

# 공기예열기를 위한 고온용 변위센서 및 센서드라이브 시스템 구현

## The Implementation of high temperature displacement sensors and sensors drive system for Air-preheater

조항덕† · 김우식\*

HyangDuck Cho, Wooshik Kim

**Key Words** : 갭 제어, 고온용 변위센서, 공기예열기, 센서드라이브 시스템

### ABSTRACT

Air preheater uses the waste heat of the gas which burnt from the boiler from the thermal power plant. Air preheater it is established in the exit of the boiler follows in change of temperature combustion gas and the vibration which it follows in thermal expansion and contraction occurs. Air preheater with ruse the gas the seal the place where it includes a gap in the structure which it does, the vibration which it follows in change of temperature fluctuates the displacement of gap, fluctuation of the leakage quantity which occurs from gap there is a possibility of decreasing an effect to system. Part system it will be able to control the interval of gap in order, control mechanism about under establishing the place where it does the gap control actively, measures a gap the displacement sensor for is necessary. Like this displacement sensor the condition must do continuous running from atmosphere of high temperature was demanded all. This paper investigates the implementation instance of hazard existing which implement the high temperature displacement sensor, it analyzes, produces the result which it examines a model, it was a presentation. These results with the fact that it will contribute in the research for the implementation and a localization of the high temperature displacement sensor and advanced air preheater.

### 1. 서 론

공기 예열기는 보일러에서 배출되는 폐열을 이용하여 보일러 연소용 공기를 가열하는 장치이다. 연소용 공기를 예열하면 연소온도가 높아지고, 연소효율이 높아지며 불완전 연소량이 감소하는 등 이점이 있다. 이러한 이유 때문에 대형 보일러 시스템에서는 대부분 공기예열기를 사용하고 있다. 국내 화력 발전소도 이러한 경우에 해당되는데, 갭 제어를 할 수 있는 모델로 회전 재생방식 공기예열기 모델이 많이 사용되고 있다.

회전 재생방식 공기예열기 모델은 배기가스와 흡

기가스가 수직으로 고정된 덕트 경로를 이루고 있으며, 경로 중간의 적절한 지점에 열 축적과 방출성능이 뛰어난 히팅 엘리먼트(H.E. Heating Element)들로 구성된 거대한 회전체를 공유하도록 되어 있다.

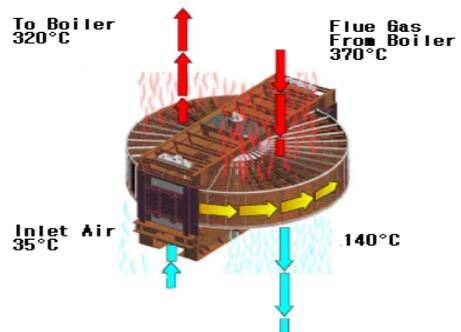


그림 1 공기예열기와 흡배기 경로의 이미지표현[2]

† 하나에버텍(주)부설연구소, whiteblack@paran.com  
Tel : 031-739-6158 , Fax : 031-739-6168

\* 세종대학교 정보통신공학과, wskim@sejong.ac.kr

그림 1에서 아래 방향으로 향하는 화살표가 보일러에서 배출되는 연소가스의 배기경로이고 위에 방향으로 향하는 화살표가 외기를 흡기하여 보일러에 공급되는 가스의 경로이다. 각 경로의 중간에 원형으로 보이는 공기에열기가 위치하고 있다. 이 공기에열기는 전체가 히팅 엘리먼트(H.E)로 구성되어 있으며, 흡열과 방열 성능 등을 고려하여 적절한 속도로 회전한다. H.E.는 배기가스 경로에서 열을 흡수하고, 흡기경로에서 외기를 가열하는데, 온도차가 큰 공기에열기 상부에 회전운동과, 고정된 덕트 사이에 기계적 접촉을 완충하는 갭이 존재한다. 이러한 갭은 섹터 플레이트라 불리는 격벽으로 구분되는데, 격벽의 한 쪽은 가열된 흡기 영역이고, 다른 한 쪽은 보일러의 배기가스 영역이다. 이 부분에서 갭이 벌어지면 배기가스와 흡기가스 사이에 누설량이 많아지는데, 보일러 출력에 따라 배기가스 온도는 가변하게 되고, 이러한 온도변화는 공기에열기의 열팽창과 수축에 영향을 주어 갭이 변동하게 된다. 회전 재생방식 공기에열기 중에는 섹터 플레이트에 상하 구동장치를 부가하여 갭을 일정하게 유지할 수 있도록 갭 제어를 할 수 있는 모델이 있다.

