

논문 2001-10-6-07

# LAPS를 위한 pH 이미지 검출용 격자무늬 광자극 방법

배상곤\*, 강신원\*, 조진호\*\*

## The Method of Optical Stimulus by Reticle for pH Image Detection using LAPS

S. K. Bae\*, S. W. Kang\*, J. H. Cho\*\*

### 요 약

본 논문에서는 시료가 갖는 pH값의 2차원 분포를 효과적으로 측정하기 위하여, 회전 격자를 이용한 변조 광을 LAPS에 주사함으로써 pH이미지를 검출하는 방법을 제안하였다. 이는 회전 격자를 이용하여 각 픽셀별로 다른 주파수로 변조된 광을 조사하고 이에 따른 광 전류의 주파수 성분별 진폭을 계산함으로써 한 행의 신호 성분을 동시에 측정할 수 있다. 제안된 검출방법을 실험하기 위하여, LAPS의 특성을 고려한 회전격자를 설계·제작하고 제작된 회전 격자와 패턴 영상을 이용한 주파수 성분 분석에 의해 이미지를 검출하였다. 실험 결과로부터 회전 격자를 이용한 제안된 검출 방식이 약 22-24dB의 PSNR을 가지는 30×30화소의 이미지를 기존의 방식보다 30배 빨리 측정할 수 있음을 확인하였다.

### Abstract

In this paper, we proposed a new detection method of pH image to effectively measure a 2-dimensional pH distribution of test materials by irradiating an frequency modulated light to LAPS using a reticle. It could measure simultaneously signals in one line by applying a modulated light having difference frequency for each pixel using a frequency modulating reticle, and calculating an amplitude with respect to a frequency component by the light source. To experiment the proposed method, we designed and implemented a reticle considering of a LAPS's characteristic, and reconstructed an image by frequency analysis using the implemented reticle and test pattern image. As a result, we verified that the proposed method using the reticle was able to detect 30 times faster for a 30×30 pixels pH image having a PSNR of 22-24 [dB] than conventional method .

## 1. 서 론

LAPS(Light Addressable Potentiometric

Sensor)는 지시 광의 위치에 따른 표면 전위의 변화에 의해 pH 변화를 검출할 수 있는 소자로서, 다양한 검체를 동시에 분석하기 위한 다중 채널용 센서로 응용 가치가 매우 높다. 따라서, 이 센서를 이용해 면역 반응에 의해 발생하는 pH 변화량을 검출함으로써 환경이나 군사용의 화학방 측정 및 식품, 수질검사와 같은 많은 응용 분야에서 미생물 및 단백질의 분석을 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다<sup>[1,2]</sup>. 그러나 이와 같이 고정된 위치에서의 1차원적인 pH 변화의 모니터링은 미생물의 확산속도나 분포를 검출하

\* 경북대학교 전자전기공학부(School of Electronic & Electrical Eng., Kyungpook National University)

\*\* 경북대학교 의과대학 의공학교실(Dept. of Biomedical Eng., School of Medicine, Kyungpook National University)  
<접수일자 : 2001년 7월 27일>

기 위해서는 부적합하다. 따라서, 최근에는 미생물 및 세포의 물질대사에 의해 나타나는 2차원 농도 분포 및 확산속도 검출을 위한 pH 이미지 센서에 관한 연구가 이루어지고 있다<sup>(3,4)</sup>.

LAPS에 의한 pH 이미지는 광원이 각 픽셀을 이동하여 조사되고 이때 각 픽셀에서 나타내는 값들을 위치에 따라 2차원적으로 배열한 것이므로 픽셀 위치에서의 신호 값을 검출하여야 한다. 이러한 pH 이미지 검출에 관한 연구의 과제는 이미지 분해능은 높이면서 측정 시간을 줄여야 하는 것이다.

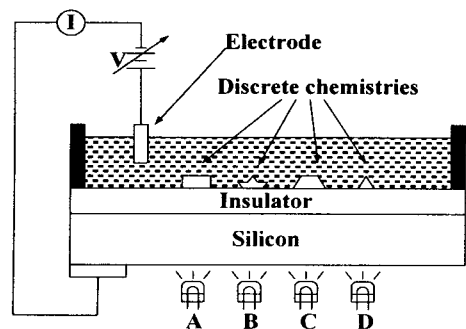
1994년에 Nakao 등은 LAPS 표면에 레이저 빔을 이동시켜 2차원적인 pH 분포를 측정하는 pH 이미지 검출에 관한 연구를 발표하였으며, 미세 조직의 관찰을 위한 고분해능 pH 이미지 센서에 관한 연구를 수행하였다<sup>(4,5)</sup>. 또한 Uchida 등은 디지털 LAPS 시스템을 이용하여 고속 화학 이미지 센서에 관한 연구를 수행한바 있다<sup>(6)</sup>. 하지만 기존 연구에서 이미지 검출을 위해서는 광원의 위치를 2차원적으로 미세 조정하여 주사하고 이 주사된 위치 정보에 해당하는 센서 신호를 검출함으로써 화학적인 농도 분포 이미지를 측정할 수 있었다. 이러한 미세 주사를 위해서는 정밀한 위치 제어 장치가 필요하게 되며, 모든 픽셀에 대하여 측정을 하여야 하므로 이미지 검출 시간이 길다.

본 논문에서는 회전 격자를 이용한 광주파수 변조에 의한 pH 이미지 검출 방법을 제안하였다. 이는 주파수 변조용 회전 격자를 이용하여 각 픽셀별로 다른 주파수로 변조된 광을 인가하여 주파수 성분별로 위치를 확인함으로써 한 행의 신호 성분을 동시에 측정할 수 있다. 제안한 방식에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여 30×30 화소의 주파수 성분별 pH 이미지 재구성이 가능함을 검증하였다. 또한 센서 특성에 적합한 회전 격자를 설계/제작하였으며, 제작된 회전 격자와 패턴 영상을 이용하여 주파수 성분분석을 통한 2차원 이미지를 검출하였다. 실험 결과로부터 회전 격자를 이용한 제안된 검출 방식이 22-24dB의 PSNR(power of signal to noise ratio)의 30×30화소의 이미지를 기존의 방식보다 30배 빨리 측정할 수 있음을 확인하였다.

