

다중채널 와전류탐상검사 장치 개발(I)

Development of a Multichannel Eddy Current Testing Instrument(I)

이희종*[†], 남민우*, 조찬희*, 윤병식*, 조현준**

Hee-Jong Lee*[†], Min-Woo Nam*, Chan-Hee Cho*, Byung-Sik Yoon* and Hyun-Joon Cho**

초 록 전자기유도(electromagnetic induction) 현상을 이용한 비파괴진단기법으로 최근까지 와전류탐상기법, 교류장측정기법, 자속누설검사기법, 그리고 원격장검사기법 등이 개발되어 활용되고 있다. 이 기법중 와전류탐상기법은 오늘날 발전설비, 화학, 조선 및 군수설비 등의 열교환기 전열관 비파괴검사에 널리 적용되고 있다. 와전류탐상검사 시스템의 구성은 기능별로 와전류신호 합성 모듈, 아날로그 모듈, 디지털 신호처리를 위한 아날로그-디지털 변환 모듈, 전원공급장치 및 신호취득·평가 프로그램 등으로 구성되며, 본 연구에서는 다중채널방식의 와전류탐상검사 장치(하드웨어) 개발에 필요한 구성 요소중 1차적으로 와전류신호 합성 모듈, 아날로그 모듈을 설계·개발하였다. 본 연구에서 개발한 와전류탐상검사 장치의 특징은 주파수영역 및 시간영역 다중화 방식에 의한 최대 4개 주파수의 동시 적용이 가능한 다중채널장치이다. 와전류신호 합성 모듈, 아날로그 모듈을 구성하는 각 회로에서 와전류신호 발생, 변조, 전처리, 변조 및 신호 디스플레이를 위한 신호가 적절하게 처리되어 최종적으로 와전류신호 평가에 필수적인 리사쥬신호가 임피던스 평면 내에 디스플레이 되는 것을 확인하였다.

주요용어: 와전류탐상검사, 다중채널, 주파수영역 다중화, 시간영역 다중화, 다중주파수 장치

Abstract Recently, the electromagnetic techniques of the eddy current testing(ECT), alternating current field testing, magnetic flux leakage testing and remote field testing have been used as a nondestructive evaluation method based on the electromagnetic induction. The eddy current testing is now widely accepted as a NDE method for the heat exchanger tube in the electric power industry, chemical, shipbuilding, and military. The ECT system mainly consists of the synthesizer module, analog module, analog-to-digital converter, power supplier, and data acquisition and analysis program. In this study, the synthesizer module and the analog module which are essential to the ECT system were primarily developed. The developed ECT system is basically a multifrequency type which is able to inject the maximum four frequencies based on the frequency and time domain multiplexing method. Conclusively, we confirmed that the EC signal was processed appropriately in each circuit modules, and the Lissajous EC signal was displayed in the impedance plane.

Keywords: Eddy Current Testing, Multichannel, Frequency Domain Multiplexing, Time Domain Multiplexing, Multifrequency Instrument

1. 서 론

현재 산업 현장에서 사용되는 비파괴검사기법 중 전자기검사법(electromagnetic testing)은 와전

류탐상검사기법, 교류장측정기법, 자속누설검사기법 및 원격장검사기법 등이 개발되어 적용되고 있다[1]. 이들 기법은 각각의 특성에 맞는 적용분야를 가지며 기법 간에 서로 구분되는 장점을 가지

