

〈論 文〉

복합재료 경화모니터링용 유전센서의 해석

김진수* · 이대길**

(1994년 8월 1일 접수)

Analysis of the Dielectric Sensor for Cure Monitoring of Composite Materials

Jin Soo Kim and Dai Gil Lee

Key Words : Cure Monitoring (경화모니터링), Dielectric Sensor (유전센서), Planar Interdigital Capacitor (IDC), Capacitance (정전용량)

Abstract

The on-line cure monitoring during the cure process of fiber reinforced resin matrix composite material is important for the better quality and productivity. Among several cure monitoring methods, the dielectrometry that uses electrodes as its sensor is known to be the most promising method. In this study, the sensitivity of the dielectric sensor for the on-line cure monitoring was analyzed by finite element method and compared to the experimental results. Using the analytical results, the equation for the capacitance of the sensor was derived. Also, the optimal sensor design method was suggested after analyzing several different sensor shapes.

1. 서 론

열경화성수지 복합재료의 경화과정은 재료의 성질이 시간에 따라서 변화하며 다상(multiphase) 내에서의 화학적 반응 및 열, 밀도, 운동량 변화를 수반한다.⁽¹⁾ 복합재료의 경화시 주변의 온도와 압력을 정확히 조절(control)하여 가장 짧은 시간안에 신뢰성있는 제품을 생산해야 하는데, 적절한 시간에 온도와 압력을 가하기 위하여 on-line cure monitoring이 유용하게 사용된다.

복합재료의 경화과정을 모니터링하는 방법에는 differential scanning calorimetry (DSC), dynamic mechanical analysis (DMA), infrared spectroscopy (IRS), optical technique 및 dielectrometry 등이 있다.⁽²⁾ 이러한 방법들 중에서 dielectrometry는 제

품성형시에 경화를 모니터링할 수 있는 가장 유망한 방법으로 알려져 있다.^(3~5) 이 방법은 수지(resin)가 monomeric 액체로부터 가교(crosslink)된 고온의 불용성 고체로 변하는 전 과정의 cure chemistry 및 점도를 연속적으로 모니터링할 수 있기 때문이다.

측정장치는 두개의 전극(electrode)을 사용하는데, 복합재료 속에 두개의 전극을 삽입한 후 여기에 교류전기장을 가하면 복합재료내의 polymer는 유전(dielectric)재료이므로 이러한 전극과 복합재료의 배열은 축전기를 형성한다. 축전기에 축적된 전하량은 polymer내의 쌍극자(dipole)와 이온(ion)들이 교류전기장에 응답하여 배열하는 양에 의존하며, 경화의 단계에 따라 변화하게 된다.

실제로 복합재료의 경화시, 평행판 축전기형태의 센서는 복합재료의 형상이 단순하지 않거나 두꺼울 경우, 복합재료의 내 외부등 전반에 걸친 경화상태를 구하기에는 부적합하다. 때문에 극성이 다른

*한국과학기술원 기계공학과

**정회원, 한국과학기술원 기계공학과

두개의 전극판이 한 평면에 놓여져 있는 형상의 센서(planar interdigital capacitor, IDC)를 미소하게 제작하여 복합재료 사이에 끼워 넣으면, 재료의 형상에 영향을 받지 않으며 여러개의 센서를 사용하면 복합재료 전반에 걸친 경화상태를 구할 수 있다. Planar interdigital capacitor (IDC)는 전극이 평면상에 놓여져 있는 구조이므로 평행판 전극에 비하여 감도가 떨어진다. 따라서 감도를 높이는 디자인을 할 필요가 있다.

본 연구에서는 센서의 감도를 높이고 주어진 형상에서 전기장이 매질에 미치는 범위를 구하기 위하여, 전극의 형상의 변화에 대한 정전용량(C)을 FEM 해석을 통하여 구하였으며, 실험치와도 비교하였다.

2. Planar Interdigital Capacitor (IDC)의 FEM 해석

정전계 (electrostatic field) 문제는 지배방정식이 푸아송형태 (Poisson type) 를 가지므로 열전도 (heat conduction) 문제와 유사성을 가진다. (6,7)

즉, 열전도 (heat conduction) 지배방정식은 아래 식과 같이 표현된다.

$$\nabla \cdot (K \nabla T) = -\dot{q} \tag{1}$$

또한 정전계 지배방정식은 아래식과 같이 표현된다.

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla V) = -\rho \tag{2}$$

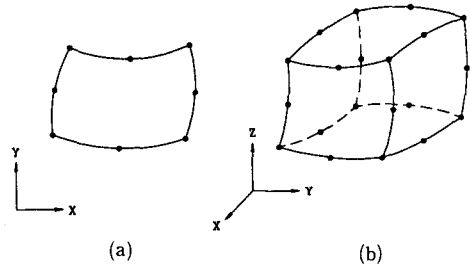
여기서,

- K : 열전도율 (W/m·°C)
- T : 온도 (°C)
- \dot{q} : 단위체적당 열발생률 (W/m³)
- ϵ : 유전상수 (Coulomb/m·V)
- V : 전위 (V)

- $-\nabla V$: 전계강도 (V/m)
- ρ : 전하밀도 (Coulomb/m³)

정전계 지배방정식과 열전달 지배방정식의 유사성에 의해 열전도율 (K)은 유전상수 (ϵ)를, 온도 (T)는 전위 (V)를 나타낸다. 또한 단위체적당 열발생률 (\dot{q})과 전계강도 ($E = -\nabla V$)는 각각 전하밀도 (ρ)와 온도구배 (∇T)를 나타낸다. 그러므로 정전계 문제는 열전달요소 (heat transfer element)를 사용하여 해석을 함으로써 해를 구할 수 있다. (8)

본 연구에서는 상용 FEM package인 ANSYS



(a) 2-D 8-node thermal solid
(b) 3-D 20-node thermal solid

Fig. 1 FEM element structure

5.0⁽⁹⁾을 사용하여 정전계문제를 해석하였으며, 2차원은 2-D 8-node thermal solid element (PLANE 77)를, 3차원에서는 3-D 20-node thermal solid element (SOLID90)를 사용하였다. Fig. 1에 2차원과 3차원 요소 (element)의 형상을 나타내었다.