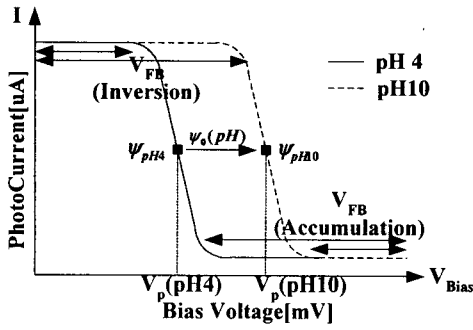
## II. LAPS와 화학 이미지 검출 원리

### 1. LAPS의 원리

EIS(Electrolyte / Insulator / Silicon) 구조인 LAPS는 변조된 광( $\lambda$ : 940nm)을 반도체 표면에 조사하여 감지막과 전해질 계면에서의 표면 전위를 측정하는 것이다. 그림 1은 LAPS의 측정 원리 및 특성 곡선을 나타내고 있다. 그림 1 (a)를 보면, 실리콘웨이퍼에 변조광과 함께 직류 전압을 인가하면 광에 의해 생성된 전자-정공 쌍이 공핍영역 전계에 의해 분리되어 LAPS소자내의 공핍 영역과 절연층의 전하를 붕괴하는 역할로 일시적인 광전류를 발생시킨다. 이때 조사된 광이 공핍 영역 폭을 충분히 변조시키게 되면 광 전류에는 광변조 주파수를 반영하는 교류성분이 존재한다. 또한, 직류 전압이 LAPS소자 내에 광 변조 신호와 동시에 인가된다. 이 인가 직류 전압이 반전(inversion) 상태 또는 축적(accumulation) 상태일 때는 비록 광에 의해 전자-정공 쌍이 생성되어도 공핍 영역의 정전용량의 변화가 없으므로 광 전류가 변화하지 않는다. 반면에 인가 전압이 반전 상태에서 축적 상태로 변화할 때는 교류 광전류/바이어스 전압 곡선이 광에 의해 발생한 전류가 없는 축적 상태와 최대인 반전 상태 사이에서 급격한 변화를 보인다. 이와 같은 환경 하에서, 감지막과 전해질 계면에서의 전위변화를 측정해 보면 광전류 곡선은 전압 축을 따라 이동하는 것을 관찰할 수 있다.



(a)



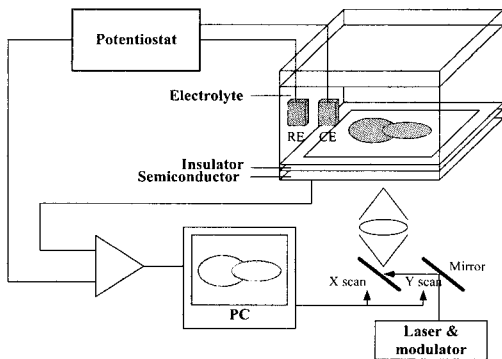
(b)

그림 1. LAPS의 (a) 기본 개념도 및 (b) 특성곡선.  
Fig. 1. (a) Schematic diagram and (b) characteristic curve of the LAPS.

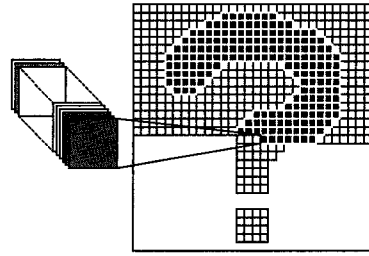
그러므로, 변곡점에서의 전압 ( $V_p$ )은 EIS구조에서 평탄 대역 전압 ( $V_{FB}$ )에 의존하게 되고, 이때 평탄 전압은 pH에 직접 관계되는 실리콘 표면 전위 ( $\psi_0$ )의 변화에 의존하게 된다<sup>[2]</sup>. 그림1 (b)는 이와 같은 동작에 의해 나타나는 특성 곡선을 보이고 있다.

## 2. 기존의 이미지 검출 시스템(PDM)

미생물 및 화학 반응에 의해 나타나는 미세 pH변화 및 미생물의 분포와 확산을 측정하기 위한 연구가 최근 들어 많이 이루어지고 있다. 이와 같은 pH 변화의 공간적인 분포를 관찰하기 위한 기존의 방식은 픽셀별로 반응에 의해 나타나는 출력을 검출하였다. 그림 2는 기존의 픽셀별 화학 이미지 검출 방식(PDM: pixel-by-pixel Detection Method)의 시스템 개념도를 나타내고 있다.<sup>[5]</sup>



(a)



(b)

그림 2. 기존 화학 이미지 센서의 (a) 검출 시스템 구성 및 (b) 검출 개념도.

Fig. 2. (a) Structure of detection system and (b) schematic diagram for conventional method of chemical image sensor.

그림2 (a)에서 EIS구조의 센서에 전위차계를 이용하여 센서 면의 전위를 측정하게 된다. 이때 나타나는 출력은 식(1)에서와 같이 레이저나 광원에 의해 광 조사 위치에 따른 전류  $I_{pixel}(x, y)$ 이며 이는 조사광의 주파수 성분  $\cos(\omega t)$ 을 포함한 전류의 진폭  $I_{x,y}$ 으로 나타난다.

$$I_{pixel}(x, y) = I_{x,y} \cdot \cos(\omega t) \quad (1)$$

따라서 그림2 (b)에서와 같이 화학 이미지  $Image(X, Y)$ 는 식(2)에 나타낸 바와 같이 각 픽셀에서 나타나는 전류값의 2차원적 분포를 나타냄으로써 생화학 반응을 관찰할 수 있다.

$$Image(X, Y) = \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y |I_{pixel}(x, y)| \quad (2)$$

이러한 기존 방법에서는 각 픽셀의 위치정보를 파악하기 위하여 레이저나 광원의 위치를 이동시키거나 가로 및 세로 방향으로 광원의 위치를 변화시키기 위한 미세 거울을 이동함으로써 순차적으로 출력값을 읽어내어 재구성하게 된다. 그러나 기존방법은 이미지 구성을 위하여 각 픽셀별로 출력을 검출해야 하므로 측정시간이 오래 걸리며, 높은 공간 분해능을 위해서는 광원의 위치 이동을 위한 X, Y 주사용 거울의 미세한 조정 장치 및 구동을 위한 제어가 필요하며 광원을 센서면에 유도하기 위한 복잡한 광학부가 필요하게 된다.

