

# 선형 홀 센서 배열을 사용한 결함 검사 알고리즘 개발

## Development of Crack Examination Algorithm Using the Linearly Integrated Hall Sensor Array

김재준<sup>1</sup>, 김병수<sup>1</sup>, 이진이<sup>2</sup>, 이순걸<sup>1,✉</sup>  
Jae-Jun Kim<sup>1</sup>, Byoung-Soo Kim<sup>1</sup>, Jin-Yi Lee<sup>2</sup> and Soon-Geul Lee<sup>1,✉</sup>

<sup>1</sup> 경희대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Kyunghee Univ.)

<sup>2</sup> 조선대학교 제어계측로봇공학과 (Department of Control, Instrumentation and Robot Engineering, Chosun Univ.)

✉ Corresponding author: sglee@khu.ac.kr, Tel: 031-201-2945

Manuscript received: 2010.4.14 / Accepted: 2010.9.8

*Previous researches show that linearly integrated Hall sensor arrays (LIHaS) can detect cracks in the steel structure fast and effectively. This paper proposes an algorithm that estimates the size and shape of cracks for the developed LIHaS. In most nondestructive testing (NDT), just crack existence and location are obtained by processing 1-dimensional data from the sensor that scans the object with relative speed in single direction. The proposed method is composed with two steps. The first step is constructing 2-dimensionally mapped data space by combining the converted position data from the time-based scan data with the position information of sensor arrays those are placed in the vertical direction to the scan direction. The second step is applying designed Laplacian filter and smoothing filter to estimate the size and shape of cracks. The experimental results of express train wheels show that the proposed algorithm is not only more reliable and accurate to detecting cracks but also effective to estimate the size and shape of cracks.*

Key Words: Magnetic Crack Detection (자기 탐상법), Non-Destructive Testing (비파괴 검사), Linearly Integrated Hall Sensor Array (선형 홀 센서 배열), Crack Examination (균열 검사), Shape Detection (형상 검출)

### 1. 서론

비파괴 검사는 검사체가 되는 재료와 구조물 등의 성질과 내부 조직을 변화시키거나 파괴하지 않고 결함의 존재 유무, 재질 변화 상태 등 안전성을 평가하는 기술 중 하나로 제조원가 절감과 신뢰성 향상에 기인하여 발전되어 왔다. 산업의 고도화에 따라 사회 인프라로서 설치된 많은 구조물의 검사와 산업 현장에서도 대형화되어 가는 설비의 결함을 탐지하여 사고를 예방할 수 있는 필수적인 기술로서 비파괴 검사의 중요성이 부각되

어 왔다.

비파괴 검사의 종류로 초음파 탐상, 자기탐상 등 여러 종류가 있다. 특히 흔히 상자성체의 경우 언급된 두 가지 기술에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 초음파 탐상은 검사체에 발사된 초음파가 균열과 같은 내·외부 결함을 만나면 반사되는 성질을 이용한 것이다. 항공기와 선박 등에 사용된 복합 재료 결함과 콘크리트 구조물의 결함 탐상으로 많이 활용되고 있고, 초음파 데이터를 이미지화 하여 결함 특징을 추출하는 하나의 분야로 활용되고 있다. 초음파 탐상법은 초음파의 높

은 투과력으로 수 미터의 두꺼운 부분도 탐상이 가능하고, 미세한 결함을 검출할 수 있지만, 방향은 검사체 표면 거칠기로 인해 탐상이 불가능할 수 있다. 또 결정입자가 조대하거나 미세기공이나 편석, 계재물 등으로 인해 탐상이 어려워진다.<sup>1</sup>

