

탄성체의 두께, 종류 및 희석제 함유량이 전기활성 유전탄성체의 구동 성능에 미치는 영향

이빈* · 임정걸* · 류상렬** · 이동주**†

Effects of Thickness, Elastomer Types and Thinner Content on Actuation Performance of Electro Active Dielectric Elastomers

Bin Li*, Zheng-Jie Lin*, Sang-Ryeoul Ryu**, Dong-Joo Lee**†

ABSTRACT: The actuation performance of an EADE (Electro-active dielectric elastomer) is studied as functions of thinner content, thickness and types of the dielectric elastomer such as natural (NR), acrylonitrile-butadiene (NBR), and silicon (KE-12) rubbers. With a decrease in elastomer thickness (1→0.5→0.25→0.1→0.05 mm) and an increase in thinner content (0→30→50 phr), the actuating displacement of KE-12 elastomer is increased, however their breakdown occurs at low voltage. For the same thickness (1 mm), the displacement of KE-12 elastomer shows a higher value (2.24 mm) compared to that of NR or NBR at the same applied voltage of 25 kV. The KE-12 has the lowest elastic modulus and the NBR has the highest one among the tested elastomers. However, the displacement of NBR elastomer is higher compared to that of NR because of high dielectric constant. It is found that the important factors of EADE actuator are a thickness, modulus and dielectric constant of the elastomer.

초 록: 실리콘 KE-12, NBR 그리고 NR 등의 유전 탄성체 종류, 두께 및 희석제 함유량을 함수로 한 전기활성 유전탄성체(EADE) 구동 성능에 대해 연구하였다. 탄성체의 두께(1→0.5→0.25→0.1→0.05 mm)의 감소에 따라 그리고 희석제의 함유량 증가에 따라 KE-12 탄성체의 작동변위는 증가하였지만, 유전파괴는 낮은 전압에서 발생되었다. 동일한 탄성체 두께(1 mm)에 대해서 KE-12의 변위(2.24 mm)는 동일한 전압(25 kV)에서 NBR 혹은 NR보다 더 높게 나타났다. 시험한 탄성체 종류 중 KE-12는 가장 낮은 탄성계수를 NBR은 가장 높은 탄성계수 나타냈다. 하지만, NBR 탄성체의 변위는 높은 유전상수 때문에 NR의 경우 보다 높았다. EADE 구동기의 중요한 요소는 탄성체의 두께, 탄성계수 및 유전상수임을 확인하였다.

Key Words: 전기활성 유전탄성체(electro-active dielectric elastomer), 유전상수(dielectric constant), 전기변형(electrostrictive), 희석제(thinner), 구동기(actuator)

1. 서 론

전기활성 고분자(Electro active polymer, EAP)는 재료 특유의 유연함으로 외부 전압에 따라 큰 변위가 발생하는 소재이다[1]. 실제 근육과 같은 방법으로 작동을 하기 때문에

의학, 의료공학 등에서 로봇, 초소형 비행체, 인공근육 등으로 연구되고 있다[2,3]. 본 논문에서는 중간에 탄성체(Elastomer)가 위치하고 탄성체 상하에 각각 부착된 2개의 전극(Electrode)으로 구성된 간단한 구조의 전기활성 유전탄성체(EADE, Electro-active dielectric elastomer) 구동기

Received 11 November 2013, received in revised form 12 February 2014, accepted 20 February 2014

*영남대학교 기계공학과 대학원

**†영남대학교 기계공학부, Corresponding author (E-mail: djlee@yu.ac.kr)

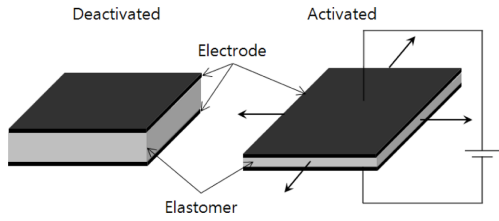


Fig. 1. Structure and working principle of EADE

(Actuator)를 제작하였다. 구동기 동작은 2개의 전극에 전압을 가함으로써 전기변형(Electrostrictive) 효과에 의해 발생하는 힘과 각 전극 내에서 발생하는 상호반발력의 상승 작용으로 Fig. 1과 같이 전극에 대하여 수평방향으로 변형한다. 탄성체의 두께방향 변형(S_z)은 다음 식 (1)에 의해 유전상수(ϵ_r)에 비례하고, 작동 전압(V)의 제곱에 비례한다. 또한 탄성계수(E)에 반비례하고, 탄성체의 두께(t) 제곱에 반비례한다. 구체적으로는 낮은 탄성계수와 높은 유전상수의 탄성체가 높은 전기장에 직면하면 큰 변형을 보인다[4].