고 있다. 각 기법에 사용되는 검사장치의 기본개념은 전자기유도현상에 기초한다. 와전류탐상검사 장치의 목적은 여자전류로 와전류탐촉자 코일을 구동하고, 검사대상체에 대한 정보를 얻기 위해 탐촉자 코일에 의해 변조된 신호를 분석하는 것이다. 와전류탐상검사는 금속의 열처리 정도를 판단하는 것에서부터 원자력발전소 증기발생기 전열관 검사까지 산업체에 중요한 NDE기술로 널리 적용되고 있다[2]. 일반적으로 사용되는 검사주파수 범위는 자성체검사를 위한 수 헤르츠부터 얇은 티타늄 검사를 위한 수 메가헤르츠까지 다양하다. 열교환기 튜브 검사시 튜브 내외부 결함, 구조물, 기하학적 형상과 같은 여러 조건의 분석을 위해서 보편적으로 다중주파수가 사용된다[3]. 본 연구에서는 다중채널방식의 와전류탐상검사 장치 개발을 위한 와전류신호 합성모듈(digital synthesizer module), 변조모듈(modulation module), 복조모듈(demodulation module) 등을 설계하였으며 시험을 통해 각 모듈에서 신호처리가 적절하게 이루어지는 것을 확인하였다.

2. 이론적 배경

2.1. 다중주파수(Multifrequency) 방식

다중주파수 와전류탐상장치의 형태에는 시간영역 다중화(time domain multiplexing)방식과 주파수영역다중화(frequency domain multiplexing)방식의 두 가지가 있다[1].

시간영역 다중화방식은 한 순간에 오직 하나의 주파수만 운전되며, 시간에 따라 일정하게 변하는 주파수 조합으로 전환시키며 사용할 수 있기 때문에 상대적으로 신호대잡음비를 향상시킬 수 있다 [Fig. 1(a)]. 주파수영역 다중화방식은 여러 주파수가 동시에 탐촉자 코일에 가하므로 “동시주입(simultaneous injection)”이라고도 부른다[Fig. 1 (b)]. 탐촉자에서 변조되어 되돌아오는 주파수는 대역필터를 사용하여 분리되며, 상대적으로 신호왜곡이 발생하는 단점이 있다. 여러 주파수가 하나의 탐촉자에 가해지므로 잡음 진폭이 수 배가 될 수가 있으며 주파수를 두 배로 증가시키면 잡음도 두 배로 증대된다. 그러나 이 방식은 시간 슬롯(time slot)사이에서 스위칭 과도현상이 없기 때문에 고인덕턴스 코일의 링잉이 생기지 않고, 따라서 원격장검

사와 같은 저주파수 환경에서 유리하다. 주파수 분리는 복조필터를 사용해 구현되며, 시간영역 다중통신방식 장치보다 더 고속으로 검사할 수 있다. 본 연구에서는 주파수영역 다중화방식의 와전류탐상검사장치 개발을 목표로 하였다.

2.2. ECT 장치 구성

와전류탐상검사 시스템을 구성하는 신호처리 및 수신 장치는 Fig. 2와 같이 여자(excitation), 변조(modulation), 신호 준비(signal preparation), 복조(demodulation), 평가 및 디스플레이의 5가지 주요 모듈로 구성된다[1].

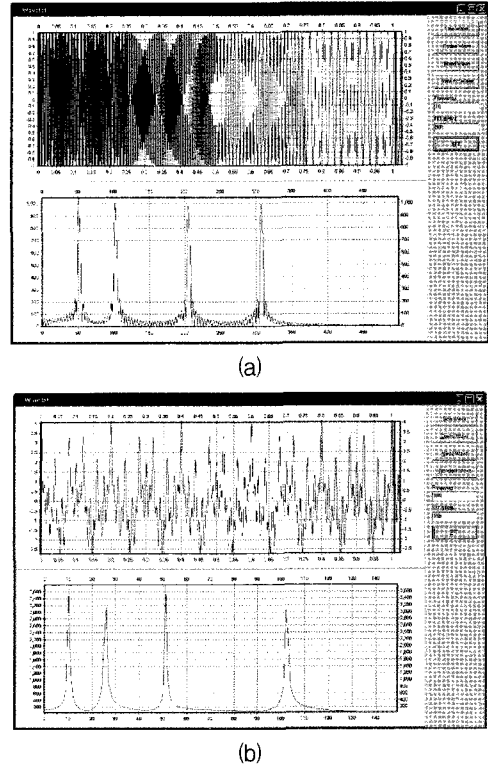


Fig. 1 Frequency multiplexing modes of ECT device: (a) Time domain multiplexing signal, (b) Frequency domain multiplexing signal

