

옥외용 플라스틱 예자의 내구성 평가

Durability and Evaluation of Plastic Insulator for the Outdoor

조한구*, 강동필, 한동희, 김인성
한국전기연구소 전기재료연구부

ABSTRACT

The application of epoxy composite materials for the outdoor insulating systems has some significant advantages compared with conventional inorganic materials, that is low weight in combination with high mechanical strength, small dimensions and design versatility.

The paper describes the results of high voltage investigations carried out different aging types of epoxy resin insulator and silicone grease coating. The insulators have been exposed 3000 hours to weather-ometer and 12 months to outdoor. In this connection, the main study of paper is form the basis of development of principal technologies of epoxy composites which are: (1)manufacturing of insulator, (2)high voltage testing under dry and wet condition, (3)mechanical properties, (3)accelerated weather-ometer test and outdoor exposed, artificial pollution.

1. 서 론

최근 전력수요의 증가에 따라 도시주변에는 환경과 용지 확보의 관점에서 종래의 송전선 대신 축소형 송전선 개발이 요구되고 있다. 즉 축소형의 송전선은 종래의 자기의 현수예자 대신 LP(line post), P(post)예자로서 축소형의 천탑설계물 도모할 수 있다. 이와 같은 관점에서 경량 또 고강도인 LP예자 및 P예자를 개발하는 것이 중요하다. 즉 이를 적용하면 종래의 경우에 비해 절연강도와 습압이 가능하게 되어 송전용량을 증가시킬 수 있으며, 높이가 3/4, 선로폭을 1/2정도 축소할 수 있어 소형화가 가능하게 되어 용지비의 경감도 기대된다.

또한 이는 자기에자와 비교해서 밀도와 유전율이 낮고, 절연파괴강도가 크고, 내 arc성이 우수하며 기계적특성도 압축강도를 제외하고 자기에자 보다 우수하다. 또 금속의 매입이 용이하기 때문에 일체형으로 제조가 가능하며 예자 높이와 직경을 30%~40% 작게, 중량을 1/3~1/4로 경감할 수 있어 소형화가 가능하며 누설거리가 긴 내오손특성이 우수한 형상으로 제조할 수 있다. 그러나 이 같은 우수한 특성이 있는 반면 이를 옥외용 절연재로 적용시에는 자연 환경에서의 자외선 등에 대한 오손이 문제로서 제기되고 있다. 따라서 이런 문제를 개선하여 사용하면 형성설계의 용이성, 금구와의 접착과 금속매입부품의 일체화와 알상화의 절연재 고성능화에 기여가 클것이다. 따라서 내후성이 우수한 고온경화형의 수지를 모재로서 사용하고 충전재를 배합하여 옥외용 지지예자를 설계 및 제조하고 전기적 및 기계적특성을 평가하였고, 이를 계통에 적용하는 경우에

대해서 예자의 장기신뢰성 및 오손특성을 weather-ometer 에 의한 가속열화시험과 옥외폭로시험 및 인공오손시험을 통해 이의 특성도 평가하였다.

2. 실 험

2.1. 출발원료

Epoxy수지는 F종 진연(155°C), 내마모성이 우수하고 특히 옥외용으로의 관점에서 오손특성이 우수한 수지이다. 이 수지는 액상이고 경화제는 산무수물(acid anhydride) 계로 epoxy수지와 혼합한 후 80°C~100°C에서 경화가 시작되며 경화물은 열변형온도가 높아 내열성재료도 이용할 수 있다. 또한 이 수지의 산무수물로 형성된 경화물 구조는 에스테르결합(ester-linkage)으로 열적 및 화학적으로 안정하며, 전기적 및 기계적특성도 우수하다. 이는 상온에서 고상이므로 35°C~38°C에서 용해시켰다.