국내 화력발전소의 공기에열기는 대부분 외국회사 제품이 설치되어 운전 중인데, 많은 경우에 공기에열기 수명이 노후 되어 있거나, 갭 제어를 하지 않는 모델이 있다. 따라서 제품의 유지보수와 기능 개조를 위하여 고온용 변위센서 및 센서 드라이브 시스템 조사와 이해가 필요하다. 본 논문은 회전 재생방식 공기에열기 모델을 위한 고온용 변위센서를 조사하고 그 결과를 제시한다. 2장에서 회전방식 공기에열기 개요, 리크, 그리고 변위센서에 대하여 살펴보고, 변위센서의 특징적 설계요소를 파악한다. 3장에서는 모형을 제작하고, 4장에서 모형을 시험하며, 5장에서 결론을 맺는다. 이 결과는 고온용 변위센서와, 고성능 공기에열기 구현과 국산화 연구개발에 기여할 것으로 기대한다.

## 2. 회전 재생방식 공기에열기 개요

### 2.1 회전 재생방식 공기에열기 구조

그림 2는 회전 재생방식의 공기에열기를 보이고 있다. 국내 화력발전소 중 500MW급 용량에서 공기에열기는 약 24개의 H.E. (Heatinf Element)가 방사

성 분할구조를 갖는 큰 원통형으로 제작되어 있다. 이 H.E.는 회전할 수 있는 로터(rotor)를 형성하고, 로터는 하우징에 싸여있다. 하우징 상부와 하부는 커넥팅 덕트(connecting duct)가 있다. 로터에서 H.E. 절반은 차가운 공기가 통과하고, 나머지 절반은 뜨거운 연소가스가 통과한다.

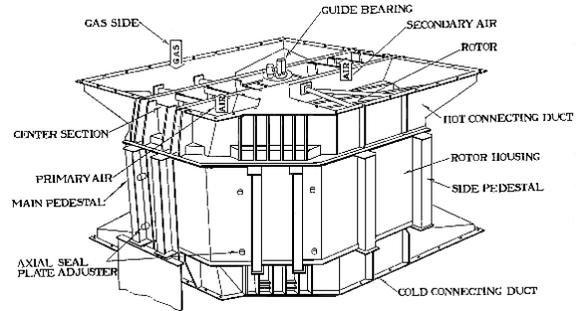


그림 2 공기에열기 구조외형

### 2.2 로터의 리크

공기에열기는 두 종류의 리크로 구분할 수 있다. 하나는 엔트레인드 리크(Entrained leakage)이고, 다른 하나는 다이렉트 리크(Direct leakage)이다. 엔트레인드 리크는 가스의 비중, 로터의 체적, 그리고 로터의 회전속도에 의하여 산출할 수 있다.

$W_E$  : 엔트레인드 리크 [kg/hr]

$$W_E = r_a \cdot v \cdot R_{ph} \quad [\text{kg/hr}] \quad (\text{식1})$$

$r_a$  비중 [kg/m<sup>3</sup>]

$v$  로터의 체적 [m<sup>3</sup>]

$R_{ph}$  시간당 로터 회전수

다이렉트 리크는 유량계수, 갭의 면적, 중력가속도, 그리고 두 기체의 압력차 즉, 배출 배기가스와 유입 연소가스의 압력차에 의하여 구할 수 있다.

$W_D$  : 다이렉트 리크[kg/hr]

$$W_D = \alpha \cdot A \cdot \sqrt{2 g r_a \Delta P} \quad (\text{식2})$$

$\alpha$  유량계수

$A$  갭 면적 [m<sup>2</sup>]

$g$  중력가속도 [m/h<sup>2</sup>]

$\Delta P$  두 기체의 압력차 [kg/m<sup>2</sup>]

전체 리크 :  $W_E + W_D$  (식3)

다이렉트 리크는 전체 리크에서 약 75~80% 를 차지한다. 다이렉트 리크가 주로 발생하는 곳은 공기예열기에서 가이드 베어링, 서포트 베어링, 레이디얼 플레이트, 축 둘레의 갭 리크로 구분할 수 있다. 이 중에서 레이디얼 플레이트의 갭 리크가 가장 큰데, 레이디얼 실링 플레이트(Radial Sealing Plate) 또는 섹터 플레이트(Sector Plate)를 이용하여 갭 제어를 할 수 있다.

