

## 미소변위측정용전기용량수감부설계와 특성평가

권철호, 박진우, 리철명

나노척도조종과 나노측정 및 가공수단에서 나노급변위량이나 위치를 정확히 측정하는 문제가 중요하다.

나노급변위량이나 위치를 측정하는 방법에는 여러가지가 있는데 전기용량식방법은 미소변위량을 비접촉식으로 측정하는 방법으로서 감도가 높고 동적응답이 빠르며 구조가 간단하고 전력소비가 작은것과 같은 우점으로 하여 그것에 대한 연구가 널리 진행되고있다.[2, 3]

논문에서는 미소변위측정용전기용량수감부설계에서 나서는 문제로서 설계인자들사이의 관계를 해석하고 수감부특성을 논의하였다.

### 1. 미소변위측정용전기용량수감부설계인자해석

전기용량수감부는 일반적으로 2개의 평행평판전극판을 리용하는데 콘덴사용량은 다음과 같다.

$$C = \epsilon \epsilon_0 \frac{s}{h} \quad (1)$$

여기서  $\epsilon$ 은 매질의 유전률,  $\epsilon_0$ 은 진공유전률,  $h$ 는 두 극판사이거리,  $s$ 는 극판면적이다.

식 (1)에서 보는바와 같이  $h$ 가 변하는데 따라 콘덴사의 용량이 변화되므로 용량변화값을 측정하여 미소변위량을 알아낼수 있다.

식 (1)에서 수감부전극의 면적은 유한이므로 수감부변두리에서의 전기마당은 불균일하게 된다.

선행연구[1]에서는 전기용량수감부변두리에서의 전기마당변화영향을 제거하기 위한 방도로서 등전위고리를 설치하고 그것에 해당하는 측정회로를 제시하였다.

전기용량수감부의 등전위차폐원리와 수감부구조는 그림 1과 같다.

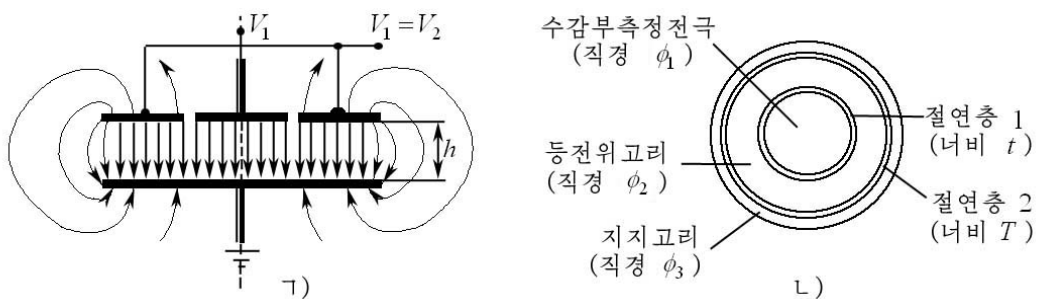


그림 1. 용량수감부의 등전위차폐원리(L)와 수감부구조(L)

$V_1$ 는 수감부측정전극에 걸린 전압,  $V_2$ 는 등전위고리전극에 걸린 전압

그림 1에서 보는바와 같이 미소변위 측정용 전기용량수감부는 수감부 측정전극옆에 등전위고리를 설치하여 수감부 변두리에서의 전기마당이 불균일한 현상을 해결할 수 있다.

이때 측정대상물은 평판콘덴서의 한쪽 극판으로 되며 보통 접지시켜 리용한다.

실제수감부에서는 그림 1의 L)에서 보는바와 같이 수감부의 지지고리를 접지시켜 외부전기마당을 차폐한다.

수감부 측정전극의 직경을  $\phi_1$ , 등전위고리의 외부직경을  $\phi_2$ , 지지고리의 외부직경을  $\phi_3$ , 절연층 1의 너비를  $t$ , 절연층 2의 너비를  $T$ 라고 하면 이 설계인자들에 대한 해석을 다음과 같이 할 수 있다.

