

와이블 통계를 이용한 나노컴퍼지트 파괴강도의 평가

이강원, 이혁진, 박희두, 김중환*, 신종열**, 이충호***, 홍진웅
 광운대학교, *영화학, **삼육대학교, ***충주대학교

Estimation of Breakdown Properties in Nano-composites using Weibull Statistics

Kang-Won Lee, Hyuk-jin Lee, Hee-doo Park, Jong-Hwan Kim*, Jong-Yeol Shin**, Chung-ho Lee*** and Jin-Woong Hong
 Kwangwoon University, *Young Chemical co., **Sahmyook University, ***ChungJu University

Abstract : Recently, epoxy based nano-composites are being increasingly investigated for their electrical properties, since the introduction of nano fillers demonstrate several advantages in their properties when compared with the similar properties obtained for epoxy systems with micrometer sized fillers. We calculated scale and shape parameter using dielectric strength. In this paper, it is investigated that the allowable breakdown probability of specimens is stable at some value using Weibull statistics. Therefore we found that breakdown probability of specimens is stable until 20 [%].

Key Words : Epoxy resin, Nano-composite, SiO₂, Dielectric strength, Weibull statistic

1. 서 론

최근 나노기술의 발전으로 전 세계적으로 전력기기에 사용하는 절연재료에 나노물질들을 첨가한 다양한 나노복합재료에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다 [1]. 1990년 A. Okada가 Nylon6/Clay 나노복합재료가 처음 발표된 이후 [2], 1994년 T. J. Lewis가 IEEE에 "Nanometric Dielectrics" 라는 나노물성에 관한 논문이 발표되어 나노복합재료의 유전과 절연특성의 바탕이 되었다 [3]. 여기서 나노복합재료는 기존의 고분자 물질에 마이크로 크기의 무기재료를 수십 wt% 혼합한 복합재료 보다 나노 크기의 수 wt% 무기재료를 혼합한 복합재료로 무기재료의 비표면적이 크게 증가하며 고분자 물질과 나노물질의 결합력의 증가한다 [4]. 그로 인하여 절연파괴 강도, 기계적 강도, 내화학성 등이 우수해지고 원재료에서 찾을 수 없는 새로운 특성이 나타나 무기물과 고분자 물질의 장점이 결비된 기존의 절연재료보다 우수한 물성이 나타나는 것으로 보고되고 있다. 이에 본 논문에서는 수명 데이터나 파괴 데이터를 정량적으로 평가에 사용하는 와이블 통계를 이용하여 Epoxy 수지와 나노 SiO₂를 혼합하여 제조한 나노 복합재료의 파괴강도 평가방법을 소개한다 [5][6].

2. 실험

에폭시 수지에 나노 SiO₂의 첨가량을 0 ~ 1.4 [wt%]로 변화를 주어 혼합을 하여, 측정온도 25, 100 [°C]에서 각각 15회를 진행하였다. 실험에서 획득한 절연파괴 데이터를 와이블 통계를 이용하여 절연파괴 시, 절연파괴전압의 분포함수(누적 확률)를 $F(x)$ 라고 할 때 2-파라미터 와이블 확률 분포 함수는 식 (1)과 같다.

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{x_s}\right)^m\right] \quad (1)$$

$F(x)$: 누적 확률 (Accumulative probability)

x : 시료의 측정값

x_s : 척도 파라미터 (누적 확률 63.2 [%]에 해당하는 값)

m : 형상 파라미터

식 (1)과 척도 파라미터(E_{Scale}), 형상 파라미터(E_{Shape}), 허용파괴확률(F)을 이용하여 식 (2)와 같이 허용파괴강도 (E_B)를 예측할 수 있다.

$$E_B = E_{Scale} \cdot \exp\left[\frac{\ln\left(\ln\frac{1}{1-F}\right)}{E_{Shape}}\right] \quad (2)$$

3. 결과 및 검토

표 1은 식 (1)을 이용하여 작성한 첨가량과 온도 변화에 따른 시료의 척도 파라미터와 형상 파라미터를 나타낸 것이다.

표 1. 시료의 척도파라미터와 형상파라미터

Content	Tem.	25 [°C]		100 [°C]	
		E_{Scale}	E_{Shape}	E_{Scale}	E_{Shape}
Virgin		3.17	7.73	1.66	17.17
0.2 [wt%]		3.45	7.59	1.69	18.17
0.4 [wt%]		3.81	7.84	1.76	21.38
0.6 [wt%]		3.57	16.74	1.75	20.97
0.8 [wt%]		3.54	12.42	1.74	16.79
1.2 [wt%]		3.68	6.74	1.76	19.08
1.4 [wt%]		3.26	5.26	1.64	16.07

척도 파라미터는 누적확률이 63.2 [%]일 때의 절연 파괴강도의 값으로, 절연파괴강도가 그 이상이 되면 시료가 파괴가 될 확률이 높아짐을 말한다. 첨가량이 증가함에 따라 0.4 [wt%]까지는 척도파라미터의 값은 증가하고, 그 이상 첨가량이 증가하게 되면 척도 파라미터의 값은 감소함을 알 수 있다. 또한, 측정온도가 상승함에 따라 척도 파라미터의 감소를 확인하였다.

형상 파라미터는 확률분포의 분포형상을 결정하는 파라미터로 형상 파라미터가 커짐에 따라 흐트러짐이 작은 분포가 된다. $E_{Shape}=1$ 에서는 지수분포에 가까운 형태를 갖으며 $E_{Shape}>4$ 에서는 정규분포에 가까운 분포형상이 된다.