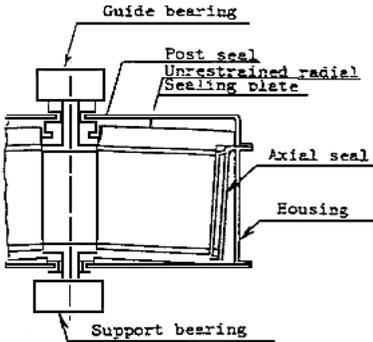


그림 3 공기예열기에서 리크개소

로터는 온도변화에 따라 구조적으로 열 변형이 발생하는데, 실링부분의 갭 들은 이러한 이유에 의하여 간격이 변동하게 된다. 갭 제어는 주로 섹터플레이트를 이용하여 레이디얼 플레이트에 갭 리크를 제한 한다. 이때 섹터 플레이트는 갭의 간격을 측정할 수 있는 거리측정 센서가 필요하다. 거리측정 센서 주변은 고온의 가스가 있기 때문에 고온용 변위 센서를 요구하게 된다. 그림 4는 변위센서가 구성된 섹터플레이트를 보이고 있다.

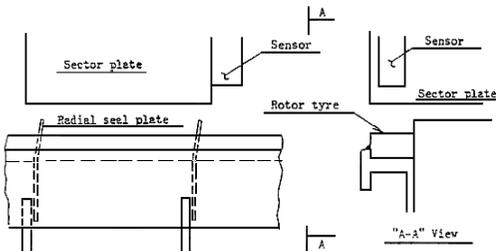


그림 4 섹터플레이트와 변위센서 구성도

그림 4에서 좌측은 로터 상부와 섹터플레이트를 나타내고 있고, 우측은 변위센서와 로터 타이어(rotor tyre)를 보이고 있다. 센서는 수직 하단에 있는 로터 타이어와 반응하여 거리를 산출하게 된다.

### 2.3 변위센서와 센서드라이브 회로

센서는 코일과 와전류를 이용한다. 센서는 섹터 플레이트(sector plate)에 부착되고, 수직방향에서 아래로 센서와 작용할 수 있도록 로터 타이어(rotor tyre)가 고려되어 있다. 센서는 자기 투자율(magnetic permeability) 변화를 감시하고, 그 신호를 이용하여 거리를 산출할 수 있다.

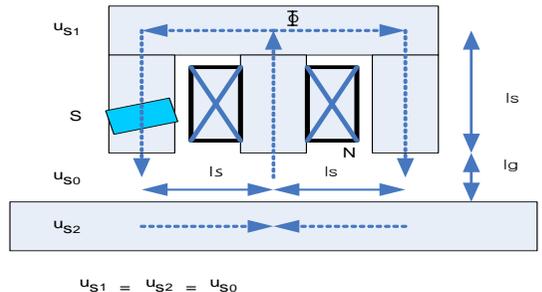


그림 5 센서의 내부 구조도

그림 5는 센서와 측정대상 그리고 갭 을 보이고 있다. 센서는 자기회로를 형성하는 연결과 코일로 되어 있고, 점선은 자기력선  $\Phi$ 의 경로를 나타낸다.  $\mu$ 는 투자율을 이다. 그림에서 투자율은 센서의 투자율, 측정 대상의 투자율 그리고 갭에서 투자율 세 개로 구분할 수 있다. 편의상 투자율은 같다고 가정한다.

$\mu_{s0} = \mu_{s1} = \mu_{s2} = \mu_s$  (식4)

센서에서 코일의 인덕턴스(Inductance) L[H]는 다음의 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$L = \frac{N\Phi}{I} \text{ [H]}$$

$$= \frac{2 N^2}{\frac{1}{\mu_s} \left( \frac{5l}{\mu_s} + 3l_g \right)} \text{ [H]} \quad (식5)$$

(식5)에서 인덕턴스  $L$ 은 갭  $l_g$ 의 함수로 표현할 수 있다. 여기서 갭은 코일이 검출하는 이격 거리가 된다. 센서가 고온의 가스 분위기에 위치하고 있으면 열 변동에 따르는 어떤 변화가 발생하게 되는데, 그림 6와 같이 레퍼런스를 위한 더미코일과, 측정을 위한 센싱코일을 같이 구성하면, 온도변화가 발생해도 센서는 레퍼런스 값을 참조하여 갭 변위를 산출할 수 있다.

