

고속 신호처리 회로에 의한 고속철도 차륜검사

황지성^{*} · 이진이[†] · 권석진^{**}

^{*}조선대학교 일반대학원 정보통신공학과

[†]조선대학교 제어계측로봇공학과

^{**}한국철도기술연구원

Improvement of Signal Processing Circuit for Inspecting Cracks on the Express Train Wheel

Ji-seong Hwang^{*} · Jin-yi Lee[†] · Suk-jin Kwon^{**}

^{*}Department of Information and Communication Engineering, Graduate School of Chosun University

[†]Department of Control and Instrumentation Robot Engineering, Chosun University

^{**}Korea Railroad Research Institute

E-mail : jinyilee@chosun.ac.kr

요 약

고속철도 차륜의 미소결함을 고속·고공간 분해능으로 측정할 수 있는 새로운 비파괴검사법이 요구되고 있다. 본 연구는 종래의 스캔형 자기카메라를 개선하여, 다중증폭회로와 결합표시를 위한 펄스 발생기를 장착한 신호처리회로를 제안한다. 홀센서를 선형으로 배열하고, 배열의 직각방향으로 차륜이 정속으로 회전하게 하면, 차륜의 단면을 검사할 수 있다. 각각의 홀전압을 증폭하고, AD변환기를 통하여 μ -processor에 의하여 시간에 따른 전압차, 즉 $\partial V_H / \partial t$ 를 연산한다. $\partial V_H / \partial t$ 가 결함의 존재를 의미하는 비교치보다 클 때 pulse 신호가 발생하여 결함을 지시한다. 철 시험편을 이용하여 제안된 방법을 검증하였다.

ABSTRACT

A novel nondestructive testing (NDT) system, which is able to detect a crack with high speed and high spatial resolution, is urgently required for inspecting small cracks on express train wheels. This paper proposes an improved signal processing circuits, which uses the multiple amplifying circuits and the crack indicating pulse output system of the previous scan-type magnetic camera. Hall sensors are arrayed linearly, and the wheel is rotated with static speed in the vertical direction to sensor array direction. Each Hall voltages are amplified, converted and immediately operated by using, amplifying circuits, analog-to-digital converters and μ -processor, respectively. The operated results, $\partial V_H / \partial t$, are compared with a standard value, which indicates a crack existence. If the $\partial V_H / \partial t$ is larger than standard value, the pulse signal is output, and indicates the existence of crack. The effectiveness of the novel method was verified by examine using cracks on the wheel specimen model.

키워드

NDT(비파괴검사), High speed(고속), Crack(균열), Wheel(차륜), Train(철도차량), Signal Processing(신호처리)

1. 서 론

1976년에 공사를 시작하여 1991년에 완성, 상용 운행중이던 독일의 ICE의 경우, 1998년 6월 3일 Eschede에서 탈선사고가 일어나, 사망 102명, 약 80명의 중상자를 포함하여 300여명의 인명사고가 발생하였다. 사고의 원인은 시속 200km/h로 고속 운행 중에 발생한 차륜의 파괴로 밝혀졌다. [1] 차륜은 철도 차량의 중량을 지지하고, 레일과의 반복적인 구름접촉을 하며 이동하는 핵심 구조부품이다. 특히, (1) 레일과의 미소 접촉부에서 발생하는 높은 수직 응력, (2) 답면 제동시 제륜자가 접촉하여 발생하는 마찰열에 의한 열응력, (3) 제조과정에서 필수적으로 발생하는 비금속 개재물등의 원인에 의하여 발생하는 차륜의 손상은 고속열차의 주행 안전에 지대한 영향을 미친다. [2] 따라서, 차륜의 상시 비파괴 검사는 매우 중요하며, 상술한 ICE의 경우에도 사고 하루 전에 차륜 답면 균열의 조기식별을 위한 3600km 차륜 검사를 뮌헨에서 실시하였다. 그러나 ICE 차량을 시속 약 1.5km로 이동시켜 레이저에 의한 차륜의 윤곽 및 초음파를 이용한 균열검사를 수행하는 원리의 차륜 답면 균열검사는 실제로는 이루어지지 않았다. 그 이유는 주행수가 적은 차륜의 경우, 표면의 경화에 의하여 초음파의 강도가 약해져 (1) 결함검출능력의 저하의 원인이 되며, 또한 점검 및 정비를 위한 차내 공장의 이용시간이 60분 이내인 경우도 있어 (2) 결함탐상시간의 부족 때문이다. 더욱이 3600km의 검사주기도 전술한 결함탐상시간의 부족 때문에 2500km로부터 변경된 것이다.[1]

