

보일러 화로내 연소가스 온도분포 구현에 관한 연구

장석원^{*}

한전전력연구원

(2006년 7월 3일 접수, 2006년 9월 3일 채택)

A Study on Monitoring of Gas Temperature in Boiler Furnace

Seok Won Jang^{*}

Korea Electric Power Research Institute

(Received 3 July 2006, Accepted 3 September 2006)

요 약

본 논문은 보일러 화로내 임의의 단면에서 다수의 음속 측정기를 설치하여 음속을 측정하고 평균온도, 최고온도, 최저온도로부터 세분화시킨 격자의 온도를 구하여 온도분포를 구현하는 방법에 대한 이론적 고찰과 적용결과에 관한 것이다. 음속 측정기 간 음속을 측정하여 보일러 내부의 연소가스 온도를 측정하고 화로를 임의의 격자로 구분하여 각 격자에 해당하는 온도값을 주위 격자의 온도구배로부터 유추하여 구한 뒤 모든 격자의 온도값을 완성하여 화로의 온도분포를 구현하는 방법에 대한 이론 및 관련 시스템을 구성하고 실제 현장적용하여 결과를 분석하였다.

주요어 : 화로온도, 음속, 온도분포

Abstract — This paper intends to present theoretical study and its application result of the way of the temperature distribution embodiment through the production of subdivided nod's temperature from the average, maximum and minimum temperature following acoustic speed measurement with a set of acoustic speed meters at the arbitrary section in the furnace. By measuring the acoustic speed between the speed meters, flue gas temperature field can be determined. Then Subdivided arbitrary grid's temperatures can be inferred out of surrounding nod's temperature distribution, and finally the entire grid's temperature distribution will be found. In this article, theoretical background, related system setup, and real application result are examined and discussed.

Key words : Furnace temperature, Aconstic speed, Temperature profile

1. 서 론

최근 건설되는 화력 발전소는 기술진보와, 수요확대에 따라 단위기 용량이 대형화되어 가는 추세이고 설비가 대형화, 자동화되면서 보일러 연소계통도 꾸준히 개선되어 열효율 향상에 큰 기여를 하고 있다. 그러나 연소계통의 최적제어와 연소안정 등은 아직도 일정 한계를 벗

어나지 못하고 있어 이를 개선하기 위한 다방면의 연구가 진행되고 있다. 연소계통의 안정운전 확보를 위해서는 운전 중 보일러 연소가스의 온도, 화염위치 등에 대한 상태감시가 필요하나 국내발전소 중 보일러 운전조건에서 화로내 연소상태를 정확히 진단할 수 있는 장치는 전무하다.

미국 EPRI를 중심으로 고온영역의 온도를 계측하기 위하여 음속을 측정하여 음속경로에서의 평균온도를 구하는 Acoustic Pyrometry에 대한 연구가 진행되고 있으며, 한편으로 연소가스가 방출하는 휘도를 측정하여 온도분포 이미지를 구현하는 연구가 90년대부터 국내외 학

^{*}To whom correspondence should be addressed.

Korea Electric Power Research Institute

Tel: 042-865-5321

E-mail: jangsw@kepri.re.kr

계에서 활발히 진행되고 있다.

국내 운전 중인 보일러는 화로의 연소가스 온도를 직접 측정할 수 있는 방법이 없어서 노내 CCTV, 튜브메탈 온도, 주증기 온도, 노내압, 공급 연료량 등을 통하여 노내 연소상태를 간접 확인하는 blind 제어방식으로 운전되고 있으므로 보일러의 안정적 운전을 위해서는 직접 연소상태를 확인하여 운전변화에 대처하는 능동적인 방식으로의 전환이 필요하다. 화염편류 등 보일러 연소가스에 대한 많은 문제가 화로에서부터 시작되기 때문에 연소가스 편류의 정도나 모양을 확인하기 위해서는 화로내에서의 연소가스의 온도분포를 파악하는 것이 무엇보다 중요하다.

