

와전류를 이용한 자동차 변속기 부품의 내부결함 검출기 개발

채용웅*

Development of Internal Defect Detector of Automotive Transmission Parts Using Eddy Current

Yong-Yoong Chai*

요 약

와전류를 이용한 비파괴검사장비가 자동차 변속기 부품의 결함유무를 판단하기 위해 개발되었다. 본 탐상기에서는 부품에서 발생하는 결함을 패턴별로 검사하기 위한 결함 마스터 샘플을 만들고, 결함의 형태별로 탐상 가능한 와전류 탐상기를 제작하여 시험을 하였다. 또한 실제 결함이 있는 불량품을 대상으로 결함발생 원인 및 결함발생 형태를 조사하며, 탐상시험을 통해 결과를 비교 분석하였다. 본 연구에서 개발된 와전류 탐상기는 비전문가도 모니터에 나타난 탐상기 결과로부터 부품의 결함여부를 쉽게 판단할 수 있도록 시스템 소프트웨어를 개발하였다.

ABSTRACT

The non-destructive testing equipment using an eddy current was developed to check for defect in the vehicle transmission component. A defect master sample was made to test all types of defects that occur in the component and also an eddy current detector was manufactured and used to test and detect all kinds of defects. In addition, testing was held against the actual defective items to investigate the cause and type of defects, and a comparative study was conducted based on results from the examination. The software system of the eddy current detector was developed so that even a non-specialist can make assessment of defect in the component from the test results displayed on the monitor.

키워드

Eddy Current, Nondestructive, Electromagnetic Induction, Internal Flaw, Magnetic Field, transmission
와전류, 비파괴, 자기유도, 내부 결함, 자기장, 변속기

1. 서론

비파괴검사는 손상없이 다양한 물질의 특성을 평가하기 위하여 산업체에서 지금까지 많이 사용되어 왔

다. 이와 같은 비파괴검사 방식에는 방사선[1], 펄스정전용력[2], 초음파[3] 등을 이용한 다양한 방식이 알려져 있으나 구리나 알루미늄 같은 도체의 탐상에는 전기장을 이용한 와전류 비파괴검사가 가장 탁월한

* 교신저자: 계명대학교 전자공학전공

· 접수일 : 2019. 04. 05
· 수정완료일 : 2019. 05. 10
· 게재확정일 : 2019. 06. 15

· Received : Apr. 05, 2019, Revised : May. 10, 2019, Accepted : Jun. 15, 2019

· Corresponding Author: Yong-Yoong Chai
· Dept. of Electronic Engineering, Keimyung University
· Email : yychai@kmu.ac.kr

성능을 나타내는 것으로 알려져 왔다[4-8].

와전류와 같은 전기장을 이용하는 방식에서는 전자 기파를 피검사체에 방사하고 되돌아오는 파형으로부터 피검사체 내부의 상황을 예측하도록 설계되어 지며, 와전류를 이용한 내부결합 검출기는 변속기의 표면 결함에 대한 검출 감도가 타 방법보다 우수하여 결합 평가에 유용하게 이용되어져 왔다. 이것은 고온의 조건에서 결합 측정이 가능하며 가는 선, 구멍 내부 등 다른 비파괴 검사로 결합유무를 검사하기 어려운 대상물에도 검사가 가능하며, 결합신호가 전기적 신호로 얻어지기 때문에 전기적 보존 및 재생이 가능하다는 이점이 있다. 와전류 탐상 검사 기술을 제조공정에서 적용하는 경우에, 제품 내의 결함 발생위치, 방향, 각도 및 결함의 패턴 등에 따라서 결함검출 가능 여부가 결정된다.