모든 시료에서 형상 파라미터는 4 이상으로 정규분포의 형태가 나타남을 알 수 있는데, 0.4 [wt%]일 때 온도가 증가함에 따라 270 [%] 증가하여 모든 시료에서 가장 큰 증가가 나타남을 알 수 있다. 또한 측정온도가 증가하면 형상파라미터의 값이 커지면서 분포가 더욱 좁아지게 되고 절연파괴강도에서 온도가 증가하면 편차가 감소함을 나타낸다.

식 (2)를 이용하여 원시료(25 [°C])에서 파괴확률이 0.1 [%]로 가정하면 허용파괴강도 E_1 은 식 (3)과 같다.

$$E_1 = 3.17 \cdot \exp \left[\frac{\ln \left(\ln \frac{1}{1-0.001} \right)}{7.73} \right] = 1.29 \text{ [MV/cm]} \quad (3)$$

여기서 파괴확률을 0.1 [%]로 하려면 파괴강도를 최대 1.29 [MV/cm]로 해야 한다는 것을 의미하며, 이와 같이 와이블 분포를 이용 허용파괴강도를 예측 할 수 있다.

표 2와 표 3은 파괴확률이 0.01, 0.1, 1, 20 [%]일 때, 온도에 따른 허용파괴강도를 나타낸 것이다. 모든 시료에서 파괴확률을 20 [%]로 할 때 허용파괴강도가 평균파괴강도의 오차 범위 내에 존재함을 확인할 수 있으며, 이것은 파괴 확률이 20 [%]까지 기기설계에서 안정적인 파괴강도 임을 의미하고 그 이상 파괴확률이 증가하면 오차 범위를 벗어나 안정성에 문제가 발생할 것으로 사료된다.

표 2. 첨가량에 따른 허용파괴강도([MV/cm], 25 [°C])

Specimen	E_{ave}	σ	Breakdown probability[%]			
			0.01	0.1	1	20
Virgin	2.99	0.37	0.96	1.29	1.74	2.61
0.2 [wt%]	3.26	0.40	1.02	1.39	1.88	2.83
0.4 [wt%]	3.60	0.43	1.17	1.58	2.12	3.14
0.6 [wt%]	3.47	0.19	2.06	2.36	2.71	3.26
0.8 [wt%]	3.41	0.25	1.68	2.03	2.44	3.13
1.2 [wt%]	3.45	0.49	0.94	1.32	1.86	2.95
1.4 [wt%]	3.01	0.52	0.56	0.87	1.36	2.45

표 3. 첨가량에 따른 허용파괴강도([MV/cm], 100 [°C])

Specimen	E_{ave}	σ	Breakdown probability[%]			
			0.01	0.1	1	20
Virgin	1.62	0.09	0.97	1.15	1.27	1.52
0.2 [wt%]	1.63	0.08	1.05	1.18	1.33	1.56
0.4 [wt%]	1.73	0.07	1.14	1.27	1.42	1.64
0.6 [wt%]	1.70	0.07	1.12	1.26	1.40	1.63
0.8 [wt%]	1.69	0.09	1.00	1.15	1.32	1.59
1.2 [wt%]	1.69	0.08	1.08	1.22	1.37	1.62
1.4 [wt%]	1.60	0.09	0.92	1.07	1.23	1.49

4. 결론

본 논문은 몰딩재료로 사용하는 에폭시 수지에 나노 SiO₂의 첨가량과 측정온도의 변화에 따른 데이터를 와이블 통계를 이용하여 시료의 안정성을 판단한 결과, 허용파괴확률을 20 [%]로 할 때, 허용파괴강도가 평균파괴강도의 오차 범위 내에 존재함을 확인할 수 있으며, 이것은 파괴 확률이 20 [%]까지 기기설계에서 안정적인 파괴강도 임을 의미하며 그 이상 파괴확률이 증가하면 오차 범위를 벗어나 안정성에 문제가 발생할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 과제 결과물은 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다.

참고 문헌

- [1] T. Tanaka, G. C. Montanari and R. Mülhaupt, "Polymer Nano-composites as Dielectrics and Electrical Insulation Perspectives for Processing Technologies, Material Characterization and Future Applications", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. Vol. 11, pp. 763-784, 2004.
- [2] A. Okada, M. Kawakami, Y. Kojima, T. Kurauchi and O. Kamigaito, "Synthesis and Properties of Nylon6/Clay Hybrids", Proc. MRS Symp. Vol. 171, pp. 45-50, 1990.
- [3] T. J. Lewis, "Nanometric Dielectrics", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. Vol. 1, pp. 812-825, 1994.
- [4] T. Tanaka et. al. "Emerging Nanocomposite Dielectrics", Electr. Insul. Vol. 1, No. 5, pp. 812-825, 1994.
- [5] A. Contin, M. Cacciari, G. C. Montanari, "Estimation of Weibull distribution parameters for partial discharge inference", CEIDP, pp. 71-78, 1994.
- [6] E.Y.Wu, J.Sune, W.Lai, "On the Weibull shape factor of intrinsic breakdown of dielectric films and its accurate experimental determination. Part II: experimental results and the effects of stress conditions" Electron Devices, IEEE Transactions on, Vol.49, pp.2141-2150, 2002.