

## 2, 3 성분 상호침입망목 에폭시 복합재료의 절연 파괴 특성에 관한 연구

논문  
9-4-5

### A Study on the Dielectric Breakdown Properties of two and three Interpenetrating Polymer Network Epoxy Composites

김명호\*, 김경환\*\*, 손인환\*\*, 이덕진\*\*, 장경욱<sup>§</sup>, 김재환\*

(Myung-Ho Kim, Kyung-Hwan Kim, In-Hwan Son, Deok-Jin Lee, Kyung-Uk Chang, Jae-Hwan Kim)

#### Abstract

In this study, in order to investigate the applicability of IPN structure to epoxy resin which has been widely used as electrical and electronic insulating materials, DC dielectric breakdown properties and morphology were compared and analyzed according to variation of network structure, using the single network structure specimen formed of epoxy resin alone, interpenetrating polymer network specimen formed of epoxy resin/methacrylic acid resin, and interpenetrating polymer network specimen formed of epoxy resin/methacrylic acid resin/polyurethane resin.

As results of the measurement of DC dielectric breakdown strength at 50[°C] and 130[°C], IPN specimen formed of epoxy resin 100[phr] and methacrylic acid resin 35[phr] was the most excellent, and which corresponded to the SEM phenomena. The effect of IPN was more remarkable at high temperature region than at low temperature region.

It is supposed that the defect of epoxy resin, dielectric breakdown strength is lowered remarkably at high temperature region, be complemented according to introducing IPN method.

**key words(중요용어)** : 단일망목(Single network), 상호침입망목(Interpenetrating polymer network), 뒤얽힘 (Entanglement), 절연파괴강도(Dielectric breakdown strength)

#### 1. 서론

고분자 구조의 상호침입망목(Interpenetrating Polymer Network, 이하 IPN)이란 두 종류 또는 그 이상의 중합 개시제를 사용하여, 고분자 I의쇄(1단 망목)와 화학적으로 서로 다른 고분자 II(2단 망목) 또는 III의쇄(3단 망목)가 완전하게 뒤얽히게 되는 다중 망목 구조체(multiple network polymer)이다.<sup>1,2)</sup>

일반적인 고분자 혼합(blending)은 고분자들 간의 열역학적 상반성으로 인하여 다상조직(multi-

phase morphology)을 초래하지만, 이 IPN은 고분자들의 장점(반대되는 특성이라도)을 동시에 가지도록 할 수 있으며, 서로의 상분리를 억제하면서 가교 밀도를 증가시킬 수 있는 유일한 방법이다.<sup>3)</sup>

본 연구에서는 전기·전자 절연재료로 폭넓게 사용되고 있는 에폭시 수지에 IPN 구조의 적용성을 검토하기 위하여, Methacrylic acid 수지와 Polyurethane 수지를 사용하여 망목 구조의 차수(order)가 변화됨에 따른 그 절연파괴 특성과 내부조직 양상(morphology)의 변화를 비교·분석한다.

#### 2. 시편 제작 및 실험 방법

##### 2.1. 시편 제작

##### 2.1.1. 단일 망목 시편 제작

본 실험에 사용한 에폭시수지는 DGEBA (Diglycidyle ether of bisphenol-A)계열의 YD-128(국도화학)이며, 경화제로는 방향족 아민계 경화제인

\* : 경원전문대학 건축설비과

\*\* : 광운대학교 전기공학과

\*\*\* : 경원대학교 전기공학과

§ : 경원전문대학 자동차정비과

접수일자 : 1995년 11월 6일

심사완료 : 1996년 2월 29일

DDM(Diamino Diphenyl Methane, 純正化學)과 촉진제로는 DMP-30[2, 4, 6 tri(Dimethylaminomethyl) Phenol, 純正化學]을 사용하였다. 시료의 구성 배합비 및 경화 조건은 표 1과 같다.

에폭시수지는 경화 반응에서 생성된 수산 기(OH group)에 의한 에폭시 기(Epoxyde group)의 개환 중합과 경화제 DDM에 의한 가교 반응에 의해 3차원의 무정형 단일 망목 구조를 형성한다.<sup>15)</sup>

2.1.2. 상호침입망목 시편 제작

에폭시 수지와 열중합금지제 Hydroquinone(東京化學, 이하 HQ)을 2시간 동안 가열 교반한 후, methacrylic acid(純正化學, 이하 MA) 수지를 첨가하여 1시간 동안 가열 교반하고, 경화제 phthalic anhydride(東京化學, 이하 PA), 중합개시제 dicumyl peroxide(Aldrich, 이하 DICUP)와 N,N benzyldimethylamine(東京化學, 이하 BDMA)를 첨가하여 가열 교반하여 금형에 주입한다.

