

## 원자력발전소 압력관 결함 검사를 위한 3차원 형상측정 장치

### A 3-D Shape Measurement System for Flaw Inspection of the Pressure Tubes in Nuclear Power Plant

박승규, 백성훈, 김철중

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

선형 레이저빔의 광 삼각법을 이용하는 3차원 표면결함 형상 측정 장치의 주된 문제는 레이저빔의 중심점 위치를 정밀한 분해능으로 정확히 찾는 것이다. 본 논문에서는 선형으로 주사된 레이저빔 패턴을 측정 환경에 따라 적응적으로 분할하여 중심선을 추출함으로써 분해능을 높이는 3차원 표면결함 형상 측정 장치를 제안하였다. 측정 대상체에 주사된 선형 레이저빔의 반사율은 측정 대상체의 색상이나 반사각 등에 따라 다르다. 제안된 3차원 표면 결함 형상 측정 장치는 측정 대상체로부터 반사되어 CCD 카메라에 촬상된 선형 레이저빔을 강도 분포에 따라 분할하여 독립적으로 중심선을 추출함으로써 중심선 추출 정밀도를 높인다. 제안된 시스템은 광을 이용한 비접촉식 형상 측정 장치이며 하드웨어 구성이 용이하여 현장 적용이 용이한 시스템이다.

#### Abstract

One of the main problems in the 3-D surface flaw shape measurement system using laser triangulation of a laser light stripe is finding the exact laser light center position with high resolution. This paper proposes a 3-D surface flaw shape measurement system which improves the measurement resolution by extracting the laser center line position from the adaptive pattern clustered laser light stripe. The reflection light intensity of a projected laser light stripe is various up to the colors and reflection angles of objects. The proposed 3-D surface flaw shape measurement system improves the precision of the laser center line position by extracting the center line positions independently of the intensity clustered area on the laser line stripe image of the CCD camera. This proposed system can measure the surface flaw shape remotely and can be applied easily to the practical situations of

the flaw shape measurement by virtue of the compact hardware composition.

## 1. 서 론

원자로의 압력관 내부 표면과 터빈 블레이드 표면등에서 발견되는 결함 구조에 대한 상세한 정보는 압력관의 수명해석과 결함의 응력 해석에 대단히 중요하다. 특히 캔두형 원자로에서 압력관은 원자로 부품중 가장 핵심이 되는 것으로, 압력관의 건전성과 수명은 발전소 가동 차원에서 매우 중요한 위치를 차지하고 있다. 압력관 내부의 결함 발생 원인은 여러 가지가 있지만 핵연료 다발 지지체와 압력관 사이의 마모와 파편마모가 주요 원인 중의 하나이다. 따라서 압력관 내부의 이러한 결함들을 조사하여 분석하는 작업들은 발전소 수명을 연장하는 중요한 작업이다. 결함검출에 사용되는 일반적인 초음파 검사 기술은 결함의 길이와 폭 및 두께 정보를 제공할 수 있으나 결함 해석시에 위험 결함(sharp defect)으로 인정되는 전통적인 정보인 바닥부의 거침도(sharpness)와 루트반경(root-radius) 정보는 제공하지 못하는 단점이 있다. 루트반경 정보를 제공할 수 있는 고무복제(rubber replication) 결함 검출 방식은 지난 몇 년간 원자력 발전소에 사용되어 오고 있다. 그러나 이 측정 방식은 결함 검출 단계가 2단계이며 직접적인 공정 비용이 비싸고 시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 이러한 문제들을 해결하기 위하여 고무복제 결함 검출 장치와 광학식 결함 측정 장치를 결합한 장치<sup>(1)</sup>와 직접 결함부위를 원격으로 측정하는 3차원 광학 측정 장치<sup>(2)</sup>가 개발되어 사용되어 오고 있다. 이러한 3차원 광학식 결함 형상 측정 장치는 측정과정이 간단하고 3차원적으로 결함의 형태를 보여줌으로써 비전문가라도 사용이 용이한 시스템으로 기존의 측정 방법에 비하여 비용 절감이 가능하다. 또한 이러한 장치는 터빈 블레이드의 마손측정, 케이블 절연부의 거침도 측정, 운전중인 장비의 진동으로 유입되는 손상분석, 생산 제품에서의 결함측정<sup>(3)</sup>, 용접단면의 정밀분석<sup>(4)(5)</sup> 등의 응용 장비로 사용되고 있다.

