

## 전기활성 고분자 전극 및 구동기에 관한 실험적 연구

이준만\* · 류상렬\*\* · 이동주\*\*\* · 임정걸\*\*

### An Experimental Study for Electro-active Polymer Electrode and Actuator

Jun-Man Lee\*, Sang-Ryeoul Ryu\*\*, Dong-Joo Lee\*\*\*, Zheng-Jie Lin\*\*

**ABSTRACT:** A thinner is used to improve the multi-walled carbon nano-tube (CNT) and carbon black (CB) dispersion in a polymer matrix and to make a soft electrode. The electrical and mechanical properties of the soft electrodes are investigated as functions of CNT, CB and thinner content. The optimal mixing condition for the electrode is thinner 80, CNT 3.5, CB 18 (phr) on the basis of matrix (KE-12). The specific resistance of that is 73 ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ), and tensile strength, tensile modulus, and elongation of that is 0.45 MPa, 0.21 MPa, and 184%, respectively. Also, a simple structure of the actuator with an optimized electrode and elastomer is fabricated and its characteristic is evaluated. At the operating voltage 25 kV, the displacement of an elastomer KE-12 is 2.24 mm, and that of an elastomer KE-12 with thinner 50 (phr) is 4.05 mm. It shows a higher displacement compared to that of 3M 4910 which has similar modulus. The actuator made with elastomer and electrode of the same material (KE-12) may have advantages for fatigue life and application.

**초 록:** 고분자 기지에 희석제의 첨가로 CNT 및 CB 입자의 분산성 향상 및 연질의 전극을 만들고자하였다. 희석제, CNT 및 CB 함유량에 따른 연질 전극재료의 전기적 및 기계적 특성을 평가하였다. 전극재료로서 최적의 혼합 조건은 기지 (KE-12)를 기본으로 희석제 80, CNT 3.5 그리고 CB 18 (phr)이었다. 이때의 비저항 값은 73 ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )이었고, 인장강도와 인장탄성율 그리고 신장율은 각각 0.45 MPa, 0.21 MPa, 184%였다. 또한 최적화된 전극과 탄성체를 이용하여 간단한 구조의 구동기를 제작하여 그 특성을 평가하였다. 작동 전압 25 kV에서 탄성체 KE-12는 2.24 mm의 변위가 발생되었고, 희석제가 50 (phr) 혼합된 KE-12는 4.05mm의 변위가 발생되었다. 희석제 50 (phr) 혼합된 KE-12는 3M의 4910과 같은 탄성계수를 나타내지만, 더 높은 변위를 보였다. 동일한 재료 (KE-12)의 전극과 탄성체로 제작된 구동기는 피로수명 및 응용에 많은 장점이 있을 것으로 보인다.

**Key Words:** 전기활성 고분자(electro-active polymer), 비저항(specific resistance), 전극(electrode), 탄성체(elastomer), 구동기(actuator)

## 1. 서 론

1880년 Roentgen이 처음으로 EAP(Electro-active polymer) 현상을 발견한 후, 1990년 이후에 본격적인 연구가 시작되었다[1]. 국내의 경우 2000년 이후부터 활발한 연구가 되고

있으나 아직 많은 관심과 연구 및 개발을 위한 지원이 필요한 실정이다. EAP는 외부 전압에 따라 큰 변위를 발생하는 소재이다. EAP가 갖는 장점은 기존 구동기로는 따라할 수 없는 실제 근육과 같은 방법으로 작동을 하기 때문에 의학, 의료공학 등에서 로봇, 초소형 비행체, 인공근육 등으

Received 10 June 2013, received in revised form 25 October 2013, accepted 29 October 2013

\*대구경북과학기술원 로봇공학전공

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

로 연구되고 있다[2,3]. 구동기(Actuator)의 구조는 중간에 탄성체(Elastomer)가 위치하고 탄성체 상하에 부착된 2매의 전극(Electrode)으로 구성된다. 동작원리는 2매의 전극에 전압을 가함으로써 압전효과(Piezoelectric effect), 맥스웰 스트레스 효과(Maxwell stress effect) 등에서 복합적으로 발생하는 힘과 각 전극 내에서 발생하는 상호반발력의 상승작용으로 전극에 대하여 수평방향으로 변형한다. 구체적으로는 낮은 탄성계수와 높은 유전상수의 탄성체가 높은 전기장에 직면하면 큰 변형을 보인다[1,4]. 전극의 경우 본 연구에서는 고무기지를 기본으로 하고 거기에 탄소나노튜브(CNT, carbon nanotube)와 카본블랙(CB, carbon black) 등의 전도성 나노 탄소입자를 혼합하여 낮은 저항의 전극을 제작한다.