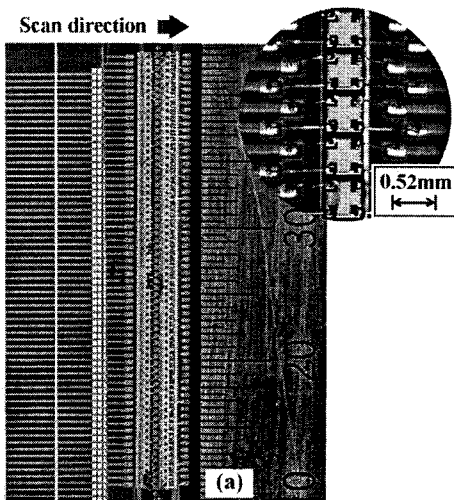


Fig. 1 Linearly integrated 64 InSb Hall sensor array on the NiZn ferrite wafer

따라서 차륜 답면 균열의 조기식별을 위하여 (1) 결함탐상시간의 고속화 및 (2) 재질에 관계없이 결함검출능력을 고도화할 수 있는 시스템의 개발이 강력히 요구되고 있다. 저자들은 상술한 문제를 해결하기 위하여, 웨이퍼상에 선형으로 배열한 홀센서 (LIHaS, linearly integrated Hall sensor array) 및 소형 요크식 전자석(이하 전자석)을 적용한 자기카메라에 있어서, 결함의 존재에 의한 자기장 분포의 변화를 검토하고, 보다 고속으로 탐상할 수 있는 방법을 제시한 바 있다.[3,4]

본 연구에서는 상술한 센서배열로부터 출력되는 신호로부터 결함정보를 추출하여, 결함지시신호를 출력할 수 있는 신호 처리부를 제안한다. 또한, 실제 KTX 차륜을 시속 1~30km/h로 회전시키면서 균열을 탐상함으로써 그 유용성을 확인하였다.

II. 원 리

1. 소형 요크식 전자석 및 LIHaS

Fig. 1은 웨이퍼상에서 0.52mm 간격으로 배열된 64개의 홀센서 배열(LIHaS)[3,9,10]을 나타낸다. LIHaS를 이용하면 보다 고공간분해능의 자기영상을, 센서간 리프트오프의 차이가 없이, 보다 빠른 속도로 취득할 수 있다. Fig. 2(a)는 본 연구에서 사용한 소형 전자석의 개요도이다. LIHaS의 센서배열방향을 y축, 스캔방향을 x축, 시험편 평면의 수직방향을 z축이라 하자. LIHaS의 배면에 전자석을 설치하면, 자극 선단에서 x방향으로 자속이 발생한다.

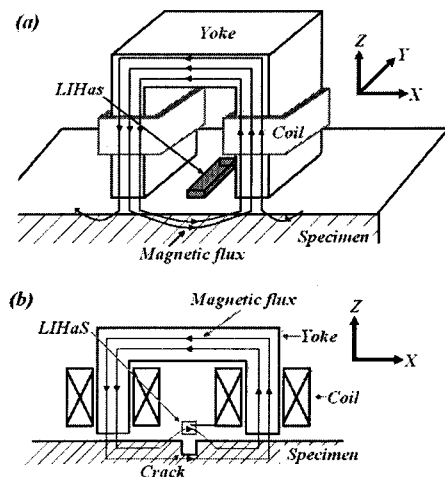


Fig. 2 Small size yoke type electromagnetic coil operated by alternative current

한편, xy-평면상의 강자성체 시험편이 전자석에 접근하면 시험편 표면 방향으로 자속이 집중된다. 이때, 결함의 존재에 의하여 누설자속이 발생(Fig. 2(b))하며, 결함의 길이방향이 자화방향(x방향)과 수직일 때 누설자속은 최대가 된다. 따라서, 이러한 구조에서 시험편이 강자성체일 때에는 결함방향이 LIHaS의 배열방향(y방향)과 근접할수록 결함탐상능력이 우월하다.