충진재(filler)는 경화방열과 경화수축을 억제하고, 또 내-tracking성을 향상하기 위해 충전재를 사용하며, 예자를 제조할 경우에 있어서 epoxy수지와 insert 금구와의 열팽창계수를 줄이게 되어 내열충격성을 향상할 수 있다. 그림1은 충전재인 treated silane SiO₂의 입도분포이다.

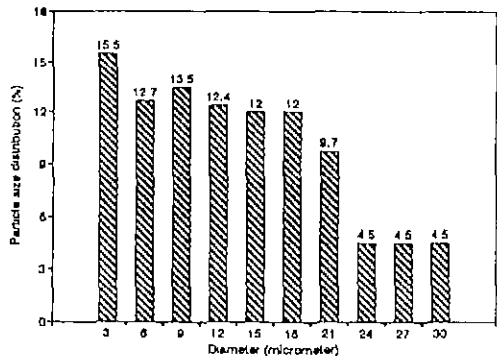


Fig. 1. Particle size distribution inorganic filler

2.2. 원료 및 경화조건

표1은 애자를 제조하기 위한 APG(automatic pressure gelation) system의 원료 및 경화조건을 나타내었으며 이

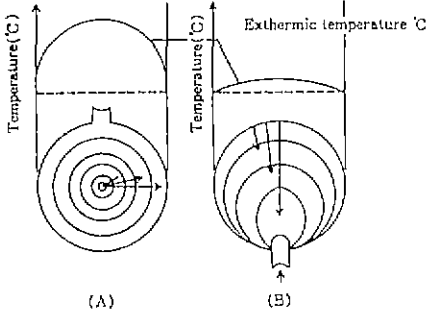


Fig. 2. Process of gelation and generation exothermic heat in the conventional(A) and APG(B) casting.

주형법은 수지의 온도 보다 높게 예열된 금형에 배합된 수지를 가압 주형하는 것으로 이는 생산시간을 상당히 줄일수 있으며 그림2와 같은 경화과정으로 종래의 주형보다 내부비물림 및 crack의 발생을 억제할 수 있다. 그림 3은 애자제조 및 APG공정에 대한 공정도이다.

Table 1. Chemical composition of the epoxy casting materials and curing, mold temperature.

Casting materials	Composition	Curing temp.	Mold temp.
Epoxy resin	100(%)	160° C/ 10hr	140° C~ 160° C
Curing agent	90(%)		
Accelerator	1(%)		
Silane treated SiO ₂	61.1 (wt%)		

3. 결과 및 고찰

3.1. 설계기준

갓(shed)과 갓사이는 두 갓 중 상부갓의 가장 낮은 위치에서 하부갓까지의 수선을 나타내며, 이는 갓과 갓 사이에 있어서 장우 및 눈에 의한 전교(bridging)를 피하기 위해 >30mm 이어야 하기 때문에 갓과 갓사이 거리는 40mm정도로 하였다. 갓 돌출거리(shed overhang)와 간격(spacing)은 갓의 수를 증가 또는 과도하게 갓 돌출거리를 너무 크게 증가하는 것에 대한 것을 의미하는 것으로 애자 자기세정(self-cleaning)특성에 있어서 중요하다. 갓 돌출에 대한 간격비는 >0.8로 갓돌출에 대한 간격의 비는 0.9로 하였다. 간극(clearance)에 대한 누설거리(leakage distance)는 애자의 하부부분 즉, 주름(rib)의 어떠한 부분이 문제점이 되는지를 검증하고 극부적인 전교현상을 피하기 위하여 <5로 하나 1.4로 설계하였다.