#### ① 절연층 1의 너비( $t$ )확정

$t$ 값이 일정한 정도로 작을 때에는 수감부 측정전극과 측정대상물사이의 전기마당이 균일해진다. 이 경우 수감부 측정전극의 넓이를  $s$ 로, 절연층 1의 넓이를  $\Delta s$ 라고 하고

$$\frac{\Delta s}{s} = \frac{4}{\pi \phi_1^2} \cdot \frac{\pi}{4} [(\phi_1 + 2t)^2 - \phi_1^2] \quad (2)$$

을 통해  $t$ 를 평가하자.

식 (2)로부터  $t$ 는  $t = \phi_1(\sqrt{1 + \Delta s/s} - 1)/2$ 과 같다.

수감부의 가공수준과 측정기구의 선형성에 대한 요구로부터  $\Delta s/s$  값을 어떤 한계상수  $\alpha_1$ 로 정할 수 있다. 즉

$$t \leq \phi_1(\sqrt{1 + \alpha_1} - 1)/2. \quad (3)$$

$\alpha_1$ 이 주어지면  $\phi_1$ 에 해당하는  $t$ 의 최대값을 결정할 수 있다.

#### ② 수감부 측정전극의 직경( $\phi_1$ )확정

미소변위 측정장치는 자기의 고유한 선형 측정 한계( $C_{\min}$ ,  $h_{\max}$ )가 있다.

$C = \epsilon \epsilon_0 s / h = \pi \epsilon \epsilon_0 \phi_1^2 / (4h)$ 에서 한계상수  $\alpha_2$ 를 받아들이면

$$\phi_1 = \sqrt{\frac{4C_{\min} h_{\max}}{\pi \epsilon \epsilon_0}} = \alpha_2 \sqrt{h_{\max}} \quad (4)$$

이다.  $\alpha_2$ 가 주어지면 측정 한계에 따라  $\phi_1$ 을 선택할 수 있다.

#### ③ 등전위고리의 외경( $\phi_2$ )확정

수감부 측정전극 변두리에서 전기마당은  $\phi_1$ 에 비하여  $\phi_2$ 가 클수록,  $h$ 가 작을수록 균일하게 된다.

응용 프로그램 COMSOL을 리용하여  $\phi_1$ 을 고정하고  $\phi_2$ 를 변화시켰을 때의 전기마당의 전력선과 전위분포도는 그림 2와 같다.

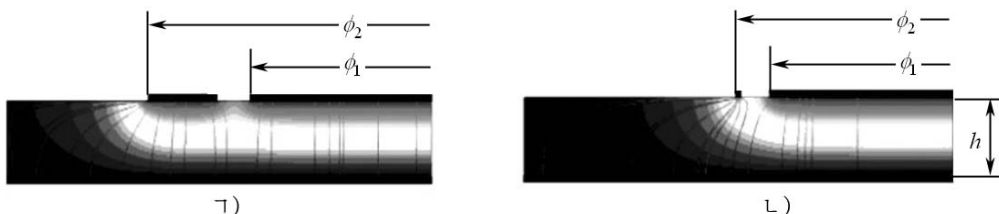


그림 2.  $\phi_1$ 을 고정하고  $\phi_2$ 를 변화시켰을 때의 전기마당의 전력선과 전위분포도

1)  $\phi_2$ 를 상대적으로 크게 했을 때, 2)  $\phi_2$ 를 상대적으로 작게 했을 때

모의에서는 고리형용량수감부가 축대칭이라는것을 고려하여 2차원평면의 절반구간만을 해석하였다.

그림 2에서 보는바와 같이  $h$ 와  $\phi_1$ 을 일정하게 하고  $\phi_2$ 를 작게 할수록 수감부측정전극끝에서의 전기마당(전력선)은 불균일하게 된다는것을 알수 있다.