자기 탐상법은 특히 표층부에 존재하는 결함을 검출하는데 우수한 비파괴 검사법이다. 자속이 흐를 수 있는 모든 재료에서 널리 사용되는데 식별력이 초음파 탐상법과 비교하여 크게 나타난다. 그 이유는 상자성체의 균열은 응력집중이 크기 때문이다. 이런 자기 탐상법을 이용하여 Hwang 과 Lee 는 철도 차륜의 결함을 탐상하였는데 검출 정밀도가 다른 비파괴 검사보다 높은 정밀도를 가짐을 증명하였다.<sup>2,3</sup> 또 Jee 는 시뮬레이션으로 승강기용 와이어 로프를 검사체로 누설자기장의 분포를 해석하였다.<sup>4</sup> 언급된 실험의 결과로 결함 부분을 지시할 수 있는 결과를 얻어냈다. 하지만 결함을 지시할 수 있을 뿐 그 형태와 구조에 대한 결과가 불충분 하였고, 잡음에서 강인한 결과를 얻어내진 못하였다.

본 논문에서는 Hwang 과 Lee 의 자기 탐상법으로 얻어진 철도 차륜 탐상 데이터를 사용하여 대상체의 결함을 형상화하고 형태를 유추하는 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 공간상으로 나란히 배열된 센서들에 의해 얻어진 데이터를 데이터 스캔 속도 정보와 결합한 라플라시안 필터를 이용하여 결함의 형상화 및 형태 추정을 수행한다. 알고리즘의 결과로 생성된 3 차원 형상으로 검사체의 결함과 형태 유사도를 판단하고, 결함 지시 성능을 비교하도록 한다. 결함의 입체적 형태 추정은 결함 원인의 규명에 논리적, 과학적 근거가 될 수 있으며 결함 발생 시설물 또는 장치의 효과적인 유지보수와 결함방지 대책으로 사용될 수 있다.

## 2. 실험 장비 및 환경

### 2.1 선형 홀 센서 배열

결함 검사를 위하여 웨이퍼 상에 선형 배열된 홀 센서(LIHaS, linearly integrated hall sensor array)를 사용하였다. 그 형태는 Fig. 1 과 같다. 이는 소형 요크식 전자석에 의해 발생된 자기장이 결함을 통과하면서 변화되는 분포를 LIHaS 로 감지하는 원리를 이용하여 고속 탐상이 가능하다.<sup>2,3</sup> 64 개의 홀 센서가 웨이퍼 상에 0.52mm 의 등간격으로 배열되어 신호를 만들어 낸다.

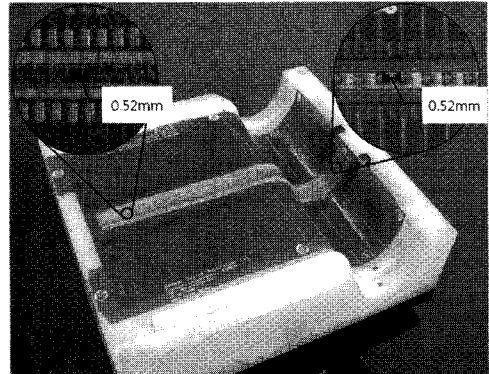


Fig. 1 Linearly integrated hall sensor array

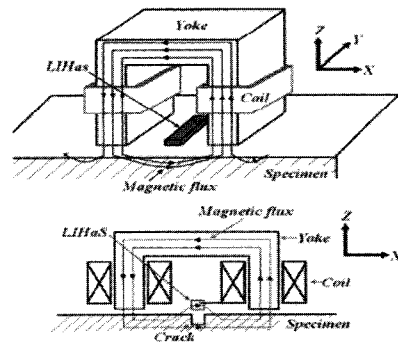


Fig. 2 Small size yoke type electromagnetic coil operated by alternative current

Fig. 2 는 LIHaS 의 동작원리와 좌표계를 나타낸다. LIHaS 의 센서 배열 방향을  $y$  축, 데이터 스캐닝 방향을  $x$  축, 시험편 평면의 수직방향을  $z$  축으로 한다. LIHaS 의 양쪽으로 전자석을 감싸고 검사체에 전류가 흐르면 자극 선단에서  $x$  방향으로 자속이 발생한다. 이때 상자성체의 표층부 표면에서 전자석이 접근하면 자속이 집중하게 된다.<sup>2</sup> 표층부의 표면에 결함이 있다면 결함부의 공간을 새어나가는 자속들이 발생하게 된다. 이를 결함누설자속이라 한다. 결함누설자속은 물리적으로  $y$  축 방향으로 측정 가능한데 그 원리는 홀 효과(hall effect)라고 불리며 전류 이동에 기인한 유도된 전자기장의 힘으로 정리된다.<sup>5</sup> 검사체를 스캔하는 LIHaS 는 자극의 강도 즉 결함누설자속의 강도를 측정하게 된다.