### 3. 제안된 검출 시스템(LDM)

#### 1) 전체 시스템

기존의 픽셀별 화학 이미지 검출의 문제점을 보완하기 위하여 본 논문에서는 라인별 출력에 의한 화학 이미지 검출 방법(LDM : line-by-line detection method)을 제안하였다. 이는 각 픽셀별로 나타나는 출력을 검출하는 대신에 한 라인에 대하여 각 픽셀별로 서로 다른 주파수 성분의 광을 인가하여 나타나는 출력을 주파수 성분별로 재구성함으로써 한번에 한 라인의 출력을 얻을 수 있다. 그림 3은 제안한 화학 이미지 센서의 검출 시스템 및 검출 개념도를 나타내고 있다.

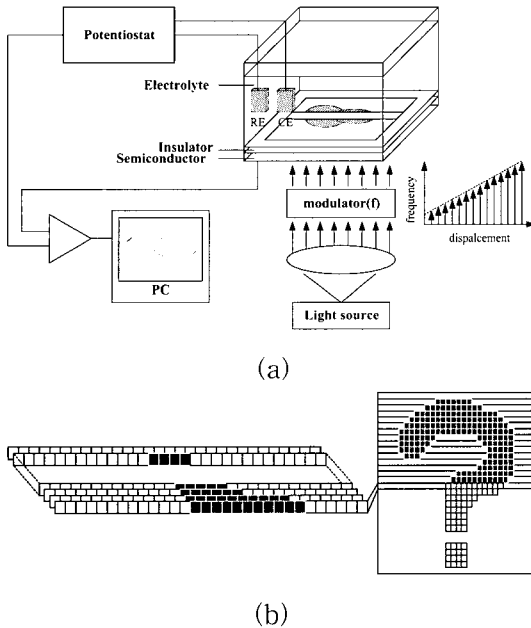


그림 3. 제안한 LDM 이미지 센서의 (a) 검출 시스템 구성 및 (b) 검출 개념도.

Fig. 3. (a) Structure of detection system and (b) schematic diagram for proposed LDM of chemical image sensor.

그림3 (a)는 검출 시스템의 구성을 나타낸 것으로, 광원은 기존의 광원과 동일한 광을 사용하게 되고 이를 확장 렌즈에 의해 센서와 동일한 길이의 광원으로 확장한다. 이렇게 확장된 광은 라인 slit 및 회전 격자에 의해 해당 라인의 가로 방향으로 서로 다른 주파수의 광원 신호로 만들어진다. 이렇게 가로축으로 변조된 광은  $i$ 개의

변조 주파수인  $\cos(\omega_0 t), \cos(\omega_1 t), \dots, \cos(\omega_i t)$ 를 각각 가진다. 변조된 광을 센서면에 조사하게 되면 식(3)과 같이 센서 출력에는 위치별로 나타나는 서로 다른 주파수 성분의 합에 해당하는 출력 신호  $I_{line}$ 을 얻게 된다.

$$I_{line}(t) = I_0 \cos(\omega_0 t) + I_1 \cos(\omega_1 t) + \dots + I_i \cos(\omega_i t) \quad (3)$$

이를 주파수 성분별로 분리하게 되면 주파수별 진폭이 나타나게 되고, 이때 주파수별 진폭이 센서면의 각 위치에 따른 전류의 크기가 된다. 따라서, 한 행에 대한 이미지를 얻을 수 있다. 그림3 (b)는 이미지 검출 개념도를 나타내고 있다.  $X$ 개 열과  $Y$ 개의 행의 픽셀로 이루어지는 화학 이미지  $Image(X, Y)$ 는 식(4)와 같이 각 라인에 의해 나타나는 전류 값  $I_{line}(x)$ 의 FFT변환한 값의 2차원 분포를 나타내고 있음을 알 수 있다.

$$Image(X, Y) = \sum_{y=1}^Y [FFT(I_{line}(t))] \quad (4)$$

#### 2) 광 신호 변조부

제안된 LDM 시스템을 위하여 동일한 라인 내에 서로 다른 주파수 성분을 가지는 변조 광신호가 필요하다. 본 논문에서는 광신호 처리에 널리 사용되고 있는 회전 격자를 이용하여 광신호를 변조하였다.

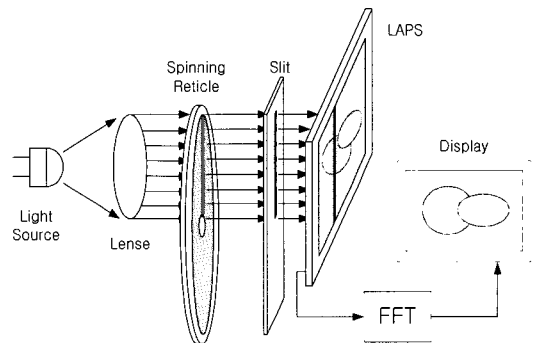


그림 4. 제안된 광신호 변조부의 구성도.

Fig. 4. Schematic diagram of a proposed optical modulator.

그림 4는 제안된 광신호 변조부의 구성도를 나타내고 있다. 광원으로부터 나온 광은 확장 렌즈를 통하여 센서 길이에 맞게 확장되고 이를

회전 격자에 의해 중심으로부터 멀어질수록 주파수가 증가하는 광으로 변조한 다음, 이를 LAPS의 측정면에 라인별로 인가하기 위한 slit을 통하여 한 라인의 변조광을 센서면에 조사하게 된다. 또한 센서면의 한 라인에 대한 측정이 이루어지고 나면, 다음 라인의 측정을 위하여 센서를 라인 분해능만큼 이동하게 된다. 이렇게 센서의 라인 수만큼의 측정이 끝나면 이를 주파수 성분 분석을 위한 FFT를 수행하여 주파수별 진폭을 공간적으로 표시함으로써 LAPS표면에서 나타나는 화학 이미지를 검출하게 되는 것이다.