FEM 해석에서는 주어진 모든 요소 (element)들의 에너지를 합하여 정전에너지 (W_e)를 계산한 후, 아래의 식(3)에 의해 정전용량 (C)을 구한다.

$$W_e = \frac{1}{2} C (V_1 - V_0)^2 \tag{3}$$

여기서,

- W_e : 정전에너지 (J)
- C : 정전용량 (F)
- $V_1 - V_0$: 두 전극에 인가된 전위차 (V)

Planar interdigital capacitor (IDC)의 정전용량 (C)을 해석하기에 앞서 해석방법의 타당성을 확인하기 위하여, Fig. 2의 평행판 축전기에 대한 정전용량 (C)을 FEM 해석으로 구하고 이를 이론식에서 구한 값과 비교하였다. 면적이 $A (=5 \text{ mm}^2)$ 이고 거리가 $d (=0.5 \text{ mm})$ 인 평행판 축전기에서 판 사이가 진공일때의 용량 (C_0)은 다음과 같다. (7)

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d} \tag{4}$$

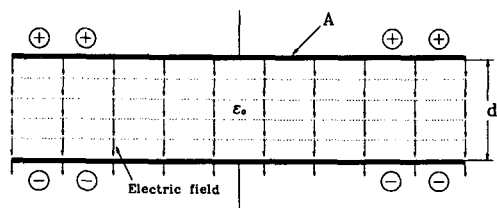


Fig. 2 FEM analysis for the parallel plate capacitor

여기서,

ϵ_0 : 진공에서의 유전상수 ($8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$)

A : 전극판의 면적 (m^2)

d : 전극판 사이의 거리 (m)

위의 이론식으로부터 2차원에서의 용량(C_0)은 $88.5(\text{pF/m})$ 이며 FEM 해석값도 $88.5(\text{pF/m})$ 가 나와 두 값이 동일하였으므로, planar interdigital capacitor(IDC)의 해석에도 같은 방법을 사용하였다.

2.1 2차원 FEM해석

Planar interdigital capacitor(IDC)의 구조는 Fig. 3과 같이 한 평면내에 두개의 극성이 반대인 전극판들이 서로 엇갈려 배열되어 있는 형상이다.

Fig. 4는 전극의 두께를 고려하지 않았을 경우의 IDC에 대한 2차원 FEM 해석결과이다. 두개의 전극에 동일한 전위차를 주면, 기질(substrate)과 매질(media)이 동일한 물질이고 무한히 클 경우에 전기장의 형태는 전극 위 아래에서 같은 형태를 가지므로 전극의 위쪽면만의 해석을 하였다. Fig. 4

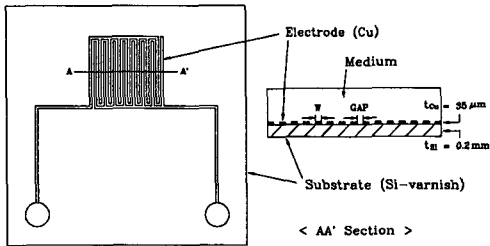


Fig. 3 Structure of planar interdigital capacitor (IDC)

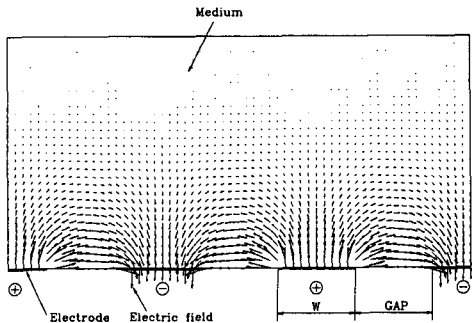


Fig. 4 Two dimensional FEM analysis for IDC neglecting the electrode thickness when the medium and the substrate are same materials

에서 화살표의 방향은 그 점에서의 전기장(E)의 방향을 나타내며 화살표의 크기는 전기장(E)의 세기를 나타낸다. 또한 전극형상의 대칭성으로부터 전기장의 모양이 대칭적으로 나타나므로 대칭부분만을 떼어내어 해석을 해도 무방하다.

