

원격장 와전류 배관 탐상 시스템 개발

Development of Remote Field Eddy Current Pipeline Inspection System

정진오*, 이재경**, 김형진*

Jin-Oh Jeong*, Jae-Kyung Yi** and Hyoung Jean Kim*

초 록 배관의 관벽투과 특성을 지닌 원격장 와전류 비파괴 검사법은 열교환기 세관 검사에서부터 천연가스 수송관에 이르기까지 다양한 형태의 배관과 결합을 대상으로 적용 연구가 진행되고 있다. 공칭 외경 100mm의 주철관은 주로 상수도 관로의 배수관으로 활용되고 있는데, 차량 진동과 부식에 의한 결합의 생성으로 정수의 누수 문제를 일으킨다. 그러나, 탐상 경제성 및 효용성 문제로 관내 검사장치 투입과 같은 직접적인 검사 방법의 수행이 제한되어 왔다. 원격장 와전류 방법은 시스템 구성이 용이하고 내·외부 부식 결합에 대한 정량적인 평가가 가능하기 때문에 경제성 있는 장치 개발이 가능하다. 본 연구에서는 원격장 와전류 기술을 이용하여 상수도 관망의 특성을 고려한 매설 배관 검사시스템 개발을 수행하였다. 세부적으로는 관내 투입 원격장 와전류 검사의 기구부 설계 및 제작, 원격장 와전류 신호의 획득 및 처리 프로그램 개발, 그리고 개발 장치의 운용 방법 및 절차 검토 등으로 되어 있다.

주요용어: 원격장 와전류, 시스템 개발, 기구 설계, 신호 처리

Abstract: Remote field eddy current testing (RFECT) with through-wall transmission characteristic is being applied to pipes ranging from small tubes of heat exchanger to natural gas supply pipelines. Cast iron pipes with nominal diameter of 100mm are used primarily as the waterline pipes. The leakage of water occurs due to defects in the pipes caused by vibration of automobiles and corrosion. But, the use of direct inspection methods such as insertion of inspection equipment inside the pipelines has been limited due to its lack of economical efficiency. Economical development of inspection equipments is possible since RFECT method can be easily employed for system integration and quantitative evaluation of both inside and outside defects. In this study, the development of underground pipeline inspection system was carried out by using RFECT method in consideration of the characteristics of waterline network. This paper specifically describes the design and production of RFECT pipeline inspection pig using centralizer mechanism, development of remote field eddy current signal acquisition and processing software, and review of RFECT system operation procedures.

Keywords: remote field eddy current testing (RFECT), system development, kinetic design, signal processing

1. 서 론

1.1. 원격장 와전류 검사법

금속 배관체에 배관과 동축의 여자 코일을 넣고 저주파 교류 전류를 인가하면 코일에서 일정거리 떨어진 배관 내부 영역에서도 자기장이 형성된다. 이 영역의 배관 내부에 탐촉코일을 두고 전도성 배관의 내·외부 결합

및 두께 변화를 비파괴 평가할 수 있는데 이를 원격장 와전류 기술(remote field eddy current testing, RFECT)이라 한다. RFECT를 이용한 비파괴 탐상법은 비접촉식이므로 부식생성물이나 시멘트 몰탈 라이닝을 가진 상수도용 주철관에 적용 가능성이 높다[1,2].