현재 와전류를 이용한 탐침장비의 국내 시장 현황은 선진국 대비 절반이하 수준으로 비파괴 진단 원천 기술은 선진국에 대한 기술 의존도가 높은 실정이다. 그럼에도 불구하고 국내의 경우, 와전류를 이용한 비파괴검사 장비를 개발하거나 생산하는 기업이 거의 없는 실정이며, 자동차 업계의 경우, 와전류를 이용한 비파괴검사 장비의 대부분은 수입에 의존하고 있는 실정이다.

II. 와전류 탐상기

와전류 탐상기에서는 결함 패턴 분석 및 판정기준치의 도출이 필수적인데, 결함 패턴 별로 검사를 행하기 위해서는, 결함 마스터 샘플을 만들고, 결함의 형태별로 탐상 가능한 타입의 와전류 센서를 설계하고 제작하여 시험을 하여야 한다. 여기에서 실제 결함이 있는 불량품을 대상으로 결함 발생원인 및 결함 발생 형태를 조사하며, 탐상시험을 통해 결과를 비교 분석하고자 한다. 이와 같이 분석된 와전류를 이용한 탐상장비를 이용하여 자동차 변속기부품 내부 결함 크기, 재질변화 등을 동시에 검사 가능한 탐상장비가 개발될 것이다. 이와 같은 탐상장비를 단조품, 가공품 등을 생산하는 자동화 라인에 적용하게 되면 자동화가 가능하게 되어 생산라인에서 생산품에 대한 전수 검사가 가능한 탐상장비로 사용될 것이다.

그림 1은 와전류 탐상장비를 나타낸다. 와전류 탐상기는 시험편의 표면 불연속을 찾기 위해 와전류의 크기가 불연속부에서 최대감도를 얻도록 주파수를 증가시켜야 한다. 이 때 와전류가 시험편 내부로의 침투 깊이는 시험편의 전도성에 따라 변함으로, 전도성이 증가하면 와전류 침투 깊이는 감소된다.

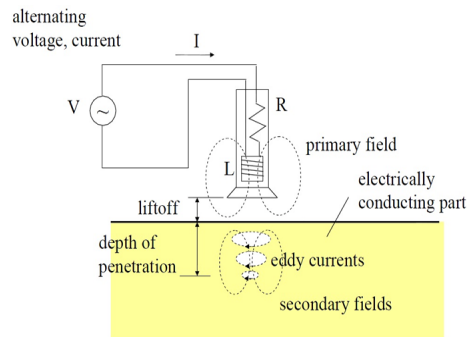


그림 1. 와전류 탐상기 원리
Fig. 1 Principle of eddy current tester

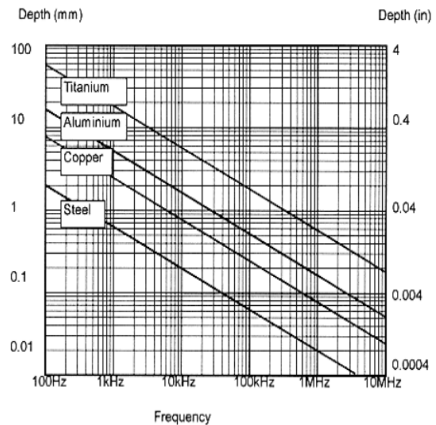


그림 2. 금속의 종류와 주파수에 따른 와전류의 침투 깊이의 변화

Fig. 2 Penetration depth difference according to sort of metal and frequency

전도성이 증가하게 되면 전류의 흐름이 증가하게 되는데 이것은 결국 강한 와전류 자장을 발생시키고, 이 자장은 시험 코일 자장의 반대가 되어 시험편에 침투되는 깊이도 감소되는 것이다. 결론적으로 와전류의 침투 깊이는 전도성 및 주파수가 증가할 때 감소하게 된다. 그림 2는 금속의 종류와 주파수에 따른 와

전류의 침투 깊이의 변화를 나타내고 있다. 그림 2를 보면 앞서 언급한 바와 같이 주파수, 금속재료의 전도성, 투자율이 증가하는 경우에는 와전류의 침투깊이는 감소하는 것을 볼 수 있다. 따라서 와전류 탐상 시에 재료나 결함의 위치에 따라 적절한 주파수의 선택이 필요하다.