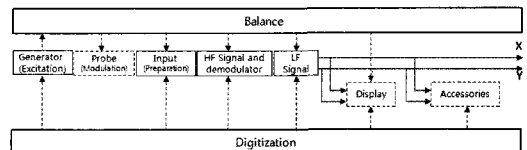


Fig. 2 Functional block diagram of an eddy current instrument

3. 와전류장치 설계

3.1. 여자(Excitation) 회로

와전류탐상검사 장치의 여자파트는 탐촉자를 구동하기 위한 신호발생기 및 증폭기로 구성된다. 신호발생기는 시험 코일에 사인파를 인가한다. 여자파트는 주파수의 정확도와 안정성이 우수하고 와전류신호의 왜곡이 작도록 설계하는 것이 중요한데, 장치가 보다 신뢰도 높은 검사를 수행할 수 있도록 해주기 때문이다. 사인/코사인파를 생성하기 위해 주파수합성기(direct digital synthesizer, DDS)를 사용한다. 이 합성기는 디지털 프로그래밍이 가능한 주파수합성기로서 클럭 발생 기능을 가지며, 정확한 클럭원이 제공될 경우 주파수/위상의 프로그래밍이 가능한 아날로그 사인파 출력을 생성한다.

본 연구에서 개발한 와전류 장치는 Fig. 3에서와 같은 총 9개의 DDS를 사용하여 사인/코사인파를 생성하는데 이중 8개는 탐촉자 코일을 구동하기 위한 신호를 생성하고 나머지 하나는 샘플 클럭을 생성한다. 즉 두 개의 DDS가 한 쌍의 사인/코사인파를 생성하므로 총 네 쌍의 주파수가 발생하게 된다. 한 쌍의 주파수 대역폭은 0.1 Hz ~ 20 MHz이며 출력 해상도는 참조 클럭 주파수 40 MHz에서 0.0093 Hz이다. 탐촉자 코일 구동전압신호의 연속 및 주파수영역 모드의 구현을 위해 가산증폭기(summing amp) 회로를 구성하고, 다중주파수송신 모드 구현을 위해 아날로그 스위칭 회로를 추가하였다. 2개의 아날로그 리시버 보드를 구동할 수 있는 탐촉자 코일 형태 선택 회로와 탐촉자 구동기 버퍼회로를 설계하였다. Fig. 3에 개발한 DDS 회로의 개략도를 나타내었다.

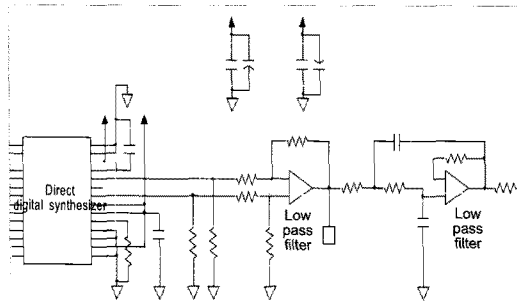


Fig. 3 Sine/cosine wave generation circuit design of the developed ECT device

3.2. 변조(Modulation) 회로

주파수 합성기로 생성된 여자신호(driving signal)에 의해 여자된 와전류 탐촉자의 주위로 전자기장이 발생되고, 전자기장 안의 결함이나 물성변화는 전자기장의 변화를 야기해 결과적으로 와전류 탐촉자의 코일에 본래의 여자신호에서 변조된 와전류신호를 생성시킨다. 본 연구에서 개발한 와전류탐상검사장치가 동시에 발생시킬 수 있는 주파수는 4개이다. 주파수영역 다중화방식으로 하나 채널을 통해 탐촉자에 다중 주파수를 인가하기 때문에 모든 주파수가 장치의 동적범위를 공유하고, 탐촉자의 전체 구동력이 각 주파수로 분배되는 단점이 있다.

