자기자화자왜 센서를 이용한 설비 off-line Health Monitoring 시스템 개발

Development of Health Monitoring System Using Self Magnetization Magnetostrictive Sensor

김이곤[†] · 문홍식^{**} · 김준^{*} · 김지현^{*}

Yi-Gon Kim[†], Hong-Sik Moon, Jun Kim, Ji-Hyeon Kim

^{*}전남대학교 전기 및 반도체 공학과

^{**}중화학설비안전진단센터

요 약

본 논문은 석유화학 플랜트 등의 결함을 자기자왜센서기술을 활용하여 주기적으로 검사하는 오프라인 모니터링이 가능한 'Health Monitoring System'의 개발과 그 활용성에 대해 확인하였다. 기존의 유도파 검사 방식은 용접부위 검사에는 적용할 수 없고, 일반적인 부위에서도 노이즈 및 반사파 등으로 검사의 정밀도에 한계를 갖고 있다. 본 기술은 주기적인 모니터링을 통해 결함의 진전에 따른 변위정보를 활용할 수 있으므로, 더 정밀한 검사가 가능하기 때문에 석유화학 플랜트에서 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

키워드 : 자기자화자왜 센서, 유도파, 모니터링, 진단, 플랜트, 비파괴 검사, 건전성, 자왜 센서

Abstract

This thesis examines the development and application of 'Health Monitoring System' which monitors periodically the state of a pipe of petrochemical plant by using magnetostrictive sensor technology. The existing guided-wave inspection methods cannot be applied to welding part inspection in pipe, and has a limit of precision when applied to general parts because of noise, reflected waves, and so on. This technology uses the information on displacement of a defect through periodic monitoring, which makes more precise inspection, and can be utilized very usefully in a petrochemical plant.

Key Words : Self Magnetization Magnetostrictive Sensor, guided wave, Monitoring, Diagnosis, Plant, Non-destructive inspection, Health, Magnetization Sensor

1. 서 론

일반적인 석유화학 플랜트는 취급하는 화학물질에 따라 다양하게 나타나는 특성으로 인해 부식과 손상의 정도가 일정하지 않고 물질에 따라 다양하게 나타난다. 이 같은 이유로 발생하는 문제점들은 유독가스 누출로 인한 대기오염, 화재, 재산상 또는 인명피해 발생의 원인으로 이어진다. 사고 발생의 위험을 미연에 방지하고자 산업현장에는 플랜트의 결함 진단을 위하여 가장 보

편화된 결함 진단법으로 인력을 이용한 결함 진단검사가 주로 사용되고 있다.

하지만 이러한 검사방법은 대규모로 운영되는 석유화학 플랜트에서는 오랜 시간과 인력소모로 결함진단에 정확성을 떨어뜨리고, 검사를 위한 족장설치와 시간소모에 따른 비용이 발생하여 효율성이 떨어진다는 평가를 받아왔다. 또한 사고발생의 위험부담과 결함진단 시 공정 중단해야 하는 비효율적인 생산방식을 고수 할 수 밖에 없다.

자기자화자왜센서를 이용한 Health Monitoring 시스템은 MsS Sensor를 이용하여 결함 발생예측부위에 지속적인 감시를 진행한다. 또한, 결함검출능력을 증가시키고 생산성 향상을 위해 공정 중 진행되는 검사방법을 유도하였다. 유도파를 이용한 주기적인 모니터링 기술은 광범위한 석유화학 플랜트 현장에서 유용한 감시시스템을 제공 할 수 있다.

2. 연구 내용

접수일자: 2012년 4월 20일

심사(수정)일자: 2012년 4월 20일

게재확정일자: 2012년 6월 19일

[†] 교신 저자

본 연구는 중소기업청에서 지원하는 2011년도 산학연 공동기술개발사업(No.11)와 20012년도 지식경제부 지원 중화학설비안전진단 지역혁신센터사업의 연구수행 및 지원으로 수행된 결과물임을 밝힙니다.

2.1 유도파(Guided Wave)

본 연구는 자기자화자왜센서를 이용한 Health Monitoring System으로서 Guided wave의 기본성질을 이용하였다. 'Guided wave' 즉 초음파 진동의 형태로 배관과 같은 구조물의 기하학적 구조를 따라, 길이방향으로 전파하는 유도파로서 이와 같은 Guided wave의 성질은 Health Monitoring System 연구의 기초로 볼 수 있다.

우선 발생시킨 Analog wave를 구조물에 전파시키면 반사되어 돌아오는 파형을 분석하게 되는데 이를 통해 석유화학 플랜트의 지속적인 건정성 감시가 가능하다.

