

원전 고압배관 감육검사를 위한 센서네트워크 기반 무선 NDT 서비스 모델 개발

최유락*, 이재철**

*한국원자력연구원, **한국원자력연구원

Development of a Sensornetwork based Wireless NDT Service Model for High-pressurized Piping Wall Thinning Defect Inspections in a NPP

Choi, Yoo Rark, Lee, Jae-Cheol

KAERI, KAERI

E-mail : yrchoi@kaeri.re.kr, jclee2@kaeri.re.kr

요 약

원자력발전소에는 매우 복잡하고 긴 배관 시스템이 작동되고 있다. 이 배관은 매우 높은 온도와 압력에 견디게 설계 및 제작 되었으나, 사용연수의 증가에 따라 배관이 깎이는 감육현상이 발생하며, 이로 인한 배관 파단 사고가 발생하고 있다. 이러한 감육현상은 배관의 곡관부에서 자주 발생하는데, 이를 감시하기 위하여 지금까지는 초음파를 이용한 배관 두께 측정을 해오고 있다. 그러나 이 검사 결과의 신뢰성이 없고, 유선 검사 방식을 채택함으로써 인한 장비 설치 문제로 극히 일부 배관의 곡관부에 대한 감시만 수행되고 있는 문제가 있다. 본 논문에서는 펄스 와전류 기법과 일체형 소형 무선 센서를 이용하여 이러한 문제를 해결할 수 있는 방안을 제안한다.

1. 서론

원자력발전소를 위한 발전계통은 1차계통과 2차계통으로 구성되어 있는데, 이 계통들은 수많은 고압 배관을 포함하고 있다.

원자로의 경우 150~160 기압의 압력과 섭씨 300도의 온도에도 견딜 수 있어야 하며 발전계통의 경우 이러한 조건을 대부분의 배관에서도 충족해야만 한다. 1차계통은 방사선에 오염된 냉각수를 포함하고 있으며, 오염되지 않은 냉각수를 포함하는 2차계통의 경우에도 1차계통과 마찬가지로 고온고압의 환경이므로 안전성 확보를 위한 계통배관의 건전성 유지는 필수 요건이다.

증가에 따라 내부면이 부식되거나 닳는 감육현상(wall thinning defect)이 발생하게 되며, 감육이 깊게 진행되면 배관 파열로 인한 중대 사고가 발생할 가능성이 높아진다. 이러한 감육현상은 곡관부에서 많이 발생하고 있으며, 이 곡관들에 대한 감육측정은 원전 안전과 직결된 중요 검사 중 하나로 볼 수 있다.

본 논문에서는 펄스 와전류 센서의 무선화 및 무선화된 펄스 와전류 센서를 이용한 무선센서 네트워크 구현 방법에 대하여 기술함으로써 센서네트워크 기반 무선 NDT 서비스 모델을 제시한다.

2. 배관 감육 측정

본 연구는 지식경제부 원자력기술개발사업(과제번호 : 53632-08)의 연구비지원에 의하여 연구되었음 원전에서 사용되는 고압배관의 경우 사용 연령

원전계통에 사용되는 곡관의 경우 그 수가 매우 많고 감육측정을 위한 접근이 불가능한 경우가 존재하며, Over-haul 기간이 짧은 관계로 전수 검사

를 수행하는 것이 불가능한 상황이다. 이러한 상황에서 현재는 곡관부에 대한 감육측정을 초음파검사 방법으로 수행하고 있으나 초음파 검사의 경우 배관 사용 연수 증가에 따른 내부 물성 변화로 인한 초음파 전파 속도 변질이 발생하여 사용 중 배관의 감육측정에 많은 오차를 보이고 있다.

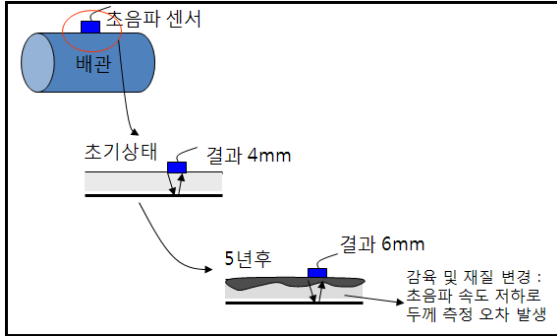


그림 1. 초음파를 이용한 배관 감육검사의 문제점

미국은 물론 일본(미하마발전소)과 한국(월성발전소)의 원자력발전소에서도 배관 파단이라는 중대 사고가 발생한다. 일본의 경우 원자력발전소 Over-haul 기간이 한국의 30 여일에 비해 2배가량 길다. 그럼에도 사고가 발생한 것은 배관 시스템이 매우 복잡하고 방대하여 제대로 진단을 하지 못했을 가능성이 높으며, 실제로 국내 원자력발전소의 경우에도 배관 시스템에 대한 전체적인 점검은 이루어지지 않고 있는 실정이다.