이와같이 선형 광원을 이용하는 광학적인 표면결함 측정 장치는 원격 비접촉식이므로 원자력 발전소와 같이 사람의 접근이 용이하지 않은 곳에서 그 활용도가 크며 일반 산업에서도 자동화산업<sup>(6)</sup> 등에서 널리 사용되는 장비로 고정밀 측정과 병렬측정이 가능하여 동시 신호처리가 용이하고 경제적이어서 실용성이 높다. 이와 같은 선형 레이저빔의 광 삼각법을 이용하는 3차원 표면결함 형상 측정

장치의 주된 문제는 레이저빔의 중심점 위치를 정밀한 분해능으로 정확히 찾는 것이다.

본 논문에서는 선형으로 조사된 레이저빔의 패턴을 측정 환경에 따라 적응적으로 분할하여 중심선을 추출함으로써 분해능을 높이는 3차원 표면결함 형상 측정 장치를 제안하였다. 측정 대상체에 조사된 선형 레이저빔의 반사율은 측정 대상체의 색상이나 반사각 등에 따라 다르다. 제안된 3차원 표면 결함 형상 측정 장치는 측정 대상체로부터 반사되어 CCD 카메라에 촬상된 선형 레이저빔을 강도 분포에 따라 분할하여, 분할된 영역에서 독립적으로 중심선을 추출함으로써 중심선 추출 정밀도를 높인다.

## 2. 본 론

### 2.1 3차원 표면결함형상측정 시스템의 기본 원리

레이저 삼각 측정 방식의 기본 원리는 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 레이저 입사각에 대한 CCD 카메라의 관측각도  $\theta$  및 배율  $m(m=f'/f)$ 은 알려진 변수이다. 영상 삼각형의  $y'$ 은 CCD 카메라를 통하여 획득한 영상에서 추출한 높이 정보이다. 그러므로 영상 삼각형의 높이정보  $y'$ 와 실제 높이 정보인 대상체 삼각형의 기준선에 대한 상대적인 높이 값  $Z$ 는 식 (1)과 같은 관계가 성립된다.

$$y' = mz \frac{\sin(\theta)}{1 + (z/f)\cot(\theta)} \quad (1)$$

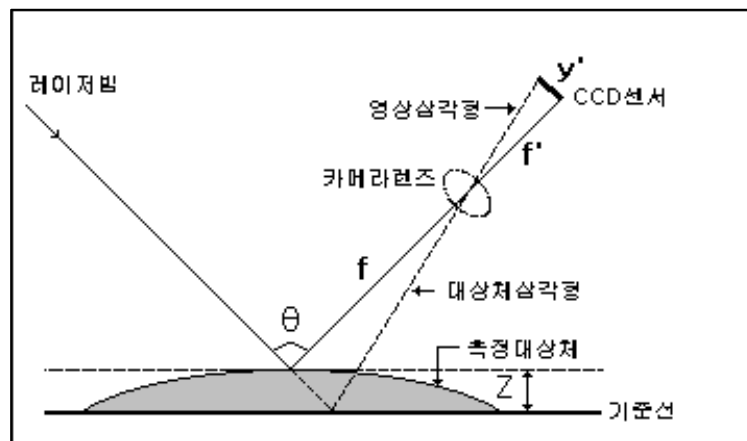


Fig. 1 Principle of laser triangulation

## 2.2 선형 광원을 이용한 3차원 표면결함형상측정 시스템

선형 광원을 이용한 3차원 표면결함형상 측정 시스템은 Fig. 2와 같이 선형 레이저빔을 만드는 광원 장치, 광학적으로 측정면적 감소도 없고 시간 손실도 없이 측정 분해능을 향상시키는 광학적 비등방성 분해능 향상 장치<sup>(7)</sup>, 조사된 선형 레이저빔 영상을 획득하는 영상 광학계와 CCD 카메라 및 영상신호처리를 위한 영상처리보드와 컴퓨터로 구성된다. 다이오드 레이저빔은 집속렌즈와 원통형 렌즈를 통과하여 측정 대상체의 표면에 선형으로 집속되어 조사된다. 측정 대상체에 조사된 선형 레이저빔 영상의 각 점은 그 위치에서의 높이 값에 비례하여 기준면의 수직방향으로 변형이 된다. 표면의 높이 변화에 의하여 변형된 선형의 레이저빔은 블록과 오목 원통형 렌즈와 편광 필터 및 색 필터를 통과하여 CCD 센서에 영상이 맺힌다. 신호처리기는 CCD 카메라에 획득된 표면 형상의 변화에 의하여 변형된 선모양을 한 레이저빔 영상에서 3차원 형상 정보를 추출할 수 있다. 측정대상체에 대한 하나의 완전한 3차원 형상정보는 측정대상체를 이동<sup>(8)</sup>시키거나 레이저빔을 이동<sup>(2)</sup>시켜 획득한다. CCD 센서에 맺힌 영상은 영상신호처리 전용 보드의 버퍼에 저장된다. 영상처리 보드에 저장된 영상은 640x480 픽셀 행렬에 256단계의 밝기 강도값으로 구성되어 있고 영상의 각 열에는 측정대상체의 높이 정보를 가지고 있는 픽셀이 하나씩 존재하므로 하나의 영상에는 640개의 높이 정보를 가지고 있는 픽셀이 존재한다.

