

극박 냉연강판의 경사진 핀홀 검출에 관한 연구

김하슬, 배호문, 이희준
계측제어연구그룹, 포항종합제철 기술연구소

The Measurement of The Inclined Pinhole in The Cold Strip

H. S. Kim*, H. M. Bae, H. J. Lee

Instrumentation & Control Research Group, Technical Research Lab. POSCO*

Abstract

The automatic pinhole detection system is described. The goal of this project is to study the feasibility test of the new concept for hole detection. The developed method is able to detect almost 50 μm pinhole by evaluating the shining of the light as if there is a pinhole in the strip. Moreover, it is possible to inspect up to the 200 μm inclined pinhole. The system consists of three main functional parts: the source part of the light which is using the linear halogen lamp, the image gathering part which is using a line CCD and the image processing part. The light spot can be controlled and optimized corresponding to the situation of the strip. To eliminate back ground noise, the binary image processing method is adopted.

Key words : Pinhole detection, Parabolic mirror, Cold rolled strip

1. 서론

스틸 캔은 알루미늄캔 역할을 대체할 품목으로 부상하고 있으며, 이를 위해 두께 0.17mm 냉연 강판이 양산화 되고 있다. 산세-냉간-압연-청정-조질-압연-정정 등의 복잡한 공정을 거쳐 만들어 지는 소재 특성상 공정간의 이물질 혼합이나, 제강 취련시 개재물의 혼입 및 냉간 압연시 편심 압 하력등의 원인에 기인하여 극박 냉연강판 제조 과정에서 핀홀(Pinhole)이 발생하고 있다. 이러한 홀은 수요자 측면에서 고려하면 큰 결함으로 간주되고 있어, 편결함의 최종검사를 실시하는 정정 공정이나, 연속소둔 공정 등에서 핀홀 검사를 실시하고 있다. 생성된 핀홀의 크기는 수 마이크로 미터에서 수 센티미터 크기의 홀 까지 다양하게 발생하고 있다. 정정공정의 전수검사(1) 항목으로서 핀홀 결함이 관리되고 있으나 아주 작은 크기의 핀 홀을 육안으로 검사하는 것은 불가능하다.

냉연강판 제조공정에서 이러한 핀 홀을 검출 할 수 있는 장치 및 방법으로 레이저와 광전자증 배관(Photo multiply tube)을 결합하여 검출하는 방법이 있다(2). 이러한 검출은 PMT 내로 외부 광의 입사에 의한 오동작을 막기 위하여 냉연강판 가장자리에 외부광 입사 방지를 위한 에지셔터(Edge shutter)를 설치하여야 하므로 다양한 크기의 조업이 이루어 지는 상황에서 가공 소재와 충돌로 인한 오동작이 종종 발생하였다. 또한 가장자리 일부가 항상 가려져야 함으로 폭방향 가장자리 수 센티미터는 검출이 불가능하였다. 이를 개선하기 위한 또 다른 대안으로서 적외선 핀홀 검출법이 개발되었다(3). 이는 120 개의 적외선 발광 부와 수광 부가 1:1 대응하는 형태로 구성된 홀 검출 법으로서 저속에서는 안정된 검출 능을 나타내었으나, 고속 조업상황에서는 수광부의 광 반응 동작 속도가 현저히 낮아지는 현상이 발생하였으며 배열된 발광부의 일부가 발광능을 상실할

때 이를 감지할 방법이 없는 문제점이 지적되어 왔다. 이러한 문제점의 극복을 위하여 외부광에 대한 측정 센서의 반응 감도가 낮으면서, 강판 가장자리 및 경사진 핀 홀까지 측정이 가능한 정밀한 측정방법의 개발이 요구되어 왔다.