CNT는 완벽한 구조와 기계적, 물리적, 전기적 및 열적 특성을 갖고 있으며 전기전자, 정보통신, 에너지, 바이오 등 폭넓은 분야에서 연구가 되고 있다[5,6]. CNT가 기계적으로나 전기적으로 우수한 특성을 가지고 있음에도 불구하고 CNT 응용에 있어 번들형태 또는 엉킴현상 등의 응집특성이 큰 걸림돌이 되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 CNT의 물리적 분산방법과 분산제 또는 계면활성제 등의 화학적 표면처리 방법이 많이 사용되고 있다[7,8]. EAP의 전극 제작을 위해 실리콘 고분자를 기지로 하고 CNT, CB 등의 입자를 혼합한다. 일반적으로 고무에 CNT를 혼합하는 방법은 유기용제를 이용하여 고무를 용해시키고, 거기에 전 처리된 CNT를 고르게 혼합하여 건조시키는 방법(SCM, solvent casting method)이 주로 사용된다[9,10]. SCM법은 CNT를 고르게 분산시킬 수 있지만 공정이 복잡하고, 장시간 소요되며 유기용제를 사용하는 단점이 있다. 하지만 상온경화(RTV, room temperature vulcanization) 실리콘 고무는 고무를 점도가 10 Pa·s로 균질기(Homogenizer)나 혼합기(Stirrer)를 사용하여 CNT를 혼합할 수 있다. 또한 필요에 따라 비휘발성의 RTV용 희석제(Thinner)를 사용하여 점도를 낮출 수 있으며 더 많은 양의 CNT 혹은 CB을 혼합할 수 있다[11]. 따라서 전기저항이 크게 감소하고, 강성 또한 감소하므로 연질의 전도성 전극의 제작이 가능하게 된다.

본 연구에서는 고분자 기지에 희석제의 첨가로 CNT 및 CB 입자의 분산성 향상 및 연질의 전극을 만들고자 하며, CNT 및 CB 함유량에 따른 고무복합 전극재료의 전기적 및 기계적 특성을 평가한다. 또한 최적화된 전극과 탄성체를 이용하여 간단한 구조의 구동기를 제작하여 특성을 평가하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 실험재료 및 제작

전극 제작을 위해 사용된 기지는 Table 1과 같이 RTV용 실리콘 고무인 신에츠의 KE-12를 사용하였고, 기지의 점도

**Table 1.** Compounding formulation for electrode

	Content (phr*)
Matrix (KE-12)	100
RTV Thinner	$\alpha$ (0, 40, 60, 80, 100, 120, 140)
Carbon nano-tube (CM-100)	$\beta$ (0, 0.5, 1.5, 2.5, 3.5)
Carbon black (Conductex SC Ultra)	$\gamma$ (0, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40)
Hardener (CAT-RM)	1
Sum.	$101 + \alpha + \beta + \gamma$

\*part per hundred grams of rubber

**Table 2.** Mechanical and electrical properties of elastomers

	KE-12	4910 (3M)
Specific Gravity	1.28	1.03
Hardness (Duro. A)	38	< 20
Tensile strength (MPa)	1.84	1.17
Elongation (%)	140	1430
Modulus (MPa)	0.57	0.11
Surface resistance ( $\Omega$ /square)	$1 \times 10^{13}$	$7.4 \times 10^{15}$
Volume resistance ( $\Omega$ -cm)	$3.3 \times 10^{11}$	$5.5 \times 10^{14}$
Dielectric constant (1 kHz)	3.82	4.26
Dielectric constant (1 MHz)	3.75	3.27

