

Design of Remote Field Eddy Current Sensor for Water-Wall Tube Inspection using Simulation

시뮬레이션을 활용한 유동층보일러 수냉벽튜브 검사용 원격장 와전류 탐상 센서 설계

Doo Song Gil^{1†}, Chan Wool Kwon², Yong-Sang Cho¹, Hak-Joon Kim²
길두송^{1†}, 권찬울², 조용상¹, 김학준²

Abstract

Thermal power generation accounts for the highest percentage of domestic power generation, among which coal-fired boiler generation accounts for the highest percentage. Coal boilers generate harmful substances and fine dust during coal combustion and have a serious effect on air pollution. So, fluidized-bed boilers have been introduced as eco-friendly coal boilers. It uses a fluid medium which affect the combustion temperature of coal. Because of it fluidized-bed boilers emit less pollutants than original one. Water-wall tubes play an important role in this fluidized bed boiler. Due to the fluid medium, the wall damage is more severe than the existing boiler. However, there is no quantitative maintenance technique in Korea yet. Remote field eddy current testing is a non-destructive evaluation technique that is often used for inspection of inner and outer wall of tube. it can inspect with non-contact and high speed. However, it is an inspection that proceeds from inside the pipe, and the water-wall tube is not able to enter the interior. In this study, we designed and simulated an external remote field eddy current sensor suitable for water-wall tube of a fluidized - bed boiler using simulations. By obtaining a signal similar to the existing remote field eddy current test, the criteria for the external remote field eddy current sensor design can be presented.

화력발전은 국내 발전량 중 가장 높은 비율을 차지하고 있으며, 그 중 석탄보일러 발전이 가장 높은 비율을 차지하고 있다. 석탄보일러는 석탄 연소 중 유해 물질 및 미세먼지가 발생하여 대기오염에 심각한 영향을 미친다. 이에 친 환경 석탄 보일러로 유동층보일러가 도입 되었으며, 이는 유동매체를 활용하여 기존의 석탄보일러보다 약 1/10정도 적은 오염물질을 배출한다. 수냉벽튜브는 이 유동층보일러에서 중요한 역할을 하는 구조물로, 유동층보일러의 특성상 기존의 보일러보다 외벽 손상이 심하다. 하지만 아직까지 이에 대한 정량적인 유지보수 기법이 없다. 원격장 와전류 탐상은 튜브형태의 내, 외벽 검사에 많이 사용되는 비파괴평가 기법으로, 비접촉이며 빠른 검사가 장점이다. 하지만 원격장 와전류 탐상은 본래 배관 내부에서 진행되는 검사이며, 수냉벽튜브는 특성상 내부 진입이 불가능하다. 이에 본 연구에서는 시뮬레이션을 활용해 유동층보일러 수냉벽튜브에 적합한 외부 원격장 와전류 탐상 센서에 대한 설계를 진행하고, 시뮬레이션을 수행하였으며, 기존 원격장 와전류 탐상과 유사한 신호를 얻음으로써 추후 실제 제작 될 원격장 와전류 탐상 센서에 대한 기준을 제시하였다.

Keywords: RFECT, Remote Field Eddy Current Testing, RFECT Simualtion, RFECT Sensor, Non-Destructive Evaluation, Water-Wall Tube, Fluidized boiler

Manuscript received July 27, 2017, Accepted January 26, 2019

¹ KEPCO Research Institute, Korea Electric Power Corporation, 105 Munji-ro Yuseong-gu, Daejeon 34056, Korea

² School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University,

† doosong.gil@kepco.co.kr

This paper is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International Public License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>. This paper and/or Supplementary information is available at <http://journal.kepco.co.kr>.