원격장 와전류 연구는 캐나다 Queen's 대학의 Atherton 교수와 Iowa 주립대학교의 Lord 교수에 의해서 활발히 수행되어 왔다. Atherton 교수는 실험과 유한요소 해석을 병행해 가며 원격장 와전류 현상의 이해와 공업적 응용을 추구해 왔다. Atherton 교수 연구 그룹의 주요 업적은 원격장 와전류 모델 정립, 신호정량처리 기법 연구, 그리고 원격장 와전류 기술의 활성화를 위한 주기적인 연구발표회 개최 등을 들 수 있다[3-6]. Lord 교수의 연구는 배관에서 일어나는 전자장치의 패턴 연구를 바탕으로 원격장 와전류의 특성 규명에 중점을 두었다. 특히, 최근에는 자속누설법을 이용한 지능형 피그 연구 과정에서, 자속누설법을 구성하는 영구자석이 고속으로 이송될 때 운동기전력에 의해 배관 벽체에서 원주방향으로 발생하는 와전류가 원격장 와전류 특성을 지님을 유한요소 해석으로 예측하였고, 이를 평판 실험을 통해서 구현했다[7-9]. 이러한 운동유도 원격장 와전류 (motion induced remote field eddy current)는 저주파 교류전류를 사용하는 원격장 와전류 검사법의 단점인 검사 속도에 대한 해결책을 제시해주는 실마리가 될 것으로 기대된다.

1.2. 상수도 관망 현황

2000년 환경부 상하수도국의 노후 상수도 시설 개량 사업에 따르면, 전국적으로 노후관이 2,585km에 달해 약 12% 교체 작업에 2,000여 억원의 예산이 소요되고 전체 노후관 교체에는 2011년까지 총 3조 8천여 억원의 투입이 필요하다. 노후관 개량 사업을 효과적으로 실시하기 위해서는 배관의 노후도를 판단할 수 있는 근거가 필요하다. 우리 나라의 경우 한국수자원공사의 "수도관 개량을 위한 의사결정 시스템 개발(1995)" 연구에서 도·송수관로에 대해서 노후도를 평가할 수 있는 모델을 개발해 평역상수도의 관로개량 작업에 이용하고 있으며, 이를 급·배수 관망의 개량작업에 확대할 수 있는 방안을 검토 중에 있다.

이와 같은 노후도 평가 모델은 노후도에 영향을 미치는 각종 외부인자들과 이들 데이터를 이용한 통계적인 모형이므로, 배관의 잔여두께 정보 취득과 부분적인 두께 감소에 의한 파손을 예측하는 데에는 한계가 있다. 그러

므로 간접적인 노후도 평가법과 직접법인 비파괴 평가 방법을 병행하여 사업의 효율성을 극대화할 필요가 있다. 즉, 모든 배관에 대하여 직접 검사를 수행할 수는 없지만, 간접 평가법에 의해 문제가 예상되는 구간을 대상으로 직접 평가를 수행하여 교체 혹은 갱생 여부를 판단한다면 보다 효과적으로 노후관망 개량 사업을 수행할 수 있을 것이다. 따라서, 제도적인 뒷받침 하에 정기적으로 구간별 검사를 수행하여 교체시기를 제시할 수 있다면, 급·배수관 파단을 미연에 방지하고 동시에 누수율을 제고할 수 있는 경제적이고 신뢰적인 방법이 될 것이다.

2. 본 론

2.1. 매설 상수관 검사 시스템 구성

내부 투입에 의한 상수도 관망 직접 검사 시스템 개발을 위하여 관망의 구성을 살펴볼 필요가 있다. 중·소 구경 배수관의 경우 도심지의 도로를 따라 매설되어 있는 것이 대부분이므로 분기와 곡관 부위가 많다. 덕타일 주철관으로 이루어진 관망의 경우에는 플랜지나 소켓형태의 연결부를 가지며, 경우에 따라서 이들 연결부가 둔턱을 이루기도 한다. 또한, 배관 내벽면에는 시멘트 몰탈 라이닝 처리가 되어 있어서 검사 코일부가 배관 피검면에 근접할 수가 없다. 특히, 내부 부식의 경우에는 두꺼운 부식 생성물로 인하여 검사 기구부가 배관을 통과조차 할 수 없다. 배관 검사체 기구부는 이와 같은 상수도 관망 환경에서 작동될 수 있도록 설계되어야 하며 운용 절차 또한 상수도 관망의 환경에 부합되어야 한다.

