

자동 초점 기법을 이용한 유리 내부 결함 검출

지용우*·장경영†·정지화**·김석준**

(2003년 12월 31일 접수, 2004년 5월 3일 심사완료)

The Detection of the Internal Defect in the Glass Using Auto Focusing Method

Yong-Woo Jy, Kyung-Young Jhang, Ji-Hwa Jung and Suk-Jun Kim

Key Words: Auto Focus(자동초점), Image Processing(영상처리), Glass(유리), Gradient Index(기울기 지표), Internal Defect(내부결함), Reliability(신뢰성)

Abstract

Internal defects in the glass, like-as micro-voids, micro-cracks, or inclusions, easily cause the failure when the glass is exposed to the shock or the thermal variation. In order to produce the highly reliable glass product, the precision inspection of the defect in the glass is required. For this purpose, this paper proposes a machine vision technique based on the auto-focusing method, which searches the defect and measures the location under the fact that the edge image of defect must be the most clear when the focal plane of CCD camera is coincided with the defect. As for the search index, the gradient indicator is presented. The basic principles are verified through the simulations for the computer-generated defect images, where the affects of defect shape, gray level of background, and the brightness of the defect image are also analyzed. Finally, experimental results for actual glass specimens are shown to confirm the applicability of this method to the actual field.

1. 서 론

유리는 건축, 자동차등 다양한 기간산업분야에서 뿐만 아니라 광학부품, 디스플레이 등의 정밀 부품으로도 널리 이용되고 있다. 특히개인용 컴퓨터의 급속한 수요 증가와 가전제품의 고급화에 힘입어 TFT-LCD(Thin Film Transistor-Liquid Crystal Display)와 같은 고급 유리 제품의 수요 역시 급증하고 있다.

그런데 고급 정밀 유리 제품의 내부에 마이크

로 보이드(micro void), 마이크로 크랙(micro crack), 이물질 등과 같은 결함이 존재하게 되면 충격, 열 변형 등 제품 사용 환경에서 파손을 일으키기 쉽다. 따라서 높은 신뢰성을 가진 유리의 생산을 위해서는 이들 결함의 검사가 필수적이다. 하지만 현재 산업현장에서는 인간의 감각에 의존하는 육안 검사법이 차지하는 비중이 상당히 큰 실정이다. 그러나 육안 검사법은 생산되는 유리가 대형화되어감에 따라 검사시간이 증가하는 문제점이 발생하는 등 점차 그 한계가 드러나고 있고, 따라서 자동화된 검사법 개발의 필요성이 증대되고 있다.

이와 같은 정밀 유리 내부 결함의 자동검사를 위해 CCD 카메라를 이용한 머신비전(Machine Vision)기법이 유효하리라고 생각되어진다. 이 방법은 투명하고 표면이 매끄러운 유리에도 적용이 가능하고, 비 접촉 검사가 가능하며 비교적 비용이 저렴한 편이기 때문이다. 실제로 머신비전을 유리 검사 공정에 이용한 예로는 자동차용 유리

* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : kyjhang@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2290-0434 FAX : (02)2299-7207

** 삼성코닝정밀유리(주)

나 bottling용 유리에 적용한 예 등이 있다. 그러나 이 경우는 비교적 큰 결함의 검출에만 적용되고 있다.⁽¹⁾ 따라서 정밀 유리 내부에 존재하는 마이크로 오더의 결함을 검출할 수 있는 새로운 머신비전 기술의 개발이 요구되고 있다.

이를 위해 본 논문에서는 자동 초점 기법을 이용한 머신비전 기술을 제안한다. 단, 정밀 유리의 검사공정에서는 결함의 수평(유리평면) 위치를 검사하는 공정과 수직(두께)방향으로의 깊이(Z)를 검사하는 공정을 구분하여 실시하는 경우가 많다. 그것은 깊이 정보가 유리의 품질 등급을 구분하는 주요 인자가 되기 때문이며, 본 논문에서 제안하는 기술은 후자를 위한 것이다. 즉, 결함의 평면 좌표를 미리 알고 있고 수직방향으로의 위치를 정밀 탐색하기 위한 것이다. 그러나 이 기술은 평면 위치를 찾는 데도 물론 적용 가능하다.