### 2.2.1 광원 및 전원제어장치

배경 영상으로부터 레이저빔의 구분이 용이한 측정 환경에서는 낮은 출력의 광원을 사용하여도 무방하나 획득된 영상에서 레이저빔의 구분이 어려운 측정환경에서는 출력이 높은 레이저빔을 사용하여 구분이 용이하도록 하여야 한다. 본 시스템에서는 파장 670nm, 출력 10mW의 다이오드 레이저를 사용하였고 난반사되어 카메라로 유입되는 빛을 줄이기 위한 편광필터와 레이저 빔 이외의 잡신호인 주변광을 차단하기 위한 색유리 필터를 사용하였다. 또한 광원으로 사용되는 다이오드 레이저는 정전류 제어방식의 다이오드레이저 전용 전원장치(ED lab: ED330)를 사용하였다.

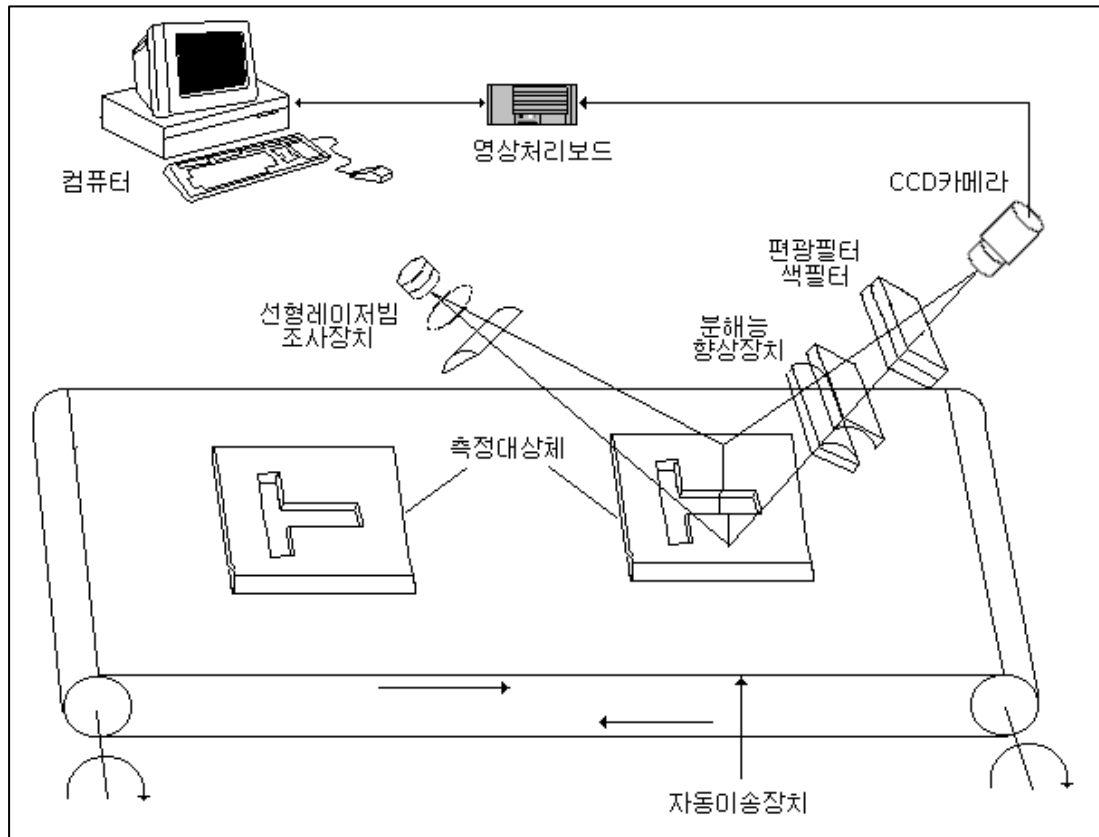


Fig. 2 The system configuration of the 3-D surface flow shape measurement system

### 2.2.2 선형 레이저빔 조사장치 및 광학적 분해능 향상 장치

선모양의 레이저빔 조사 장치는 집속 렌즈와 볼록 원통형 렌즈로 구성되어 있다. 이 장치는 다이오드 레이저에서 나온 레이저빔을 집속 렌즈와 원통형 렌즈를 사용하여 선모양의 레이저빔을 만든 후, 이 선형의 레이저빔을 측정 대상체에 조사한다. 광학적 분해능 향상 장치<sup>(7)</sup>는 볼록 원통형 렌즈와 오목 원통형 렌즈로 구성되어 있다. 이 장치는 측정 대상체에 조사된 선형 레이저빔 영상이 CCD 센서에 맺히는 과정에서 측정 면적은 그대로 유지하면서 높이 정보에 대한 측정 분해능만을 향상시키는 기능을 수행한다. 본 연구에서 사용한 볼록 원통형 렌즈의 초점거리는 100mm, 오목 원통형 렌즈의 초점거리는 -150mm이므로, 원통형 렌즈의 길이 방향으로서는 확대되지 않으면서 폭 방향으로서는 150/100만큼 확대된 영상을 얻게된다. 따라서 측정 대상체에 대한 측정 면적을 고정시키면서 선형레

이저빔의 높이 정보에 해당되는 쪽 방향을 상대적으로 1.5배 확대시킴으로써 높이 정보에 대한 분해능이 향상된 결과를 얻을 수 있다.