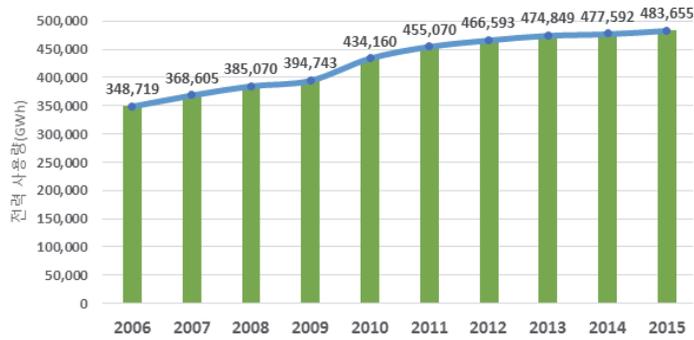


Fig. 1. 연도별 국내 총 전력 사용량 [1].

I. 서론

한국 경제의 발전과 그에 따른 국민의 소득향상으로 인해, 전력 소비량은 꾸준히 증가 하고 있는 추세이다 [1]. Fig. 1은 국내에서 사용된 총 전력량을 나타내는 그래프이며, 2006년도부터 2015년까지 꾸준히 상승하는 것을 확인할 수 있다. 경제 성장은 산업의 발전으로부터 시작되었으며, 그 중 특히 한국은 제조업의 발전으로 인해 전력소모량이 상당하다.

부족한 전력을 보충하기 위해 발전설비들 또한 급격하게 증가하였으며, 그 중 가장 많은 부분을 차지하는 것이 화력발전이다. 화력발전은 석탄을 이용한 발전이 많은 부분을 차지하고 있다. 석탄은 매장량이 풍부하기 때문에 낮은 발전단가를 유지 할 수 있어 지금까지 기저발전원으로 활용되었다. Fig. 2는 2000년도부터 2016 년도까지의 우리나라의 전원현황에 대한 변화 추이를 나타내며 [2] Fig. 2에서 석탄, 유류, LNG는 화력발전에 속한다. Fig. 2에서처럼 비록 수력 및 대체 발전 등의 방법으로 발전량을 대신하고 있지만 여전히 화력발전은 우리나라 전체 발전의 반 이상을 차지하고 있으며, 이를 한 번에 대체시키는 것 또한 불가능하다.

하지만 화력 발전소는 대기오염에 심각한 영향을 미치며, 특히 석탄 화력발전은 연소과정 중에 질소산화물(NOx)과 황산화물(SOx)이 배출되며 이는 대기오염에 주범이라 할 수 있다 [3]. 그렇기에 정부는 2030년까지 화력발전소가 차지하는 비중을 약 25%수준까지 축소할 것을 제안하였다 [4]. 석탄 화력발전의 입지가 줄어들 만큼, 친환경적인 화력 발전에 대한 연구개발이 활발하며, 그 결과물 중의 하나가 유동층보일러이다.

기존 보일러는 석탄만을 연소시켰지만, 유동층보일러는 유동매체와 석탄을 같이 주입시켜 연소 온도를 1,500도에서 950도까지 낮출 수 있는 친환경 기술의 하나이다. 낮은 온도에서 연소되는 석탄은 그렇지 않은 경우보다 황산화물은 약 1/10배, 질소산화물은 약 1/4배 감소 배출된다 [5].

수냉벽튜브는 유동층보일러에서 중요한 역할을 하는 튜브군의 하나로, 모래와 같은 유동매체로 인해 기존의 수냉 벽튜브보다 외벽손상이 쉽게 일어난다. 하지만 아직까지 국