Fig. 4에 와전류신호 변조회로를 보였다. 아날로그 스위치와 필터 및 동상제거를 위한 video OP amp.와 주변부품들로 구성되며 Fig. 4(a)의 좌측 입력단에 차동형 탐촉자 코일이 연결된다. Fig. 4(b)에 탐촉자 코일의 연결 및 배치를 위한 커넥터 핀 배열을 나타내었다.

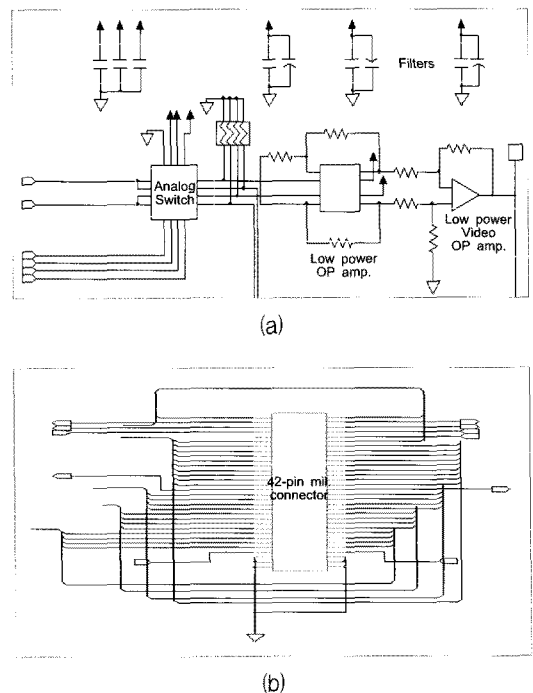


Fig. 4 Modulation circuit design of the developed ECT device: (a) Modulation and probe connection circuit design for signal modulation, (b) Probe connection circuit design for signal modulation

3.3. 복조(Demodulation) 회로

와전류 탐측자에 생성된 캐리어(carrier) 신호는 여자를 위해 입력시킨 여자신호와 피검체의 물성변화나 결합에 의해 생성된 신호의 합성신호이다. 따라서 이 캐리어 신호에서 여자를 위해 입력해준 여자신호성분을 제외하면 결합이나 물성변화에 의해 발생한 신호성분만이 남게 되는데 이 과정을 수행하는 것을 복조(demodulation)라고 한다. 본 연구에서 개발한 아날로그 보드 회로는 탐측자 코일에서 생성된 신호를 수신하는 역할을 수행하는 회로로서 주파수합성회로와 함께 쌍으로 구성된다. 아날로그보드 회로 구성은 차동 전치증폭기를 통한 1차 신호증폭기 및 노이즈를 제거하기 위한 전방증폭기/스위치, 직류 영점조정이 가능한 평형회로, 수신된 신호를 진폭전압(X축)과 위상각(Y축) 성분으로 구분하기 위한 복조기, 2차 노이즈의 제거를 위한 고정주파수 필터/조정가능 필터, 고정 게인/프로그램 가능 게인, 아날로그-디지털 변환기로 구성되어 있다. Fig. 5에 와전류신호 복조회로를 나타내었으며, 다중 분배기 및 필터로 구성된다. 변조회로 출력단으로부터 입력되는 임피던스 신호의 실수 및 허수부 성분을 분리하여 리사쥬신호를 나타내기 위한 모듈이다.

3.3.1. 신호 전처리(Signal Preparation)

신호가 변조된 다음 복조 및 분석을 위해 전처리하는 단계이다. 이 과정에서 탐측자 신호가 증폭되고 잡음이 최소화된다. 탐측자에서 와전류신호 수준은 보통 수십 마이크로볼트로서 매우 미소하므로 게인증폭기에서 분해가 가능한 수준으로 증폭된다.