이 기술에서는 CCD카메라의 초점면을 유리 표면으로부터 내부로 미세 이동시키면서 결함 영상을 획득한다. 카메라의 초점면이 결함과 일치하면 결함 영상은 가장 선명하게 되는데, 이를 화상처리를 통한 정량화된 수치로 인식하고, 이때의 카메라 초점면 이동거리로부터 결함의 깊이 정보를 얻는다. 여기서 결함 영상의 선명도, 즉 초점면과의 일치도(In Focus)판정의 지표로서 기울기 지표(Gradient Index)를 이용한다.⁽²⁾

본 연구에서 제안한 원리는 먼저 컴퓨터에서 생성한 모의 결함 이미지를 대상으로 한 시뮬레이션을 통해 타당성을 검증하였고, 결함의 형상, 배경밝기, 초점일치도(Focusing State)가 결함 이미지의 선명도 및 기울기 값에 미치는 영향도 함께 분석되었다. 또한, 실제 결함 시편을 대상으로 한 실험을 통해 실 적용 가능성을 확인하였다.

2. 유리 내부의 결함 검출을 위한 자동초점의 기본원리

일반적으로 초점면(Focal Plane)과 영상평면(Image Plane)이 일치되어 물체의 영상이 가장 선명하게 보이는 상태를 In Focus상태라 하며 물체와 카메라의 거리가 카메라의 초점거리와 일치하도록 카메라의 위치를 자동적으로 조절해주는 것을 자동초점(Auto Focusing)이라 한다.⁽³⁾ 즉, Fig. 1에 나타낸 바와 같이 초점거리가 f 로 고정된 CCD카메라를 이용하여 물체 P1, P, P2에 대한 In

Focus상태의 영상을 얻기 위해서는 초점면(Image Plane)이 각각 Q1, Q, Q2에 위치하도록 카메라를 이동시켜야 한다.

본 연구에서는 이와 같은 자동초점의 원리를 이용하여 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 카메라 초점면을 유리 표면으로부터 내부로 일정 스텝 간격으로 이동시키면서 결함이 있는 위치가 카메라 초점면과 일치하는지, 즉 In Focus상태가 되는지를 조사한다. 여기서는 In Focus상태의 정량적인 평가를 위해 결함영상 경계에서의 명도기울기의 변화를 이용한다. 이는 영상이 In Focus상태에서 가장 선명하고, 배경과의 경계에서 명도기울기가 급증한다는 특징을 이용한 것이다. 상세한 내용은 다음 장에서 기술된다.

Fig. 3은 카메라의 초점이 유리의 결함(가늘고 긴 기포의 예)에 위치하지 않았을 때(Out of Focus)의 영상(a)와 결함이 존재하는 면에 위치했을 때(In Focus)의 영상(b)를 나타낸다. 결함이 존재하는 면에 카메라의 초점이 다가감에 따라 결함의 영상이 선명해지고, 이에 따라 배경과 결함경계의 명도차가 커짐을 알 수 있다.⁽⁴⁾

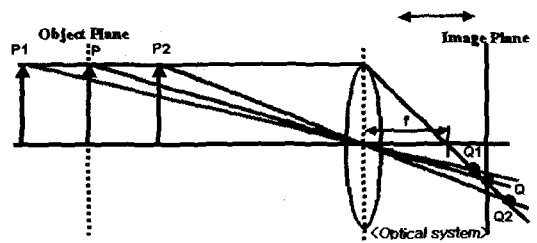


Fig. 1 Basic principle of auto focusing

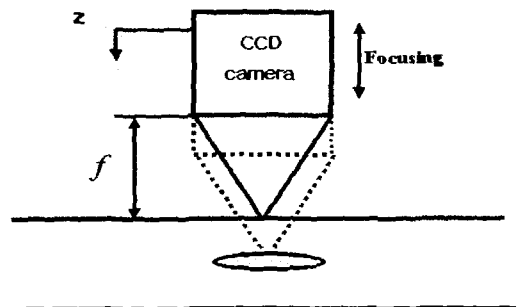


Fig. 2 Auto focus on the internal defect in glass

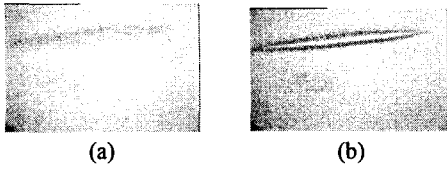


Fig. 3 Image of blister in the glass (a) at out of focus and (b) in focus

3. In Focus 판정 Index

본 장에서는 얻어진 결함 이미지가 In Focus 상태인지 아닌지를 판단하기 위한 방법에 대해 기술한다. 먼저, 결함을 배경과 분리할 필요가 있는데 물체를 배경화면에서 분리하는 방법으로 가장 많이 사용되는 영상처리 알고리즘은 윤곽선(Edge) 검출이다.