원전 배관 파단(일본 미하마)



원전 누설 발생(월성)

그림 2. 원전 배관 파단 사고 예

이러한 문제는 배관감육 측정 장비를 소형화 및 무선화 하면 개선될 수 있으나, 초음파나 와전류와 같은 펄스/리시버 형태의 비파괴 검사 장비는 센서 구동기, 벌크 데이터 전송, 그리고 배터리 충전 등의 문제로 무선화 시키기 어려운 점이 있다.

3. 펄스 와전류를 이용한 배관 감육검사

와전류 탐상은 금속 등의 도체에 자속을 작용시켜 도체내부에 생기는 와전류의 변화를 검출하는

시험 방법이다. 와전류 탐상 방법은 사용주파수의 중첩 정도에 따라 크게 단일 주파수 방법, 다중 주파수 방법, 그리고 펄스 와전류 방법으로 나누어진다. 단일 주파수 방법은 단일 주파수를 갖는 전류를 사용하여 탐상하는 방법이며, 다중 주파수 방법은 몇 개의 주파수가 중첩된 파를 이용하여 탐상하는 방법으로 단일 주파수 방법이 갖는 단점인 탐상 목적과 관계없는 인자에 의한 노이즈를 감소시켜 준다. 펄스 와전류 방법은 다중 주파수 방법을 보다 개선한 방법으로 적당한 형태를 갖는 펄스를 이용하여 탐상을 수행하는 방법으로 그 원리에 있어서 다중 주파수 방법과 유사하다. 이 방법은 현재 거의 실용화되어 있지는 않으나 잠재성이 높아 이에 관한 연구가 계속 진행되고 있다.

일반적인 와전류 탐상 기술은 특정한 정현파 교류를 코일에 인가한다. 그러나 펄스 와전류 탐상 기술은 스텝 전압을 코일에 인가한다. 이러한 스텝 전압을 사용함으로써 광대역의 주파수 대역을 코일에 인가하는 장점이 있다. 그 결과 다양한 주파수에 대한 전자기 응답은 단일스텝에 의해서 측정될 수 있고 침투 깊이가 여기 주파수에 의존되기 때문에 깊이 범위의 정보가 단 한 번에 측정될 수 있다. 만약에 측정이 시간영역에서 이루어진다면 결함이나 다른 부식 등의 신호가 검사코일에 의해서 거리의 특징으로 시간 영역에서 나타난다. 신호의 해석은 일반적으로 기준신호가 나타나고 이것은 다른 신호와 비교됨으로 두께, 부식 등 검출할 수 있다.

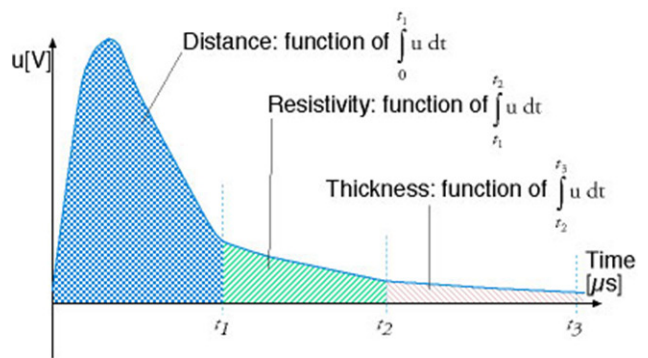


그림 3. 펄스 와전류 수집 파형

펄스 와전류 탐상 신호는 그림3과 같이 펄스와 전류 센서와 피검체 간의 거리, 피검체의 저항, 그리고 피검체의 두께에 대한 정보를 포함한다.

$t_2 \sim t_3$ 구간의 파형은 피검체의 두께 정보를 포함

하고 있다. 하나의 파형 전체 사이즈는 수 KByte를 차지하지만, 두께 정보를 포함하는 파형의 사이즈는 전체 사이즈의 약 1/3 수준을 차지한다. 또한 펄스 와전류 센서를 이용한 캘리브레이션을 통해 $t_2 \sim t_3$ 두께 구간 중 일부 포인트들의 값으로 두께 값을 정확히 알아낼 수 있다.