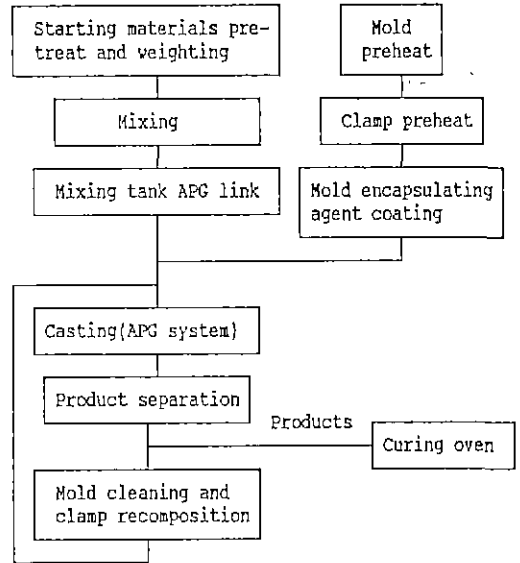


Fig. 3. Insulator manufacturing processes using APG and mixing system.

갓(shed)의 기울기는 애자의 자기세정특성을 나타내는 요소로 갓의 끝으로부터 갓상부의 기울기는 5° 보다 커야 한다. 단 갓 하부부분에 대한 기울기는 주름이 없는 갓의 경우 하부의 기울기는 2° 이상일 것이 요구된다. 따라서 상부 경우에는 20°, 하부는 4°로 하였다. 즉 갓의 하부 기울기가 증가할수록 평균오손밀도가 증가하기 때문이다.

또한 최적의 갓 상부 기울기에 대한 오손밀도는 >10° 일때 낮은 값이며, 20° ~ 30°의 범위에서는 큰 값을 나타낸다. 그러나 가장 낮은 평균오손밀도는 갓 상부 기울기가 <45° 일때 얻을수 있는데 이는 바람에 의한 자기세정특성으로 갓의 기울기가 낮을 경우 더욱 효과적이며 애자의 표면에 부착되어 있는 미분을 제거하는데 효과적이기 때문이다.

애자의 최소공칭누설거리는 20kV/mm이며, 이의 오손등급은 등가염분부착밀도(ESDD:equivalent salt deposit density)의 경우는 0.1-0.2mg/cm²이다. 또한 creepage factor는 이 오손등급일 경우 I₁/S₁<3.5(I₁:애자의 전누설거리, S₁:공기중에서의 건조 arc 거리)이며 profile factor는 이 오손등급일 경우 <0.8정도이다. 따라 creepage factor는 2.1, profile factor는 1로 하였다. 금구에 대해서 애자의 상부와 하부금구의 insert 길이는 30mm, 60mm로 하였으며, 금구와 주형수지 접촉면은 기계적특성을 개선하기 위해 제단형상으로 설계하였다.

3.2. 지지애자의 형상 및 재원

기존의 절연등급(24kV)인 자기애자 보다 전장 및 동경이 작고 중량을 작게 제조한 애자의 제원을 표2에 나타내었다. 또 제작된 애자를 대해서 여러 조건들로 내구성을 시험한 애자의 종류를 표3에 나타내었다.

Table 2. Parameter characteristics of developed 24kV post insulators.

Parameters	Data
Distance of shed and shed	40(mm)
Ratio of spacing and shed overhang	0.90
Ratio of creepage distance and clearance	1.40
Shed inclination of upperside	20(°)
Shed inclination of underside	4(°)
Minimum specific creepage distance	20(kV/mm)
Insert distance of upperside	30(mm)
Insert distance of underside	60(mm)
Leakage distance	475(mm)
Shape coefficient	2.11
Numbers of shed	5
Insulator diameter	120(mm)
Stem diameter	60(mm)
Attitude	bell
Continual distance	225±1(mm)
Effective distance	225±1(mm)
Weight	1.8(kg)

Table 3. Insulator of aging conditions

Conditions of insulator	
Original	A
Accelerated weather-ometer 3000hr	B
Cleanning after accelerated weather-ometer 3000hr	C
Outdoor exposure 1 year	D
Silicone coating	E
Outdoor exposure 1 year after silicone coating	F