### 3) 회전 격자 설계

본 논문의 광신호 변조부 구성을 위해서 회전 격자가 필요하다. 회전 격자는 격자의 형태에 따라 거리, 주파수 및 방위각 변조를 쉽게 할 수 있으므로, 광 신호의 변조에 널리 이용되고 있다.<sup>[7-10]</sup> 그림 5는 광신호 처리에 널리 사용되는 회전 격자의 종류를 나타내고 있다. 그림 5 (a)는 원점으로부터의 거리에 따라 가지수를 달리함으로써 가지수의 개수에 따라 거리를 측정할 수 있게 된다. 그림 5 (b)는 방위각 변조를 위한 격자로서, 가지수는 동일하지만 물체의 위치에 따른 방위각을 측정할 수 있게 된다. 또한 그림 5 (c)는 각 위치에 따른 주파수를 변조할 수 있는 격자이다. 이밖에도 시분할 회전 격자 및 시분할/주파수 혼성 격자에 대한 연구가 상당히 이루어진 상태이다.

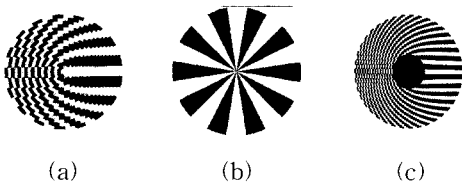


그림 5. (a) 거리 (b) 방위각 (c) 주파수 변조 회전 격자.

Fig. 5. Reticle for modulation of (a) distance (b) angle and (c) frequency.

본 논문에서 사용되는 회전 격자는 그림 5 (c)와 같이 동일한 라인 내에 여러 주파수 성분이 일정한 간격으로 분포된 변조광을 발생시키기 위한 것이다. 이러한 회전 격자의 투과 함수를 극좌표계로 나타내면 식 (5)로 표현된다.

$$T(r, \theta) = \frac{1}{2} \text{sgn}[\cos m(r)\theta] \quad (5)$$

여기서,  $m(r)$ 은 회전 격자 내에 포함된 격자의 가지수로 중심에서의 거리에 따라 변화하는 값이며,  $\text{sgn}(\cdot)$ 는 이진화를 위한 시그모이드 함수이다. 따라서, 광의 변조 주파수  $\omega_{\text{optical}}$ 는 회전 격자의 회전수  $rot$  및 하나의 회전 격자에 구성된 격자수  $m(r)$ 에 의해 식(6)과 같이 결정된다.

$$\omega_{\text{optical}} = 2\pi \times rot \times m(r) \quad (6)$$

따라서, 회전 격자를 설계하기 위해서는 광 변조 주파수의 범위, 격자수 및 회전수를 고려하여야 한다. 본 논문에서 사용될 회전 격자 설계를 위하여 각 픽셀의 위치별 광 변조 주파수( $\omega_n$ )를 식(7)과 같이 정의하였다.

$$\omega_n = \omega_{\text{init}} + n \cdot \Delta\omega \quad (n=1, \dots, i) \quad (7)$$

여기서,  $\omega_{\text{init}}$ 는 중심으로부터 최내각 원주에서의 변조 주파수이며,  $\Delta\omega$ 는 인접 픽셀과의 주파수 차이이며,  $n$ 은 픽셀의 위치를 나타내고 있다.

## IV. 실험 결과 및 고찰

### 1. 시뮬레이션

#### ■ 입력 영상

입력 영상은 행과 열로 구성된 영상이라고 가정하고 이를 한 행씩 주파수 변조 회전격자에 의해 변조시킨다. 변조된 신호로부터 각 주파수 성분을 검출하여 영상을 재구성하였다. 시뮬레이션에 사용한 입력 영상은 그림 6과 같다. 영상의 크기는 사용된 격자의 해상도에 맞추어  $30 \times 30$  화소로 구성하였다. 그림 6 (a) 및 (c)는 입력 영상의 이진 및 회색 준위에 따른 2차원 영상을 나타낸 것으로 중심부에서 화학 반응에 의해 높은 회색 준위를 나타내고 주위로 갈수록 반응의 확산에 의해 회색 준위가 감소하는 형태를 나타내고 있다. 그림 6 (b) 및 (d)는 이러한 입력 영상의 위치 및 회색 준위에 의한 3차원 영상을 나타내고 있다.

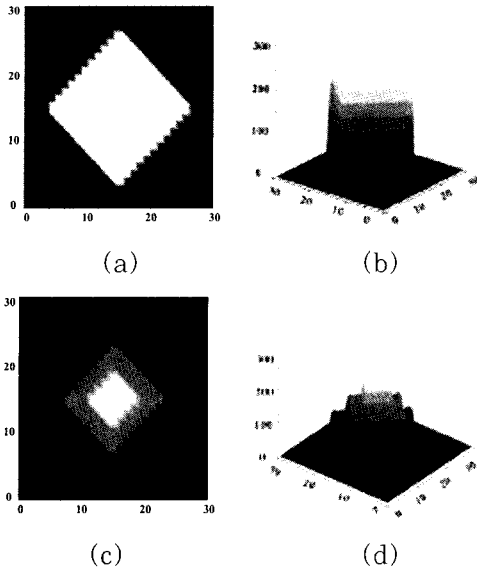


그림 6. 시뮬레이션에 사용된 (a) 2차원, (b) 3차원 이진영상과 (c) 2차원, (d) 3차원 휘도 영상.  
 Fig. 6. Input binary image of (a) 2D, (b) 3D and gray level image of (c) 2D, and (d) 3D for simulation.

이와 같은 입력 영상신호를 이용하여 제안한 LDM에 의한 이미지 검출에 관한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 위해 사용된 변조 주파수는 최내각 격자가 3kHz이며, 각 픽셀당 주파수 차이가 100Hz이고 30개 화소로 구성되어 최외각 격자가 6kHz로 구성하였다. 또한 샘플링 주파수는 최고 변조 주파수인 6kHz의 2배 이상인 20kHz이다.

그림 7은 이미지의 한 라인이 회전 격자에 의해 변조된 각 화소의 변조 신호 및 이들의 합에 의해 나타나는 센서의 출력 신호를 보여주고 있다. 그림에서는 30개의 화소 중에서 3번째, 16번째 및 27번째 화소의 변조 신호를 나타내고 있다. 각 화소의 출력은 서로 다른 주파수 ( $\omega_3, \omega_{16}, \omega_{27}$ )로 구성되며 각 출력 신호의 진폭( $A_3, A_{16}, A_{27}$ )도 서로 다를 수 있다. 이러한 신호들은 LAPS의 특성상 하나의 출력 단자로 합해져서 출력되므로 그림의 아래 부분과 같이 30개의 변조 신호에 의한 출력이 합해져서 나타나게 된다. 하지만 이렇게 합해진 신호에는 원 신호의 주파수 성분을 모두 포함하고 있으므로 이 출력 신호를 입력받아 주파수 성분 분석을 수행하게 된다.