물체의 윤곽선을 인식하는 방법에는 Sobel Filter, Laplacian Filter, Prewitt Gradient Method, Line Segment Enhancement 등의 다양한 방법들이 있다.^(5,6) 이러한 대부분의 윤곽선 검출 기법들은 편미분 연산자 계산에 근거하는데, 즉, 이러한 개념을 나타낸다. Fig. 4는 그레이 레벨 255인 배경에 그레이 레벨 0인 원의 영상과 이 영상의 수평 주사선(Horizontal Slice)을 따라 나타낸 명암도 윤곽 파형(Gray Level of Edge), 그리고 이 파형의 1차 미분 값을 나타낸 것이다. 명암도 윤곽파형의 1차 미분은 변이의 앞부분에서는 음의 값, 뒷부분에서는 양의 값을 갖고, 일정한 명암도를 가진 영역에서는 0이 된다. 또한, 1차 미분 값의 크기는 명도 변화의 기울기를 나타내며 윤곽선의 존재 여부를 알아내는데 사용된다.

본 연구에서는 비교적 가로 세로 방향 모두의 윤곽선 검출 성능이 우수한 Sobel Filter를 사용하였다.

한편, 영상화소의 그레이 레벨 $G(x,y)$ 의 위치 (x,y) 점에서의 기울기는 다음과 같은 벡터로 나타낼 수 있다.

$$\vec{\nabla} G = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial G}{\partial x} \\ \frac{\partial G}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (1)$$

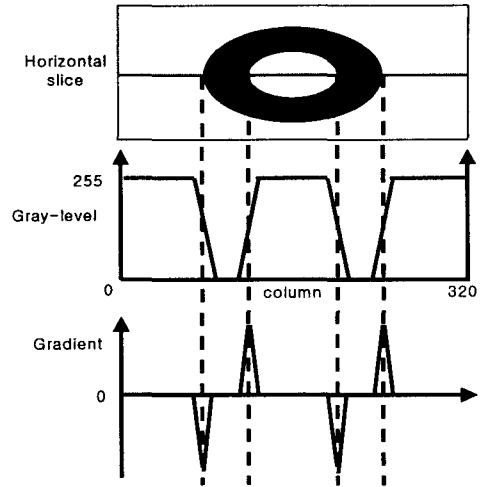


Fig. 4 Image of circle, gray level of image edge and 1st differential value at background gray level 255

위치 (x,y) 점에서의 기울기 벡터는 그 점에서의 명도의 최대 변화율과 방향을 가리키는데 윤곽선 검출에서 가장 중요한 값은 이 벡터의 크기이며, 이는 간단하게 기울기라고 하고, ∇G 로 표시한다. 즉,

$$\nabla G = \text{mag}(\vec{\nabla} G) = [G_x^2 + G_y^2]^{1/2} \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다. 이 값은 $\vec{\nabla} G$ 방향으로 단위 길이가 당 $G(x,y)$ 의 최대 변화율과 같다. 실제 알고리즘을 구현할 때는 계산시간의 절약과 하드웨어의 간략화를 위해 식 (3)과 같이 기울기를 절대값으로 근사하여 많이 사용한다.

$$\nabla G \approx |G_x| + |G_y| \quad (3)$$

Fig. 5와 Fig. 6은 각각 기포(Blister)와 불순물(Inclusion) 결함 영상에 대해 Sobel Filter를 적용한 결과를 원영상과 비교하여 나타내며 처리 결과는 각 화소의 ∇G 값을 256단계의 그레이 레벨로 변환하여 재구성한 영상이다. 이로부터 물체와 배경의 명도 차이에 의해 경계가 부각되는 것을 확인할 수 있다. 단, 본 연구에서 사용된 Sobel Filter의 크기는 3×3 이다.