한편, 종래의 연구에 의하면, 스캔형 자기카메라에서 $\partial V_H / \partial x$ 분포는 결함 탐상과 평가의 결정적인 수단이 된다. [5-8]

2. 실시간 신호처리장치

Fig. 3는 Fig. 1에서 보인 LIHaS의 홀전압 출력단 이후의 증폭부, AD변환부 및 결함지시부의 개요도를 나타낸다. 지금까지는 시판되는 AD변환기를 이용하여 결함을 탐상하였으나, 신호변환속도 및 스위칭속도, 검출범위 및 분해능, 직접 데이터 액세스(이하 DMA, direct memory access), 임시 저장속도 및 저장량에 있어서 한계점을 가지고 있었다. 따라서, (1) 선형 연구에 의하여 개발된 OP-Amp, 신호증폭배율의 조정 회로, LPF를 표준 장착하여 S/N비를 높이고, (2) 이들 회로들이 각각의 자기센서와 1:1 대응할 수 있도록 하여 각 센서의 S/N비를 높이고, (3) 신호 배선을 간략화하여 외부 잡음의 유입을 최소화하고, (4) 12bit의 분해능으로 자기장의 신호를 디지털 변환하며, (5) 마이크로프로세서에 저장된 각각의 센서로부터의 디지털 신호를 $\partial V_H / \partial x$ 처리하고, (6) $\partial V_H / \partial x$ 값이 일정크기 이상의 결함의 존재를 나타내는 지점값보다 클 경우, 결함지시신호로 출력할 수 있도록 프로그램한 마이크로프로세서를 사용하고,

(7) 결함지시신호를 받아 실시간으로 결함의 유무 및 위치를 지시하는 장치를 개발하였다. 추후, 결함지시신호를 이용하여 결함의 위치에 페인트를 분사하거나, $\partial V_H / \partial x$ 분포의 데이터량을 최대한 압축할 수 있다.

III. 실험 및 고찰

1. 시험편 및 실험장치

LIHaS와 전자석에 의하여 구성되는 검사장치의 유용성을 검증하기 위하여 Fig. 4와 같이 직경 240mm X 두께58.9mm의 고탄소강(S38C) 원반시험편(이하 B-wheel)을 이용하였다. 또한, Fig. 6과 같이 실제 KTX 차륜에 인공결함을 도입(이하 R-wheel)하고, 시속 1~30km/h의 속도가 되도록 회전시키면서 고속 신호처리회로의 유용성을 검증하였다. Fig. 4의 모델 시험편은 방전가공에 의하여, Table 1에 표시한 바와 같이 여러 가지 크기의 인공결함을 도입하였다. 즉, 폭과 깊이가 약 0.5mm이고, 길이가 3, 5, 7, 10mm인 인공결함이 원주방향 및 원주방향과 45도 방향으로 도입하였다. 또한, 각각의 시험편에는 깊이 4mm인 지점에 직경이 3, 5, 7 및 10mm인 관통형 결함을 드릴링하였다. Fig. 5는 Fig. 4의 차륜을 모사한 원반형 시험편상의 표면 결함을 탐상하기 위한 장치이다. 원반형 시험편을 회전하면서, 펄스발생기에 의하여 0.43mm (B-wheel) 이동시마다 펄스를 발생하였다. 이 펄스는 아날로그-디지털 변환기 (ADC)의 변환 트리거로 사용하였다. 이러한 구조에 의하여, 시험편의 회전속도가 일정하지 않더라도 동일한 간격의 자기장 분포를 얻을 수 있다.