### 2.2.3 영상획득 장치 및 신호처리 장치

본 연구에서 사용된 CCD 카메라(PULNIX사 : TM7-CN)는 RS170방식(프레임속도 : 30HZ)의 640x480 픽셀 분해능과 256 단계의 밝기 강도값을 갖고 있으며 영상처리보드의 채널 0에 연결되어 사용된다. 또한 본 연구에서는 고속의 표면 결함 형상 측정을 위하여 영상신호처리 전용 보드(MATROX사, PCI, METEOR-2)를 사용하였다. IBM PC(인텔 CPU 400MHz)에 장착된 영상처리 전용보드는 PCI형의 2MByte의 메모리를 갖고 있다.

### 2.2.4 형상 재구성을 위한 신호처리 소프트웨어

CCD 카메라로 획득한 선형 레이저빔 영상에 대해 영상신호처리를 통하여 측정 대상체의 3차원 위치 좌표를 추출하는 과정에서 가장 중요한 부분은 정확히 선형 레이저빔의 중심선 위치 정보를 추출하는 것이다. 주사되는 선형 레이저빔의 수평 방향의 강도분포는 일정하다고 가정할 수 있다. 그러나 측정 대상체에 조사된 후 반사되어 CCD 카메라에 맺혀진 영상에서 선형 레이저빔의 수평방향 강도 분포는 대응되는 측정 대상체 상에서의 색상이나 반사 각, 유도반사 등에 의하여 일정하지 않다. 이러한 불규칙 반사는 특히 반사가 심한 표면이나 굴곡의 변화가 심한 측정 대상체 등의 경우에 심하고 이러한 불규칙 반사 문제는 실제 측정 과정에서 쉽게 해결되지 않는 문제이다. 본 논문에서 제안한 3차원 표면 결함 형상 측정 시스템은 측정환경에 따라 능동적으로 선형 레이저빔 영상을 여러 개의 독립적인 측정 영역으로 분할한 후, 독립적으로 레이저빔 중심선의 위치를 추출함으로써 시스템의 측정 효율을 높인다. 또한 먼저 찾아진 중심선의 위치 정보로부터 세분하여 다시 정밀 중심선의 위치를 추출하여 서브 픽셀 분해능을 제공한다.

#### (a) 입력환경설정

전체 획득된 영상에서 실제 신호처리 하고자 하는 영역은 측정대상체의 최소 변이와 최대 변이 사이의 영역이므로 효율적인 신호처리를 위하여 신호처리영역

에 해당하는 영역인 바닥선(base line) 값과 윗선(top line) 값을 설정한다. 또한 영상 획득 후 선형 레이저빔을 추출하기 위한 변수의 하나인 선폭(line width) 값을 설정한다. 이 값은 CCD 센서에 촬상된 영상에서 레이저 폭이 위치하는 평균 픽셀 수를 의미한다. 또한 사용자는 측정대상체의 이동 속도인 모터의 속도와 이동 거리를 설정할 수 있다.