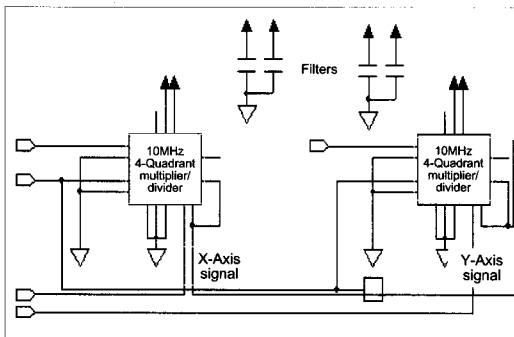


Fig. 5 Demodulation circuit design of the developed ECT device

이때 제거되는 잡음은 탐측자 내의 외부 전자기 간섭, 열적 변화와 잔류 캐리어 신호 등이다. 전자기 간섭과 열적변화는 이와 같은 잡음을 차단하는 차동입력에 의해 최소화된다. 캐리어신호에 수반된 노이즈가 최소화되도록 전치증폭기의 입력을 차동 방식으로 구현하여 임피던스의 평형을 이루면서 증폭기가 최대 공통모드 잡음을 제거하도록 하였다. 와전류 임피던스 평형장치는 평형코일, 조정이 가능한 평형 임피던스 또는 조정이 가능한 브리지 평형으로 구성하였다.

3.3.2. 신호 복조(Signal Demodulation)

복조회로에서는 탐측자 코일에서 생성된 캐리어 신호로부터 시험체에 대한 정보를 추출한다. 탐측자에서 변조가 발생한 캐리어신호를 전방의 차동증폭기와 평형회로를 거쳐 저항성분(X축)과 리액턴스(Y축)성분으로 분류하여 리사쥬(Lissajous)신호로 나타낸다. 탐측자 신호는 구동 파형과 동일 위상의 참조신호와 90°위상 차이가 나는 참조신호에 의해 구동 파형의 복조가 이루어진다. 신호의 동일 및 비동일 위상 성분은 필터링되고 신호 파형을 나타내는 위상자의 수평 및 수직성분만을 추출함으로써 여자신호를 소거시킨다. 최근의 장비는 입력신호를 처리하여 위상자(phasor)의 위상과 진폭 또는 실수 및 허수 성분으로 나타낸다. 위상자를 나타내는 복소수 평면을 임피던스평면이라 부르며, 임피던스평면은 임피던스 탐측자, 반사(구동 픽업 또는 송수신) 탐측자 또는 원격장 등의 와전류탐상검사 데이터를 나타내기 위해 일반적으로 이용된다. 저항성분(X축)과 리액턴스 성분(Y축)은 각각 하나의 스트립 데이터 형태로 얻어지고, 보통 이 두 스트립 데이터를 각각 수직방향으로 매핑한다. 이렇게 하면, 탐측자의 리프트오프신호가 디스플레이의 수평 방향에 오프셋된 형태로 보이기 때문에, 검사자는 수월하게 수평 방향의 리프트오프신호를 무시할 수 있다.

3.3.3. 임피던스 평형회로(Impedance Balancing)

임피던스 평형회로는 탐측자 코일의 임피던스 평형을 조정(null out)하여 최적의 신호로 만들어 준다. 본 연구에서는 과거에 평형회로에 사용된 코일성분, 저항, 인덕터를 이용한 수동적 방식이 아닌 고도로 개선된 IC 칩(디지털-아날로그 변환기)을 사용

하여 오늘날의 디지털 시스템에 적합한 평형 및 캐리어신호 소거회로를 구현하였다. Fig. 6에 임피던스 평형회로를 나타내었는데, 12-bit 디지털-아날로그 변환기(digital-to-analog converter, DAC), 연산 증폭기 및 필터로 구성된다. Fig. 7에 복조회로에서 출력되는 와전류신호의 잡음제거를 위한 필터회로를 나타내었으며, 가변 필터에 의해 잡음이 제거된 최적의 신호가 얻어진다. Fig. 8은 와전류신호의 증폭량을 조정하여 평가에 최적화된 수준으로 처리하기 위한 회로이다. 12-bit 디지털-아날로그 변환기, 연산증폭기 및 필터로 구성된다.