$$S_z E = -\epsilon_r \left(\frac{V}{t}\right)^2 \quad (1)$$

본 연구에서는 탄성체의 종류 및 두께, 희석제 함유량, 전극 크기 등에 따른 간단한 형태의 구동기를 제작하여 변위 특성을 평가한다. EAP의 응용에 관한 다양한 연구[5-7]가 진행되고 있지만, 탄성체의 종류 및 두께, 희석제 함유량, 전극 크기 등에 관한 체계적인 연구가 진행되지 않고 있다.

2. 실험

2.1 실험재료 및 제작

논문에서 사용된 전극은 한국 신에츠실리콘의 상온경화(RTV, room temperature vulcanization) KE-12 기지를 기본으로 희석제 80, 카본나노튜브 3.5 그리고 카본블랙 18(phr)를 혼합하여 사용하였다[8]. 이때의 두께는 50~80 μm , 비저항 값은 73($\Omega \cdot \text{cm}$)이었고, 인장강도와 인장탄성율 그리고 신장률은 각각 0.45 MPa, 0.21 MPa, 184%였다.

실험에 사용된 탄성체는 전극 기지와 동일한 KE-12와 합

Table 1. Compounding formulation of NBR and NR

	Content (phr)			
	NBR		NR	
Rubber	35H	100	STR 5L	100
Activator	ZnO	5	ZnO	5
Accelerator	TT	1.2	TT	0.7
	TBBS	2	TBBS	1.5
Vulcanizing Agent	Sulfur	1	Sulfur	2
	Sum.	109.2	Sum.	109.2

성고무인 NBR(Acrylonitrile-butadiene rubber)과 NR(Natural rubber)이었다. KE-12는 계량 후 경화제 1 phr를 첨가하여 혼합하고 진공로에서 1차 진공 5분, 그리고 혼합된 고무를 금형에 붓고 2차 진공(5분)을 하였으며, 최종적으로 상온에서 24시간 경화시켰다. NBR과 NR의 배합표는 Table 1과 같으며 80톤 압축프레스를 사용하여 압축 열성형 하였다. 성형 중의 압력, 온도 그리고 시간은 각각 14 MPa, 170°C 그리고 6'이었다.

2.2 전기적 및 기계적 특성 평가

탄성체의 비저항 측정은 초고압 절연 메타(HIOKI사의 SM-8220)로 평판 시료용 전극(SME-8311)을 사용하였다. 측정 시 ISO 2951, KS M 6773을 참고하였으며, 상온에서 시험편($\Phi 30 \times 1t$)에 500 V를 가하고 10초 후에 측정하였다. 탄성체의 유전상수(ϵ_r) 측정은 ASTM D150을 참고하여 Agilent사의 정밀 임피던스 분석기(4294A)와 유전시험 고정치구(16451B)를 사용하였다. 평판의 접촉 전극법으로 전극의 크기 및 두께는 $\Phi 38 \times 5 \text{ mm}$ 이며, 100 Hz~2 kHz 범위에서의 C_p 값을 측정하고 식 (2)를 이용하여 ϵ_r 을 계산하였다.

$$\epsilon_r = \frac{t \times C_p}{\pi \frac{d^2}{2} \epsilon_0} \quad (2)$$

여기서, t : specimen thickness(m), C_p : Equivalent parallel capacitance(F), d : Guarded electrode's diameter(m), ϵ_0 : Permittivity of free space ($8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$)

인장특성 평가를 위해 LRY Plus(LLOYD Co. Ltd.)를 이용하여 인장시험을 하였다. Fig. 2와 같이 아령형 시험편을 사용하였으며, 실온에서 인장속도는 50 mm/min이었다. 실험의 시료는 4개 이상을 사용하였으며 얻어진 결과는 이들을 산술평균하였다.

