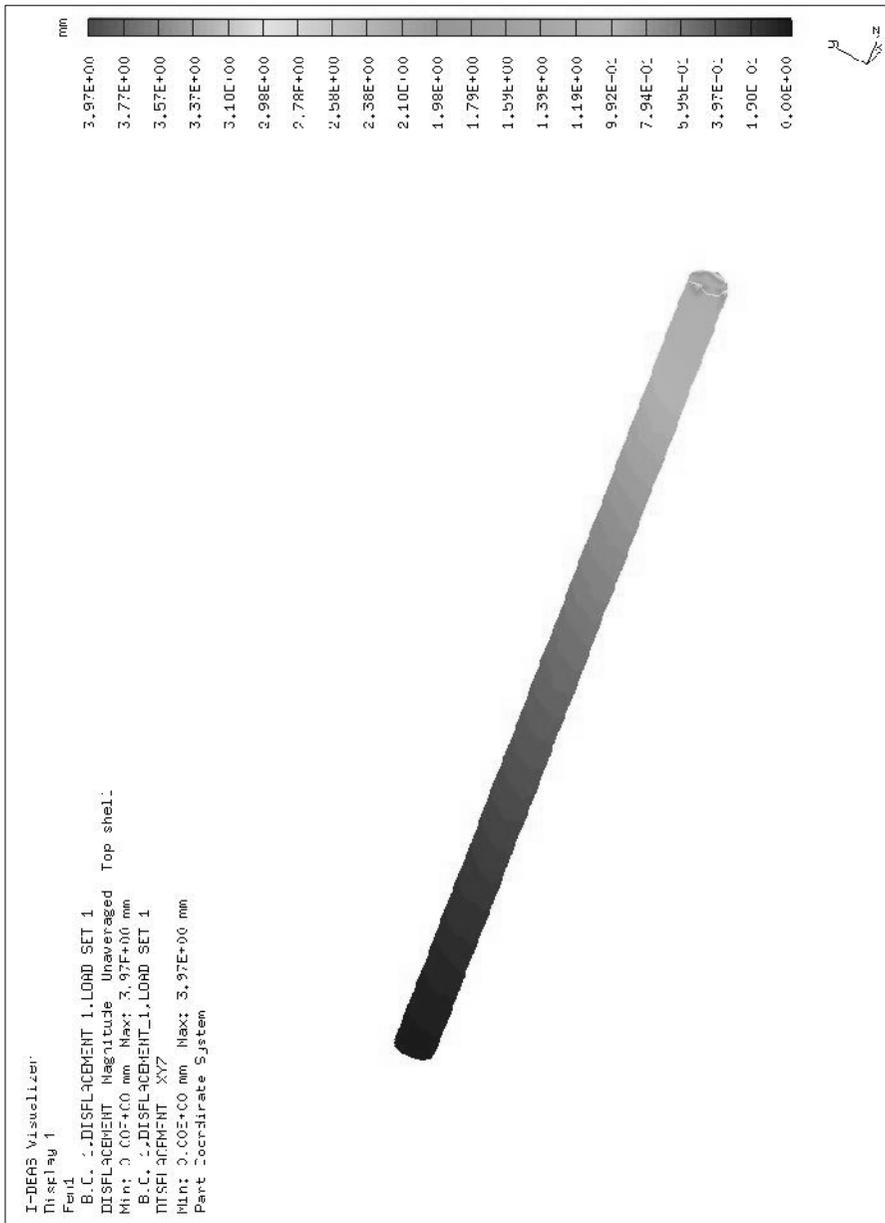


Fig. 11 Tensile result at load 7,000kg applied.

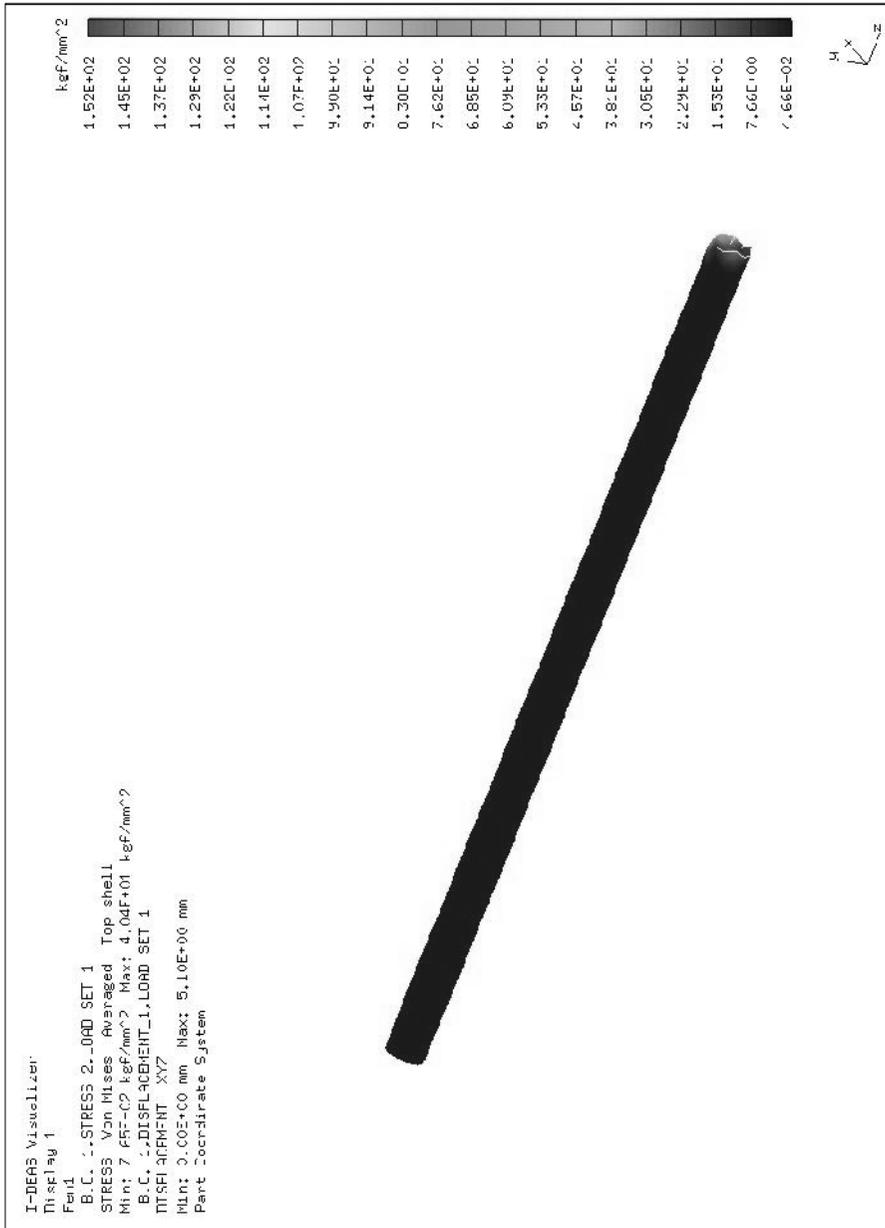


Fig. 12 Tensile result at load 9,000kg applied.

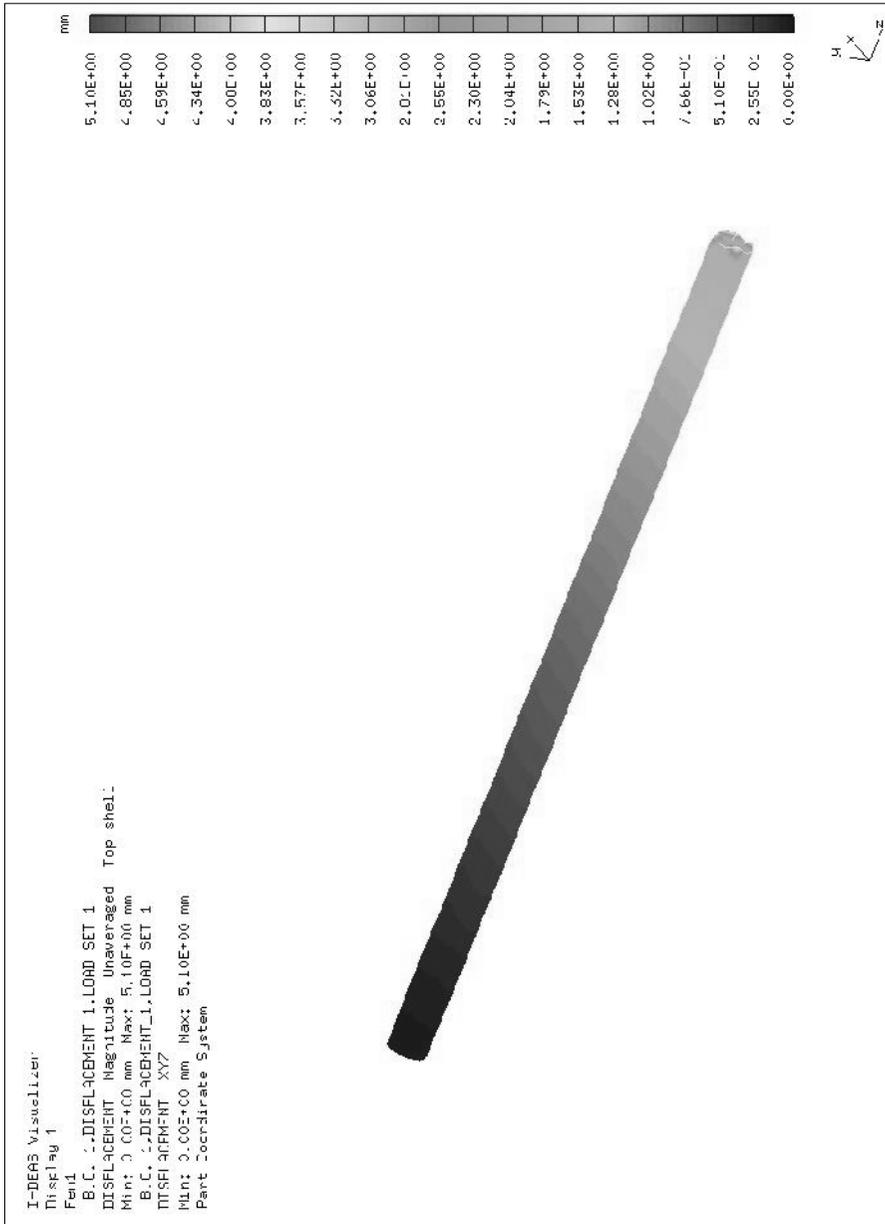


Fig. 13 Tensile result at load 9,000kg applied.

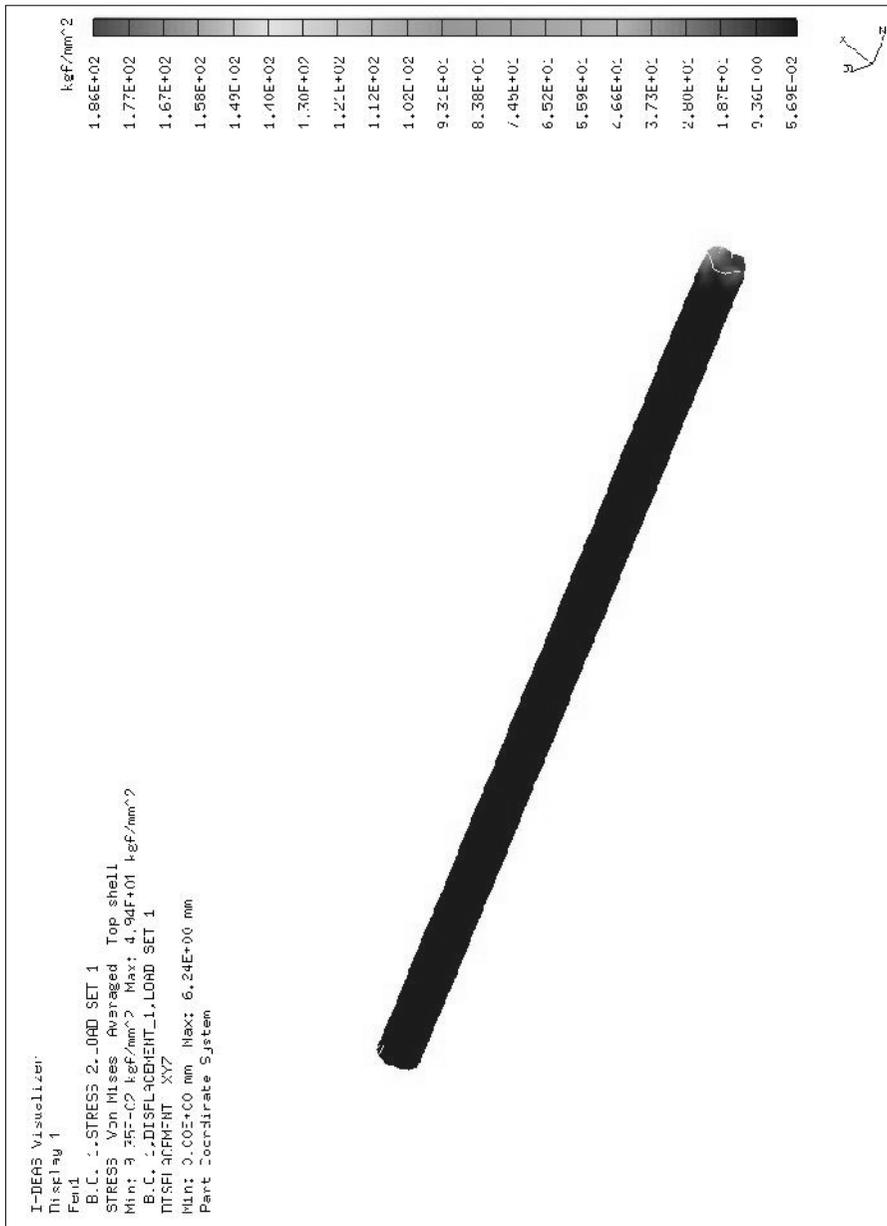


Fig. 14 Tensile result at load 11,000kg applied.

