전기활성 고분자의 특성과 응용

나 창 운

1. 서 론

전기활성고분자(electroactive polymers, EAP)는 Figure 1에 나타낸 바와 같이 외부에서 전기적인 자극을 가하면 정전기력이나 이온농도 등의 차이에 의해 기계적 변형을 일으킬 수 있고, 거꾸로 기계적 변형을 가하면 전기적 에너지를 발생시킬 수 있는 일종의 기능성 소재이다. 따라서 이러한 소재를 이용하면 여러 가지 구동장치(actuator)와 센서로 활용할 수 있다. EAP는 크게 electronic 형태와 ionic 형태로 대별 할 수 있으며, 전자의 경우 ferroelectric polymers, dielectic elastomer, electrostrictive graft elastomer, electrostictive paper, electrovisco-elastic elastomers, liquid crystal elastomer 등이 있고, 후자의 경우 ionic polymer gel, ionomeric polymer-metal composite, conductive polymer, 카본나노튜브, electrorheological fluid 등이 포함된다.

EAP는 팽창, 수축, 또는 휨 변형 등 다양한 형식의 기계적 변형을 안정적으로 보여줄 수 있고,

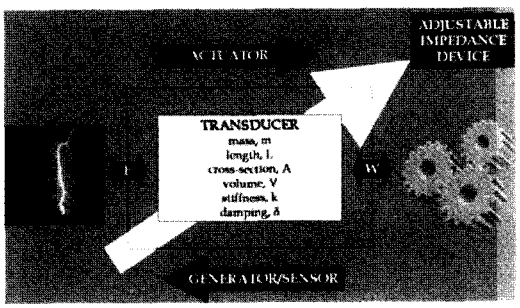


Figure 1. Fundamental principle of EAP transducer.

또한 인간의 근육과 유사한 거동을 나타내기 때문에 Figure 2와 같이 인공근육이나 인공심장 등에 활용이 모색되고 있다. EAP와 유사한 특성을 가지는 재료로 전기활성 세라믹과 형상기억합금을 들 수 있지만, EAP 재료가 낮은 응력 하에서도 큰 변형을 보이고 생체 근육과 비슷하여 질김성, 강인성, 진동감쇠 특성을 가지므로 단단하고 부서지기 쉬운 세라믹이나 전기적 자극에 대해 매우 느리게 반응하는 형상기억합금 등에 비해 인공근육과 같은 응용에 유리한 것으로 평가되고 있다.

본고에서는 여러 가지 EAP 중에서 실용적인 측면에서 잠재력을 가지고 있는 DEA를 중심으로 간

Figure 2. Artificial muscle and heart.

나창운

1984 아주대학교 화학공학과(학사)
1986 아주대학교 화학공학과(석사)
1995 미국 Akron 대학교 (박사)
1999~ 전북대학교 부교수
현재

략히 그 특성과 응용 방안에 대해 간략히 소개한다.

2. DEA 구조 및 특성

DEA는 기본적으로 Figure 3에 나타낸 바와 같이 두 전극사이에 얇은 유전 탄성고분자 필름이 삽입된 일종의 축전기(capacitor)라고 할 수 있다. 여기에 전압을 인가하면 정전기적 압력에 의해 유전 탄성고분자 필름의 두께가 수축되고 평면방향으로 팽창하는 기계적 거동이 발생하는데 이러한 동일평면상의 확장운동을 이용하여 구동체로 활용할 수 있다.

발생되는 막스웰 압력, P는 다음과 같은 간단한 모델로 예측될 수 있는데, 탄성고분자의 유전특성과 가해준 전기장의 크기에 의존한다.

$$P = \varepsilon_r \varepsilon_o E^2 = \varepsilon_r \varepsilon_o \left(\frac{V}{t}\right)^2 \quad (1)$$

여기서 ε_r과 ε_o는 탄성고분자와 공기의 유전상수를 나타내고, V는 가해준 전압, E는 전기장, t는 탄성고분자의 두께를 나타낸다. DEA의 구동 전기장은 ~100 V/㎛로써 비교적 높은데, 절연파괴강도 내에서 인가전압을 증가시킬수록 그리고 pre-stretching을 통해 필름 두께를 얇게 할수록 DEA 효율성을 높일 수 있다. 또한 DEA는 변형정도가 높을 뿐만 아니라 효율이 우수하고 응답속도가 수 msec로써 빠르고, 나아가 가볍고, 유연성의 높고, 저렴하기 때문에 저비용/고효율이 요구되는 여러 응용분야에서 흥미를 끄는 재료이다.