2.3 구동기 제작 및 시험

Fig. 3과 같이 탄성체($\Phi 50 \text{ mm}$) 중앙부 측면에 전극($\Phi 30 \text{ mm}$)을 바르고 40°C 오븐에서 4시간 동안 건조하여 구동기를 완성한다. 전극 자체는 매우 약하므로 구리전극으로 전압을 연결한다. 또한 탄성체를 고정하기 위해 절연성이 큰 아크릴 판을 사용하였다. 구동기에 수십 kV의 고전압을 인가해야 하므로 UltrValt사의 고전압 발생장치(40 kV,

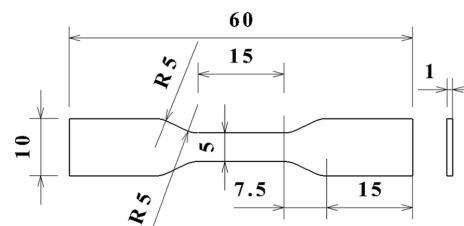


Fig. 2. A schematic of the tensile specimen

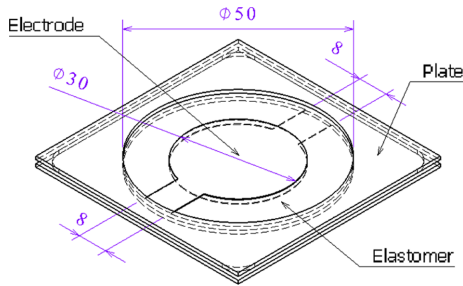


Fig. 3. A schematic of an actuator

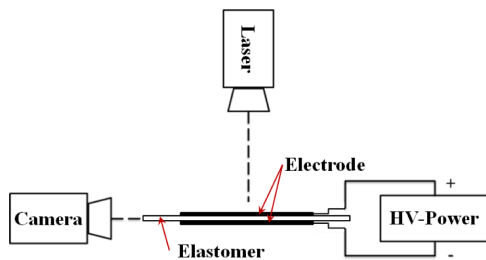


Fig. 4. A schematic of a displacement measurement for the actuator

300 μ A)를 사용하였다. 또한 Fig. 4와 같이 인가전압에 따른 구동기의 변위를 측정하였다. 변위 측정은 레이저(Opto NCDT, MICRO-EPSILON)와 ILD-1302 Tool을 사용하여 구동기 전극 중앙면의 수직변위를 측정하였다. 또한 측면에 카메라를 설치하여 관측하였다.

3. 실험결과 및 토의

3.1 탄성체의 기계적 및 전기적 특성

성형된 각 탄성체의 기계적 특성 및 전기저항 값은 Table 2와 같다. 재료의 강성을 나타내는 인장 탄성계수(Tensile modulus)는 KE-12가 가장 낮았고 NBR이 가장 높았으며, 체적저항의 경우는 KE-12가 가장 높았고 NBR이 가장 낮았다. 여기서 인장 탄성계수는 저변형률($\epsilon = 0.05 \sim 0.2$) 범위의 응력 값을 선형화 하여 얻은 기울기를 의미한다. Fig. 5는 3가지 종류의 탄성체에 대해 주파수 변화에 따른 유전상수 측정결과를 나타냈다. 3가지 탄성체 중 Acrylonitrile 극성기를 가지고 있는 NBR이 가장 큰 유전상수 값을 보였으며, NR이 가장 낮은 값을 나타냈다. 또한 주파수의 증가에 따른 유

Table 2. Mechanical and electrical properties of elastomers

	KE-12	NBR	NR
Hardness (Hs. A)	38	52	41
Tensile strength (MPa)	1.84	3.06	6.40
Elongation (%)	140	321	588
Tensile modulus (MPa)	0.57	2.07	1.17
Volume resistance ($\Omega \cdot \text{cm}$)	3.3×10^{11}	1.6×10^5	2.6×10^{10}