에폭시 수지는 중합 개시제 DICUP에 의해 라디칼 중합을, 그리고 MA 수지는 중합개시제 BDMA에 의해 이온 중합을 각각 동시에 진행시켜 IPN을 형성하였다. 이러한 과정으로 에폭시수지와 MA 수지는 그림 1과 같은 IPN 구조<sup>16,17)</sup>를 하게 된다. 이렇게 제작된 시편을 표 1에서 EM계열로 표기하였다.

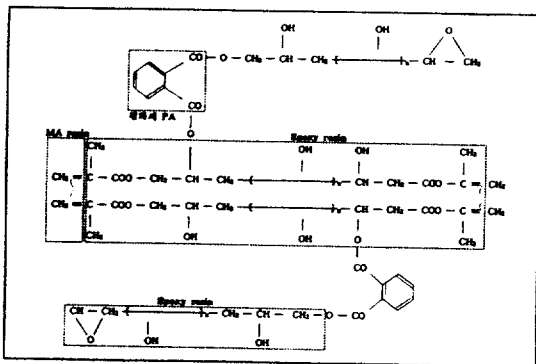


그림 1. 에폭시 수지와 MA 수지의 상호침입망목 구조

Fig. 1. Interpenetrating polymer network structure of epoxy resin and MA resin

Epoxy/MA수지를 1단 망목으로, polyurethane(강남 화성, 이하 PU) 수지를 2단 망목으로 하기 위하여, EM계열 시편 제작 공정의 최종 과정인 BDMA와 DICUP이 첨가되어 가열 교반된 상태에

표 1. 시편의 구성 배합비 및 경화 조건

Table 1. Composite ratio and curing condition of specimen.

단위 : [phr]

시 편		E	EM	EMP	
배 합 비	모 체 수 지	Epoxy	100	100	65
		MA		10,15,20,25,30,35	35
		PU			15,15,25,30,40
	경화제	DDM	27		
		PA		8	6.45
	열중합금지제	HQ		0.16	0.16
경화촉진제	DMP 30	0.5			
			DICUP	0.86	0.48
			BDMA	0.11	0.24
경 화 시 간		90[°C] 2[hr]	130[°C] 3[hr]	130[°C] 3[hr]	
		150[°C] 4[hr]	150[°C] 3[hr]	150[°C] 3[hr]	

표 2. 시편의 종류

Table 2. The kind of specimens

조성 양상	모체 수지 [phr]	[phr]	시편의 분류
단일 망목 구조	Epoxy 수지	100	E 시편
상호 침입 망목 구조	Epoxy 수지(100) + MA 수지	10	EM 10 시편
		15	EM 15 시편
		20	EM 20 시편
		25	EM 25 시편
		35	EM 35 시편
	Epoxy 수지(65) + MA 수지(35) + PU 수지	5	EMP 5 시편
		15	EMP 15 시편
		25	EMP 25 시편
		30	EMP 30 시편
		40	EMP 40 시편

서, 육중합을 하는 PU 수지를 표 1의 배합비로 첨가하였다. 이러한 과정으로 제작된 시편은 IPN<sup>18)</sup> 구조를 형성하게 되며, 이러한 시편들의 분류는 표 2와 같다.

2.2. 실험 방법

절연 파괴 강도는 고전압 발생기(Pulse engineering Co. Ltd)를 사용하여 측정하였다. 절연파괴강도 측정에 사용된 시편과 전극의 형상은 그림 2와 같다. 승압 속도는 500[V/sec]로 절연 파괴가 발생할 때 까지 승압하였다.

파괴 전압을 측정할 경우, 주변 효과를 억제하기 위하여, 진공 건조기에서 탈기 처리를 행한 실리콘유를 주워 매질로 하였다.<sup>9)</sup> 절연 파괴 강도(dielectric breakdown strength, 이하 E<sub>BD</sub>)는 파괴 전압 V<sub>BD</sub>를 전극간 거리로 나누어 구하였으며, 각각의 온도에서 총 15회 반복 실험하여 그 중 최댓값과 최솟값을 제외한 나머지 13회의 결과를 평균하였다. 전극간 거리는 마이크로미터를 이용하여 시편 전체의 두께를 측정한 후 구전극의 직경을 감하여 구하였다.