조절을 위하여 신에츠의 비휘발성 RTV용 희석제를 사용하였다. 또한 전도성 탄소 나노 소재의 종류로는 다중벽 CNT와 CB를 사용하였다. CNT는 한화나노텍(주)의 CM-100 ( $\Phi$ 10~15 nm)이었고, 전도성 CB는 새한 실리캠(주)의 Conductex SC Ultra( $\Phi$ 20 nm)를 사용하였다. 각 보강재는 혼합 전에 흡착된 수분 제거를 위해 110°C 오븐에서 2시간 건조 후 사용하였다. CNT의 경우 희석제와 함께 초음파 분산기(Sonic & Material사의 VC 750)로 750 Watts에서 20 kHz로 약 1시간 분산 후에 첨가하였다[10]. 기지와 CNT, CB 등이 포함된 혼합용액을 만들기 위해 혼합기를 사용하였다. 먼저 희석제에 CNT를 넣고 초음파 분산시키고, 그것을 기지가 계량된 용기에 넣고 혼합기를 이용하여 혼합한다. 그리고 CB를 5 phr 단위로 넣으면서 혼합한다. 이때 회전기의 혼합조건은 상온에서 400 rpm, 1 hr이었다. 마지막 혼합공정이 끝난 후 경화제 1 phr를 첨가하고 진공로에서 진공(5분)을 가한다.

실험에 사용한 탄성체는 상온 경화형 실리콘 고무인 KE-12와 구매품인 3M의 4910이다. 각 탄성체의 전기적 및 기계적 특성은 Table 2와 같다.

### 2.2 전기적 기계적 특성 평가

전극의 비저항 측정은 CMT-100MP를 이용하였다. 수동 레버식 접촉시스템으로 탐침직경 0.40 mm, 탐침간격 1 mm의 4탐침을 이용하여 측정하였다. 탄성체의 비저항 측정은

초고압 절연 메타(HIOKI사의 SM-8220)로 평판 시료용 전극(SME-8311)을 사용하였다. 측정시 KS M ISO 2951, KS M 6773을 참고하였으며, 상온에서 시험편( $\Phi 30 \times 1$  t)에 500 V를 가하고 10초 후에 측정하였다.

기계적 특성 평가를 위해 LLOYD사의 LRY Plus를 이용하여 인장시험을 하였다. 아령형 시험편( $60 \times 5 \times 1$  mm)을 사용하였으며, 실온에서 인장속도는 50 mm/min이었다. 실험의 시료는 4개 이상을 사용하였으며 얻어진 결과는 이들을 산술평균 하였다.

2.3 구동기 제작 및 시험

Fig. 1과 같이 탄성체( $\Phi 50$  mm) 중앙부 측면에 전극( $\Phi 30$  mm)을 바르고 40°C 오븐에서 4시간 동안 건조하여 구동기를 완성한다. 전극자체는 매우 약하므로 구리전극으로 전압을 연결한다. 또한 탄성체를 고정하기 위해 절연성이 큰 아크릴 판을 사용하였다.

탄성체 수 mm인 구동기에 수십 kV의 고전압을 인가해야 하므로 UltrValt사의 고전압 발생장치(40 kV, 300  $\mu$ A)를 사용하였다. 또한 Fig. 2와 같이 인가전압에 따른 구동기의 변위를 측정하였다. 변위 측정은 레이저(Opto NCDT, MICRO-EPSILON)와 ILD-1302 Tool을 사용하여 구동기 전