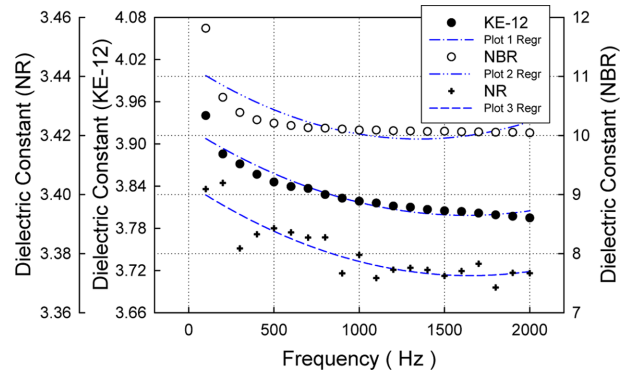


Fig. 5. Effects of frequency and elastomer type on the dielectric constant

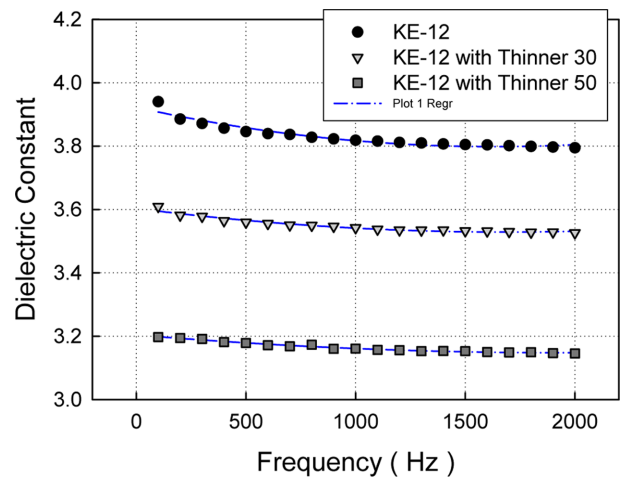


Fig. 6. Effects of frequency and thinner content on the dielectric constant of KE-12 elastomer

전상수 변화를 볼 때 저주파수에서 고주파수로 증가에 따라 유전상수는 감소하는 경향을 보였다. 이러한 고주파로 갈수록 유전상수의 감소는 배향분극 및 공간저하 분극에 기인하는 것으로 알려져 있다[9]. Fig. 6은 KE-12 탄성체에 희석제를 혼합한 경우에 대한 유전상수 측정결과를 보여 준다. 주파수의 증가에 따라 감소하는 경향을 보였으며, 희석제의 함유량이 증가할수록 유전상수 값 또한 감소하였다.

3.2 구동기의 변위측정 결과

최적화된 전극[8]을 이용하여 Fig. 3과 같이 간단한 구조의 구동기를 제작하였다. 전극에 전압을 가하면 전극과 전극 사이의 탄성체는 가장자리 아크칠판의 구속에 의해 전극에 대해 수평방향으로 확장되면서 변형된다. Fig. 7은 탄성체 두께가 1 mm일 때, 전압의 증가에 따른 탄성체별 구동기의 변위측정 결과를 나타냈다. 전극의 기지로 사용했던 KE-12 탄성체의 경우가 동일한 전압에서 다른 두 탄성체들 보다 큰 변위를 나타냈다. 식 (1)에서 두께가 일정하다면 변형율은 유전상수에 비례하고 탄성계수에 반비례한