III. 와전류탐상기 구성

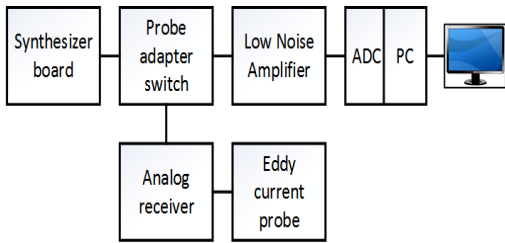


그림 3. 와전류 탐상기 하드웨어 블록도
Fig. 3 Hardware block diagram of eddy current detector

그림 3은 본 연구를 통해 제작한 와전류 탐상기의 블록도를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 와전류 탐상기는 와전류프로브(eddy current probe), 합성보드(synthesizer board), 아날로그수신기(analog receiver), 프로브아답터스위치(probe adapter switch), 저잡음증폭기(low noise amplifier), 입력된 자료를 분석하기 위한 AD변환기를 포함하는 PC 및 분석된 파형을 디스플레이하는 모니터 등으로 구성되어 있다.

이와 같은 구성을 통해 와전류 프로브에서 탐측된 신호는 저잡음증폭기로 입력되어 AD변환기에 의해 디지털 부호화되어 PC로 입력되게 된다. 합성보드에서는 여자신호를 생성하여 프로브에 전달하고, 프로브아답터스위치는 와전류프로브에서 오는 와전류신호를 수신하고 이를 저잡음증폭기로 전달하는 기능 블록이 있으며 PC 내부에 있는 AD변환기는 저잡음증폭기에서 입력된 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하며, PC 내부의 CPU는 앞에서 수신한 신호를 분석하고 이에 따라 시스템을 제어하는 기능을 각각 담당한다[9-10].

와전류탐상시스템 소프트웨어에서 와전류 신호수집

/평가 소프트웨어는 ECT(Eddy Current Testor)포드 제어 소프트웨어 모듈, 신호수집 소프트웨어, 신호 분석/측정 소프트웨어 모듈, 이송제어장치 소프트웨어 모듈, 시스템 운용/관리 소프트웨어 모듈 등으로 구성된다.

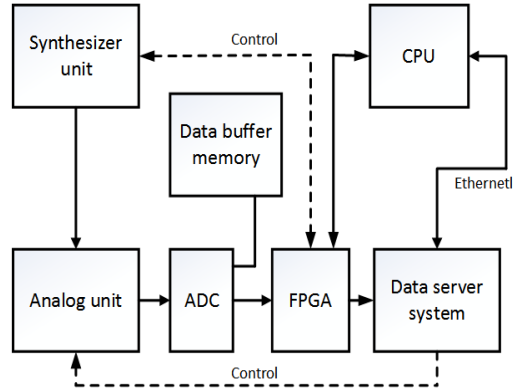


그림 4. 와전류탐상시스템 소프트웨어 블록도
Fig. 4 Software block diagram of eddy current detector

ECT포드는 와전류 탐측자에 와전류 여자신호를 전달하고 수신하는 역할을 하는 아날로그 와전류보드와 아날로그 와전류보드로부터 아날로그 데이터를 수신하여 디지털변환을 수행하는 FPGA보드, 장치의 전체적인 제어와 명령해석, 디지털 데이터의 송수신 기능을 수행하는 운영체제가 작동하는 CPU보드가 하나의 장치형태로 통합되어 동작한다.

ECT포드는 이더넷을 통해 서버와 연결되며, 서버에서 작동하는 신호수집/평가 소프트웨어는 ECT포드와 정해진 프로토콜을 통해 데이터와 제어신호를 주고받아 와전류 검사신호를 수집한다.