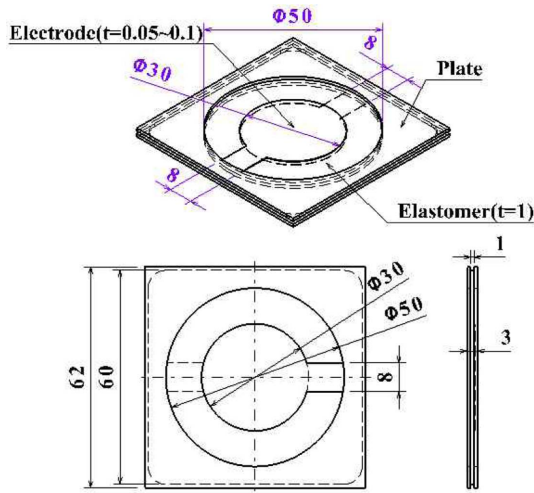


Fig. 1. A schematic of an actuator

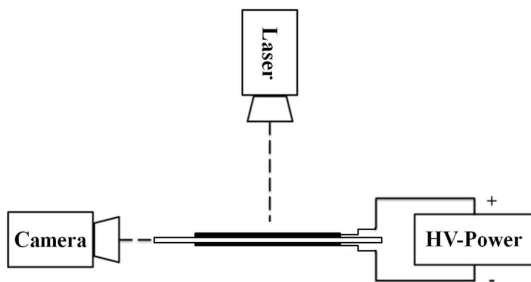


Fig. 2. A schematic of a displacement measurement for the actuator

극 중앙면의 수직변위를 측정하였다. 또한 측면에 카메라를 설치하여 관측하였다.

3. 실험결과 및 토의

3.1 전극재료의 최적화

전극재료에 요구되는 특성은 구동기의 작동 전압을 가능한 낮게 할 수 있는 낮은 저항과 구동기의 형상 변형에 따라 같이 변형되는 유연성이 필요하다. Fig. 3은 전도성 CB 함유량(phr)이 20일 때, 희석제와 CNT 함유량 증가에 따른 전극재료의 비저항 값을 나타냈다. CNT 2.5일 때, 희석제 함유량 80 이하의 복합재료 비저항은 약 145( $\Omega \cdot \text{cm}$ ) 정도였고, 함유량이 80 이상에서는 크게 증가하였다. 희석제 함유량 140에서 비저항은 80일 경우에 비해 8.5배까지 증가하였다. 기지에 희석제의 첨가로 체적은 증가하지만, 전도성 입자의 함유량은 동일하기 때문에 비저항은 증가하게 된다. 또한 희석제 함유량이 80에 비해 60과 40으로 감소함에도 비저항 값의 큰 차이가 없는 것은 점도의 증가로 인한 전도성 입자들의 분산에 문제가 있는 것으로 판단된다. CNT 함유량의 증가에 따라 동일한 희석제 함유량에서 입자들의 접촉점(Contact point) 형성이 증가하므로 비저항은 감소하였다[12]. CNT 함유량이 3 및 3.5일 때, 희석제 함유량 80 미만에서는 높은 점도로 인해 전도성 입자의 혼합이 불가능하였다.

Fig. 4는 CNT 함유량이 3.5, 희석제 함유량이 80일 때, CB 함유량 증가에 따른 전극재료의 비저항 값을 나타냈다. CB의 함유량 증가에 따라 복합재료의 비저항은 크게 감소하였다. CB의 함유량이 낮을 때는 비저항 값의 편차가 크지만 CB 함유량이 증가함에 편차도 크게 감소하였다. 이러한 CB 함유량 증가에 따른 비저항 및 편차의 감소는 전자 터널 및 접촉 연쇄 구조 이론에 의해 CB의 입자와 입자 간격(gap)이 좁아지거나 접촉에 의해 발생하는 것으로 알려져

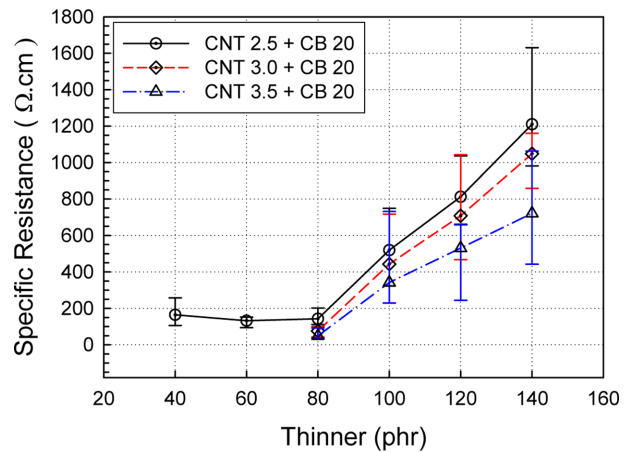


Fig. 3. Effects of thinner and CNT content on the specific resistance of electrode materials