제작된 시편의 내부 구조를 관찰하기 위하여 전자 주사 현미경(scanning electron microscope, Philips Co.Ltd)을 사용하였다. 가로 3[mm], 세로 3[mm] 시편의 파단면을 1500배로 확대하여 촬영하였다

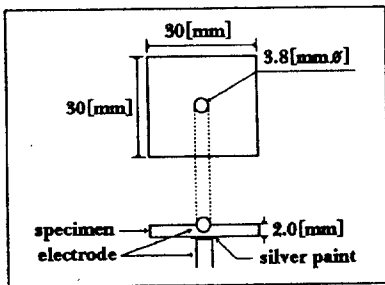


그림 2. 시편과 전극의 형상

Fig. 2. Geometry of specimen and electrode

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 망목 구조 변화에 따른 절연 파괴 강도의 변화

3.1.1. 에폭시 수지와 MA수지의 상호 침입 망목 구조 형상에 따른 절연 파괴 강도 변화

그림 3과 4는 1단 망목을 형성하는 에폭시 수지와 2단 망목을 형성하는 MA 수지의 조성비가 E<sub>BD</sub>에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 50[°C]와 130[°C]에서 행한 직류 절연 파괴 강도의 측정 결과이다. 에폭시 수지 100[phr]에 MA 수지가 10, 15, 20, 25, 35 및 45[phr]의 중량비로 변화되어 첨가될 때, 각 온도에서 동일하게 EM-35 시편의 E<sub>BD</sub>가

가장 높았다.

EM-35 시편의 E<sub>BD</sub>가 가장 높은 것은, 이 영역에서 가장 전형적인 상호 침입 망목 구조 즉 상분리가 제한되면서 분자쇄의 뒤엎히는 수가 가장 이상적으로 증가했다고 생각할 수 있다.<sup>6)</sup> 이러한 현상을 화학양(stoichiometry)적으로 고찰하면, 단량체당 Epoxy 수지의 분자량은 약 187이며 MA 수지의 분자량은 약 86이므로, 187과의 결합 반응에 필요한 화학양적 평형점은 86, 즉 약 46[phr]이 될 것이며, 그 이상의 첨가량에서는 반응을 하지 않는 전기적 불순물로 되기 때문에 E<sub>BD</sub>가 저하된다고 생각된다.

그런데 본 실험에서는 이러한 계산치와 조금 상

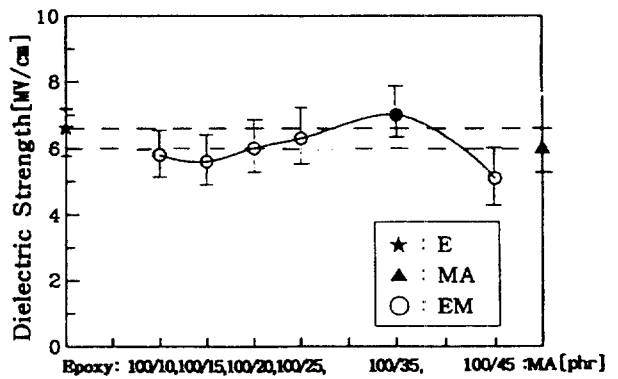


그림 3. Epoxy 수지에 대한 MA 수지 함량 변화에 따른 직류 절연 파괴 강도(50[°C]).

Fig. 3. DC dielectric breakdown strength due to variation of MA resin content on Epoxy resin(50[°C]).

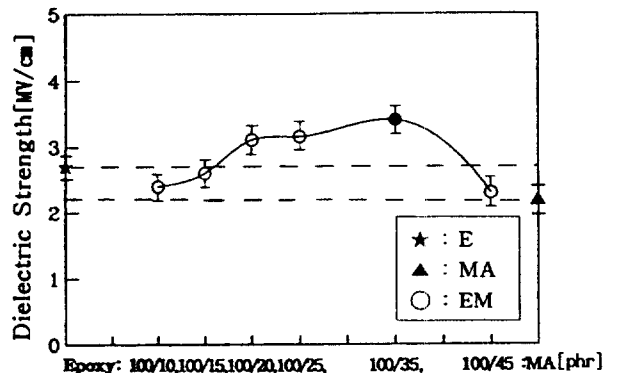


그림 4. Epoxy 수지에 대한 MA 수지 함량 변화에 따른 직류 절연 파괴 강도(130[°C]).

Fig. 4. DC dielectric breakdown strength due to variation of MA resin content on Epoxy resin(130[°C]).

이한 35[phr]에서 최적의 결합양이 되는 현상은, 수지 간의 공중합체는 화학양적 평형점 아래에서 형성된다는 보고<sup>10)</sup>를 바탕으로 이해될 수 있다.