2.2 자기자화자왜센서[1,3,4]

대규모 산업단지에서 가동되는 석유화학 플랜트의 건정성 진단 검사는 정확하고 안전하게 진행되어야 한다. 수많은 위험물질과 화학품에 노출된 진단장비는 어떠한 경우에도 안전성이 유지되어야 하며 진단의 결과가 일정해야 한다. 이러한 현장상황에서 수집되어진 결함신호는 정확한 정보와 정확하지 않은 왜곡된 정보를 동시에 포함한다. 이러한 문제점은 결함진단에 사용되는 결함신호에 대한 새로운 분석방법이 필요하다. 데이터 추이 변화를 추적할 수 있는 주기적 비주기적 계측에 적합한 Interface Sensor Module은 헬스 모니터링 시스템에서 가장 중요한 요소로 신호의 취득조건이 재현성이다. 유도파 가진 및 수신기의 복잡함과 도체를 통해 전달되는 유도파 신호의 복잡함으로 인해 주기적 계측신호의 추이를 분석하는데 절대적 영향을 미친다. 기존의 유도파 측정 장치로는 모니터링 기능은 불가능하다. 그러나 자기자화자왜센서는 가격의 저렴함과 전자적으로 제어가 가능하여 정격에 의한 재현성이 높아 문제를 해결할 수 있다. 자기자화자왜센서의 자왜 물질인 스트립위에 직각으로 교차되는 코일에 흘려주는 전류에 의해 자력선의 방향을 임의로 제어하여 원하는 모드의 유도파를 발생하게 하는 특징을 갖고 있다. 그 구성은 그림 1과 같다.

그림 1. 자기자화자왜센서 구조

Fig. 1. Structure of Self Magnetization Magnetostrictive Sensor

자기 자화 센서의 시뮬레이션은 전자기학 계산 및 해석용 전산 프로그램 MAFLO code를 사용하여 시뮬레이션 하였다. MAFLO code는 한국 핵융연구센터(NFRC)의 이덕교 박사님께서 20여 년간 미국 Oak Ridge National Lab에서 magnetic fusion 및 플라스마 물리 연

구를 위해 개발 하여 탁월한 성능으로 업적상을 수여받은바 있고, 1997년 귀국 후 한국핵융합 연구 장비 KSTAR의 설계 및 연구개발에 활용하며 개선/확장한 것으로 계산의 정확도와 속도가 높고 사용하기가 편리한 것으로 알려져 있다[2].

그림 2. 자기자화자왜센서의 코일 및 스트립 구조
Fig. 2. The Coil and Strip Structure of Self Magnetization Magnetostrictive Sensor

그림 3. 자기자화자왜센서 자기분포 시뮬레이션 결과
Fig. 3. Simulation result of magnetic field distribution of Self Magnetization Magnetostrictive Sensor

그림 1은 자기자화자왜센서의 구조를 나타내는 그림이고, 그림2는 시뮬레이션 구조를 나타낸다. 그림으로 자기자화자왜센서는 원주방향의 자기장을 생성하는 Toroidal-coil과 축방향의 자기장을 생성하는 Solenoid-coil로 구성되어 있다. Solenoid-coil은 파이프의 축방향으로 자기장을 생성할 수 있는 방향으로 감겨져 있고, Toroidal-coil은 균등한 간격으로 Solenoid-coil을 중심으로 감겨져 있다.

그림 3은 MAFLO code의 해석결과를 MatLab으로 나타낸 그림이다. 그림 4는 그림3의 해석 결과를 확대한 그림이다. 그림4에서 보는 것과 같이 Crossed-coils에 의해 발생된 자기장은 Solenoid-coil에 의해 발생된 자기장에 비하여 일정한 각도를 가지는 것을 알 수 있다[4-8].

그림 4. 자계 크기 및 방향의 시뮬레이션 결과

Fig. 4. Simulation results of the magnitude and direction of the magnetic field

2.3 플랫폼 시스템 제작

데이터 추이 변화를 추적할 수 있는 주기적 비주기적 계측에 적합한 모니터링 시스템의 구성에서는 Interface Sensor Module과 이 모듈과 결합하여 유도파를 가진하고 반사된 유도파를 수집하고, 수집된 데이터를 분석하고 관리하는 모니터링 플랫폼 시스템으로 구성된다. 넓은 공간에 분포된 위험관리가 필요한 지점들의 주기적인 순환 도보 방문으로 데이터 취득이 가능한 포터블 시스템으로 설계되어야 한다. 플랫폼 시스템은 유도초음파의 가진과 수집 기능 뿐아니라, 취득된 데이터의 트렌드를 관리, 분석하고 저장처리가 가능한 저전력 휴대용 시스템이 필요하다. 기존의 미국 스웨리에서 제작된 MsSR 3030 유도파 장비는 전력 소모가 크고, 무게 및 부피가 커 포터블로는 적합하지 않다. 영국의 Gul사에서 제작된 제품도 마찬가지로 현장에서 주기적으로 이동하면서 계측하기는 어렵고, 이 제품의 센서는 재현성이 떨어져 모니터링에 적용하는데는 한계가 있다. 플랫폼 시스템의 구성은 그림 5와 같다.