따라서  $\frac{\phi_2 - \phi_1}{h} = \alpha_3$ 인 한계상수  $\alpha_3$ 을 받아들이면 등전위고리의 외부직경  $\phi_2$ 를 선택할수 있다. 즉

$$\phi_2 \geq \phi_1 + \alpha_3 h_{\max}. \quad (5)$$

#### ④ 절연층 2의 너비( $T$ )확정

등전위고리에서의 전기마당이 지지고리에 의한 영향을 적게 받게 하려면  $T$ 가 될수록 커야 하는데 이것을 다음과 같이 표시할수 있다.

$$T_{\min} \geq \alpha_4 t \quad (6)$$

우에서 논의된 식 (3)–(6)에서 상수  $\alpha_i, i=1, \dots, 4$ 는 실험을 통하여 설계인자들과 측정대상을 변화시키면서 알아낼수 있다.

다음 이 상수들을 리용하여 수감부설계인자들의 값들을 결정할수 있다.

## 2. 전기용량수감부의 특성평가실험

설계된 전기용량수감부의 특성평가는 원자힘현미경(AFM)의 탐침이송대에 설치된 걸음전동기식나노변위기구를 리용하여 진행하였다.

이때 리용한 걸음전동기 《MA335B》는 고성능미세걸음전동기로서 한 임펄스당 40nm씩 이동한다.[4]

변위값은 용량수감부를 리용한 측정장치의 출구에서 전압으로 현시된다.

#### ① $t$ 의 평가실험

$\phi_1=3.8\text{mm}$ ,  $\phi_2=6.6\text{mm}$ ,  $T=0.2\text{mm}$ 로 고정하고  $t$ 가 0.1, 1, 2mm일 때의 변위-전압관계는 그림 3과 같다.

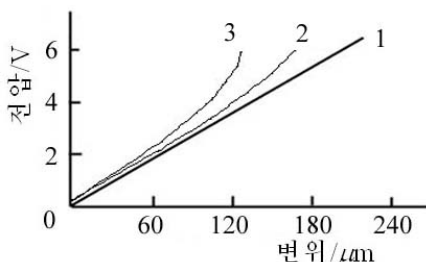


그림 3. 각이한  $t$ 에 대한  
변위-전압관계곡선  
1-3은  $t$ 가 각각 0.1, 1, 2mm인 경우

그림 3에서 보는바와 같이  $t$ 가 작을수록 선형성이 좋지만 가공수준과 측정기구에 대한 요구정도를 고려하여  $t$ 의 한계값을 0.1mm로 정해야 한다는것을 알수 있다.

이 한계값에 의하여  $\alpha_1$ 은 0.11로 된다.

각이한  $\phi_1$ 값에 대한 실험을 진행한 결과  $\alpha_1$ 값은 큰 차이가 없다.

#### ② $\phi_1$ 의 평가실험

다음으로 각이한  $\phi_1$ 에 해당하는 최대측정선형구간  $h_{\max}$ 와  $\alpha_2$ 를 결정하기 위한 실험을 진행하였다.

$t=0.1\text{mm}$ ,  $T=0.2\text{mm}$ ,  $\phi_2=\phi_1+2$ 로 고정하고  $\phi_1$ 이 3.8, 6, 8.4mm일 때  $h_{\max}$ 와  $\alpha_2$ 값은 표 1과 같다.

표 1.  $\phi_1$ 에 따르는  $h_{\max}$ 와  $\alpha_2$  값

$\phi_1 / \text{mm}$	$h_{\max} / \text{mm}$	$\alpha_2$	$k / (\text{V} \cdot \mu\text{m}^{-1})$	$S / (\text{nm} \cdot \text{mV}^{-1})$
3.8	0.22	8.1	0.022 7	44
6.0	0.52	8.3	0.016 9	59
8.4	1.13	7.9	0.006 3	160

③  $\phi_2$ 의 평가실험

$\phi_1$ 을 3.8, 6.0, 8.4mm로 하고  $\phi_2$ 를 각이한 크기로 변화시키면서 변위-전압관계를 보았다.