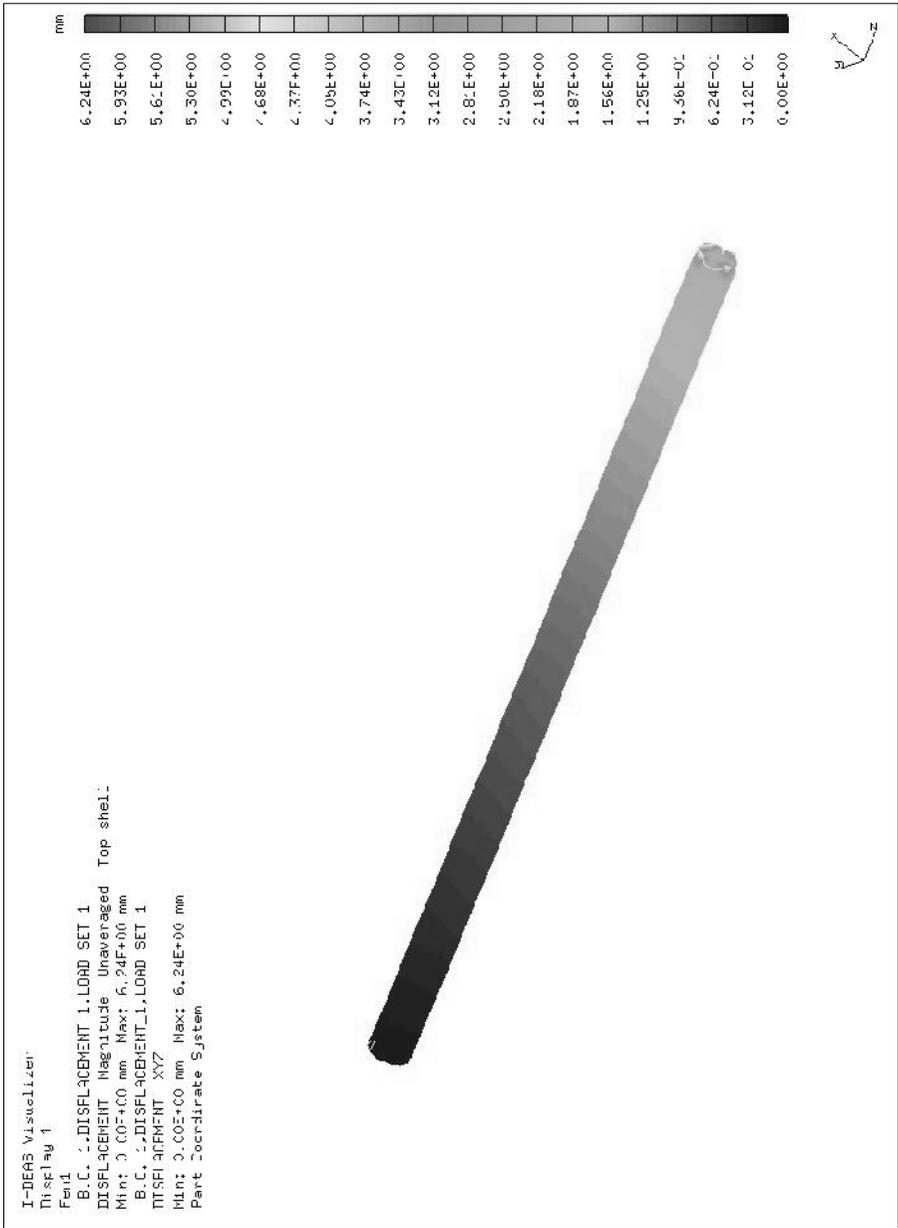


Fig. 15 Tensile result at load 11,000kg applied.

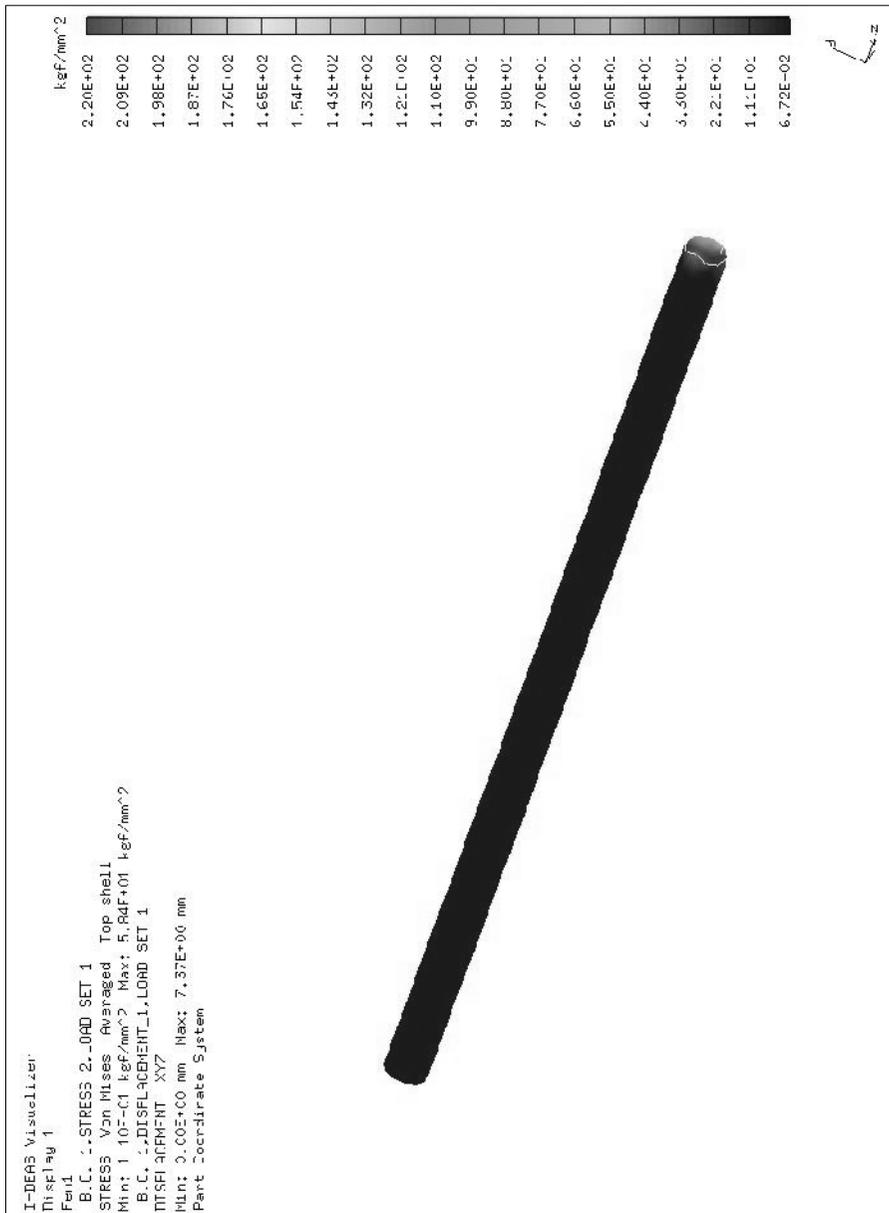


Fig. 16 Tensile result at load 13,000kg applied.

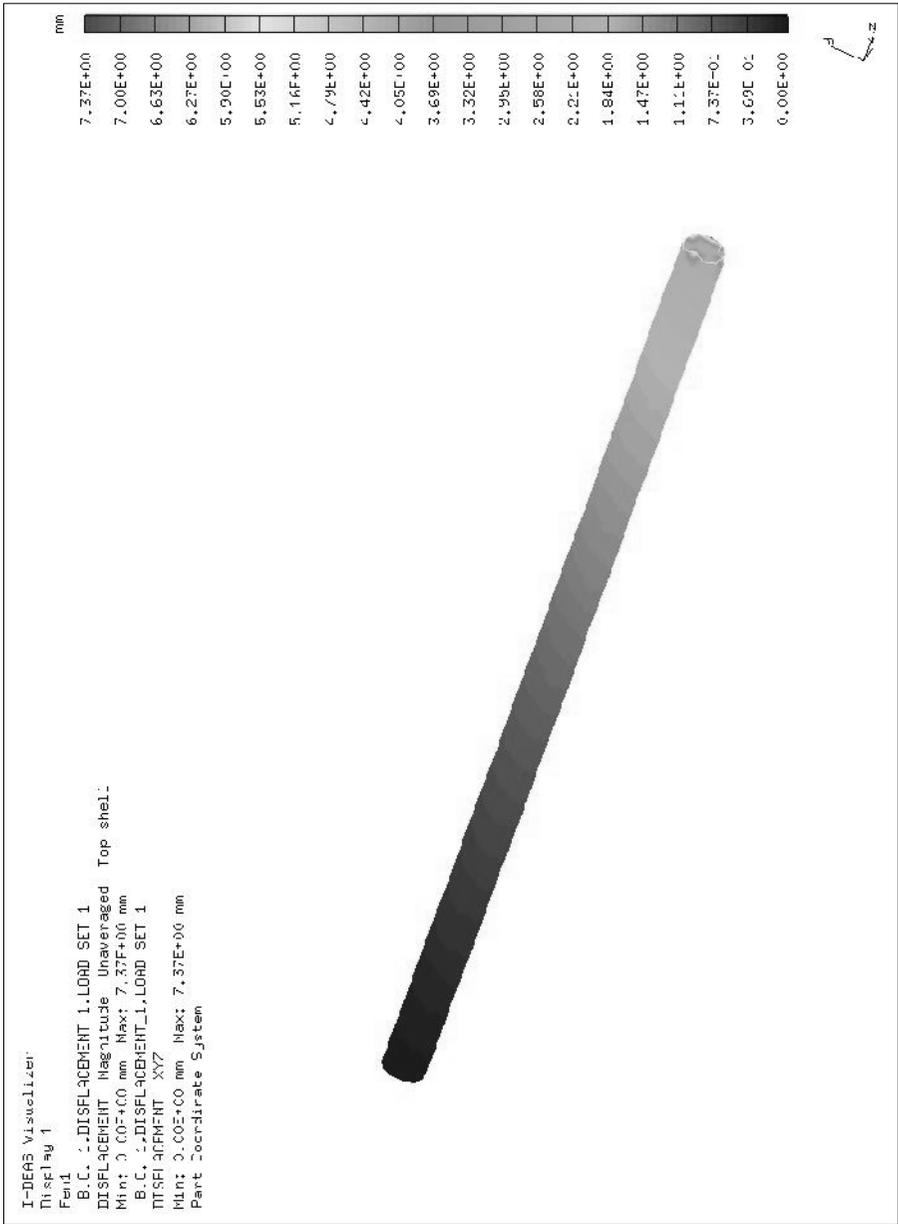


Fig. 17 Tensile result at load 13,000kg applied.