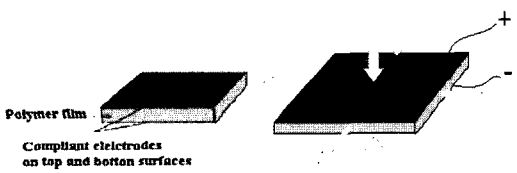


Figure 3. Principle of operation of DEA.

일반적으로 DEA 재료로 사용되고 있는 탄성고분자는 천연고무, 아크릴 고무, 실리콘 고무, 불소고무, 우레탄고무 등 다양하다. 지금까지 잘 알려진 재료로서 신장율이 매우 높고, 응답속가 빠른 아크릴고무가 많이 사용되었는데, 약 300% 이상의 이축신장과 215%까지 일축신장이 가능한 특성을 갖고 있다.

상기 Table 1은 유전 탄성고분자의 strain response를 테스트 한 결과이며, 전기장이 인가됨에 따라 실리콘 및 아크릴 탄성고분자의 변형을 나타내고 있다. 고분자 필름은 인공근육과 같은 액추에이터 제품에 다방면으로 이용될 수 있다. Table 2는 대표적인 유전 탄성고분자의 점탄성 특성을 나타내었고, 필름의 응답 속도와 효율과의 상관성을 나타낸 것이다.

DEA의 작동에서 고려해야 할 사항은 인가된 임피던스, 환경적 내성, 신뢰도와 내구성, 제어특

Table 1. Strain response(circular and linear) of electroelastomers.

Material	Relative Thickness Strain (%)	Relative Area Strain (%)	Test Field Strength (MV/m)	Pressure (MPa)	Estimated Elastic Energy, e (MJ/m³)
Circular response					
Silicone A[1]	48	93	110	0.3	0.098
Silicone B[2]	39	64	350	3.0	0.75
Acrylic[3] Elastomer	61	158	412	7.2	3.4
Linear response					
Silicone A[1]	54	117	128	0.4	0.16
Silicone B[2]	39	63	181	0.8	0.2
Acrylic[3] Elastomer	68	215	240	2.4	1.4

[1]NuSil CF 19-2186, NuSil Corporation Carpinteria, California,
[2]Dow Corning HS Ⅲ, Dow Corning Corporation, Midland, Michigan, [3]3M VHB 4910, 3M Corporation, St. Paul, MN

Table 2. Speed of response and efficiency-related characteristics of dielectric elastomer films.

Material	Effective Modulus (MPa)	Relative Dielectric Constant	Dielectric Loss Factor $\tan\delta_e$	Mechanical Loss Factor $\tan\delta_m$	Maximum Electro-mechanical Coupling Factor, k^2[1] (%)	Overall Maximum Efficiency[2] η_t (%)
Silicone A[3]	0.1	2.8 at 1kHz	0.005 at 1kHz	0.05 at 80Hz	79	82 at 80Hz
Silicone B[4]	1.0	2.8 at 1kHz	0.005 at 1kHz	0.05 at 80Hz	63	79 at 80Hz
Acrylic[5]	3.0	4.8 at 1kHz	< 0.005 at 1kHz	0.18 at 20Hz	90	80 at 80Hz

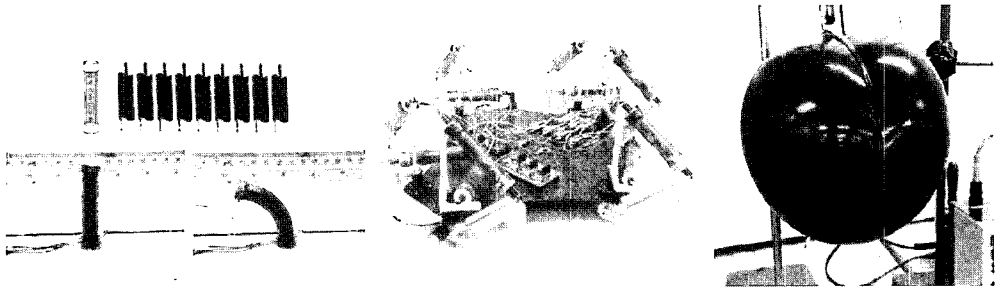
[1]Based on maximum quasi-static strain conditions as shown in Table 1.
[2]Based on estimated mechanical and dielectric loss at about 100Hz maximum electromechanical coupling conditions, driving circuits with 90% charge recovery are used
[3]NuSil CF 19-2186, NuSil Corporation Carpinteria, California
[4]Dow Corning HS Ⅲ, Dow Corning Corporation, Midland, Michigan
[5]3M VHB 4910, 3M Corporation, St. Paul, MN