수집된 와전류 검사신호는 서버(혹은 별도의 데이터 저장장치)에 저장되고, 저장된 데이터는 신호수집/평가 소프트웨어의 분석/평가 모듈에 의해 평가를 수행할 수 있다. 그림 4는 이와 같은 와전류 신호수집/평가 소프트웨어 구성도를 나타낸다.

IV. 탐상기 결과

그림 5는 시험편에 하나의 결함을 SAM으로 촬영한 영상을 나타낸 것이다.

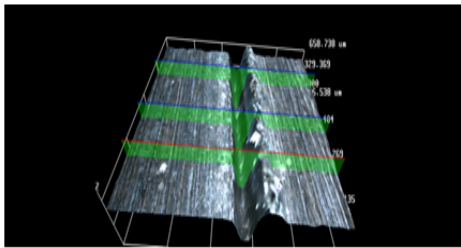


그림 5. SAM으로 촬영된 결함
Fig. 5 Defect photograph by SAM

제품의 시험은 시험대상제품을 알루미늄 지그 위에 고정하여 회전시키면서 특수 전용 자기포화프로브로 시험하였다. 이 때 시험조건은 표 1과 같다.

표 1. 시험조건
Table 1. Testing condition

item	value	unit
Coil Mode	Impedance	
Drive Voltage	12.0	V

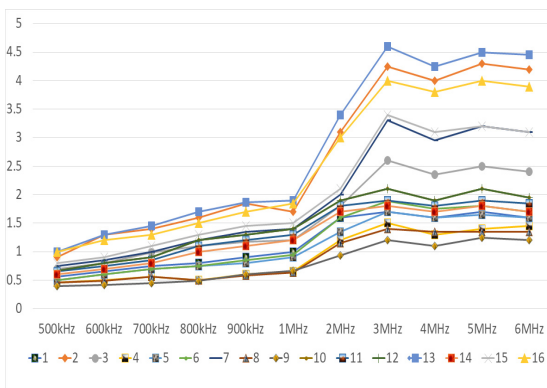


그림 6. 결함별 주파수 특성
Fig. 6 Frequency characteristics according to defects

와전류 탐상기는 시험편의 표면 불연속을 찾기 위해서 와전류의 크기가 불연속부에서 최대감도를 얻을 수 있는 특정 주파수를 찾아야 한다. 그림 6은 다수개의 자체제작 워크의 결함별 주파수 특성을 실측한 결과를 나타내는데, 그림에서 보는 바와 같이 주파수가 3MHz에서 4.5로 가장 높은 감도가 나오는 것을 볼 수 있다.

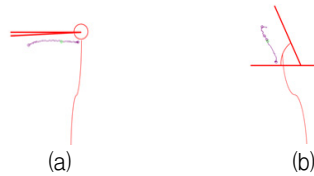


그림 7. (a) 정상적인 시험편에서 디스플레이 되는 화면 (b) 결함이 있는 경우에 디스플레이 되는 화면
Fig. 7 (a) Display on normal specimen (b) display on abnormal specimen

이와 같은 시험편을 이용하여 탐상기를 실험한 결과가 그림 7에 나타나 있다. 그림 7의 (a)는 정상적인 시험편에서 디스플레이 되는 화면이며 (b)는 시험편에 결함이 있는 경우에 디스플레이되는 화면을 나타낸다.

일반적인 ECT 신호에서 결함부위를 판정할 때는 신호의 세기 (V_{pp} :Voltage Peak to Peak) 와 신호의 위상각 변화 형태(Angle)로부터 이상 유무를 판단한다. 이를 위해 정확한 표준 시험편을 먼저 계측한 후, 결함 시험편에 대해 결함의 크기별로 감도를 조정하여 기준을 설정하면 정확하게 결함 확인이 가능하다. 그림 7은 ECT 프로브가 정상위치와 결함위치를 지나갈 때의 ECT 신호형태를 이해하기 쉽게 나타낸 그림이다.