그림 5. 플랫폼 시스템 구성도

Fig. 5. Configuration of Platform system

주 Micro-Processor로 구성된 제어부, 유도파를 가진하기 위한 500Khz의 신호발생기, 반사된 유도파를 수신하여 디지털 신호로 변환하는 40MPS 속도의 아날로그-디지털 변환기, 센서부와에 가해지는 전원과 각 회로 부에 가해지는 전원을 제공하는 전원부로 구성되어 있으며, 이들에 대한 회로도도는 각각 다음과 같다.

그림 6. Main Board 회로도

Fig. 6. Schematic of Main Board

그림 7. 아날로그-디지털 신호 변환기 회로도

Fig. 7. Schematic of Analog-Digital Signal Converter

그림 8-a. 신호발생기 회로도

Fig. 8-a. Schematic of Signal Generator

그림 8-b. 신호 발생기 회로도
Fig. 8-b. Schematic of Signal Generator

그림 8-c. 신호 발생기 회로도
Fig 8-c. Schematic of Signal Generator

그림 9. Power-Amp 회로도
Fig 9. Schematic of Power-Amp

2.3.1 자기자화자왜센서 모듈

그림 10은 Interface Sensor Module로 모니터링 플랫폼 시스템과 직접 결합이 가능한 구조를 갖는 모니터링 용 센서 모듈이다. 저 전력으로 좌우 10M 범위를 감시 가능한 성능을 갖는다. 최소의 접촉 저항을 갖도록 결합부를 특수 금속으로 처리하고 위험환경으로부터 노출을 방지하기 위해 방폭시스템으로 설계하였다.

그림 10. 자기자화자왜센서 모듈
Fig. 10. Module of Self Magnetization Magnetostrictive Sensor

2.3.2 헬스 모니터링 플랫폼

개발된 헬스 모니터링 플랫폼 시스템의 성능과 규격은 표 1과같이 기존의 유도파 장비에 비해 성능과 크기 및 무게에서 포터블 장비로 적합함을 알 수 있다. 크기에서 2배정도 가볍다.

표 1. 미국 스웨리 유도파장비와 개발 장비의 비교
Table 1. Comparison of MsSR-2020 developed by U.S. SwRI and developed equipment

주요 성능	단위	개발된 장비	MssR 2020
1. 주파수범위	Hz	10Khz~500Khz	2Khz~250Khz
2. 신호 S/N비	dB	60dB	40dB
3. 취득속도	MPS	40MPS	20MPS
4. 결합 크기	%	3	5
5. Dimensions	cm	25(d) x 36.5(w) x 15(h)	46.3(d) x 47.1(w) x 14.7(h)
6. Weight	kg	7.5	14.3

그림 11. MsSR 2020(A)과 개발된 장비(B)
Fig. 11. MsSR 2020(A) and developed equipment(B)

그림 11에서와 같이 현장에서 휴대하기 편하고 성능에서도 휴대용 모니터링에 적합한 장비임을 알 수 있다.

3. 모니터링 시스템 구성 및 실험

대단위의 플랜트의 특성상 결함예측부위가 부분적으로 국한된 것이 아닌 널리 퍼져있어 지속적으로 감시를 진행하더라도 그 데이터를 수집하는데 있어서는 많은 제약이 따른다. 그래서 오프라인 모니터링 시스템에서 가장 중요한 부분은 저 전력 소모형 플랫폼 시스템과 제현성이 높은 모듈화된 자기자화자왜센서의 개발이다. 개발 제작된 플랫폼 시스템과 센서모듈을 용접점부위 결함검출에 유용성을 중심으로 실험하고자 그림 12와 같이 대상 파이프의 위험부위를 모니터링하기 적합한 지점에 개발된 오프라인 모니터링에 적합한 센서모듈을 부착하고 부착된 센서와 개발된 모니터링 플랫폼 시스템을 결합하여 플랫폼시스템에서 발생된 신호를 센서를 통해 파이프에 유도파를 가진하고, 반사되어 되돌아온 유도파 신호를 취득하도록 구성하였다. 대상은 그림 14와 같은 4φ파이프로 용접된 부분이다. 유도파의 특성상 용접부위의 결함 검출은 분석하기가 어렵기 때문에 결함검출을 위해 지속적 모니터링이 필요하다. 결함의 크기를 순차적으로 변화시켜 그에 대한 신호변화를 통해 유무 판별이 가능한지를 실험을 통해 입증하고자한다.

