

에폭시 수지의 경화형태와 전기 절연특성과의 연관성

Relation between Curing Formation and Electrical Insulation Properties in Epoxy Resin

金 泰 成* · 李 進** · 李 殷 學*
(Tae-Seoung Kim · Jin Lee · Eun-Hak Lee)

요 약

신소재용 전기 절연재료로 각광받고 있는 에폭시 수지는 경화과정에서 현저한 화학적 반응을 동반하며 경화제와 경화조건에 따라 다양한 물리적, 화학적 성질을 나타내므로 전기적 특성과 경화형태와의 관련성에 대한 연구는 에폭시 수지의 절연특성을 향상시키는 중요한 자료가 된다.

실험결과, 경화는 에폭시의 에폭시환과 경화제의 활성기 사이의 화학반응으로 일어나며 전기 절연특성은 경화할 때 얻어지는 가교에 의하여 영향을 받음을 확인하였고 경화형태는 적외선 파수 $915[\text{cm}^{-1}]$ 의 에폭시환이 감소하고 $1,453[\text{cm}^{-1}]$ 파수의 변성메틸이 생성되지 않는 가교를 할 때 우수한 절연특성이 얻어졌다.

ABSTRACT

Epoxy Resin, as a new electrical material, shows prominent chemical reaction in the curing process and as it gives various physical and chemical characteristics depending on the curing agent and curing condition, the studies on the relation between curing formation and electrical insulation properties in epoxy resin, will contribute to improving its insulation characteristics.

And, it is confirmed by the experiments that the curing process occurs by chemical reaction between epoxy ring of epoxy and activation radical of curing agent and the crosslink reaction obtained in the curing process affects the insulation properties.

As a result, the excellent insulation properties is obtained when the epoxy ring shown at $915(\text{cm}^{-1})$ infrared wavenumber decreases and the deformed methyl of $1453(\text{cm}^{-1})$ wavenumber is not produced.

* 전남대학교 전기공학과

** 목포대학교 전기공학과

1. 서 론

최근 고분자 절연재료로 주목받고 있는 에폭시 수지는 경화의 용이성 및 전기적, 열적, 화학적 측면에서 우수한 성질을 갖고 있어 각종 전기기기의 절연용 충전제, 전기 전자용 기관 및 애자 등의 절연재로 널리 이용되고 있다.

국내에서도 이의 중요성을 인식하여 1980년대부터 본격적으로 실용화에 주력하고 있으며 그 장점을 연구·개발하려는 노력이 계속되고 있다.

에폭시 수지의 경화란 2차원의 선상구조인 에폭시가 경화제와의 가교반응으로 3차원의 망상구조로 변화되면서 분자량, 강도, 유전율 및 시료의 내부에 잔류하는 물질의 성분과 양이 달라지는 것을 말하므로 경화상태와 전기절연특성은 중요한 연관성을 가진다.

경화상태를 엄격히 구별하면 활성화 사이의 화학반응과 반응이 일어날때 생성되어 얻어지는 가교로 구분되며, 화학반응은 반응기들의 반응에 따라 여러형태의 다양한 결합을 하고 반응속도는 활성화들이 얻게되는 활성화 에너지의 차이에 따라 상이하게 나타난다.

따라서 에폭시의 에폭시환과 경화제의 활성화 사이의 반응은 활성화에너지의 변화에 따라 연쇄와 확산 등의 반응속도가 다르고 반응비는 주로 확산반응에 의하여 조절된다.^{1, 2)}

경화형태에 관한 연구는 T.G.Fox 등에 의한 가교특성, J.L.Lachich 등의 경화조건에 대한 격자구조해석, A.N.Gent 등에 의한 강도해석, J.L.Binter 등의 붕괴에너지 연구 및 J. K. Gillham 등의 경화온도와 시간에 대한 경화특성 등의 이론으로 발전되어 왔으며^{3~7)} 고분자 유전체의 파괴이론에 관한 연구로는 J.H.Mason⁸⁾에 의해 트리밍현상이 발견된 이

래 트리의 발생, 진전의 기구에 대해 활발한 연구가 행하여져 왔다. 그러나 이들 연구는 주로 전기 특성과 구조연구가 독자적으로 이루어져 전기적 특성과 경화상태의 연관성에 관한 연구는 아직 미진한 상태이다.