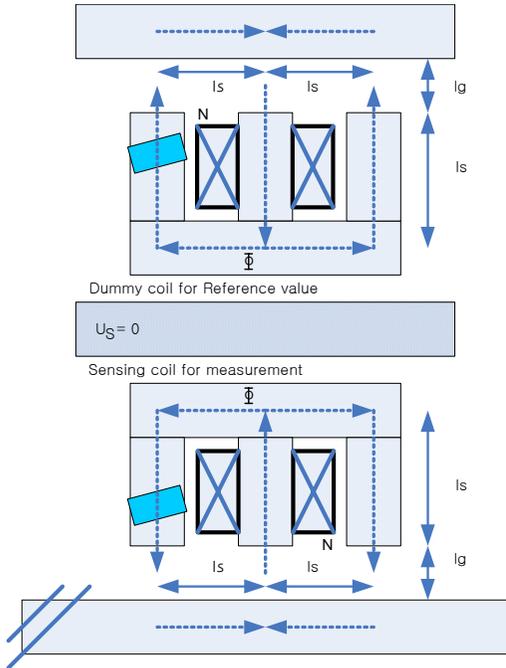


그림 6 더미코일과 센싱코일로 구성된 센서

그림 6은 하나의 센서유닛에 두 개의 코일이 구성되어 있다. 상부에 있는 코일은 레퍼런스 값을 위한 더미 코일로, 미리 정의된 거리를 이격하여 측정 대상과 동일 재질의 매체가 더미코일과 작용하도록 설치되어 있다. 하부에 있는 코일은 변동하는 로터와 거리를 측정하게 된다. 두 코일이 동일한 온도 분위기 속에 위치하게 되면, 온도와 관련된 특성 변화가 더미코일과 센싱코일에 같은 영향으로 작용하게 된다. 또한 더미코일은 레퍼런스 값을 유지하고 있기 때문에, 다양한 온도변화에서도 센싱 코일은 더미의 레퍼런스를 이용하여 변위산출을 효과적으로 할 수 있다.

그림 6은 등가회로를 이용하여 그림 7과 같은

브리지모델로 표현할 수 있다. 더미코일과 센싱코일은  $L_1$ 와  $L_2$ 로 나타난다. 그림 7에서

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{j\omega L_1}{j\omega L_2} = \frac{L_1}{L_2} \quad (\text{식6})$$

을 만족하면  $e_0 = 0$  이 된다.

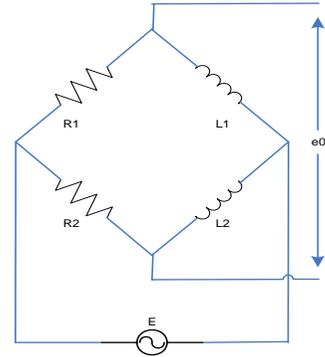


그림 7 센서의 등가회로

만약에  $L$ 에 변동이 발생하고, 그 영향이 두 코일에 동일하다면 (식6)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{L_1 + \Delta L_1}{L_2 + \Delta L_2} \quad (\text{식7})$$

(식6)은  $e_0 = 0$ 을 조건으로 하는데, 정상적인 운전에서  $L_1$ 과  $L_2$ 는 열에 의한 변동  $\Delta L_1$ 과  $\Delta L_2$ 을 처리할 수 있다. 그러므로 (식7)은 운전 중에 발생하는 분위기의 온도변화와 그에 따르는 영향을, 브리지 출력  $e_0$ 을 이용하여 상수와 같이 처리할 수 있다.

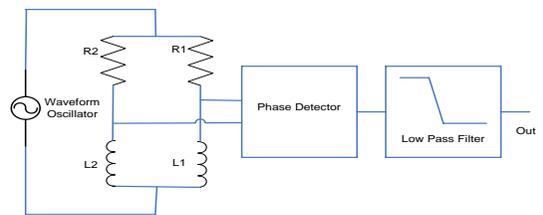


그림 8 센서드라이브 회로의 기능도

그림 8은 센서의 신호를 감시하는 회로이다. 왼쪽

부터 센서, 위상검출 그리고 필터로 구성되어 있다. 위상을 검출회로와 필터회로는 보다 자세하게 그림 9와 같이 구성된다.