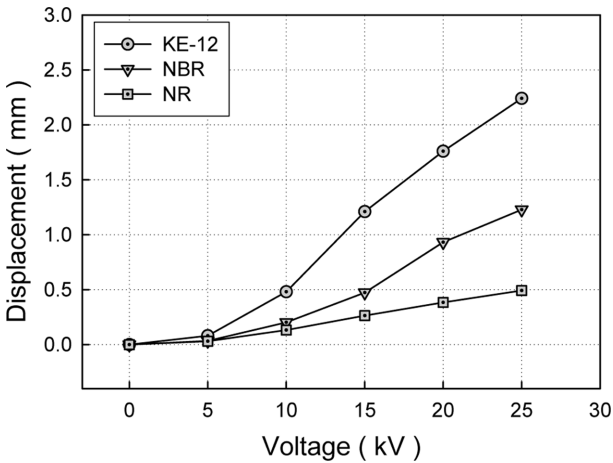


Fig. 7. Effects of elastomer type and voltage on the actuating displacement

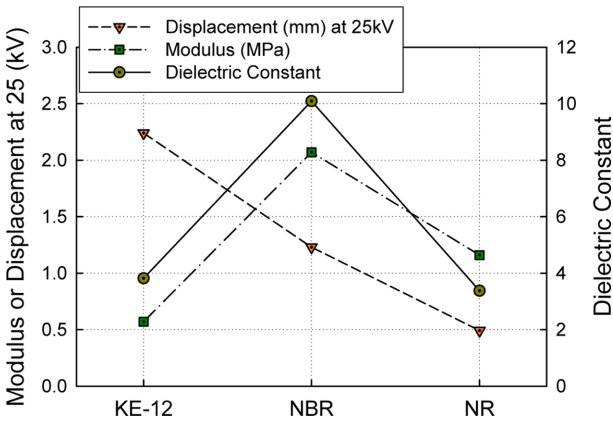


Fig. 8. Comparison of tensile modulus, dielectric constant and displacement for the various elastomers

다. 이러한 탄성체별 특성값과 25 kV에서의 변위값을 Fig. 8에 나타냈다. 여기서 유전상수는 일반적으로 사용하는 1 kHz 일 때의 값을 기준으로 하였다. 탄성계수는 KE-12가 가장 낮아 유리하지만, 유전상수는 NBR의 경우가 가장 높았다. 하지만 NBR의 탄성계수 역시 KE-12의 3배 정도 높아서 변형량에 미치는 영향이 크지 않은 것으로 판단된다. 25 kV에서 변위량(mm)은 KE-12(2.24) → NBR(1.23) → NR(0.49)의 순서로 나타났다. NBR의 경우 NR보다 탄성계수는 1.8 배 높지만 유전상수 값이 3.0배 높기 때문에 변위가 큰 것으로 보인다. NBR은 Acrylonitrile이라는 극성 그룹을 포함하는 합성고무로 높은 유전상수를 나타내고, NR과 EPDM (Ethylene propylene diene monomer) 등은 전형적인 비극성 고무들이다.

희석제를 전극용 재료의 농도 조절[8,10] 용으로 사용했던 것과 유사하게 탄성체의 경우도 Fig. 9와 같이 희석제를 혼합하여 탄성계수를 조절하여 비교하였다. KE-12의 인장강도와 탄성계수(MPa)는 각각 1.84, 0.57이었고, 희석제 30

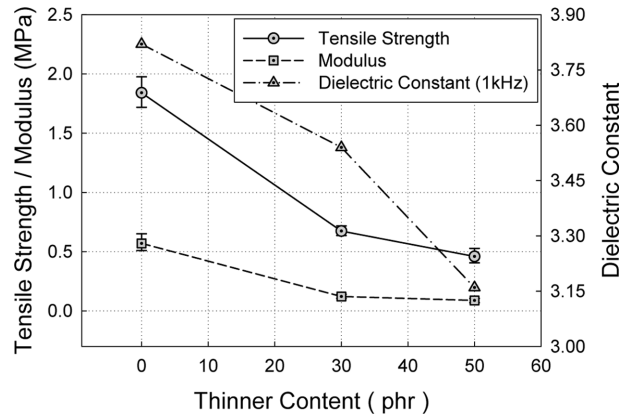


Fig. 9. Effect of thinner content on the tensile properties and dielectric constant of elastomer KE-12