따라서 본 연구는 경화상태와 전기 절연특성과의 연관성을 구명하고 우수한 절연특성을 갖는 경화형태를 제시하고자 한다.

이와같은 연구의 목적을 달성하기 위하여 경화온도와 시간을 변화시키면서 에폭시를 경화하고 경화된 에폭시 수지의 경화형태를 적외선 스펙트럼과 시차 열분석을 이용하여 분석한 다음 유전정접과 절연 파괴전압 및 트리밍 특성을 조사하고 이들의 결과를 비교·분석 하였다.

2. 시료 및 실험방법

실험에 사용된 에폭시 수지는 비스페놀A와 에피클로로 히드린을 알카리 용액중에서 축합시킨 DGEBA(Diglycidyl Ether of Bisphenol A) 계열의 에폭시당량 184~194의 에폭시 YD-128과 경화제로는 중화당량 88~93인 산무수물의 일종인 MNA(Methylnadic Acid)를 사용하고 촉진제로 3급 아민인 BDMA(Benzyl Dimethyl Amine)를 부가하였다.

MNA의 열변형 온도는 130[°C]이나 예비 실험의 결과 경화할때 시료의 내부온도가 130[°C]를 초과하므로 경화제의 열에 의한 손실을 고려하여 경화제의 양을 에폭시의 양보다 당량비로 10[%] 많게 가하였고 BDMA는 DGEBA의 중량비 3[%]로 정하였다. 따라서 에폭시, 경화제, 촉진제의 배합비는 중량비 100 : 85 : 3으로 배합하였다.

전기적특성을 비교·분석하기위한 시료의

전극구성은 침-평판 전극의 불평등 전계로 하여 그림1과 같이 구성하고 침전극은 치구를 이용하여 금형에 고정시킨 후 혼합상태에서 30[분] 이상 진공처리하여 완전히 기포를 제거하였다.

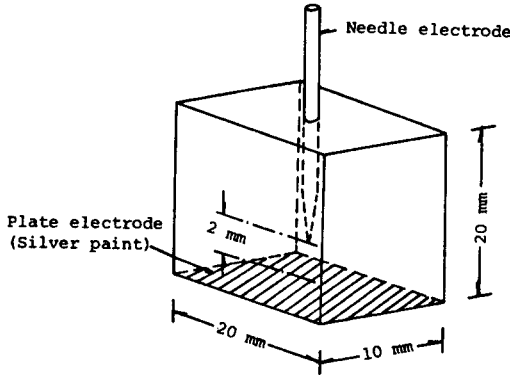


그림 1. 전극 배치도

Fig. 1. Arrangement of electrodes

표 1. 경화온도 및 시간에 따른 시료표

Table 1. Sample index for various curing temperature and times.

(a) Pre-cure.

Curing time (Hr) / Curing temp.(C)	1	2	3	4	5
120		Em-1	Em-2	Em-3	
130		Em-4	Em-5	Em-6	Em-7
140	Em-8	Em-9	Em-10	Em-11	
150	Em-12	Em-13	Em-14	Em-15	

(a) Pre-and post-cure.

Curing time (Hr) / Curing temp.(C)	(pre/post) 1/1	1/2	1/3	1/4	1/5
120/130 (pre/post)	Em-16	Em-17	Em-18	Em-19	Em-20
120/140	Em-21	Em-22			
120/150	Em-23	Em-24		Em-25	
130/140	Em-26		Em-27	Em-28	

경화조건의 설정은 MNA가 90[°C]까지는 비활성이므로 표1과 같이 경화온도와 시간을 규정하였고 경화방식은 전경화만을 행하는 경우와 전경화와 후경화를 병행하는 경우로 구분하여 28종의 시료를 제작하였으며 경화 후의 냉각은 항온조내에서 열원을 제거한후 상온에 이르기까지 방치시키는 서냉을 택하였다.