EM 35 이외의 영역에서  $E_{BD}$ 가 저하되는 원인은 3.2.1항의 시편 내부의 조직 양상 변화와 깊은 관계가 있다고 생각된다. EM 35시편의  $E_{BD}$ 와 E시편의  $E_{BD}$ 의 차가 시온보다 고온에서 더욱 큰 이유는 IPN 구조에 의해 MA 수지 분자쇄의 뒤얽힘(Entanglement)이 에폭시 수지 분자 쇠련(segment)의 열운동을 억제<sup>11)</sup>하기 때문이라고 생각된다.

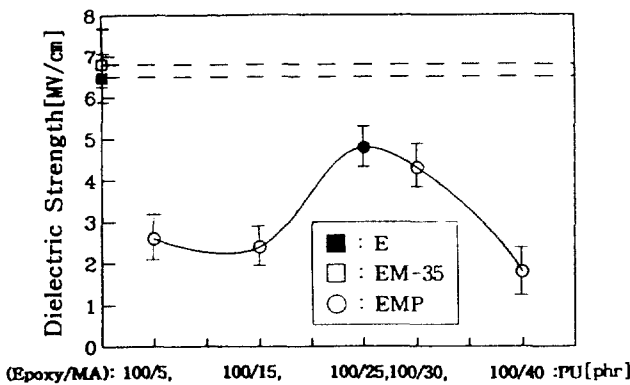


그림 5. Epoxy/MA 수지에 대한 PU 수지 함량 변화에 따른 직류 절연 파괴 강도(50[°C])

Fig. 5. DC dielectric breakdown strength due to variation of PU resin content on Epoxy/MA resin(50[°C]).

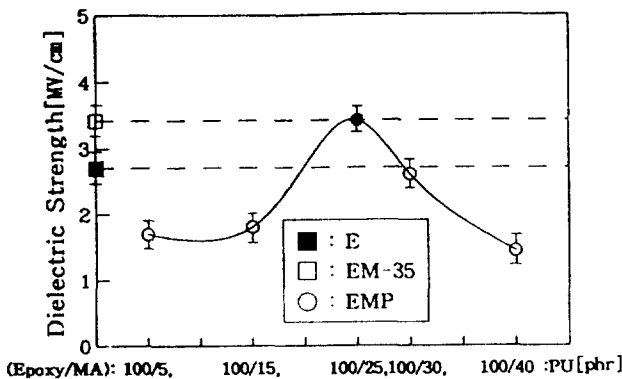


그림 6. Epoxy/MA 수지에 대한 PU 수지 함량 변화에 따른 직류 절연 파괴 강도(130[°C])

Fig. 6. DC dielectric breakdown strength due to variation of PU resin content on Epoxy/MA resin(130[°C]).

### 3-1 2. 에폭시 수지, MA수지 그리고 PU수지의 상호 침입 망목 구조 형성에 따른 절연 파괴 강도 변화

그림 5와 6은 1단 방목을 형성하는 Epoxy/MA 수지와 2단 방목을 형성하는 PU수지의 조성비가  $E_{BD}$ 에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 각각 50[°C]와 130[°C]에서 행한 직류 절연 파괴 강도의 측정 결과이다.

Epoxy/MA수지 100[phr]에 PU수지가 5, 15, 25, 30 및 40[phr]의 중량비로 변화되어 첨가될 때, 50[°C]와 130[°C]에서 동일하게 PU수지 함량 25[phr]에서 그  $E_{BD}$ 가 가장 높았다. 그림 5의 50[°C]에서, EM 35 시편의  $E_{BD}$ 보다도, 그리고 E 시편의  $E_{BD}$ 보다도, Epoxy/MA/PU 상호 침입 망목 시편들의  $E_{BD}$ 가 낮았다.

그러나 그림 6의 130[°C]에서는, EMP 25 시편의  $E_{BD}$ 가 EM 35 시편의  $E_{BD}$ 와 같아지는 결과를 얻을 수 있었다.