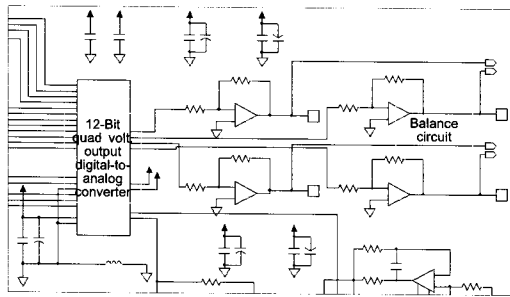


Fig. 6 Impedance balancing circuit design of the developed ECT device

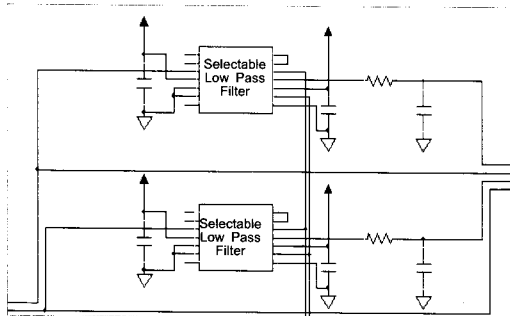


Fig. 7 Adjustable filtering circuit design of the developed ECT device

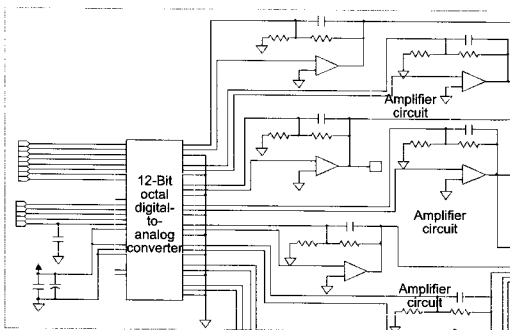


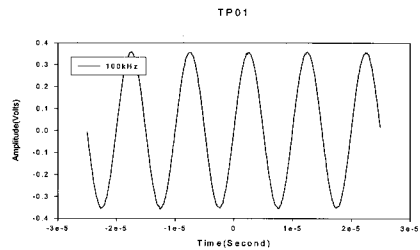
Fig. 8 Adjustable gain circuit design of the developed ECT device

4. 와전류탐상검사 장치 성능시험

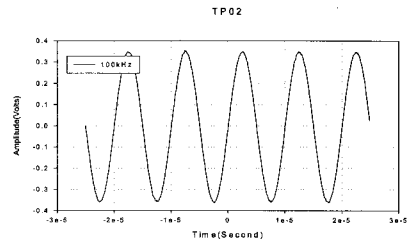
제작된 와전류탐상검사 신호 발생·수신 모듈의 기능시험을 수행하였으며, 각 모듈별로 신호처리 기능을 확인하였다. 이를 위해 보빈 탐촉자를 와전류탐상검사 장치의 신호발생·수신 모듈에 연결하고 ASME 교정시험편에 가공된 인공결함에 대해 신호를 취득하였다. 와전류탐상검사 장치의 신호발생·수신 모듈을 구성하는 와전류 주파수합성, 변조, 복조 회로 모듈의 각 출력단에서 와전류 신호 처리가 적절하게 처리되어 최종적으로 리사쥬신호가 출력되는 것을 확인하였다.

4.1. 주파수 합성(Frequency Synthesizer)회로 신호

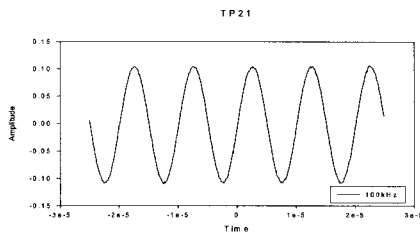
직접 디지털 주파수합성회로의 출력단 신호로서 Fig. 9(a), (b)와 같은 100 kHz의 사인/코사인파가



(a)



(b)



(c)

Fig. 9 DDS output and reference signals: (a) DDS output signal(100 kHz cosine wave), (b) DDS output signal(100 kHz sine wave), (c) DDS F1 sine reference signal