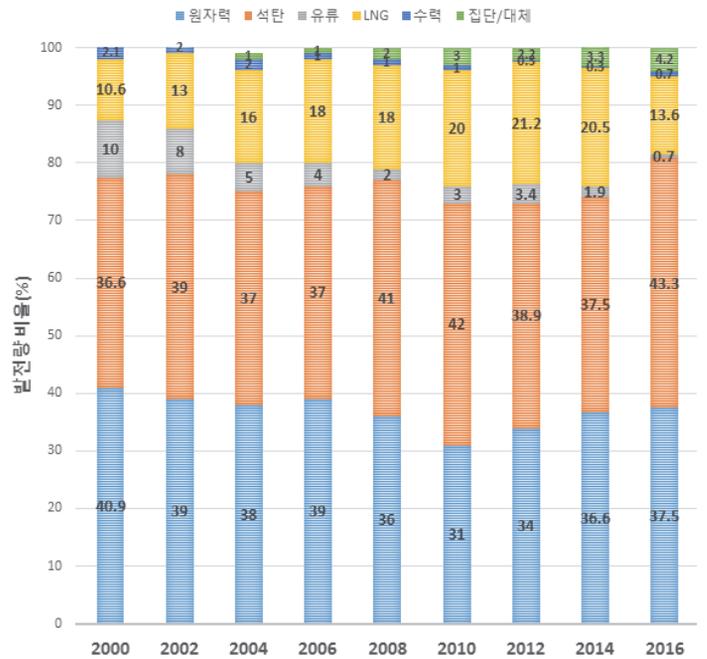


Fig. 2. 국내 발전량 현황 [2].

내에서 수냉벽튜브 외벽을 검사하거나 평가하는 기술에 대한 연구가 부족하다.

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 있다. 하지만, 원격장 와전류 탐상은 기본적으로 튜브 내부에서 진행되고, 수냉벽튜브는 구조적 특성상 내부에서 검사를 진행할 수 없다. 이에 본 연구에서는 시뮬레이션을 활용하여 수냉벽튜브 외벽을 검사할 수 있는 원격장 와전류 센서 설계를 하는 것을 목표로 하고 있다.

II. 이론

본 연구에서 활용된 기법은 원격장 와전류 탐상 (Remote Field Eddy Current Testing, RFECT)이다. 원격장 와전류 탐상은 와전류 탐상의 응용기법으로서 전자기를 활용하여 주로 배관검사에서 적용되는 비파괴평가 기법이다. 바탕 원리는 와전류 탐상과 같기 때문에 먼저 와전류 탐상에 대한 이해가 필요하다.

A. 와전류 탐상

Fig. 3은 와전류 탐상의 도식화된 그림이다. Fig. 3과 같이 코일에 교류 전류를 인가해 준 뒤, 자성체 시편에 근접하게 되면, 패러데이의 법칙(Faraday's Law)에 의해 자기장이 형성되는데 이를 1차 자기장이라 한다. 이 자기장은 다시 렌츠의 법칙(Lenz's Law)에 의해 기존 방향과는 반대되는

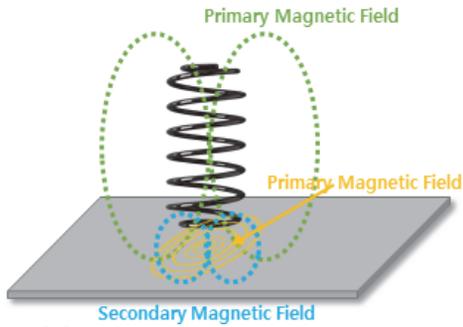


Fig. 3. 와전류 탐상 도식도.

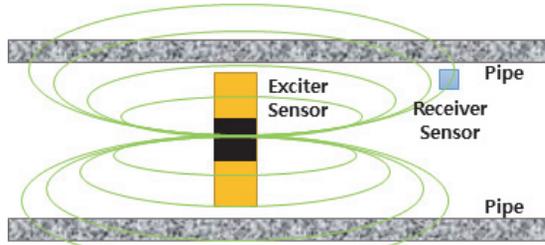


Fig. 4. 원격장 와전류 탐상 도식도.

방향의 전류를 생성하게 된다. 교류 전류를 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 일으키며, 여기에서 발생하는 임피던스 변화를 측정하여 결함 및 물성평가를 할 수 있는 기법이다 [6].

B. 원격장 와전류 탐상

원격장 와전류 탐상의 기본적 이론은 와전류 탐상과 같다. 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. Fig. 4는 원격장 와전류 탐상의 도식화된 그림을 나타낸다 [7].

