

Simulation of Remote Field Scanner for Defect Evaluation of Water Wall Tube Within the Fluidized Bed Boiler

유동층보일러 수냉벽튜브 결함평가를 위한 원격자장 스캐너 시뮬레이션에 관한 연구

Doo-Song Gil, Gye-Jo Jung, Jung-Seok Seo, Hak-Joon Kim, Chan-Wool Kwon
길두송, 정계조, 서정석, 김학준, 권찬울

Abstract

Water wall tube is one of the major factors consisting of a fluidized bed boiler and it plays very important role for the generation of electricity within the boiler. But these water wall tubes within the fluidized bed boiler are subject to the wear and corrosion caused by the high temperature gas and the flowing medium. If water leak is occurred, the secondary damage by the water leak will occur. As a result of that, the power generation efficiency decreases noticeably. Therefore, the maintenance of the water wall tube is very important. In this study, we designed a exciter sensor based on simulation and composed a remote field eddy current system for the defect evaluation of the outer water wall tube. Starting from the shape design of exciter, we conducted simulations for various design factors such as the water wall tube size, material, frequency, lift-off and so on. Based on the results, we designed the optimum exciter sensor for the water wall tube test within the fluidized bed boiler.

유동층보일러를 구성하는 요소 중 하나인 수냉벽튜브는 외부의 고온 연소 가스를 이용해 물을 증기로 가열하는 튜브군의 하나로써, 보일러를 이용한 전력생산에 중요한 역할을 담당하지만, 고온 가스 및 유동매체로 인해 마모 및 부식이 심하게 일어나면 누수가 발생하게 되고, 누수로 인한 2차 피해도 발생될 뿐만 아니라, 발전 효율이 현저히 떨어지게 되어 수냉벽튜브의 유지보수는 매우 중요하다. 본 연구에서는 원격자장 기반의 발신자(Exciter) 센서 설계, 원격자장 와전류 시스템 구성, 수냉벽튜브 외벽 결함평가를 목적으로 하였으며, 이를 위한 발신자 형상의 센서 설계를 시작으로, 수냉벽튜브의 크기, 재질, 주파수, Lift-Off (센서와 수냉벽튜브 사이의 거리) 등 여러 가지 요인에 따른 시험을 진행하여 그에 따른 최적의 발신자 센서를 설계하였다.

Keywords: Remote Field Scanner, Water Wall Tube, Fluidized Bed Boiler, Defect Evaluation, Exciter Sensor

I. Introduction

여러 발전 중에 화력발전은 매장량이 풍부한 석탄을 주원료로 사용하고, 타 발전방법에 비해 가격 경쟁력이 뛰어나기 때문에 가장 많은 발전비용을 차지하고 있다. 하지만 석탄을 연소하여 발전하기 때문에 많은 환경적인 문제점들이 야기된다. 이러한 점을 고려하여 개발된 것이 '유동층보일러'이다. 이 보일러를 구성하는 요소 중 하나인 수냉벽튜브는 외부의 고온 연소 가스를 이용해 물을 증기로 가열하는 튜브군의 하나로, 보일러 발전에 중요한 역할을 한다. 하지만 유동층보일러 수냉벽튜브는 고온 가스 및 유동매체로 인해 마모 및 부식이 심하게 일어난다. 수냉벽튜브에 마모 및 부식이 일어나면 누수가 발생하게 되고, 누수로 인한 2차 피해도 발생할 뿐만 아니라, 발전 효율이 현저히 떨어지게 되어 수냉벽튜브의 유지보수는 매우 중요하다. 수냉벽튜브 뿐만 아니라 튜브형태

구조물의 유지보수를 위해 사용되는 비파괴 평가적 기법들이 많이 있고 원격자장에 대한 효과는 1940년에 처음 알려졌으며, 1951년에 W.R. Maclean에 의해 특허가 출원되었다 [1].

또한 수냉벽튜브 내외부의 자기장의 분포를 시험한 결과 40 kHz에서 최적의 검출감도를 얻을 수 있었다 [2]. 그 외의 비파괴적 검사방법으로는 초음파탐상(Ultrasonic Testing, UT)과 와전류탐상(Eddy Current Testing, ECT)이 주로 사용되고 있고, 와전류탐상의 응용 기법인 원격자장 와전류 탐상(Remote Field Eddy Current Testing, RFECT) 또한 널리 사용되고 있다. 이 중에서 원격자장 와전류 탐상 기술은 프로브 근처에 있는 결함뿐만 아니라 검사대상 재질의 전 두께를 검사할 수 있어 인기가 높다.