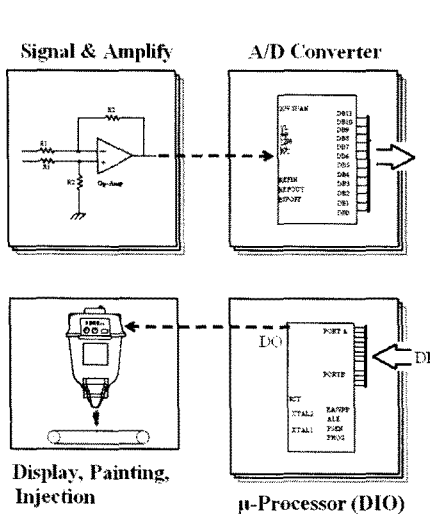


Fig. 3 A block diagram for the signal processing circuits

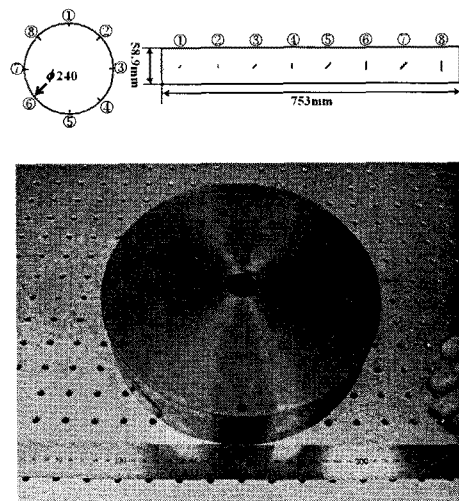


Fig. 4 Model specimen

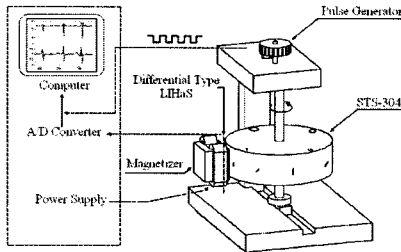


Fig. 5 Experimental equipment for inspecting cracks on the B-wheel

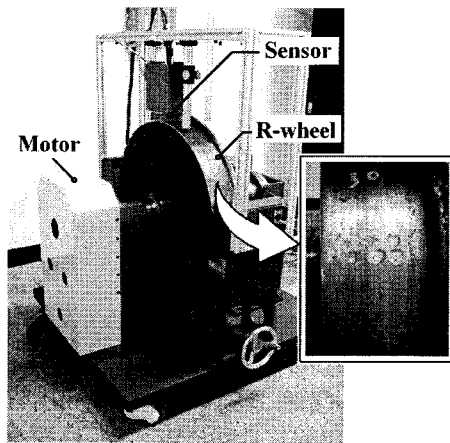


Fig. 6 R-wheel specimen

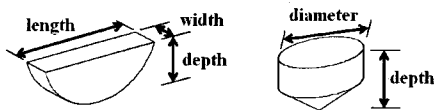


Fig. 7 Crack shape on the R-wheel specimen

또한, Fig. 6의 실제 시험편(R-wheel)은 드릴 및 소잉 머신에 의하여 Fig. 7의 형태로 결함을 도입하였다. Table 2는 휠 시험편에 도입한 결함의 종류 및 크기를 나타낸다. 한편, Fig. 6의 R-wheel 시험편은 등속 회전시킨 후 일정시간 간격으로 데이터를 취득한 후, 직전 데이터로부터 차감함으로써 $\partial V_H / \partial x$ 데이터를 취득하였다. 이때, 회전 속도를 일정하게 하면 ∂x 는 ∂t 로 대체할 수 있다. 따라서 고속 신호처리장치의 경우에는 $\partial V_H / \partial x$ 대신에 $\partial V_H / \partial t$ 를 사용하기로 한다. 또한, 이들 값이 미리 지정한 값($\pm 0.1V$)보다 크면, 1bit의 신호를 출력하여 64×16개의 LED에 의하여 구성되는 디스플레이부에 지시할 수 있도록 하였다. 이때, 횡축 64개의 LED는 각각 64개의 홀센서를 통하여 판별되는 결함지시신호를 출력하게 된다. 또한, 종축 16개의 LED는 shift register에 의하여

입력신호와 동기하여 결함의 유무를 디스플레이 한다.

Table 1 Sizes of each crack on the B-wheel [unit : mm]

No.	depth	width	length	No.	depth	width	length
1	0.53	0.5	3	5	0.57	0.5	7
2	0.54	0.5	3	6	0.59	0.5	7
3	0.52	0.5	5	7	0.51	0.5	10
4	0.52	0.5	5	8	0.55	0.5	10

Table 2 Shapes and sizes of each crack on the real wheel specimen [unit : mm]

No.	Slit shape			Hole shape		
	depth	width	length	No.	depth	diameter
1	1	2.28	20.83	10	1	2
2	0.65	2.03	17.03	11	1.39	3
3	0.4	2.01	19.6	12	1.2	3
4	1.06	2.07	19.77	13	1.34	4
5	0.74	2.26	18.50	14	1.74	5
6	0.47	2.48	17.26	15	1	2
7	1	2.35	19.04	16	1.16	3
8	0.7	1.93	17.70	17	1.45	4
9	0.5	1.87	16.27	18	1.23	5

2. 실험 및 고찰

Fig. 8은 리프트오프 0.2mm에서 B-wheel의 결함을 LIHaS에 의하여 취득한 $\partial V_H / \partial x$ 영상 (a), 결함중심선상의 V_H 분포 (b) 및 $\partial V_H / \partial x$ 분포 (c)를 나타낸다. 전체적으로 모든 영상에서 길이가 3mm 이상인 모든 표면 결함을 각도에 관계없이 탐상할 수 있었다. 이때 $\partial V_H / \partial t$ 를 $\pm 0.01V$ 로 설정하면, 잡음의 영향을 받지 않고, 결함을 지시할 수 있다.