Fig. 5는 기본적인 원격장 와전류 탐상의 신호를 나타낸다. 신호발생(Exciter) 센서의 거리에 따라 총 3가지 구역으로 나누어지게 된다. 1차 자기장영역(Direct-field zone)은 Exciter 센서에서 형성된 1차 자기장의 영향만이 존재하는 영역으로 자기장 세기가 강하지만 그 신호가 불안정한 영역이다. 임계영역(Transition Zone)은 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 존재하는 영역으로 자기장 신호의 세기는 Direct-field zone보다는 작지만, 그 크기가 일정하기 때문에, 신호수신(Receiver) 센서를 Direct-field zone에 위치시켜 검사를 진행하게 된다 [8]. Fig. 5는 모든 원격장 와전류 탐상에서 공통적으로 형성되는 자기장 신

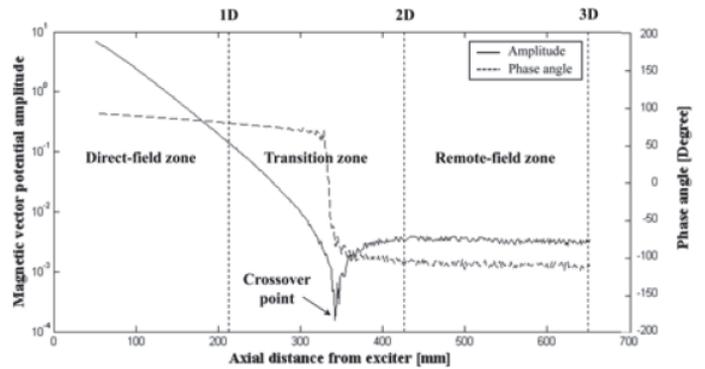


Fig. 5. Exciter 센서 거리에 따른 격장 와전류 탐상 신호 [9].



Fig. 6. 실제 유동층보일러 수냉벽튜브.

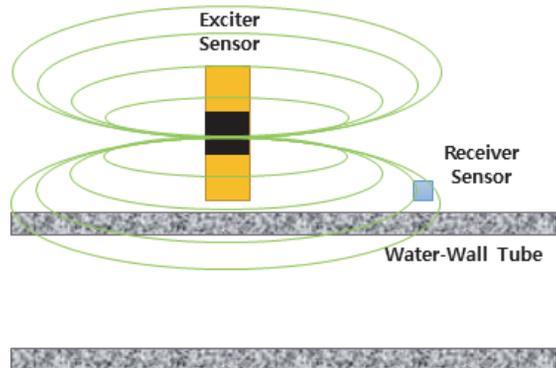


Fig. 7. 외부 원격장 와전류 탐상 도식도.

호로서, 본 연구에서 새롭게 설계한 Exciter 센서를 이용하여 Fig. 5와 같은 신호를 얻어 낸다면, 적절한 설계를 하였다고 판단 할 수 있다.

C. 외부 원격장 와전류 탐상

서론에서도 언급하였지만, 원격장 와전류 탐상은 기본적으로 배관 내부에서 원형 형태의 Exciter 센서가 배관을 따라 검사를 진행하는 기법이다. 하지만 본 연구에서 검사하고자 하는 유동층보일러 수냉벽튜브는 내부로 Exciter 센서 진입이 어렵고, 또한 멤브레인(수냉벽튜브와 튜브 사이의 연결부) 때문에, 원형 형태의 Exciter 센서로 검사가 불가능하다. 그렇기 때문에 본 연구에서는 외부로 진행하며 수냉벽튜브 외벽에 적절한 와전류를 유도할 수 있는 반원 형태의 Exciter 센서를 설계하고자 하였다. Fig. 6은 실제 수냉벽튜브 사진을 나타내며, 보는 바와 같이 튜브와 튜브 사이의 연결부인 멤브레인으로 인하여 튜