이에 따라 국내외에서 원격자장 와전류 탐상기법을 통한 비파괴평가 기법이 활발하다. David L. Atherton 등은 관 내에서 발생하

Article Information

Manuscript Received January 20, 2020, Revised February 21, 2020, Accepted March 4, 2020, Published online June 30, 2020

D. Gil, G. Jung, and J. Seo are with Power Generation Lab., KEPCO Research Institute, Korea Electric Power Corporation, 105 Munji-ro Yuseong-gu, Daejeon 34056, Republic of Korea. H. Kim and C. Kwon are with Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, 2066 Seobu-ro Jangan-gu, Suwon 16419, Republic of Korea.

Correspondence Author: Doo-Song Gil (doosong.gil@kepco.co.kr)



This paper is an open access article 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, color print of one or more figures in this paper, and/or supplementary information are available at <http://journal.kepco.co.kr>.

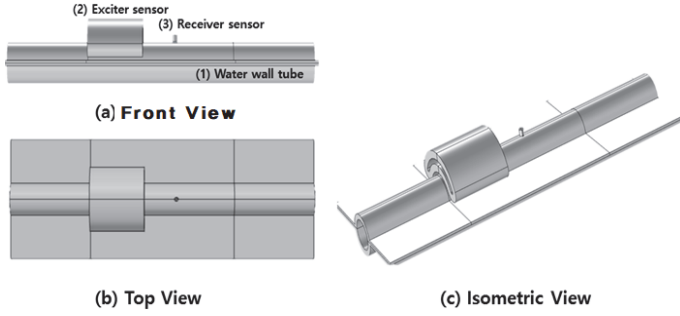


Fig. 1. Overall configuration for exciter design.

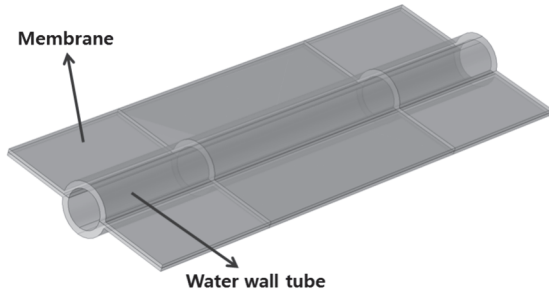


Fig. 2. Geometry of water wall tube.

TABLE 1
Specific Dimension of Water-Wall Tube

Parameter	Value
Length of Pipe	380 mm
Diameter of Pipe	57.2 mm
Thickness of Pipe	6.1 mm
Thickness of Membrane	6.1 mm
Length of Membrane [One side]	19 mm

는 원격장 와전류 탐상 신호를 분석하였으며 [3], 박재하 등은 원격장 와전류 탐상 기법을 통해 6인치 이상 관 내에서 결함을 측정하였고 [4], 박정원 등은 GMR (Giant Magneto Resistance) 센서를 사용한 원격장 와전류 탐상 기법을 통해 결함 검출 기법을 개발하였다 [5]. 국외로는 W.Lord 등이 원격장 와전류 탐상기법에 대한 시뮬레이션 기법을 연구했으며 [6], A.Vajpayee 등은 원격장 와전류 탐상 기법을 통하여 보일러 튜브의 결함 검사를 연구하였다 [7].

본 연구에서는 원격장 기반의 발신자 센서 설계, 원격장 와전류 시스템 구성, 수냉벽튜브 외벽 결함평가를 목적으로 하였으며, 수냉벽튜브 외벽검사를 위한 발신자 형상의 설계를 시작으로, 수냉벽튜브의 크기, 재질, 주파수, Lift-Off 등 여러 가지 요인에 따른 시험을 진행하였다. 그리고 그에 따른 최적의 발신자를 설계하여 후보군을 정한 후 직접 권선하였다.

