

화력발전소에서 용융회가 열전달 감소에 미치는 영향에 관한 연구

A Study on the Heat Transfer Reduction due to the Clinker in the Thermal Power Plant

강희찬 · 이규욱

H. C. Kang and K. W. Lee

Key Words : Power Plant(발전소), Clinker(용융회), Heat Transfer(열전달), Thermal Properties(열 물 성치)

Abstract : This study was conducted for the heat transfer reduction due to the clinker formed in the furnace of the thermal power plant. The thermal properties of clinker such as thermal conductivity, specific heat, density and void fraction were measured. The thermal conductivities of the clinker were ranged 0.32-0.54 W/m · K and the average specific heat and the void fraction were 930 J/kg · K and 0.36 respectively. The thermal resistance of clinker was the greatest among the thermal resistances. It was found that the clinker reduces more than 90% of the heat transfer if the clinker is thicker than 10 cm.

1. 서 론

국내 화력발전소에서는 연료로 무연탄, 벙커C유를 일정한 비율로 혼합연소 또는 중유를 전소하고 있으며 고회분을 함유한 무연탄을 연소시키는 경우에는 용융회(clinker)의 생성이 거의 필연적이다. 보일러 연소실에 생성된 용융회의 낙하로 인하여 수냉각관의 파손, 연소실 내의 압력변동 발생, 보일러 효율저하 등 많은 문제점이 발생되고 있다. 특히 보일러 수냉각관 벽에는 용융회가 다량 형성되며 이는 보일러 수냉각관에서 열흡수를 저하시킨다. 열전달이 충분히 이루어지지 않은 연소가스가 연소실내 과열기의 온도를 상승시켜 과열저감기의 부하를 증가시키고, 고온의 연소가스가 연돌로 배출됨으로서 효율이 저하된다. 그러나 용융회에 의한 열손실 등에 대한 연구는 많지 않은 실정이다.

발전용 미분탄은 무연탄을 분쇄기에서 분쇄하여 미분탄(mesh 200, 통과율 80%)을 만들어 사용하며 이송용 공기(1차 공기)와 함께 연소실 안으로

분출된다. 분출시 버너 끝 부위에 부착된 노즐 및 이송용 공기 압력에 의해 연소실 안으로 확산되어 분출된다. 무연탄은 착화온도가 높아 자연발화가 일어나지 않으므로 보조연료를 사용하는 중유 버너를 점화시켜 미분탄을 연소시키고 있다. 이때 연소를 원활하게 하기 위하여 연소용 공기(2차 공기)가 공급되며 화중점 형성을 위하여 별도의 3차 공기를 공급하는 경우도 있다^{1,2)}.

미분탄 연소시 연소실내에 공급된 미분탄은 1500°C 정도의 고온의 화염과 접촉하여 연소하는 과정에서 일부는 재로 변하지 않고 용융상태로 연소실내에 체류한다. 이는 차가운 부위에 접촉할 때 고형화되면서 성장한다. 연소실 벽에 부착되어 하나의 큰 덩어리로 성장한 재의 집합체를 용융회라고 칭하고 있다.

일반적으로 용융회는 연소부하가 클 경우, 연소실내 온도가 회용점보다 높을 경우, 화염이 연소실내 안정되지 못하고 수냉관벽 쪽으로 치우칠 경우, 불완전연소로 환원성 기류가 형성될 경우, 연료유과다 사용으로 국부 과열의 경우, 급격한 출력변동에 의하여 연소실내 온도가 급상승하는 경우, 회용점이 낮은 석탄을 연소시키는 등의 경우에 잘 생기는 것으로 알려져 있다. 연소실 내부에서 용융회