펄스 와전류 기법을 사용하면 피검체의 초음파 검사에서 발생하던 부식에 의한 검사 결과 오차가 전혀 발생하지 않는다. 피검체와 주위 환경에 따라 차이가 있기는 하지만 배관 감육 측정 결과로는 약 $0.02\mu\text{m}$ 오차범위까지도 정밀도를 얻을 수 있으며, 인슐레이션 된 배관의 경우에도 인슐레이션을 뜯어내지 않고 검사를 수행할 수 있다. 다만 현재까지의 기술로는 평판에 대한 측정은 매우 잘 수행되나, 곡면에 대한 측정에서는 반복적인 정확한 결과를 아직까지 얻지 못하고 있다는 것이다. 그러나 이 문제도 지속적인 연구와 실험을 통하여 1년 내에 해결될 것으로 예상하고 있다.

4. 원전 배관 감육검사를 위한 센서네트워크 구축요건

무선센서를 이용한 센서네트워크 구축에 있어 가장 큰 문제가 되는 것은 센서 배터리가 오래 사용될 수 있도록 환경을 설정해주는 것이다. 이를 위해서 노드들 간의 효율적인 연결방식과 전송 데이터 사이즈의 절감 연구가 지속되고 있으며, 더 나아가서는 에너지 자체 수급 연구가 활발하게 진행되고 있다.

펄스 와전류 기반 배관 감육 무선 검사용 센서네트워크를 구축하기 위해서는 펄스 와전류 검사 센서와 이 센서의 구동 및 신호 수집을 위한 펄스/리시버의 일체화 및 무선 통신 모듈 기능 추가가 우선 요구된다. 수집 신호의 전송량을 줄이기 위해서는 리시버 내에서 펄스 와전류 탐상 파형의 두께 구간 중 캘리브레이션에 의해 설정된 구간 정보만을 추출할 수 있는 기능도 요구되며, 이는 FPGA를 이용하여 해결할 수 있다. 그림 4는 통합된 펄스/리시버의 제어 논리회로를 보여주고 있는데, 무선 통신 부분은 시리얼 통신을 사용한다.

펄스 와전류 센서 모듈의 전력 공급을 위한 배터리 기술로는 방사선을 이용한 원자력전지 기술

을 적용할 수 있으나, 이 기술의 실제 적용을 위해서는 실용화 연구가 필요한 상황이다.

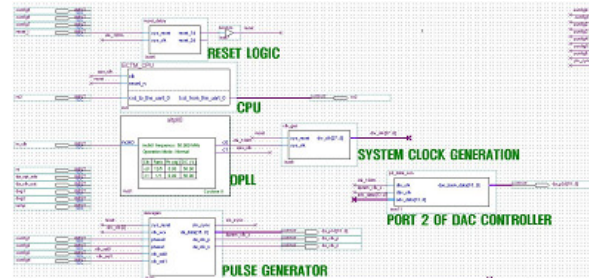


그림 4. 펄스/리시버의 제어논리 일부 회로

5. 결론

현재까지 비파괴 검사를 무선센서 방식을 이용하여 수행하는 기술은 도입된 바 없다. 이는 비파괴 검사 장비 자체를 온도센서와 같은 일반적인 무선센서처럼 소형화 및 저전력화 하지 못했던 이유와 매니플레이터 방식에 의존한 검사 기법의 채택에 기인하고 있다고 판단된다.

펄스 와전류를 이용한 배관감육 측정에는 굳이 매니플레이터 방식을 채택하지 않아도 되며, 장시간의 주기 마다 한 번씩 검사를 수행하면 된다. 따라서 펄스 와전류 센서와 펄스/리시버의 일체화·소형화·무선화를 통해 간단하게 무선센서네트워크 기반의 배관 감육 측정 환경을 구현할 수 있다.

초음파 기술 분야에서는 다중 초음파 기법이 본격적으로 사용되기 시작하였으므로, 특정 구간에 대한 초음파 검사의 경우에도 본 논문에서 제안하는 기술을 직접 응용할 수 있다.

[참고문헌]

- [1] Li, Y., Tian, G.Y., Simm, A. Fast analytical modelling for pulsed eddy current evaluation, NDT and E International, Volume 41, Issue 6, September 2008.
- [2] Zheng, G., Liu, D., Zhang, Z., Li, H. Research on thickness measurement based on lift-off intersection of pulsed eddy current, Chinese Journal of Scientific Instrument, Volume 29, Issue 8, August 2008.