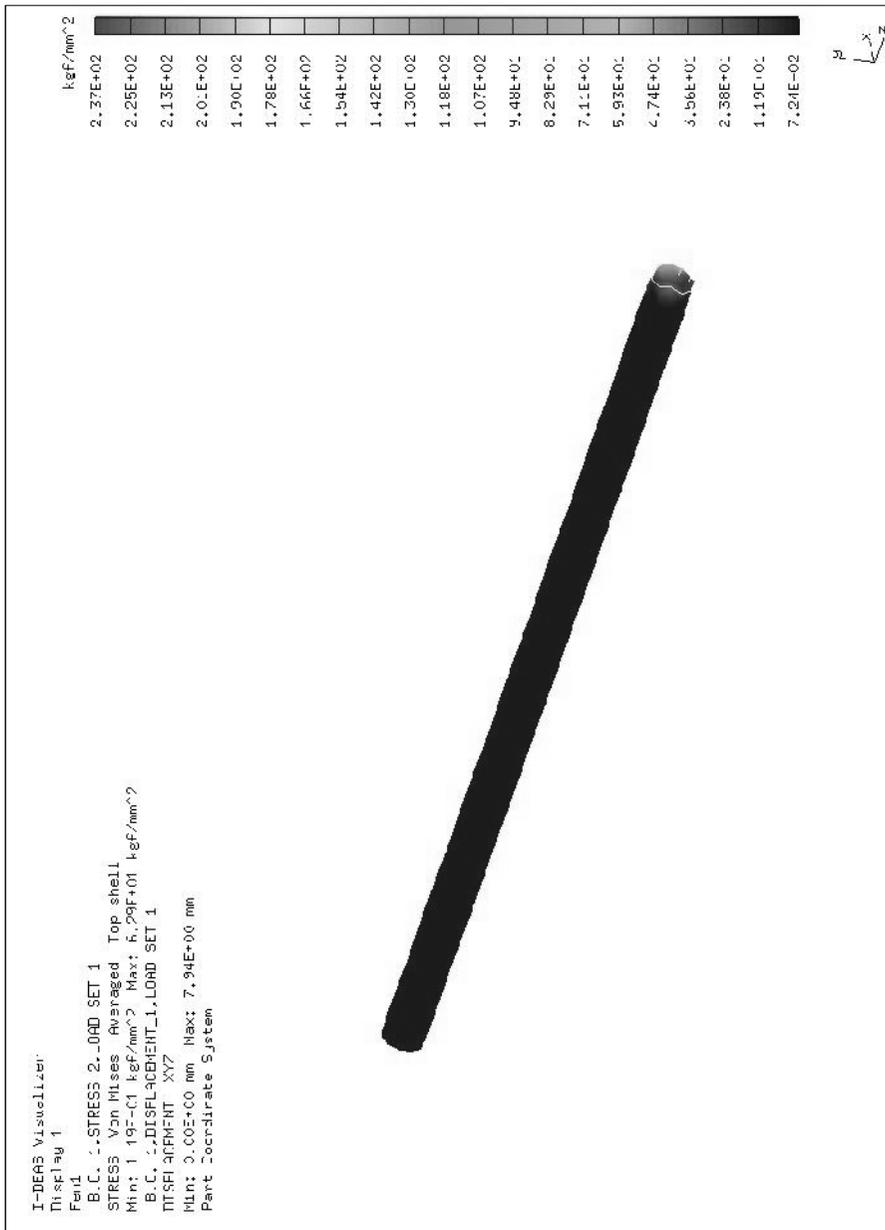


Fig. 18 Tensile result at load 14,000kg applied.

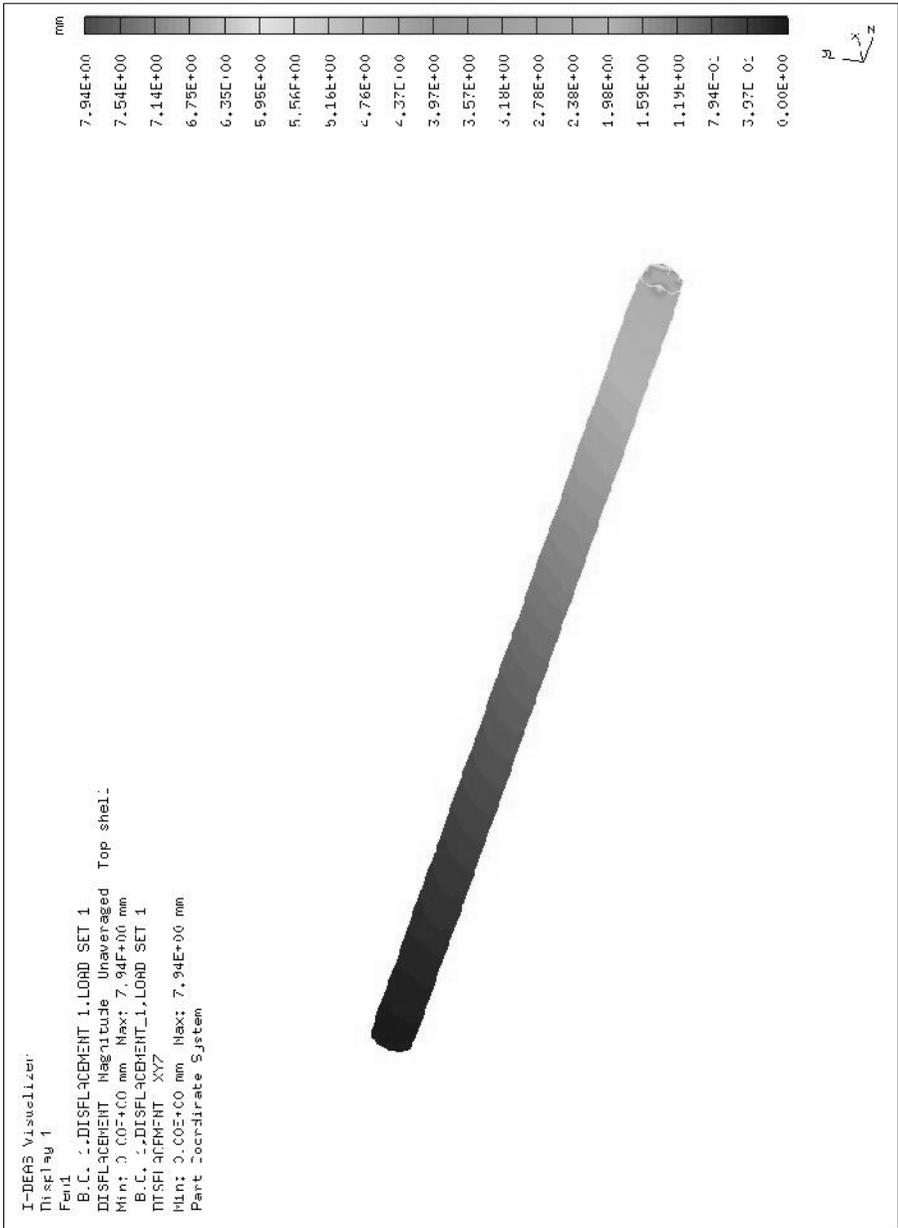


Fig. 19 Tensile result at load 14,000kg applied.

3.4 실험 시료 제작 공정

무결함 FRP 절연봉을 만드는 인발공정으로는 크게 함침공정, 프리포머공정, 경화공정, 견인공정, 마지막 단계인 절단작업으로 끝이 난다. 다음에 따르는 Table 8은 세부작업 공정순서 이다.

Table 8 Detailed working process

No.	Process	Detailed process	Remarks
1	Array glass roving to roving rack	Put glass roving on the rack	
2	Set up glass guide	Installation first, second glass guide	
3	Set up mold	Install mold on the mold die of pultrusion M/C	
4	Set up heater plate	Set up heater plate at upper & down of mold	Temperature control by three step
5	Set up resin bath	Set up resin bath front second glass guide	
6	Set up glass fiber	Set up glass roving through guide, resin bath, mold	
7	Mixing resin & supply	Mixing resin into resin bath	Resin:Hardener:Filler = 100 : 100 : 15
8	Pultrusion M/C working	Start pultrusion M/C	
9	Cutting process	Cut off pultruded product in settled size	

3.4.1 함침공정(Dipping process)

섬유가 함침조 내부를 통과하는 함침탱크(Dip Tank)방식을 주로 사용하고 있으며 함침탱크 방식의 특징은 섬유가닥을 많이 사용하여 대량으로 함침 시킬 때 유리하며 단, 섬유와 섬유사이에 기포가 함유될 수 있으므로 섬유가닥을 최대한 펴주면서 함침조를 통과시키면 수지 접촉면이 넓어져 함침성이 높아지며, 섬유의 인장력도 증가하여 제품의 물성이 좋아진다.

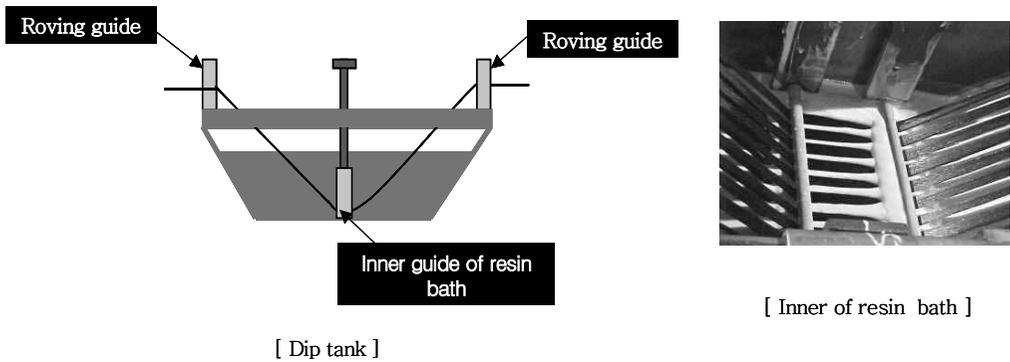


Fig. 20 Dipping prepress.

3.4.2 프리포머(Preformer)공정

수지가 함침된 로빙이 금형에 들어가기 전에 최종형상을 이루게 하는 공정으로 편심이 지지 않도록 가이드를 배치하여 보강재(섬유, 매트, 베일 등)을 조밀하게 배열하여 제품형상을 만들어간다.

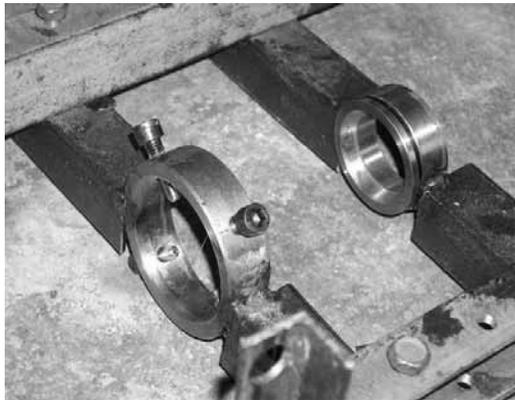


Fig. 21 Preformer guide.

3.4.3 경화공정

프리포머 공정을 거친 재료가 연속적으로 금형내부를 통과하면서 경화되는 공정이다. 금형은 상, 하 분리(분할)형과 일체형이 있으며 그 소재로는 S45C, KP4M으로 사용가능하며 내부는 경질크롬 도금을 시행했다. 금형 온도조절은 금형의 상, 하단부에 히터 판을 설치하여 3단계로 조절하였다.

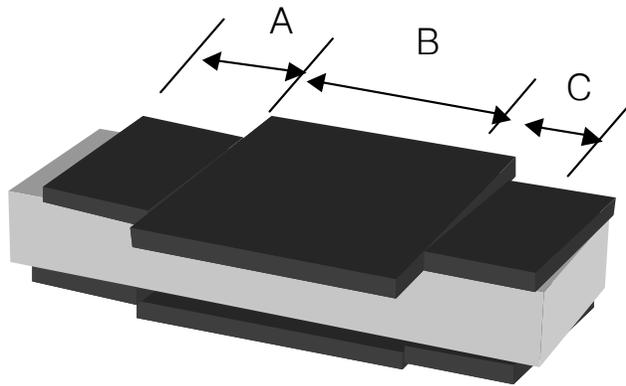


Fig. 22 Mold & heater plate.