성이 있다. 액츄에이터의 전기적 입력에 대한 요구조건을 규정하는 한 가지 방법은 전기적 임피던스를 측정하는 것으로 전압과 전류를 야기시킨다. 유전 탄성고분자와 같은 전기장에 응답성을 보이는 EAP는 높은 구동 전기용량이 요구된다. 즉, 최대 인가전압은 매우 높다. 그러나 여러 가지 변압기를 이용하면 전지나 가선으로부터 고전압을 발생시킬 수 있고, 이미 많은 고전압 디바이스에 적용되고 있는데, 예로써 음극선 튜브, 형광등, 그리고 스파크 플러그와 자동차 점화시스템 등을 들 수 있다.

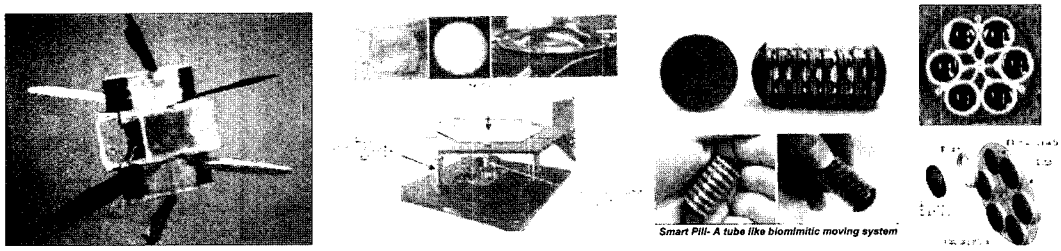
또한 액츄에이터는 우주와 같은 극한적인 환경조건에서도 성능을 유지하여야한다. 중요한 환경적 요인으로는 온도와 습도, 태양광과 같은 방사선, 가스방출, 화학적 상용성과 같은 인자들은 중요하다. 유전 탄성고분자를 포함한 다른 종류의 EAP 소재에 대한 연구가 진행되고 있지만, 상대적으로 극한 온도 및 습도 조건에서의 실험은 엄격하게 이루어지지 않았다. 액츄에이터는 또한 신뢰도와 내구성을 지녀야 한다. 환경적 내성과 같은 기본적인 물리적 현상들과 전극 물질들의 기계적, 전기적 성질들은 신뢰도와 내구성을 평가하는데 사용될 수 있다. 만일 전극의 많은 반복하중, 기계적 변형과 전기장에서 오랜시간 기계적/전기적 성질은 유지 할 수 있다면 액츄에이터의 신뢰도를 확신할 수 있을 것이다. 대부분의 유전 탄성고분자는 반복적인 피로조건에서 널리 사용되고 있다. 이러한 응용은 충격과 진동 흡수를 포함한다. 따라서 유전 탄성고분자 물질이 인가된 부하하에서 기계적으로 강한 특성을 보임에 따라 내구성을 보일 것으로 보인다. 환경적인 내성, 신뢰도 그리고 내구성 인자들과 같이 응용에 있어서 제어 특성을 평가하는데 전기-기계적 응답의 물리적인 현상이 이용된다. 전기 유전율과 같은 고분자 물질의 전기적인 성질들은 진동수 또는 다른 인자들 안에서 약간의 진동으로 변동할 수 있다.