3-3. 전기적시험

1. 상용주파전조섬락전압시험

건조상태로 유지된 애자에 있어서 두 전극간에 공기중을 통하여 지속방전을 일으키는 교류전압의 실효치를 애자의 건조섬락전압이라 하며, 이 전압은 60Hz의 상용주파전압을 사용하고 섬락전압치는 5회이상 계속하여 섬락전압을 측정하고 평균치를 기준치로 하였다. 이 애자의 섬락전압치가 정격건조섬락전압치인 110kV의 95%(104.5kV)를 기준치로 하였으며, 그림4는 단위누설거리에 대한 평균섬락전압을 표시하였다. 그림에서 A애자가 weather-ometer에 의한 B, 육의에서 1년 폭로한 D애자 보다 평균섬락전압이 큰 것을 알 수 있다.

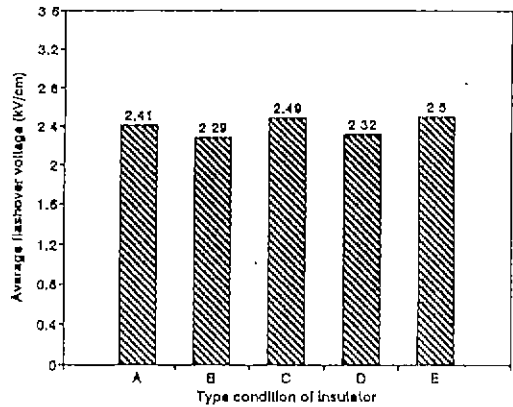


Fig. 4. Average flashover voltage for leakage distance for types insulator(dry)

2. 상용주파주수섬락전압시험

주수상태에 있어서 애자의 두 전극간에 공기중의 통해서 지속방전을 일으키는 교류전압 실효치를 애자의 주수섬락전압이라 하며 강우시에 있어서 애자의 절연내력을 검증하는 것이다. 주수는 수압이 일정한 상태에서 분사시키고 주수범위는 애자를 충분히 포함하는 넓이가 되어야 한다. 주수량은 수직성분으로 3mm/min, 주수각도는 애자의 중앙에서 수직방향에 대해서 45°, 주수의 저항률은 100Ω/cm ± 15%로 한다. 상용주파주수섬락치는 5회정도 측정하고 그 평균치를 애자의 평균주수섬락전압치가 정격주수섬락전압치 75kV의 90%(67.5kV)를 기준치로 하였다. 그림5는 단위누설거리에 대한 평균주수섬락전압을 표시하였다. 각각의 애자에 대한 주수섬락전압은 1.87kV/cm, 1.33kV/cm, 1.74kV/cm, 1.69kV/cm, 1.79kV/cm이었다. 이런 주수섬락전압은 건조상태 평균섬락전압의 87.3%, 58.1%, 70%, 72.8%, 77.3%이다. 이것으로 보아 weather-ometer에 의해 가속 열화시험한 후 세정하지 않은 B애자가 가장 큰폭의 평균주수섬락전압이 감소하는 것으로 나타났다.

3. Silicone coating에 따른 건조 및 주수섬락전압시험

제조한 epoxy수지 A애자 표면에 silicone으로 coating한 E애자의 애자와 coating하지 않은 A애자와의 건조 및 주수

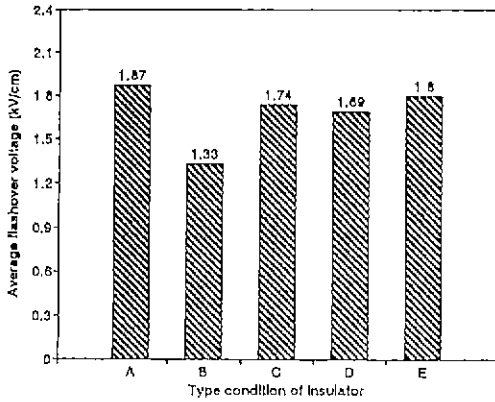


Fig. 5. Average flashover voltage for leakage distance for types insulator(wet)