(b) 영상 획득 및 중심선 추출

일정한 속도로 이동되는 선형 레이저빔이 조사된 측정 대상체에 대하여 컴퓨터는 CCD 카메라를 사용하여 하나의 영상을 획득한 후, 저주파 통과필터(3x3, 5x5창)를 사용하여 전처리를 수행한 후 영상처리 전용 보드 상의 두 버퍼 메모리에 각각 저장한다. 두 번째 버퍼 메모리에 저장된 영상에 대하여 신호처리기는 다음 식 (2)를 만족하는 경계값 K를 계산한다. 이 경계값은 이진 영상을 얻기 위한 값이며 선폭값과 획득영상의 강도 분포로부터 유도된다.

$$\text{SUM}[i] \geq (\text{선폭값}) \times (\text{선길이값}) \quad (2)$$

여기서 SUM[i]는 픽셀강도값 i의 히스토그램 값을 누적 합산 한 값이고, 픽셀 강도값 i는 최대값 255부터 0으로 1씩 순차적으로 감소되는 값이다. 선폭 값은 선형 레이저 빔이 선폭 방향으로 평균적으로 차지하는 픽셀 수를 의미하고, 선길이 값은 획득 영상의 행의 수(640)이다. 경계 값을 계산한 후, 신호처리기는 경계값을 기준으로 0과 1의 값을 갖는 이진 영상을 획득하고 획득된 영상의 열 방향에 대한 선형 프로파일을 획득한다. 신호처리기는 획득한 열 방향 프로파일에 대하여 행 방향으로 두 픽셀 이상의 0값의 폭을 갖는 지역을 제외하고 1x3창 혹은 1x5창의 저주파 통과 필터를 사용하여 전처리를 수행한다. 전처리가 수행된 열 방향 프로파일에 대하여 신호처리기는 0의 값을 갖는 좌우 경계면에 대하여 선형 레이저빔의 패턴 분할을 수행한다. 각각의 분할된 영역에 대하여 신호처리기는 가변 선길이 값을 갖는 식 (2)를 만족하는 경계값을 각각 구한 다음 선형 레이저 빔의 위치를 구한 후, 상승경계선과 하강경계선으로부터 픽셀 분해능으로 레이저빔의 중심선 위치 정보를 추출한다. 중심선 추출 과정에서 신호처리기는 배경으로부터 구분이 분명한 레이저빔의 위치부터 추출하며, 점차로 구분이 약한 레이저빔의 위치를 추출하며, 이 과정에서 기존에 추출한 주위의 중심선 위치를

참고한다. 추출한 중심선 정보의 가중치가 설정된 값 이하로 배경으로부터 분명하지 않는 레이저빔 중심선은 추출을 포기하고 추출된 주위 정보로부터 추후 선형 보간 법으로 위치 정보를 채워 넣는다.

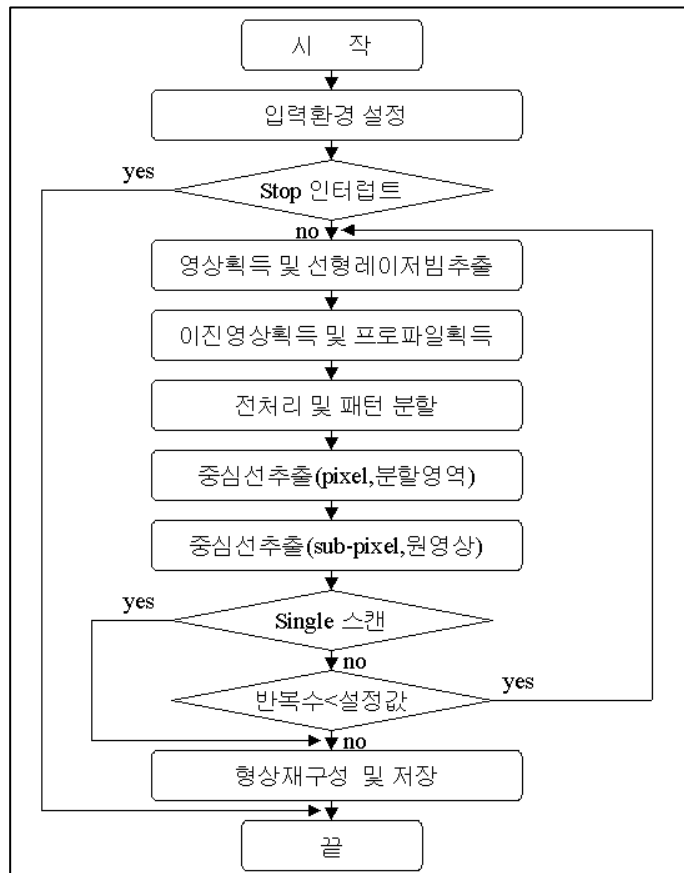


Fig. 3 The flowchart of the signal processing for image reconstruction

그런 다음 신호처리는 첫 번째 버퍼의 원 영상을 이용하여 픽셀 분해능으로 추출된 중심선 위치로부터 식 (3)을 만족하는 픽셀분해능 이상의 고분해능 (sub-pixel resolution)으로 레이저 중심선의 위치를 추출한다.