3. DEA의 응용 가능성

EAP는 1999년에 국제학술회의를 통하여 공식적으로 논의된 이래 각국의 관련 연구그룹들 간의 공동연구를 통하여 그동안 많은 기술적 진보를 이루어 왔고, 선형 구동장치, 벨브, 펌프, 제너레이터, 모터, 센서, 스피커 등 다양한 응용이 검토되고 있다. 따라서 이들 부품이 사용되는 모든 산업분야, 즉 자동차, 선박, 항공, 우주 산업, 생명공학, 로봇산업 등에 파급효과가 매우 큰 분야로 전망되고 있다. 특히, 최근 미국 NASA 우주선의 wind-brush의 의 구동에 적용이 시도되고 있는 등 우주산업 분야에서도 이용이 적극적으로 검토되고 있는 발전가능성이 매우 높은 연구분야이다. DEA는 우수한 성능을 제공하는 액추에이터나 장치의 디자인 및 응용에 대해 많은 연구가 진행되



Bending roll actuator　　Insect-inspired legged robot　　Dielectric balloon actuator



Insect-inspired flapping-wing robot　　Shape control of flexible mirror　　Smart pill actuator module

Figure 4. Possible application of DEA.

고 있다. 우선 EAP의 장점으로는 거동 및 움직이는 부분이 없이 큰 동작을 구현할 수 있으며, 천연근육의 기계적 물성 및 특성의 일부를 유사하게 구현할 수 있으며, 높은 탄력성으로 안정적이며 튼튼한 것을 대표적으로 들 수 있다. DEA의 응용에 있어서 가장 대표적인 사례는 인공근육이다. DEA는 종종 "인공근육"이라 불리기도 한다. 또한, 아크릴 필름이 적층되어 두 층으로 구성된 선형 인공근육 액추에이터도 들 수 있다. 그 이외에도 인공심장, acrylic film double bow-tie actuator, bending roll actuator, insect-inspired legged robot, dielectric balloon actuator, insect-inspired flapping-wing robot, shape control of flexible mirror, smart pill actuator module, motor, generator, sensor 등 다방면으로 이용이 가능하다. Figure 4에는 대표적인 응용사례에 대해 나타내었다.

참 고 문 헌

1. Alexander, R., *Elastic Mechanism in animal Movement*, Cambridge University Press, Cambridge, UK (1988), pp. 56-69.
2. Baughman, R., L. Shacklette, R. Elsenbaumer, E. Pichata, and C. Becht, "Conducting polymer electromechanical actuators", *Conjugated polymeric materials: Opportunities in Electronics, Optoelectronics and Molecular Elextronics*, eds. J.L.Bredas and R.R Chance, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands (1990), pp. 559-582.
3. Bobbio, S., M. Kellam, B. Dudley, S. Goodwin Johansson, S. Jones, J. Jacobson, F. Tranjan, and T. DuBois, "Integrated force arrays," in *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop*, Fort Lauderdale, Florida (February 1993).
4. Clark, J. E., J. G. Cham, S. A. Bailey, E. M. Froehlich, P. K. Nahata, R. J. Full, and M. R. Cutkosky. "Biomimetic design and fabrication of a hexapedal running robot." *Proc. IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation* (2001).
5. Dickinson, M., and J. Lighton, "Muscle efficiency and elastic storage in the flight motor of drosophia," *Science*, **268**, 87-90 (1995).
6. Dickinson, M., C. Farley, R. Full, M. Koehl, R. Kram, and S. Lehman, "How animals move: an integrative view," *Science*, **288**, 100-106 (2000).
7. Eckerle, J., J. S. Stanford, J. Marlow, Roger Schmidit, S. Oh, T. Low, and V. Shastri, "A bio-

logically inspired hexapedal robot using field-effect electroactive elastomer artificial muscles," *Proc. of SPIE, Smart Structures and Materials 2001: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*, Vol. 4332 (2001).

