

시뮬레이션을 활용한 수냉벽 튜브 원격장 와전류 센서

길 두 송 선임연구원 / 한전전력연구원 청정발전연구소
doosong.gil@kepcoco.kr

화력발전은 국내 발전량 중 가장 높은 비율을 차지하고 있으며, 그중 석탄보일러 발전이 가장 높은 비율을 차지하고 있다. 석탄보일러는 석탄 연소 중 유해 물질 및 미세먼지가 발생하여 대기오염에 심각한 영향을 미친다. 이에 친환경 석탄보일러로 유동층 보일러가 도입되었으며, 이는 유동 매체를 활용하여 기존의 석탄보일러보다 1/10 정도 적은 오염물질을 배출한다. 수냉벽 튜브는 이 유동층 보일러에서 중요한 역할을 하는 구조물로 유동층보일러의 특성상 기존의 보일러보다 외벽 손상이 심하지만, 아직까지 이에 대한 정량적인 유지보수 기법이 없는 실정이다.

원격장 와전류 탐상은 튜브 형태의 내외벽 검사에 많이 사용되는 비파괴평가 기법으로, 비접촉이며 빠른 검사가 장점이다. 하지만 원격장 와전류 탐상은 본래 배관 내부에서 진행되는 검사이며, 수냉벽 튜브는 특성상 내부 진입이 불가능하다. 이에 전력연구원에서는 시뮬레이션을 활용해 유동층 보일러 수냉벽 튜브에 적합한 외부 원격장 와전류 탐상 센서에 대한 설계를 진행하고

시뮬레이션을 수행하였으며, 기존 원격장 와전류 탐상과 유사한 신호를 얻음으로서 추후 제작될 원격장 와전류 탐상 센서에 대한 기준을 제시하였다.

1. 서론

한국 경제의 발전과 그에 따른 국민의 소득 향상으로 인해, 전력 소비량은 꾸준히 증가하고 있는 추세이다. 그림 1은 국내에서 사용된 총 전력량을 나타내는 그래프이며, 2006년도부터 2015년까지 꾸준히 상승하는 것을 확인할 수 있다. 경제성장은 산업의 발전으로부터 시작이 되었으며, 특히 한국은 제조업의 발전으로 인해 전력 소모량이 상당하다.

부족한 전력을 보충하기 위해 발전설비들 또한 급격하게 증가를 하였으며, 그중 가장 많은 부분을 차지하는 것이 화력발전이다. 화력발전은 석탄을 이용한 발전이 많은 부분을 차지하고 있으며, 매장량이 풍부하기

시물레이션을 활용한 수냉벽 튜브 원격장 와전류 센서

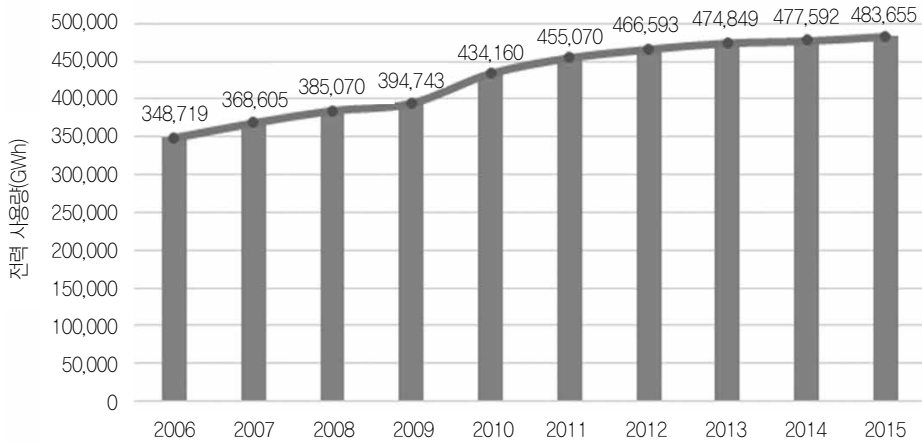


그림 1. 국내 총 전력 사용량

때문에 낮은 발전단가를 유지할 수 있어 지금까지 저지 발전원으로 활용되었다. 그림 2는 2000년도부터 2016년도까지의 우리나라 전원 현황에 대한 변화 추이를 나타내고 있으며, 비록 수력 및 대체 발전 등의 방법으로 발전량을 대신하고 있지만 여전히 화력발전은 우리나라 전체 발전의 반 이상을 차지하고 있을 뿐만 아니라, 이를 한 번에 대체시키는 것도 불가능하다.