$$P_i = \frac{\sum_{j=P_{i0}-\frac{W}{2}}^{P_{i0}+\frac{W}{2}} (I_{i,j} \times P_{i,j})}{\sum_{j=P_{i0}-\frac{W}{2}}^{P_{i0}+\frac{W}{2}} I_{i,j}} \quad ( 3 )$$



여기서  $I_{i,j}$ 는  $j$ 번째 열과  $i$ 번째 행 픽셀의 강도 값이고,  $P_{i,j}$ 는  $j$ 번째 열과  $i$ 번째 행 픽셀의 위치 값이다.  $P_{i0}$ 는  $i$ 번째 행에서 픽셀 분해능으로 찾아진 중심선의 위치이고  $W$ 는 선폭 값이다. 설정된 값 이하로 배경으로부터 분명하지 않는 레이저빔의 중심선은 추출된 주위 정보로부터 추후 선형 보간법으로 채워진다.

### (c) 형상 재구성

식 (1)에 따라 신호처리는 추출된 중심선의 위치 정보로부터 측정 대상체의 실제 높이 값을 계산한 후 이를 메모리에 저장한다. 입력환경에서 설정된 모터의 이동속도와 설정된 거리만큼 측정 대상체를 이동시키면서 형상을 측정한 후, 신호처리는 전체영상을 조합하여 형상을 재구성한다.

## 2.3 형상측정 실험

선형 레이저빔(길이 50mm)은 측정 대상체의 기준 수직면에 대하여  $45^\circ$  각도로 조사된다. 실험을 위하여 측정대상체 기준 수직면에 대하여  $-45^\circ$  각도로 기울어진 CCD 카메라(TM-7CN, PULNIX)와 초점거리 105mm의 이매징 렌즈(니콘 마크로), 볼록(초점거리 100mm) 및 오목(초점거리 -150mm) 원통형 렌즈, 편광 필터 및 색필터가 사용되었다. 측정대상체로는 검은 글자로 음각된 레이저 시스템의 앞 패널을 사용하였다. 측정결과는 본 논문에서 제안한 적응적 패턴 분할에 의한 중심선 추출 방법과 수식 (2)를 적용한 전통적인 중심선 추출 방법에 의한 결과들을 Fig. 4에서 서로 비교하였다.

Fig. 4의 a는 선형레이저 빔이 조사된 측정대상체인 앞 패널 샘플을 보여준다. Fig. 4의 b는 수식 (2)를 적용한 전통적인 중심선 추출 방법<sup>(2)(7)</sup>에 의하여 얻어진 결과이다. Fig. 4의 d는 본 논문에서 제안한 선형 레이저빔의 적응적인 패턴 분할 방법에 의하여 측정된 결과이다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이, 음각된 검은 글자로부터 반사되어 CCD 카메라에 촬상된 선형 레이저빔의 강도는 회색의 배경부로 반사된 부분의 강도 보다 낮다. 특히 ①, ② 영역에서, 전통적인 중심선 추출 방법은 레이저빔의 위치를 찾지 못한다. 그러나 본 논문에서 제안된 중심선 추출 방법은 영역 ①, ②에서 독립적으로 중심선을 추출함으로써 레이저빔의 위치를 찾아낸다. Fig. 4의 c, e는 Fig. 4의 b와 d로부터 레이저빔을 찾지 못한 부분에 대하여 선형 보간된 결과를 보여준다.

Fig. 5는 전통적인 중심선 추출 방법을 사용하여 측정한 후 재 구성한 3차원 표면 형상 측정 결과이다. Fig. 6은 본 논문에서 제안된 적응적인 패턴 분할에 의한 중심선 추출 방법을 사용하여 측정한 결과이다. Fig. 5와 6에서 볼 수 있듯이, 제안된 적응적인 패턴 분할에 의한 중심선 추출 방법은 전통적인 중심선 추출 방법보다 가변적인 반사율을 보이는 측정 대상체에서 특히 보다 나은 분해능을 제공함을 알 수 있다. 하나의 획득된 영상으로부터 중심선을 추출한 후 완전한 높이 정보를 추출하는데 시간은, 전통적인 중심선 추출 방법은 약 0.07초 소요되며, 본 논문에서 제안한 적응적 패턴 분할에 의한 중심선 추출 방법은 약 0.1초 소요된다.