본 연구에서는 타원반사경, 할로겐 램프 및 Line CCD(Charge coupled device)를 결합한 경사진 미소 핀홀 측정장치를 제작 구성하였다. 할로겐 램프에서 발광된 빛이 일자형 타원 반사경에 의하여 반사된 후, 90° 부채꼴 모양의 빛살을 형성하여 강판에 입사토록 하였다. 경사 핀 홀이 존재할 때에는 강판의 수직방향에 대하여 ±45° 광 입사가 가능하여 핀홀 내부를 통한 광투과가 이루어 지도록 하였다. 따라서 투과된 산란광의 광량과 위치를 측정하여 홀의 크기를 측정할 수 있음을 보이고자 한다.

2. 광학계 구성

냉연강판 제조 설비의 최대 조업 속도는 분당 700Meter 이상에 이른다. 따라서 우리가 사용하는 방전형 AC형 광원은 60Hz 임으로 극히 짧은 순간에는 빛이 발생하지 않는 경우가 발생한다. 조명용 Halogen lamp의 경우 색온도 2856° K 에서 발광하는 열광원 이므로 교류형 전압이 인가된 경우 일지라도 근 적외선 영역 발광 빛은 DC형 광 출력을 발산하게 되므로 본 연구의 발광원으로 선정하였다. 그림 1에서 타원반사경의 한 초점에서 출사된 광이 다른 한 초점에 모이는 성질을 응용하여, 본 장치에서 입사광의 입사각은 냉연강판의 법선 방향에서 ±45° 가 되도록 구성하였다. 타원경에 의하여 반사된 할로겐 램프 선광원은 냉연강판 위에 임의 선폭을 가진 일자형 광원으로 광을 조사 하게 된다. 강판 내의 핀홀 내부를 통하여 광투과시 출사단의 광파의 운동을 고려하면 그림 2와 같이 묘사될 수 있다. 수직 홀의 경우 투과광에 의한 정보를 관측할 수 있고, 경사진 핀홀에 의하여 핀홀 내부에서 또다른 산란이 있는 경우에는 회절된 빛에 의하여 홀 영상을 획득할 수 있다. 선광원이 핀홀 즉 슬릿에 입사되면, 호이겐스 원리에 따라 이차파의 소파원들이 선광원의 역할을 하게된다. 각 점에서 방출되는 이차 구형파는 거리에 반비례 하는 진폭의 r^{-1} 의존성을 나타내어 다음과 같이 표현된다(4).

$$E = \epsilon_0 \int_{-D/2}^{+D/2} \frac{\sin(\omega t - kr)}{r} dr \quad (1)$$

여기서 E 는 전기장, ϵ_0 는 광원세기, D 는 홀 직경, r 은 핀홀에서 CCD 까지 거리를 나타낸다.

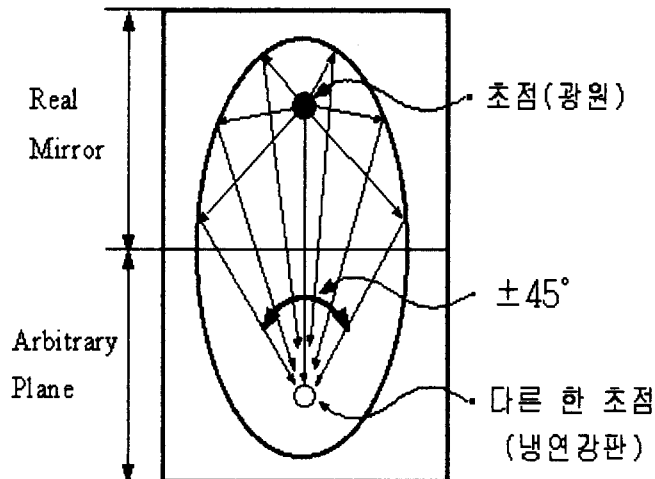


Fig. 1 The design of the cylindrical parabolic mirror.

라인 스캔에 의한 계측 시스템을 구축할 때에는 물체의 종 방향, 횡 방향에 대한 분해능을 고려하여야 한다. 횡 방향 분해능은 CCD 카메라의 화소수에 의하여 제한이 되며, 물체각(object field of view)에서 화소수는 영상 분해능을 결정한다.