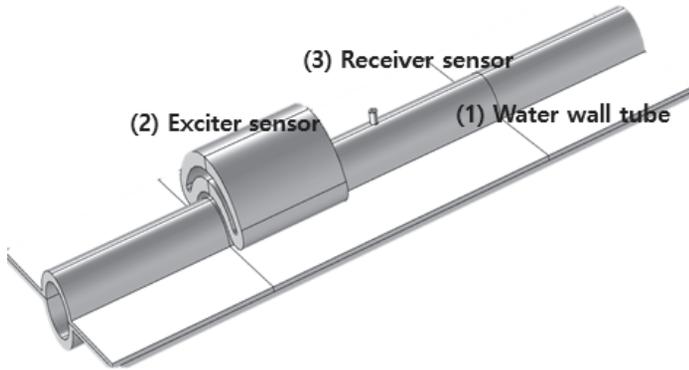


Fig. 8. 수냉벽튜브 형상화 모델링.

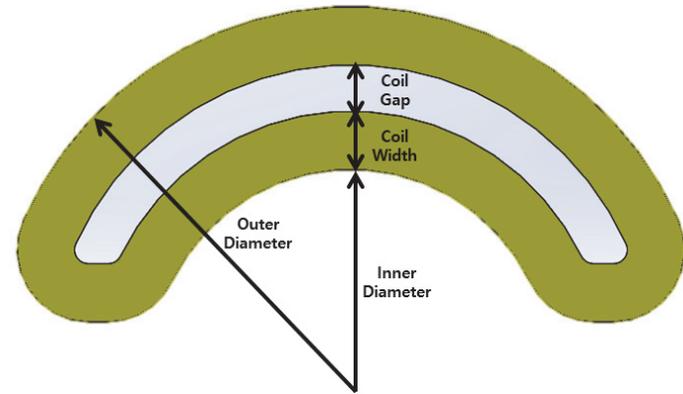


Fig. 9. Exciter 센서.

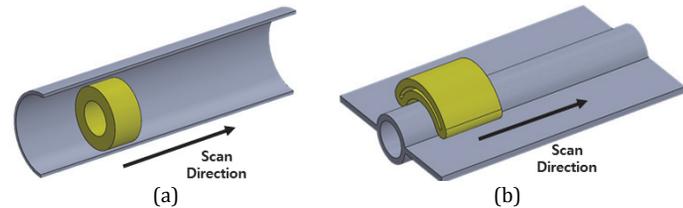


Fig. 10. Exciter 센서 검사 방법. (a) 기존 원격장 와전류 탐상, (b) 외부 원격장 와전류 탐상.

브의 절반 밖에 검사를 수행할 수 없음을 확인할 수 있다.

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

III. 원격장 와전류 탐상 시뮬레이션

본 연구에서 사용된 시뮬레이션 툴(Tool)은 COMSOL Multiphysics 이다. COMSOL Multiphysics는 전자기적 현상을 사용자가 원하는 환경에 맞게 구현할 수 있다.

Table 1. 수냉벽튜브 상세 사이즈

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

Table 2. Exciter 센서 상세 사이즈

Exciter 센서 외경	79.2 [mm]
Exciter 센서 내경	44 [mm]
Exciter 센서 두께	6.3 [mm]
Exciter 센서 Gap	3 [mm]
Exciter 센서 권선 수	385
코일 선경	0.85 [mm]

Table 3. Receiver 센서 상세 사이즈

Receiver 센서 외경	5 [mm]
Receiver 센서 내경	3 [mm]
Receiver 센서 길이	3 [mm]
Exciter 센서 권선 수	11,200
코일 선경	0.02 [mm]

A. 형상화 모델링

시뮬레이션에서 가장 기본적이면서도 중요한 것이 형상화 모델링이다. 기본적으로 3D 시뮬레이션은 파일 자체가 크기 때문에 정말 필요한 부분만 형상화하는 것이 중요하다. 물론 실제로 검사하고자 하는 영역을 전부 형상화하면 좋지만, 시간이 오래 걸리기 때문에 매우 비효율적이다.