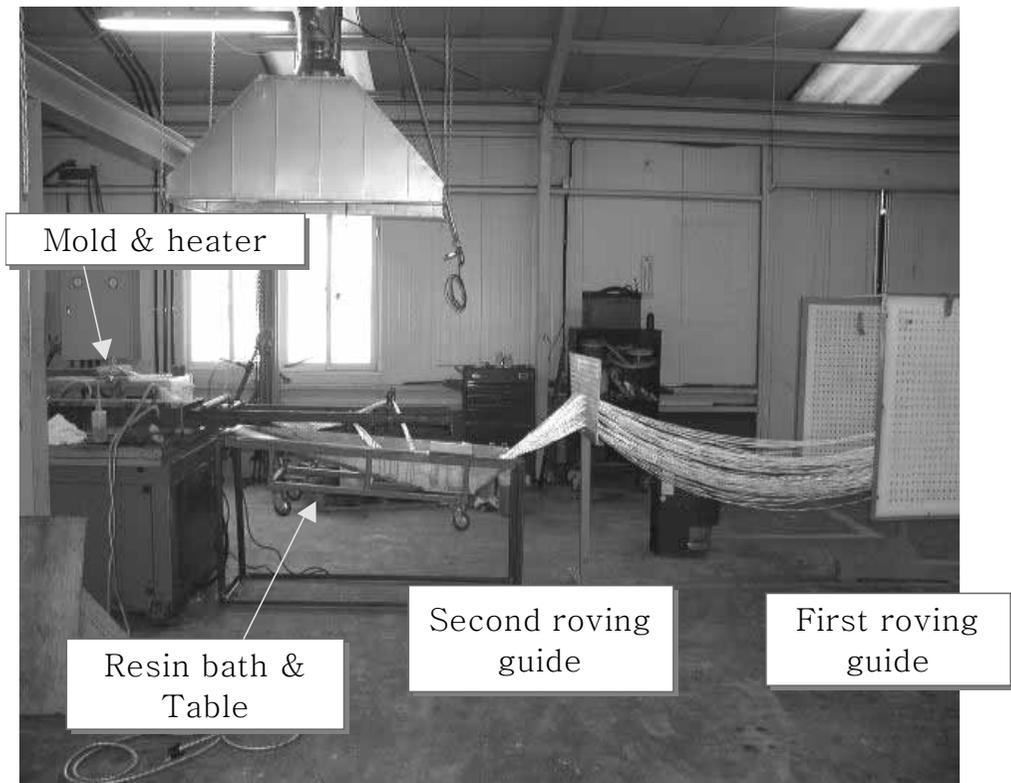


Fig. 23 Manufacturing system of FRP insulator rod.

3.4.4 견인공정(Pulling process)

금형으로부터 연속적으로 성형된 제품을 끌어당기는 공정이다.

1) 견인공정

견인공정에는 캐터필러(Caterpillar)식과 프레스(Press)식이 있다. 캐터필러 식은 무한 궤도식으로 연속적으로 회전하면서 견인하는 방식이고 프레스식은 프레스 형식의 견인기가 순차적으로 작동하면서 견인하는 방식이다.

2) 견인지그

제품 끌어당기는 지그는 미끄럼 없이 적당한 접촉압력을 지는 우레탄이나 고무를 사용하는 것이 좋으며 접촉압력은 최고 5.6kgf/cm^2 가 적당하다.

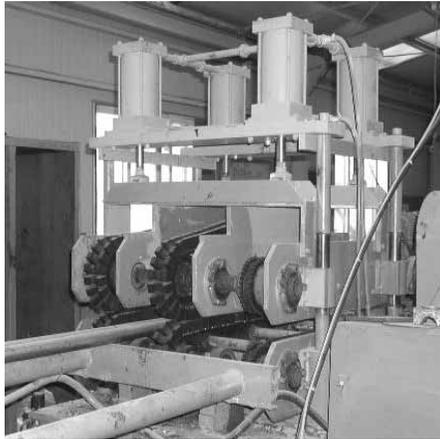


Fig. 24 Caterpillar type (left) & press type (right).

3.4.5 절단공정(Cutting process)

금형에서 성형이 이루어진 제품이 일정한 치수만큼 견인기에 의해 끌려오게 되면 절단기에 의해 자동절단 된다.

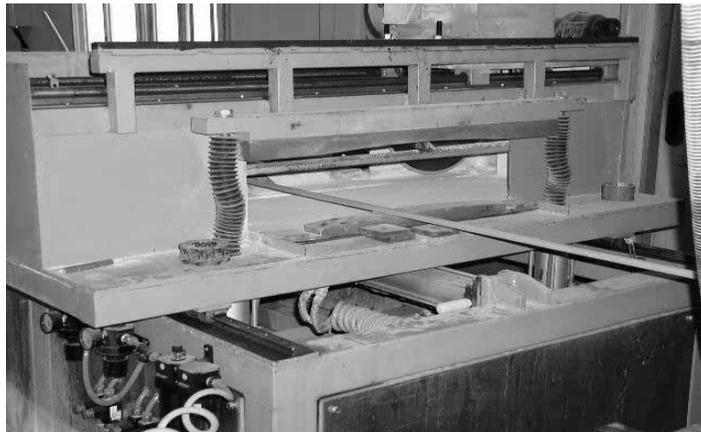


Fig. 25 Cutting machine.

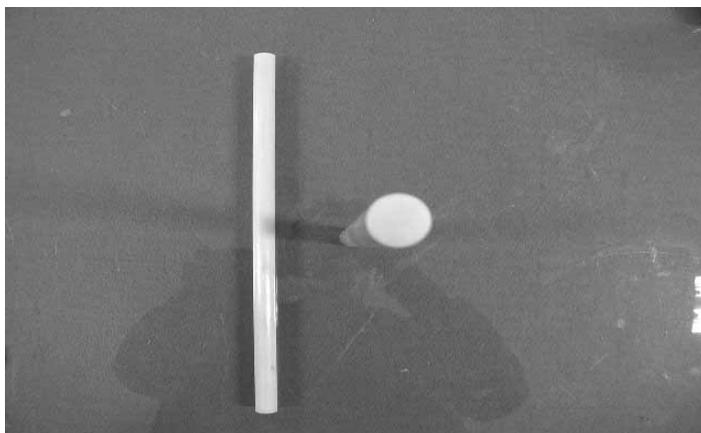


Fig. 26 Zero-defect FRP insulating rod.

제 4 장 실험결과 및 고찰

4.1 실험규격

무결함 FRP 절연봉의 시험내용을 설명하기에 앞서 무결함 FRP 절연봉에 대한 시험방법이 뚜렷이 명시되어져 있는 국제 및 국내규격은 아직은 없다.

지금부터 설명하는 시험내용은 무결함 FRP 절연봉이 사용되어지는 폴리머 현수애자의 공인된 시험규격 중 무결함 FRP 절연봉에 관련된 시험내용만을 발췌하여 시험한 결과이다.

특히 무결함 FRP 절연봉은 사출작업에서 수 ton의 사출압과 수백도의 열을 견뎌야 하므로 작업도중 절연봉 자체의 물성 변화가 일어날 수 있으므로 사출 전, 후의 시험결과를 비교 검토한 후 이상 유무를 검증하였다.

먼저 시험시료의 제작 조건은 생산 속도 차에 따라 총 5부분으로 나누었다. 생산 속도 차에 따른 무결함 FRP 절연봉의 특성 및 양산체제에서 가장 최적합상태를 파악하기 위하여 분당 생산속도를 100mm, 200mm, 300mm, 400mm, 500mm로 나누어 시료를 제작하였다. 분당 600mm까지 시료제작을 해보았으나 금형에서 나오는 순간 깨어짐 현상이 발생하여 시료 제작에는 실패하였다.

다음 Table 9는 무결함 FRP 절연봉의 기계적, 전기적 특성 시험항목이다. 무결함 FRP 절연봉은 전기 절연물인 동시에 전주 등에 설치되어 전선을 지탱시키는 지지물이기 때문에 기계적, 전기적 특성을 갖추어야 한다.

Table 9 Test specification of zero-defect FRP rod

<p>Mechanical characteristic</p>	<p>1.Reference to CEA LWIWG-01, 7.3 Tensile load test 2.Reference to CEA LWIWG-01, 5.3 Dye penetration test 3.Reference to CEA LWIWG-01, 5.8 Torsional load test 4.Reference to IEC 61109, 6.4 Mechanical load-time test 5.Reference to CEA LWING-01, 5.9 Thermal Mechanical test</p>
<p>Electrical characteristic</p>	<p>1.Reference to CEA LWIWG-01, 5.4 Water diffusion test 2.Reference to ANSI C 29.2, 8.2.1 Radio influence voltage test 3.Reference to CEA LWING-01, 5.1 Water penetration test 4. Reference to ANSI C 29.2, 8.2.3 Critical impulse flashover test</p>

4.2.기계적 특성 시험

4.2.1 인장파괴하중시험

(CEA LWIWG-01의 7.3항 Tensile load test)

인장파괴하중시험은 무결함 FRP 절연봉이 선로에 매달려 있을 때 실제 전선에 의해 받는 인장력 보다 가혹한 무한대의 힘을 가해 얼마의 인장력에서 FRP 절연봉이 파괴되는지를 확인하는 시험이다.

인장파괴하중 시험방법은 처음에 하중을 규정 하중치(7,000kg)의 75%까지 급격히 증가시킨 후 1분 동안에 규정 하중치의 최대 15%~최대 30%율로 증가시켜 파괴에 이를 때까지의 값을 알아보기 위한 실험이다.

모든 시료는 규정 하중치인 7,000kg 이하에서 기계적 손상 또는 파괴없이 규정된 인장하중에 도달해야 한다.



Fig. 27 Tensile fracture load test specimen.



Fig. 28 Tensile fracture load test
(Before injection).



Fig. 29 Tensile fracture load test
(After injection).

위의 시험과정을 통하여 분당 100mm, 200mm, 300mm, 400mm, 500mm의 5개 시료를 인장파괴하중시험을 실시한 결과는 Table 10과 같다.

5개 시료는 평균적으로 12,263kgf의 값에서 파괴가 일어났다. 하지만 실제 파괴가 일어난 것은 FRP 절연봉 자체가 파괴가 아니라 절연봉에 압착된 금구가 하중에 의해 이탈되어 나간 것이다.

그러므로 FRP 절연봉의 인장파괴력은 이 값을 넘어선다는 것으로 판명이 되고 규격서 요구치에 적합하다. 사출 후 인장파괴하중 시험을 실시한 결과는 사출 전의 값과 거의 차이가 나타나지 않았다.

Table 10. Tensile fracture load value of Zero-defect FRP insulating rod.

Test	100mm/min	200mm/min	300mm/min	400mm/min	500mm/min
Tensile fracture load value	12,284kgf	12,046kgf	12,459kgf	12,354kgf	12,176kgf

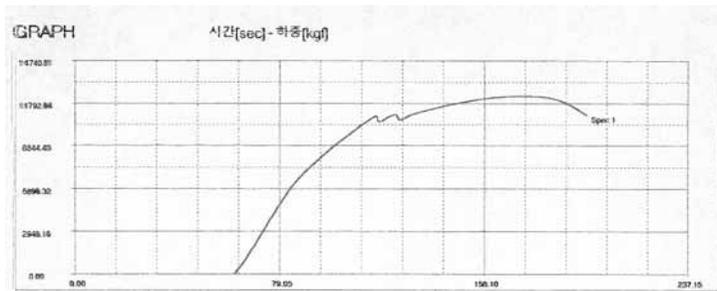


Fig. 30 100mm/min.

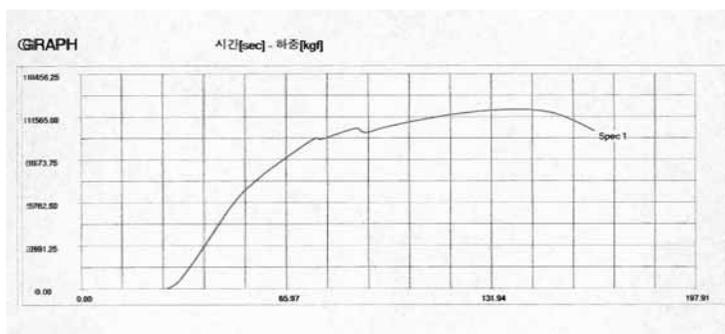


Fig. 31 200mm/min.

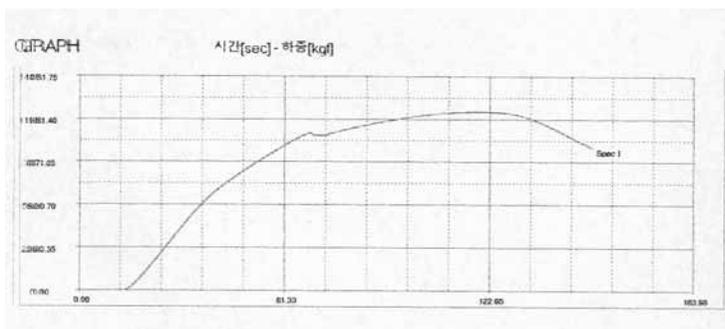


Fig. 32 300mm/min.

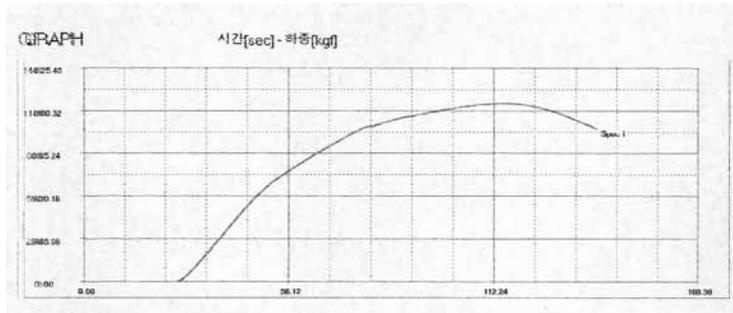


Fig. 33 400mm/min.