화력발전소는 대기오염에 심각한 영향을 미치며, 특히 석탄 화력발전은 연소과정 중에 질소산화물(NOx)과 황산화물(SOx)이 배출되어 대기오염의 주범이라 할 수 있다. 그렇기에 정부는 2030년까지 화력발전소가 차지하는 비중을 약 25% 수준까지 축소할 것을 제안하였으며, 석탄 화력발전의 입지가 줄어들든 만큼 친환경적인 화력발전에 대한 연구 개발이 활발하고 그 결과물 중의 하나가 유동층보일러이다.

기존 보일러는 석탄만을 연소시켰지만, 유동층 보일러는 유동매체와 석탄을 같이 주입시켜 연소 온도를 1500도에서 950도까지 낮출 수 있는 친환경 기술의 하

나이며, 낮은 온도에서 연소되는 석탄은 그렇지 않은 경우보다 황산화물은 약 1/10배, 질소산화물은 약 1/4배까지 감소시켜 배출된다.

수냉벽 튜브는 유동층 보일러에서 중요한 역할을 하는 튜브군의 하나로 모래와 같은 유동 매체로 인해 기존의 수냉벽 튜브보다 외벽 손상이 쉽게 일어나지만, 아직까지 국내에서 수냉벽 튜브 외벽을 검사하거나 평가하는 기술에 대한 연구가 부족한 실정이다.

원격장 와전류 탐상은 대표적인 비파괴평가 기법 중의 하나이며, 검사 속도가 빠르고 비접촉식 검사라는 점에서 다양한 분야에서 널리 활용 중이다. 특히, 가스배관 등 튜브 형태의 구조물 검사에 가장 많이 사용되고 있지만, 원격장 와전류 탐상은 기본적으로 튜브 내부에서 진행되어 구조적 특성상 내부에서 검사를 진행할 수 없기 때문에 시물레이션을 활용하여 수냉벽 튜브 외벽을 검사할 수 있는 원격장 와전류 센서의 설계를 목표로 하고 있다.