Fig. 5는 Fig. 4에서 IDC의 대칭부분인 단위형상에 대한 2차원 FEM 해석결과를 보여준다. 전극의 두께는 고려하지 않았으며 매질의 유전상수는 실리콘 와니스(silicon varnish)의 유전상수인 $3.15\epsilon_0$ 하였다. 변수로는 전극의 폭(W), 전극사이의 간격(GAP)이 있으며, 전기장(E)의 세기가 전극에 가까운 부분의 매질에서 크고 전극에서 멀어질수록 약해지므로 매질의 두께(t)도 변수로 작용을 한다. 또한 전기장이 매질의 두께에 미치는 한계범위가 있다는 것을 알 수 있으므로 해석을 통해 주어진 전극형상에서의 전기장이 미치는 범위와 그때의 정

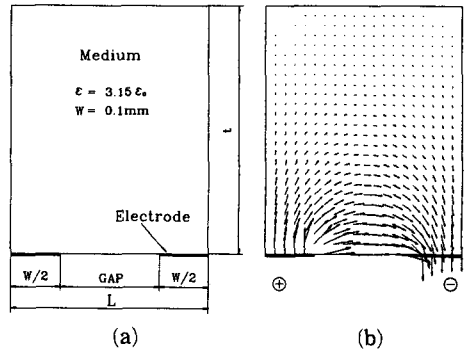


Fig. 5 Two dimensional FEM analysis for the unit cell of IDC neglecting the electrode thickness

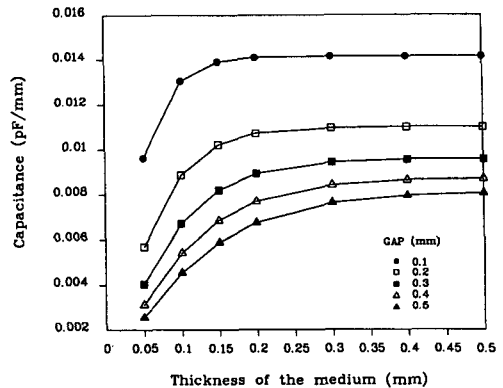


Fig. 6 Capacitance of the unit cell w. r. t. the gap between the electrodes(GAP) and the medium thickness(t)

전용량(C)을 구하였다.

Fig. 6은 Fig. 5의 단위형상(unit cell)에 대해 전극의 폭(W)을 0.1 mm로 고정하고, 전극사이의 간격(GAP)과 매질의 두께(t)를 변화시켰을 때 정전용량(C)의 값을 나타낸 그래프이다. 매질의 두께가 어느정도 커지면 정전용량(C)의 값이 일정해지는 경향이 있는데, 이는 주어진 전극의 형상에서 전기장이 미치는 범위가 정해져 있다는 사실을 말해주며 GAP이 작아질 수록 전기장이 미치는 범위는 국부적이며 정전용량(C)의 값이 커짐을 알 수 있다. Fig. 6에서 W=0.1 mm, GAP=0.1 mm일때 전기장이 매질에 미칠 수 있는 두께(t)는 0.2 mm 정도이며 그 뒤의 매질은 전기장에 영향을 미치지 않으므로 무시할 수 있다.

Fig. 7은 전극의 두께(tc_u=35 μm)를 고려했을

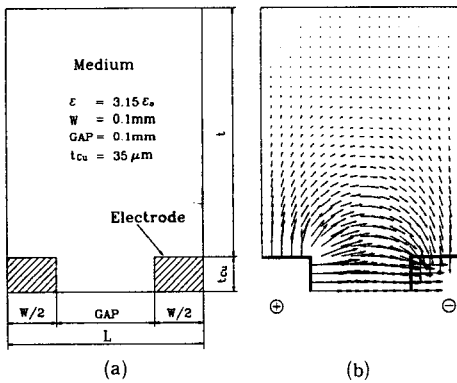


Fig. 7 Two dimensional FEM analysis for the unit cell of IDC with the electrode thickness

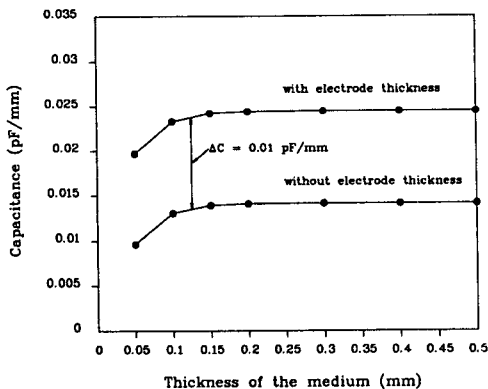


Fig. 8 Two dimensional FEM analysis results with the electrode thickness and without the electrode thickness

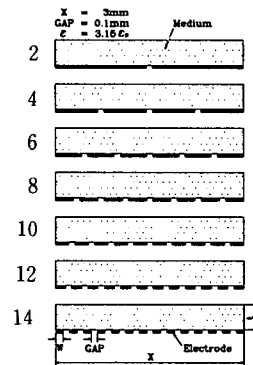
경우, IDC의 단위형상에 대한 2차원 FEM 해석결과이다. ε=3.15ε₀, W=0.1 mm, GAP=0.1 mm의 경우에 대해 전극의 형상과 전기장의 분포를 나타내었다.

Fig. 8은 전극의 두께(tc_u=35 μm)를 고려했을 경우와 고려하지 않았을 경우에, 단위형상(unit cell)의 매질의 두께에 대한 정전용량값을 나타낸 그래프이다. 여기서 ε=3.15ε₀, W=0.1 mm, GAP=0.1 mm이다. Fig. 8에서 두 경우의 정전용량값의 차는 매질의 두께에 관계없이 항상 같은 값(ΔC=0.01 pF/mm)이 나오는데, 이는 전극의 두께의 영향이 항상 일정하다는 것을 알 수 있다.