그림 12. 실험 구성도
Fig. 12. Experimental diagram

그림 13. 결함 모니터링 실험도
Fig. 13. Diagram of Defect monitoring experiments

(A) 결함이 없는 용접지점을 갖는 파이프(2"(S10s))
(A) Welding point on ineffective pipe(2"(S10s))

(B) 파이프 결함 파이프 (30mm)
(B) Defective pipe (30mm)

그림 14. 용접부를 갖는 시편
Fig. 14. Defect on Welding point of pipe

(A) 결함신호(0, 6, 15, 20, 25, 30 [mm])
(A) The defective signal of pipe
(0, 6, 15, 20, 25, 30 [mm])

(B) 결함 신호 분석
(B) analysis of The signal of defective pipe

그림 15 건전부 및 결함 진전에 따른 신호
Fig. 15. The signal of defective-free pipe and defective pipe

4. 결 론

본 연구에서는 광범위한 석유화학 플랜트 현장에서 적용 가능한 자기자화자왜센서를 이용한 Health Monitoring System을 설계 제작하였으며, 실제 배관의 용접점에 인위적 결함을 진진 시키고 이를 제작된 모니터링시스템을 이용하여 결함의 진진과정을 확인하였다.

그림 15의 A, B를 통해 MsS센서를 이용한 결함 예상 부위를 주기적 감시 만으로 결함을 조기에 감지 할 수 있음을 보였다. 그림15의 A의 동그라미로 표시된 피크치 값을 자세히 분석하면 B와 같이 결함의 진진에 따라 피크치의 위상과 크기가 비례적으로 증가함을 알 수 있다. 결함 신호의 위상과 크기가 결함의 체적에 비례하여 나타나고 있다. 따라서 결함의 감지 성능을 높이는 신호 분석 기법을 개발한다면 지금까지 용접점 부위의 결함 검출이 어려웠던 문제를 해결할 수 있음을 보였다. 향후 저 전력 U-Sensor Module의 개발을 통해 온라인으로 감시가 이루어지게 하면 유용성을 더욱 높일 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 김이곤, "Crossde-Coils를 이용한 자기자화 MsS 센서의 설계," *한국지능시스템학회 2008년도 춘계 학술대회 논문집*, pp. 205-208, 2008.
- [2] http://dklee.knfp.net/EM_code.doc
- [3] 박경조, "파이프 원주방향 결함에 의한 유도파 반사" *Bull. Yosu Nat'l. Univ.* Vol. 14, No. 2, pp. 217-225, 1999.
- [4] 문홍식, *Crossed-coils를 이용한 자왜센서의 설계*, 전남대학교 석사학위논문, 2009. 2.
- [5] Joule, J. P., 1847 "On the effect of magnetism upon the dimensions of iron and steel bars," *Phi. Mag. III*, 30, pp. 76.
- [6] S.-H. Park : 생체 신호 처리 및 응용, Adtec(1999) (in Korean)
- [7] D. C. Jiles and D. L. Atherton, "Theory of ferromagnetic hysteresis," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 61, pp. 48-60, 1986.
- [8] M. J. Sablik and D. C. Jiles, "Coupled magnetelastic theory of magnetic and magnetostrictive hysteresis," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 29, pp. 2113-2123, 1993.
- [9] R. Long, M.J.S Lowe and P. Cawley, "Acoustic Wave Propagation in Buried Iron Water Pipes," *Proceedings of Royal Society London*, pp. 351-356, 2003.

저 자 소 개

김이곤(Yi-Gon Kim)

1992년 : 일본 동경대학교 객원연구원
 1993년 : 전남대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)
 2000년~2001년 : 미국 아이오와 주립대 교환교수
 2002년 : 한국과학재단 우수연구성과 30선 선정

1995년~전남대학교 전기 및 반도체 공학과 교수
 2008년~2009년 : 한국지능시스템학회 회장
 2009년~현재 : 중화학설비안전진단센터 센터장

관심분야 : 시스템 모델링, 인공지능, 지능제어, 고장진단, 유도파 진단

Phone : 010-3634-7499

E-mail : yigon@chonnam.ac.kr

문홍식(Hong-Sik Moon)

2007년 : 전남대학교 전기 및 반도체 공학과 졸업(학사)
 2007년~현재 : 동 대학원 전기 및 반도체 공학과 졸업(석사)

관심분야 : 퍼지 이론, 비파괴검사, 자왜센서
 E-mail : mhs99co@nate.com

김 준(Jun Kim)

2007년 : 전남대학교 전기 및 반도체 공학과 입학

관심분야 : 비파괴검사, 지능제어
 E-mail : the-june@nate.com

김지현(Ji-Hyeon Kim)

2007년 : 전남대학교 전기 및 반도체 공학과 입학

관심분야 : 자왜센서 비파괴검사
 E-mail : hyeon30@naver.com