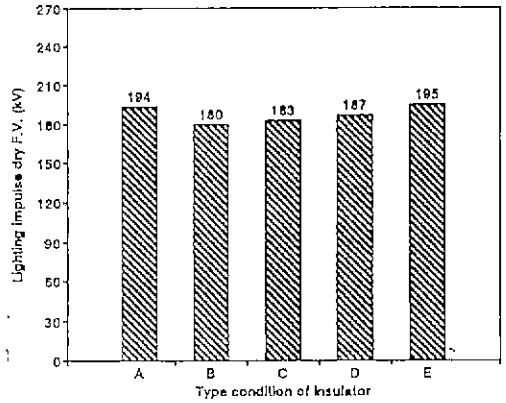


Fig. 7. Lighting impulse dry flashover voltage for types insulator of positive

섬락전압의 평균치를 그림6에 나타내었다. 이의 silicone coating 두께는 1mm정도였다. Silicone으로 coating을 한 E에자의 평균건조섬락전압이 118kV인 반면, coating되지 않은 A에자는 114kV이다. 이 때의 평균주수섬락전압은 89kV, 85kV이다. 또한 옥외에서 1년간 폭로한 D 및 F에자에 대한 평균건조섬락전압은 동일한 110kV이나 평균주수섬락전압은 각각 80kV, 85kV로 silicone coating한 E에자가 약간 섬락전압이 큰 것을 알수 있다.

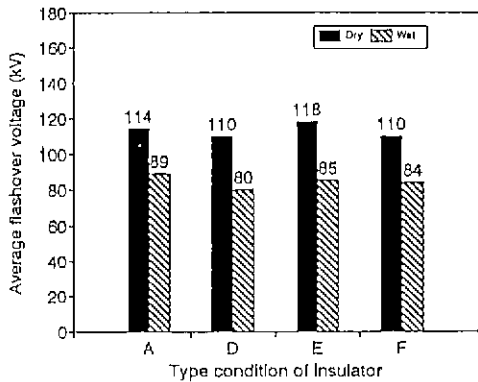


Fig. 6. The flashover voltage for silicone coated and uncoated epoxy resin insulators

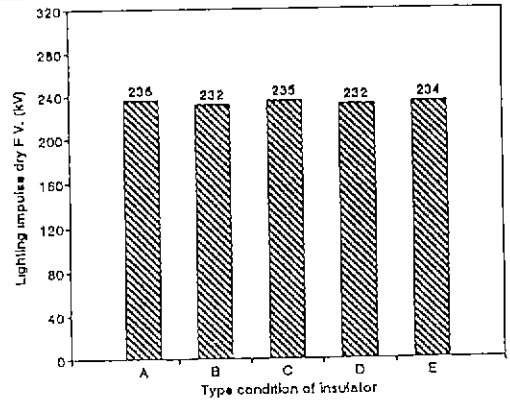


Fig. 8. Lighting impulse dry flashover voltage for types insulator of negative

4. 뇌충격건조섬락전압시험

뇌충격전압은 단인의 단극성전압으로 진동분을 포함하지 않고 0으로 부터 단시간 최대치에 이르고 그후 단시간에 0 까지 감쇠하는 전압으로 에자의 두 전극간에 뇌충격전압을 가하여 섬락이 나타날 때의 전압의 파고치이다. 이 시험에 사용하는 표준파형은 1.2x50μS의 정(positive) 및 부(negative)의 단극성 전파전압으로 파형의 허용치는 파 두장이 ±30%, 파고치는 ±3%이다. 에자 평균뇌충격섬락전압치치가 정극뇌충격섬락전압치의 정극성 경우 +170kV의 92% (+156.4kV)이상, 부극성인 경우 정극뇌충격전압치가 -250kV의 92% (-230kV)를 기준치로 하며 그림7은 뇌충격건조섬락전압의 정극성, 그림8은 부극성의 결과이다.