전극의 두께부분은 평행판 축전기라고 할 수 있으므로 전극의 두께부분의 정전용량값은 식 (4)에서 구할 수 있다. 평행판 축전기에서 거리 d는 전극사이의 간격(GAP=0.1 mm), 면적 A는 전극의 두께(tc_u=35 μm)이므로 식 (4)에서 전극의 두께부분의 용량(C)은 다음과 같다.

$$C = \epsilon \frac{A}{d} = (3.15\epsilon_0) \frac{0.035}{0.1} \approx 0.01 \text{ pF/mm}$$

즉, 전극의 두께부분을 고려했을 경우와 고려하지 않았을 경우의 정전용량값의 차(ΔC=0.01 pF/



No. of electrode	W(mm)
2	1.4500
4	0.6750
6	0.4167
8	0.2875
10	0.2100
12	0.1583
14	0.1214

Fig. 9 Shapes for the electrode number

mm)는 전극의 두께부분을 평행판 축전기의 식으로 계산한 정전용량값과 같다. 따라서 전극의 FEM 해석시, 전극의 두께부분의 정전용량값을 평행판 축전기의 식으로 계산하여 전극의 두께부분을 고려하지 않았을 경우의 정전용량값에 더해 주면 된다.

Fig. 9는 센서길이(X)를 3 mm, 전극사이의 간격(GAP)을 0.1 mm로 고정하고, 전극의 폭(W)과 매질의 두께(t)를 변화시켰을 때의 전극형상이다. 전극의 폭(W)이 좁아짐에 따라 전극의 수는 증가하는데 전극의 수가 2개에서 14개까지의 IDC에 대한 정전용량(C)의 값을 Fig. 10에 그래프로 나타내었다.

Fig. 10에서 알 수 있는 사실은 정해진 센서길이 내에서 전극의 폭이 넓고 전극수가 적은 IDC보다는 전극의 폭이 좁고 전극수가 많은 IDC가 정전용량(C)의 값이 크고 전기장이 미치는 범위가 국부적이다.

Fig. 11은 매질의 유전상수의 변화에 대한 정전용량(C) 값의 그래프이다. 전극의 형상은 단위형상(unit cell)으로 W와 GAP은 0.1 mm, 매질의 두께는 0.2 mm를 주었다. 유전상수가 증가함에 따라 정전용량의 값은 선형적으로 증가함을 볼 수 있다. 따라서 평행판 축전기에 대한 정전용량의 식(4)와 마찬가지로 IDC도 정전용량(C)의 값이 유전상수에 선형비례함을 알 수 있다.

지금까지의 해석결과로부터 센서의 감도를 높이기 위한 최적의 설계(design)는 GAP이 작을 수록(Fig. 6) 그리고 전극의 폭(W)이 좁으면서 전극수가 많을수록(Fig. 10) 좋은 설계라고 할 수 있는데, 이를 만족시키는 조건이 바로 주어진 센서길이 내에서 W와 GAP을 제작가능한 최소의 크기로 정하는 것이라고 할 수 있다.

Fig. 12는 $GAP/W=1$ 이고 $L(=W+GAP)$ 이 다른 단위형상(unit cell)들에서의 매질의 두께에 따른 정전용량의 값을 해석한 그래프이다. 전극의 두께는 고려하지 않았으며 매질의 유전상수는 $3.15\epsilon_0$ 를 주었다. 매질의 두께가 커져서 정전용량의 값이 일정해지는 점근값에서는 모든 정전용량값은 거의 일치하는 경향을 볼 수 있다. 이는 평행판 축전기에서의 A와 d의 비가 같을 때 같은 매질일 경우 같은 값이 나오는 경우와 유사하다. 단, 정전용량의 값이 점근값에 도달하는 속도는 L의 함수이다. 즉, L이 작을 수록 정전용량의 값이 점근값에 빨

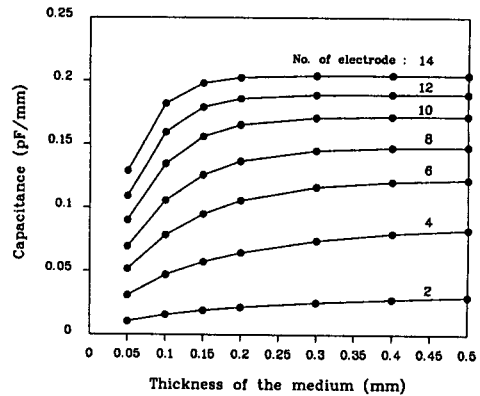


Fig. 10 Capacitance w. r. t. the electrode number and the medium thickness

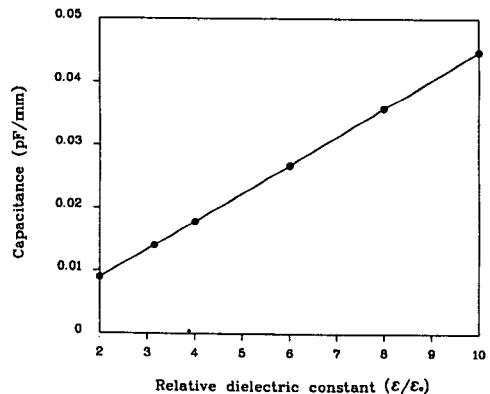


Fig. 11 Capacitance of the unit cell (W=0.1 mm, GAP=0.1 mm, t=0.2 mm) w. r. t. the dielectric constant of the medium

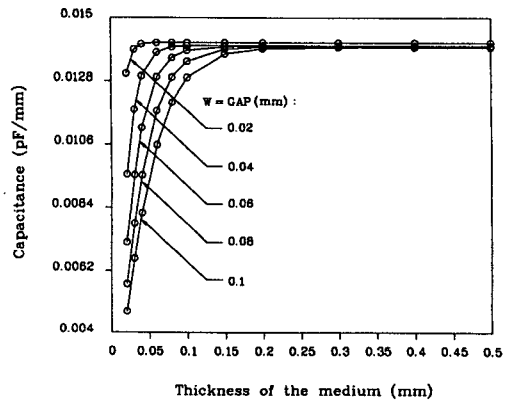


Fig. 12 Capacitance of the unit cell w. r. t. the medium thickness when $GAP/W=1$

리 도달하며 그때의 매질의 두께도 작아진다.