1단 방목 구조인 E시편은 격자 구조로 형성되어 있으며, IPN 구조인 EMP 시편은 격자 구조에 분자 쇠의 뒤얽힘이 존재하게 된다. 그런데 이 뒤얽힘의 양은 첨가되는 수지의 양을 조절함으로써 인위적으로 그 양을 조절할 수가 있지만 뒤얽힘에 되는 밀집도의 균일한 배치는 인위적으로 조절할 수가 없기 때문에 국부적으로 그 뒤얽힘은 어느 정도의 차이가 있을 가능성<sup>12)</sup>이 있으며, 또한 가교 과정에서 분자쇄 I이 배치될 때 다른 분자쇄 II의 뒤얽힘이 입체적 장애(Steric hindrance)가 되어 분자쇄 I의 배치를 방해하여 자유 체적을 만들 가능성<sup>13,14)</sup>도 있기 때문에 미시적인 전자의 이동으로 분자 구조의 국부적 전이파괴로 이어지는 전자 시대 파괴만이 존재하는 시온 영역(50[°C])에서는 전술한 가능성들로 인하여 IPN효과를 얻을 수가 없었다고 생각된다. 절연파괴 온도가 130[°C]의 영역은, 분자쇄의 마이크로브라운 운동(Microbrownian motion)에 의한 자유체적 발생에서 기인되는 자유체적 파괴가 지배적인 영역<sup>15)</sup>이므로, IPN 시편 내부에서 분자쇄의 뒤얽힘의 차이가 나타나도 그 뒤얽힘이 분자 쇠련의 열운동을 억제하는 역할을 할 것이므로 이러한 파괴 영역에서는 EMP 25시편의  $E_{BD}$ 가 증가한다고 생각한다. EMP 25 이외의 영역에서  $E_{BD}$ 가 저하되는 원인은 3.1.2.항에서 전술한 화학양론적 고찰과 3.2.2.항의 조직 양상 변화와 관계가 있다고 생각된다.

### 3.2. 망목 구조 변화에 따른 조직 양상의 변화

**3.2.1. 에폭시 수지와 MA수지의 상호 침입 망목 구조 형성에 따른 조직 양상의 변화**

에폭시 수지와 IPN을 형성하는 MA 수지 함량이 변화될 때, 시편 내부에서 변화되는 양상을 전자 주사 현미경으로 관찰한 결과는 사진 1, 2, 3, 4, 5 및 6과 같다.

사진 1과 2에서는 에폭시 수지와 MA 수지가 상용(相容)되지 않음으로 인해서 발생하는 소위 해-도(海-島)구조<sup>6,14,16)</sup>가 뚜렷하게 관찰되며, 사진 3과 4에서는 해-도 구조가 감소되면서 수지간의 상용성이 개선되고 있는 것을 관찰할 수 있다. 사진 5(EM-35 시편)에서는 해-도 구조 형태의 상분리가 전혀 관찰되지 않는다.

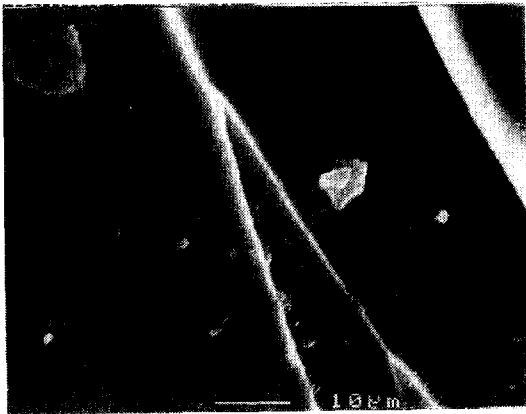


사진 1. 에폭시 수지 100[phr]/MA 수지 10[phr] 시편의 전자현미경 사진

Photo 1. SEM of specimen with Epoxy resin 100[phr]/MA resin 10[phr]

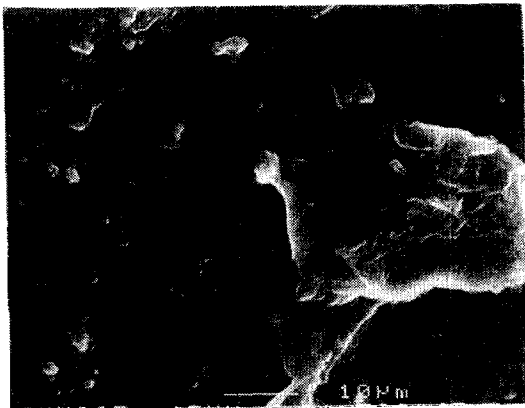


사진 2. 에폭시 수지 100[phr]/MA 수지 15[phr] 시편의 전자현미경 사진

Photo 2. SEM of specimen with Epoxy resin 100[phr]/MA resin 15[phr]

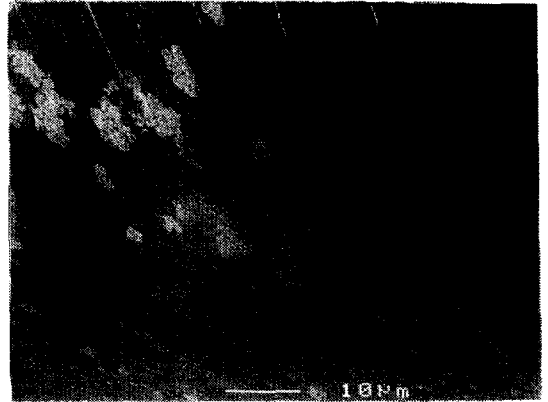


사진 3. 에폭시 수지 100[phr]/MA 수지 20[phr] 시편의 전자현미경 사진

Photo 3. SEM of specimen with Epoxy resin 100[phr]/MA resin 20[phr]