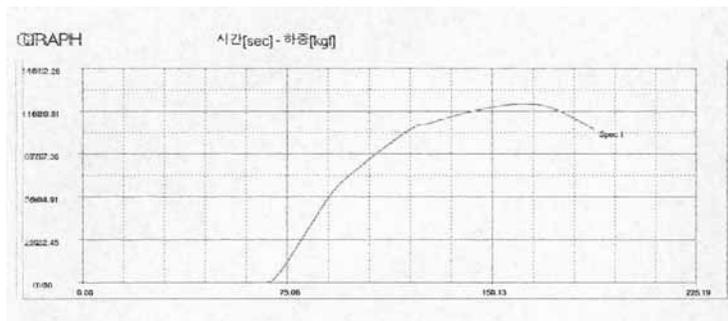


Fig. 34 500mm/min.

4.2.2 염색용액침투시험

(CEA LWIWG-01의 5.3항 Dye penetration test)

FRP 절연봉은 절연체이므로 봉 내부에 균열(Crack)이 발생하게 되면 그 사이를 통해 누설전류가 흐르거나 또는 인장력이 약화되어 불량이 발생하게 된다. 염색용액침투시험은 무결함 FRP 절연봉이 이러한 결점에 의한 이상유무가 있는지를 판단하기 위한 시험이다.

FRP 절연봉을 $10\pm 0.5\text{mm}$ 로 자르고 연마한 후 용기에 지름이 1~2mm의 유리구슬을 깔고 그 위에 시료를 놓고 1%의 흑신용액(메탄올)을 구슬의 2~3mm까지 붓고 15분간 방치한 후 반으로 잘라 흑신용액이 침투하였는지 확인하는 시험이다.

반으로 잘려진 FRP 절연봉 사이 붉은색을 띠는 흑신용액이 침투하지 않았으면 양품이다.

분당 100mm, 200mm, 300mm, 400mm, 500mm의 시료를 염색용액침투시험 한 결과 모두 흑신용액이 침투하지 않는 제품으로 판명이 났다. 그리고 사출 후 위와 같은 규격으로 자른 후 염색용액침투시험을 실시한 결과 모두 양호한 상태로 판명이 났다.

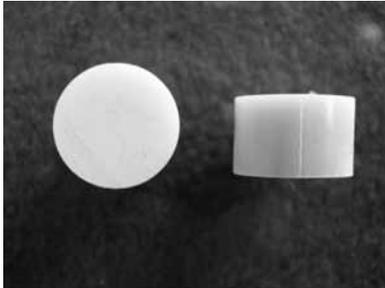


Fig. 35 Zero-defect FRP rod (10mm).



Fig. 36 Dye penetration test.



Fig. 37 Passed product.

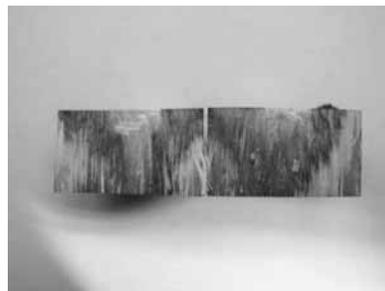


Fig. 38 Failed product.

< 염색용액침투 시험 >

mm/min \ 결단부위	CREVIS	CENTER	EYE
100 mm/min			
200 mm/min			
300 mm/min			
400 mm/min			
500 mm/min			

Fig. 39 Dye penetration test result
(Before injection).

< 염색용액침투시험 >

시료	시료
100mm/min	
200mm/min	
300mm/min	
400mm/min	
500mm/min	

Fig. 40 Dye penetration test result
(After injection).

4.2.3 비틀림내하중시험

(CEA LWIWG-01의 5.8항 Torsional load test)

무결점 FRP 절연봉은 실제 선로 상에서는 인장하중뿐만 아니라 비틀림 하중도 받게 된다. 비틀림 하중을 받은 FRP 절연봉은 절연봉 내에 경화되어있는 수지와 유리섬유조직이 하중에 의해 갈라짐이 발생하게 되어 절연과괴현상이 일어나거나 인장력 또한 약해질 수 있다. 이를 확인하기 위해 일정한 비틀림 하중을 가한 후 염색용액침투시험을 하여 균열(Crack)이 발생하였는지 이상 유무를 확인하기 위한 시험이다.

토크렌치와 간이 지그를 이용하여 5,530kgf*mm(40lb*ft)의 비틀림 하중을 1분간 인가 후 염색용액침투시험을 실시한다.

규정치의 하중을 인가시킨 후 염색용액침투시험 하여 FRP 절연봉 내에 흑신용액의 침투가 없어야 한다.

분당 100mm, 200mm, 300mm, 400mm, 500mm의 시료에 5,530kgf*mm (40lb*ft)의 비틀림 하중을 1분간 인가 후 염색용액침투시험한 결과 모두 흑신용액이 침투하지 않는 제품으로 판명이 났다.

사출 후 비틀림내하중시험을 실시한 결과는 그 이전 즉, 사출전의 결과와 차이는 없었다.



Fig. 41 Torsion test.

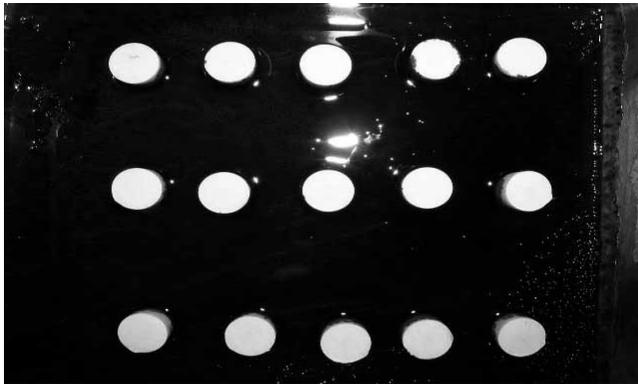


Fig. 42 Dye penetration test.

< 비틀림 시험 후 염색용액침투 시험 >

mm/min \ 구간부위	CREVIS	CENTER	EYE
100 mm/min			
200 mm/min			
300 mm/min			
400 mm/min			
500 mm/min			

Fig. 43 Test result (Before injection).

< 비틀림시험후 염색용액침투시험 >

mm/min	시료
100mm/min	
200mm/min	
300mm/min	
400mm/min	
500mm/min	

Fig. 44 Test result (After injection).

4.2.4 기계적 하중-시간시험

(IEC 61109의 6.4항 Mechanical load-time test)

4.2.1에서 보여준 인장파괴하중시험은 무결함 FRP 절연봉이 무한대의 힘을 가해 완전히 파괴될 때까지의 인장력을 보았다면 이 시험은 실 선로에서 애자가 받는 하중과 거의 비슷하게 하중을 가하여 4일간 시험기에 매달아 시험이 끝난 후 FRP 절연봉의 이상 유무를 파악하는 것이다.

시험 실패에 7,000 kgf(규정하중치) x 0.7인 4,900 kgf 하중을 96시간 인가한 후 규정하중치인 7,000 kgf 인가시킨다.

시험 후 코어의 파괴, 빠짐 또는 금구의 파괴가 일어나지 않아야 하며 염색용액침투시험을 실시하여 이상이 없어야 한다.

분당 100mm, 200mm, 300mm, 400mm, 500mm의 시료에 4,900kgf 하중을 96시간 인가한 후 규정하중치인 7,000 kgf 인가시킨 후 코어의 파괴, 빠짐 또는 금구의 파괴가 일어나지 않았으며 염색용액침투 시험한 결과 모두 흑신용액이 침투하지 않는 제품으로 판명이 났다. 사출 후 기계적 하중-시간시험을 실시한 결과는 그 이전 즉, 사출 전의 결과와 차이는 없었다.



Fig. 45 Mechanical load-time test machine.



Fig. 46 Test of Zero-defect FRP rod.

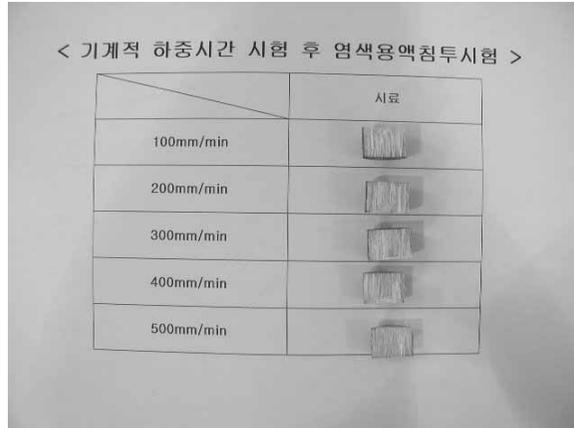


Fig. 47 Test result
(Before injection).

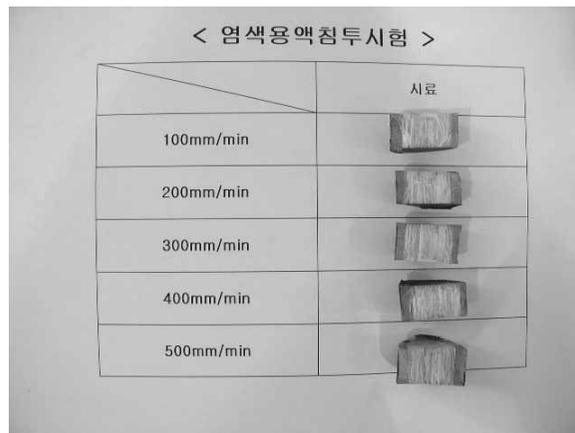


Fig. 48 Test result
(After injection).

4.2.5 경년변화시험

(CEA LWIWG-01의 5.9항 Thermal Mechanical test)

애자와 같은 구조물은 온난기후에서 뿐만 아니라 열대기후나 냉대기후에서도 사용되어지는데 이상이 없어야 한다. 경년변화시험은 이러한 여러 가지 기후 조건에서도 이상 없이 사용할 수 있는지 여부를 검토하기 위한 시험이다.

규정 인장 하중치의 50% (3,500 kgf) 이상을 인가한 상태에서 시료의 주위 온도를 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 5\text{ k}$ 에서 $60\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 5\text{ k}$ 로 변화시키며 24 시간을 1 Cycle로 각 온도에서 8 시간씩 유지시킨다. 시험은 4 Cycle (96 시간) 시행한다.

실험 전에 비해 실험 후의 길이 증가분이 2mm 이하여야 하고 염색용액침투시험에서 염료의 침투가 없어야한다. 실험 후 시료의 길이 증가분은 다음 Table 11과 같다.

96시간 경년변화시험 후 길이 증가분은 5개 시료 모두 2mm 이하의 증가분을 나타내었고 평균 0.372mm 증가하였다. 사출 후 폴리머 현수애자로 위와 같은 시험을 행한 결과도 모두 2mm이하의 증가분을 나타내었다.

염색용액침투시험 FRP 절연봉과 폴리머현수애자 분당 100mm, 200mm, 300mm, 400mm, 500mm의 시료 모두 염색용액침투 시험에서 양호한 결과가 나왔다.



Fig. 49 Thermal Mechanical test machine.



Fig. 50 Inner of test machine.

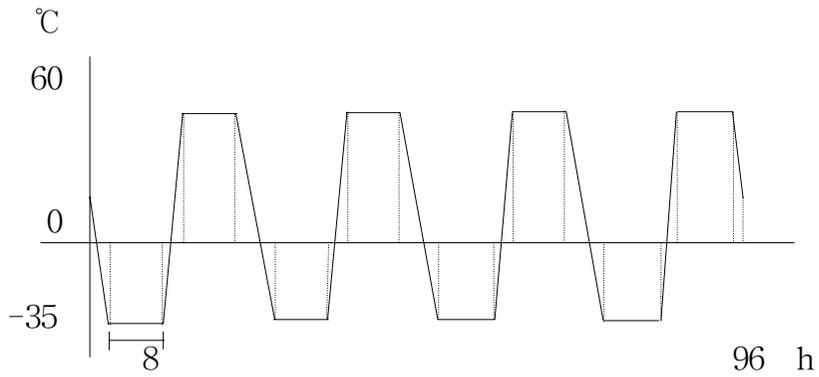


Fig.51 Temperature & time program of Thermal Mechanical test.