Fig. 8은 본 연구에서 활용된 시뮬레이션 형상화 모델링이다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이, 전체 형상화 모델링은 크게 3가지로 구분된다. (1)수냉벽튜브 (2) Exciter 센서, (3) Receiver 센서이다.

1) 수냉벽튜브(Water-Wall Tube)

II. C절에서 언급하였듯이 수냉벽튜브는 튜브끼리 멤브레인으로 연결되어 있다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이, 튜브 양쪽에 날개와 같은 것이 멤브레인을 형상화한 것이며, 여러 개의 튜브를 형상화하기보다는 하나의 튜브만 형상화하였다. 그 이유는 위에서 언급하였듯이 시간적인 효율성을 높이기 위해서이다. Table 1은 수냉벽튜브의 상세 사이즈를 나타낸다.

대상 수냉벽튜브는 초임계압 관류형 재열보일러에서 활용되는 수냉벽튜브를 대상으로 형상화하였다 [10]. 유동층보일러와 그 형상은 매우 비슷하기 때문에 큰 무리가 없다고 판단하였다.

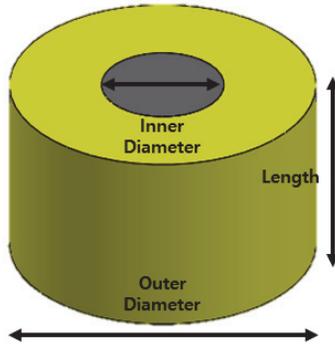


Fig. 11. Receiver 센서.

2) Exciter 센서

Fig. 9은 본 연구에서 활용된 Exciter 센서의 형상을 나타낸다. II. C절에서도 언급하였듯이, 기존의 원격장 와전류 탐상 Exciter 센서와는 다른 형태의 설계가 필요했고, 그 형태가 Fig. 9과 같은 반원 형태이다.

Fig. 10(a)는 기존에 사용하는 원형 형태의 Exciter 센서 형상을 활용한 원격장 와전류 탐상 검사 방법이고, Fig. 10(b)는 본 연구에서 설계 한 반원 형태의 Exciter 센서의 검사 방법을 나타낸다.

Table 2 및 Fig. 9는 Exciter 센서의 상세 사이즈를 나타낸다.

3) Receiver 센서

Fig. 11은 Receiver 센서를 나타낸다. 보통 GMR 센서와 코일(coil) 센서가 Receiver 센서로 활용되지만, 본 연구에서는 코일(coil) 센서를 사용하였다.

코일(coil) 센서를 Receiver 센서로 사용할 경우, 배관의 직경에 따라 Receiver 센서의 크기 및 개수가 정해진다. 하지만 본 연구에서는 Exciter 센서 설계를 주목적으로 하므로, 하나의 Receiver 센서만 형상화하였다. Fig. 11 및 Table 3은 Receiver 센서의 상세 사이즈를 나타낸다.

IV. 외부 원격장 와전류 탐상 신호 분석

II. B절에서 언급 하였듯이, 새로운 형태의 Exciter 센서를 활용하여, Exciter 센서로부터의 거리에 따른 신호가 기존의 원격장 와전류 탐상과 유사하다면 적절한 설계가 되었다고 생각할 수 있다. 그렇기 때문에 본 연구에서 중점적으로 생각해야 할 부분은 기존 원격장 와전류 탐상과 유사한 신호를 얻을 수 있는가에 달려있다.