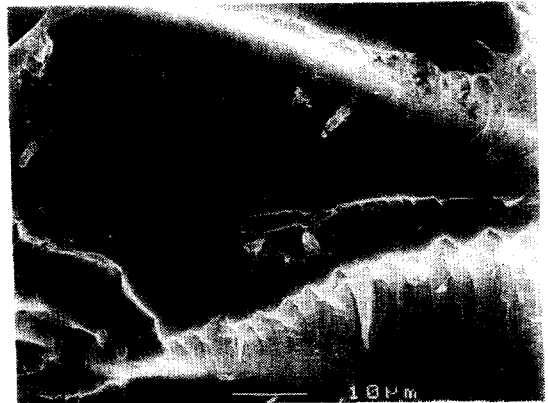


사진 4. 에폭시 수지 100[phr]/MA 수지 25[phr] 시편의 전자현미경 사진

Photo 4. SEM of specimen with Epoxy resin 100[phr]/MA resin 25[phr]



사진 5. 에폭시 수지 100[phr]/MA 수지 35[phr] 시편의 전자현미경 사진

Photo 5. SEM of specimen with Epoxy resin 100[phr]/MA resin 35[phr]



사진 6. 에폭시 수지 100[phr]/MA 수지 45[phr] 시편의 전자현미경 사진  
Photo 6. SEM of specimen with Epoxy resin 100[phr]/MA resin 45[phr]

사진 6에서는 다시 작은 해-도 구조와 공동(空洞)이 관찰된다.

이러한 해-도 구조, 공동 및 상의 분리가 시편들의 E<sub>BD</sub>를 저하시키는 원인이라고 생각된다.

### 3.2.2. 에폭시 수지, MA수지 그리고 PU수지의 상호 침입 망목 구조 형성에 따른 조직 양상 변화

Epoxy/MA 수지와 IPN을 형성하는 PU수지 함량에 따라 변화되는 시편의 내부 구조를 전자 주사 현미경으로 관찰한 결과는 사진 7, 8, 9, 10 및 11과 같다.

사진 7에서는 Epoxy/MA수지와 PU수지가 상용되지 않은 작은 해-도 구조가 관찰되며, 사진 8에서는 상의 분리<sup>16,17)</sup>가 관찰되며, 사진 9(EMP-25)에서는 상의 분리는 감소되었으나 Epoxy/MA수지와 PU수지간의 결합의 형태가 서로 경계를 이루면서 분리되어 있는 것으로 관찰된다. 이러한 구조로 인하여 저온 영역(50[°C])에서 EMP-25 시편의 E<sub>BD</sub>가 저하된다고 생각된다.

사진 10과 11에서는 PU수지의 함량이 많아짐에 따라 다시 뚜렷한 상분리가 관찰된다. 이것이 E<sub>BD</sub> 저하의 원인이라고 생각된다.

모든 시편들의 E<sub>BD</sub> 측정 결과가 전자 주사 현미경의 관찰 결과와 일치하고 있으며, EMP-25 시편보다 EM-35 시편의 E<sub>BD</sub> 측정 결과가 전자 주사 현미경의 관찰 결과가 우수한 것으로 미루어, IPN의 망목이 형성되는 차수(order)는 그 결과적인 IPN의 조직 양상과 특성에 강하게 영향을 미친다고 생각된다.

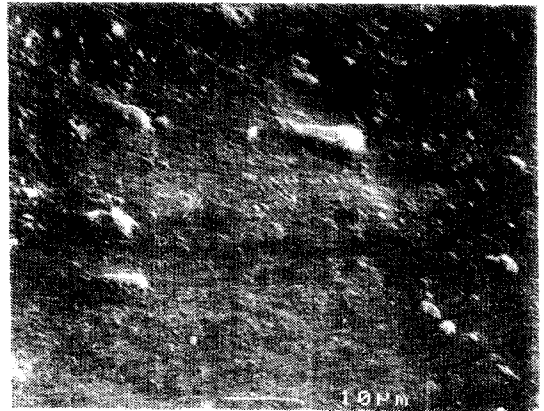


사진 7. (Epoxy/MA) 수지 100[phr]/PU 수지 5[phr] 시편의 전자 현미경 사진  
Photo 7. SEM of specimen with (Epoxy/MA)resin 100[phr]/PU resin 5[phr]