$\phi_1=6.0\text{mm}$ 에 대한 측정결과는 그림 4와 같다.

그림 4에서 보는바와 같이  $\phi_2$ 가 클수록 선형성이 좋으며  $\phi_2=11\text{mm}$ 이상에서는 그 차이가 크지 않다는것을 알수 있다.

$\phi_1$ 값을 변화시켰을 때  $\alpha_3$ 에 대한 측정결과는 표 2와 같다.

표 2.  $\phi_1$ 값을 변화시켰을 때  $\alpha_3$ 에 대한 측정결과

$\phi_1 / \text{mm}$	$h_{\max} / \text{mm}$	$\phi_2 / \text{mm}$	$\alpha_3$
3.8	0.22	6	10.9
6.0	0.52	11	9.6
8.4	1.13	18	8.5

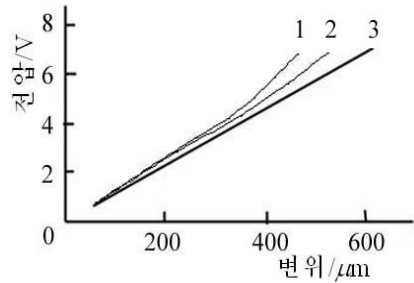


그림 4. 각이한  $\phi_2$ 에 대한 변위-전압관계곡선

1-3은  $\phi_2$ 가 8, 10, 11mm인 경우

표 2로부터 수감부측정전극직경( $\phi_1$ )이 커질수록 등전위고리가 두터워져야 한다는것을 알 수 있다.

④  $T$ 의 평가실험

$T$ 는 될수록 커야 하지만  $T$ 가 너무 크면 오히려 수감부의 체적이 커져 다루기 불편 할뿐만아니라 외부전자기마당의 차폐효과가 떨어진다.

$T$ 를 변화시키면서 실험한 결과  $\alpha_4$ 는 대체로 2이다.

세가지 종류의 수감부를 리용한 측정기구의 기술적특성은 표 3과 같다.

표 3. 측정기구의 기술적특성

$\phi_1 / \text{mm}$	측정구간/ $\mu\text{m}$		전압구간/V		$S / (\text{nm} \cdot \text{mV}^{-1})$
3.8	20~250	220	2.55~7.58	5.03	44
6.0	80~600	520	1.04~9.84	8.80	59
8.4	170~1 300	1 130	1.47~8.56	7.06	160

표 3에서 보는바와 같이  $\phi_1$ 이 작을수록 측정대역은 작아지지만 반면에 분해능  $S$ 가 높아진다는것을 알수 있다.

따라서 44nm보다 작은 분해능으로 측정하려면 측정수감부의 면적을 보다 작게 하여야 하며 구체적인  $\phi_1$ 값은  $\alpha_2$ 와  $h_{\max}$ 를 식 (4)에 대입하여 구할수 있다.

동시에 측정회로의 증폭도와 출구단의 A/D변환기비트수를 높여야 한다.

## 맺 는 말

미소변위측정용전기용량수감부에서 변두리영향을 제거할수 있는 수감부설계인자들사이의 관계식들을 밝히고 파라미터들을 결정하여 합리적인 설계를 진행할수 있게 하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] 신영제 등; 물리, 2, 26, 주체101(2012).
- [2] 李建文 等; 计量学报, 22, 3, 181, 2001.
- [3] 刘宇 等; 传感技术学报, 20, 7, 1504, 2007.
- [4] 徐熙平 等; 长春理工大学学报, 33, 2, 54, 2012.

주체103(2014)년 7월 5일 원고접수

**Design of a Capacitive Sensor for Micro Displacement  
Measurement and Estimation  
of Its Characteristics**

*Kwon Chol Ho, Pak Jin U and Ri Chol Myong*

We analyzed the design factors of capacitive sensor which is able to eliminate the edge effects of sensor for micro displacement measurement and identified its characteristics through experiment.

Key words: micro displacement, capacitive sensor