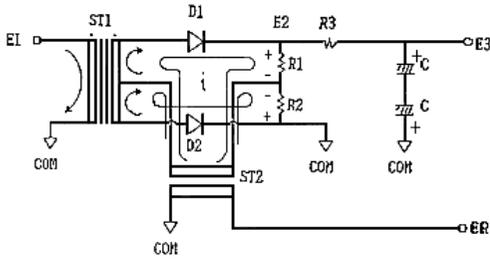


그림 9 위상검출회로

그림 9에서 ST는 신호용 변성기 이고 위상검출을 위해 조합되어 있다. C는 저역 통과필터를 구성한다.

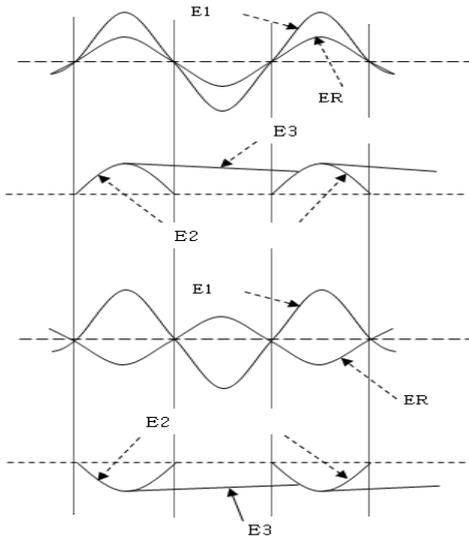


그림 10 위상검출회로의 위상신호

E1은 신호용 변성기 1차측 신호로 외부에서 정의된 사인파가 사용된다. E2와 E3은 신호용 변성기 2차측에서 관찰할 수 있는 신호다. ER이 음인 경우에 다이오드 D1, D2는 역으로 바이어스 되어 ST2로 흐르는 전류는 차단된다. ER이 양인 경우에 E1과 E2가 동상이면 E2는 (+)가 되고, E1과 E2가 역상이면 E2는 (-)가 된다. 더미에서 설정된 갭의 이격과 동일한 간격으로 센서 축을 이격한 후,  $R_1$ ,

$R_2$ 을 조절하여 E1과 ER의 위상이 같아지도록 조정한다. 이후 센서를 측정매체로 가까이 하거나 멀리하면 E3에서 (+) 또는 (-), 그리고 값의 크기를 읽을 수 있는데, 이 결과로부터 센서의 이동방향과 측정거리를 추정할 수 있다. 그림 10에서 볼 수 있듯이, E1과 ER신호가 동상인 경우에 그림에서 두 번째 같은 E3 출력신호를 측정할 수 있고, 세 번째 같이 E1과 ER신호가 역상인 경우에는 그림에서 네 번째 같은 E3 출력이 관측된다.

### 3. 모형제작

모형제작은 일반 변압기 제작과 유사 하다. 단 코일이 감기는 자기회로 프레임에서 한 측면이 개방되어 있는 구조가 다르다. 그림 11은 더미와 센싱에 사용될 센서, 센서기구, 시험용 지그를 보이고 있다. 센서기구 한 쪽은 더미코일로 특정 거리를 이격한 후 시험할 측정매체와 동일 재질의 매체가 설치되어 있고, 센싱코일 부분은 개방되어 있다. 더미와 센싱코일은 하나의 기구에 상하로 구성되고, 시험을 위하여 지그를 그림에 우측 상단같이 제작하였다.

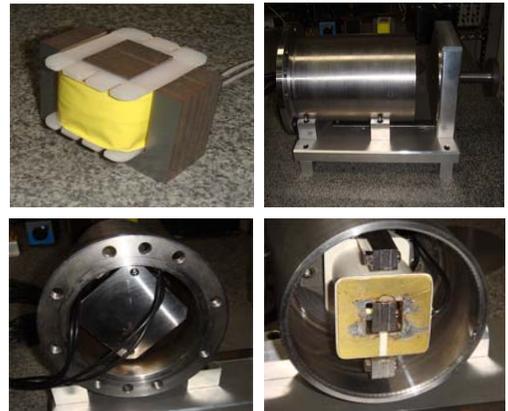


그림 11 제작중인 변위센서 모형

### 4. 시험

시험은 테스트용 지그를 이용하여 시행되었다. E1의 신호는 15[V], 800[Hz]의 사인파를 이용하였고, 더미 코일에서 갭은 9[mm]로 설정하였다. 그림 12는 E1이 800[Hz]사인파 신호이고, ER은 역상인 경우에 신호이며, 이때 E3의 출력이 (-)에 있는 것을 확인할 수 있다. 이 경우는 센싱된 거리는 더미의

설정된 갭 거리 이내로 근접한 것을 의미한다.