본 본문에서는 화로내에서 소리전달 속도인 음속을 이용하여 온도를 측정하고 소리전달 경로상에서 온도분포를 확인하여 전체 화로내에서 온도분포도를 구현하는 방법에 대한 이론적 배경 및 대용량 화력발전소에 실제 적용한 결과를 기술하였다.

2. 음속을 이용한 온도측정 기술

2-1. 기본 원리

연소 가스온도 측정은 Fig. 1에서와 같이 보일러 화로의벽을 따라 설치된 센서에 해당되는 소리 송수신기 사이의 경로를 따라 이루어진다. 송신기와 수신기 기능을 겸하고 있는 송수신기를 보일러 화로의 외벽을 따라 수평배치하여 연소중인 가스를 통과하여 인접한 송수신기와 소리신호를 주고 받아 컴퓨터 처리를 통하여 다중 경로 배열에 의한 온도분포 해석과 진단이 이루어진다.

소리에 의한 온도측정 기본원리는 음속은 온도와 가스의 연소특성에 의해 결정 된다는 이론에 근거한다. 연속방정식, 운동량방정식, 상태방정식으로부터 음속과 온

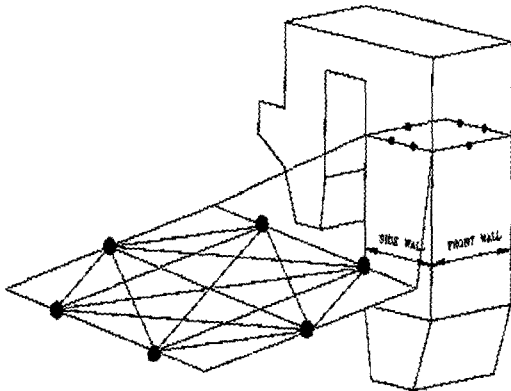


Fig. 1. 보일러 화로의 송수신기 배치도.

Table 1. 연료별 분자량 및 비열비 일반값.

연료	분자량(kg/kmol)	비열비(γ)
Air	29.00	1.40
Coal	29.30	1.29
Oil	28.30	1.31
Natural Gas	27.65	1.31

도사이에는 음속 \propto 온도, 즉 음속과 온도는 비례하는 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$C = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (1)$$

식(1)에서 음속을 측정하기 위해서는 Fig. 1의 송수신기에서 한쪽에는 소리를 송신하고 다른 한쪽에는 수신을 하여야 하므로 송신기인 transmitter와 수신기에 해당하는 microphone을 설치한다. 즉 송신기에서 음향을 발생시키면 수신기에서는 소리를 받는다. 송신기와 수신기 사이의 거리는 알고 있으므로 소리가 전달된 시간만 측정하면 송수신기 사이의 평균속도를 알 수 있다. 음속은 소리 진행시간과 거리로부터 구해진다.

$$C = \frac{d}{t} \quad (2)$$

식(1), 식(2)로부터 가스온도 T는 다음과 같이 계산된다.

$$T = \left(\frac{d}{Ct}\right)^2 * 10^6 - 273 \quad (3)$$

비열비 γ 와 분자량 M은 연소가스의 성분분석을 통하여 산출하는 것이 정확하지만 연료성상이 바뀔 때마다 계산하고 입력해야하는 불편함이 있고 비열비와 분자량의 일반값도 계산값과 거의 일치하므로 Table 1과 같이 일반값을 사용하였다. 적용대상 보일러는 석탄연소발전소 보일러이므로 사용연료는 Table 1에서 Coal을 선정하였다.

2-2. 시스템 구성

온도분포도 구현을 위한 시스템은 음속을 측정하는 송수신기 센서, 소리를 발생시키고 측정된 소리신호를 처리하는 중앙제어장치, 온도분포도를 구현하는 모니터링 시스템 등 하드웨어적으로 다음과 같은 3부분으로 구성된다.