광학적 특성인식(optical character recognition)의 경우 인치마다 200 도트가 있어야 한다. 이것은 카메라 픽셀 하나가 물체의 0.005 인치에 대응 되도록 하여야 한다. 냉연 강판의 경우 가장 빠른 line의 속도가 900MPM으로 설정 되어 있다. 이는 2952.7ft에 해당되며, 590 inches/sec 에 해당한다. 또한 냉연강판 수평방향 보임 각(horizontal field view)을 100 inch로 설정하고, OCR을 20으로 설정하면, 요구되는 분해능은

$$\begin{aligned} \text{resolution} &= \text{HFOV} \times \text{DPI} \\ &= 100'' \times 20\text{DPI} \\ &= 2000 \text{ 화소} \end{aligned}$$

가 되며, 가능한 센서로는 2048개의 화소수를 가진 CCD를 선택하면 20 DPI 분해능을 얻을 수 있다. 분해능 CCD의 화소수를 늘리거나, Scan rate을 증대함에 의하여 달성할 수 있다. 한편 Pinhole에서 회절광이 CCD에 입사하게 됨으로 DPI 자체가 광학계 자체의 분해능을 의미 하지는 않는다. 물체의 움직임에 대한 카메라 scan rate의 동기화는 엔코더(encoder)를 사용함에 의하여 행하여 질 수 있다. 엔코더 이송은 움직이는 물체와 같은 속도로 회전하는 wheel과 동일한 속도로 움직이도록 하며, 수직 방향의 분해능은 물체 전송속도와 카메라의 scan rate을 일치 시킨 후, scan rate 조절에 의하여 이를 수 있다.

3. 실험

폭이 매우 좁은 홀에 대하여 투과 광량과 CCD에 맺히는 노광 소자수를 측정함에 의하여 핀홀 유무 및 크기를 판단하기 위하여 그림 3과 같은 장치를 구성하였다. 조업 현장에서는 수직형 홀 뿐 아니라 경사형의 홀 또한 존재한다. 수직형의 경우에 기존에는 빛의 직선적 조사에 의하여 투과된 광량을 측정하면 홀의 크기를 유추 할 수 있었다. 그러나 BP 냉연과 같이 극박 압연 공정을 통하여 만들어지는 소재의 경우는 이물질의 이탈, 조업중의 이 물질 침입, Dent 및 Scratch등에 의하여 다수의 경사 핀홀이 존재하게 된다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 극복하기 위한 방법의 하나로써 입사광 자체의 입사각을 냉연강판의 수직면에 $\pm 45^\circ$ 의 부채꼴 모양을 이루도록 함으로서 경사 및 수직형 핀홀이 동시에 측정 가능하도록 하는데 기초를 두도록 하는데 주안점을 두었다. 광 조사를 위한 광원으로는 Halogen lamp를 사용 하였다. 이는 현장 여건을 고려한 장치제

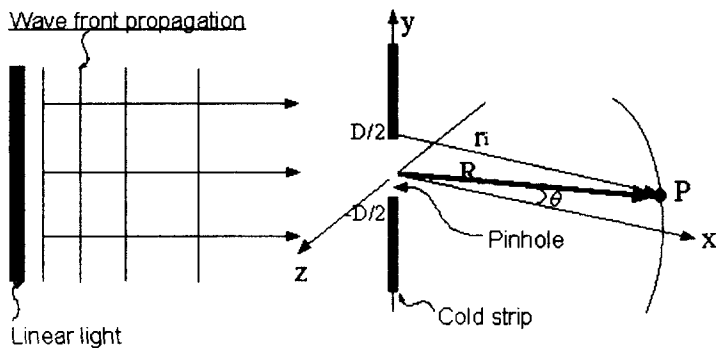


Fig. 2 The linear light, wave front propagation and the position of the CCD(at P).