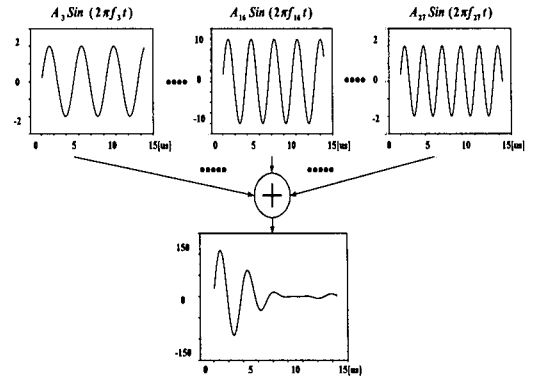
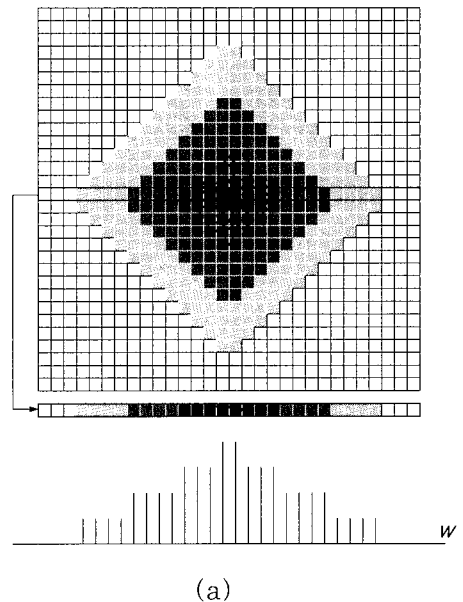


그림 7. 각 화소별 주파수변조 신호 및 센서 출력 신호.  
 Fig. 7. Signal of frequency modulation and sensor output for each pixels.

그림 8은 시뮬레이션 결과에 의해 재구성된 영상과 이 영상의 15번째 라인에 대한 주파수-진폭관계를 나타낸 것이다. 재구성 영상은 그림 8(a)에서와 같이 각 라인별로 검출된 출력 신호를 이용하여 FFT를 수행하고 주파수에 따른 진폭 성분을 회색 준위 이미지로 재구성한 결과를 나타내고 있다. 이는 입력 영상에서 진폭 성분과 비례함을 알 수 있다. 그림 8(b)에서 가로축은 주파수 즉, 픽셀 위치이고 세로축은 출력 신호의 진폭이다. 또한 재구성된 영상 중 15번째 라인에 가지는 주파수별 진폭을 동시에 나타내고 있다.



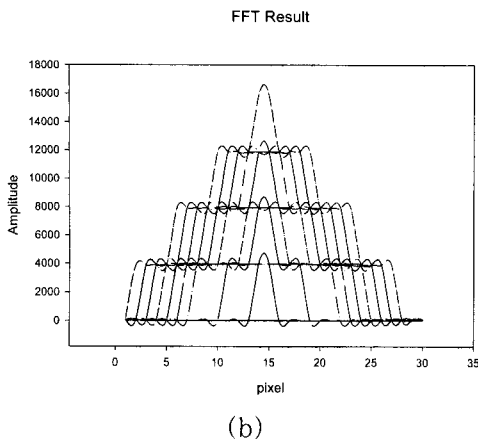


그림 8. 모의 실험 결과의 (a) 재구성 영상 및 (b) 15번째 라인의 FFT결과.

Fig. 8. Result of (a) reconstruction image and (b) FFT of 15th line.

## 2. LDM에 의한 pH이미지 검출 실험

### (1) 회전 격자 실험

본 논문에 사용된 광주파수 변조를 위한 회전 격자와 각도에 따른 격자 패턴을 그림 9에 나타내었다. 그림9 (a)에서 회전격자의 전체 지름은 6cm이고 격자가 구성된 폭은 센서의 길이와 동일한 1cm로 하였다. 그림9 (b)는 이러한 회전 격자를 각도  $\theta$ 가 0인 위치에서 반지름  $r$ 방향으로 잘라서 펼쳐놓은 형태로 된 격자 패턴을 나타낸 것으로 가로축은 각도이고, 세로축은 반지름 방향이다. 주파수변조 회전 격자는 30개의 다른 주파수 성분을 갖고 있으며, 이것이 재구성 영상의 해상도가 된다. 제작된 회전 격자의  $f_{ini}$ 를 3kHz,  $\Delta f$ 를 100Hz 및  $n$ 을 30으로 선택하였다. 이를 위하여 최내각의 회전 격자의 가지수는 30개로 구성하였으며 모터의 회전수는 초당 100회로 정하였다. 또한 각 격자간의 가지수의 차이를 1개씩 증가하여 최외각에는 59개의 격자 가지수를 가지게 구성하였다. 이상과 같이 제안된 pH 이미지 검출을 위한 광 주파수 변조를 위하여 회전 격자 패턴을 Auto-CAD를 이용하여 실측으로 작성하였으며 이를 흑백용 OHP용지 위에 1200 dpi의 레이저 프린터(HP5000)를 이용하여 출력하였다. 제작된 회전 격자를 모터에 장착하기 위하여 중앙 부분에 모터 연결용 샤프트로 고정하고 회전시 격자의 흔들림 방지를 위하여 원주

주위에 원형의 링을 부착하였다. 그림9 (c)는 회전 격자의 반지름 변화에 대한 주파수 특성을 나타내고 있다.