다양하게 활용되는 스마트 센서

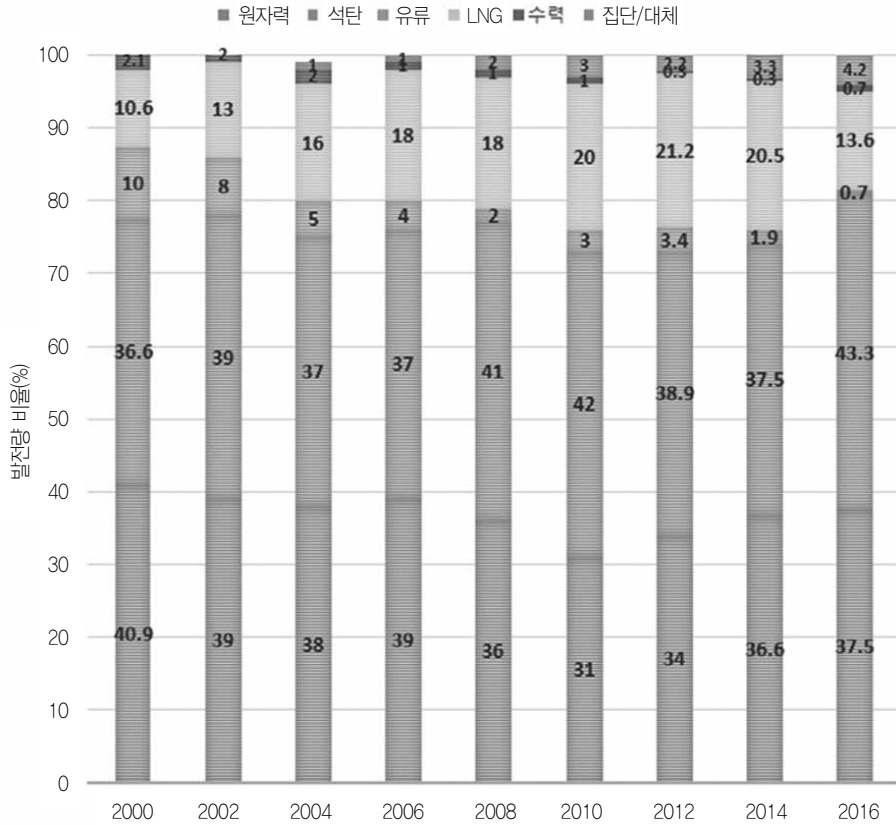


그림 2. 국내 발전량 현황

2. 이론

센서 개발을 위해 활용된 기법은 원격장 와전류 탐상(Remote Field Eddy Current Testing, RFECT)이다. 원격장 와전류 탐상은 와전류 탐상의 응용 기법으로써 전자기를 활용하여 주로 배관검사에서 적용되는 비파괴 평가 기법의 하나로서, 기본 원리는 와전류 탐상과 같기 때문에 먼저 와전류 탐상에 대한 이해가 필요하다.

(1) 와전류 탐상

그림 3은 와전류 탐상의 도식화한 것으로서 코일에 교류전류를 인가해 준 후 자성체 시편에 근접하게 되면,

패러데이의 법칙(Faraday's Law)에 의해 자기장이 형성 되는데, 이를 1차 자기장이라 한다. 이 자기장은 다시 렌츠의 법칙(Lenz's Law)에 의해 기존 방향과는 반대되는 방향의 전류를 생성하게 된다. 교류전류를 인가해 주었기 때문에 이 전류는 맴도는 형태를 띠며, 이를 맴돌이 전류 또는 와전류라고 칭한다.

이 와전류는 다시 자기장을 형성하는데, 코일에 의해 생성된 1차 자기장과 와전류에 의해 생성된 2차 자기장이 서로 상호 간섭을 일으키고, 여기에서 발생하는 임피던스 변화를 측정하여 결함 및 물성평가를 할 수 있는 기법이다.

시뮬레이션을 활용한 수냉벽 튜브 원격장 와전류 센서

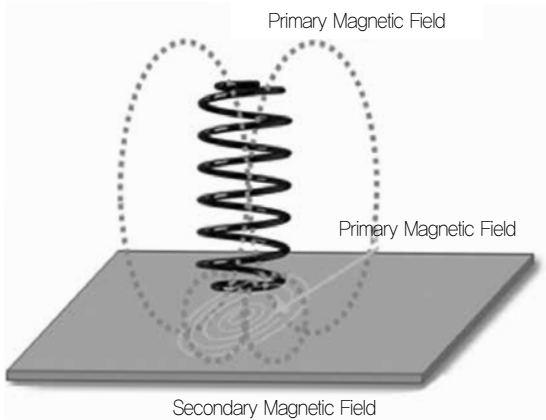


그림 3. 와전류 탐상 도식도

(2) 원격장 와전류 탐상

원격장 와전류 탐상은 배관에 유도된 와전류에 의해 생긴 2차 자기장이 계속해서 배관을 따라 와전류를 유도하고, 다시 자기장을 생성하는 것을 반복하며, 배관 전체에 와전류를 유도하는 것이 원격장 와전류 탐상이다. 그림 4는 원격장 와전류 탐상을 도식화하여 나타낸 것이다.

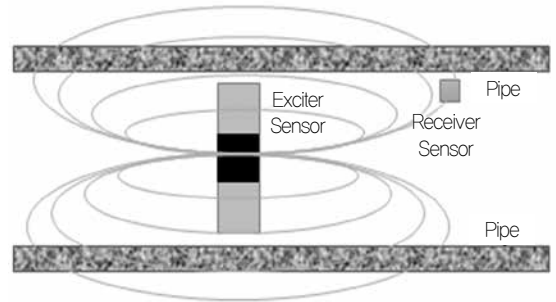


그림 4. 원격장 와전류 탐상 도식도

기본적인 원격장 와전류 탐상의 신호는 발생(Exciter) 센서의 거리에 따라 총 3가지 구역으로 나누어지게 된다. 1차 자기장 영역(Direct-field zone)은 발신자(Exciter) 센서에서 형성된 1차 자기장의 영향만이 존재하는 영역으로 자기장 세기가 강하지만 그 신호가 불안정한 영역이다. 임계영역(Transition Zone)은 발신자(Exciter) 센서에서 형성된 1차 자기장과, 와전류에 의해 형성된 2차 자기장의 상쇄가 일어나는 영역으로 자기장 신호가 급격하게 감소하는 영역이다. 마지막으로 원격장 영역(Remote-field zone)은 2차 자기장의 영향만이 존재