작을 위한 것으로 다른 광원에 비하여 IR영역의 방사 강도가 크다. 통상 형광등과 같은 Arch등의 경우 120Hz에 맞춰서 깜박임 현상이 나타나므로 고속 Line CCD 등으로 측정할 때 순간적으로 광원이 발광하지 않는 경우가 발생한다. 이러한 경우 홀이 존재한다 할지라도 측정하지 못하는 경우가 발생한다. 이러한 상황을 극복하기 위해서는 Line CCD의 Sampling rate의 3 배 이상의 고진동 전원을 공급하여야 하는 결점이 있어 왔다. Halogen lamp의 경우 그 자체가 열광원 이므로 이러한 문제가 발생하지 않으며, 아주 작은 직경으로 1~2 미터의 선광원을 만드는 것이 가능하다. 반사경의 재질은 락크 80을 이용하였고, 타원 방정식 Program을 CNC 선반에 입력하여 타원 가공하였다. 또한 반사면은 Cr 코팅을 하여 Back scattering된 빛이 반사되어 냉연강판의 가상의 초점에 집광 되도록 하였다. 램프의 위치는 수직으로 움직일 수 있도록 하여 강판 위에 1cm의 집광된 광원이 광폭을 이루도록 하였다. 냉연강판이 고속으로 움직이면서 진동을 하기 때문에 점 광원으로 집광 된 1차원 형태의 광 조사보다는 임의의 광폭을 2차원 직사각형의 광 입사하는 것이 신호검출에 양호한 상태를 나타내었다. 광원은 Phillips사의 200mm의 Halogen lamp를 이용하였다. 220V 입력 때 1K watt 가 소모되는 광원 이어서 다량의 열이 방출 된다. 따라서 판 속에 따라 광원의 밝기가 바뀌도록 하였고, 저속일 때는 50Volt 이하로 광원의 input 전압을 설정 하였으며, 200MPM 이상의 판속을 가지는 경우 220 volt 전압 입력을 하도록 하였다. 투과된 산란광의 검출은 Area CCD와 Line CCD를 이용하여 수광 하였다. Area CCD의 경우 투과된 산란광의 형태 검출은 양호하나 이의 신호처리는 많은 Data를 처리 하여야 함으로 개략적 신호 형태를 파악 하는데 이용하였으며, Data 검출은 Line CCD를 이용 하였다. Area CCD는 Pulnix사의 TM7EX 모델을 사용 하였고, Frame grabber는 Matrox사의 Corona board를 이용 하였다. Line CCD는 Dalsa CL-C3 모델로서 2048 1 개의 Resolution을 나타내며, CCD 하나의 화소는 14 μm 의 직사각형으로 이루어져 있으며, 최대 line scan rate은 14.3 kHz까지 가능하다. Line CCD에서 PC로의 data는 8 bit RS422 format으로 전송 하였으며, PC에서는 1 line data의 전송을 받은 후 2048개의 신호처리를 하였다. 256 Gray level에서 data의 평균 밝기는 13~16 Gray level을 나타내었다. Halogen lamp등에 의하여 소재 가열을 방지하기 위하여 3개의 냉각팬으로 강제 송풍을 하도록 하였다. 측정 하고자 하는 시편은 원형의 스텐레스 판 위에 부착하여 고속 회전운동 및 정적 상태에서 빛의 투과 광량을 측정 하였다.