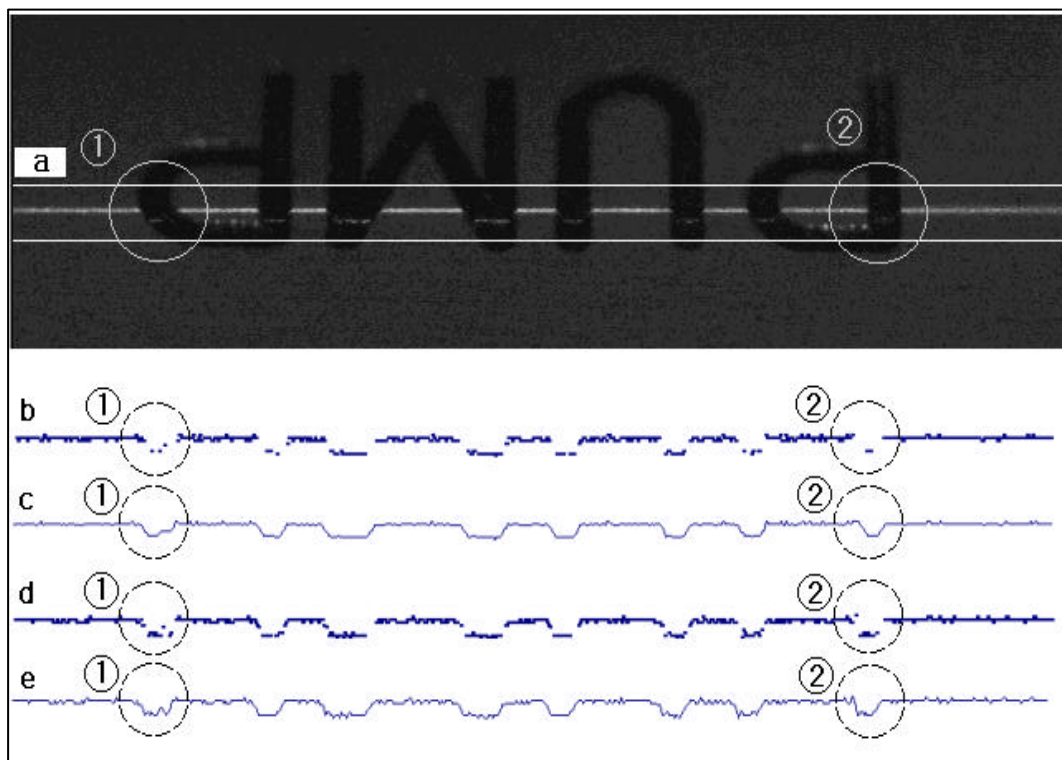


Fig. 4 Measurement results comparison from the conventional method and the proposed adaptive pattern clustered center line extracting method