생성되는 것을 확인하였으며, Fig. 9(c)의 참조 사인파는 신호 복조를 위한 참조신호로 입력된다. 본 연구에서 개발한 와전류탐상검사 장치는 4개 주파수를 동시에 발생시킬 수 있으며 이 실험을 위해 100 kHz (F1), 200 kHz(F2), 300 kHz(F3), 400 kHz (F4) 주파수를 시험주파수로 적용하였다. 탐촉자 구동신호를 증폭하기 위해 DAC 증폭기에서 출력되는 F1+F2 및 F3+F4 사인파 가산신호를 확인하였으며[Fig. 10(a), (b)], 또한 탐촉자 구동신호를 증폭하기 위해 DAC 증폭기에서 출력되는 F1+F2+F3+F4 사인파 가산신호를 확인하였다[Fig. 10(c)].

4.2. 변조(Modulation), 복조(Demodulation) 및 임피던스 평형(Balancing)회로 신호

탐촉자 코일 입력단에 입력되는 탐촉자의 차동 및 절대형 신호 파형을 확인하였다[Fig. 11(a), (b)]. Fig. 12(a), (b) 신호는 리사주신호 X-축 및 Y-축 성분의 원점보정을 위한 평형 DC 신호이다.

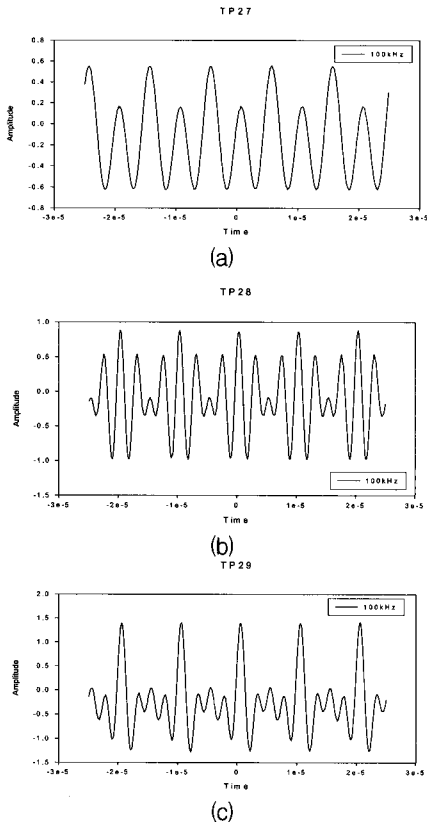


Fig. 10 Summing signals at DAC output: (a) F1+F2 sum sine signal, (b) F3+F4 sine sum signal, (c) F1+F2+F3+F4 sum sine signal

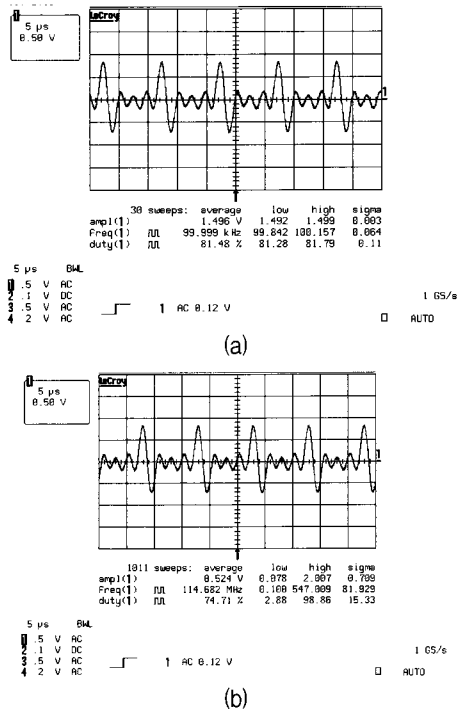


Fig. 11 Differential and absolute signals at coil input: (a) Differential input signal, (b) Absolute input signal