### 2.2 실험 환경

Fig. 3 은 실험에 사용된 실제 KTX 차륜으로 표면에 임의의 크기로 장방향 및 사선 방향의 스크래치

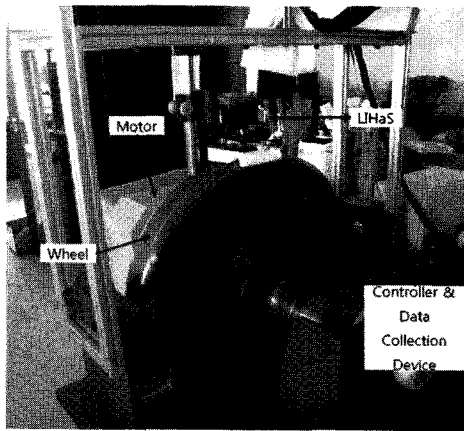


Fig. 3 Experimental setup

형태와 원형의 인공결함을 정과 끌로 마킹하여 만들었다. 모터를 사용하여 차륜을 시속 30Km/h 의 속도로 등속회전 시킬 때 상단에 차륜의 표면과 약 4.5mm 의 간격으로 구축되어 있는 LIHaS 가 약 100 kHz 의 주기로 자기장 분포를 측정한다. 측정된 데이터는 ±2.2V 이내의 전압으로 고속의 데이터 수집 장치에 저장된다.

3. 수집 데이터 원형과 결함 의심지역 및 형상 추정 알고리즘

3.1 수집 데이터

LIHaS 에서 수집되어 데이터 수집 장치에 저장된 데이터는 -1 에서 1 까지 수치로 변환된다. 그 수치의 크고 작음은 누설자속의 크기와 결함 내부 깊이로 인해 차이가 나는데 결함이 발견되었을 경우 큰 누설자속의 영향으로 발견 지점에서는 사인과 형태의 데이터가 생성된다.<sup>5,6</sup> 그 이유는 결함을 피해가는 누설자속으로 인해 측정값이 커졌다가 결함 내부에 진행되었을 경우 떨어진 측정거리로

인해 감도가 줄어들기 때문이다. 결함 주변의 자속의 형태는 Fig. 4 와 같이 형성되고, LIHaS 의 누설자속 측정 방향이 y 축이다.<sup>5</sup> 여기서 예측할 수 있는 것은 홀 센서가 수집한 데이터는 결함을 정확히 묘사할 수 없다는 점이다. 2 가지 측면에서 생각해 볼 수 있는데 첫 번째로 결함 내부를 표현하지 못하는 것과 두 번째로 결함의 정확한 크기를 얻을 수 없다는 점이다.

3.2 결함 의심지역 추출

Hwang 과 Lee 의 선행 연구에서는 식 (1)을 적용함으로 결함 의심지역을 검출했다.<sup>2,3</sup> 여기서  $V_n$  는 LIHaS 의 신호전압 출력이고,  $x$  는 탐상 방향의 위치값으로 시간  $t$  로 대체 가능하다. 검출 경계치 (threshold)인 ±0.351V 는 실험적 방법으로 결정하였다.

$$\frac{\partial V_n}{\partial x} \geq \pm 0.351(v) \tag{1}$$

이는 단순히 검사방향에 대한 센서 출력의 변화율이 어떤 경계치 이상이 되면 결함이 있는 것으로 판단하는 방법이다. Fig. 5 는 이와 같은 방법으로 얻어진 데이터를 스케일화 하여 이미지로 나타낸 것이다. 편미분의 효과로 원래 센서 신호의 이미지(Fig. 5a)에서 존재하던 잡음들이 처리 후 이미지(Fig. 5b)에서 줄어들고, 결함 범위가 축소되어 보다 나은 결과를 보여주지만 세로 방향의 잡음과 세밀한 잡음은 그대로 남아 있음을 볼 수 있다.