II. 원격장 와전류 탐상 시험

A. 형상 모델링

Fig. 1은 적절한 발신자 설계를 위한 전체 형상 구성을 나타낸다. Fig. 1(a)-1(c)는 각각 정면도, 평면도, 등각도를 나타낸다. 구

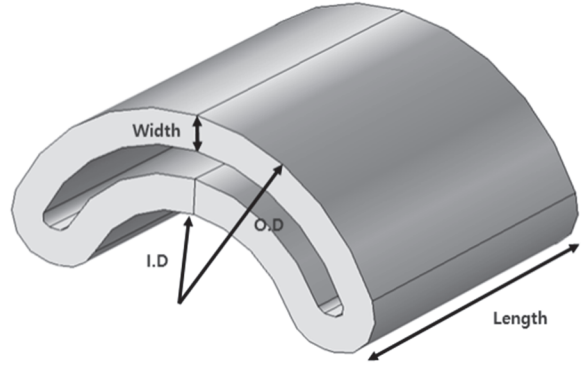


Fig. 3. Geometry of exciter sensor.

TABLE 2
Specific Dimension of Water-Wall Tube

Parameter	Value
Length of Exciter	40.5 mm
Width of Exciter	4.5 mm
Exciter I.D	31.6 mm
Exciter O.D	46 mm
Layer	5 mm

성은 (1) 수냉벽튜브, (2) 발신자 센서, (3) Receiver 센서로 이루어져 있다. 수냉벽튜브는 여러 개의 파이프가 서로 연결되어 있는 형태이다. 튜브와 튜브 사이를 연결해 주는 부위를 멤브레인 (Membrane)이라고 부른다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 본 시험에서는 전체 수냉벽튜브를 형상화하지 않고 하나의 파이프만 형상화 하였다. TABLE 1은 수냉벽튜브 형상의 상세한 수치를 나타낸다.

다음은 이번 시험에서 가장 중요한 발신자 센서이다. Fig. 3에서처럼 반원 형태의 파이프의 형태로 구성하여 권선의 방향 또한 반원 형태의 원주방향을 따라 이루어졌으며, 파이프의 외벽에 고르게 와전류를 유도하고 그 세기가 균일하게 전달되게 함으로써 튜브에서 발생된 파형을 좀 더 쉽게 구현하기 위하여 새로운 형태인 반원모양의 원주방향으로 설계하였다. TABLE 2는 발신자 센서 형상의 상세한 수치를 나타낸다.

콘솔 프로그램(COMSOL Program)을 활용하여 직접적인 수신자(Receiver) 센서의 신호 감도를 계산할 수는 없다. 그렇기에 본 연구에서 활용된 Fig. 4는 원주방향을 모양으로 권선된 코일 센서 또는 GMR 센서가 추후에 그 누설 자기장을 탐지할 것이며, 실제 실험을 통해 비교하여 수신자 센서를 선정하였다. TABLE 3은 코일 센서(Coil sensor) 형상의 상세한 수치를 나타낸다.

B. 물성 및 재료 선정

본 시험에서 물성 및 재료는 매우 중요한 역할을 한다. 수냉벽튜브에 적용된 재료는 13CrMo44인 합금 철강 파이프로, 고온과 고압에 잘 견디기 때문에 압력 용기(Pressure vessel)나 보일러에 많이 사용되는 재질이다. 또한, 유동층보일러 수냉벽튜브 자체가 강자성체이기 때문에 비투자율을 50, 전기전도도는 6.67 MS/m을 주었다.

C. 발신자 센서 설계

와전류 생성을 위해 콘솔 다중물리학(COMSOL Multiphysics)

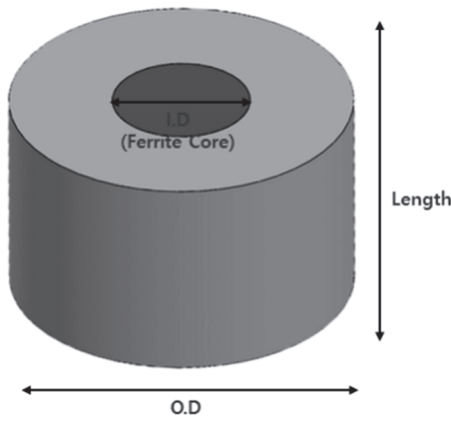


Fig. 4. Coil receiver sensor.