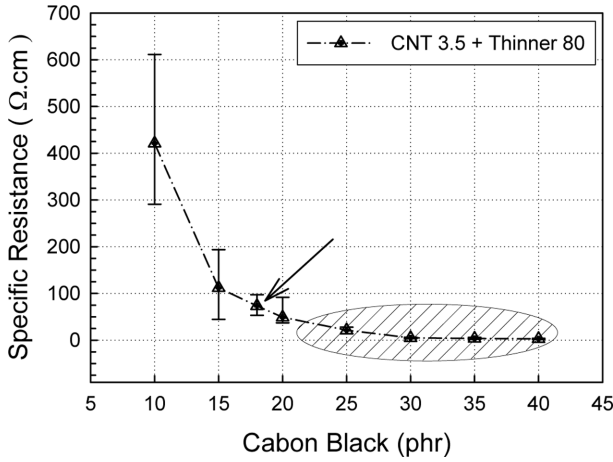




Fig. 4. Effects of CB content on the specific resistance of electrode materials

있다 [13]. Fig. 4에서  부는 비저항이 매우 낮고 안정된 값을 나타낸다. 하지만 그 전극재료들을 탄성체에 결합시키고 변형시키면 전극재료를 표면에 크랙이 발생된다. 따라서  부의 복합재료들은 전극재료로의 사용이 불가능하다. 이는 CB의 함유량이 많은 경우에 전도성 입자들의끼리의 접촉량은 증가하지만, 상대적으로 점결제(Binder) 역할을 하는 기지의 함유량이 적어져 표면 크랙이 발생되며 따라서 절연파괴 현상이 나타난다. 따라서 Figs. 3과 4에서 전극재료들의 비저항 값과 표면 크랙 발생 등을 고려하여 최적의 전극 혼합조건을 결정하였다. 전극 재료로의 최적 혼합조건은 Fig. 4의 / 표시부로 기지를 기본으로 희석제 80, CNT 3.5 그리고 CB 18이다. 이때의 비저항 값은 73(Ω·cm)였다. Fig. 4의 CB 20의 경우는 비저항이 49이었지만 실험 시료 중 20%에서 표면 크랙이 발생되었다.

본 논문에서 기지의 특성을 유지하면서 점도를 낮추기 위해 기지 전용 희석제를 사용하였고, 거기에 낮아진 점도만큼의 많은 CNT나 CB 등 전도성 입자를 혼합할 수 있었다. 이러한 시도는 본 연구실에서 진행 중인 것으로 아직 다른 연구결과는 보고되지 않고 있다[11]. Fig. 5는 기지(Top)와 기지에 희석제 함유량 40이 포함된 재료(Bottom)의 표면 SEM 사진을 나타냈다. 기지 표면에 약 0.5 μm 크기로 고무분자들이 뭉쳐있는 구조를 볼 수 있으며, 기지가 용매인 희석제를 흡수하여 팽윤되어 있음을 확인할 수 있다. 이러한 팽윤현상을 확인하기 위하여 희석제 함유량 증가에 따른 전극 재료들의 비중 측정결과를 Fig. 6에 나타냈다. 기지와 희석제의 비중 값은 각각 1.280과 0.926이었고, 희석제 함유량의 증가에 따라 비중 값은 크게 감소하였으며 계산결과와 시험결과가 유사하였다. 기지에 희석제의 첨가로 기계적 특성의 저하 즉, 유연성을 부여할 수 있으며, 많은 양의 전도성 입자들을 첨가할 수 있으므로 Figs. 3-4에서와 같이 전기적 특성을 개선시킬 수 있는 것으로 보인다.

또한 Fig. 7에서 기지에 희석제 80의 첨가로 인장강도(T.S.)