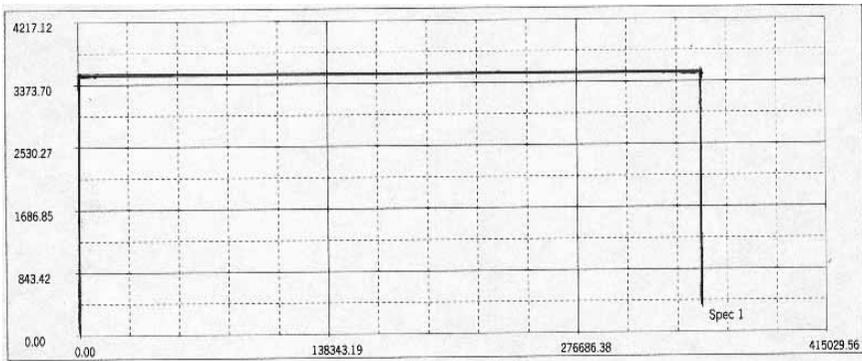


Fig. 52 Tensile load 3500kg is applied for 96hour.

Table 11 Increase length after thermal mechanical test of Zero-defect FRP rod.

Division	100mm	200mm	300mm	400mm	500mm
Before test	274.25	274.89	274.11	274.39	274.78
After test	274.50	275.01	274.68	274.88	275.21

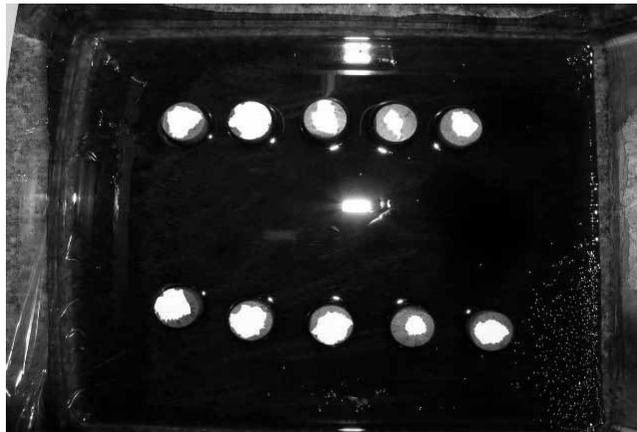


Fig. 53 Dye penetration test of after thermal mechanical test.

< 염색용액침투 시험 >

mm/min \ 결단부위	CREVIS	CENTER	EYE
100 mm/min			
200 mm/min			
300 mm/min			
400 mm/min			
500 mm/min			

Fig. 54 Result of after Dye penetration test.

4.3 전기적 특성시험

4.3.1 수분확산시험

(CEA LWIWG-01의 5.4항 Water diffusion test)

가혹한 환경조건을 거친 후에도 FRP 절연봉의 절연특성이 유지되는지 여부를 확인하기 위한 시험이다.

FRP 절연봉을 30 ± 0.5 mm로 자르고 연마한 후 세척하여 0.1%의 NaCl용액에서 100°C , 100 ± 0.5 시간동안 water bath에 끓인 다음 세척 및 건조시켜 시료를 전극 사이에 넣고 누설전류시험기로 1분간 AC 12 kV를 인가시켜 섬락이나 절연파괴가 일어나지 않아야 한다.

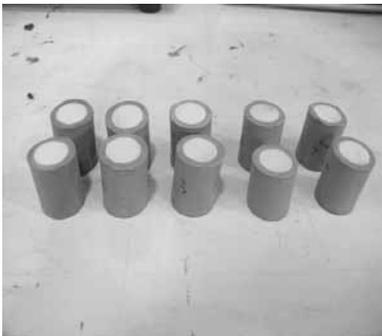
실험 결과는 분당 100mm, 200mm, 300mm, 400mm, 500mm의 시료 모두 AC 12kV/1분간 인가시켰으나 섬락이나 절연파괴는 일어나지 않았다. 그리고 사출을 한 후에 각각 30mm를 자른 후 위의 시험방법과 같이 행하였으나 섬락이나 절연파괴는 일어나지 않았다.



**Fig. 55 Boiled specimen
(Before injection).**



Fig. 56 Water diffusion test.



**Fig. 57 Boiled specimen
(After injection).**

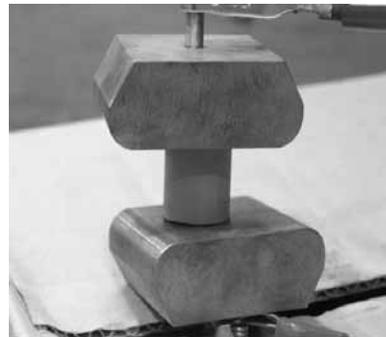


Fig. 58 Water diffusion test.

4.3.2 상용주파건조섬락시험

(ANSIC 2 9.2 의 8.2.1 Radio influence voltage test)

상용주파건조섬락시험은 무결함 FRP 절연봉의 절연내력을 파악하기 위한 시험이다.

규격서 (ANSIC 2 9.2 의 8.2.1 Radio influence voltage test)에 따르면 폴리머현수애자(B호기준)는 절연내력 130kV 기준치의 95%이상을 합격기준으로 본다.

하지만 무결함 FRP 절연봉은 누설거리를 길게 해주어 절연내력을 높이는 형상으로 된 폴리머하우징이 없는 상태이므로 규격에 나오는 합격 기준치에는 이르지 못하는 것이다.

그러므로 1차로 무결함 FRP 절연봉만으로 시험 후 2차로는 무결함 FRP 절연봉에 고무 사출한 폴리머 현수애자를 가지고 시험을 하여 비교 분석해보았다.

각각의 시료를 5회 이상 섬락 시켜 섬락전압 평균치를 구하며, 전압의 인가는 예상섬락 전압치의 75%까지 적당히 상승시키고 그 후는 매초 섬락 전압치의 약 2%의 상승률로 상승시켜 섬락시킨다. 절연파괴가 130kV의 기준치의 95% 이상에서 이루어지면 합격판정 된다. 시험결과는 Table 12,13에 따른다.

Table 12와 같이 시험결과는 앞서 개요에서 예상하였듯이 합격기준인 95%에 이르지 못한 평균 86%에 이르렀다. 하지만 고무사출을 한 폴리머 현수애자의 상용주파건조섬락 시험에서는 합격기준치인 절연파괴가 130kV의 기준치인 95% 이상 즉, 100.2%에서 이루어졌다. Table 13에서 잘 보여준다. 이 결과를 검토해 보면 무결함 FRP 절연봉은 상용주파건조섬락에서도 요구치에 적합하다고 본다.

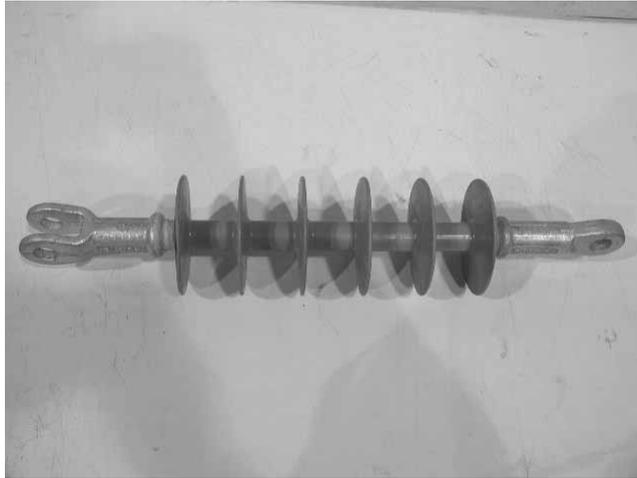


Fig. 59 Polymer dead-end insulator (Type B).



Fig. 60 Zero-defect FRP insulating rod.



Fig. 61 Radio influence voltage test machine.



Fig. 62 Radio influence voltage test
(Before injection).



Fig. 63 Radio influence voltage test (After injection).

Table 12. Radio influence voltage test result of Zero-defect FRP rod (Before injection).

mm/min \ Times	1	2	3	4	5	average(kV)
100	117	112	113	109	107	112(86%)
200	116	114	115	116	116	115(88%)
300	115	112	110	113	112	112(86%)
400	114	112	110	110	112	112(86%)
500	108	110	110	111	109	110(85%)

Table 13. Radio influence voltage test result of Zero-defect FRP rod (After injection).

mm/min \ Times	1	2	3	4	5	average(kV)
100	132	128	133	132	132	131(101%)
200	128	126	128	122	127	126(97%)
300	132	132	135	132	135	133(102%)
400	127	127	128	130	133	129(99%)
500	133	133	133	135	132	133(102%)

4.3.3 수분침투시험

(CEA LWIWG - 01의 5.1항 Water penetration test)

수분침투시험은 끓임을 한 후 상용주파건조섬락과 상용주파내전압 시험을 하여 끓임 전, 후에 무결점 FRP 절연봉의 특성변화를 알아 보는 것이다.

0.1%의 NaCl 용액에서 100 ± 0.5 시간 끓인 다음 세척 및 건조시킨다. 그런 다음 상용주파건조섬락시험 과 동시에 상용주파내전압시험을 한다. 상용주파건조섬락시험은 4.3.2의 방식대로 하며 상용주파내전압시험은 끓임 전 상용주파 건조섬락전압 평균치의 80%의 전압을 30 분 인가시킨다.

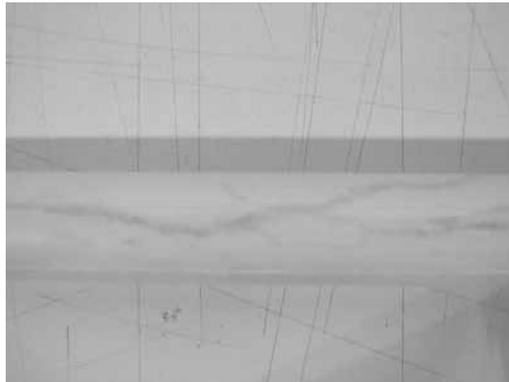
상용주파건조섬락시험은 섬락전압 평균치는 끓임 전의 섬락전압 평균치의 90% 이상이어야 하고 상용주파내전압시험은 절연파괴가 일어나지 않아야 한다.

Table 14의 결과에 나타나듯이 끓임 전과 비교해서 상용주파건조섬락전압치는 평균 98.6%를 나타내며 요구치에 해당하는 결과를 가져왔다. Table 15는 폴리머현수애자의 끓임 후 상용주파건조섬락시험을 한 결과 평균 95.6%로 양호한 결과가 나왔다.

그리고 상용주파건조섬락전압치의 80%(평균 90kV)의 전압을 30분 간 인가시키는 내전압시험에서는 FRP 절연봉과 폴리머현수애자 5개 시료 모두 절연파괴가 일어나지 않았다.



Fig. 64 Boiled specimen.



**Fig. 65 Leak current test
when flash.**

Table 14. Radio influence voltage test result of Zero-defect FRP rod (Before injection & boiled).

mm/min \ Times	1	2	3	4	5	average(kV)
100	110	112	113	111	107	110.6(99%)
200	115	110	115	110	112	112.4(98%)
300	113	112	109	112	114	112 (100%)
400	112	110	108	110	107	109.8(98%)
500	106	105	110	111	106	107.6(98%)

Table 15. Radio influence voltage test result of Zero-defect FRP rod (After injection & boiled).

mm/min \ Times	1	2	3	4	5	average(kV)
100	122	127	128	128	124	125.8(96%)
200	126	125	125	124	126	125.2(99%)
300	124	124	123	123	125	123.8(93%)
400	125	121	126	126	124	124.4(96%)
500	125	127	123	123	125	124.6(94%)

4.3.4 뇌충격시험

(ANSI C 29.2의 8.2.3 Critical impulse flashover test)

애자와 같이 전기선로에 매달려 있는 절연물은 순간적인 이상전압에 의해 파괴되는 현상이 벌어질 수 있다. 이러한 FRP 절연봉은 순간적인 이상전압에서도 견딜 수 있는 내구성을 갖추고 있어야 한다.

여기서는 먼저 FRP 절연봉 시료로 먼저 시험한 후 고무 사출한 폴리머 현수애자를 시험하여 비교 분석하였다.

시험방법은 뇌충격시험기를 이용하여 정, 부극성 1.2 x 50 μ s의 충격전압을 인가하여 50% 섬락 전압치를 구한다. 뇌충격 섬락전압은 정극성 190 kV, 부극성 230kV 92%(정극성 174.8kV, 부극성 211.6kV)이상이어야 한다.

상기의 실험방법에 따라 무결함 FRP 절연봉을 뇌충격시험한 결과 정극성은 5개 모두 190kV의 92% 이상의 값이 나왔으나 부극성은 100mm/min, 200mm/min 외 나머지만 230kV의 92% 이상의 값이 나왔다.

다음 Table 16은 FRP 절연봉 뇌충격시험 결과값이다.

Table 16. Critical impulse flashover test result (Before injection).

Polarity \ Specimen	100 mm/min	200 mm/min	300 mm/min	400 mm/min	500 mm/min
Positive	176kV	184kV	192kV	180kV	196kV
Negative	196kV	204kV	216kV	216kV	212kV



Fig. 66 Critical impulse flashover test machine.



Fig. 67 Critical impulse flashover test.