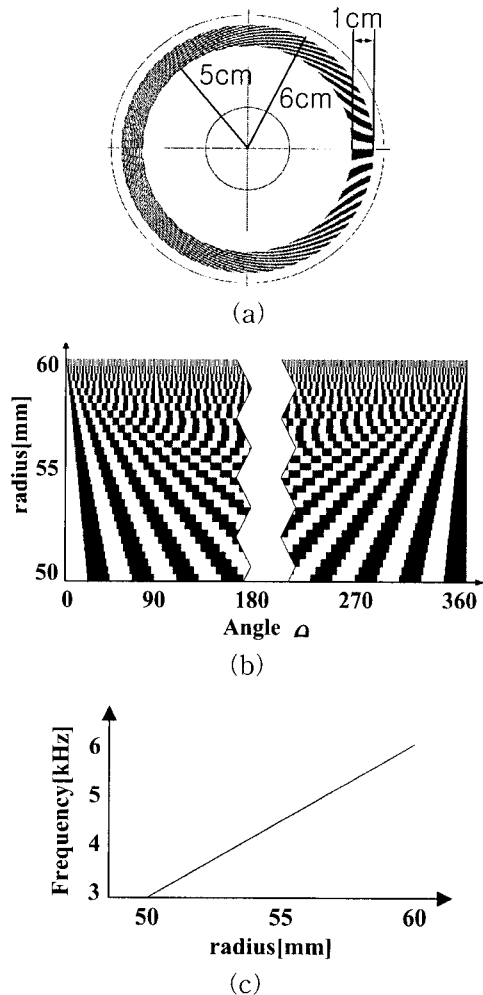
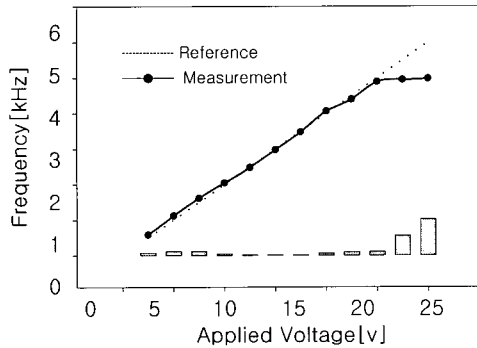


그림 9. (a)회전 격자, (b) 각도에 따른 격자 패턴 및 (c) 거리에 따른 주파수 특성.

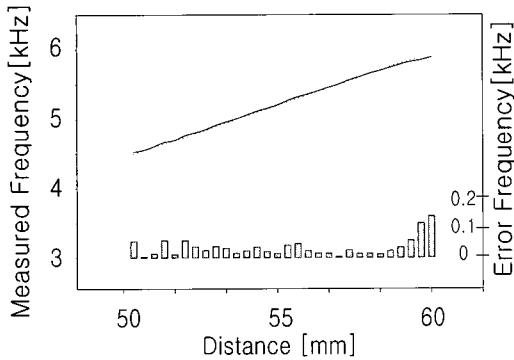
Fig. 9. (a) Shape of frequency modulation reticle, (b) spreaded pattern of the reticle and (c) frequency characteristic vs. radius.

이상과 같이 구성된 회전 격자를 이용하여 반지름  $r$ 에 따른 광주파수 변조 실험을 수행하였다. 회전 격자의 회전을 위하여 소형 DC모터(마쓰시다사, MXG-12WH)를 사용하였으며, 회전 격자의 출력 특성 확인을 위하여 센서의 광원과 동일한 파장의 적외선 광에 의해 동작하는 광인터럽트(SANYO사, TL850)를 사용하였다. 회

전 격자를 소형 DC모터에 고정하고 이를 실험용 스탠드에 장착한 다음 격자 부분에 광 인터럽트를 부착하여 실험하였다. 또한 측정된 파형의 주파수 스펙트럼을 관찰하기 위하여 DSP(TI사, TMS320C31)를 기반으로 한 DSK를 사용하였으며, 프로그램은 DSK 전용의 512포인트 FFT 소프트웨어를 사용하였다.



(a)



(b)

그림 10. 회전 격자의 인가전압-주파수 및 거리-주파수 응답 특성.

Fig. 10. Response of (a) frequency vs. applied voltages and (b) distance-frequency for reticle.

그림 10은 인가 전압 및 반지름에 따른 회전 격자의 응답을 나타낸 것이다. 그림10 (a)는 격자 회전시 2-24V까지의 인가 전압에 의해 나타나는 최대각 변조 광의 주파수 특성을 나타낸 것으로 특정 전압 범위에서는 이론적인 모터의 회전수와 비례함을 알 수 있다. 16V까지는 회전수가 일차적으로 비례하여 증가하지만 16V 이상에서는 무부하 회전수에 대하여 포화됨을 알 수 있

었으며, 본 논문에서 필요로 하는 3kHz 주파수를 위한 인가 전압은 모터 회전수의 선형적인 변화 범위에 속함을 알 수 있었다. 또한 정전압 파워 공급기를 통하여 모터의 특성 회전수를 유지하면서 회전 격자의 위치에 따른 출력 주파수를 그림10 (b)에 나타내었다. 그림에 나타난 주파수는 광검출기의 이동시에 DSK에 의해 나타나는 최대 진폭에서의 주파수를 측정하였다.

(2) 패턴 영상 실험

본 논문에서는 제안된 방식에 의한 이미지 검출 실험을 위하여 패턴 영상을 사용하였다. 이를 위하여 위에서 제작된 회전 격자와 그림 5에서 사용된 패턴 영상을 이용하여 이미지를 검출 실험을 수행하였다.

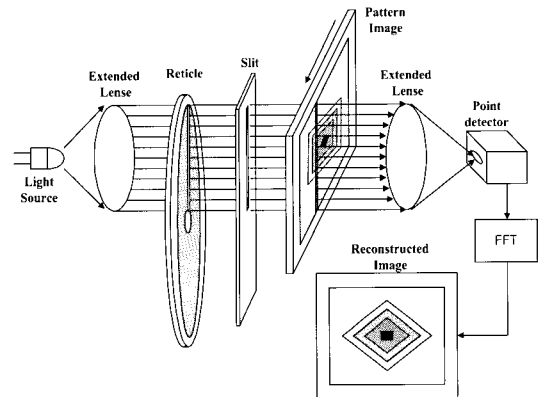


그림 11. 패턴 영상에 의한 실험 개념도.

Fig. 11. Schematic diagram of experiment by pattern image.