GAP/W=1 일 때 정전용량의 값을 하나의 일반화된 함수식으로 나타내기 위하여 수치해석법인 최소제곱법(least square method)을 이용하여 구하였다. C는 지수함수(exponential function)를 이용하여 다음식과 같이 curve fitting을 하였다.⁽¹⁰⁾

$$C = C_{\infty}(1 - c_1 e^{-c_2 \frac{t}{L}}) \quad (5)$$

여기서,

C_{∞} : 각각의 단위형상에서 매질의 두께가 무한대일 경우의 정전용량값(pF/mm)

c_1, c_2 : 각각의 단위형상에서 curve fitting시의 상수값

t : 매질의 두께(mm)

L : 단위형상의 길이(=W+GAP, mm)

Fig. 11에서 정전용량(C)은 유전상수에 비례함을 알 수 있으므로 $(C)_{\infty}$ 는 $k(C_0)_{\infty}$ 로 쓸 수 있다. 즉,

$$C = k(C_0)_{\infty}(1 - c_1 e^{-c_2 \frac{t}{L}}) \quad (6)$$

여기서,

k : ϵ/ϵ_0 , 비유전율

$(C_0)_{\infty}$: 매질이 진공일때, 매질의 두께가 무한대일 경우의 정전용량값(pF/mm)

식 (6)의 $(C_0)_{\infty}, c_1, c_2$ 는 Fig. 12의 결과로부터 polynomial fitting을 하여 GAP의 3차 함수로 나타내었으며 계수들의 값은 Table 1에 표시하였다.

$$(C_0)_{\infty}, c_1, c_2 : A_3 \cdot (GAP)^3 + A_2 \cdot (GAP)^2 + A_1 \cdot (GAP) + A_0 \quad (7)$$

C가 C_{∞} 의 99.5%에 도달할 때의 매질의 두께를 $(t)_{asym}$ 이라 하면, 식(5)에서

$$1 - c_1 e^{-c_2 \frac{t}{L}} = 0.995$$

으로 나타낼 수 있으므로 $(t)_{asym}$ 는 다음식과 같다.

$$(t)_{asym} = \frac{-L}{c_2} \ln \frac{0.005}{c_1} \quad (8)$$

$(t)_{asym}$ 일 때의 정전용량을 $(C)_{asym}$ 이라 하면, $(C)_{asym}$ 은 다음 식과 같다.

$$(C)_{asym} = 0.995k(C_0)_{\infty} \quad (9)$$

Fig. 6에서 W=0.1 mm, GAP=0.1 mm일때 전기장이 매질에 미칠 수 있는 두께(t)는 0.2 mm정도이며 그 뒤의 매질은 무시할 수 있다고 가정하였다. 이제 위에서 구한 일반화된 함수식을 사용하여 FEM 계산결과를 역으로 구하였다. 식(7)에서 GAP=0.1 mm일 때, $c_1=1.116, c_2=5.097$ 이므로 식(8)에 대입하면

$$(t)_{asym} = \frac{0.2}{5.097} \ln \frac{0.005}{1.116} = 0.21 \text{ mm}$$

또한, 식(7)에서 $C_{\infty}=4.439 \times 10^{-3}$ 이고, $k=3.15$ 를 식(9)에 대입하면

$$(C)_{asym} = 0.995k(C_0)_{\infty} = 1.4 \times 10^{-2} \text{ pF/mm}$$

계산결과, W=0.1 mm, GAP=0.1 mm일때 전기장이 매질에 미칠 수 있는 두께는 0.2 mm정도이며 그때의 단위형상의 정전용량값은 1.4×10^{-2} pF/mm이었으므로 FEM 해석대신에 앞에서 유도한 일반화된 함수식을 이용할 수 있음을 발견하였다. 전극의 두께를 고려할 경우에는 식(9)에다 전극의 두께부분을 식(4)로 계산하여 더해주면 되며 다음 식과 같다.

$$(C)_{asym} = 0.995k(C_0)_{\infty} + k\epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (10)$$

2.2 센서설계

Planar interdigital capacitor(IDC)는 한 평면에 두개의 전극이 놓여져 있어 flux line의 궤적이 곡선을 그린다. 따라서 flux line의 궤적이 직선인 평행판 축전지에 비해 궤적길이가 길어져서 정전용량(C)이 떨어지므로 감도를 높이는 설계를 해야 할

Table 1 Coefficients of $(C_0)_{\infty}, c_1, c_2$

Coefficient	A_3	A_2	A_1	A_0
$(C_0)_{\infty}$	-1.962×10^{-1}	4.640×10^{-2}	-3.730×10^{-3}	4.545×10^{-3}
c_1	114.971	28.852	-9.183	1.631
c_2	1293.214	-164.866	-6.521	6.105

Table 2 Specification of IDC

GAP (μm)	100	
W (μm)	100	
Sensor area (mm^2)	3.1 × 3	
Electrode	Material	Copper
	Thickness (μm)	35
Substrate	Material	Silicon varnish
	Thickness (μm)	200
	Dielectric constant	3.15 ϵ_0 at kHz

필요가 있다. ⁽¹¹⁾

앞에서의 2차원 FEM 해석결과로부터 IDC의 정전용량(C)이 크기 위해서는, 전극사이의 간격(GAP)이 작고, 전극의 폭(W)이 좁으면서 전극수가 많아야 한다는 것을 알 수 있었다. 또한 이런 경우 전기장이 매질에 미치는 범위도 국부적이었다. 본 연구에서는 전극으로 두께 35 μm 의 구리판을 에칭을 하여 제작하였는데, 구리판의 두께의 영향으로 만들 수 있는 전극사이의 간격(GAP)은 최소 100 μm 정도였으므로 Table 2와 같이 IDC의 형상을 결정하였다.