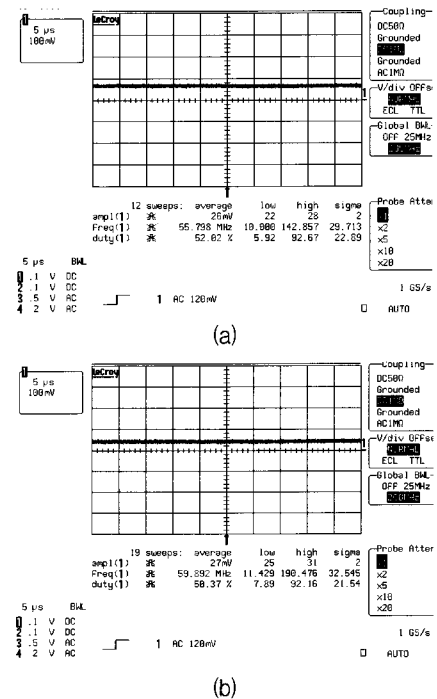


Fig. 12 DC signals for balancing of Lissajous signal components: (a) DC signal for balancing of Lissajous X axis, (b) DC signal for balancing of Lissajous Y axis

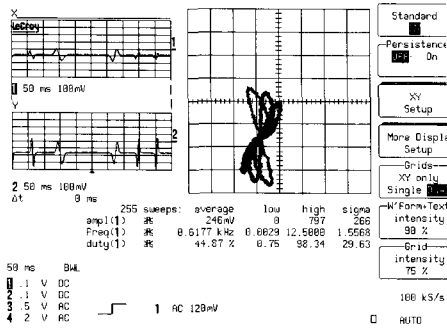


Fig. 13 X-Y strip chart and Lissajous signal

Fig. 13 신호는 100 kHz의 임피던스의 X(실수부)/Y(허수부)축의 스트립 차트이며, 오른쪽 신호는 두 성분을 합성한 리사쥬 신호이다.

5. 결론

본 연구에서는 와전류탐상검사 시스템 개발을 위한 와전류탐상검사 신호 발생 및 처리 요소기술을 개발하였다. 이 요소기술을 활용하여 와전류탐상검사 시스템을 구성하기 위한 필수 모듈인 와전류신호 합성모듈(synthesizer), 변조모듈(modulation), 복조모듈(demodulation) 등을 설계·개발하였다. 와전류 신호발생장치의 성능시험을 위해 ASME 교정 시험편을 사용하였으며, 와전류탐상검사 장치를 구성하는 각 모듈의 출력 신호를 확인하였다.

각 모듈의 출력신호를 확인한 결과 4개 주파수의 사인·코사인 신호가 정상적으로 출력되었으며, 또한 참조(reference) 사인파가 입력되는 것을 확인하였다. 또한 탐촉자 구동(drive) 신호를 증폭하기 위한 가산 신호가 디지털-아날로그 변환기(DAC) 출력단에서 적절하게 출력되었으며, 탐촉자 코일 입력단에 차동 및 절대신호가 적절하게 입력되었다. 결론적으로 와전류 신호발생·수신 모듈을 구성하는 와전류 주파수합성, 변조, 복조 회로 모듈의 각 출력단에서 와전류 신호 처리가 적절하게 처리되어 최종적으로 리사쥬신호가 출력되는 것을 확인하였다.

참고문헌

- [1] ASNT, Nondestructive Testing Handbook-Electromagnetic Testing, 3rd Eds., Vol. 5, pp. 172-179, American Society for Nondestructive Testing, Columbus OH, USA (2004)
- [2] EPRI, Electromagnetic NDE Guide for Balance-of-Plant Heat Exchangers, Rev. 2, pp. 3.2-21~4.0-30 (1997)
- [3] V. S. Cecco, Eddy Current Manual, Vol. 1 Test Method, AECL Chalk River Lab., pp 168-174 (1983)
- [4] 이희중, 남민우, 김용식, "원자력발전소 제어봉 상태진단 기술 개발", 최종연구보고서, 전력연구원 (1997)