접수일 : 1999년 8월 20일
강희찬 : 군산대학교 기계공학부
이규욱 : 서천화력발전처 품질관리과

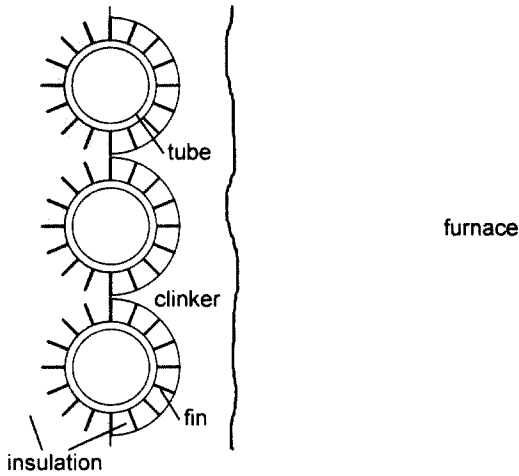


Fig. 1 Schematic diagram of clinker deposited on the cooling tube in the furnace

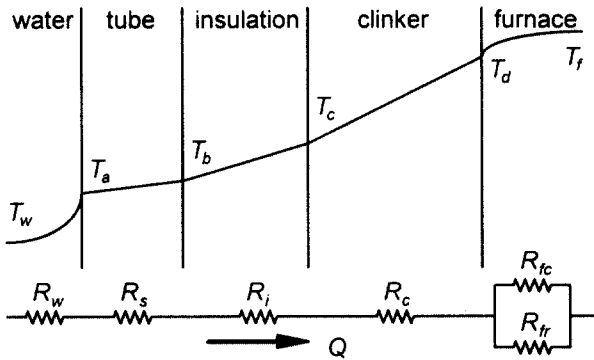


Fig. 2 Thermal resistance model to estimate the heat loss due to clinker in the furnace

는 버너의 바로 아래 아아치 튜브에서부터 아래쪽으로 2차 공기 덕트까지 전 범위에 걸쳐 부착되며 특히 버너의 바로 아래와 연소실 측면 수냉각관 벽에 집중적으로 생성된다. 버너 직 하부에는 불규칙한 크기를 갖는 원추모양의 용융회가 전표면에 부착되며, 연소실 측면 수냉각관 벽에는 관형 형태의 직사각형 모양으로, 전후면의 수냉각관 벽면에는 불규칙한 반원형의 형태로 부착되는 것으로 관찰되고 있다. 용융회의 두께는 보일러 운전시간 경과에 따라 다르지만 일반적으로 연소실의 전후면에 위치한 수냉각관 벽에 약 0.3 m, 연소실 측면 수냉각관 벽에 약 0.5 m 이다.

용융회 발생에 따라 보일러 수냉각관에서 열흡수율 저하, 보일러 후부 전열면 온도상승, 과열저감기 유량증가, 터빈 효율 저하, 용융회 낙하에 의한 설비손상, 용융회 제거를 위한 보일러 정지, 용

융회 처리 시 동력소요 등의 문제점이 발생하고 있다. 국내 화력발전소에서 그 동안 지속적으로 운전방법과 설비를 개선하고 탄질을 고급화하여 심각한 문제점은 줄어든 상태이나 아직도 용융회 생성을 방지할 수 있는 근본적인 대책은 마련하기 어려운 실정이다.

본 연구에서는 국내탄을 사용하는 발전소에서 생성되는 용융회가 열손실에 미치는 영향에 대하여 중점을 두고 연구하였다. 특히 실제 용융회의 열전도율, 비열, 밀도 그리고 기공율과 같은 열물성치를 측정하여 추후 연구자에게 활용될 수 있는 자료를 제시하였다. 수냉각관 벽에서 열손실 추정 모델을 제시하고 열손실량을 추산하였다.

2. 해석모델

본 연구에서 대상으로 하는 수냉각관은 연소실 내에 관(tube)이 일정한 간격으로 배치되어 있다. 수냉각관에는 열전달을 촉진할 목적으로 흰(fin)이 부착되어 있다. 수냉각관의 외면에는 단열재가 부착되어 있고 수냉각관의 연소실 측으로는 관을 보호하기 위한 방열재가 부착되어 있다. 연소실내 수냉각관과 용융회의 개략도는 Fig. 1과 같다.

용융회가 부착되는 연소실 벽의 규격은 수십 m × 수십 m 이다. 연소실 벽에서는 Fig. 1에 도시된 수냉각관이 수백 개 이상 설치되어 있다. 수냉각관으로 열흐름의 해석을 단순화하기 위하여 다수의 수냉각관과 흰은 연속된 평면이며, 흰 내부의 열저항은 전체 열저항에 비하여 무시할 만하고, 용융회의 외부에는 대류 및 복사 열저항이 존재하는 것으로 가정하였다. 이때 열저항은 냉각수와 수냉각관의 내벽 사이의 대류열저항, 수냉각관 자체, 단열재 그리고 용융회의 전도열저항, 용융회 외부의 대류 및 복사열저항으로 구성된다고 가정하였다. 열전달은 연소실내부에서 수냉각관벽으로 1차 원적으로 흐른다고 가정하고 열저항에 대한 모형도는 Fig. 2에 도시하였다.