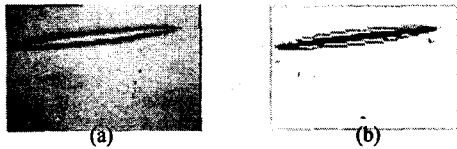


Fig. 5 Image of blister in the glass (a) original and (b) sobel filtered

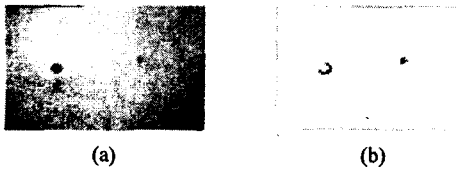


Fig. 6 Image of inclusion in the glass (a) original and (b) sobel filtered

다음으로 Fig. 3과 같이 Out of Focus 상태에서 In Focus상태로 되어감에 따라 획득 영상에서 결함의 윤곽이 명확해지고 결함과 배경에서의 명도 기울기가 급격히 증가하는 특징에 착안하여 식 (4)와 같이 기울기 지표(GI : Gradient Index)를 산출한다.

$$GI(z) = \sum_{\text{Image at z axis}} \left[\frac{|\nabla G|}{\nabla G_{\max} - \nabla G_{\min}} \right] \quad (4)$$

여기서 ∇G 는 식 (3)을 통해 구할 수 있고, ∇G_{\max} , ∇G_{\min} 는 한 영상내의 기울기 값의 최대, 최소값이다. ∇G 자체는 주위의 평균적인 배경명도에 영향을 받을 수 있기 때문에 ∇G_{\max} 와 ∇G_{\min} 의 차이 값을 적용하여 명도의 절대값에 대한 의존성을 적게 갖도록 하였다. 또한 이렇게 계산된 값들을 합한 것은 영상 전체에 대한 기울기 값을 얻기 위함이다.

4. 시뮬레이션

여기서는 유리 내부 결함 검출 Index로써 GI 값의 사용에 대한 타당성을 컴퓨터상에서 임의로 만든 모의 결함 이미지를 이용하여 검증하고자 하였으며, 결함 경계의 두께 변화와 배경명도의 변화에 대한 영향을 분석하였다. 또한, 결함 존재

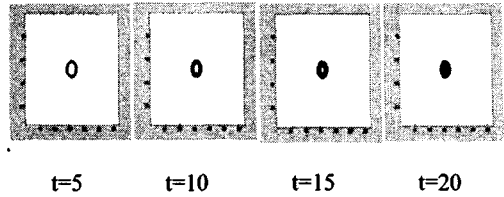


Fig. 7 Circle shape simulation image

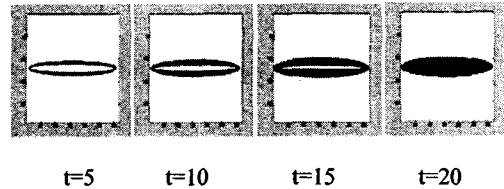


Fig. 8 Ellipsoid shape simulation image

면에 카메라의 초점이 다가감에 따라 배경과 결함의 명도차이에 대하여 어떠한 영향을 주는지에 대한 시뮬레이션을 병행하였다.

4.1 모의 결함 이미지

유리를 생산할 때 가장 많이 발생하는 결함은 기포(Blister)와 불순물(Inclusion)인데, 기포는 유리 제조과정 중 용융과정에서 공기가 혼합되어 나타난 것으로 타원형태가 주종을 이루며, 불순물은 비정질 상태의 유리가 아닌 결정성 물질이 유리 내부에 존재하는 것으로 원형 형태가 주종을 이룬다. 이에 모의 결함 이미지는 실제 결함과 유사한 형태로 Fig. 7, Fig. 8과 같이 각각 생성하였다. 여기서 t는 결함 이미지 경계의 두께를 픽셀 단위로 나타낸 것이며, t가 커지는 것은 경계를 이루는 영역의 크기가 증가하고 있음을 의미한다.

또한, CCD카메라의 초점이 유리의 표면에서부터 결함이 존재하는 면으로 접근해가는 과정, 즉 Out of Focus 상태에서 In Focus상태로 변하는 과정에 대한 시뮬레이션 이미지를 Fig.9, Fig.10에 나타내었다. 여기에서 초점일치도 2, 4, 6, 8, 10의 순서로 점점 숫자가 커지는 것은 Out of Focus 상태에서 In Focus상태로 초점일치도가 커지는 것을 의미하며 초점일치도가 10이 되는 것을 In Focus상태일 때로 정의한다.