2-2-1. 송수신기

보일러의 화로벽에 설치하며 소리를 발생시키고(송신) 상대편 송수신기로부터의 소리를 전기적인 신호로 변환시키는(수신) 장치이다. 소리를 측정하는 센서인 송수신기는 온도 감시구역의 보일러 외벽인 수냉벽에 Fig. 2

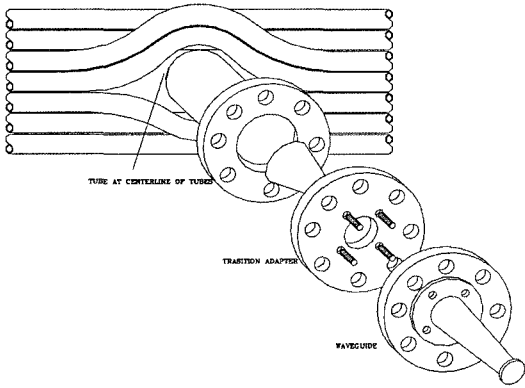


Fig. 2. 송수신기 wave guide 설치도.

와 같이 설치한다. 송수신기는 보일러 화로벽에 프렌치 부착형으로 부착되어 소리를 효과적으로 수신하기 위한 wave guide와 수신된 신호를 증폭시키는 증폭기로 구성된다. Wave guide는 오리피스가 내장되어 압축공기가 통과할 때 소리신호가 발생되고 이렇게 발생된 소리신호가 상대편 wave guide의 수신기로 전달되는 시간을 측정하여 내부온도가 측정된다.

송수신기를 설치하기 위해서는 설치위치의 수냉벽을 벤딩하여 wall box를 삽입하고 transition adaptor과 wave guide를 순차적으로 조립하고 음향을 센싱하는 피에조미터(microphone)는 wave guide 내부에 설치한다. 송수신기는 송, 수신을 병행할 수 있으며 소리의 파장을 효과적으로 수집한다.

2-2-2. 주제어장치(Process Control Unit)

기기 제어회로와 컴퓨터를 내장한 종합연산장치이다. 자체 내장된 마이크로프로세스에 의해 디지털 제어되고 마이크로프로세스는 ROM에 저장된 소프트웨어에 의하여 동작된다. 소리경로의 길이, 가스의 비열비, 기타 보일러 설비의 제한된 setting 값을 입력하고 소리의 음원인 압축공기를 on/off하는 솔레노이드를 동작시키며 송수신기의 증폭기로부터 전송된 소리신호를 받아서 신호처리 및 데이터 기록 기능을 수행한다. 주제어장치의 주요기능은 다음과 같다.

- 솔레노이드밸브를 제어하여 소리 발생
- 수신된 소리신호 검출 및 처리
- 각 경로의 소리 전송시간을 받은후 온도신호를 모니터링장치로 전송
- 측정 온도데이터값을 내부 메모리에 저장
- 시스템 입력값을 입력 및 저장

2-2-3. 모니터링 시스템

송수신기 및 주제어장치에서 측정, 처리된 온도값을 모니터링하는 발전소의 기존 터미널 혹은 PC를 말한다. 통

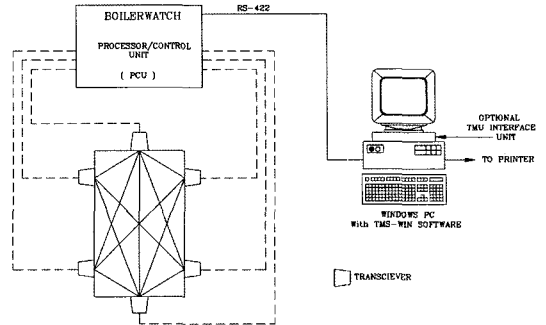


Fig. 3. 온도분포도 구현 시스템 구성도.