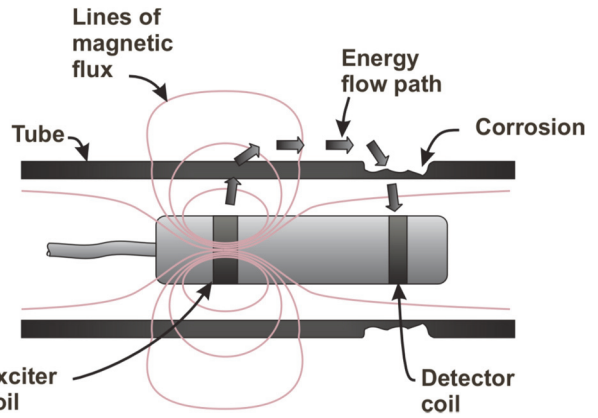


Fig. 5. Concept map of remote field test range.

TABLE 3

Specification of Coil Receiver Sensor

Parameter	Value
Inner Diameter (I.D)	2 mm
Outer Diameter (O.D)	8 mm
Length	6 mm
Turns	19,200 회
Resistance	11.9 kΩ

TABLE 4

Value for Calculating Frequency

Parameter	Value
Standard depth of penetration	4.44×10^{-3} m
Magnetic Permeability	$50 \times 4 \times \pi \times 10^{-7}$ H/m
Electrical Conductivity	6.67×10^6 S/m

내의 기능 중 하나인 자기장(Magnetic Fields) 기능을 사용하였다. 코일은 2중 폴리아레탄 동선(2UEW)을 기준으로 설정값을 적용시켜 주었다. 코일의 선경은 0.85 mm를 사용하였고, 약 4-5 A까지의 전류를 견딜 수 있는 코일을 선택하였다. 권선수는 225, 전기전도도는 5.96×10^7 S/m를 주었다.

D. 기준 주파수 선정

검사하고자 하는 시편이 정해지면 고유 물성이 정해져 있기 때문에 주파수에 따라 침투 깊이를 변화시킬 수 있다. 발신자 코일(Exciter Coil) 최적화를 하기 이전에, 배관 두께에 따른 유효 침투 깊이를 얻기 위해 주파수를 계산하였다. TABLE 4는 침투 깊이를 계산하기 위해 필요한 값들을 나타낸다. 원격장 와전류 탐상은 기본적으로 배관을 통과한 후 뚫고 나오는 신호를 받기 때문에 배관 두께의 2배 정도 되는 침투 깊이를 요한다. 본 연구에서 사용된 배관의 두께는 6.1 mm이며, 이중벽 관통기술(Double-Wall-Through Technique)을 적용하여 약 12 mm라고 생각할 수 있으며, 표준 침투 깊이는 이 깊이의 약 37 %인 4.44 mm이다 [8]. Eq. (1)을 이용하여 다음과 같이 약 40 Hz를 얻을 수 있으며 원격장 와전류 탐상은 두꺼운 배관을 통과시켜야 하기 때문에 일반적인 와전류탐상보다 훨씬 낮은 주파수를 사용하였다.

$$f = \frac{1}{\pi \times \text{자기투자율} \times \text{평균 침투 깊이} \times \text{전기전도도}} = \frac{1}{\pi \times (50 \times 4 \times \pi \times 10^{-7}) \times (4.44 \times 10^{-3})^2 \times (6.67 \times 10^6)} \approx 40 \text{ Hz} \quad (1)$$

E. 원격장 와전류 검사범위

기본적인 원격장 검사용 프로브는 한 개의 송신코일과 한 개의 수신코일로 구성된다. 두 코일 모두 검사 대상이 튜브나 파이프에 대하여 동축으로 감겨지며 코일간의 거리는 최소한 검사대상체 직경의 2배가 넘는다 [9]. 이와 같은 송신코일과 수신코일 간에 거리가 존재하는 것이 원격장 검사에서 가장 특징적인 사항이다. 수신코일이 송신코일에 가까이 있을 경우 감지할 수 있는 것은 송신코일에서 발생하는 자기장만 검출이 가능할 뿐이다. 이 경우는 일반적인 와전류 검사 방법에서 송신과 수신방법으로 사용되는 설정 방법과 동일하다. 원격장 검사에서 특징적으로 관찰될 수 있는 것은 검사대상체를 투과하는 에너지 전달 현상을 확인할 수 있는 방법으로 송신코일에서 수신코일을 점점 이격시켜 가는 방법이 있다. Fig. 5에서와 같이 실제 적용에 있어서 최소한의 이격거리는 검사대상체 외경의 두 배가 된다. 바로 이와 같은 현상이 송신코일에서 멀리 떨어진 곳에서 원격장을 검출할 수 있다는 것이다. 비록 자기장의 크기가 미약하더라도 파이프 두께 변화에 대한 정보를 포함하고 있다.