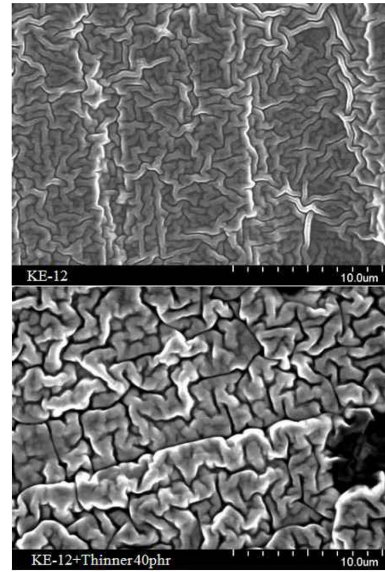


Fig. 5. SEM photos of the matrix (top) and matrix with thinner 40 phr (bottom)

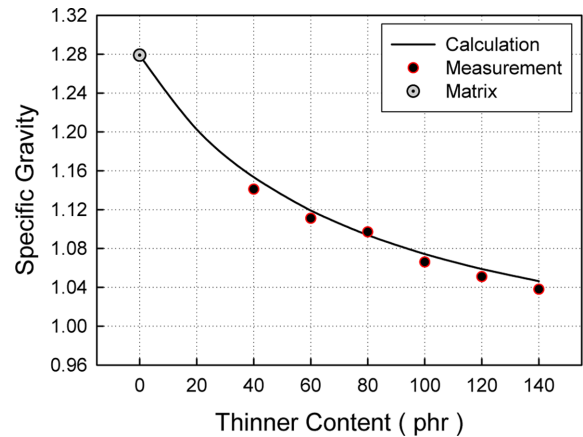


Fig. 6. Effect of thinner content on the specific gravity of electrode materials

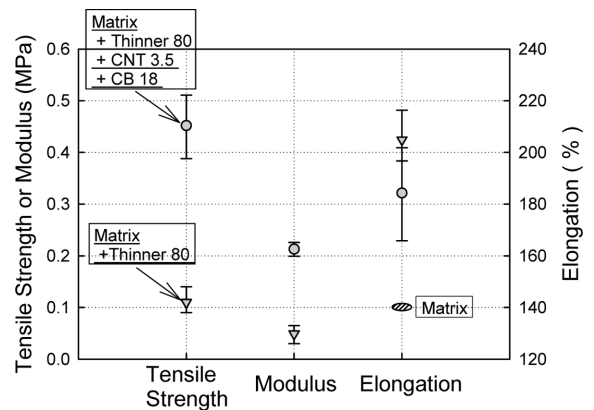


Fig. 7. Effects of thinner, CNT and CB content on the mechanical properties of reinforced composites



및 인장탄성율(T.M.)은 각각 기지의 6%와 9% 수준으로 크게 감소하였고, 신장률은 기지에 비해 11% 증가하였다. 또한 전극의 최적조건(희석제 80 + CNT 3.5 + CB 18)인 경우는 전도성 입자들의 첨가로 전기적 특성도 개선되지만 기계적인 특성도 다소 증가한다. 하지만 여전히 기지에 비해서는 훨씬 낮은 기계적 특성을 보여 유연한 재료임을 알 수 있다.

3.2 구동기의 작동성 평가

Figs. 1-2와 같이 간단한 구조의 구동기를 제작하였으며, Fig. 8(a)와 같이 전극에 전압을 가하면 전극과 전극 사이의 탄성체는 (b)와 같이 전극에 대해 수평방향으로 확장되면서 변형된다[1,4]. 탄성체의 두께방향 변형( $S_z$ )은 다음 식 (1)과 같이 탄성체의 두께( $t$ ) 및 탄성계수( $E$ ), 유전상수( $\epsilon$ )가 일정하므로 작동 전압( $V$ )의 제곱에 비례하게 된다.