사진 8. (Epoxy/MA) 수지 100[phr]/PU 수지 15[phr] 시편의 전자 현미경 사진  
Photo 8. SEM of specimen with (Epoxy/MA)resin 100[phr]/PU resin 15[phr]



사진 9. (Epoxy/MA) 수지 100[phr]/PU 수지 25[phr] 시편의 전자 현미경 사진  
Photo 9. SEM of specimen with (Epoxy/MA)resin 100[phr]/PU resin 25[phr]

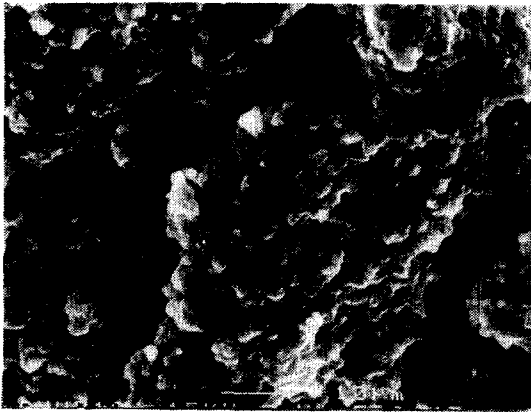


사진 10. (Epoxy/MA) 수지 100[phr]/PU 수지 30[phr] 시편의 전자 현미경 사진

Photo 10. SEM of specimen with (Epoxy/MA)resin 100[phr]/PU resin 30[phr]

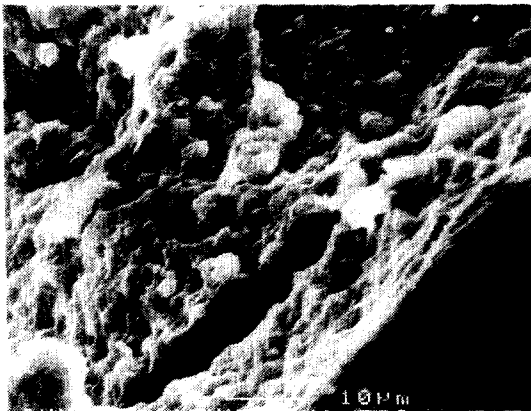


사진 11. (Epoxy/MA) 수지 100[phr]/PU 수지 40[phr] 시편의 전자 현미경 사진

Photo 11. SEM of specimen with (Epoxy/MA)resin 100[phr]/PU resin 40[phr]

#### 4. 결 론

에폭시 수지만으로 모체 수지가 형성된 단일 망목 시편, epoxy/methacrylic acid 수지로 모체 수지가 형성된 상호침입망목 시편 그리고 epoxy/methacrylic acid /polyurethane 수지로 모체 수지가 형성된 상호침입망목 시편을 사용하여 망목 구조의 차수가 변화됨에 따른 직류 절연과피 특성과 내부 조직 양상을 비교 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 50[°C]와 130[°C]에서 에폭시 수지 100[phr]에 methacrylic acid 수지 35[phr]이 첨가된 상호침입망목 시편의 절연과피강도가 가장 우수하였다. 에폭시 단일망목 시편의 절연과피강도 보다

매우 높았으며, 분자쇄의 뒤얽힘이 분자쇄편의 열운동을 억제하여 50[°C]에서 보다는 130[°C]에서 상호침입망목 효과가 더욱 두드러졌다.

2. epoxy/methacrylic acid 수지 100[phr]에 polyurethane 수지 25[phr] 함량에서 그 절연과피강도가 가장 높았다. 50[°C]에서는 여타 시편들의 절연과피강도보다 가장 낮았지만, 130[°C]에서는 에폭시 단일망목 시편의 절연과피강도보다 높고, epoxy/methacrylic acid 상호침입망목 시편의 절연과피강도와 같았다. 상온보다는 고온 영역에서 상호침입망목 효과가 두드러졌다.
3. 에폭시 수지 100[phr]에 methacrylic acid 수지 함량 35[phr]과 epoxy/methacrylic acid 수지 100[phr]에 polyurethane 수지 25[phr]이외의 함량에서는 상의 분리, 해도 구조 및 공동이 관찰되었으며, 이러한 현상이 관측된 시편의 절연과피강도는 상대적으로 낮게 나타났다. 에폭시 절연 재료는 고온영역에서 그 절연과피강도가 현저하게 저하되는 결점이 있는데, 상호침입망목 구조가 이러한 결점을 보완할 수 있는 유효한 수단이 되리라고 기대한다.