A. Exciter 센서로부터의 거리에 따른 외부 원격장 와전류 탐상 신호 분석

Fig. 12은 Exciter 센서로부터의 거리에 따른 수냉벽튜브 외벽의 자기밀도를 나타낸 그래프이다. Fig. 12에서 보는 바

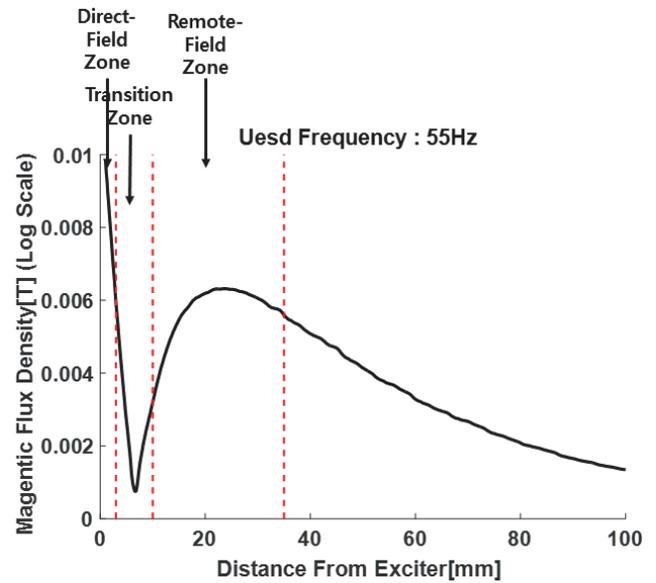


Fig. 12. Exciter 센서로부터의 거리에 따른 자기밀도.

와 같이, Fig. 5의 그래프와 매우 흡사한 것을 확인할 수 있으며, 기본적으로 원격장 와전류 탐상의 원격장 영역은 검사 배관 직경의 2~3배 정도 이다. 하지만 시뮬레이션 결과 원격장 영역이 약 1~1.5배 정도이며, 원격장 형성 위치는 검사 결과와는 크게 상관없기 때문에 본 연구의 목적인 외부 원격장 와전류 탐상 센서의 설계가 가능함을 확인할 수 있다.

B. Receiver 센서 방향에 따른 원격장 와전류 탐상 결함 신호 분석

시뮬레이션 상으로는 Receiver 센서 성능에 따른 자기장 세기를 비교할 수 없다. 그렇기에 본 연구에서는 와전류에 의해 생성된 2차 자기장을 100% 수신하였을 경우를 가정하였으며, II. B절에서 언급하였듯이, Receiver 센서는 원격리 장 영역(remote-field zone)의 자기장을 수신한다. 하지만 원격리 장 영역의 자기장은 와전류에 의해 생성된 2차 자기장으로, 그 세기가 매우 작기 때문에, Receiver 센서는 매우 민감해야 하며, 민감도를 높이기 위해서는 기전력이 높아야 한다.

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

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

Eq. (1)은 맥스웰-패러데이 법칙을 나타내며, -부호는 렌츠의 법칙에 의해 생긴 것이다. Eq. (1)에서 자속 밀도는 Exciter 센서에 따라 고정되는 값이므로, 기전력을 높이기 위해서는 권선 수를 높이면 된다. Receiver 센서의 방향에 따라 Receiver 센서가 수신하는 자기장의 세기가 다르기 때

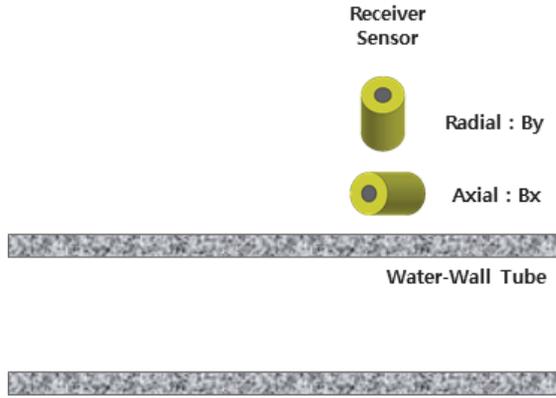


Fig. 13. Receiver 센서 방향.