적외선(IR) 스펙트럼과 유전정접(tan δ)의 측정시료는 연마제를 이용하며 표면을 일정하게 유지하였고 시차 열분석(TG-DTA) 시료는 분쇄하여 입도를 60[mesh]로 제작하였다.

절연파괴 실험은 시료의 연면방전을 방지하기 위하여 변압기유내에서 승압속도 400[v/s]로 60[Hz] 교류전압을 인가하면서 파괴치를 측정하고 28종의 시료중 파괴강도가 큰 순으로 7종을 추출하여 트리잉특성을 조사하였다.

절연파괴전압 및 트리잉특성 실험값은 각종별로 10개씩의 시료를 측정하고 최대값과 최소값은 버린 나머지 8개의 평균값을 취하였다.

트리잉 실험에서는 직접접지 방식으로 시료를 접속하여 교류전압 21[kV]를 인가하였고 트리의 길이는 배율 60배의 현미경으로 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

1) 경화특성

그림 2(a)는 BDMA를 부가하고 경화시킨 IR스펙트럼이다. 그림 2(a)에서 활성기인 에폭시환은 895~910[cm⁻¹]의 파수(Wave number)에서 나타나고, MNA의 활성기와 에폭시

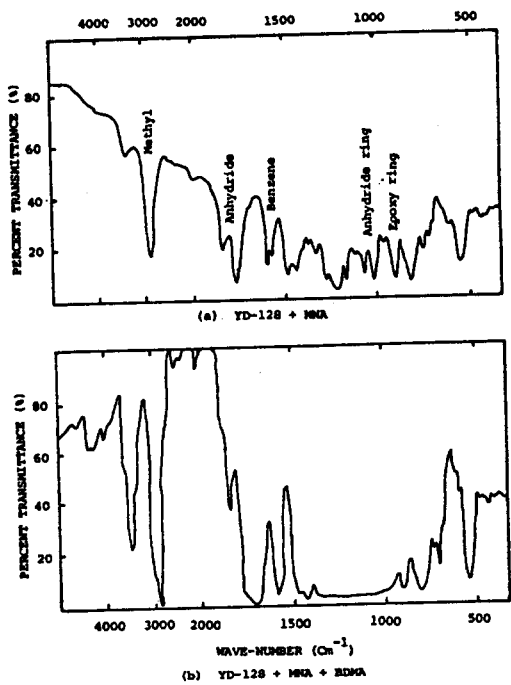


그림 2. 액상 에폭시와 경화된 에폭시 수지의 IR 스펙트럼

Fig. 2. IR Spectrums of liquid epoxy and cured epoxy resin.

환의 화학반응으로 개환반응이 일어나면 에폭시환 내부의 CH₂가 개환반응에 의하여 적외선의 흡수도를 증가시킨다. 따라서 경화가 진행됨에 따라 그림 2(b)와 같이 895~910[cm⁻¹] 파수의 에폭시환 흡수도는 감소하고 2800~2900[cm⁻¹] 파수에서 특성피크가 얻어지는 메틸그룹의 흡수도는 증가하며 경화가 충분히 진행되면 에폭시환의 피크가 소멸된다.

각각의 조건에서 경화된 시료들의 IR스펙트럼은 두께와 경화조건에 따라 빛의 흡수도가 다르므로 이들에 대한 보정이 필요하다. 그러므로 경화된 시료의 두께 보정은 W.A. Patterson⁹⁾ 등의 연구식을 이용하여 0.025 [mm] 두께의 흡수도로 보정하였고, 경화조건

표 2. 경화된 에폭시 수지의 벤젠에 대한 적외선 흡수비

Table 2. Ratio of infrared transmittance of cured epoxy resin to Benzene.