상적으로 RS422 통신선을 사용하여 PC를 사용하거나 4-20 mA 신호를 사용하여 DCS나 recoder 등에 연결하여 mapping software를 이용, 온도분포도를 표시한다. 전체 시스템의 구성도는 다음과 Fig. 3과 같다.

3. 음속을 이용한 온도측정 정확성 검증

500 MW급 opposition firing 타입 발전용 대형 보일러의 화로를 대상으로 음속 측정장치의 정확성을 검증하였다. 보일러 고온 부위에 열전대를 설치하고 온도 측정결과를 비교하였다. 보일러 화로는 1,500°C 이상의 고온과 유동특성상 열전대 설치가 어려워 비교적 고온이면서 계측기 설치가 가능한 800°C 온도 구간인 화로 뒤쪽 보일러 과열기 구간에 열전대를 설치하고 음속을 측정하는 송수신기도 동시에 설치하여 측정값을 비교하였다.

열전대는 Fig. 4, 5와 같이 5개를 1 set로 송수신기측에 1 set 맞은편 수신기측에 1 set, 총 10개를 보일러 내로 삽입하였다. 설치 위치의 보일러 폭은 15m로 1.5m 간격으로 열전대를 설치하였다. Fig. 6은 온도측정 결과이

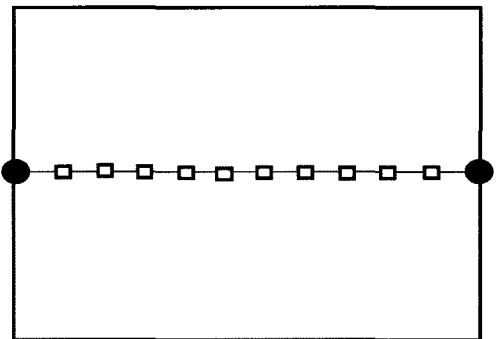


Fig. 4. 과열기 경로를 따라 설치된 열전대.

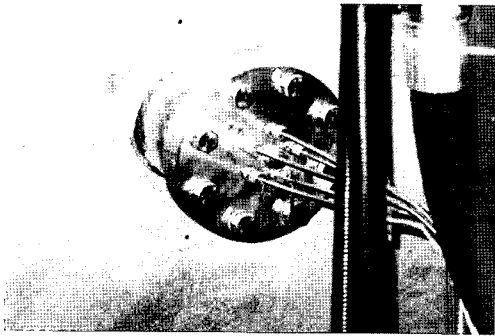


Fig. 5. 열전대 설치.

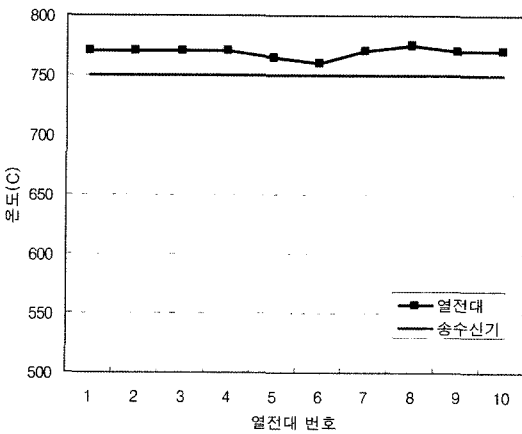


Fig. 6. 열전대와 음속 측정장치 온도계측값.

다. 그림에서 열전대 계측 온도는 평균 770°C로 음속 송신기로 측정된 온도는 열전대로 계측한 온도보다 약 20°C 정도 낮게 측정되어 약 2.5%의 측정오차가 발생하였다. 경로길이 오차범위는 ±0.2%^[11]로 15m에서는 30cm 이내가 되어야 하며 30cm의 경우 37°C 온도오차가 발생하므로 20°C 오차는 오차범위 이내로 신뢰범위 이내임을 알 수있다.