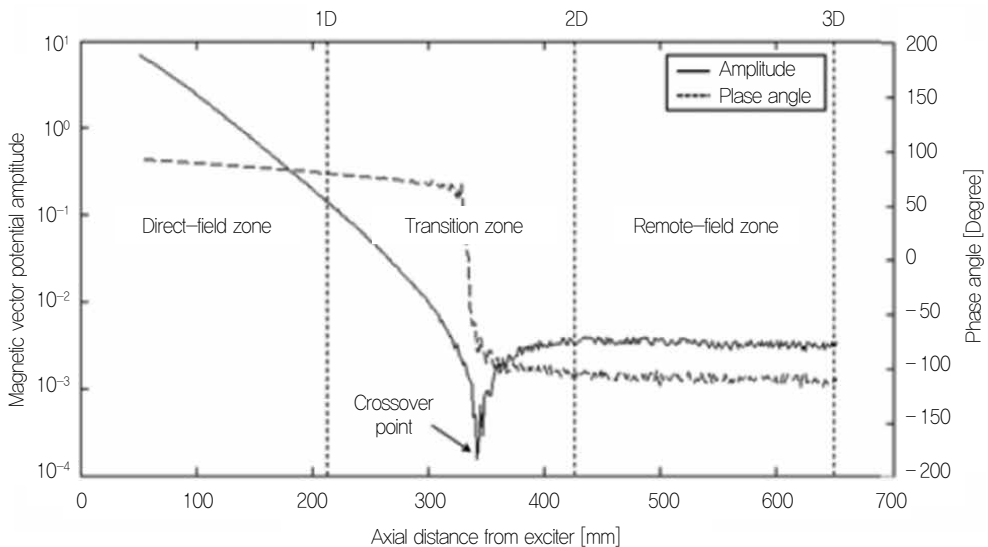


그림 5. 발신자(Exciter) 센서 거리에 따른 와전류 탐상 신호

다양하게 활용되는 스마트 센서

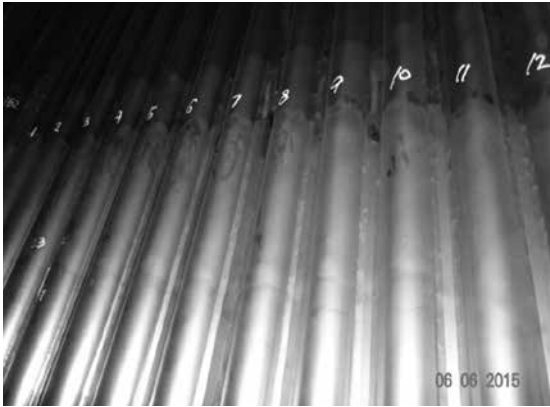


그림 6. 유동층 보일러 수냉벽 튜브

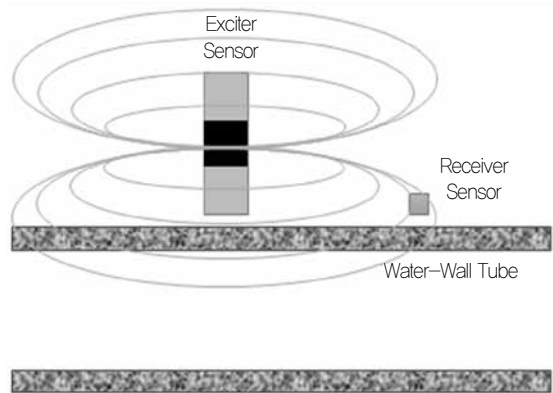


그림 7. 외부 원격장 와전류 탐상 도식도

하는 영역으로 자기장 신호의 세기는 1차 자기장 영역(Direct-field zone)보다는 작지만, 그 크기가 일정하기 때문에 신호수신(Receiver) 센서를 1차 자기장 영역(Direct-field zone)에 위치시켜 검사를 진행하게 된다. 그림 5는 모든 원격장 와전류 탐상에서 공통적으로 형성되는 자기장 신호로서 연구원에서 새롭게 설계한 발신자(Exciter) 센서를 이용하여 그림 5와 같은 신호를 얻어낸다면 적절한 설계를 하였다고 판단할 수 있다.