프로브의 코일 형상은 제작사별로 각각 상이하게 만들어지며, 충전율(fill factor)은 튜브 내면 단면적과 코일 유효 단면적의 비율이 된다. 일반적으로 충전율은 70%정도로 낮아도 되며, 와전류 검사방법에서 사용되는 충전율은 85%나 그 이상이 되어야 한다. 낮은 충전율은 작은 결함에 대한 감도를 떨어뜨리지만 원격장 검사 데이터의 품질에는 영향을 없다. 낮은 충전율에도 효과가 좋은 원격장 검사방법은 내부 코팅이 되어있는 파이프나 곡관부 검사에 매우 효과적으로 사용될 수 있다. 원격장 검사용 프로브에는 수신코일이 배열형 형태로 된 것이 있으며 코일은 검사장비에 동축 케이블로 연결되어 있다. 또한 동축 케이블은 튜브나 파이프를 30 m 정도까지 밀어 넣어서 검사할 수 있도록 강성이 있는 플라스틱 튜브내부에 보호되어 있다.

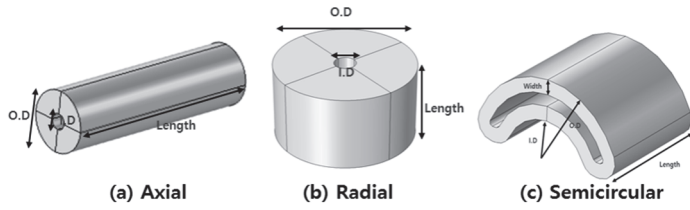


Fig. 6. Different shape of exciter sensor.

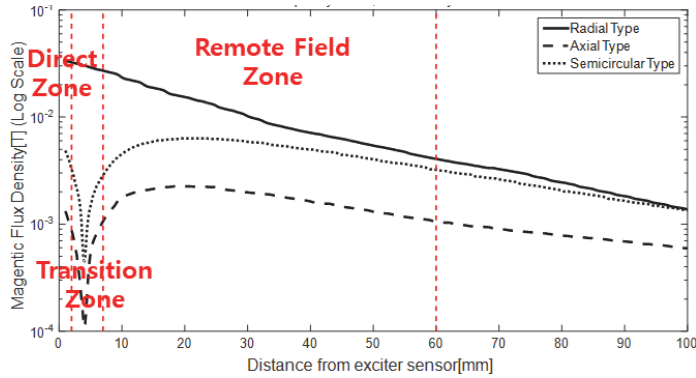


Fig. 7. Comparison according to exciter sensor type.

TABLE 5

Value for Calculating Frequency

Parameter	#1 Axial	#2 Radial	#3 Semi-circular
Inner Diameter (I.D)	5 mm	5 mm	31.6 mm
Outer Diameter (O.D)	19.4 mm	41 mm	46 mm
Length	67.5 mm	27 mm	40.5 mm
Width	-	-	4.5 mm

III. 원격장 신호특성 분석

A. 발신자 센서 형태에 따른 신호 특성 분석

원격장 와전류 탐상 발신자 센서의 가장 좋은 형태는 유동층 보일러 수냉벽튜브 외벽에 균일하게 와전류를 생성시킬 수 있는 형상이어야 한다. 실제 와전류 탐상 및 원격장 와전류탐상에서 가장 많이 사용하는 2가지 형태와, 본 연구를 위해 새롭게 고안된 형태에 대해 시험을 진행해 보았다. Fig. 6은 각각 (a) 축방향(Axial) 타입, (b) 원주방향(Radial type) 타입, 그리고 (c) 반 원구형(Semicircular) 타입 발신자 센서 형태를 나타내고, 권선의 방향과 모양 또한 각각 Fig. 6(a)와 6(b)는 원주방향으로 권선하였고, Fig. 6(c)는 반원형태의 도넛(Donut) 모양을 따라 권선하였다. TABLE 5는 다른 형상의 발신자 센서의 상세한 수치를 나타낸다.