3.3 결함 추정 알고리즘

LIHaS 의 출력은 64 개의 y 축 공간으로 배열된 일련의 데이터가 검사속도에 따라 시간에 따라 얻

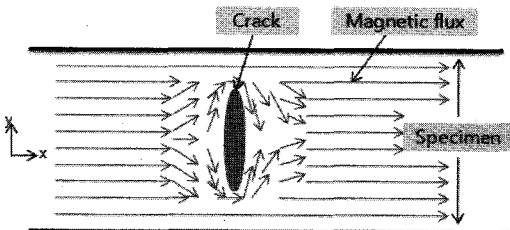
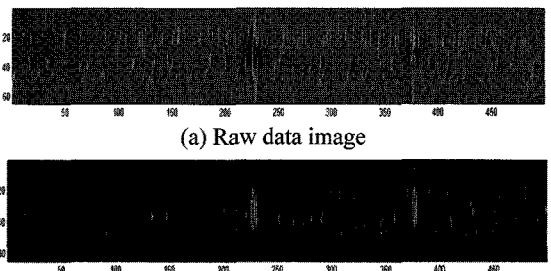


Fig. 4 Magnetic field distribution around a crack (quoted from "Encyclopedia of Sensors"<sup>5</sup>)



(a) Raw data image  
(b) Partially differentiated data image  
Fig. 5 Scaled data represented as image

어지는 신호이다. 측정 시간 정보는 스캔속도를 고려하면 이동방향에 대한 위치로 환산될 수 있고, 따라서 시간에 따른 데이터는 검사방향(x 축)의, 즉 검사체 위치에 대한 센서출력이 된다. 그 결과 64 개의 센서 배열의 시간에 대한 출력 데이터는 x, y 2 차원 공간상의 누설자속 측정치를 얻게 된다.

본 논문에서는 결함의 형태 추정 알고리즘에 영상처리에서 사용하는 라플라시안 필터 개념을 적용하였다. 라플라시안 필터링은 이웃 화소 간의 편차를 이용한 2 방향성 편미분을 수행하여 영상의 윤곽선을 추출하는데 사용한다. 동일한 공간 배열 영상 데이터의 경우 3x3 행렬인 라플라시안 마스크를 곱하여 에지를 추출할 수 있다. LIHaS 데이터는 수집방향으로는 차륜의 회전속도와 관련된 간격으로 배열된 정보이고 그 직각방향으로는 홀 센서 배열 간격의 공간 배열정보이므로 이를 동일한 거리배열로 변환 후 라플라시안 마스크를 적용하면 결함 영역과 정상 차륜 영역간 구분을 판별이 용이해진다. 수집 데이터에서 LIHaS의 센서간 거리 및 센싱 속도에 기인하여 설계된 라플라시안 마스크를 적용하여 형상화 입체모델을 생성한 후 공간 영역 평활화를 적용하여 뚜렷한 전이가 줄어든 데이터로 재배열시킨다.

3.2 절의 Fig. 5(b)의 이미지에서 많은 개선이 이루어 졌지만 결함 주변에 적지 않은 잡음이 포함 되어 있고, 결함 데이터가 원형의 결함 데이터보다 특별히 강조되지 않았다. 특히 결함과 비슷한 데이터값을 가지지만 면적이 작은 잡음이 유입될 경우 1 차 편미분 결과로는 잡음을 결함으로 인식할 가능성이 높다. 그래서 x 축과 y 축 모두 편미분 하고 잡음 제거를 위해 라플라시안 필터를 채택하였으며 필터 마스크를 수집 환경에 맞게 설계하였다. 설계의 기준은 각 데이터간의 거리로 요약되는데 x 축의 경우 데이터 수집속도와 차륜의 회전속도를 이용하고, y 축은 LIHaS의 홀 센서간 거리에 기인한다.