Fig. 9는 회전속도에 따라 B-wheel을 본 연구에서 개발한 실시간 신호처리장치를 통하여 본 No.7 결함의 지시영상을 나타낸다. 영상에서 표시한 바와 같이 0.1~0.3km/h에 상당하는 속도로 B-wheel이 회전할 때, lift-off 1mm에서 Table 1의 모든 결함을 탐상할 수 있었다. 저속(0.1km/h)에 비하여 고속(0.3km/h)의 경우에 결함의 폭이 넓게 보인 것은 잔상 때문인 것으로 추정된다.

이러한 원리를 이용하여, $\partial V_H / \partial t$ 를 0.2294V로 설정하고 R-wheel의 회전속도를 1~30km/h로 하면서 결함을 탐상하였다. 고속 회전시 오실로스코프를 통하여 관찰한 결과 결함은 탐상할 수 있었으나, 육안으로 관찰할 수 없었다. 육안으로 관찰 또는 비디오로 촬영할 수 있었던 디스플레이 영상은 3km/h 이하에 상당하는 회전속도에서 얻어질 수 있었으며, 결함탐상 결과를 Fig. 10에

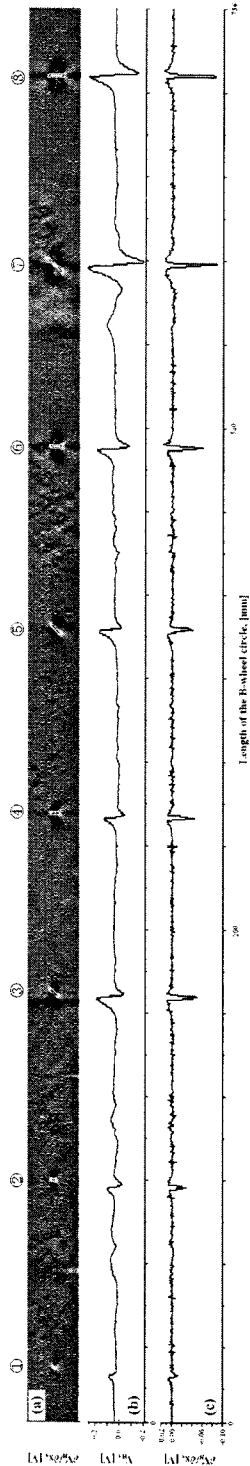
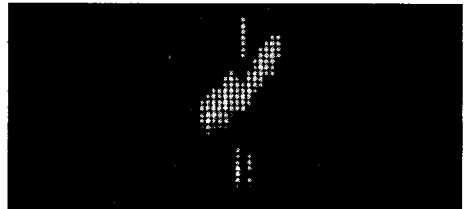


Fig. 8 Experimental results of B-wheel by using the LIHaS: (a) images, (b) section view

나타낸다. R-wheel의 답면형상이 일정하지 않아서 lift-off가 0.84~1.5mm로 균일하지 않았음에도 불구하고, Table 2에 표시한 대부분의 결함을 탐상할 수 있었다.



(a) 0.1km/h, 0.5mm interval, cut-off $\pm 0.2294V$

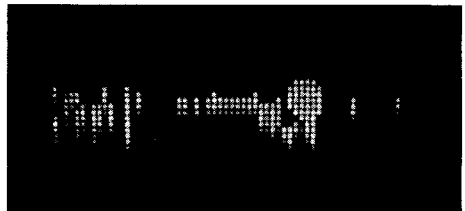


(b) 0.2km/h, 0.5mm interval, cut-off $\pm 0.2294V$



(c) 0.3km/h, 0.5mm interval, cut-off $\pm 0.2294V$

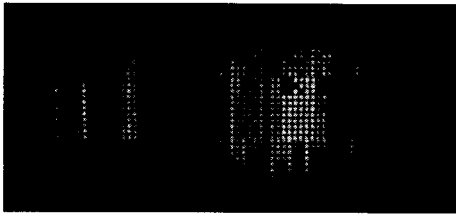
Fig. 9 Detection of No.7 crack of B-wheel by using the LIHaS and developed signal processing circuits on the lift-off of 1mm