그림 7과 같이 센서가 정상 부분의 위치를 지나갈 때는 신호가 좌, 우로 움직이면서 기준 각도가 180° 및 360° 에 근접하는 위상으로 나타나며, 결함 위치를 지나갈 때는 신호가 상, 하로 변동되어 움직이면서 기준 각도가 약 $30^\circ \sim 150^\circ$ 혹은 $210^\circ \sim 330^\circ$ 로 형성된다. 따라서 모니터에 디스플레이 되는 이미지를 통해서 시험편에 결함 유무를 판단할 수 있다. 이와 같은 모니터 디스플레이 방식은 기존 탐상기의 문제점으로 지적되어 왔던 탐상기 결과를 비전문가가 해독하는데 있어서의 어려움을 해소하는 방안이 될 것이다.

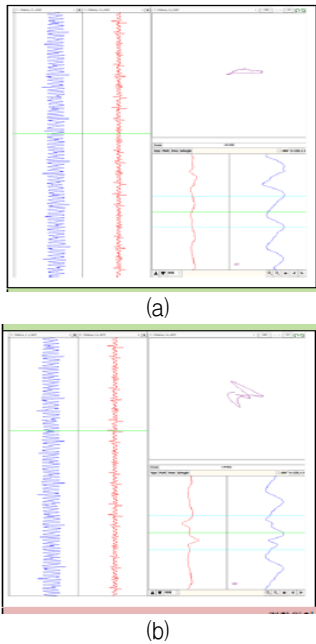


그림 8. (a) 정상신호 파형 (b) 결함신호 파형
Fig. 8 (a) Signal on normal specimen (b) signal on abnormal specimen

그림 8은 제작 완료된 와전류 탐상기의 모니터에 나타난 결함이 없는 경우의 파형(a)과 결함이 있는 경우의 파형(b)를 나타낸다. 그림 9는 알루미늄 지그 위에 변속기 부품을 고정하고 프로브를 회전시키면서 와전류 탐상을 하는 모습을 보여주고 있다.

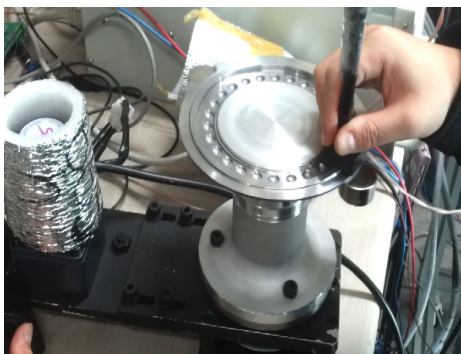
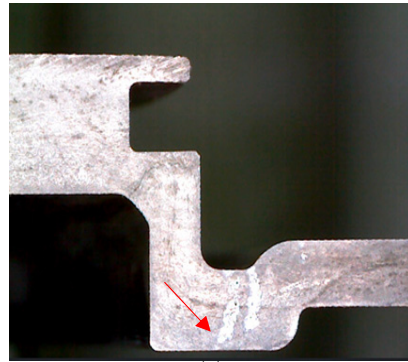
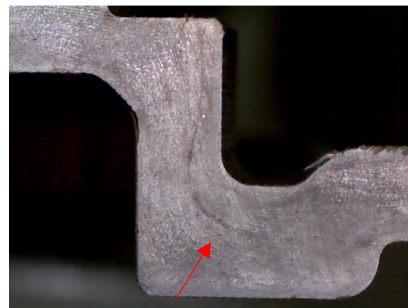


그림 9. 와전류 탐상기를 이용한 탐상현장
Fig. 9 Testing scene with eddy current tester



(a)



(b)

그림 10. (a) 변속기의 옆모습 (a) 결함이 있음 (b) 결함은 없으나 metal flow가 있음
Fig. 10 (a) Side view of transmission (a) with defects (b) without defects but with metal flow

그림 10은 자동차 변속기에서 결함이 있는 경우와 결함은 없으나 metal flow가 있는 경우의 상황을 보여주고 있다. 이러한 미세한 결함의 경우에도 와전류 탐상기가 정상적인 동작을 하는 것이 확인되었다.