결과는 아래의 Fig.으로 나타난다.

Fig. 68은 100mm/min으로 제작한 FRP 절연봉이 정극성 176kV, 1.2 x 50 μ s의 충격전압에서 절연이 파괴되지 않음을 나타낸다.

Fig. 69는 100mm/min으로 제작한 FRP 절연봉이 정극성 177kV, 1.2 x 50 μ s의 충격전압에서 절연이 파괴되었음을 나타낸다.

Fig. 70은 100mm/min으로 제작한 FRP 절연봉이 부극성 196kV, 1.2 x 50 μ s의 충격전압에서 절연이 파괴되지 않음을 나타낸다.

Fig. 71은 100mm/min으로 제작한 FRP 절연봉이 부극성 197kV, 1.2 x 50 μ s의 충격전압에서 절연이 파괴되었음을 나타낸다.

Fig. 72는 200mm/min으로 제작한 FRP 절연봉이 정극성 184kV, 1.2 x 50 μ s의 충격전압에서 절연이 파괴되지 않음을 나타낸다.

Fig. 73은 200mm/min으로 제작한 FRP 절연봉이 정극성 185kV, 1.2 x 50 μ s의 충격전압에서 절연이 파괴되었음을 나타낸다.

Fig. 74는 200mm/min으로 제작한 FRP 절연봉이 부극성 204kV, 1.2 x 50 μ s의 충격전압에서 절연이 파괴되지 않음을 나타낸다.

Fig. 75는 200mm/min으로 제작한 FRP 절연봉이 부극성 205kV, 1.2 x 50 μ s의 충격전압에서 절연이 파괴되었음을 나타낸다.

Fig. 76은 300mm/min으로 제작한 FRP 절연봉이 정극성 192kV, 1.2 x 50 μ s의 충격전압에서 절연이 파괴되지 않음을 나타낸다.

Fig. 77은 300mm/min으로 제작한 FRP 절연봉이 정극성 193kV, 1.2 x 50 μ s의 충격전압에서 절연이 파괴되었음을 나타낸다.

Fig. 78은 300mm/min으로 제작한 FRP 절연봉이 부극성 216kV, 1.2 x 50 μ s의 충격전압에서 절연이 파괴되지 않음을 나타낸다.

Fig. 79는 300mm/min으로 제작한 FRP 절연봉이 부극성 217kV, 1.2 x 50 μ s의 충격전압에서 절연이 파괴되었음을 나타낸다.

Fig. 80은 400mm/min으로 제작한 FRP 절연봉이 정극성 180kV, 1.2 x 50 μ s의 충격전압에서 절연이 파괴되지 않음을 나타낸다.

Fig. 81은 400mm/min으로 제작한 FRP 절연봉이 정극성 181kV, 1.2 x 50 μ s의 충격전압에서 절연이 파괴되었음을 나타낸다.

Fig. 82는 400mm/min으로 제작한 FRP 절연봉이 부극성 216kV, 1.2 x 50 μ s의 충격전압에서 절연이 파괴되지 않음을 나타낸다.

Fig. 83은 400mm/min으로 제작한 FRP 절연봉이 부극성 217kV, 1.2 x 50 μ s의 충격전압에서 절연이 파괴되었음을 나타낸다.

Fig. 84는 500mm/min으로 제작한 FRP 절연봉이 정극성 196kV, 1.2 x 50 μ s의 충격전압에서 절연이 파괴되지 않음을 나타낸다.

Fig. 85는 500mm/min으로 제작한 FRP 절연봉이 정극성 197kV, 1.2 x 50 μ s의 충격전압에서 절연이 파괴되었음을 나타낸다.

Fig. 86은 500mm/min으로 제작한 FRP 절연봉이 부극성 212kV, 1.2 x 50 μ s의 충격전압에서 절연이 파괴되지 않음을 나타낸다.

Fig. 87은 500mm/min으로 제작한 FRP 절연봉이 부극성 213kV, 1.2 x 50 μ s의 충격전압에서 절연이 파괴되었음을 나타낸다.

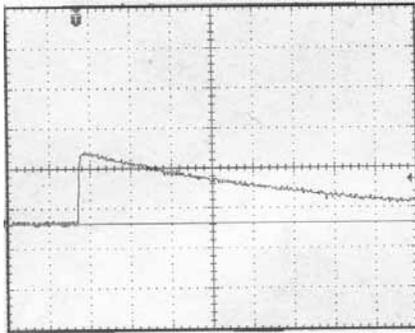


Fig. 68

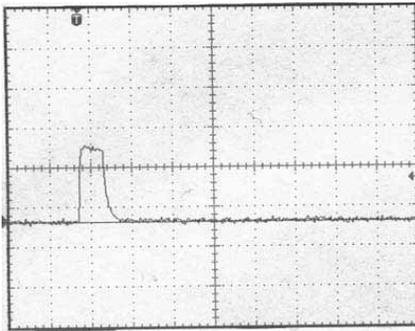


Fig. 69

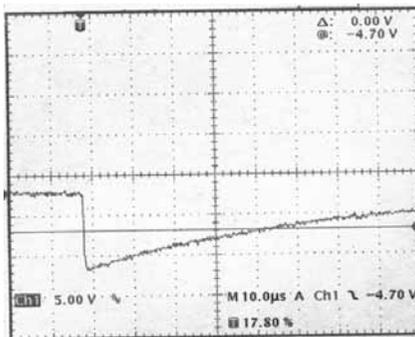


Fig. 70

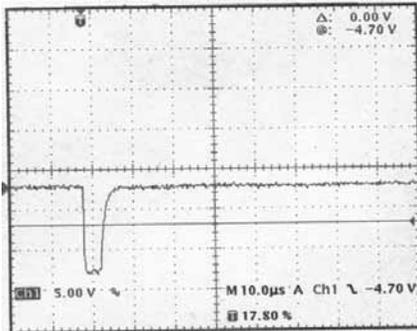


Fig. 71

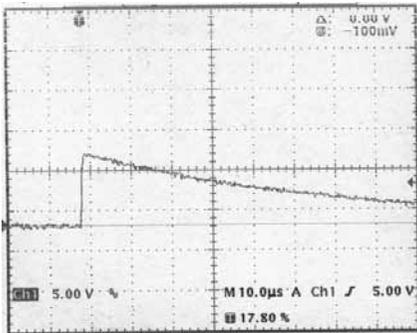


Fig. 72

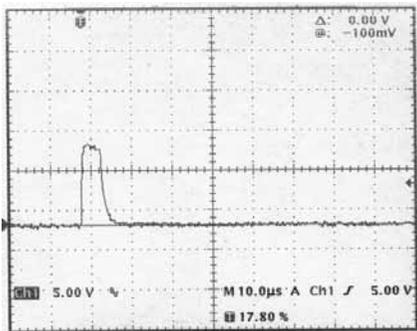


Fig. 73

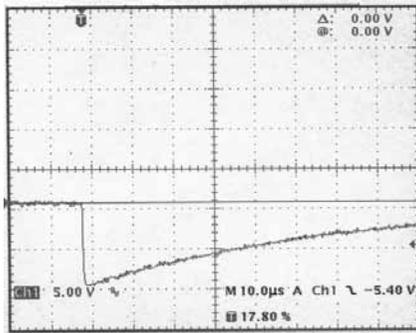


Fig. 74

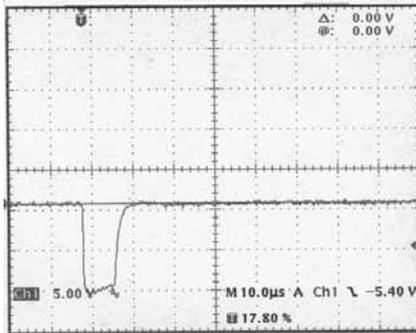


Fig. 75

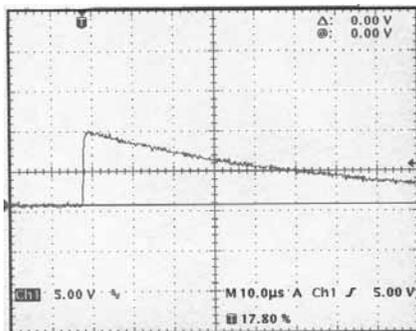


Fig. 76

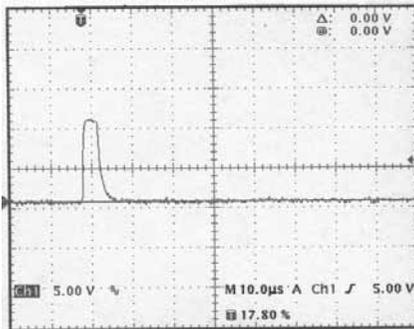


Fig. 77

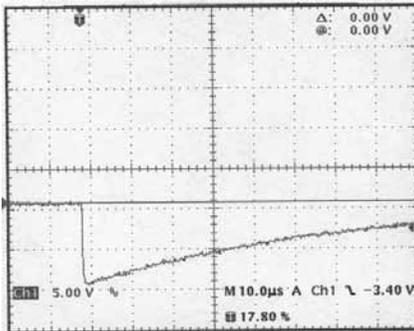


Fig. 78

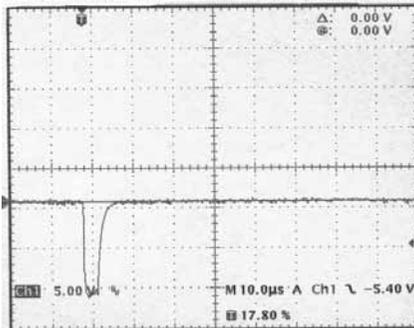


Fig. 79

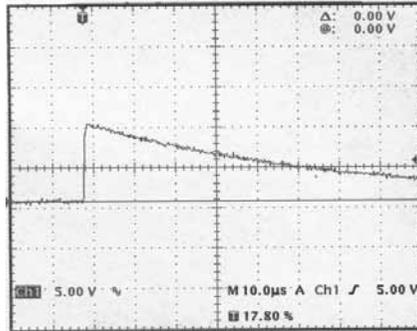


Fig. 80

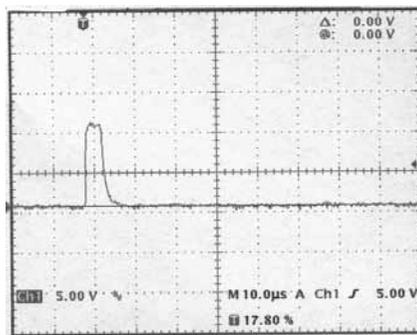


Fig. 81

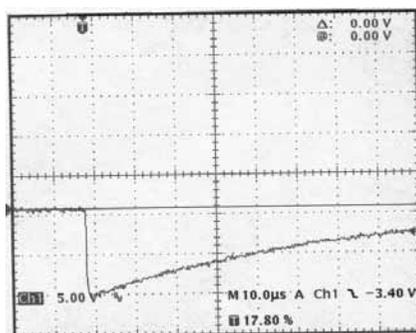


Fig. 82

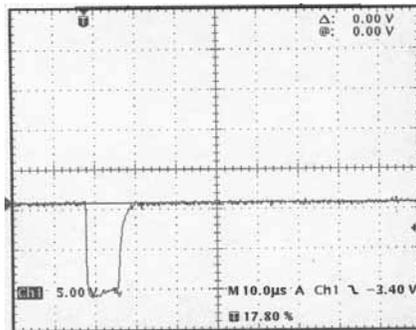


Fig. 83

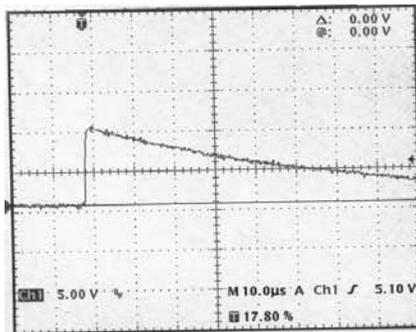


Fig. 84

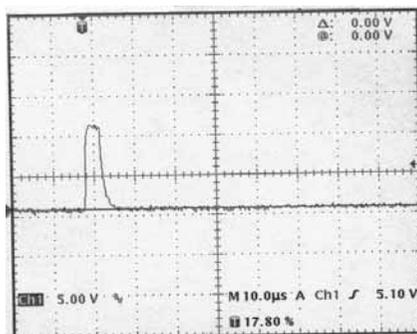


Fig. 85

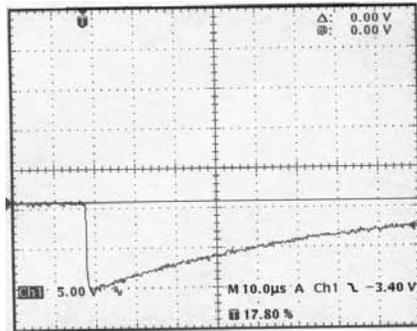


Fig. 86

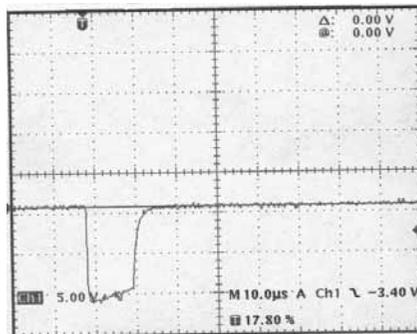


Fig. 87

상기의 결과물로 판단해볼 때, 무결점 FRP 절연봉은 $1.2 \times 50 \mu\text{s}$ 의 정극성 190kV, 부극성 230kV 의92% 이상의 충격전압에서도 양호한 상태가 나타남을 보여준다. 그리고 완제품인 폴리머현수애자로 제작하여 시험한 결과 모두 결과값은 양호한 상태를 나타내었다.