(a) 0.5km/h, 2mm interval, cut-off $\pm 0.2294V$



(b) 1km/h, 2mm interval, cut-off $\pm 0.2294V$



(c) 3km/h, 2mm interval, cut-off $\pm 0.2294V$

Fig. 10 Detection of No.15 crack of R-wheel by using the LIHaS and developed signal processing circuits on the lift-off of 0.84~1.5mm

V. 결 론

차륜담면 결함탐상시간의 고속화를 위하여, 웨이퍼상에 선형으로 배열한 LIHaS 및 소형 요크를 적용한 스캔형 자기카메라의 신호처리장치를 제안하였다. $\partial V_H / \partial x$ 분포는 결함 탐상 및 평가를 위한 결정적인 수단이다. 자기센서와 1:1 대응할 수 있도록 증폭기 및 AD변환기를 설치하고, 마이크로프로세서에 일시 저장된 각각의 센서로부터의 디지털 신호를 $\partial V_H / \partial x$ 처리하고, $\partial V_H / \partial x$ 값이 일정크기 이상의 결함의 존재를 나타내는 지정값보다 클 경우, 결함지시신호로 출력할 수 있도록 프로그램한 후, 결함지시신호를 받아 실시간으로 결함의 유무 및 위치를 지시하는 장치를 개발하였다. KTX의 실제 휠이 시속 1~30km/h의 속도로 이동하는 것과 같은 속도로 회전시킨 후, 개발한 고속 신호처리장치에 의하여 결함을 탐상한 결과, 10km/h 이하의 속도에서 2mm의 결함을 탐상할 수 있음을 확인하였다.

후 기

이 연구는 2007년도 정부(건설교통부)의 재원으로 한국철도연구원의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (No. T305C1000003-07C010000316)

참고문헌

[1] Miyamoto, "Investigation of the derailment accident of the express train", Ken-yusha Inc Press, pp. 5, 1995.
 [2] B. Park, K. Kim and H. Kim, "An Evaluation Method of Fatigue Strength and Reliability in a Railway Wheel with an Application of Strength-Stress Interference Model", J Kor Soc Rail, Vol. 5, No. 2, pp. 118, 2002.

[3] J. Hwang, J. Lee, J. Jun, R. Wang, S. Choi and S. Hong, "Scan type magnetic camera images with a high spatial resolution for NDT obtained by using a linea interated hall senosr array", Proceedings of IEEE International Workshop on Imaging Systems and Techniques, pp. 1-6, 2007.

[4] J. Lee, W. Choe, M. Kim, D. Kim, M. Kang, "Magnetic flux density apparatus for, E.G., Detecting an internal crack of a metal or a shape of the metal", US patents 6,683,452 B2., 2004.

[5] J. Lee and J. Hwang, "The Detection Probability Improvement of the Far-side Crack on the High Lift-off Using the magnetic Camera", Int. J. of Mod. Phys. B, Vol. 20 Nos. 25, 26, & 27 pp. 4631-4636, 2006.

[6] J. Lee and J. Hwang, "The QNDE Using Image Processing of the Magnetic Camera", Int. J. of Mod. Phys. B, Vol. 20, Nos. 25, 26, & 27 pp. 4625-4630, 2006.

[7] J. Lee, J. Hwang, S. Choi and J. Lim, "Detection Probability Improvement for Nondestructive Evaluation Using a Magnetic Camera", Key Engineering Materials, Vols 241-246, pp. 306-308, 2006.

[8] S. Choi, J. Hwang, J. Jun, J. Lee and C. Kim, "Improvement of crack detection probability by using magnetic camera and image processing", Key Engineering Materials, Vols. 353-358, pp. 2375-2378, 2007.

[9] J. Jun, J. Hwang, K. Kim, K. Ogawa and J. Lee, "Development of signal processing circuit of a magnetic camera for the NDT of a paramagnetic material", Key Engineering Materials, Vols. 353-358, pp. 2379-2382, 2007.

[10] J. Jun, J. Lee, and D. Park, "NDT of a Nickel Coated Inconel Specimen Using by the Complex Induced Current-Magnetic Flux Leakage Method and Linearly Integrated Hall Sensor Array," J. of KSNT, Vol. 27, pp. 375-382, 2007.