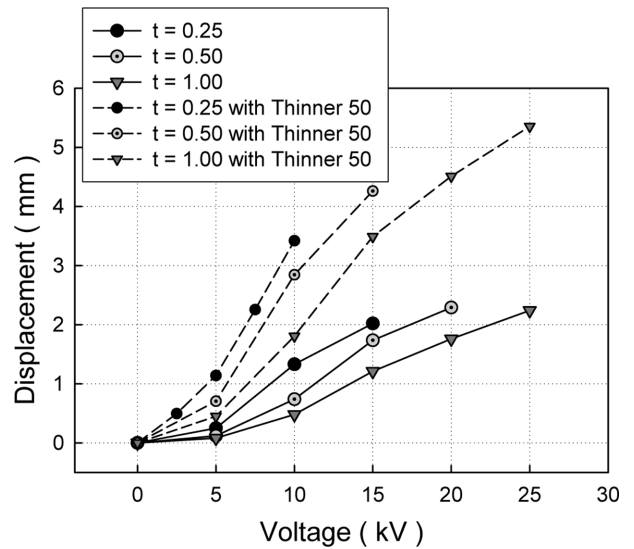


Fig. 10. Effects of elastomer thickness, thinner content and voltage on the actuating displacement

및 50이 함유된 탄성체의 탄성계수는 각각 0.12와 0.08로 크게 감소하였다. 또한 KE-12의 유전상수도 3.82에서 희석제 함유량 증가에 따라 각각 3.54, 3.16로 감소하였다. 희석제의 함유량 증가에 따라 탄성계수는 각각 21%, 14%까지 감소하였지만, 유전상수는 92%, 83% 정도에서 유지되었다. 따라서 희석제가 첨가된 탄성체로 제작된 구동기의 변위는 더 크게 나타날 것이 예측된다. Fig. 10은 KE-12 탄성체에 대해 두께 및 희석제 함유량 변화에 따른 변위 측정결과를 보여준다. 동일한 조건에서 탄성체의 두께가 얇을수록 변위는 크게 발생했으며, 희석제의 함유량이 높을수록 낮은 탄성계수로 인해 큰 변위를 보인다. 또한 두께가 얇을수록 희석제의 함유량이 높을수록 유전파괴가 낮은 전압에서 발생하였다. 25 kV에서 KE-12의 변위(mm)는 2.24이었고, 희석제 30 및 50의 첨가로 각각 4.08와 5.35까지 증가하였다. Fig. 11은 작동 전압 10 kV에서 희석제 함유량 및 두

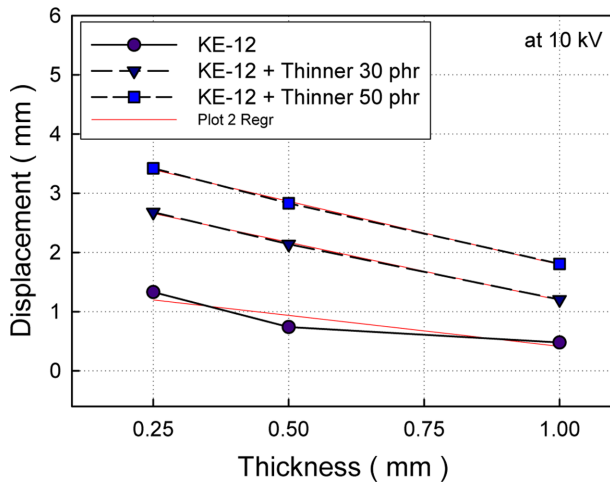


Fig. 11. Effects of elastomer thickness and thinner content on the actuating displacement