5. 부분방전시험

이는 금구의 부착부분을 절지하고 상부에서 전압을 인가 하여 정격전압까지 승압시키고 1분간 방치 후 서서히 전압을 감소시켜 정상대지전압의 $(\sqrt{3}) \times 1.1$ 배 전압치로 부분방전의 전하량을 측정한다. 이때 부분방전의 전하량은 100(PC) 이하를 기준치로 하며 표4는 이 시험을 결과이다.

Table 4. Test results of partial discharge

Test Insulators	Test voltage (kV)	Results (PC)	Partial discharge voltage (1PC이하)
A	$(23/\sqrt{3}) \times 1.1$	1(PC)이하	36kVrms
B	$(23/\sqrt{3}) \times 1.1$	1(PC)이하	35kVrms
C	$(23/\sqrt{3}) \times 1.1$	1(PC)이하	37kVrms
D	$(23/\sqrt{3}) \times 1.1$	1(PC)이하	36kVrms
E	$(23/\sqrt{3}) \times 1.1$	1(PC)이하	36kVrms

3-4. 내구성시험

1. 인공오손시험

가. 오손층에 의한 방법

고분자에자물 오손층에 의한 방법으로 인공오손시험 할 경우 애자표면의 발수성으로 인하여 오손액이 전혀 애자의 표면에 부착되지 않으므로 표면을 sandpaper로 연마한 후 표5의 오손액에 침적시켰다. 이때의 오손액의 오손밀도는 등가염분부착밀도(ESDD)가 0.35mg/cm²인 해안지역의 심한 오손도를 채택하였다. 오손액은 제조 후 약 48시간 후에 애자를 침적하였으며, 이때 점도는 상온에서 2000±20(%)이며 애자표면에 오손층을 만든 후에 상대습도가 80% 이상인 장소에서 30분 건조하였다.

Table 5. Chemical composition of contaminants for equivalent salt deposit density degree.

Contaminants	ESDD(mg/cm ²)	0.35
Kaoline		40g
SiO ₂ (2-20μm)		10g
Water		1l
NaCl		140g

나. 염수분무법

오손층에 의한 방법인 애자 표면을 인위적으로 벗겨내는 것은 epoxy수지 애자표면의 발수성을 강제적으로 제거하는 것이므로 적당하지 않다. 따라서 염수분무법으로 오손액인 염수는 소금을 수돗물에 용해시킨 것으로서 이것의 비중이 1.075정도이다. 이는 오손층에 의한 방법인 오손도 ESDD가 0.35mg/cm²와 동일한 값이다. 염수분무는 일정한 속도로 분무하고 시험 초기의 분무실 주위온도는 23°C이다. 표6에서 알 수 있듯이 시험중에 미소한 발광현상 및 섬락이 일어났지만, 애자표면에는 track의 형성이 생기지 않았고 또 요구하는 인가전압에서 3회 3시간 내전압시험을 하여도 우수한 결과를 얻었으며, 3회 3시간 후에도 28kV에서 섬락 되는 것으로 보아 제조된 애자는 우수한 오손특성을 가진 것으로 추측된다.

2. 가속열화시험

고분자에자물 옥외의 전력계통에 적용하기 위해서는 옥외의 기상조건과 환경조건 (NO_x, SO_x, H₂S의 대기오염 가스 및 자외선, 온도, 습도)에 의한 열화의 장기실험을 평가하는 것이 중요하다. 따라서 애자를 자외선, 습도, 온도, 강우의 인공적인 조건에서 가속열화시키기 위하여 weather-ometer를 사용하였고, 이 광원으로는 2500W xenon arc lamp로 outer 및 inner filter는 borosilicate glass로 이는 275nm이하의 파장을 차단시켜 방사되는 에너지는 태양광선 분포와 유사하다. 내부의 온도는 63±2°C이고, 옥외절연체의 경우 태양광선 뿐만 아니라 강우가 있으므로 주수를 120분 중 18분의 비율로 주수하였고, 주수nozzle의 반경은 1.2mm이고 주수압은 1kg/cm²이다. 내부의 습도는