Fig. 7은 신호해석용 콘솔 프로그램을 활용하여 각각 원주방향 형태, 축방향 형태 그리고 반구형의 형태로 된 발신자 센서에 대한 자속밀도 신호를 비교해 놓은 것으로서 가로축은 발신자 센서로부터의 거리를 나타내며, 세로축은 각 센서에 대한 자속밀도의 크기를 나타낸다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 원주방향 형태는 자기장의 방향이 유동층보일러 수냉벽튜브에 와전류를 유도하기에 적합한 방향이 아니기에, 기존 원격장 와전류 탐상처럼 근접지역(Direct Zone), 임계지역(Transition Zone), 원격장 지역(Remote Field Zone)이 구분이 안 된다. 자속 밀도는 다른 두 형태에 비해

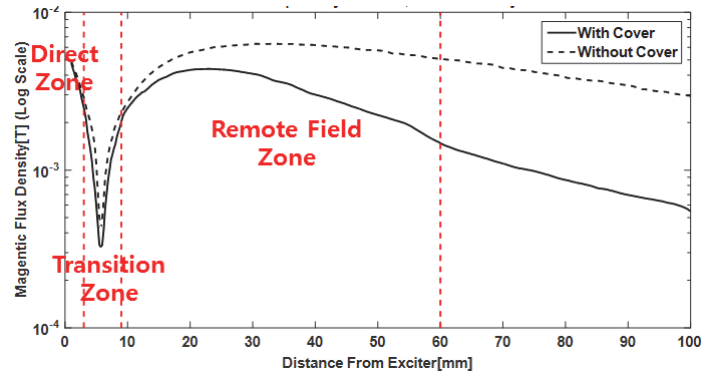


Fig. 8. Comparison between with cover and without cover.

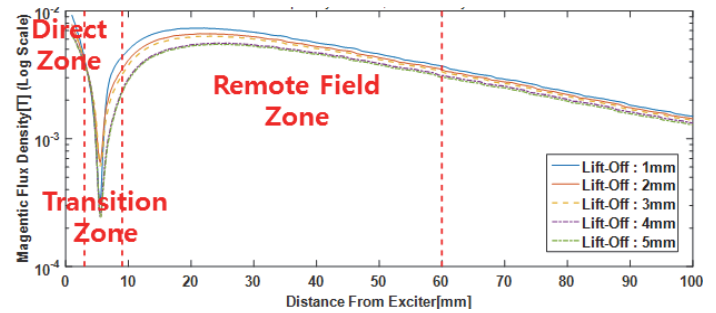


Fig. 9. RFECT signal according to lift-off.

높지만, 비교적 자속밀도가 일정한 부분이 없어서 결함을 검사하는데 무리가 있다. 기존 원격장 와전류 탐상 발신자 센서 형태인 축방향 타입은 세 가지 영역이 뚜렷하게 구분이 되지만, 반 원구형 타입보다 자속밀도가 현저히 낮은 것을 확인할 수 있다. 본 시뮬레이션 결과를 토대로, 반 원구형 타입의 발신자 센서 형상을 선정하였다.

B. 멤브레인 유무에 따른 와전류 탐상 신호특성 분석

Fig. 8은 Fig. 7과 같은 신호해석용 콘솔 프로그램을 활용하여 수냉벽튜브 사이의 용접부인 멤브레인 유무에 따른 유동층보일러 수냉벽튜브 외벽의 자속밀도를 나타낸다. 기존 원격장 와전류 탐상과 비슷하게 내부에서 진행되는 것과 같은 효과를 얻기 위해 멤브레인을 사용하였다. 그러나 시뮬레이션 결과 멤브레인이 없는 것이 원격장 지역에서 자속밀도가 높았다. 그 이유는 멤브레인 또한 자성체로 판단할 수 있고, 유동층보일러 수냉벽튜브 외벽으로 침투되는 자속밀도가 멤브레인에도 분배되어서 작아지기 때문이다. 하지만 멤브레인 부분은 결함 검사 및 평가 대상이 아니기 때문에 라이프 외벽에 자속밀도를 낮추면서 멤브레인을 반영할 필요가 없다고 판단되어, 이후부터는 멤브레인이 없이 시험을 수행하였다.