연소실에서 수냉각관 벽면을 통과하는 열전달율은 다음과 같다.

$$Q = \frac{T_f - T_w}{R_{tot}} \quad (1)$$

총 열저항, R_{tot} 는 다음과 같다.

$$R_{tot} = R_w + R_s + R_i + R_c + R_f \quad (2)$$

여기서 R_w, R_s, R_i, R_c, R_f 는 각각 냉각수, 수냉각관, 단열재, 용융회, 연소실측의 열저항이다. 연소실측의 열저항은 대류(R_{fc})와 복사열저항(R_{fr})이 병렬로 조합된다.³⁾

$$R_f = \frac{1}{\frac{1}{R_{fc}} + \frac{1}{R_{fr}}} \quad (3)$$

각 열저항은 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$R_w = \frac{1}{Ah_w} \quad (4)$$

$$R_n = \frac{L_n}{Ak_n} \quad (5)$$

$$R_{fr} = \frac{1}{\varepsilon\sigma A(T_f + T_c)(T_f^2 + T_c^2)} \quad (6)$$

$$R_{fc} = \frac{1}{Ah_f} \quad (7)$$

식 (5)에서 첨자 n 은 전도열저항 요소인 수냉각관(s), 단열재(i) 및 용융회(c)를 표시한다. 최대 열전달율은 용융회가 없는 경우로 다음 식으로 표시된다.

$$Q_{\max} = \frac{T_f - T_w}{R_w + R_s + R_i + R_f} = \frac{T_f - T_w}{R_{\min}} \quad (8)$$

용융회에 의한 열전달감소는 다음과 같이 최대 열전달율에서 실제 열전달율을 감한 것이다.

$$Q_{\text{loss}} = Q_{\max} - Q = \frac{T_f - T_w}{\frac{1}{R_{\min}} - \frac{1}{R_{\text{tot}}}} \quad (9)$$

열전달감소율은 최대열전달에 대한 실제열전달의 비로 다음과 같다.

$$\phi = \frac{Q_{\text{loss}}}{Q_{\max}} \quad (10)$$

본 연구의 대상인 화력발전소의 조건에 맞도록 관련인자를 다음과 같이 추산하였다. 수냉각관내의 열전달계수(h_w)는 다음의 Dittus-Boelter⁴⁾식을 이용하였다.

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (11)$$

여기서 Re 와 Pr 은 수냉각관 내경을 기준으로 한 Reynolds수와 Prandtl수이다. 수냉각관 내부에 흐르는 물의 열전달계수는 내경($d=0.03531$ m), 평균 유속($V=20$ m/s), 온도($T_w=350^\circ\text{C}$) 조건에서 구하였다. 무차원수는 $Pr=1.7$, $Re \approx 55,000$, $Nu=178$ 이고, 열전달계수(h_w)는 대략 $1,960$ $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ 이다. 본 연구에서 사용한 조건은 실제 운전 조건을 참고하여 Table 1에 정리하였다.

Table 1 Representative condition used in the present work

Parameter	Unit	Value
Water temperature, T_w	$^\circ\text{C}$	350
Furnace temperature, T_f	$^\circ\text{C}$	1400
Heat transfer coefficient inside of the tube, h_w	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	1960
Heat transfer coefficient of inside furnace, h_{fc}	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	100
Emissivity, ε		0.9
Thickness of tube, L_s	m	0.005
Thickness of clinker, L_c	m	0.5
Thickness of insulation, L_i	m	0.007
Thermal conductivity of tube, k_s	$\text{W/m} \cdot \text{K}$	19
Thermal conductivity of clinker, k_c	$\text{W/m} \cdot \text{K}$	0.94
Thermal conductivity of insulation, k_i	$\text{W/m} \cdot \text{K}$	1.0

The thermal conductivities are referred from the reference⁵⁾.

3. 실험장치 및 실험방법

본 연구 대상인 용융회(Fig. 3)는 가공이 쉽지 않아 기존의 열전도율측정장치를 사용하는데 어려움이 있었다. 따라서 본 연구에 적합하도록 Fig. 4와 같은 열전도율측정장치를 제작하였다. 열전도율 측정장치는 대상의 시료 상하에 전기가열기와 냉각판을 설치하였다. 전기가열기와 냉각판 사이에 균일 온도조건을 만족하도록 두께 10 mm인 순수 구리판($k=380$ W/mK)을 설치하였다. 전기가열기, 구리판, 시료 및 냉각판은 동일한 단면적을 가지며 규격은 50 mm × 50 mm 정방형이다. 시료의 두