8. Full, R., D. Strokes, A. Ahn and R. Josephson, "Energy absorption during running by leg muscles in a cockroach," *J. Experimental Biology*, **201**, 997-1012 (1998).
9. Full, R., and K. Meijer, "Artificial muscle versus natural actuators from frogs to flies," *Proc. of SPIE*, Smart Structure and material 2000: Electroactive Polymer Actuators and Devices, ed. Y. Bar-Cohen, **3987**, 2-9 (2000).
10. Giurgitiu, V., C. Rogers, and Z. Choudhry, "Energy-based comparison of solid-state induced-strain actuators," *J. Intelligent Materials Systems and Structures*, **7**, 4-14 (1996).
11. Heydt, R., R. Pelrine, J. Joseph, J. Eckerle, and R. Kornbluh, "Acoustical Performance of an electroactive polymer film loudspeaker," *J. Acoustical Society of America*, **107**(2), 833-839 (2000).
12. HeydtR. and Chhokar, S., "Refreshable Braille display based on electroactive polymer," *Proc. 23rd Intl. Display Research Conf.*, Phoenix, Arizona (15-18 September 2003).
13. Hunter, I., S. Laforntaine, J. Hollerbach, and P. Hunter, "Fast reversible NiTi fibers for use in microrobotics," *Proc. 1991 IEEE Micro Electro Mechanical Systems-MEMS* '91, Nara, Japan, (1991), pp. 166-170.
14. Hunter, I., S. Laforntaine, "A comparison of muscle with artificial actuators," *Technical Digest of IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, Hilton Head, South Carolina, (1992). pp. 178-185.
15. Jeon, J., K. Park, S. An, J. Nam, H. Choi, H. Kim, S. Bae, and Y. Tak, "Electrostrictive polymer actuators and their control systems," *Proc. of SPIE, Smart Structure and material 2000: Electroactive Polymer Actuators and Devices*, ed. Yoseph Bar-Cohen, **4329**, 380-388 (2001).
16. Kornbluh, R., R. Perlrine, J. Joseph, R. Heydt, Q. Pei, and S. Chiba "high-field electrostriction of elastomeric polymer dielectrics for actuation," *Proc. of SPIE, Smart Structure and material 1999: ElectroActive Polymer Actuators and Devices*,, ed. Yoseph Bar-Cohen, **3669**, 149-161 (1999).
17. Kornbluh, R., R. Perlrine, Q. Pei, S. Oh, and J. Joseph "Ultrahigh strain response of field-actuated elastomeric polymers," *Proc. of SPIE Smart Structure and material 2000: Electroactive Polymer Actuators and Devices*,, ed. Y. Bar-Cohen, **3987**, 51-64 (2000).
18. Kornbluh, R., R. Full, K. Meijer, R. Pelrine, and S. Shastri "Engineering a muscle: and approach to artificial muscle based on field-activated electroactive polymers," *Neurotechnology for Biomimetic Robots*, eds. J. Ayers, J. Davis and A. Rudolph, MIT Press (2002a), pp. 137-172.
19. Kornbluh, R., R. Perlrine, Q. Pei, R. Heydt, S. Stanford, S. Oh, and J. Eckerle "Electroelastomers: applications of dielectric elastomer transducers for actuation, generation and smart structures," *Proc. of SPIE Smart Structure and material 2002: Industrial and Commercial Applications of Smart and Structures Technologies*, ed. A. McGowan, **4698**, 254-270 (2002b).
20. Kornbluh, R. D., D. S. Flamm, H. Prahlad, K. M. Nashold, S. Chhokar, R. Pelrine, D. L Huestis, J. Simons, T. Cooper, and D. G. Watters, "Shape control of large lightweght mirrors with dielectric elastomer actuation," *Proc. of SPIE Smart Structure and material 2003: Electroactive Polymer Actuators and Devices*, ed. Y. Bar-Cohen, **5051**, 143-158 (2003).
21. Liu, C., Y. Bar-Cohen, andS. Leary, ."Electro-statically stricted polymers(ESSP)," *Proc. of SPIE Smart Structure and material 1999: Electroactive Polymer Actuators and Devices*, ed. Y. Bar-Cohen, **3669**, 186-190 (1999).
22. Meijer, K., M. Rosenthal, and R. Full, "Musclelike actuators? A Comparison between three electroactive polymers," *Proc. of SPIE Smart Structure and material 2001: Electroactive Polymer Actuators and Devices*, ed. Yoseph Bar-Cohen (2001), pp. 7-15
23. Park, S., and T. Shrout, "Ultrahigh strain and piezoeletric behavior in relaxor based ferroelectric single crystals," *J. Applied Physics*, **82**, 1804-1811 (1997).
24. Pei, Q., R. Pelrine, S. Stanford, R. Kornbluh, M. Rosenthal, K. Meijer, and R. Full, "Multifunctional electroelastomer rolls and their application for biomimetic walking robots," *Smart Structures and*

Materials 2002: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies, ed. Anna-Maria McGowan, pp. 246-253.