Sample	Infrared wavenumber(Cm-1)				
	2950	1743	1453	1083	915
Em-1	2.287	3.218	X	X	0.419
Em-2	5.499	2.779	X	X	0.139
Em-3	2.577	3.266	X	X	0.143
Em-4	1.661	1.393	0.228	X	0.251
Em-5	3.251	1.434	X	X	0.249
Em-6	1.750	1.081	0.093	X	0.186
Em-7	1.441	1.193	0.385	X	0.274
Em-8	6.206	1.540	X	X	X
Em-9	5.539	1.813	X	X	1.135
Em-10	6.343	2.045	X	X	0.136
Em-11	6.622	6.857	X	X	X
Em-12	3.366	1.341	X	X	0.142
Em-13	2.556	1.476	X	X	0.210
Em-14	2.921	2.692	0.256	X	0.265
Em-15	2.668	1.339	X	X	0.200
Em-16	5.372	1.530	X	X	0.157
Em-17	2.082	1.663	X	X	0.306
Em-18	2.230	3.476	0.177	X	0.278
Em-19	1.437	1.260	0.300	X	0.273
Em-20	0.191	0.956	0.194	X	0.242
Em-21	3.930	1.350	X	X	0.127
Em-22	2.714	1.357	0.108	X	0.191
Em-23	5.216	1.715	X	X	0.129
Em-24	3.384	1.125	X	X	0.164
Em-25	2.667	1.067	0.133	X	0.239
Em-26	3.270	1.030	X	X	0.165
Em-27	1.852	1.333	0.225	X	0.275
Em-28	1.295	X	X	X	0.187

에 대한 보정은 경화할때 얻어지는 가교에 의하여 흡수도가 변하지 않으며 가장 강한

결합을 하고있는 벤젠링(C=C)의 흡수도를 기준으로 하여 흡수도의 비율값으로 보정하였다. 벤젠링의 특성파이크는 적외선 파수 1600~1630[cm⁻¹]에서 얻을 수 있었고, 각 특성파이크들의 보정값은 표2에 나타났다.

표2에서 경화온도 및 시간변화에 따라 경화된 시료들에서 얻어진 적외선 밴드들의 파이크 특성은 파수 915[cm⁻¹]에서 특성파이크가 얻어지는 에폭시 환의 흡수도가 감소함에 따른 2950[cm⁻¹] 파수의 메틸 흡수도의 증가, 1743[cm⁻¹] 파수의 에스테르 흡수도의 증가 및 1453[cm⁻¹] 파수에서 얻어진 변성메틸의 생성 등 세가지 특성을 나타냈다.

E_m-1과 E_m-2 시료를 비교하면 에폭시기와 카르복실기의 반응으로 에폭시환의 감소에 따라 메틸이 증가하는것을 알 수 있으며 E_m-1과 E_m-3을 비교하면 에폭시환의 감소와 더불어 에스테르의 흡수도가 증가하며 에스테르 흡수도의 증가는 산무수물과 알콕시의 가교반응으로 얻어진다. 변성메틸의 흡수도가 나타나는 경화온도 130[°C]에서 경화된 E_m-4, 6 및 E_m-7 시료의 적외선 특성에서 에폭시 수지의 열변형이 시료 내부에서 일어났음을 알 수 있고, 변성메틸의 생성온도는 MNA의 열변형 온도(130[°C])와 일치하였다. 따라서 적외선 파수가 1453[cm⁻¹]인 변성메틸의 성장은 MNA의 열변형 및 에폭시 수지 말단의 열변형에 의한 재생성5과 재개시화가 생성의 원인으로 생각된다.