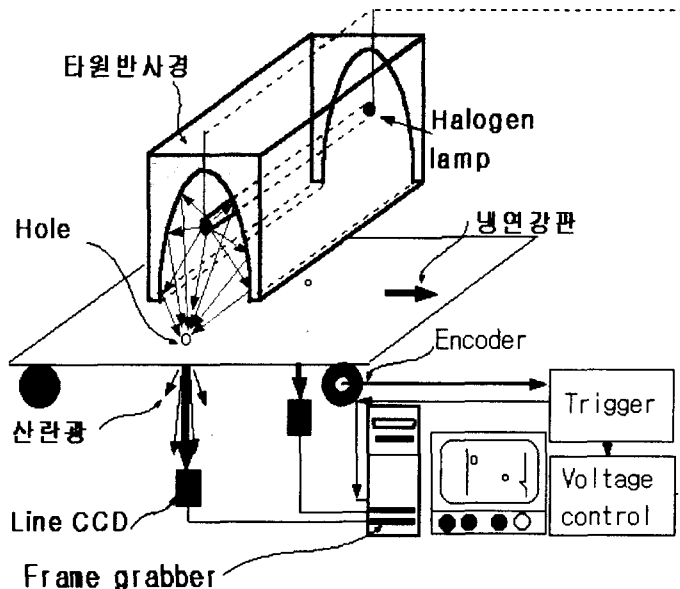


Fig. 3 The experimental system for detecting the cold strip pinhole.

4. 실험결과

사진 1은 BP 강판에서 발생한 홀의 경우인데, 굽힌 홀이 크게 발생한 경우로서 25배 확대한 현미경 사진이다. 자세히 관측하면 두개의 hole로서 이루어진 것을 알 수 있다. 사진 아래면 축적과 비교하면 큰 홀의 경우 수평 방향으로 $600\mu\text{m}$, 수평에서 45° 경사방향으로 $880\mu\text{m}$, 수평방향으로 $120\mu\text{m}$ 임을 알 수 있다. Area CCD를 이용하여 측정된 결과는 그림4에 나타내었으며, 각 화소 마다의 Intensity 정보를 Plotting하면 그림 5와 같이 분리된 핀홀 상을 관측할 수 있었다.

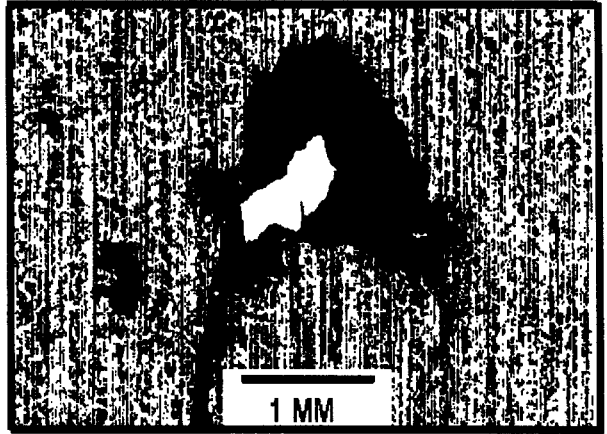


Fig. 1 The BP cold strip hole which is scratched on the process. The small bright region indicates the pinhole.

그림6은 경사진 냉연 편흔을 인공적으로 제작한 경우로서 45° 의 가공면마 후, 한 쪽 강판에 45° 홀을 내어 접합하였으며, 경사 편흔의 직경은 $200\mu\text{m}$ 인 경우이다. 수직형 편흔 측정법으로는 투과된 광신호의 측광이 어려우나, 본 연구에 의한 방법으로는 그림 8의 중앙에 나타난 측광 신호를 얻을 수 있었다. 그림 7은 기준이 되는 수직 편흔 시편의 제원을 나타낸 것으로 그에 대한 측광 결과는 그림 8의 좌측 및 우측의 intensity profile로 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 $50\mu\text{m}$ 수직형 편흔 신호가 $200\mu\text{m}$ 보다 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 편흔 안으로 입사된 빛살들이 투과되기 까지 산란과 반사를 되풀이 하면서 투과 되기 때문에 수직으로 형성된 편흔 신호보다 낮은 Intensity 정보를 내는 것으로 판단된다. 그림 9는 Line CCD에 의하여 400MPM 의 속도로 편흔이 회전할 때 획득한 약 1200 화소에 대한 Intensity profile 정보이다. 그림에서 알 수 있듯이 $50\mu\text{m}$ 에 해당하는 화소는



Fig. 4 The strip image is captured by the area CCD when the linear light is on.