25. Pei, Q., M. Rosenthal, R. Pelrine, S. Stanford, and R. Kornbluh, "Multifunctional electroelastomer actuators and their application for biomimetic walking robots," *Proc. of SPIE Smart Structures and Materials 2003: Electroactive Polymer Actuators and Devices*, ed. Y. Bar-Cohen, **5051**, 281-290 (2003).
26. Pelrine, R., J. Eckerle, and S. Chiba, "Review of artificial muscle approaches," invited paper, *Proc. of the Third Intl. Symposium on Micro Machine and Human Science*, Nagoya, Japan (1992).
27. Pelrine, R., R. Kornbluh, J. Joseph, and J. Marlow, "Analysis of the electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrodes as a means of actuation," *Sensor and Actuators A: Physical* 64, 77-85 (1995).
28. Pelrine, R., R. Kornbluh, and G. Kofod, "High-strain actuator materials based on dielectric elastomers," *Advanced Materials* 2000, 12, 16 (200), pp. 1223-1225.
29. Pelrine, R., R. Kornbluh, Q. Pei, and J. Joseph, "High-speed electrically actuated elastomers with over 100% strain," *Science*, 287, 5454 (2000), pp. 836-839.
30. Pelrine, R., R. Kornbluh, J. Eckerle, P. Jeuck, S. Oh, Q. Pei, and S. Stanford, "Dielectric elastomers: generator mode fundamentals and applications," *Proc. of SPIE Smart Structures and Materials 2001: Electroactive Polymer Actuators and Devices*, ed. Y. Bar-Cohen, **4329**, 148-156 (2001).
31. Pelrine, R., R. Kornbluh, Q. Pei S. Stanford, S. Oh, J Eckerle, R. Full, M. Rosenthal, and K. Meijer, "Dielectric elastomer artificial muscle actuators: toward biomimetic motion," *Proc. of SPIE Smart Structures and Materials 2002: Electroactive Polymer Actuators and Devices*, 4695 (2002), ed. Y. Bar-Cohen.
32. Shahinpoor, M., "Micro-electro-mechanics of ionic polymer gels as electrically controllable artificial muscles," *J. Intelligent Material Systems and Structures*, **6**, 307-314 (1995).
33. Sommer-Larsen, P., J. Hooker, G. Kofod, K. West, M. Benslimane, and P. Gravesen, "Response of dielectric elastomer actuators," *Proc. of SPIE Smart structures and Materials 2001. Electroactive Polymer Actuators and Devices*, ed. Yoseph Bar-Cohen, **4329**, 157-163 (2001).
34. Tobushi, H., S. Hayashi, and S. Kojima, "Mechanical properties of shape memory polymer of polyurethane series," *JSME International J., Series I*, 35, 3 (1992).
35. Uchino, K., *Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors*, Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts (1997), pp. 142-143.
36. Wax, S., and R. Sands, "Electroactive polymer actuators and devices," *Proc. of SPIE Smart Structures and Materials 1999: Electroactive Polymer Actuators and Devices*, ed. Y. Bar-Cohen, **3669**, 2-10 (1999).
37. Wingert, A., M. Lichter, S. Dubowsky, and M. Hafez, "Hyper-redundant root manipulators actuated by optimized binary dielectric polymers," *Proc. of SPIE Smart Structures and Materials 2002: Electroactive Polymer Actuators and Devices*, ed. T. Bar-Cohen, 4695 (2002).
38. Xia, F., H. Li, C. Huang, M. Huang, H. Xu, F. Bauer, Z. Cheng, Q. Zhang, "Poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) based high performance electroactive polymer," *Proc. of SPIE Smart Structures and Materials 2003: Electroactive Polymer Actuators and Devices*, ed. Y. Bar-Cohen, **5051**, 133-142 (2003).
39. Zhang, Q., V. Bharti, and X. Zhao, "Giant electrostriction and relaxor ferroelectric behavior in electron-irradiated poly(vinylidene fluoride- trifluoroethylene) copolymer," *Science*, **280**, 2101-2104 (1998).
40. Zhenyi, M., J.I. Scheinbeim, J.W. Lee, and B.A. Newman, "High field electrostrictive response of polymers," *J. Polymer Sciences, Part B-Polymer Physics*, **32**, 2721-2731 (1994).