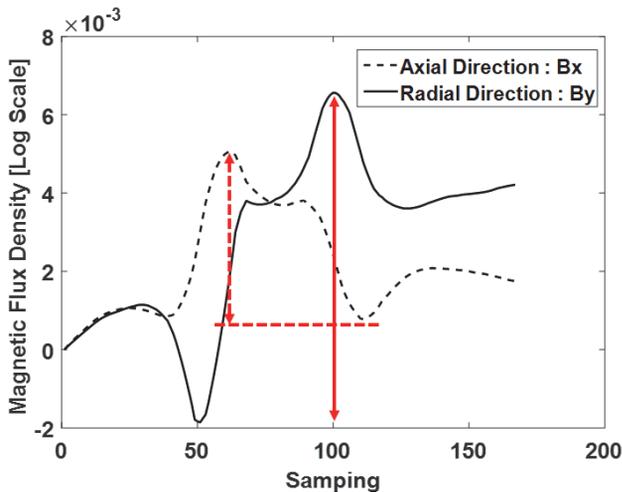


Fig. 14. Receiver 센서 방향에 따른 와전류 탐상 결합 신호.

문에, 이에 대한 비교 분석을 진행해 보았다.

Fig. 13과 같이 Axial과 Radial 방향으로 센서를 두었을 때, 수신하는 신호를 비교하였으며, Fig. 14는 Receiver 센서 방향에 따른 원격장 와전류 탐상 결합 신호를 나타낸다. Fig. 14에서 알 수 있듯이, Radial 방향의 결합 신호 크기가 Axial 방향의 결합 신호보다 큰 것을 확인 할 수 있다.

V. 결론

COMSOL Multiphysics 시뮬레이션을 활용하여 외부 원

격장 와전류 탐상 Exciter 센서에 대한 설계를 진행하였다. 기존의 내부에서 진행되는 원격장 와전류 탐상과 비슷한 신호를 얻는 것을 설계 기준으로 설정하였으며, 결과적으로 유사한 신호를 얻었다.

본 연구에서는 시뮬레이션을 활용하여 외부에서 튜브 형태를 검사할 수 있는 원격장 와전류 탐상 Exciter 센서를 설계 하였으며, Exciter 센서의 길이, 권선 수, 코일의 선경 등 Exciter 센서에 영향을 미치는 주요 인자에 대한 비교 분석이 진행된다면, 실제 코일을 감을 때 시간과 비용 소모를 줄일 수 있을 것이라 생각된다. 또한 Receiver 방향에 따른 자기장 세기 분석을 통해, 어느 방향으로 Receiver 센서가 놓이는 것이 좀 더 효과적인가에 대한 분석을 하였다.

결론적으로 외부에서 진행되는 원격장 와전류 탐상 센서(Exciter 센서, Receiver 센서)에 대한 설계와 시뮬레이션을 진행하였고, 센서 제작을 위한 코일을 감을 때 참고가 될 수 있는 토대를 제시하였다.

REFERENCES

- [1] 한국전력공사 전력 빅데이터 센터, "5대 전력정보분석보고서_1", 2016.
- [2] 통계청, www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1339
- [3] 송유나, 박종식, 구준모, 이지연, 사회공공연구원, "석탄화력 연구보고서", 2017.
- [4] 현대경제연구원, "온실가스 감축 및 미세먼지 저감을 위한 전력정책 제안", 2017.
- [5] terms.naver.com/entry.nhn?docId=2446539&cid=51641&categoryId=51641
- [6] 박은수, 박익근, 송성진, "비파괴평가공학", 학연사, 2004.
- [7] Satish S. Udpa and Patrick O. Moore, "NONDESTRUCTIVE TESTING Handbook Electromagnetic Testing Volume 5", 2004.
- [8] 이유기. (2015). "Remote Field Eddy Current Testing System의 설계에 관한 연구". 석사학위, 부산대학교, 부산.
- [9] Park, J. H., Yoo, H. R., Kim, D. K., Kim, H. J., Cho, S. H., Song, S. J., ... & Rho, Y. W. (2017). Development of RFECT system for in-line inspection robot considering extendibility of receiving sensors based on parallel lock-in amplifier. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 18(2), 145-153.
- [10] 김범수, 김두수, 정남근, & 이성호. "보일러 수냉벽튜브 손상원인 분석"