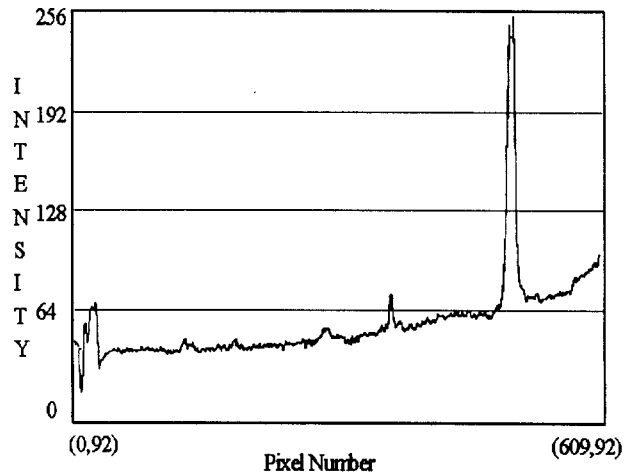


Fig. 5 The intensity distribution profile.

5~6 개의 화소이며, $10\mu\text{m}$ 에 해당하는 화소는 3~4개 정도에 해당된다. 이는 영상획득 신호처리 Threshold를 얼마로 설정 하는냐에 따라 차이가 날 수 있다. 강판의 고속 회전시 심한 요동이 있어 광 조사 영역과 CCD 초점 광축의 불일치가 발생할 경우 홀 정보를 놓치는 경우가 발생 하는데 Line CCD화소 구성을 $14\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ 형태로 전환하면 Data 수를 줄이면서 광축 정렬에 보다 민감도가 낮은 광학계를 구성할 수 있을 것이다.

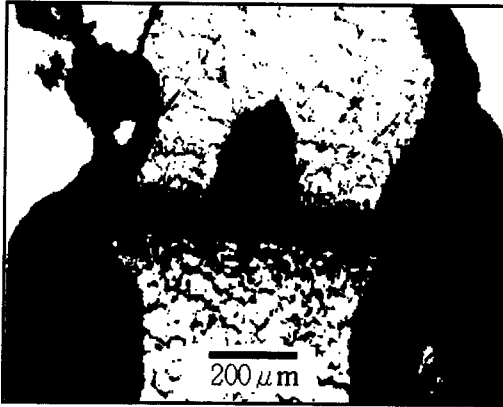


Fig. 6 The inclined pinhole(×50).

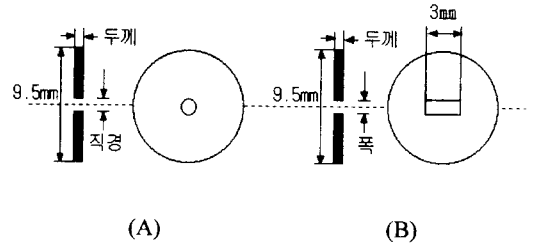


Fig. 7 Precision pinhole. (A) Hole diameter 50 μm, thickness 0.01inches, (B) Hole diameter 50 μm, slit length 3mm.

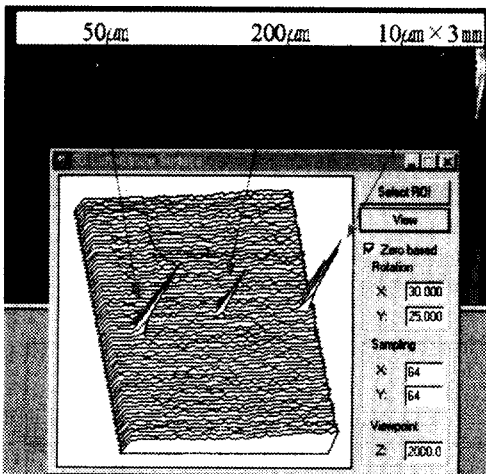


Fig. 8 The intensity map of the pinhole.