전경화만으로 경화를 행한경우 경화온도 120[°C]에서 3[Hr] 동안 경화시킨 E_m-2, 130[°C]에서 3[Hr] 경화한 E_m-5, 140[°C]에서는 1[Hr] 경화한 E_m-8, 150[°C]에서는 1[Hr] 경화를 행한 E_m-12 시료가 각 온도조건에서 에폭시환의 적외선 흡수 피이크가 가장 적어

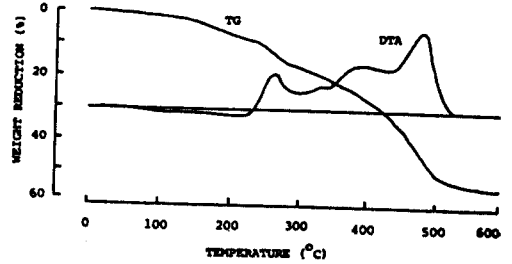


그림 3. 경화된 에폭시 수지의 시차 열분석도
Fig. 3. TG-DTA Thermograms of cured epoxy resin.

주어진 온도와 시간조건에서 경화상태가 나타났다.

첫째, 에폭시 환이 감소하고 메틸 및 에스테르가 증가하면 ε₁이 증가하고 ε₂ 및 C는 감소하였다.

둘째, 메틸의 증가가 에스테르 증가보다 크

표 3. 경화된 에폭시 수지의 표준시료(Ca(COO)₂H₂O)에 대한 발열 면적비

Table 3. Ratio of exothermic area of cured epoxy resin to standard sample (Ca(Coo)₂H₂O).

Sample	Exothermic area ratio	Sample	Exothermic area ratio
Em-1	106.84	Em-15	94.78
Em-2	35.85	Em-16	103.02
Em-3	56.43	Em-17	91.25
Em-4	70.10	Em-18	90.17
Em-5	58.32	Em-19	88.42
Em-6	143.58	Em-20	85.87
Em-7	102.15	Em-21	89.28
Em-8	68.72	Em-22	86.44
Em-9	62.46	Em-23	85.32
Em-10	40.77	Em-24	87.85
Em-11	50.66	Em-25	88.75
Em-12	68.54	Em-26	94.62
Em-13	57.37	Em-27	107.43
Em-14	66.35	Em-28	78.90

면 ϵ_1 이 증가하고 ϵ_2 및 C는 감소하였고 이 결과는 E_m-8과 E_m-9시료의 비교에서 얻을 수 있었다.

셋째, E_m-4, 5, 6 및 E_m-7의 시료의 비교에서 변성매질의 생성에 따라 ϵ_1 이 감소하고 ϵ_2 및 C가 증가하였다.

네째, E_m-1에서부터 E_m-7까지의 시료를 비교한 결과 경화시간의 증가에 따라 ϵ_1 은 증가하고 ϵ_2 는 경화시간 3[Hr]를 초과하면 오히려 증가하였다.

다섯째, 경화온도 140[°C]와 150[°C] 부근에서 2[Hr]이내로 경화를 행할 때 유전특성이 우수하였다.

에폭시 수지는 고분자 합성수지중 열방산률이 낮은 물질이므로 손실전력에 의한 발생열은 대부분이 시료내부에 축적되고 축적된 열에 의해 시료의 절연 특성이 저하된다.

손실 전력량은 동일 주파수에서 정전용량과 유전손율의 곱에 비례하므로 표4를 표2의 적외선 스펙트럼과 비교하여 고찰하면 파수 915[cm⁻¹]의 에폭시환이 감소하면서 2950[cm⁻¹]파수의 메틸이 증가할때 손실전력이 가장 적었다. 따라서 유전특성이 우수한 에폭장 우수함을 알수 있었다.

전경화와 후경화를 병행한 경우는 각 온도 및 시간조건에서 E_m-15, E_m-21, E_m-23 및 E_m-26의 경화상태가 가장 우수하므로 경화의 전소요시간이 2[Hr]를 초과하면 오히려 경화상태가 나빠졌고 결과는 고온의 Tg에서 경화상태를 연구한 L.C.Chan⁷⁾ 등의 연구와 일치하여 과다한 가열은 경화에 유익하지 못함을 알 수 있었다.