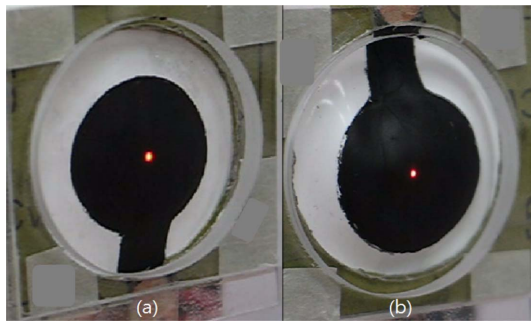


Fig. 12. Electro active images of (a) KE-12 and (b) KE-12 with thinner 50 phr

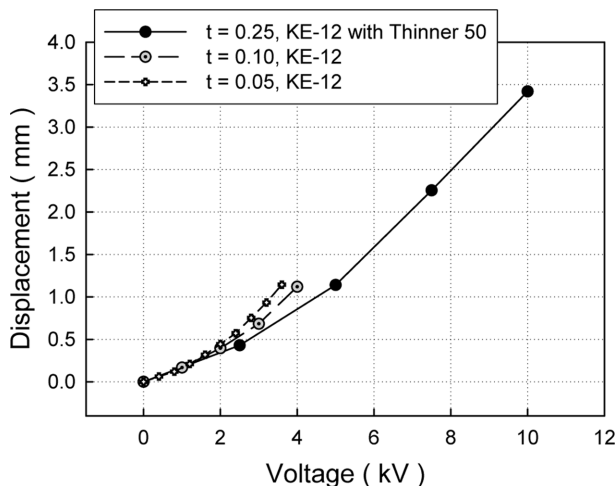


Fig. 13. Effects of elastomer thickness, thinner content and voltage on the actuating displacement

께 증가에 따른 변위 측정 결과를 나타냈다. 희석제 함유량이 높은 경우가 높은 작동 변위를 보였고, 탄성체 두께의 증가에 따라 감소 기울기 또한 크게 나타났다. Fig. 12는 탄성

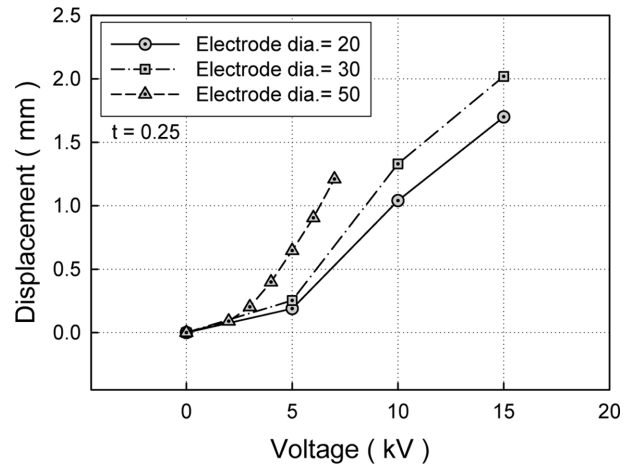


Fig. 14. Effects of electrode diameter and voltage on the actuating displacement

체 두께가 0.5인 구동기 사진을 나타냈다. (a)경우는 희석제가 없는 경우이고 (b)는 희석제 함유량이 50일 때의 사진으로 (b)의 경우가 전기자극에 크게 반응함을 알 수 있다.

식 (1)에서 탄성체의 두께가 얇을수록 큰 변형을 보이는데, Fig. 10에서와 같이 절연거리의 감소로 절연파괴 전압 또한 감소한다. 또한 두께가 작을수록 시편의 취급 및 형상 불안정성이 증가하게 된다. Fig. 13은 탄성체 두께가 얇은 경우(0.25, 0.1, 0.05 mm)를 비교한 그래프로 0.25의 경우 희석제가 50 함유된 경우이다. 희석제 50이 혼합된 탄성체는 탄성계수가 0.08로 희석제가 없는 경우의 14% 정도였고, 두께는 각각 2.5, 5배 높았다. 3가지 경우 모두 1.5 kV까지는 유사한 변위를 보였지만, 두께 0.1과 0.05의 경우 4 kV 이하의 낮은 전압에서 절연파괴가 일어났고, 0.25의 경우는 10 kV까지 변위가 발생되었다. 이는 두께가 얇을수록 시편 제작 시의 이물질 혼입이나 미세 기포 등이 통전 통로 역할을 하기 때문으로 판단된다. 따라서 저전압에서 구동할 수 있게 하기 위해 탄성체의 두께도 중요하지만 탄성계수 또한 중요한 요소가 된다.

Fig. 14는 탄성체 KE-12($t=0.25$)에 전극의 크기에 따른 구동기의 변위특성을 비교하였다. 전극의 크기 증가는 전기장의 영향을 받는 탄성체의 면적의 증가를 의미하므로 같은 전압에서도 구동기의 변위특성은 다르게 나타났다. 전극의 크기가 증가할수록 동일한 전압에서 구동기의 변위는 크게 나타났지만, 절연파괴는 또한 낮은 전압에서 일어났다. 전극크기가 $\phi 50$ 인 구동기의 최대전압과 변위는 7 kV, 1.2 mm이었고, 전극크기가 $\phi 30$ 인 구동기의 경우는 각각 15 kV, 2.02 mm였다.