4. 음속을 이용한 화로내 온도분포 구현 기술

화로내 온도분포를 구하기 위하여 화로에 송수신기를 다수 설치한다. 8개 설치하는 경우 Fig. 7과 같은 24개의 경로가 생성된다. 각 경로에서 온도를 계산하는 방식은 다음과 같다. 즉, 경로상에서 화로벽이 온도가 제일 낮으므로 최저온도(Tmin)에 해당하고, 경로의 중앙이 최고 온도가 되어 온도구배를 형성한다. 화로벽의 온도는 주어지고(실험적으로 700°C), 소리 진행 시간을 측정하여 경로상의 평균온도(Tavg)가 식(2)에서 계산되며, 경로의

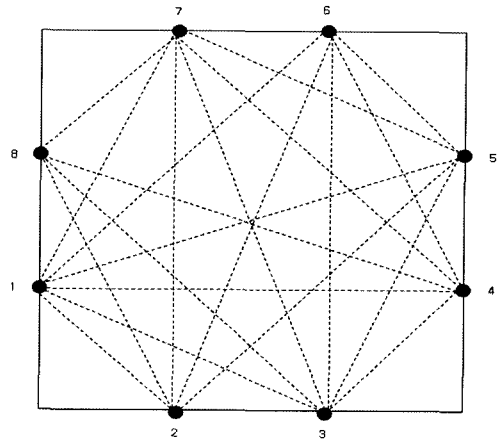


Fig. 7. 화로내 온도경로.

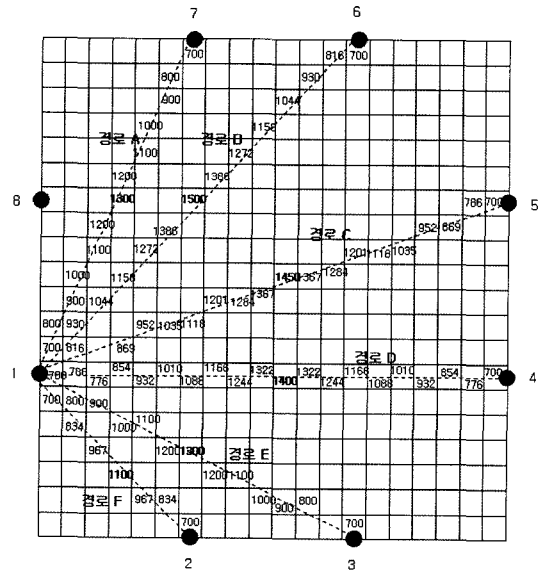


Fig. 8. 20*20 격자의 송수신 경로상의 온도구배.

중앙이 최고온도(Tmax)가 되므로 다음과 같은 식으로 최고온도값이 구해진다.

$$T_{max} = T_{avg} + (T_{avg} - T_{min}) \quad (4)$$

여기서 경로상 온도분포를 구하기 위하여 경로를 N개의 격자로 나누고 중앙의 최고온도 격자인 경로 중앙에서부터 좌, 우의 온도구배를 따라 N/2개씩 최저 온도 격자인 화로벽까지 식(5)의 값으로 온도가 저장되게 분배한다. Fig. 8은 화로를 가로, 세로 20의 격자로 나누고 1번 송수신기에서 나오는 6개의 온도경로를 따라 각 격자의 온도구배가 완성된 모습이다.

Table 2. 송수신기 1번 각 경로에서의 주요온도값.