이러한 IDC의 형상에서는 전기장이 매질의 두께가 0.2 mm 까지만 작용을 한다고 할 수 있다. 따라서 기질(substrate) 부분에 미치는 전기장은 기질의 두께가 0.2 mm이므로 기질 내에서만 작용한다고 할 수 있으며 항상 일정한 용량($C_{\text{substrate}}$)이 나온다. 전극을 사이에 두고 기질의 반대면에 위치한 매질만 매질의 용량(C_{medium})을 구하는데 고려되므로 매질의 용량(C_{medium})은 IDC의 총 용량(C_{total})과 기질의 용량($C_{\text{substrate}}$)의 차로 나타낼 수 있다.

$$C_{\text{medium}} = C_{\text{total}} - C_{\text{substrate}} \quad (11)$$

2.3 3차원 FEM 해석

3차원에서도 IDC의 대칭성에 의해 단위형상부분만 해석을 수행하면 전체의 해석이 가능하다. Fig. 13에서는 Table 2의 형상을 가진 IDC의 두가지 단위형상을 보여주고 있는데, 바깥쪽(outer side) 부분의 형상(2개)과 안쪽(inner side) 부분의 형상(13개)으로 나누어 각각에 대해 3차원 FEM 해석을

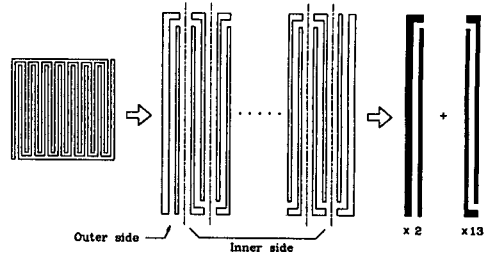


Fig. 13 Two different unit cells of the IDC for 3-D FEM analysis

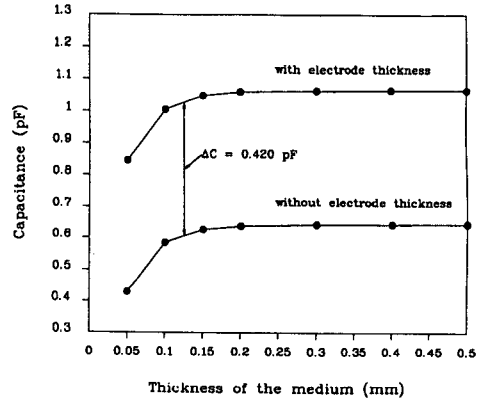


Fig. 14 Three dimensional FEM analysis results with the electrode thickness and without the electrode thickness

하였다.

Fig. 14는 Fig. 13의 두가지 단위형상의 FEM 해석에서 나온 값으로부터 IDC의 정전용량(C) 값을 구한 그래프이다. 전극의 두께(35 μm)를 고려하지 않은 경우와 고려한 경우의 각각에 대해, 매질의 두께에 대한 정전용량값을 그래프로 나타내었다. 해석시, 전극의 위쪽면인 매질부분만 해석하였으며 매질의 유전상수로는 실리콘 와니스(silicon varnish)의 유전상수인 3.15 ϵ_0 를 주었다.

3차원에서도 2차원 해석과 비슷한 경향을 보인다. 전극의 두께를 고려하지 않을 경우에도 매질의 두께가 0.2 mm 이상이 되면 일정한 정전용량의 값을 유지한다. 전극의 두께를 고려했을 때에도 전극의 두께부분의 정전용량을 더해주는 효과만 있을 뿐 경향은 같게 나왔다.

전극의 두께부분의 정전용량값은 2차원의 FEM 해석에서와 마찬가지로 식(4)에서 구할 수 있다. 거리 d는 전극사이의 간격(GAP=0.1 mm)이며, 면적 A는 전극의 두께($t_{cu}=35 \mu\text{m}$)에 GAP의 중간

접에서 전극사이의 홈을 따라 만들어진 선의 길이 ($L_{GAP}=43.6 \text{ mm}$)를 곱한 값으로 하였다. (4)식에서 전극의 두께부분의 용량(C)은 다음과 같다.

$$C = \epsilon \frac{A}{D} = \epsilon \frac{t_{cu} \times L_{GAP}}{GAP} = (3.15\epsilon_0) \frac{0.035 \cdot 43.6}{0.1} = 0.425 \text{ pF}$$

위의 값(0.425 pF)은 전극의 두께부분을 고려했을 경우와 고려하지 않았을 경우의 정전용량값의 차($\Delta C=0.420 \text{ pF}$)와 거의 같다. 따라서 3차원 해석에서도 전극의 두께부분과 전극의 두께를 고려하지 않은 부분을 분리하여 해석이 가능하다.