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

이러한 전압 크기에 따른 변위 값( $h$ )을 Fig. 4에서 검토했

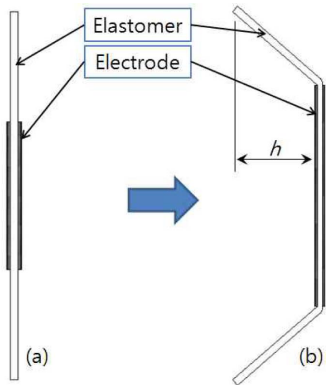


Fig. 8. Schematics of the actuator deformation

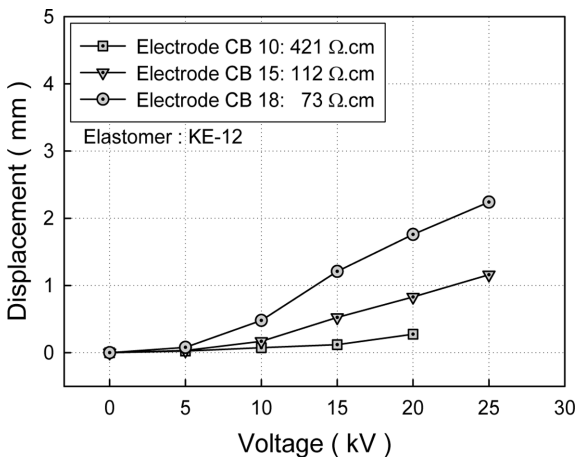


Fig. 9. Effects of voltage and specific resistance on the displacement of the actuator

던 전극의 비저항 크기에 따라 비교하였다. Fig. 9에 사용된 탄성체는 순수 KE-12이고, 비저항 값이 각각 다른 3가지 전극에 대한 전압의 증가에 따른 변위 관계를 나타냈다. 전극의 CB 함유량이 증가할수록 즉, 비저항 값이 감소할수록 동일한 전압에서 변위는 크게 발생됨을 알 수 있다. 또한 CB 10의 경우 20 kV 이후 절연파괴가 발생하였으며, CB 15와 CB 18의 경우는 25 kV까지 안정적인 움직임 보였다. CB 18의 경우는 앞서 언급한대로 최적의 전극조건으로 25 kV에서 2.24 mm까지 변위가 발생되었다.

또한 Fig. 10은 최적의 전극조건에 대해 2가지 탄성체를 비교하였다. 첫째는 대부분의 논문에서 EAP 소재로 사용되는 3M사의 4910이고, 둘째는 KE-12에 희석제를 50 phr 혼합한 경우이다. 이는 식 (1)에서와 같이 탄성계수가 중요한 요소 중의 하나이기 때문에 4910의 탄성계수인 0.11 MPa과 유사하게 조정하기 위함이다. 두 경우 모두 작동 전압의 증가에 따라 변위는 크게 증가하였고, 30 kV에서 절연파괴가 일어났다. 20 kV 이상에서 4910에 비해 희석제가 혼합된 KE-12의 경우가 높은 변위를 보였다. 두 재료의 탄성계수가 동일하고 유전상수 또한 유사하다. 하지만 전극에 사용된 기지와 탄성체의 기본 재료가 KE-12로 동일하기 때문에 전극

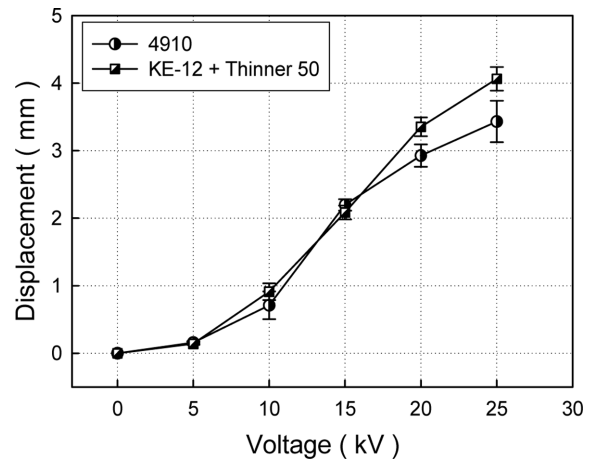


Fig. 10. Effect of voltage on the deformed displacement of the actuator

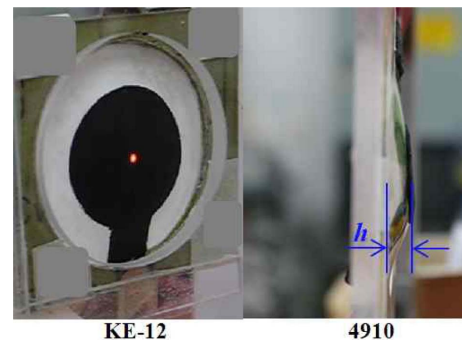


Fig. 11. Electro active images of KE-12 and 4910 elastomers

과 탄성체의 접착성이 우수한 것으로 판단된다.