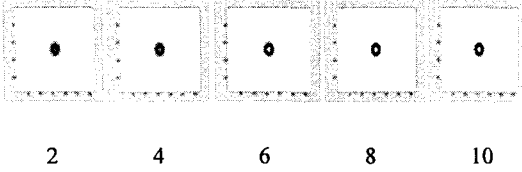


Fig. 9 Simulation image for different focusing states variation (Circle shape)

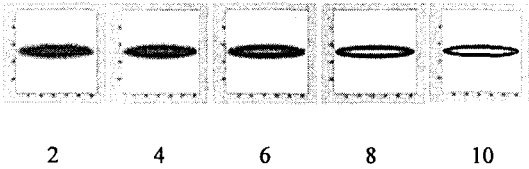


Fig. 10 Simulation image for different focusing states variation (Ellipsoid shape)

4.2 초점 일치도의 변화에 따른 명도 기울기의 변화

Table 1은 Fig. 9에서 제시한 원형 모양의 시뮬레이션 이미지에 대하여 배경명도 100, 윤곽선의 두께 t 를 10으로 고정시켰을 때 초점일치정도에 따른 최대 기울기 값 (∇G_{max})의 변화를 구한 결과이다.

Out of Focus 상태에서 In Focus 상태로 이동함에 따라 최대 기울기 값이 점차 증가하는 것을 볼 수 있고 특히 초점일치도가 10이 되었을 때 즉, In Focus 상태가 되었을 때는 결함 영상과 배경사이의 명도 차인 100과 거의 유사한 값까지 급증함을 알 수 있다. 또한, Fig. 11은 초점 일치도가 변화할 때 결함 영상의 중심축선을 따른 명도 기울기 값의 변화를 나타낸 것으로 In Focus 상태로 이동할수록 결함 영상과 배경사이의 경계가 명확해지는 것을 볼 수 있다. 이는 명도의 기울기 값을 이용하여 In Focus 상태를 충분히 인지할 수 있음을 의미한다.

4.3 초점 일치도 및 결함 경계 두께의 변화에 따른 GI값 변화

Fig. 12는 배경명도가 255로 일정한 경우 원형 결함 경계 두께의 변화에 따른 GI값의 크기 변화를 초점면의 이동량에 따라 나타낸 것이다. 그 결과 결함 경계 두께는 GI값에 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 Fig.13에서 나타낸 것처럼 타원형 결함의 경우에도 동일하게 나타났다. 다만 타원형 결함의 경우 $t=20$ 일 때 결함의 내외부 구분이 없어지고 이로 인해

Table 1 Maximum gradient value of simulation model as focusing state variation (circle shape)

Focusing State	∇G_{max}
0	5.75
2	7
4	8.875
6	14.875
8	31.625
10	95.125

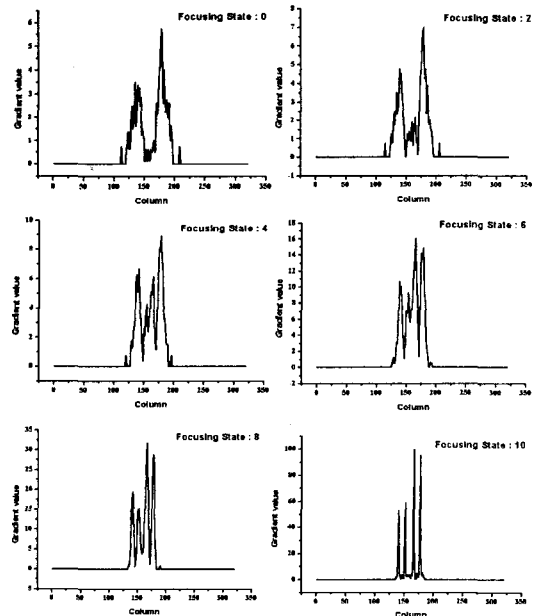


Fig. 11 Gradient value of simulation model as focusing state variation (circle shape)

결함경계에 해당하는 픽셀의 수가 감소하며, 결과적으로 다른 경우에 비해 GI값이 감소하였다. 하지만 Out of Focus 상태에서 In Focus 상태로 초점일치도가 변화함에 따라 GI값이 크게 상승하는 경향은 일치함을 알 수 있다. 이러한 결과는 GI값이 In Focus를 판정할 수 있는 좋은 수단이 될 수 있음을 보여 주는 것이다.