수집 데이터에 라플라시안 필터링을 적용할 때 식 (2)를 따른다. 식 (2)는 라플라시안의 정의이다.

$$\nabla^2 V_h = \frac{\partial^2 V_h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_h}{\partial y^2} \quad (2)$$

식 (2)를 디지털 2 차 편미분으로 수정하고, 각 x, y 성분을 더하여 식 (3)을 얻을 수 있다.

$$\nabla^2 V_h = \left[ \begin{array}{c} V_h(x+1, y) + V_h(x-1, y) \\ + V_h(x, y+1) + V_h(x, y-1) \end{array} \right] - 4V_h(x, y) \quad (3)$$

식 (4)는 수집 데이터 환경을 고려하여 설계된 마스크이다. 마스크 구조는 수집 데이터에 따라 가로가 x 축, 세로가 y 축으로 중심점의 대각선은 x, y 에 대한 정규값이고 중심점은 외곽 성분의 합역역수이다.

$$\nabla^2 V_h = \left[ \begin{array}{ccc} -0.9794 & -0.52 & -0.9794 \\ -0.83 & 6.6176 & -0.83 \\ -0.9794 & -0.52 & -0.9794 \end{array} \right] \quad (4)$$

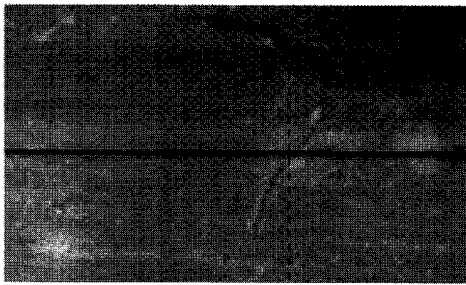
라플라시안 필터링은 잡음에 매우 민감하므로 구해진 결함 윤곽 데이터가 불균일한 형태를 보이고, 부적절한 잡음을 가진다. 결함 내부 데이터의 연속성과 필터 마스크보다 작은 형태의 잡음 제거를 위해 식 (5)와 같이 간단히 2 방향성 데이터의 평균을 구하는 평활화 마스크를 적용한다.

$$\nabla^2 V_h = \frac{1}{9} \left[ \begin{array}{ccc} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{array} \right] \quad (5)$$

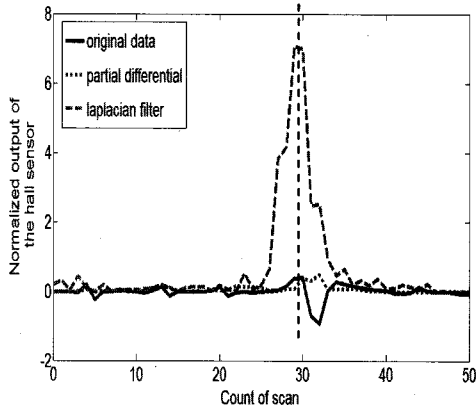
## 4. 실험 결과

### 4.1 선행 연구와 실험 데이터 비교

LIHaS의 수집 데이터와 Hwang 과 Lee 의 철도 차륜 결함 탐상의 x 축 방향 편미분 데이터, 그리고 본 논문의 알고리즘 결과 데이터를 비교하였다. 하나의 홀 센서 수신 데이터의 거동을 2 차원 그래프로 Fig. 6에 나타냈다. Fig. 6(a)는 실험 차륜의 표면 사진으로 데이터 스캔위치와 방향을 화살표로 나타냈다. Fig. 6(b)는 이 스캔 구간에서 수집된 데이터와 처리된 데이터들을 시간에 따라 나타낸 것이다. Fig. 6(b)에서 긴 점선이 원시 데이터, 짧은 점선이 x 방향 편미분 데이터, 실선이 라플라시안 필터링된 데이터이다. 원시 데이터의 경우 결함 주변에 집중된 자기장이 잘 표현되어 있다. 하지만 결함 내부는 데이터 의미가 불분명하다. 특히 결함에 집중된 자기장과 비슷한 잡음이 있을 경우 결함 분별력이 떨어지게 된다. 이런 잡음은 결함이 없는 곳에서 차륜과 홀 센서간 거리가 밀접해 짐으로 생기는 경우가 있다. 스캔방향 편미분 결과로 결함 표현력은 좋아졌으나 형상 추출 출력 값으로 불충분하다. 라플라시안 필터링 및 평활화 데이