V. 결 론

본 논문을 통해 자동차 부품의 용접부에 대한 결함을 찾아내기 위해 와전류 탐상기를 개발하였다. 본 연구를 통해 효과적인 전기장 교란을 통한 결함 검출 기술 확보할 수 있었으며 주파수 제어를 통한 다양한 깊이의 결함 검출 기술 확보할 수 있었다. 또한 결함 검사 크기 또는 국부 검사 가능 기술 및 재질 시험, 두께 측정, 치수 측정 등에 응용 가능 기술 확보할 수 있었다. 마지막으로 비전문가도 측정 결과로부터 이상

유무를 판단 가능하도록 하는 사용자 친화적 프로그램을 개발하였다.

향후에는 metal flow 현상에 대응하기 위한 데이터 베이스를 확보하여 탐상오류를 개선하게 된다면 개발된 와진류 탐상장비는 변속기 부품라인에서의 자동화 생산라인에서 결함검사 장비로서의 역할을 원활히 수행할 수 있게 될 것이다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 화성장학문화재단의 연구비 지원을 받아 수행된 연구사업입니다.

References

[1] K. Kim, "Detection of Flaws in Ceramic Materials Using Non-Destructive Testing," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 5, no. 3, June 2010, pp. 321-326.

[2] B. Whang, "The Measurement System of Space Charge Distribution in Polymer Dielectric Materials by the PEA Method," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 7, no. 6, Dec. 2012, pp. 1403-1411.

[3] Y. Jung, "Development of 3D Petroglyph VR Contents based on Gesture Recognition," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 9, no. 1, Jan. 2014, pp.25-31.

[4] L. Janousek, K. Capova, N. Yusa, and K. Miya, "Multiprobe inspection for enhancing sizing ability in eddy current nondestructive testing," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 44, no. 6, 2008, pp.1618 - 1621.

[5] H. Hashizume, Y. Yamada, K. Miya, S. Toda, K. Morimoto, Y. Araki, K. Satake, and N. Shimizu, "Numerical and experimental analysis of eddy current testing for a tube with cracks," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 28, no. 2, 1992, pp. 1469-1472.

[6] S. Yang, Y. Sun, L. Upda, S. Upda, and W. Lord, "3d simulation of velocity induced fields for nondestructive evaluation application," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 35, no. 3, May 1999, pp. 1754 - 1756.

[7] C. Stott, P. Underhill, and T. Krause, "Pulsed eddy current detection of cracks in multilayer aluminum lap joints," *IEEE Sensors J.*, vol. 15, no. 2, Feb. 2015, pp. 956-962.

[8] A. Ribeiro and H. Ramos, "Inductive probe for flaw detection in non-magnetic metallic plates using eddy currents," *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, Victoria, Canada, 2008, pp. 1447 - 1451.

[9] S. Kim, K. Lee, S. Yeo, S. Hong, and Y. Park, "Implementation of Successive Approximate Register typed A/D Converter for a Monitored Battery Voltage Conversion," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 6, no. 2, May 2011, pp. 256-261.

[10] Y. Chai, "Development of OPAMP in an A/D Converter for Pressure Measurement" *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 5, no. 4, Aug. 2010, pp. 435-442.

저자소개



채용웅(Yong-Yoong Chai)

1985년 8월 서강대학교 졸업 (공학사)
 1991년 4월 Oklahoma State Univ. 졸업(공학석사)
 1994년 12월 Oklahoma State Univ. 졸업 (공학박사)
 계명대학교 전자공학전공 교수
 ※ 주 관심분야 : DC-DC컨버터