C. 리프트 오프에 따른 와전류 탐상 신호특성 분석

유동층보일러 수냉벽튜브와 발신자 센서 사이의 거리인 리프트 오프는 원격장 와전류 탐상 신호측정을 위한 주요 인자 중의 하나이다. 와전류 신호는 깊이에 따라 그 밀도가 기하급수적으로

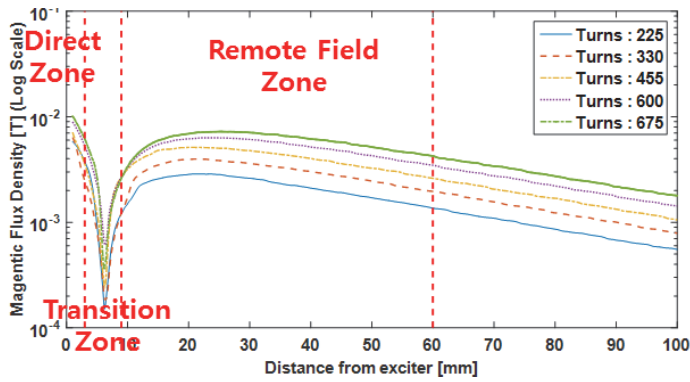


Fig. 10. Comparison according to turns & layer of exciter sensor.

TABLE 6
Case of Exciter Sensor According to Turns & Layer

	#1	#2	#3	#4	#5
Turns	225 회	330 회	455 회	600 회	675 회
Layer	5 층	6 층	7 층	8 층	9 층
Length	40.5 mm	49.5 mm	58.5 mm	67.5 mm	67.5 mm
Current	2 A				
Resistance	2.25 Ω	3.38 Ω	4.76 Ω	6.41 Ω	7.37 Ω
Voltage	4.50 V	6.76 V	9.52 V	12.82 V	14.74 V

감소한다. 그렇기 때문에 발신자 센서와 유동층보일러 수냉벽튜브의 거리가 멀수록 유도되는 와전류의 세기도 감소한다.

그러나, 이를 보완하기 위해 리프트 오프 값을 0으로 설정하면 용접부위 또는 불순물 등에 의해 발신자 센서가 파손되는 경우가 생길 수 있다.

그렇기 때문에 적절한 리프트 오프를 설정하는 것이 중요하다. Fig. 9는 리프트 오프에 따른 원격장 와전류 탐상 신호를 보여준다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이 리프트 오프 값이 작아질수록 자속밀도가 높은 것을 확인할 수 있다. 본 결과를 통해 알 수 있는 것은, 리프트 오프가 5 mm정도가 되어도 신호는 작지만 유효한 신호를 얻을 수 있다는 것이다. 일반적으로, 수냉벽튜브 외벽은 마모로 인해 튜브 외벽에 장애물이 생기지만, 3 mm 이하로 생기기 마련이다. 그렇기에 본 연구에서는 실제 검사 환경을 고려하여 3 mm의 리프트 오프 값을 선정하였다.

D. 발신자 센서 크기에 따른 와전류 탐상 신호특성 분석

발신자 센서의 크기는 곧 권선 수에 비례하며, 권선 층수를 높이면 발신자 센서의 폭이 늘어나고, 한 층당 권선 수를 늘리면 발신자 센서의 길이가 늘어나기 때문이다. TABLE 6은 권선 수에 따른 층수 및 발신자 센서의 길이를 나타낸 것이다. TABLE 6의 #4와 #5는 발신자 센서의 길이가 더 이상 늘리지 않았다. 그 이유는 발신자 센서의 크기가 너무 커지면, 그만큼 검사할 수 있는 영역이 줄어들기 때문이다. 전류는 기본적으로 2 A로 가진해 주었고, 이는 저항 산출방법을 이용하여 구했으며, 저항을 통해 2 A를 가진해 주었을 때, 허용치 이상의 전압이 나오는지 확인하였다. Fig. 10은 각 케이스에 따른 자속 밀도를 나타낸다. Fig. 10을 보면 권선 수 및 코일 층수가 많아질수록 자속밀도가 세지는 것을 알 수 있으며, 권선 수를 늘릴수록 자속밀도의 증가량은 작아지는 것을 확인할 수

있다. 본 연구의 목적은 멤브레인이 붙어있는 형태의 수냉벽튜브를 검사하는 것이며, 너무 많은 턴수와 층수를 선택하게 되면, 발신자 센서의 크기가 커지고, 그렇게 되면 옆 튜브와 간섭이 일어날 수 있기 때문에 무작정 많은 권선을 하는 것은 좋은 방법이 아니다. 그렇기 때문에 본 연구에서는 #3과 #4의 중간 값을 선정하여, 길이는 58.5 mm, 턴수는 600 턴을 기준으로 최종 센서로 선정하여, 실제로 권선하였다.