그림3은 시차 열분석도(TG-DTA)로서 발각 시료의 TG-DTA 특성곡선에서 발열부분의 면적을 비교하기 위하여 동일조건에서

표 4. 경화된 에폭시 수지의 유전특성

Table 4. Dielectric characteristics of cured epoxy resin.

Sample No.	Capacitance (uF)	Dielectric Constant	Dielectric loss factor	tan δ
Em-1	5.69	3.40612	0.00895	0.00263
Em-2	4.21	3.42154	0.00668	0.00195
Em-3	5.06	3.50322	0.00845	0.00241
Em-4	7.18	3.44820	0.00845	0.00245
Em-5	4.32	3.46068	0.00770	0.00222
Em-6	5.55	3.29303	0.00708	0.00215
Em-7	6.23	3.30233	0.00963	0.00292
Em-8	4.82	3.33456	0.00690	0.00207
Em-9	6.96	3.20026	0.00897	0.00280
Em-10	8.53	3.27352	0.00879	0.00269
Em-11	5.47	3.33931	0.00847	0.00254
Em-12	4.42	3.45930	0.00681	0.00197
Em-13	4.03	3.42110	0.00808	0.00236
Em-14	4.89	3.46391	0.00935	0.00270
Em-15	6.53	3.39629	0.00855	0.00252
Em-16	5.72	3.35116	0.00797	0.00238
Em-17	7.04	3.33187	0.01597	0.00479
Em-18	5.91	3.34446	0.00871	0.00260
Em-19	5.44	3.36127	0.00874	0.00260
Em-20	6.15	3.56915	0.00899	0.00252
Em-21	5.56	3.39591	0.01187	0.00350
Em-22	7.62	3.24193	0.00836	0.00258
Em-23	4.25	3.34532	0.02254	0.00674
Em-24	5.12	3.50539	0.00665	0.00190
Em-25	5.28	3.36184	0.02938	0.00874
Em-26	4.51	3.28485	0.00871	0.00265
Em-27	5.99	3.33769	0.00787	0.00236
Em-28	4.75	3.44836	0.00562	0.00163

측정한 표준시료인 Ca(COO)₂H₂O의 발열부분 면적을 기준값인 1로하고 각각의 시료의 면적비를 구한다음 결과를 표3에 나타냈다.

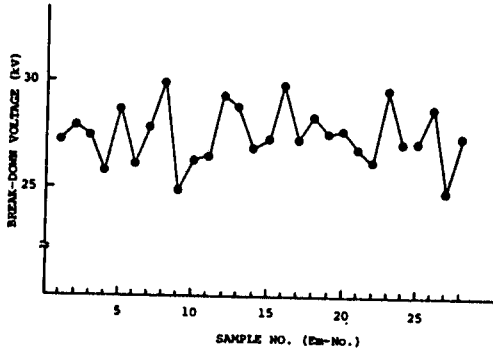


그림 4. 경화된 에폭시 수지의 절연파괴전압
Fig. 4. Break-down voltage of cured epoxy resin.

표3의 결과는 표2의 IR스펙트럼에 의한 경화상태의 분석과 동일한 특성을 보였고 불순물의 피이크인 δ 는 파수 $1453[\text{cm}^{-1}]$ 의 변형생열량의 곡선은 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ 의 피이크를 보이며 α 는 미반응 에폭시, β 는 경화제의 촉매작용, γ 는 이온화 반응에 의하고 δ 는 불순물에 의하여 얻어진다. 따라서 α 피이크로서 경화상태를 쉽게 비교할 수 있으며 β, γ 및 δ 피이크는 절연특성을 저하시키는 인자로 작용한다. 그러므로 DTA 곡선에서의 발열부분의 면적은 온도에 따른 열적내력과 절연내력을 나타내므로 경화상태와 절연내력의 우열을 면적비로 비교할 수 있다.