#### 참 고 문 헌

1. D.klempner et al, "Nomenclature of Interpenetrating Polymer Networks", J. Elastoplastics, Vol.5, pp.196-200, 1973.
2. H.L.Frisch et al, "Two and Three Component Interpenetrating Polymer Networks", Polym. Eng & Sci, Mid-june, Vol.25, No.8, pp. 488-493, 1985.
3. K.C.Frisch et al, "Recent Advances in Interpenetrating Polymer Networks", Polym.Eng.Sci, Vol.22, No.17, pp.1143-1152, 1982
4. C.S.Chern et al, "A Kinetic Model for Curing Reactions of Epoxides with Amines", Pol. Eng.Sci, Vol.27, No.11, pp.788-795, 1987.
5. 加門 隆, "種의 아민による 에폭신 樹脂의 硬化 反應", 高分子論文集, Vol.41, No.5, pp. 293-299, 1984.
6. 角田 誠 外 1人, "メタクリル酸 變性 에폭신 樹脂 同時 相互 侵入 網目(SIN)의 動的 粘彈性 および 誘電 緩和 舉動", 高分子 論文集, Vol.48, No.8, pp.505-512, 1983.
7. A.Dubisson et al, "Homogeneous Epoxy-Acrylic Interpenetrating Polymer Networks", Polymer Bulletin 3, pp.391-398, 1980.

8. R.S.Altland et al, "Advances in High-Temperature Fluoropolymer Composites", Wire Tech, Vol.15, No.2, pp.22-25, 1987.
9. IEC Pub.60-1, "High-Voltage Test Techniques", Part 1, 1989.
10. K.H.Hsieh et al, "Interpenetrating Polymer Network of Polyurethane and Unsaturated Polyester", Journal of Materials Science, Vol.26, pp.5877-5882, 1991.
11. 柴山恭一 外 1人, "網目高分子における分子鎖のからみ合い効果", 三菱電氣技報, Vol. 44, No.2, pp.303-308, 1970
12. S.C.Kim, "Interpenetrating Polymer Networks", Polymer, Vol.10, No.6, pp.584-587, 1986.
13. D.Klempner et al, "Topologically Interpenetrating Elastomeric Networks", J. Polym.Sci, Part A-2, Vol.8, pp.921-935, 1970.
14. 日本化学會, "複合材料", 東京大學出版會, 化學總説 No.8, pp.12-36, 1975
15. 吉村 昇 外 5人, "エポキシ樹脂の直流破壊電壓に及ぼす充てん剤の効果", 日本電氣學會誌 A, 102卷, pp.30-50, 1987.
16. 倉持智宏 外 2人, "ポリウレタンとエポキシ樹脂との Interpenetrating Polymer Networks", 工學院大學研究報告, 第63號, pp. 105-112, 1987.
17. Y.Suzuki et al, "Dynamic Mechanical Properties of Interpenetrating Polymer Networks Formed by UV Curing Process", J.Mac.Sci. Phys, Vol.B17, No.4, pp.787-802, 1980.

**저자소개**



**김명호**

1963년 5월 11일생. 1989년 강원대학교 공대 전기공학과 졸업. 1991년 광주대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1992년-1996년 현재 강원전문대학 건축설비과 조교수. 1995년 일본 동경공업대학 전자물리공학과 객원연구원.



**이덕진**

1968년 9월 25일생. 1993년 광주대학교 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 석사. 현재 동 대학원 박사과정.



**김경환**

1959년 11월 25일생. 1982년 중앙대학교 전기공학과 졸업. 1984년 광주대학교 전기공학과 석사. 1990년 동 대학원 전기공학과 박사. 1984년-1995년 일본 동경공업대학 전자물리공학과 6011부 객원연구원. 1991년-1996년 현재 강원대학교 전기·전자공학부 조교수.



**장경욱**

1963년 8월 27일생. 1986년 광주대학교 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 석사. 1993년 동 대학원 전기공학과 박사. 현재 강원전문대학 자동차장비과 전임강사.



**손인환**

1968년 1월 13일생. 1991년 광주대학교 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 석사. 현재 동 대학원 박사과정.



**김재환**

1934년 9월 10일생. 1958년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1975년 홍익대학교 전기공학과 석사. 1983년 동 대학원 전기공학과 박사. 1959년-1973년 한국전력(주) 근무. 1964년 불관서 전력공사 초형 도불 기술연수. 1973년-1975년 홍익공업전문대학 전기과 전임강사. 1975년-1996년 현재 광주대학교 전기공학과 교수.