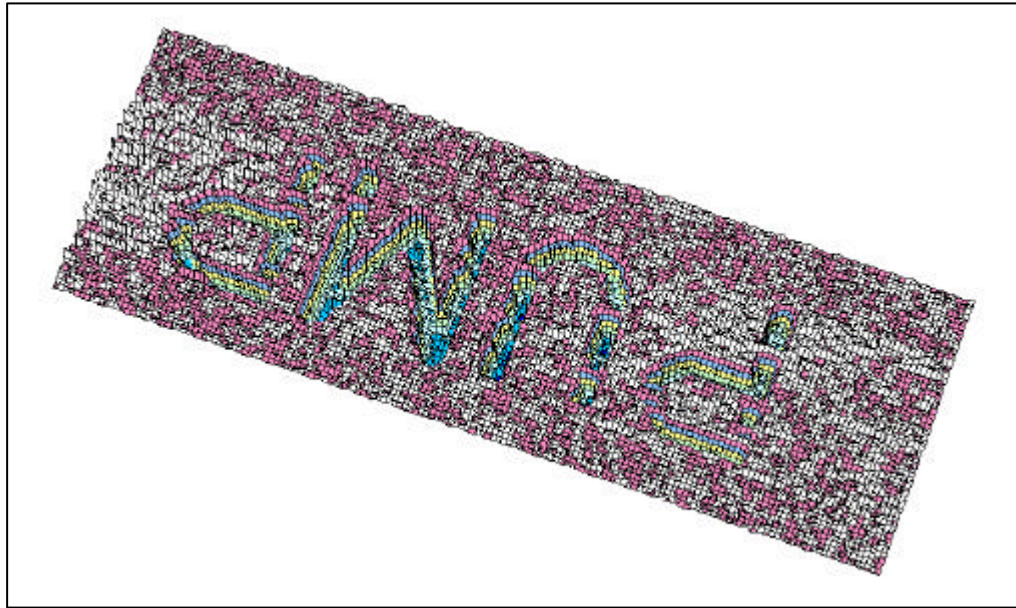


Fig. 5 Measured 3D shape using the conventional center line extracting method

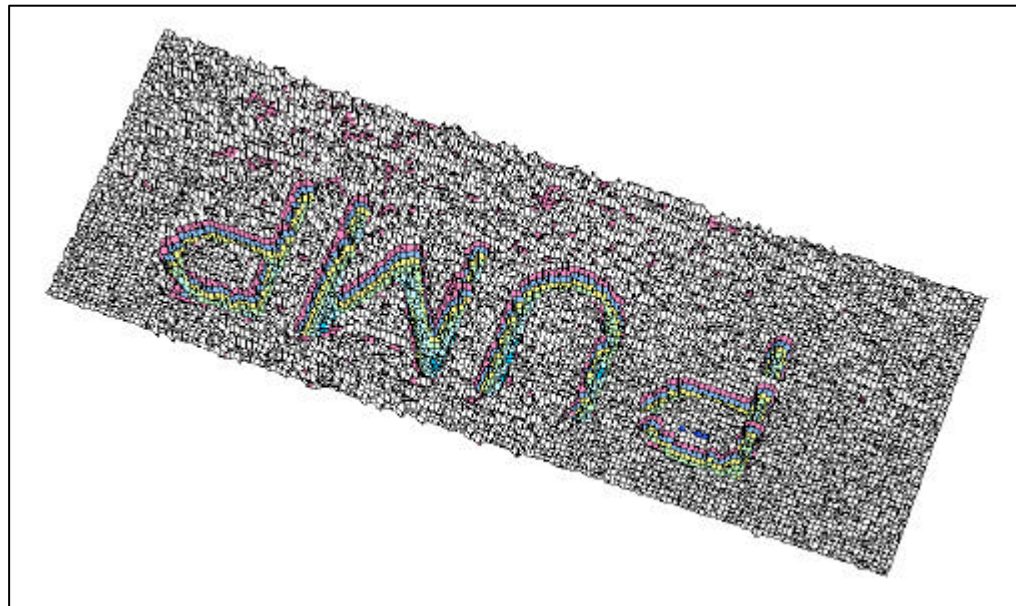


Fig. 6 Measured 3D shape using the proposed adaptive pattern clustered center line extracting method

### 3. 결 론

본 논문에서는 선형 레이저빔을 이용한 3차원 표면 결함형상 측정 시스템을 구성함에 있어 측정 환경에 따라 적응적으로 레이저빔 패턴을 분할하여 독립적으로 중심선을 추출함으로써 측정대상체의 높이 정보에 대하여 개선된 분해능을 갖는 3차원 표면 결함형상 측정 시스템을 제안하였고 중심선 추출 능력 향상을 실험적으로 실증하였다. 본 시스템은 하드웨어의 구성이 용이하고 실제 현장 활용이 가능한 시스템이다. 현재 하나의 선형 레이저 빔에 대한 형상 정보의 추출 시간은 약 0.1초 정도 소요되고 있으므로 차후 더욱 빠르고 정확한 형상 정보 추출에 관한 연구가 필요하고 특히 반사율이 높은 물체의 형상 측정에서 정확히 레이저빔의 중심선을 추출하는 방법에 대한 연구가 필요하리라 생각된다.

### 후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었음.

### 참고문헌

- (1) OHT Report, 1995, "State-of-the-art flaw detection for all surfaces", Tomorrow's Technology for Today's World, Vol 12.
- (2) D. L. Mader and J. C. Kuurstra, 1996, "In-situ optical profilometry of CANDU fuel channels", Proceedings of the ASME-JSME, ICONE-4.
- (3) P. I. Ereno, 1994, "3D vision industrial system", SPIE, Vol. 2240, pp. 149-158.
- (4) H. Hofler, 1992, "Optical surface and morphology inspection techniques", Optical Sensors, Vol. 6, pp. 563-570.
- (5) T. C. Strand, 1985, "Optical three-dimensional sensing for machine vision", Optical Engineering, Vol. 24, pp. 33-40.
- (6) D. Holm, 1994, "Identification and integrity verification of final disposal casks", SPIE, Vol. 2248.
- (7) S. K. Park, S. H. Baik and C. J. Kim, 1998, "A surface profilometer using line-shaped laser light triangulation with anisotropic magnification", The Review of Laser Engineering, Vol. 26, pp. 55-58.
- (8) J. Klicher, 1992, "A very compact two-dimensional triangulation-based scanning system for robot vision", SPIE, Vol. 1822, pp. 217-227.