(a) Crack section



(b) Comparative crack section

Fig. 6 Data of a hall sensor that passes a crack

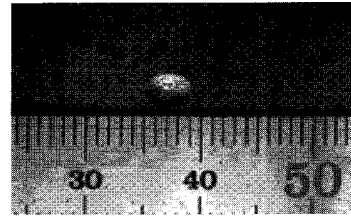
터의 경우 결함 근처에서 스캔방향 1 차 미분 결과보다 10 배가 넘는 큰 홀 센서 출력 값이 발생하여 적절한 경계치 설정으로 결함 추출이 가능하다.

#### 4.2 라플라시안 필터 및 평활화의 결함 구체화 결과

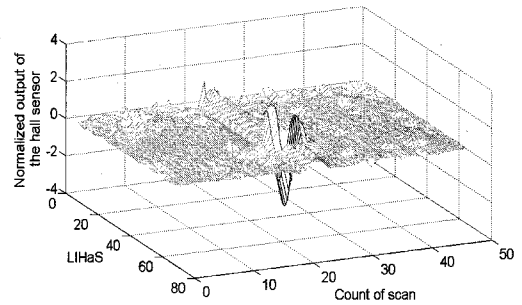
결함의 구체화는 결과적으로 차륜의 단면 형태, 크기, 위치를 사실적으로 묘사하는 것이다. 인간의 눈이 정확히 결함을 판별할 수 있듯이 기계적 판단을 돕기 위해 질 좋은 데이터로 가공하는 단계로 생각할 수 있다.

알고리즘 적용 데이터를 3 차원 그래프로 고찰함으로써 기계적 인식 가능 수준을 판단하도록 한다.

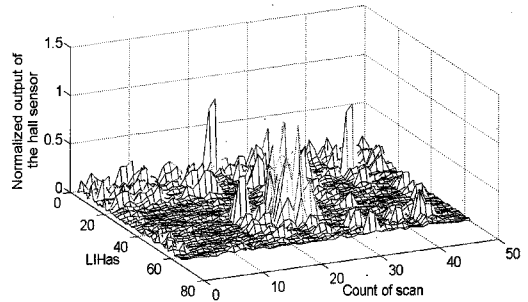
Fig. 7 에 원형 결함의 수집 데이터, 편미분 적용 데이터, 라플라시안 필터 적용 데이터 순으로 3 차원 그래프로 나타내었다. Fig. 7(b)의 수집된 원 데이터는 실제 형상 표현이 어렵다. 또 결함과 y 축 방향으로 잡음이 형성된다. 이 잡음은 Fig. 7(c)의 편미분 데이터에서 걸러낼 수 있다. 하지만 결함이 없는 부분에서 결함 데이터와 비슷한 값을