2.2. 배관 탐상 장비 운용 검토

내부 투입에 의한 배관 직접 검사법 적용을 위해서는 두 가지 방법의 검사체 운용을 고려할 수 있다. 하나는 지능형 피깅(intelligent pigging) 방식으로서, 배관 내부에 흐르는 유체의 압력으로 이동하며 배관 탐상 정보를 검사체에 내장된 컴퓨터 및 기록 매체에 기록하는 방법이다. 이 방법을 사용하려면 launcher와 receiver 같은 특별한 장치가 관망에 부착되어 있어야 하므로, 주로 지관이 많지 않는 대구경 장거리 배관의 검사에 많이 사용된다. 다른 방법으로는 검사체에 전선 혹은 이송을 위한 케이블을 연결하는 wireline 혹은 tether cable 방식을 들 수 있다.

배수 관로와 같은 상수도 배관에 내부 투입식 검사체를 적용한다면 wireline 방법이 다음과 같은 이유 때문에 더 적당하다. 즉, 배수관은 분기와 곡관이 많으며, 지능형 피그를 운용하기에는 배수관 사용 압력이 낮고, 펌프에 의한 검사체 이송의 경우에는 배관이 그 운용 압력을 견딜 수 없기 때문이다. 또한, 기존의 배관 세정 작업이나 하수도 관로의 보수 및 검사 등에 이미 wireline 방식이 채택되어 있으므로 상수도 배수 관로의 검사에도 wireline을 적용하는 것이 무리가 없으리라 판단된다.

Wireline 방식을 채택한다면 자주식으로 할 것인가 견인식으로 할 것인가를 택해야 한다. 자주식의 경우는 배관 내부를 스스로 주행하는 도구와 이에 연결된 검사체로 구성된다. 하수도 관로의 vision 검사를 수행하는 경우에는 보통 CCD 카메라를 탑재한 자주차를 사용한다. 그러나 검사체의 길이가 상대적으로 길고 탐상 코일부의 중심 유지가 요구되는 원격장 와전류 탐지기는 그 특성상 자주차에 검사체를 직접 연결하여 관내를 주행하기에는 자주차의 견인력 한계 때문에 곤란하다.

견인식은 독립적으로 사용될 수 없다. 예를 들어, 임의의 구간을 검사하기 위해서는 구간의 양끝을 굴착하고 케이블을 견인기가 있는 반대편으로 보낼 수 있어야 하기 때문이다. 따라서, 상수도 배수관 검사에 대해서는 견인식과 자주식을 절충한 방식이 요구된다. 즉, 케이블을 반대편으로 보낼 목적으로 자주차를 이용하거나, 세정 피그에 케이블을 연결하여 수압으로 보내는 방식 등을 사용할 수 있다.

2.3. 원격장 와전류 탐상코일부 설계 및 제작

Table 1 Specification of the remote field eddy current inspection device

특성	값
주파수	250Hz
코일간거리	270mm
여자기	폭 : 20mm, 외경 : 80mm 깊이 : 5mm, 권선수 : 400 turns
탐지기	폭 : 5mm, 외경 : 80mm 깊이 : 5mm, 권선수 : 800 turns
전단증폭기	대역 : 53Hz ~ 540Hz 이득 : 59.2 dB (max. at 200Hz)

공칭 외경 100mm의 덕타일 주철 배수관의 배관 감속 정도를 탐색 할 수 있는 탐상코일부를 Table 1에 기술된 사양으로 설계·제작하였다. 운전 주파수는 배수관 재질인 덕타일 주철관의 물성을 고려하여 표피효과에 의한 침투 깊이와 탐지코일에 유기 되는 전압의 크기 그리고 검사속도를 최적화 하여 결정하였다.