4. 결론

최적화된 전극과 다양한 전기활성 유전탄성체(EADE)가

결합된 구동기를 제작하여 그 특성을 실험적으로 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 3가지 탄성체(KE-12, NBR, NR) 중 KE-12의 경우가 낮은 탄성계수로 동일한 전압에서 다른 두 탄성체들 보다 큰 변위를 나타냈다. 대표적인 극성고무인 NBR은 NR보다 탄성계수는 1.8배 높지만 유전상수 값이 3배 높기 때문에 변위가 크게 나타났다.

(2) KE-12 탄성체에 희석제의 첨가로 탄성계수는 약 20% 수준까지 감소하였지만, 유전상수는 약 90% 정도에서 유지되었다. 따라서 희석제가 첨가된 탄성체는 그렇지 않은 경우에 비해 변위가 더 크게 나타났다.

(3) KE-12 탄성체의 두께가 얇을수록 구동기의 변위는 크게 발생했지만, 두께 0.1과 0.05의 경우 4 kV 이하의 낮은 전압에서 절연파괴가 일어났고, 두께 0.25의 경우 10 kV에서 절연파괴가 발생하였다.

(4) 따라서 저전압에서 EADE 구동기를 구동시키기 위해서는 탄성체의 두께 및 탄성계수가 무엇보다 중요하며, 시편 제작공정의 관리 또한 중요한 요소가 된다.

후 기

본 연구는 2012년도 한국연구재단 일반연구비(2012-007554)에 의해 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

1. Yoseph, B., EAP Actuators as Artificial Muscles, SPIE PRESS,

2004.

2. Kim, J.H., Yun, S.R., Bae, S.H., and Ounaies, Z., "Conductive Polymer Coated Electro-active Paper (EAPap)", *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 15, No. 9, 2005, pp. 1077-1083.
3. Chung, S.Y., "Electroactive Smart Polymer(Artificial Muscle)", *Polymer Science and Technology*, Vol. 19(5), 2008, pp. 420-424.
4. Pelrine, R., Kornbluh, R., Pei, Q., and Joseph, J., "High-speed Electrically Actuated Elastomers with Strain Greater Than 100%", *Science*, Vol. 287, No. 5454, 2000, pp. 836-839.
5. Kim, B.C., Chung, J.A., Cho, H.J., Shin, S.H., Lee, H.S., Moon, H.P., Choi, H.R., and Koo, J.C., "Biomimetic Actuator and Sensor for Robot Hand", *Transactions of the KSME(A)*, Vol. 36, No. 12, 2012, pp. 1497-1502.
6. Yuse, K., Guyomar, D., Audigier, D., Eddiai, A., Meddad, M., and Boughaleb, Y., "Adaptive Control of Stiffness by Electroactive Polyurethane", *Sensors and Actuators A*, Vol. 189, 2013, pp. 80-85.
7. Ozsecen, M.Y., and Mavroidis, C., "Nonlinear Force Control of Dielectric Electroactive Polymer Actuators", *Proceedings of SPIE*, Vol. 7642, 2010, 76422C1-8.
8. Lee, J.M., Ryu, S.R., Lee D.J., and Lin, Z.J., "An Experimental Study for Electro-active Polymer Electrode and Actuator", *Composites Research*, Vol. 26, No. 5, 2013, pp. 289-294.
9. Hwang, I.L., Kim, K.Y., Lee, K.Y., and Lim, D.S., "Dielectric Relaxation Properties of Natural Rubber Nanocomposites due to Radiation Deterioration", *Applied Chemistry*, Vol. 12, No. 2, 2008, pp. 225-228.
10. Lee, J.M., Ryu, S.R., and Lee D.J., "Electrical and Mechanical Properties of Carbon Particles Reinforced Rubber for Electroactive Polymer Electrode", *Transactions of the KSME(A)*, Vol. 37, No. 12, 2013, pp. 1465-1471.