그림 11은 패턴 영상을 이용한 실험의 개념도를 나타내고 있다. 실험에 사용된 광원은 He-Ne 레이저광을 이용하였으며 이를 확장 렌즈를 이용하여 회전 격자 크기로 확장하고 이를 제작된 회전 격자 및 슬릿(slit)을 통과하여 변조하게 된다. 변조된 광은 시물레이션 입력 영상과 동일한 형태로 구성된 패턴 영상에 조사되도록 하였다. 이때 패턴 영상에 의해 투과되는 빛은 반지름에 따라서는 서로 다른 주파수 성분을 가지며 패턴의 모양에 따라 투과도가 다르게 나타나므로 통과된 광의 밝기가 패턴영상에 의존하게 된다. 패턴 영상은 OHP 필름에 4단계의 회색 준위를 가지는 영상으로 구성되었으며, 회색 준위에 따라 LAPS 특성과 동일한 현상으로 해



당 위치의 광신호 투과 정도를 변화시키게 된다. 이렇게 투과된 빛을 확장 렌즈를 이용하여 한 점으로 모으게 되고 모아진 광신호를 점 검출기를 이용하여 검출하게 된다. 검출된 광신호는 주파수 성분 분석을 위하여 FFT수행을 위한 DSK 보드로 입력되어 한 라인에 대한 영상을 얻게 된다. 이는 LAPS소자가 모든 출력이 한 점을 통하여 검출되어지는 구조와 동일한 것으로 이를 이용하여 LAPS에 의한 pH이미지 검출과 동일한 조건의 실험을 수행하게 된다.

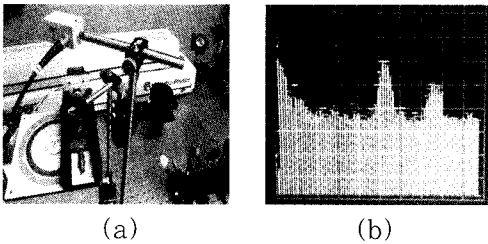


그림 12. 패턴 영상의 의한 (a) 실험 장면 및 (b) 주파수 성분 분석 결과.

Fig. 12. Photograph of (a) experiment and (b) result of FFT using pattern image.

그림 12는 패턴 영상에 의한 실험 장면 및 실험 결과를 나타내고 있다. 그림12 (a)는 실험 장면을 나타낸 것으로 레이저 광원을 회전 격자 아래 부분에서 조사하고 격자를 통과한 광원은 패턴 영상이 장착된 챔버를 통하여 집광 렌즈에 투과되면서 격자 및 패턴에 의한 광신호를 발생한다. 렌즈에 의해 집광된 광은 윗부분에서 점 검출기에 의해 전기 신호로 변환된다. 그림12 (b)는 패턴영상의 중앙 부분인 15행 이동시에 변환된 전기신호를 DSP 프로세서를 이용하여 AD변환하고 이를 FFT한 결과 화면이다. 여기서, 격자당 주파수는 약 500Hz이므로 최초 피크가 생기는 부분이 3kHz의 회전격자의 최내각 부분이다. 주파수가 증가할수록 진폭이 줄어들다가 패턴 영상의 중앙 부분에서 최소의 진폭을 나타내고 다시 증가하는 형태로써 패턴영상의 모양에 따라 진폭이 변화하고 있음을 확인할 수 있다.

이렇게 측정된 결과값을 이용하여 재구성된 영상을 그림 13 및 14에 나타내었다. 그림 12는 그림 6에 나타낸 이진 영상 패턴에 의한 측정 결과 영상이다. 그림13 (a)는 측정 결과를 3차원으로 재구성한 것으로 중앙부분이 패턴의 검은 부분으로 광원의 감쇠가 많이 일어난 부분이다.

그림13 (b)는 3차원 구성을 2차원으로 표시한 것으로 중앙 부분에 높은 값을 보이며 주변으로 갈수록 진폭이 낮아짐을 알 수 있다. 또한 영상의 왼쪽 부분이 오른쪽 부분보다 전반적으로 높은 값을 가지고 있으며 주변부분이 높은 값을 보이고 있다. 이렇게 2차원으로 구성된 영상에 대해 원 영상과의 유사도를 계산하기 위해 진폭값  $TH=140$ 의 문턱치에 의한 결과 영상을 그림13 (c)에 나타내었다.

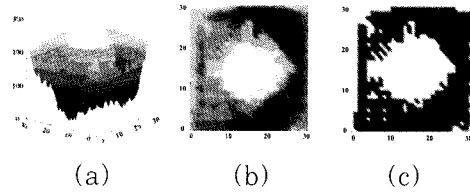


그림 13. 이진 영상의 (a) 3차원, (b) 2차원 및 (c) 문턱치에 의한 측정 결과.

Fig. 13. Binary result image of (a) 2D, (b) 3D and (c) image by threshold.

그림 14는 이진 영상과 동일한 방법으로 재구성된 4-휘도 결과 영상으로, 그림14 (a)는 재구성된 3차원 영상, 그림14 (b)는 2차원 영상 및 그림 14 (c)는 문턱치가  $TH = 160$ ,  $TH_2 = TH*0.85$ ,  $TH_3 = TH*0.7$  및  $TH_4 = TH*0.6$ 인 결과 영상을 각각 나타내고 있다.

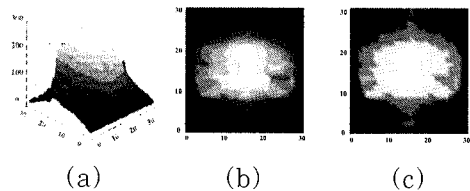


그림 14. 4-휘도 영상의 (a) 3차원, (b) 2차원 및 (c) 문턱치에 의한 측정 결과.

Fig. 14. 4-level result image of (a) 2D, (b) 3D and (c) image by threshold.

표 1은 위에서 구성된 영상의 측정 결과와 유사도 확인을 위하여 PSNR의 결과를 나타내고 있다. 이진 영상 및 4-휘도 영상은 각각 실제 크기가  $10 \times 10 \text{mm}$ 인 영상을  $30 \times 30$  화소로 검출한 것으로 측정 시간은 제안한 방법의 경우 약 1분이 걸린다. 표에서는 본 논문에 사용된 시스템을 이용하여 기존의 방법에 의해 측정할 경우 필요한 시간을 함께 표시하였다. 또한 위와 같은 문

텍처를 이용하여 처리된 영상의 PSNR은 이진 영상의 경우 24.2[dB], 4-level 영상의 경우 22.9[dB]가 각각 나타남을 알 수 있었다. 이로써, 20[dB]이상의 영상 획득을 위하여 제안된 방식을 사용할 경우 약 30배의 측정 시간이 향상될 수 있다.