Table 6. Test results of artificial pollution

	Salt spray initial withstand voltage(kV)	During salt spray 3 number 3 hours with-stand vol-tage(kV)	After salt spray 3 number 3 hours with-stand vol-tage(kV)
A	35이상(NFO)	14.9(NFO)	28(FO)
B	35이상(NFO)	14.9(NFO)	28(FO)
C	35이상(NFO)	14.9(NFO)	28(FO)
D	35이상(NFO)	14.9(NFO)	28(FO)
E	35이상(NFO)	14.9(NFO)	28(FO)

NFO:non-flashover, FO:flashover

무주수시는 50±5%, 주수시는 80±5%이며, 애자부착의 holder 회전속도는 1rpm, 운전은 1일 24시간으로 애자가 받는 조사량을 균일하게 위치를 180° 변경하였고, 광원과 애자의 거리는 212mm이며 애자상태는 축심과 직각방향으로 고정하였다.

3. 옥외폭로시험

옥외폭로대의 크기는 2000x700mm², 주구조체는 A1이며 폭로대는 동쪽으로 향하도록 했으며 수평면과의 구배는 30°이다. 애자는 tefron선으로 부착하였으며, 폭로한 애자의 상태는 축심과 직각방향과 수평방향의 2중류로 적결폭로하였다. 이 때 폭로면과 지면과의 높이는 900mm이다.

3-5.기계적시험

1. 인장파괴하중시험

애자를 상부 및 하부 jig에 삽입하는 방법에 의해 애자의 축심 방향으로 하중이 가해지도록 부착하며 하중은 시험하중치의 75% 까지 급히 증가시키고 그 이후는 최소 1분 동안에 시험하중치의 15%로 증가시켜 시험한다. 기준치는 자기애자의 경우 상부는 910(kg), 하부는 455(kg)이며, 옥내용 epoxy수지 애자 경우는 600(kg) 표7은 인장파괴의 결과이다.

Table 7. Test results of tensile breaking load.

Types	A insulator
Test names	Results
Tensile breaking load	최소(920kg), 최대(1,340kg)

2. 굽힘파괴하중시험

참 고 문 헌

기준치는 자기 애자의 경우 2275(kg), 옥내용 epoxy수지 애자의 경우는 1200(kg)이다. 표8은 굽힘파괴하중의 결과치이다.

Table 8. Test results of flexural breaking load.

Test names	Types	A insulator
	Results	
Flexural breaking load test	4,000kg ~ 4,100kg	

3. 압축파괴하중시험

기준치는 자기애자의 경우 4550(kg), 옥내용 epoxy 수지 애자의 경우는 없으며 표9은 압축파괴하중시험의 결과이다. 이의 결과로 부터 제작된 애자는 기존의 옥내용 epoxy수지애자 보다 기계적특성이 우수한 알 수 있다.

Table 9. Test results of compressive breaking load.

Test names	Types	A insulator
	Results	
Compressive breaking load test	17,000 ~ 17,200이상	

1. M. A. B. EL-Koshairy, et al "The Performance of High Voltages Transmission Lines Epoxy Resin Insulators Under Desert Pollution Conditions.", Inter. Confer. on High Voltages Electric System, 1978.
2. J. Keller-Jacobsen, "Field and Laboratory Tests for the Proper Dimensioning of Insulators Exposed to Salt Pollution", CIGRE, No.33-11, 1978.
3. L. Egiziano, G. Lupo, et al, " Methodological Procedures to Investigate the Degradation Process of Organic Materials Aged in the Field and in Laboratory Testes", IEEE Inter. Sympo. on Elect. Insul., No.9-11, 1986.
4. Hermann, et al, "Testing and Measurement Techniques for the Evaluation of Organic Insulating Materials for HV Outdoor Application", Proc. 21st Sympo. on Elect: Insul. Mater., 1988.