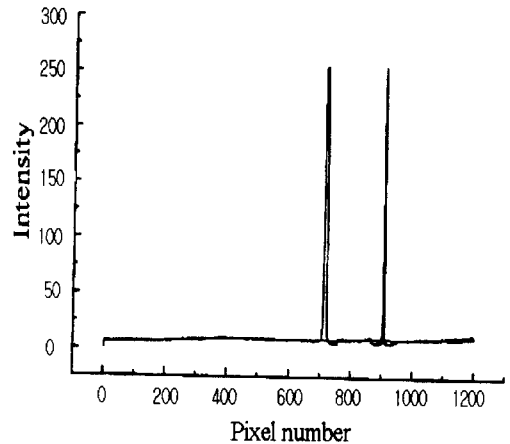


Fig. 9 The intensity distribution of the 50 μm(left) and 10 μm(right) pinhole are captured by the line CCD.

5. 결론

냉연강판 품질 검사의 3대 항목은 외부결함, 내부결함 그리고 Hole 결함으로 구분할 수 있다. 외부 결함은 Laser와 CCD등을 이용하여 측정하는 SDD가 있으며, 내부 결함은 Magnetic induction 을 이용한 IDD 등이 연구 되고 있다. Pinhole 결함 탐상 장치는 Laser type, Lamp type 및 Infra-red LED type 등이 조업 현장에서 이용되고 있다. 그러나 조업 현장에서 설비의 유지보수 어려움, 측정 정도저하, 측정 장치와 냉연강판 사이의 거리를 좁게 설정 하여야 측정이 가능하다는 등의 제약 조건이 있다. 이러한 이유로 인하여 편홀 측정 장치의 상당 수가 적절히 이용되지 못하고 있으며, 편홀이 존재하는 제품이 수요자에게 인도될 경우 수요가 불만 제기 및 Claim의 원인이 되고 있다. 본 연구는 기존 편홀 탐상 장치에서 지적 되어 왔던 외부광 차단기에 의한 강판손상, 광축 정렬의 어려움 해결과 경사진 편홀 측정 가능성 타진을 위한 선행 연구로서 시작 하였다.

할로젠 램프와 경사진 광 입사가 가능하도록 고안된 타원 반사경에 의하여 고 휘도 광량을 냉연강판 위에 광 조사 하도록 하였으며, 냉연강판에 형성된 핀홀에 의하여 투과된 광은 핀홀 크기 및 투과 광량에 비례하여 Line CCD 각각의 화소에 영상 정보가 맺힌다. 영상 정보는 Frame grabber를 통하여 Digital 정보로 변환된 후 이진화 된 영상 신호처리에 따라 핀홀 유무 및 크기를 판별할 수 있었다.

900 MPM까지 고속 회전 가능한 시뮬레이 제작 및 타원 반사경과 선광원을 결합하여 고휘도 광원이 냉연강판 위에 특정한 경사각을 유지 하면서 입사 가능 하도록 하였다. Line CCD 및 영상획득 장치를 이용하여 400MP속도로 시편 핀홀이 회전할 때, 직경 50 μ m 까지 핀홀 검출이 가능 하였다. 인위적으로 제작한 경사진 냉연 핀홀의 경우 직경 200 μ m 까지 측정할 수 있었다.

본 연구에 의하여 BP 냉연강판 등에서 발생하는 경사진 홀의 측정이 가능하게 되었으며, 기존 Detector에서 Strip Edge 부분과 같은 측정이 불가능할 것으로 생각되었던 부분을 본 측정법에 의하여 탐상이 가능하게 되었다.

참고문헌

1. 한국철강신문, 중급철강지식, pp.287-289(1985).
2. Christoph Scheck, MTP-Metallurgical Plant and Technology International, no.5, pp.86-92(1995).
3. J. Y. Park, Proceedings of the 1st conference of the technical society of steel process control, pp.14-16(1998).
4. E. Hecht, Optics, Addison-Wesley, pp.392-424(1987).