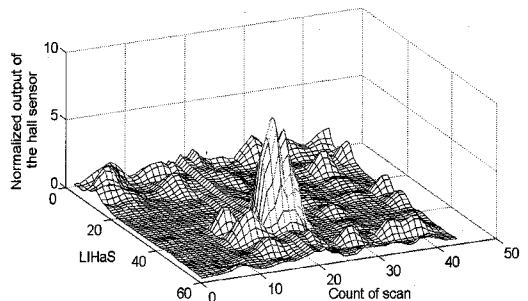
(a) A round shape crack



(b) Raw data



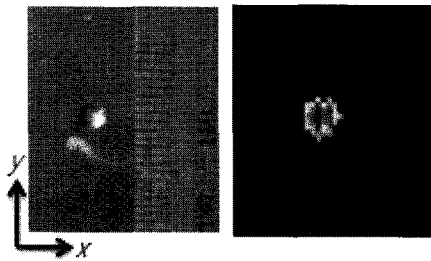
(c) Partially differentiated data



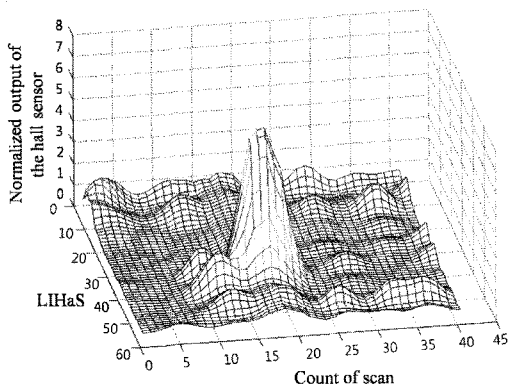
(d) Laplacian filtered data

Fig. 7 3D figuration results of each method

가진 새로운 잡음이 발견된다. 잡음 크기를 생각할 때 굉장히 정교한 경계치의 설정이 요구될 것으로 판단된다. 라플라시안 필터와 평활화 과정을 거친 Fig. 7(d)는 추정 가능한 형태의 결과를 그래

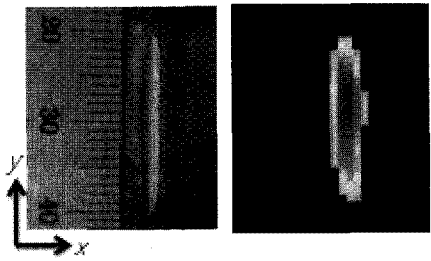


(a) When the threshold is 45% of the maximum value

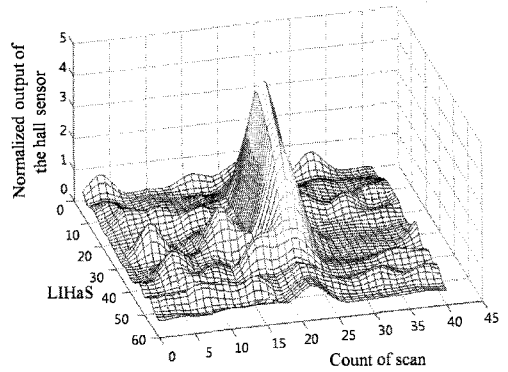


(b) 3D figuration of a round shape crack

Fig. 8 Result image of a round shape crack



(a) When the threshold is 45% of the maximum value



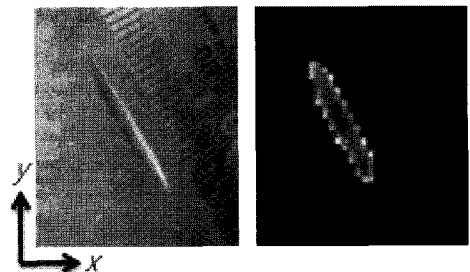
(b) 3D figuration of a vertical shape crack

Fig. 9 A vertical shape crack and its filtered image that shows its longitudinal length

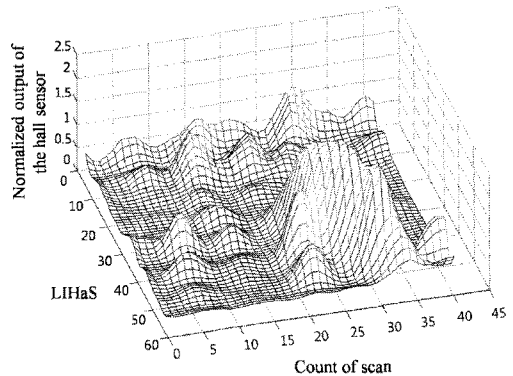
프로 보여준다. 특히 Fig. 7(c)에서 야기된 잡음들이 정리되었다. Fig. 7(a)의 실제 결함 사진과 비교하여도 사실적인 묘사가 되었음을 알 수 있다. 다른 원형 결함의 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 이번 결과 역시 실제 차륜 답면의 사진과 비교하여 직관적으로 형상 추정이 가능한 결과 그래프가 생성되었다. 원형 결함의 경우 잡음 구별력과 형상 묘사가 잘 되는 것을 알 수 있다.