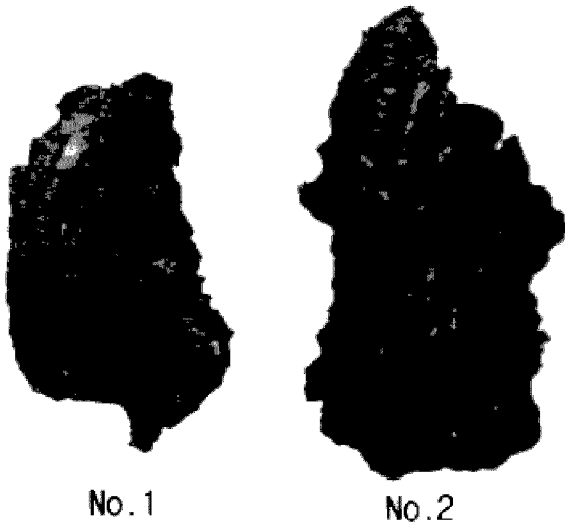


Fig. 3 Clods of clinker

장치의 외부 전체는 두께 50 mm 이상의 스티로폼으로 단열시켰다. 정상상태의 온도구배를 구하기 위해서는 실험 시작 후 약 5 시간 이상이 소요되었다. Fourier의 전도법칙을 이용하여 열전도율은 다음과 같이 계산하였다.

$$k = \frac{LQ_{heat}}{A(T_h - T_c)} = \frac{LV^2}{AR_h(T_h - T_c)} \quad (12)$$

여기서 L , A , V , R_h , T_h 와 T_c 는 각각 시료의 두께와 단면적, 인가 전압, 가열기의 저항 및 가열과 냉각 측의 온도이다.

비열의 측정을 위해 두께 20 mm 스티로폼으로 가로, 세로, 높이가 각각 $90 \times 125 \times 155$ mm인 단열재 용기를 사용하였다. 초기의 온도가 다른 시료와 용기내의 온도를 측정하여 에너지균형식으로부터 비열은 다음과 같이 구하였다.

$$c_{b,c} = \frac{c_{p,w}m_w(T_w - T_f)}{m_c(T_f - T_c)} \quad (13)$$

여기서 $c_{p,c}$, $c_{p,w}$, m_w , m_c , T_w , T_c 와 T_f 는 각각 시료의 비열, 물의 비열, 물의 초기질량, 시료의 초기질량, 물의 초기온도, 시료의 초기온도 및 시료와 물의 최종온도이다. 비열측정에서 정상상태까지 이르는 데 약 20분 정도 소요되었다.

용융회의 기공율은 용융회 시료를 물에 잠긴 상태에서 질량을 측정된 값으로 구하였다. 이때 용융회는 물 속에 수 시간동안 담가두어 물이 충분히 침투하도록 하였다. 물이 침투된 용융회의 질량을 물에 잠긴 상태에서 측정한다. 공기 중에서의 시료의 질량과 물 속에서의 시료의 질량의 차이는 용융회가 배제한 물의 질량($\rho_w V_c$)이 된다. 이로부터 용융회의 순수체적(V_c)을 구할 수 있다. 용융회의 기공율은 용융회의 순수체적(V_c)을 용융회의 외관체적(V_s)으로 나누어 다음과 같이 계산하였다.