메틸이 성장함에 따라 증가하였다.

2) 전기적 특성

에폭시 수지를 전기 절연재료로 사용시 열로되어 소비되는 손실전력량은 인가전압과 정전용량이 일정할 경우 $\tan \delta$ 값에 의존한다. 경화상태에 따른 유전특성을 고찰하기 위하여 주위온도 $25[^\circ\text{C}]$, 주파수 $100[\text{Hz}]$ 에서 측정된 정전용량(C), 유전율(ϵ_1), 유전손율(ϵ_2) 및 유전정점($\tan \delta$)값을 표4에 나타냈다.

표4에서 유전특성과 경화상태의 분석치를 비교하여 고찰한 결과 다음 5가지의 특성을

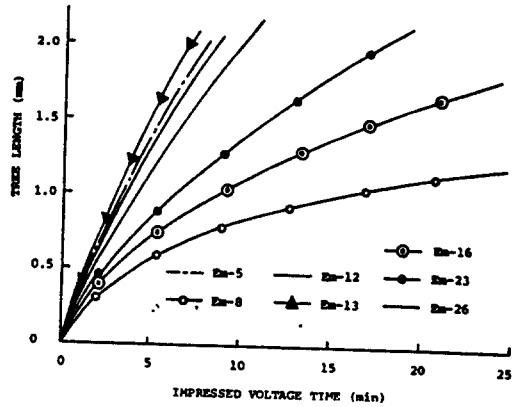


그림 5. 트리잉 진전특성

Fig. 5. Treeing processing characteristic curve.

시 수지의 경화는 가교반응이 에폭시기와 카르복실기의 사이에서 일어날때 얻어짐을 알 수 있었다.

그림4는 경화된 에폭시 수지를 불평등 전계하에서 절연파괴 실험을 하고 그 결과를 나타낸 것이다.

파괴전압은 $140[^\circ\text{C}]$ 에서 $1[\text{Hr}]$ 동안 경화시킨 E_m-8 시료의 평균치가 $29.8[\text{kV}]$ 로 가장 높고, $120[^\circ\text{C}]$ 에서 $1[\text{Hr}]$ 전경화를 행한 후 $130[^\circ\text{C}]$ 에서 $1[\text{Hr}]$ 후경화한 E_m-16 시료가 $29.7[\text{kV}]$, $120[^\circ\text{C}]$ 에서 $1[\text{Hr}]$ 전경화후 $150[^\circ\text{C}]$ 에서 $1[\text{Hr}]$ 후경화한 E_m-23 시료가 $29.4[\text{kV}]$ 의 순으로 낮아졌다. 이 결과를 비스페놀 A의 용점($153\sim 154[^\circ\text{C}]$)과 MNA의 열변형 온도($130[^\circ\text{C}]$)를 비교하면 고온에서의 과다한 가열이 시료의 내부에서 변형을 일으키고 있음을 알 수 있다.

그림5는 시료중 절연특성이 우수한 7종의 시료를 추출하여 트리잉 시험을 행하고 그 진전특성을 나타냈다.

트리의 진전특성은 초기에 트리의 가속이 빠르나 트리가 약 $0.5[\text{mm}]$ 진전한 이후에는 가속의 완화를 가져왔다. 트리잉 가속의 완화

는 트리가 진전할때 생성되는 가스가 트리 지내에 충전하여 지내의 압력을 상승시키기 때문에 압력증가에 의한 도전성의 감소에서 트리의 감속이 일어난 것으로 생각된다.

이상의 결과로부터 에폭시 수지의 전기 절연특성은 경화의 진행중 수반하여 얻어지는 가교에 의하여 결정되며 일반적으로 경화상태가 우수하면 절연특성은 증가하나 엄격하게는 가교의 형태에 따라 절연특성이 결정됨을 알수 있었으며 본 실험에서는 적외선 파수 $915[\text{cm}^{-1}]$ 의 에폭시 환이 감소하고 $2950[\text{cm}^{-1}]$ 의 메틸이 증가하며 $1453[\text{cm}^{-1}]$ 의 변성메틸이 생성되지 않는 경화를 할때 전기 절연 특성이 우수한 에폭시 수지가 얻어졌다.