(3) 외부 원격장 와전류 탐상

서론에서 언급한 바와 같이 원격장 와전류 탐상은 기본적으로 배관 내부에서 원형 형태의 발신자(Exciter) 센서가 배관을 따라 검사를 진행하는 기법이다. 하지만 검사하고자 하는 유동층 보일러 수냉벽 튜브는 내부로 발신자(Exciter) 센서 진입이 어렵고, 멤브레인(수냉벽 튜브와 튜브 사이의 연결부) 때문에 원형 형태의 발신자(Exciter) 센서로 검사가 불가능하다. 그렇기 때문에 외부로 진행하며 수냉벽 튜브 외벽에 적절한 와전류를 유도할 수 있는 반원 형태의 발신자(Exciter) 센서를 설계하고자 하였다. 그림 6은 실제 수냉벽 튜브 사진을 나타내며, 튜브와 튜브 사이의 연결부인 멤브레인(Membrane)으로 인하여 튜브의 절반밖에 검사를 수행할 수

없음을 확인할 수 있다.

그림 7은 외부 원격장 와전류 탐상의 도식도를 나타내며, 발신자(Exciter) 센서와 수신자(Receiver) 센서가 수냉벽 튜브 외벽에 위치하여 검사를 진행한다. 기본적인 이론은 원격장 와전류 탐상과 모두 동일하며, 보통 원격장 와전류 탐상에서 수신자(Receiver) 센서로 GMR(Giant Magneto Resistive)센서, 코일센서 등을 사용한다.

3. 원격장 와전류 탐상 시뮬레이션

원격장 와전류센서 제작을 위하여 COMSOL Multiphysics라고 하는 시뮬레이션 툴(Tool)을 사용하였으며, 이를 통하여 전자기적 현상을 사용자가 원하는 환경에 맞게 구현할 수 있다.

① 형상화 모델링

시뮬레이션에서 가장 기본적인면서도 중요한 것이 형상화 모델링이며, 기본적으로 3D 시뮬레이션은 파일 자체가 크기 때문에 정말 필요한 부분만 형상화하는 것

시뮬레이션을 활용한 수냉벽 튜브 원격장 와전류 센서

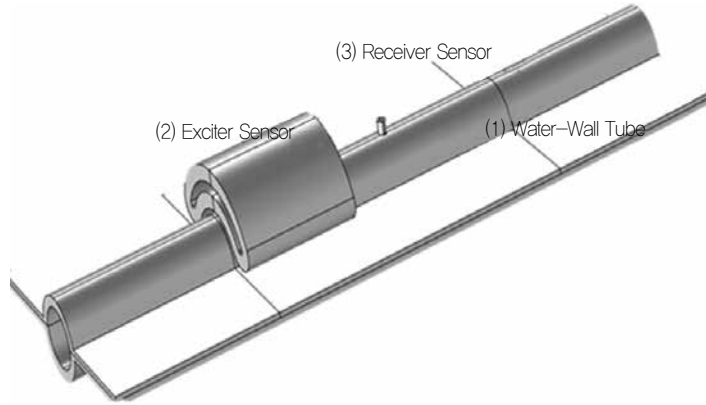


그림 8. 수냉벽 튜브 형상화 모델링

이 중요하다. 물론 실제로 검사하고자 하는 영역을 전부 형상화하면 좋지만, 시간이 오래 걸리기 때문에 매우 비효율적이며, 그림 8은 시뮬레이션을 통하여 형상화한 모델링이다.

그림 8에서 보는 바와 같이 전체 형상화 모델링은 수냉벽 튜브와 발신자(Exciter) 센서 및 수신자(Receiver) 센서의 3가지로 크게 구분된다.

② 형상화 모델링 수냉벽 튜브(Water-Wall Tube)

수냉벽 튜브는 튜브끼리 멤브레인(Membrane)으로 연결되어 있고, 그림 8에서 볼 수 있는 바와 같이 튜브 양쪽에 날개와 같은 것이 멤브레인을 형상화한 것이며, 시간적인 효율성을 높이기 위해 여러 개의 튜브를 형상화하기보다는 하나의 튜브만 형상화하였고, 표 1은 수냉벽 튜브의 상세 사이즈를 나타낸다.