IV. Conclusion

본 연구에서는 유동층보일러 수냉벽튜브의 외벽 검사를 위한 원격장 와전류 탐상에 관한 연구를 진행하였다. 시험용 프로그램 틀은 실제로 겪기 힘든 현상들을 가상으로 경험할 수 있게 해주는 강력한 도구이기 때문에, 설계에 앞서 필수적인 역할을 한다. 일반적으로 원격장 와전류 탐상은 내부에서 진행하지만, 본 연구에서는 외부에서 진행하는 원격장 와전류 탐상을 목적으로 진행하였고, 그에 맞는 발신자 센서 형상도 설계하였다. 통상적인 원격장 와전류 탐상 방법은 전자유도 작용에 의해 발생한 기전력을 이용하여 코일에 흐르는 자속의 변화를 통해 측정을 하는 것으로 검사범위가 센서가 접촉되는 바로 밑부분으로 제한되어 있으나, 본 연구에서 제안된 원격장 와전류를 이용한 방법은 검사범위가 일반적으로 튜브 직경의 2배로 넓기 때문에 기존의 검사방법에 비해 검사시간을 단축시키는 효과를 볼 수 있다. 그 결과, 통상적인 원격장 와전류 탐상과는 약간 다르지만 거의 유사한 형태의 원격장 와전류 탐상 신호를 얻을 수 있었다. 리프트 오프, 발신자 센서 형상, 전류의 세기, 권선 수 및 발신자 센서의 크기 등 원격장 와전류 탐상 신호에 영향을 줄 수 있는 주요 인자들에 대해 비교를 하여 유동층 보일러 수냉벽튜브 외벽을 검사할 수 있는 최적의 발신자 센서를 선별하였으며, 이렇게 선별된 발신자 센서를 직접 제작하고, 이 센서와 연동되는 휴대용 형태의 스캐너를 직접 제작할 예정이다. 본 연구를 토대로 제작될 예정인 스캐너를 이용하여, 실제 유동층보일러 수냉벽튜브 검사에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Maclean, W.R. "Apparatus for Magnetically Measuring Thickness of Ferrous Pipe," United States Patent 2, pp. 573-799. 1951.
- [2] Atherton, D.L, W.M. Czura, "Finite Element Evaluation," Vol. 52, No. 1. Columbus, OH: American Society for Nondestructive Testing, 1994.
- [3] Atherton D. L, Mackintosh D. D, Sullivan S. P, Dubois J. M. S, Schmidt T. R, "Remote-Field Eddy Current Signal Representation," Material Evaluation, Vol 51, No. 7, pp. 782-789.
- [4] Jae-Ha Park, Hui-Ryong Yoo, Dae-Kwang Kim, Hak-joon Kim, Sung-Ho Cho, Sung-Jin Song, Hui-Min Kim, Gwan-Soo Park, Yong-Woo Rho, "Development of RFECT System for In-Line Inspection Robot Considering Extensibility of Receiving Sensors based on Parallel Lock-in Amplifier," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol 18, No 2, pp. 145-153, 2017.
- [5] J.W. Park, J.H. Park, S.J. Song, M.B. Kishore, S.G. Kwon, H.J. Kim, "Enhanced Detection of Defects Using GMR Sensor Based Remote Field Eddy Current Technique," Journal of Magnetism, Vol 22, No 2, pp. 531-538, 2017.
- [6] W. Lord, Y.S. Sun, S.S. Upda, S. Nath, "A Finite Element Study of the Remote Field Eddy Current Phenomenon," IEEE Transactions on Magnetism, Vol 24, No. 1, pp. 435-438, 1988.
- [7] A.Vajpayee, D.Russell, "Automated Condition Assessment of Boiler

Water Wall Tubes Using Remote Field Technology. A Revolution over Traditional and Existing Techniques," The 10th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing, pp. 523-530, 2009.

[8] 한국비파괴검사학회 이용, "와전류탐상검사(Eddy Current Testing)," 노

드미디어, p. 28, 2012.

[9] D.S. Gil, G.J. Jung, H.J. Kim, et al., "Defect Evaluation Technology of Water Wall Tube within the Fluidized Bed Boiler using Remote Field Robot Scanner," KEPCO, Final Research Report, pp. 19-20, 2019.