검사체의 여자코일과 탐지코일 사이의 거리(inter-coil distance)는 먼저 유한요소 해석을 통해 예측하고 pull-away 실험으로 원격장 영역을 확인하여 결정하였다 [10]. 여자기 코일의 권선수 결정에는 배관 통과를 위한 여자기의 크기가 주요한 인자로 작용되었다. 탐지기 코일은 보빈형(bobbin)으로 제작하여 하나의 탐지 코일로 원주방향 전체 영역의 신호를 받도록 하였다. 곡관부의 용이한 통과를 위해서는 배관과 동축인 탐지코일의 충진율(fill factor)이 작은 게 선호되지만, 너무 작으면 신호의 분해능이 떨어지므로 적당한 크기를 유지해야 한다. 즉, 코일의 권선수를 높이는 방향이 신호를 탐지하는 측면에서는 유리하나, 탐지기의 폭이 넓어지고 깊이가 커져서 신호의 분해능은 떨어진다.

2.4. 기구부 설계

원격장 와전류 기법을 이용한 검사체는 배관 내부를 주행하면서 배관의 두께에 대한 정보를 획득해야 한다. 검사체 설계시의 주요 요건은 배관 곡관부 통과능과 여자기와 탐지기의 각 축이 배관축과 동축을 이루도록 하는 것이므로 검사체 주축의 재료로 휨 탄성이 우수한 우레탄 계열을 사용하였다. 그리고 기구부에 4 bar linkage 와 압축 스프링을 이용한 centralizer를 설계하여 주축과 배관축이 일치하도록 하였다. Centralizer의 재료는 비자성계의 스테인레스 스틸을 사용하였고, 여자기와 탐지기를 이루는 보빈부와 관련 housing으로는 polycarbonate를 사용하였다.

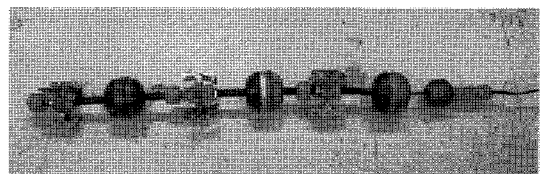


Fig. 1 The prototype remote field eddy current inspection device

90° 엘보우 통과를 목표로 이와 같이 설계된 검사체는 실제 테스트에서는 45° 엘보우 정도까지만 통과할 수 있었다. 이는 국내에서 제작되는 주철관의 90° 엘보우 관경이 몰탈 라이닝에 의해 너무 좁게 되어 있고, 또한 이음부에 불연속적인 턱이 형성되기 있기 때문이다.

2.5. 신호 획득 및 처리 시스템

원격장 와전류 탐상에서는 탐지코일에서 유기 되는 기전력 크기 신호, 그리고 여자기에 가해진 저주파 교류 신호와 탐지코일에서 유기 되는 기전력 신호 사이의 위상차 신호가 각각 발생한다. 두 신호가 변하는 정도에 따라 배관 두께 변화 정도를 평가할 수 있다. 이와 같이 기준 신호에 대한 대상신호의 위상과 크기를 얻기 위해서는 lock-in amplifier를 사용한다. 시스템 구성을 위해서 Stanford Research Systems의 SR830 DSP lock-in amplifier를 사용하였다. 구성 시스템의 단순화 및 경량화를 위하여 GmbH사의 board 형태의 lock-in amplifier인 LIA150 DSP PCI board를 사용코자 하였으나, 원시신호의 잡음도와 신호 처리 속도를 테스트한 결과 SR830이 LIA150보다 모두 우수하였으므로 SR830을 채택하였다.