파이프 길이	380 [mm]
파이프 직경	39 [mm]
파이프 두께	5 [mm]
멤브레인 두께	5 [mm]
멤브레인 길이	50.5 [mm]

표 1. 수냉벽 튜브 상세 사이즈

대상 수냉벽 튜브는 초임계압 관류형 재열보일러에서 활용되는 수냉벽 튜브를 대상으로 형상화하였으며, 유동층 보일러와 그 형상은 매우 비슷하다고 할 수 있다.

4. 외부 원격장 와전류 탐상 신호 분석

발신자(Exciter) 센서로부터의 거리에 따른 신호가 기존의 원격장 와전류 탐상과 유사하다면 적절한 설계가 되었다고 생각할 수 있으며, 중점적으로 생각해야 할 부분은 기존 원격장 와전류 탐상과 유사한 신호를 얻을 수 있는가에 달려 있다.

시뮬레이션 상으로는 수신자(Receiver) 센서 성능에 따른 자기장 세기를 비교할 수 없기 때문에 와전류에 의해 생성된 2차 자기장을 100% 수신하였을 경우를 가정하였으며, 수신자(Receiver) 센서는 원거리 장 영역(Remote-field zone)의 자기장을 수신한다.

하지만, 원거리 장 영역(Remote-field zone)의 자기장은 와전류에 의해 생성된 2차 자기장으로 그 세기가 매우 작기 때문에 수신자(Receiver) 센서는 매우 민감해

다양하게 활용되는 스마트 센서

야 하며, 민감도를 높이기 위해서는 기전력이 높아야 한다.

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt} \quad \dots (1)$$

(단, ε : 기전력[V], N : 권선수, Φ_B : 자속 밀도[T])

식 (1)은 맥스웰-패러데이 법칙을 나타내며, -부호는 렌츠의 법칙에 의해 생긴 것이다. 식 (1)에서 자속 밀도는 발신자(Exciter) 센서에 따라 고정되는 값이므로 기전력을 높이기 위해서는 권선수를 높여야 하며, 발신자(Exciter) 센서의 방향에 따라 수신자(Receiver) 센서가 수신하는 자기장의 세기가 다르기 때문에 이에 대한 비교 분석을 진행해 보았다. 그림 9와 같이 각각 축(Axial)과 원주(Radial) 방향으로 센서를 두었을 경우 수신하는 신호를 비교하였으며, 수신자(Receiver) 센서의 방향에 따른 원격장 와전류 탐상 결합 신호분석 결과 원주(Radial) 방향의 결합 신호 크기가 축(Axial) 방향의 결합 신호보다 큰 것을 확인할 수 있다.



그림 9. 수신자(Receiver) 센서 방향

5. 결론

시뮬레이션 프로그램인 COMSOL Multiphysics를 활용하여 외부 원격장 와전류 탐상 발신자(Exciter) 센서에 대한 설계를 진행하였으며, 기존의 내부에서 진행되는 원격장 와전류 탐상과 비슷한 신호를 얻는 것을 설계 기준으로 설정하였고, 결과적으로 유사한 신호를 얻었다.

전력연구원에서는 시뮬레이션을 활용하여 외부에서 튜브 형태를 검사할 수 있는 원격장 와전류 탐상을 위한 발신자(Exciter) 센서를 설계하였으며, 발신자(Exciter) 센서의 길이, 권선수, 코일의 선경 등 전반적으로 센서에 영향을 미치는 주요 인자에 대한 비교 분석이 진행된다면, 실제 코일을 감을 때 시간과 비용 소모를 줄일 수 있을 것이라 생각된다.

또한, 수신자(Receiver)의 방향에 따른 자기장 세기 분석을 통해 어느 방향으로 수신자(Receiver) 센서가 놓이는 것이 좀 더 효과적인가에 대한 분석을 수행하였으며, 결과적으로 외부에서 진행되는 원격장 와전류 탐상 센서인 발신자(Exciter) 센서와 수신자(Receiver) 센서에 대한 설계와 시뮬레이션을 진행하여 센서 제작을 위한 코일을 감을 경우에 있어서 참고가 될 수 있는 토대를 제시하였다.