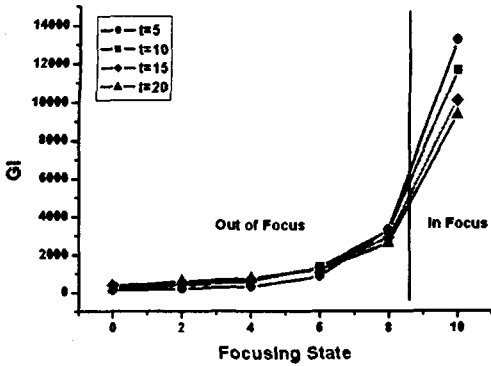


Fig. 12 Distribution of GI value regard as focusing state and defect thickness (Circle shape)

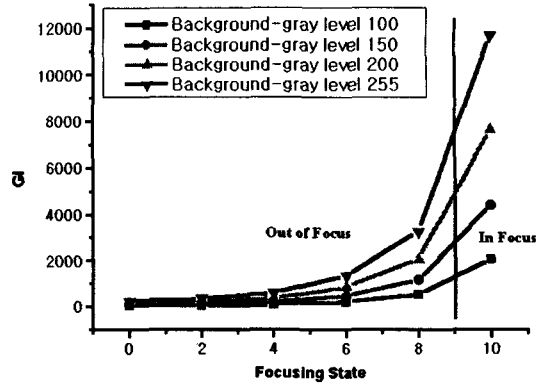


Fig. 14 Distribution of GI value regard as focusing state and background gray (Circle shape)

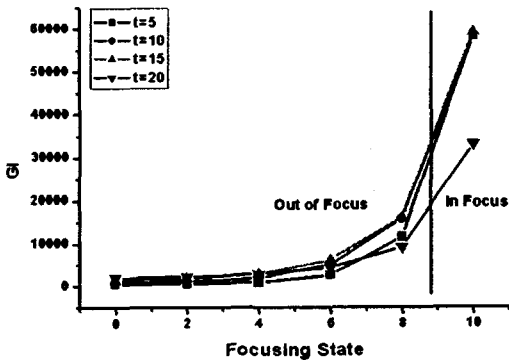


Fig. 13 Distribution of GI value regard as focusing state and defect thickness (Ellipsoid shape)

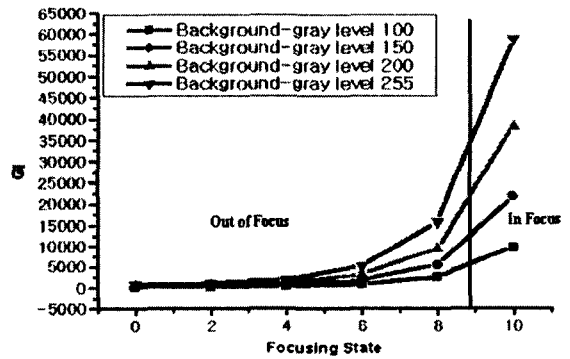


Fig. 15 Distribution of GI value regard as focusing state and background gray (Ellipsoid shape)

4.4 초점 일치도 및 배경명도의 변화에 따른 GI값 변화

이번에는 결함 경계 두께를 일정하게 고정 (t=10)시킨 다음 배경명도를 256 그레이 스케일에서 100, 150, 200, 255로 변화시키면서 GI값의 변화를 살펴보았다. 그 결과는 Fig. 14와 Fig. 15에 나타내었다. Out of Focus 상태에서 In Focus 상태로 변화함에 따라 GI값의 크기가 급격히 커지는 경향은 앞서 수행했던 시뮬레이션과 동일하다. 단, 배경명도는 클수록, 즉 배경이미지가 밝을수록 유리함을 알 수 있다.

5. 실험

5.1 실험장치 및 방법

제안하는 기법의 유효성을 실증적으로 보이기 위해 실제 유리 결함 시편을 대상으로 실험을 실시하였다. Fig. 16은 실험장치의 개략도이다.