송수신기 경로	단 위	평균온도	최저온도	최고온도	격자 수	격자간 온도강하값
		Tavg	Tmin	Tmax		
경로 A	°C	1000	700	1300	14	100
경로 B	°C	1100	700	1500	16	116
경로 C	°C	1150	700	1450	18	83
경로 D	°C	1100	700	1400	20	78
경로 E	°C	1000	700	1300	10	100
경로 F	°C	900	700	1100	6	133

$$\text{격자의 온도 강하값} = \frac{T_{avg} - T_{min}}{\frac{N}{2}} \quad (5)$$

Fig. 8에서 경로 A에서 격자가 14개이고 경로의 평균 온도(Tavg)가 1000°C 이면 화로벽 최저온도(Tmin)는 700°C 이므로 중앙부 최고온도(Tmax)는 1,300°C로써 격자간 100°C 온도구배로 경로A의 각 격자의 온도값이 구해진다(Table 2 참조).

같은 방식으로 경로B~경로F까지 각 격자에 대한 온도구배를 완성하고 다른 7개의 송수신기에 대해서도 동일한 절차를 수행하여 24개 경로에 대하여 화로내 각 격자의 온도를 구할 수 있고, 경로가 없는 격자에 대해서도 동일한 방법으로 인근 격자의 온도구배를 구하여 온도를 산출할 수 있어서 모든 격자의 온도값을 구할 수 있으므로 화로내 온도분포도를 완성할 수 있다

5. 현장적용 결과

500 MW급 opposition firing 타입 발전용 대형 보일러의 화로를 대상으로 송수신기 등 시스템을 설치, 구성하였다. 다음 Fig. 9과 같이 화로벽을 밴딩하여 Fig. 7과 같은 8개의 송수신기를 설치하고 주제어장치 및 모니터링시스템을 설치하고 보일러 정상운전 중 화로내 연소가스의 온도현황을 확인하여 온도분포도를 구현하였다.

등온선 온도분포도를 이용하여 온도분포를 확인하고 연소가스의 온도와 위치의 불균일 정도를 알아보았다. Fig. 10은 화로내 연소가스의 온도와 화염위치를 나타내는 전형적인 등온선 온도분포도이다. 그림에서 연소가스 중심부 온도, 화염위치, 화염중심에서부터 외부로의 온도분포를 나타내고 있다. 화염은 화로 좌, 위에서 높은 온도를 보여주고 있다. 즉 corner firing 보일러에서 보여주는 fire ball이나 화로중심에서 고온 현상은 없고, opposition firing 보일러의 전형적인 온도분포인 화로단면 좌, 위의 중간지점에서 최고온도가 형성되는 형상을 보여주고 있다. 화염중심은 좌, 위의 중심에서 형성되며 화염중심이 편향없이 비교적 좌, 위의 중앙에서 운전되



Fig. 9. 송수신기 설치를 위한 화로벽 가공.

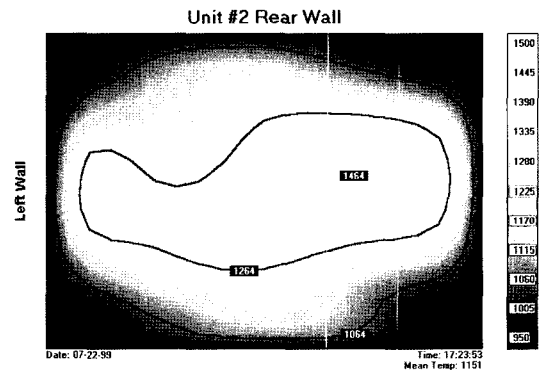


Fig. 10. 등온선 화로 온도분포.

고 있음을 알 수 있다. Fig. 11은 화로내 화염의 온도와 화염위치를 16개 영역으로 나타낸 영역별 온도분포도이다. 그림에서 화로단면에서의 분할된 영역의 평균온도를 보여주고 있다. 선택된 영역의 온도는 화면 우측

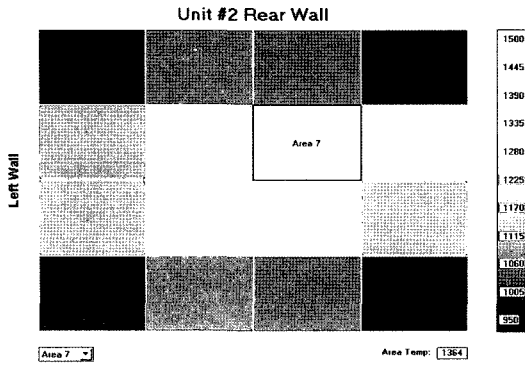


Fig. 11. 영역별 화로 온도분포.