이상과 같이 위치별 변조 주파수를 달리하는 LAPS에 의한 pH 이미지 검출용 격자무늬 광자극 방법에 대한 실험 결과 약 22-24[dB]의 결과 이미지를 검출할 수 있었다. 하지만, 이러한 재구성된 이미지의 오차가 나타나는 이유를 살펴보면, 첫째, 조사광의 불균일에 의한 오차가 있을 수 있다. 이는 레이저 발생기에서 발생한 광원을 확장할 때 중심부분과 가장자리의 광 세기의 불균일이 있을 수 있으며, 이에 따른 출력의 세기가 각각 다르게 나타날 수 있다. 둘째, 회전 격자에 의한 주파수 변조에 따른 각 주파수별 광 세기에 차이에 의한 오차가 있을 수 있다. 이러한 입력 광의 세기에 대해서는 입력 광원에 대한 광 세기를 보정하여 정규화 시킬 필요가 있을 것이다. 셋째, 이미지 검출 시스템의 기구적 오차에 의한 출력값의 오차가 있을 수 있다. 회전 격자의 제작시 혹은 회전시 진동에 의하여 센서면과 슬릿간의 정렬이 맞지 않을 수 있으며 이에 따른 오차가 나타날 수 있다. 이는 정밀하고 견고한 검출 시스템을 구성함으로써 보다 나은 결과를 기대할 수 있을 것이다.

## V. 결 론

본 논문에서는 회전 격자를 이용한 광주파수 변조에 의한 pH 이미지 검출 방법을 제안하였다. 이는 주파수 변조용 회전 격자를 이용하여 각

픽셀별로 다른 주파수로 변조된 광을 인가하여 주파수 성분별로 위치를 확인함으로써 한 행의 신호 성분을 동시에 측정할 수 있다. 제안한 방식에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여 30×30 화소의 주파수 성분별 pH 이미지 재구성이 가능함을 검증하였다. 또한 센서 특성에 적합한 회전 격자를 설계/제작하였으며, 이를 이용하여 LAPS의 동작 모델에 따른 패턴 영상 및 점검출기의 출력을 주파수 성분분석에 의해 2차원 이미지를 구성하였다. 실험 결과로부터 회전 격자를 이용한 제안한 검출 방식이 22-25[dB]의 PSNR을 가지는 30×30화소의 이미지를 기존의 방식보다 30배 빨리 측정할 수 있음을 확인하였다.

## 참고 문헌

1. H. Merrick, G. Hawlitschek, "A Complete System for Quantitative Analysis of Total NA, Protein Impurities and Relevant Proteins", *Biotech Forum Europe*, pp. 398-403, 1992.
2. D. G. Hafeman, J. W. Parce and H. M. McConnell, "Light-addressable potentiometric sensor for biochemical systems", *Science*, vol. 240, pp. 1182-1185, 1988.
3. J. Allen, F. Fan Fu-Ren, T. P. David, R. U. Patrick, O. W. David, and Z. Feimeng, "Chemical imaging of surface with the scanning electrochemical sensor with digital LAPS system", *Sensors and Actuators*, B. 34, pp. 446-449, 1996.

표 1. 이진 영상과 4-휘도 영상에 대한 측정 결과.

Table 1. Measurement result of binary and 4-level image.

	Image		Time		Threshold	PSNR[dB]
	Size[mm]	Pixel	PDM[sec]	LDM[sec]		
Binary	10×10	30×30	1800	60	TH = 140	24.2
4-level	10×10	30×30	1800	60	TH = 160 TH2 = TH * 0.85 TH3 = TH * 0.7 TH4 = TH * 0.6	22.9

4. M. Nakao, T. Yoshinobu, and H. Iwasaki, "Scanning laser beam semiconductor pH imaging sensor", *Sensors and Actuators*, B. 20, pp. 119-123, 1994.
5. M. Nakao, S. Inoue, T. Yoshinobu, H. Iwasaki, "High-resolution pH imaging sensor for microscopic observation of microorganisms," *Sensors and Actuators*, B. 34, pp. 234-239, 1996.
6. H. Uchida, W. Y. Zhang, T. Katsube, "High speed chemical image sensor with digital LAPS system", *Sensors and Actuators*, B. 34, pp. 446-449, 1996.
7. D. J. Lovell, "Electro-optical position indicator system", U.S. patent 2,997,699, 1961.
8. K. Suzuki, "Analysis of rising-sun reticle", *Optical Engineering*, Vol. 18, no.3, pp. 350-351, 1979.
9. J. S. Taylor, R. G. Drigger, C. E. Halford, J. S. Sanders, S. T. Griffin, and M. Welfare, "Comparision of continuous and discrete frequency-versus-radius frequency-modulated reticles", *Appl. Opt.*, vol. 31, no. 10, 1992.
10. R. G. Drigger, C. E. Halford, G. D. Boreman, D. Latman, and K. F. Williams, "Parameters of spining FM reticles," *Appl. Opt.*, vol. 30, no. 7, pp. 887-895, 1991.

---

著 者 紹 介

---

**배 상 곤**

1995 영남대학교(공학사-전자공학)  
 1997 경북대학교(공학석사-전자공학)  
 1997-1998 (주)LG전자 연구원  
 1998-현재 경북대학교(박사과정-전자공학)  
 주관심 분야 : 디지털하드웨어설계, 센서응용 및  
 신호처리

**강 신 원**

1978 경북대학교(공학사-전자공학)  
 1980 영남대학교(공학석사-전자공학)  
 1993 게이오대학교(공학박사-생체의공학)  
 1994 - 현재 경북대학교 전자전기공학부 교수  
 주관심 분야 : 집적광학 소자 및 센서, 광섬유센서, 의용센서

**조 진 호**

1977 경북대학교 (공학사-전기공학)  
 1979 경북대학교 (공학석사-전자공학)  
 1988 경북대학교 (공학박사-전자공학)  
 1986-현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부  
 교수, 경북대학교병원 의공학실장  
 주관심 분야 : 생체신호처리, 센서및 의용전자  
 기기