결함이 있는 유리 시편을 수직 직립 시키고, 선형 이송대(Linear Motion Guide)와 스텝모터로 CCD카메라의 이송부를 구성하였다. CCD카메라의 이송은 컴퓨터에 의해 제어되고 연속 영상을

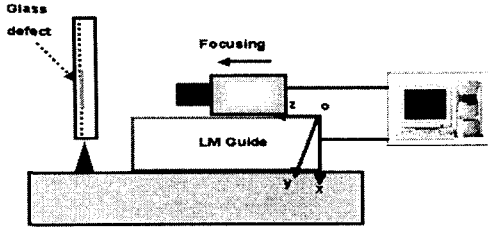


Fig. 16 Schematic diagram of the experimental setup

획득하여 컴퓨터에서 영상처리를 하게 하였다. 영상획득에 사용된 Vision Board는 Matrox사의 Meteor II이며 CCD카메라는 Samsung BW360ED Monochrome를 사용하였다. 조명으로는 CCD카메라와 동축을 이루고 있는 초고휘도 LED를 사용하였고 컴퓨터는 AMD Duron 1GHz를 사용하였다. 또한 유리를 고정시키고 1축 직선운동을 할 수 있는 선형 이송대 위에 CCD카메라를 고정시켜서 유리의 깊이방향에 대하여 스캐닝을 하여 100 μ m마다 영상을 획득하였고 획득한 영상들의 GI값을 얻어서 이 값이 급증하는 여부로부터 In Focus상태를 인식하고자 한다.

여기서 스캐닝 스텝은 요구되는 깊이방향 위치 검출 정밀도와 관련되는데 본 연구에서는 이를 100 μ m로 설정하고 수행하였다. 만약 더 높은 정밀도가 요구된다면 스텝을 더 작게 하여야 한다.

또한 검사영역, 즉 FOV(Field of View)는 1mm \times 0.75mm이며, 검사대상 유리의 두께는 0.7mm이다.

5.2 실험 결과

첫 번째로 Fig. 17은 수백 μ m정도의 기포에 대한 GI값의 z축으로의 이동(즉, CCD카메라 초점면의 이동)에 따른 변화를 보여주고 있다. 그래프에서 보는 것과 같이 기울기 값이 특정한 위치(z=1.5mm)에서 급격히 증가했다가 감소하는 것을 볼 수 있는데 이것은 결함이 존재하는 면과 CCD카메라의 초점면이 일치했을 때를 의미한다. Fig. 18은 이 위치 전후의 결함 이미지를 비교하여 나타낸 것으로 1.5mm위치에서 가장 선명하게 나타남을 알 수 있다. 이것으로 GI값을 이용하여 유리 내부에 결함이 존재하는 것을 판정 할 수 있다는 것을 알 수 있다.