4. 결 론

에폭시 DGEBA에 경화제로 산 무수물(MNA)을 혼합하고 촉진제로 3급 아민인 BDMA를 부가하여 경화온도 및 경화시간을 변화시키면서 경화한후 경화상태의 해석과 전기적 특성을 조사하고 이들의 연관성을 비교, 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 에폭시 수지의 경화는 경화제의 활성기와 에폭시 환의 개환반응으로 일어났고, 개환반응은 적외선 스펙트럼 파수에 나타난 특성 피크들의 진동에서 경화반응이 활성기 사이의 반응으로 일어남을 확인하였다.

2) 가교상태와 전기 절연특성을 비교, 분석한 결과 적외선 파수 $915[\text{cm}^{-1}]$ 에 나타난 에폭시 환의 흡수도가 감소하고 $2950[\text{cm}^{-1}]$ 파수의 메틸과 파수 $1743[\text{cm}^{-1}]$ 의 에스테르의 흡수도가 증가하며 $1453[\text{cm}^{-1}]$ 파수의 변성메틸이 생성되지 않는 가교를 얻을 때 전기 절연특성이 우수한 에폭시 수지가 된다는 것을 구명하였다.

3) 에폭시 수지의 트리의 진전특성은 초기에 트리의 가속이 빠르나 트리가 약 $0.5[\text{mm}]$ 진전한 후에는 가속의 완화를 가져왔다. 가속의 완화는 트리가 진전할 때 생성되는 가스가 트리 지내에 충전하여 압력을 상승시키기 때문이다.

4) 본 실험에서는 전경화만으로 경화하는 경우 $140[^\circ\text{C}]$ 에서 1[Hr], 전경화와 후경화를 병행하는 경우는 $120[^\circ\text{C}]$ 에서 1[Hr] 후경화를 행한 경우 우수한 에폭시 수지를 얻을수 있었다.

이상의 실험에서 에폭시 수지의 경화상태와 전기 절연특성의 연관성을 구명하고 우수한 절연성을 가진 에폭시 수지를 얻을 수 있는 경화조건을 제시하였으나, 경화 가속제와 전압 안정제 등의 첨가에 따른 활성기들의 다양한 결합반응과 무기질 충전제와의 복합재료의 대한 전기적 특성과의 연관성에 대해서도 많은 연구가 계속되어야 할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- 1) S. Lunak, K. Dusek; *J. of Appl. Polym. Sci.* **5**, 45-55. (1975)
- 2) M. T. Arnhime, J. K. Gillhanm; *J. of Appl. Scil*, **29**,2017-2020, (1984)
- 3) T. G. Fox, S. Loshaek; *J. of Polym. Sci.*, **15** 371-390, (1955)
- 4) J. L. Rachich, J. A. Koutsky; *J. of Appl. Polym. Sci.*, **20**. 2111-2129, (1976)
- 5) A. N. Gent, R. H. Tobias; *J. of Polym. Sci.*, **20**, 2051-2058, (1982)

- 6) J. L. Binter, J. L. Rushford, W. S. Rose, D. L. Hunston, C. K. Riew; *J. Adhesion*, **13**, 3-28, (1981)
- 7) J. K. Gillham, L. C. Chan, H. N. Nae; *J. Appl. Polym. Sci.*, **29**, 3307-3327, (1984)
- 8) J. H. Mason; *Elect. Engrs*, **102c**, 254(1955)
- 9) W. A. Patterson; *Anal. Chem.* **26**, 923-834, (1954)
- 10) R. B. Prime; *Polym. Eng.*, **13**, 365-371, (1973)

(1989년 8월 19일 접수)