3. IDC의 해석값과 실험값의 비교

Planar interdigital capacitor (IDC) 센서에 대한 신뢰성을 확보하기 위해 전극의 두께를 고려한 3차

원 FEM 해석의 정전용량값과 실제 제작한 IDC를 측정하여 얻은 정전용량값을 비교하였다. 제작한 IDC의 측정값은 정전용량을 측정할 수 있는 회로를 구성하여 측정하였다. 즉, 저항(2 M Ω)과 IDC를 직렬로 연결하고 1 kHz의 입력전압을 가하면 IDC에 걸리는 전압에는 입력전압과의 위상차 및 전압비가 발생하는데, 이 위상차와 전압비를 측정하여 회로이론식에 대입하면 IDC의 정전용량을 계산할 수 있다.

Fig. 15는 정전용량값의 해석과 실험을 위한 IDC의 단위형상부분을 나타낸 그림으로, 매질로는 공기(air)와 실리콘 와니스(silicon varnish)를 사용하였다. Table 3은 IDC의 FEM 해석값과 실험값의 비교결과로서, 해석과 실험값의 오차는 5% 이내임을 알 수가 있었다.

4. 센서형상에 따른 3차원 FEM 해석

지금까지는 IDC의 감도에 대해 계산하였는데,

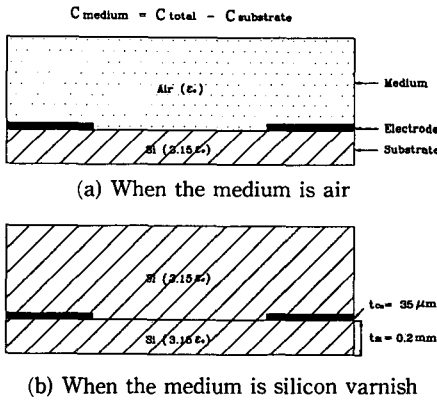
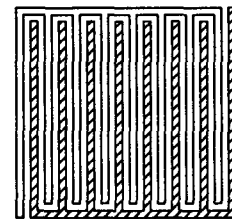


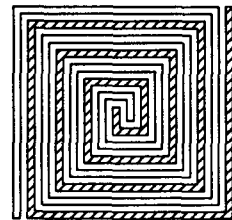
Fig. 15 Unit cells of IDC for experiment and FEM analysis

Table 3 Capacitance of the IDC by the 3-D FEM analysis and by the experiment

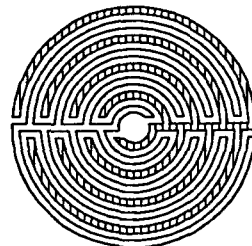
Medium	Air ($\epsilon_{air} = \epsilon_0$)	Silicon varnish ($\epsilon_{Si} = 3.15\epsilon_0$)
Capacitance by the 3-D FEM analysis (pF)	0.983	1.710
Capacitance by the 3-D FEM analysis (pF)	1.010	1.654
Error (%)	2.7	3.4



Type 1



Type 2



Type 3

Fig. 16 Three different types of the sensor

IDC 외의 센서형상에 대한 감도에 대해서도 계산하였다. 전극형상은 3가지의 형태에 대해 3차원 FEM 해석을 하였는데, Fig. 16은 3가지의 센서 Type을 보여준다. Type 1은 기존의 IDC 형태이고 Type 2는 사각형의 나선형태이다. Type 3은 원형의 센서형상으로 설계하였다. 여기서 비교를 위해 Table 2에서의 W, GAP, sensor area 등을 3가지 Type의 센서 모두 동일하게 적용시켰다.

Table 4는 Fig. 16의 센서들의 정전용량값을 3차원 FEM 해석과 수치해석으로 구한 결과를 보여준다. 여기서 센서의 매질과 기질은 모두 실리콘 와니스(silicon varnish)의 유전상수인 $3.15\epsilon_0$ 를 주었으며, 센서 전체를 해석하였다. 센서형상에 대한 3차원 FEM 해석에서는 Type 2의 센서가 가장 감도가 좋게 나왔으며 Type 1, Type 3의 순서로 감도가 좋았다.

수치해석에 의한 정전용량값은 매질부분은 식(10), 기질부분은 식(9)로 계산할 수 있으며 다음식과 같다.

$$\begin{aligned}
 C &= C_{\text{medium}} + C_{\text{substrate}} \\
 &= \left[0.995k_{\text{medium}}(C_0)_\infty + k_{\text{medium}}\epsilon_0 \frac{A}{d} \right] \\
 &\quad + 0.995k_{\text{substrate}}(C_0)_\infty \\
 &= 0.995(k_{\text{medium}} + k_{\text{substrate}})(C_0)_\infty \\
 &\quad + k_{\text{medium}}\epsilon_0 \frac{t_{\text{cu}} \times L_{\text{GAP}}}{\text{GAP}} \quad (12)
 \end{aligned}$$

식(12)에서 L_{GAP} 은 GAP의 중간점에서 전극사이의 홈을 따라 만들어진 선의 길이로서, Type 1과 Type 2는 43.6 mm로 같았으며 Type 3은 42.9 mm이었는데 Type 3에서는 센서중앙의 원형부분은 고려하지 않았다. Type 3에서 L_{GAP} 을 구할 때 센서중앙의 원형부분을 고려하지 않은 이유는, 중앙의 GAP은 다른 부위의 GAP에 비해 4배이상 크기 때문에 L_{GAP} 에 포함시키기가 곤란하며 또한 그 부분의 정전용량은 거의 무시할 수 있다고 보았기 때문이다. Table 4에서 수치해석(numerical analysis)으로 구한 정전용량값은 2차원 FEM 해석값으로부터 유도된 것이기 때문에 3차원 FEM 해석의 정전용량과 비교하여 작은 값이 나왔으며, 5~6% 정도의 오차가 있었다. Type 1의 센서가 가장 작은 오차를 보였다. Type 3의 센서는 수치해석(numerical analysis)에서 센서중앙의 원형부분을 고려하지 않았기 때문에 다른 Type에 비해 오차가 약간 크게