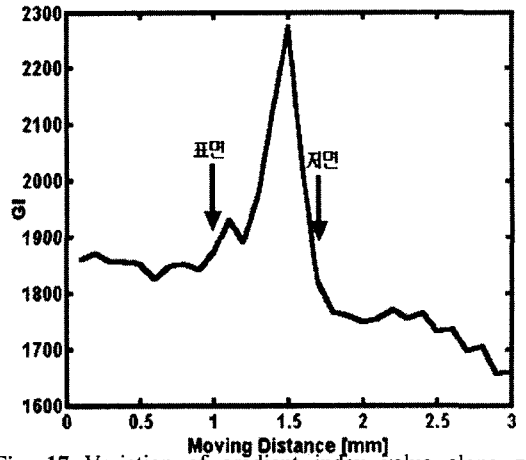


Fig. 17 Variation of gradient index value along z axis

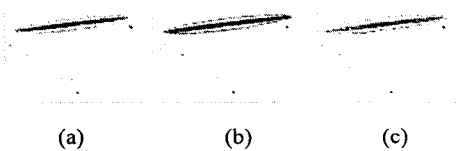


Fig. 18 Change of image along z axis at (a)1.4mm, (b)1.5mm, (c) 1.6mm

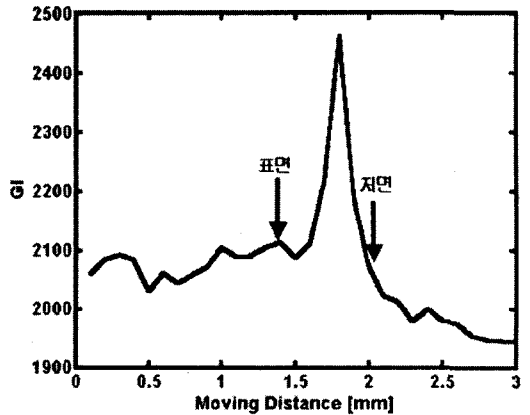


Fig. 19 Variation of gradient index value along z axis

둘째로 수십 μ m정도의 미세한 불순물에 대한 실험결과를 Fig. 19에 나타낸다. 결함의 크기가 앞서 실험했던 기포보다 훨씬 작고 모양도 다르지만 기포와 마찬가지로 결함 면에 도달하게 되면 GI값이 급증하는 것을 확인할 수 있다. 단, 스캐

닝 간격을 미세하게 하면 결함위치 검출 분해능은 더욱 향상 될 수 있다.

한편 검사시간은 유리의 두께에 걸쳐 1회 검사하는데 약 2초 소요되었다. 검사시간은 크게 영상처리속도와 카메라 이송시간에 의존하는데 본 연구의 경우 영상처리속도는 초당 20프레임 이상이고, 결과적으로 총 검사시간에서 이송시간이 큰 비중을 차지하고 있음을 알 수 있다. 따라서 향후 검사시간의 단축을 위해서는 초점의 이동 메커니즘을 전자화하는 등의 노력이 필요할 것으로 사료된다.

또한 결함이 깊이 방향으로 비교적 큰 크기를 가지는 경우에는 GI값의 분포가 Fig. 17이나 Fig. 19에서와 같은 피크를 나타내지 않고 넓게 분포하게 될 것이다. 이런 경우에 GI값의 분포 너비로부터 결함의 깊이방향으로의 분포 정도를 알아 낼 수도 있다.

아울러 영상에서 나타나는 결함의 위치나 형상까지 고려한다면 본 연구에서 제안하는 기법은 깊이방향으로의 3차원적 결함 형상에 대한 분석을 가능하게 할 것이다. 그러나 이 부분은 본 논문의 연구범위로 고려하지 않았다.

6. 결 론

본 연구에서는 유리 내부의 결함의 존재 유무를 파악하기 위하여 CCD 카메라를 이용한 Auto Focusing 기법을 적용하였다. 또한 결함 존재 면에 대한 In Focus 판정 Index로 기울기 지표를 적용하였고 기울기 지표의 사용에 대한 타당성을 증명하기 위하여 결함 경계의 두께 변화와 배경명도의 변화에 따른 GI값의 변화를 알아보는 시뮬레이션을 실시하였다. 그리고 본 연구에서 제시된 알고리즘이 실제 공정에 적용이 가능한지에 대하여 간이 실험장치를 제작하여 검증실험을 실

시하였다.

시뮬레이션 결과 결함 경계의 두께와 배경명도가 변화하는 경우에도 Focusing 정도가 Out of Focus 상태에서 In Focus 상태로 이동할 때 GI값이 급증하였으며, 이는 본 연구에서 제안하는 알고리즘이 유리 내부에 존재하는 결함을 검출하는데 유용하다는 것을 검증하는 결과이다.

또한, 실험을 통하여 수백 μm 정도의 결함은 물론 수십 μm 정도 크기의 미세한 결함을 검출하는데 GI값을 이용하는 것이 매우 효과적임을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Seungkoo Lee and George Vachtsevanos, 2002, "An Application of Rough Set Theory to Detection of Automotive Glass," *Elsevier*, pp. 225~231.
- (2) Kwanguoong Koh, Jooyoun Kim and Sangyong Lee, 1999, "Determination of In-focus Criteria Image Processing Method for Particle Size Measurement," *Trans. KSME (A)*, Vol. 23, No. 3, pp. 398-407.
- (3) Silvia Allegro, Christophe Chanel and Jacques Jacot, 1996, "Auto Focus for Automated Microassembly Under a Microscope," *Lausanne, Switzerland*, pp. 677~680.
- (4) Hunsu Han, 2002, "Basis and Applications of Computer Vision System Based on the Experiments," *Sinkron*, pp. 13~20.
- (5) Gonzalez R. C. and Woods R. E., 1992, "Digital Image Processing," *Addison Wesley*, pp. 417~481.
- (6) Davies, E. R., 1990, "Machine Vision," *Academic Press*, pp. 140~185.