시험편 진행 방향에서 수직으로 긴 형태의 크랙을 Fig. 9에 나타낸다. 2가지의 결함에서 형상 표현 및 결함 지시가 잘 이루어지는 것으로 판단할 수 있다.

또 다른 결함의 한 형태인 시험편 진행 방향에서 대각 방향으로 긴 형태를 Fig. 10에 나타낸다. 이런 형태의 경우도 결함 형상 표현에는 문제가 없어 보인다. 다만 잡음이 다른 형태의 결함 결과와 비교했을 때 큰 것으로 생각된다. 그 이유는 라플라시안 필터의 2방향 성분 벡터가 아닌 대각 방향의 잡음 형태이기 때문이다. 하지만 경계치를 적용할 경우 다른 형태와 마찬가지로 결함만을 분리해 낼 수 있다.



(a) When the threshold is 45% of the maximum value



(b) 3D figuration of an oblique crack

Fig. 10 An oblique crack and its filtered image

## 5. 결론

본 논문에서는 철도 차륜을 시험편으로 LIHaS를 이용하여 데이터를 수집하고, 수집된 데이터를 설계된 라플라시안 필터링과 평활화 필터링으로 결합의 형상을 잡음 데이터 속에서 분리하였다. 실험 결과로 선행된 비교 논문보다 탁월한 결합 지시 및 추정을 위한 형상을 얻어 낼 수 있었다. 특히 충분한 잡음 제거에 의해 결합 판단력을 끌어 올릴 수 있었다. 향후, 더욱 다양한 형태의 결합을 이용하고, 신경망 인식을 통해 결합 형태를 학습시켜 자동화 어플리케이션 구현에 관한 연구를 진행할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업(NIPA-2010-C1090-1021-0013)과 한국연구재단의 지원사업(No. R01-2008-000-20645-0)의 연구결과로 수행되었음.

## 참고문헌

- Hong, G. Y. and Hong, S. B., "Enhancement of the Ultrasonic Image Using the Adaptive Window Log Filter for NDI of Aircraft Composite Materials," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 11, No. 2, pp. 33-42, 2003.
- Hwang, J. S., Lee, J. Y. and Kwon, S. J., "The application of a differential-type Hall sensors array to the nondestructive testing of express train wheels," *International the Independent Journal of Non Destructive Testing and Evaluation*, Vol. 42, No. 1, pp. 34-41, 2009.
- Lee, J. Y., Hwang, J. S., Kwon, S. J. and Seo, J. W., "Inspection of Cracks on the Express Train Wheel Using a High Speed Scan Type Magnetic Camera," *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 32, No. 11, pp. 943-950, 2008.
- Jee, H. S., Lee, J. O. and Kim, J. W., "Leaked magnetic flux distribution analysis of wire rope for elevator," *Mechanical and Material*, Vol. 20, No. 3, pp. 129-138, 2008.
- Grimes, C. A., Dickey, E. C. and Pishko, M. V., "Encyclopedia of Sensors," American Scientific Publishers, pp. 261-282, 2006.
- Joo, G. T., Son, D. L., Han, J. H. and Park, J. H., "The magnetic flux leakage measurement by the hall sensor in the longitudinal magnetic field," *Spring Conference of the Korean Society for Nondestructive Testing*, pp. 373-381, 1998.
- Gonzalez, R. C., "Digital Image Processing," Prentice Hall, pp. 131-137, 2004.
- Hwang, J. S. and Lee, J. Y., "Modeling of a Scan Type Magnetic Camera Image Using the Improved Dipole Model," *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 20, No. 10, pp. 1691-1701, 2006.
- Lee, K. S., Suh, J. H., Min, J. T. and Lee, Y. J., "Development of Real-time Remote Detection System for Crane Wire Rope Defect," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 22, No. 1, pp. 53-60, 2005.