Table 4 Capacitance of the sensors by the 3-D FEM analysis and by the numerical analysis

Sensor type	Type 1	Type 2	Type 3
L_{GAP} (mm)	43.6	43.6	42.9
Capacitance by the 3-D FEM analysis (pF)	1.710	1.738	1.699
Capacitance by the numerical analysis (pF)	1.645	1.645	1.619
Error (%)	3.8	5.4	5.6

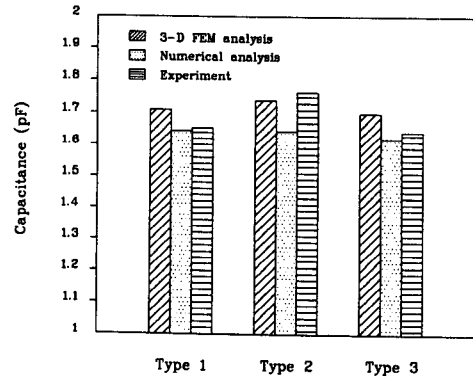


Fig. 17 Comparison of the 3-D FEM analysis, numerical analysis and experimental results of the sensors in Fig. 16

나타났다.

Fig. 17은 Fig. 16의 센서들의 3차원 FEM 해석, 수치해석, 그리고 실험결과를 서로 비교한 그래프이다. 3차원 FEM 해석결과와 실험결과 모두 Type 2의 센서가 가장 감도가 좋게 나왔다.

5. 결 론

본 연구에서는 planar interdigital capacitor(IDC)의 형상에 대한 센서의 감도 및 작용범위 등을 FEM 해석으로 계산하였다. 또한 IDC 외에 다른 형상의 센서에 대한 감도를 서로 비교하였다. FEM 해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 센서전극의 형태가 반복성을 가질때, 전기장의 모양이 대칭성을 이루므로 단위형상만의 FEM

해석으로 전체의 해석이 가능하다.

(2) IDC의 감도를 높이기 위해서는, 주어진 선 서길이 내에서 전극의 폭(W)과 전극사이의 간격(GAP)을 제작할 수 있는 최소의 크기로 하여 전극의 수가 가장 많게 해야 한다.

(3) 매질의 두께가 어느정도 커지면 정전용량(C)의 값이 일정해지는 경향이 있는데, 이는 주어진 전극형상에서 전기장이 미치는 범위가 정해져 있다는 것을 나타낸다. 따라서 제작한 센서(W : 0.1 mm, GAP : 0.1 mm)에서는 매질의 두께가 0.2 mm 이상인 곳의 매질은 고려할 필요가 없었다.

(4) GAP/W=1일 때, 센서의 FEM해석 대신에 사용할 수 있는 일반화된 함수식을 수치해석법으로 구하였다.

(5) 센서형상에 대한 해석 및 실험결과에서는 사각형의 나선형태(Type 2)의 센서가 가장 감도가 좋았다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Chiao, L. and Lyon, R. E., 1990, "A Fundamental Approach to Resin Cure Kinetics," *Journal of Composite Materials*, Vol. 24, pp. 739~752.
- (2) McDonough, W. G., Fanconi, B. M., Mopsik, F. I. and Hunston, D. L., 1990, "A Role of Cure Monitoring Techniques for On-Line Process Control," *Proceedings of the 6th Annual ASM/ESD Advanced Composite Conference*, 8-11, pp. 637~644.
- (3) Hudson, D., 1974, "The Use of Automatic Dielectrometry for Autoclave Moulding of Low Void Composites," *Composites*, pp. 247~252.
- (4) Bromberg, M. L., Day, D. R., Lee, H. L. and Russell, K. A., 1986, "New Applications for Dielectric Monitoring and Control," *Proceedings of the 2nd Conference of Advanced Composites*, 18-20, pp. 307~311.
- (5) Day, D. R., 1986, "Cure Control : Strategies for Use of Dielectric Sensors," *Proceedings of the 31st International SAMPE Symposium*, 7-10, pp. 1095~1103.
- (6) Holman, J. P., 1986, *Heat Transfer*, McGraw-Hill Book Company, 6th Edition, Chapter 2.
- (7) Halliday, D. and Resnick, R., 1981, *Fundamentals of Physics*, John Wiley & Sons, Inc., 2nd Edition, Chapter 27.
- (8) Lin, J., Möller, S. and Obermeier, E., 1991, "Two-Dimensional and Three-Dimensional Interdigital Capacitors as Basic Elements for Chemical Sensors," *Sensors and Actuators B*, 5, pp. 223~226.
- (9) ANSYS *User's Manual*, 1992, Swanson Analysis Systems, Inc., Revision 5.0.
- (10) Maron, M. J., 1982, *Numerical Analysis*, Macmillan Publishing Co., Inc., Ch. 5.
- (11) Endres, H. E. and Drost, S., 1991, "Optimization of the Geometry of Gas-Sensitive Interdigital Capacitors," *Sensors and Actuators B*, 4, pp. 95~98.