하단에 표시되고 화염위치, 화염중심에서부터 바깥쪽 온도분포를 영역으로 나타내고 있다. 화로의 4개 코너의 평균온도가 제일 낮고 좌, 우를 따라서 중심 부근에서 화염의 평균온도가 높음을 알 수 있다.

5. 결 론

운전 중인 대형 발전용 보일러의 화로내 온도분포를 감시하기 위한 기술을 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 소리에 의한 온도측정 기본원리인 가스에서의 음속은 온도와 가스의 연소특성에 의해 결정 된다는 이론에 근거하여 음속 측정 및 소리 경로상의 온도를 구하고 화로온도분포를 구현하기 위한 시스템을 구성하였다.
2. 음속으로부터 송수신기 경로상의 평균온도를 산출하고 이를 다시 격자로 분할하여 온도구배를 주어서 최고온도부터 화로벽의 최저온도까지 온도값을 산출하고 실제로 8개 송수신기, 24개 경로부터 동일한 방식으로 각 경로내의 격자에 해당하는 온도를 구하여 온도분포도를 완성하였다.
3. 화로내의 온도현황을 표현하는 등온선 온도분포도 및 영역별 온도분포도를 이용하여 화로에서의 온도분포도를 구현하였다.
4. Opposition Firing 보일러의 전형적인 온도분포인 화로단면 좌, 우의 중간지점에서 최고온도가 형성되는 온도분포를 확인하였다.

사용기호

B : 소리상수, $(\gamma R/M)^{1/2}$

C : 가스 속에서의 소리속도(m/sec)
 d : 거리(m)
 M : 분자량(kg/mole)
 N : 경로상의 격자 수
 R : 가스상수(8,314 J/kmolK)
 T : 온도(°C)
 t : 소리 진행시간(sec)
 Tavg : 경로 평균온도(°C)
 Tmax : 경로 최고온도(°C)
 Tmin : 경로 최저온도(°C)
 γ : 비열비

참고문헌

1. Kleppe, J.A. "Engineering Application of Acoustics", Artech House Press, 1989.
2. Yori, L.G.; Dams, F.H.; Kleppe, J.A. "Acoustic Pyrometers : Picture Windows for Boiler Performance", Power, August, 1991.
3. Hilleman, D.D.; Marcin, R.J.; Kleppe, J.A. "Application of Acoustic Pyrometry as a Replacement for Thermal Probes in Large Gas and Oil Fired Utility Boilers", Power Gen, November, 1993.
4. "보령화력본부 기본운전지침서(제1, 2 호기)" 한국전력공사 보령화력본부, 1985.
5. "보령화력 2호기 발전설비 종합성능진단 결과보고서" 한전전력연구원, 1997.
6. "삼천포화력 3, 4 호기 운전지침서" 한국전력공사 삼천포화력본부, 1994.
7. "화염구조 분석을 위한 온도 및 열유속 측정기법 연구" 한전전력연구원, 1993.
8. "Acoustic Gas Temperature Monitors" EPRI.
9. "Comparison of Technoques for Furnace Gas Temperature Measurements During Start-Up of 750 MW Coal Fired Boiler" Scientific Engineering Instrument.
10. Rudolph H. Nichols, "An Acoustic Techniques for Rapid Temperature Distribution Measurement".
11. Babcock & Wilcox "Steam : its generation and use" Macdermott Company, 1992.
12. John A. Kleppe, "Sonic Instrumentation for Use in CEMS and Utility Boiler Application" EPRI, 1994.