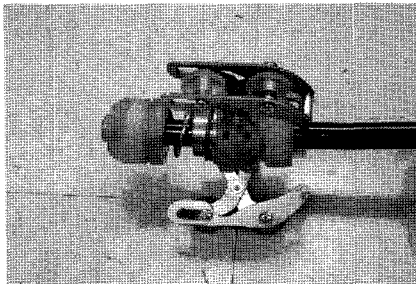


Fig. 2 The centralizer module of the inspection device

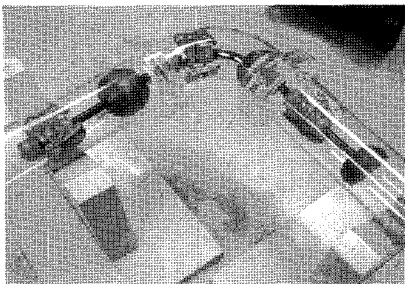


Fig. 3 The inspection device passing through an elbow in a curved pipe

SR830으로부터 PC로 전송된 데이터는 별도의 처리과정을 거쳐 결함을 판별하게 된다. PC로 전송된 원시데이터는 크기가 작은 잡음을 포함하고 있으므로 Gaussian smoothing을 이용하여 잡음을 제거하였다. 일반적인 주철 배관의 한쪽 끝은 소켓의 형태로 되어 있고, 제조 공정의 이유로 주철관의 두께는 소켓 쪽으로 갈수록 두

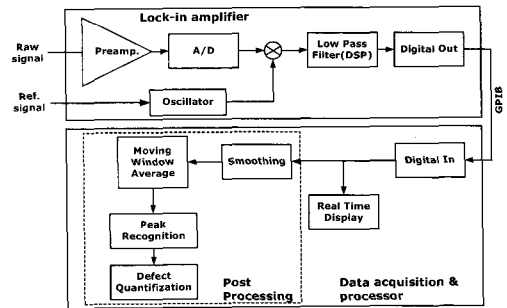


Fig. 4 Signal processing flow of a remote field eddy current inspection system

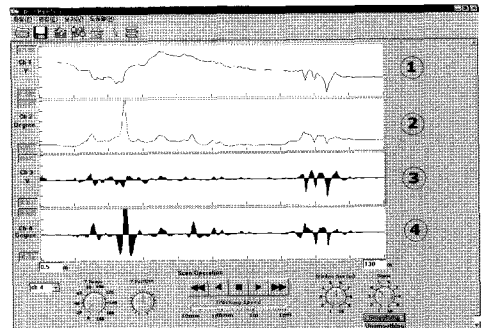


Fig. 5 A view of data processing program: ① is for a raw amplitude signal, ② for a raw phase, ③ for a moving-window-averaged amplitude signal and ④ for a moving-window-averaged phase

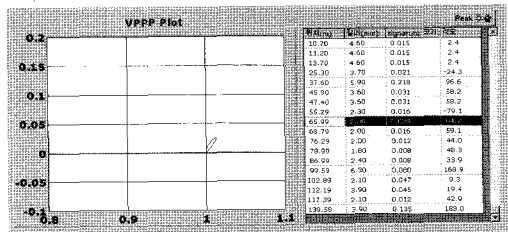


Fig. 6 The voltage plane polar plot (VPPP) of data processing program. This module is now under development

꺼워진다. 이러한 두께의 변화는 장범위 잡음으로 작용하므로 이동구간평균을 취해서 장범위 잡음을 제거하였고, 결합부위 신호를 Voltage Plane 극좌표 법으로 처리하여 결합 크기에 대한 정량 평가를 수행하였다[10].

피검 대상 배관의 구간 길이가 수백 미터에 이르므로 처리된 신호로부터 결함을 판별하는 작업은 자동적으로 이루어져야 한다. 이는 시퀀스로부터 특정 패턴을 컴퓨터가 인식하도록 하는 것을 의미한다. 일반적으로 결함 신호는 첨두(peak) 신호 형태를 갖기 때문에 시퀀스 전체를 탐색하면서 첨두 신호를 찾도록 하는 루틴을 작성해 주어야 한다. 또한, 결함 신호 외에도 배관 연결 요소들을 구분해 줄 수 있어야 한다. 연결 방법에는 소켓 연결과 플랜지 연결이 있으며 요소로는 엘보우, 밸브 및 티(tee) 등이 존재한다. 연결요소들의 신호는 결함신호에 비해 복잡하고 연결요소마다 특징이 존재하므로 이들을 일일이 구분하기 위해서는 많은 반복 실험 수행으로 충분한 데이터가 확보되어야 한다. 그러나 현재로서는 요소의 형태와 연결방법을 구분하는 것이 효용가치가 적다고 판단되므로 본 개발 시스템에서는 결함에 의해 발생하는 첨두 신호로써 결함을 판별하고, 연결부위에 대해서는 그 존재 위치만 확인 할 수 있도록 하였다.