무결함 FRP 절연봉을 사용한 폴리머 현수애자(고무 사출 후)의 뇌충격 시험결과 는 모두 합격기준인 정극성 190 kV, 부극성 230kV 92%(정극성 174.8 kV, 부극성 211.6kV)이상으로 나왔다.

다음 Fig.은 폴리머현수애자의 뇌충격시험 결과를 보여준다.

Fig. 88은 100mm/min으로 제작한 FRP 절연봉이 사용된 폴리머 현수애자가 정극성 174.8kV, $1.2 \times 50 \mu\text{s}$ 의 충격전압에서 절연이 파괴되지 않음을 나타낸다.

Fig. 89는 100mm/min으로 제작한 FRP 절연봉이 사용된 폴리머 현수애자가 부극성 211.6kV, $1.2 \times 50 \mu\text{s}$ 의 충격전압에서 절연이 파괴되지 않음을 나타낸다.

Fig. 90은 200mm/min으로 제작한 FRP 절연봉이 사용된 폴리머 현수애자가 정극성 174.8kV, $1.2 \times 50 \mu\text{s}$ 의 충격전압에서 절연이 파괴되지 않음을 나타낸다.

Fig. 91은 200mm/min으로 제작한 FRP 절연봉이 사용된 폴리머 현수애자가 부극성 211.6kV, $1.2 \times 50 \mu\text{s}$ 의 충격전압에서 절연이 파괴되지 않음을 나타낸다.

Fig. 92는 300mm/min으로 제작한 FRP 절연봉이 사용된 폴리머 현수애자가 정극성 174.8kV, $1.2 \times 50 \mu\text{s}$ 의 충격전압에서 절연이 파괴되지 않음을 나타낸다.

Fig. 93은 300mm/min으로 제작한 FRP 절연봉이 사용된 폴리머 현수애자가 부극성 211.6kV, $1.2 \times 50 \mu\text{s}$ 의 충격전압에서 절연이 파괴되

지않음을 나타낸다.

Fig. 94는 400mm/min으로 제작한 FRP 절연봉이 사용된 폴리머 현수애자가 정극성 174.8kV, 1.2x 50 μ s의 충격전압에서 절연이 파괴되지않음을 나타낸다.

Fig. 95는 400mm/min으로 제작한 FRP 절연봉이 사용된 폴리머 현수애자가 부극성 211.6kV, 1.2x 50 μ s의 충격전압에서 절연이 파괴되지않음을 나타낸다.

Fig. 96은 500mm/min으로 제작한 FRP 절연봉이 사용된 폴리머 현수애자가 정극성 174.8kV, 1.2x 50 μ s의 충격전압에서 절연이 파괴되지 않음을 나타낸다.

Fig. 97은 500mm/min으로 제작한 FRP 절연봉이 사용된 폴리머 현수애자가 부극성 211.6kV, 1.2x 50 μ s의 충격전압에서 절연이 파괴되지 않음을 나타낸다.

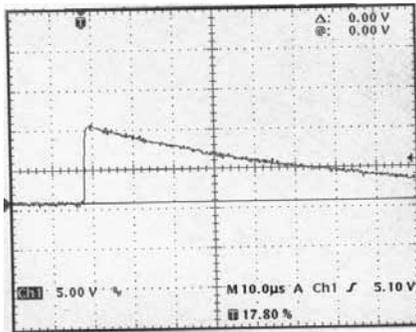


Fig. 88

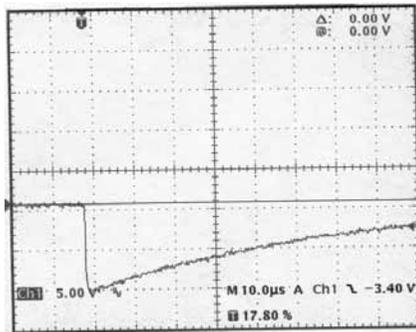


Fig. 89

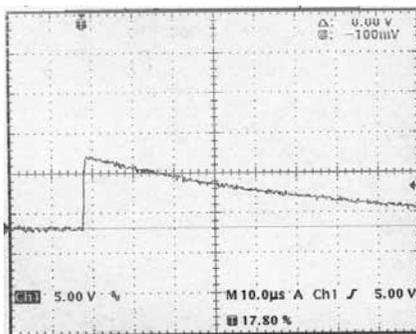


Fig. 90

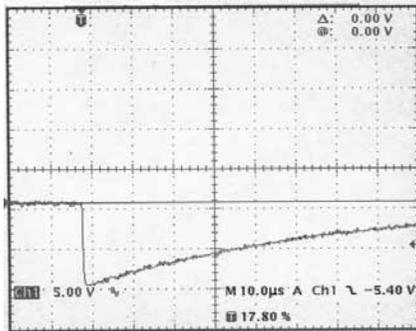


Fig. 91

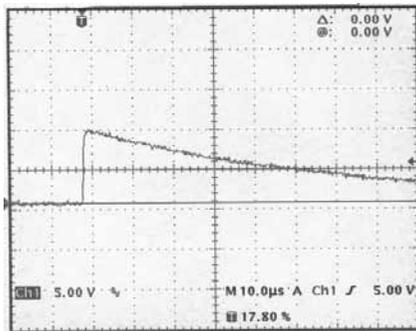


Fig. 92

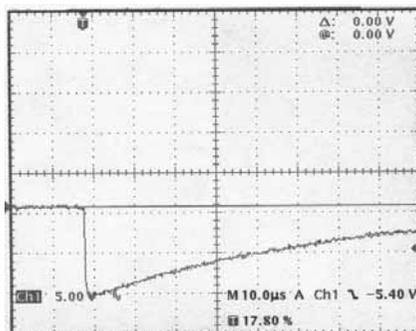


Fig. 93

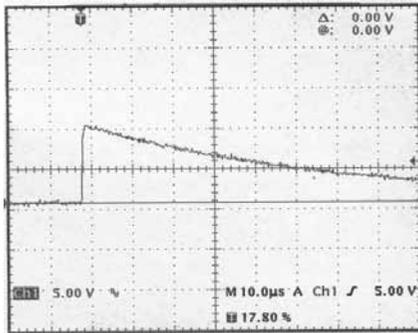


Fig. 94

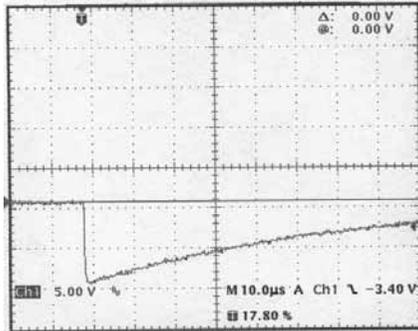


Fig. 95

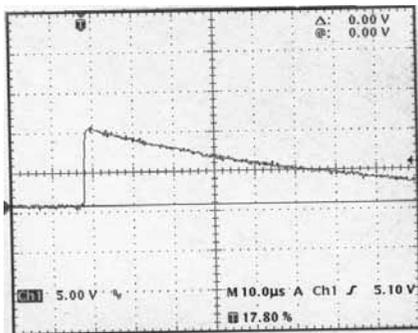


Fig. 96

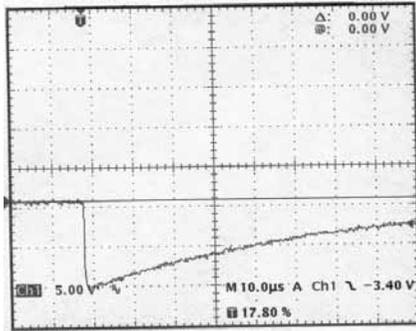


Fig. 97

제 5 장 결 론

본 연구는 배전 및 송전, 철도용에 사용되어지는 폴리머 애자류의 핵심부품인 무결합 FRP 절연봉의 국산화를 목표로 하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 유리섬유는 범용 E-Glass, 수지는 절연성 및 강도가 우수한 에폭시 수지(bisphenol A계)를 원자재로 사용하여 인발공법에 의해 시제품 제작에 성공하였다.
2. 유한요소해석법을 이용하여 FRP 절연봉의 구조해석을 하였으며 이를 토대로 시제품 제작에 응용하였다.
3. 본 연구에서 행해진 시험은 캐나다 전기 협회(Canadian Electrical Association CEA), 미국애자표준원(American National Standard for Insulator ANSI), 국제전기기술위원회(International Electrotechnical Commission IEC)의 국제규격과 한국전력표준구매시방서(Standard Technical Specification of Korea Electric Power Corporation ES)를 근거로 하였으며 모두 양호한 결과를 얻었다.
4. 양산의 측면에서는 본 연구의 조건상태에서 분당 최고 500mm까지 생산이 가능하다는 결론을 얻었으며 자재의 배합비 및 금형 온도 등의 조건을 조절하면 생산성을 더욱 향상시킬 수 있다고

본다.

5. 현재는 배전용 현수애자에 사용되어지는 지름 17.2mm 무결함 FRP 절연봉의 개발에는 성공하였지만 앞으로 더 나아가 송전용 현수애자 지름 22mm, 철도용 장간애자 지름 40mm 등의 무결함 FRP 절연봉의 국산화도 추진 가능 하리라 사료된다.

참고문헌

- (1) Ronald F. Gibson, 1994, *"Principles of Composite Material Mechanics"*, McGraw-Hill, Inc..
- (2) J.N. Reddy, 1997, *"Mechanics of Laminated Composite Plates"*, CRC Press, Inc..
- (3) Robert M. Jones, 1975, *"Mechanics, Scripta Book Company"*.
- (4) Klaus-Jurgen, Bathe, 1996, *"Finite Element Procedures"*, Prentice-Hall, Inc.
- (5) O.C. Zienkiewicz and R.L. Taylor, 1989 *"The Finite Element Method"*, McGraw-Hill, Inc..
- (6) T.Y. Yang, 1986, *"Finite Element Structural Analysis"*, Prentice-Hall, Inc..
- (7) Y.H. Kim, J.W. Han, 2001, *"Composite Lecture"*, Hyo Sung, Inc.. p157~161
- (8) John Murphy, *"The Reinforced Plastics Handbook"*, ELSESEVIER ADVANCED TECHNOLOGY pp 13 ~ 124
- (9) *"CEA LWIWG-01, 7.3 Tensile load test"*.
- (10) *"CEA LWIWG-01, 5.3 Dye penetration test"*.
- (11) *"CEA LWIWG-01, 5.8 Torsional load test"*.
- (12) *"IEC 61109, 6.4 Mechanical load-time test"*.
- (13) *"CEA LWING-01, 5.9 Thermal Machanical test"*.
- (14) *"CEA LWIWG-01, 5.4 Water diffusion test"*.
- (15) *"ANSI C 29.2, 8.2.1 Radio influence voltage test"*.
- (16) *"CEA LWING-01, 5.1 Water penetration test"*.
- (17) *"ANSI C 29.2, 8.2.3 Critical impulse flashover test"*.

감사의글

어느 듯 졸업의 시간이 다가왔습니다. 긴 것 같으면서도 짧은 시간이었습니다. 하지만 저에게 있어서 지난 시간은 사회 속에서 경쟁력과 차별화에 맞서기 위한 또 하나의 선택과 준비의 기간이었습니다.

저의 이 선택에 길잡이가 되어주신 김윤해 교수님께 진심어린 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 바쁘신 와중에도 논문 심사 및 지도를 아끼지 않으신 문경만 교수님과 이명훈 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다.

보이지 않게 잔일을 하며 도와준 수현이와 여러 학우들에게도 감사드립니다. 그리고 여기까지 올수 있게 도와주신 부모님과 제 아내에게도 감사드립니다.

앞으로 학교와 현장에서 더 많은 학문과 경험을 쌓아 폭 넓고 지식을 겸비할 뿐만 아니라 엔지니어로서 후배 양성에도 앞장서도록 노력하겠습니다.

감사합니다.