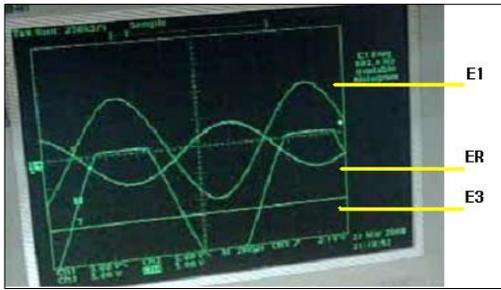


그림 12 변위센서 모형의 작동시험

그림 13은 시험을 위해 구성된 세트를 보인다.



그림 13 모형실험을 위한 세트

지그를 이용하여 7[mm]부터 17[mm]까지 거리를 변경하면서 측정된 결과는 그림 14와 같다. 더미코일의 변위와 같은 9[mm]에서 출력은 0이고, 9[mm]보다 길어질수록 전압이 (+)로 증가하고, 9[mm] 이하로 감소하면 (-)로 증가하는 것을 볼 수 있다.

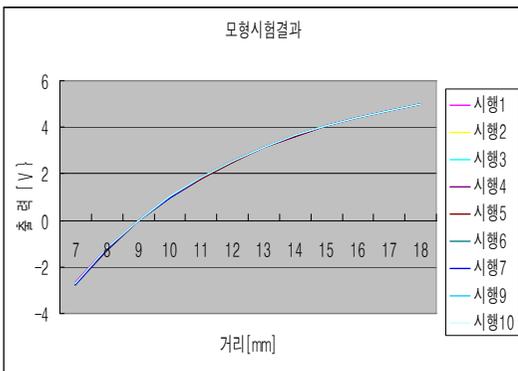


그림 14 변위센서 모형의 시험기록

7[mm]에서 E3출력은 약 -2.5[V], 12[mm]에서 약 2.5[V], 14[mm]에서 약 3.5[V], 16[mm]에서 약 4.5[V]를 보이고 있다. 거리변화 1[mm]에 대하여 전압출력은 커브를 보인다. 10회 반복에서  $\pm 2/100$ 의 허용오차를 보였다. 제작된 모형의 구성 중에 열에 취약한 부분은 코일의 절연부분인데, 180도 이상 고온의 가스분위기를 견디는 절연체는 많지 않으며, 온도 범위가 증가할수록 절연체 비용과 절연으로 인한 코일의 부피증가가 문제가 된다.

## 5. 결 론

화력발전소에서 공기예열기는 보일러 배기가스를 이용하여 연소공기를 예열하는 장치다. 연소공기를 예열하면 보일러 팬 전력을 감소시키고, 연료비용을 절감시키는 효과 등이 알려져 있다. 회전 재생방식의 공기예열기는 로터의 실 갭에서 발생하는 누설을 제한하기 위하여 갭 제어장치를 이용하는데, 이 장치는 고온의 가스 분위기에서 사용할 수 있는 거리 측정센서를 필요로 한다. 본 논문은 표준 화력발전 시스템에서 많이 사용하는 고온용 거리측정센서와 회전재생방식 공기예열기를 조사하고, 센서를 모형으로 제작하여, 대표적인 특징과, 기능을 살펴보았으며, 그 결과들을 제시하였다.

현재 국내발전소의 공기예열기와 고온용 변위센서는 대부분 해외사제품이고, 노후설비들이 많아 유지보수 비용과 시간이 많이 소모되는 문제가 있다. 또한 자기장의 전기적 현상을 이용하는 센서의 특성으로 출력이 비선형이고, 고온용 절연체와 센서의 높은 해상도 요구 등의 문제를 해결하기 위해 이 부분의 연구가 계속 필요하다.

## 참 고 문 헌

(1) Louis P. Bondurant III, Combined Power Plant Air Polution's Control Mega Symposium in Atlanta, GA from August 16-20th. Feb, 2005

(2) Datasheet describing air-preheater principles and applications, Feb, 2005

(3) Selective Catalytic Reduction for Coal-fired Power Plants - Pilot Plant Results, EPRI CS-4386.