3. 결론 및 향후 개발 계획

원격장 와전류 방법은 내·외부 부식 결함에 대한 정량적인 평가가 가능하고 시스템 구성도 비교적 용이하기 때문에, 경제성 있는 배관 내부 투입식 비파괴검사 장치 개발이 가능하다. 본 논문에서는 원격장 와전류 탐상 기술을 바탕으로 매설 상수도 주철재 배관의 검사시스템 개발에 대하여 기술하였다. 상수도 관망에 대하여 직접 검사법을 적용하기 위해서는 본 논문에서 개발한 관련 검사 기술과 시스템 확보 외에도 주기적인 관망 유지·보수 작업 수행 등에 대한 제도적 뒷받침이 요구된다.

개발 시스템은 상수도 배관 및 각종 플랜트 배관의 일반부식(general corrosion)에 의한 두께 감속 정도를 평가하기 위한 용도이나, 국부적인 미세 균열 탐지 목적으로 확대 적용을 위해서는 배열형 탐지코일 방식의 검사체 개발을 추진할 필요가 있다. 그리고, 기존의 원격장 와전류 탐상 방법은 탐상 속도에 문제가 있어 응용범위가 제한적이거나, 운동유도 원격장 와전류 방법을 이용하면 각종 배관을 대상으로 고속검사가 가능하리라 기대 된다.

참고문헌

- [1] S. Chifa and A. Andreescu, "Transducer for establishing the integrity of influent water pipes", *Sensors and Actuators A*, Vol. 59, pp. 208-212, (1997)
- [2] R. Grimberg, S. Chifan, L. Lancu and O. Mihalache, "RFEC nondestructive evaluation of steel pipes for influent water conduct", *Proceedings of the 4th International Conference of the Slovenian Society for Nondestructive Testing*, April 24-25, 1997, Ljubljana, Slovenia, pp. 379
- [3] D.D. Mackintosh, D.L. Atherton and P.A. Puhach, "Through-transmission equations for remote field eddy current inspection of small bore ferromagnetic tubes", *Materials Evaluation*, June, pp. 744-748, (1993)
- [4] D.L. Atherton, D.D. Mackintosh, S.P. Sullivan and J.M.S. Dubois, "Remote field eddy current signal representation", *Materials Evaluation*, July, pp. 782-789, (1993)
- [5] D.L. Atherton, *Proceedings of the 4-th International Conference on the Remote Field Current Technique*, August 25-27, 1997, Kingston, Canada.
- [6] Y. Zhang and D.L. Atherton, "Finite-element analysis for remote field eddy current responses from near and far side cracks", *Res. Nondestr. Eval.*, Vol. 10, pp. 163-169, (1998)
- [7] Y.S. Sun and W. Lord, G. Katragadda and Y.K. Shin, "Motion induced remote field eddy current effect in a magnetostatic nondestructive testing tool: A finite element prediction", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 30, No. 5, pp. 3304-3307, (1994)
- [8] S. Yang, Y. Sun, L. Udpa, S.S. Udpa and W. Lord, "Application of perturbation methods in finite element analysis of stress corrosion cracking", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 36, No. 4, pp. 1714-1718, (2000)
- [9] S. Yang, Y. Sun, L. Udpa, S.S. Udpa and W. Lord, "3D simulation of velocity induced fields for nondestructive evaluation application", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 35, No. 3, pp. 1754-1756 (1999)
- [10] 정진오, 이재경, 김형진, "배관 결합부 원거리장 와전류 신호 정량화 연구", *비파괴검사학회지*, 20권, 6호, pp. 555-561, (2000)