Fig. 11은 최적화된 전극과 KE-12와 4910 탄성체의 25 kV의 전압에 변형된 사진을 보여준다. 작동 전압 25 kV에서 희석제가 혼합된 KE-12와 4910의 변위는 각각 4.05와 3.51 mm이었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 고분자 기지에 희석제의 첨가로 CNT 및 CB 입자의 분산성 향상 및 연질의 전극을 만들고자하였으며, CNT 및 CB 함유량에 따른 고무복합 전극재료의 전기적 및 기계적 특성을 평가하였다. 전극재료로서 최적의 혼합조건은 기지(KE-12)를 기본으로 희석제 80, CNT 3.5 그리고 CB 18(phr)이었다. 이때의 비저항 값은  $73(\Omega \cdot \text{cm})$ 이었고, 인장강도와 인장탄성을 그리고 신장률은 각각 0.45 MPa, 0.21 MPa, 184%였다. 또한 최적화된 전극과 탄성체를 이용하여 간단한 구조의 구동기를 제작하여 그 특성을 평가하였다. 작동 전압 25 kV에서 탄성체 KE-12에는 2.24 mm의 변위가 발생되었고, 희석제가 50 혼합된 탄성체 KE-12는 4.05 mm의 변위가 발생되었다. 희석제가 50 혼합된 KE-12의 탄성계수는 EAP 범용재료인 3M 4910과 동일하지만, 25kV에서의 변위는 더 높게 나타났다.

#### 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, No. 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(5454), 2000, pp. 836-839.
5. Lee, G.W., and Han, J.T., "Dispersion of Carbon Nanotubes (CNTs) and CNT-based Transparent Conductive Films," *KIC News*, Vol. 10, No. 4, 2007, pp. 8-19.
6. Yun, S.J., and Im, H.G., "Dispersity and Electro-Conductivity of PU Grafted MWCNT/PU Composite via Simple Blending Method," *Applied Chemistry for Engineers*, Vol. 21, No. 5, 2010, pp. 500-504.
7. Kim, M.S., Goak, J.C., and Han, J.H., "Effect of Acid Treatment on Transparent Conductive Films of Single-Walled Carbon Nanotubes Prepared Using Various Surfactants in Aqueous Solutions," *Proceeding of the KIEEME, Annual Autumn Conference*, 2008, pp. 396.
8. Lee, K.H., and Kim, J.H., "Study on the Properties of Polystyrene and Styrenic Copolymer Containing Carbon Nanotubes and Nanoclay," *Journal of the Korean Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 20, No. 5, 2009, pp. 493-499.
9. Sui, G., Zhong, W.H., Yang, X.P., and Yu, Y.H., "Curing Kinetics and Mechanical Behavior of Natural Rubber Reinforced with Pretreated Carbon Nanotubes," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 485, 2008, pp. 524-531.
10. Sung, J.H., Lee, D.J., Ryu, S.R., and Cho, Y.S., "Mechanical Properties of Elastomeric Composites with Atmospheric-Pressure Flame Plasma Treated Multi-Walled Carbon Nanotubes and Carbon Black," *Journal of the Korea Society of Mechanical Engineer(A)*, Vol. 34, No. 9, 2010, pp. 1209-1215.
11. Sung, J.H., Lee, J.M., Ryu, S.R., and Lee, D.J., "Effects of Nanomaterials and Thinner Content on the Electrical and Mechanical Properties of Silicone Rubber Composite," *Proceeding of KSCM, Annual Autumn Conference*, 2011, pp. 139-140.
12. Yang, J.S., Lee, K.Y., and Park, D.H., "Electrical and Mechanical Properties of Semiconducting Shield for Power Cable by Carbon Nanotube Content," *KIEE*, Vol. 55, No. 8, 2006, pp. 381-386.
13. Park, J.M., Kim, D.S., Kim, S.J., Kim, P.G., Yoon, D.J., and Lawrence D.K., "Local Electronic Transport through a Junction of SWNT Bundles," *Composites: Part B*, Vol. 38, 2007, pp. 847.