$$\sigma = \frac{V_s - V_c}{V_s} \quad (14)$$

4. 결과 및 고찰

4.1 용융회의 열물성치

열전도율 측정의 타당성을 확인하기 위해서 테프론 시편에 대하여 실험 후 비교하였다. 시간에

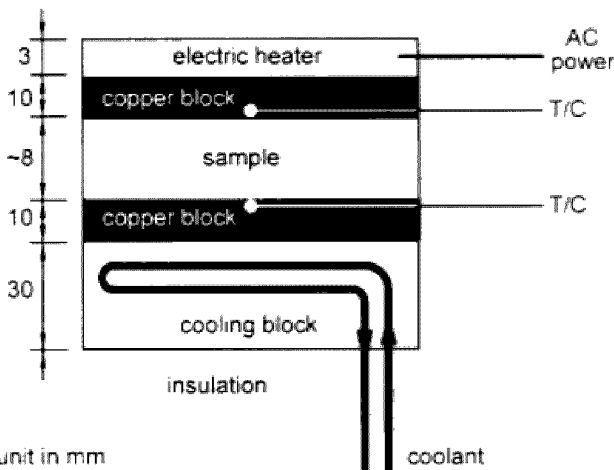


Fig. 4 Schematic diagram of thermal conductivity meter used in the present work

계는 약 8 mm 정도이며 전기가열기와 냉각판의 두께는 각각 3 mm와 30 mm 이다. 전기가열기의 저항은 약 130 Ω 이고 가열량 측 입력전력은 전압 조절장치로 입력전압을 조절하고 정밀전력계로 측정하였다. 일반적인 입력전압은 약 10 V 이었다. 냉각판은 순수 알루미늄으로 제작하였고 내부의 온도가 균일하도록 냉각수 유로를 설치하였다. 냉각은 항온조로부터 15°C의 물을 정량유량펌프로 냉각판에 일정한 유량을 흐르도록 하였다. 시료에 주어진 온도구배는 시료의 상하에 설치된 구리판에 직경 0.25 mm인 T형 열전대로 구하였다. 열전대는 구리판에서 시료 쪽으로 부착하였다. 시료와 구리판 사이의 접촉열저항을 줄이기 위하여 구리판 양쪽에서 볼트로 압착시켰다. 본 열전도율측정

다른 시료의 고온과 저온 측의 온도변화의 한 예가 Fig. 5에 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 약 6시간 경과 후 온도편차가 일정하게 유지되었다. 측정된 테프론의 밀도와 열전도율은 Table 2와 같다. 본 실험결과를 ASHRAE⁵⁾의 자료와 비교할 때 밀도는 0.2% 열전도율은 약 3% 이내에서 일치하고 있어 본 연구의 열전도율측정장치 및 실험방법은 신뢰할 만하다고 할 수 있다. 이와 같은 방법으로 5개의 용융회 시료에 대하여 측정하였고 밀도, 열전도율, 기공율 및 비열에 대한 결과를 Table 3과 4에 정리하였다.

Fig. 6은 용융회의 기공율과 밀도의 관계를 나타낸 것이다. 용융회의 평균 밀도는 915 kg/m³ 이었고 평균 기공율은 35.9% 이었다. 본 실험결과로부터 용융회의 밀도와 기공율은 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\rho = (1 - \sigma)\rho_c + \sigma\rho_a \quad (15)$$

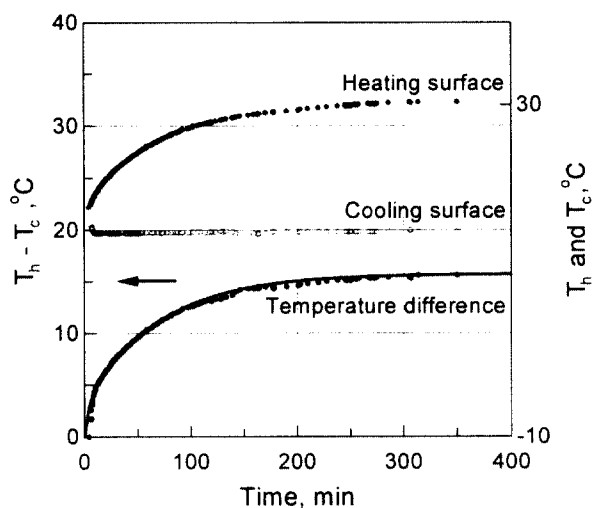


Fig. 5 Variation of the temperatures of heating and cooling surface and the difference along the time in the measurement of thermal conductivity

Table 2 Comparison of the present result to the reference data for the Teflon sample

Symbol	ρ	k
Unit	kg/m ³	W/m · K
Reference data ⁹⁾	2200	0.35
Present data	2196	0.36
Error	-0.2%	2.8%

Table 3 Test results for the density, the thermal conductivity and the void fraction of clinker samples

Property	Density	Thermal conductivity	Void fraction
Sample No.	kg/m ³	W/m · K	%
1	573	0.420	54.7
2	585	0.316	47.5
3	1070	0.342	26.1
4	1280	0.494	26.5
5	1070	0.540	24.3
average	915	0.422	35.9

Table 4 Specific heat of clinker

Property	Specific heat
Sample No.	J/kg · K
1	923
2	936
average	930

여기서 ρ , ρ_c , ρ_a 는 각각 평균밀도, 용융회 자체의 밀도 및 공기의 밀도이다. 본 실험결과에서 용융회 자체의 밀도 $\rho_c=1395 \text{ kg/m}^3$ 이었다.

용융회의 열전도율은 0.32-0.54 W/m · K 범위에 있었고 5개 시료에 대한 평균 열전도율은 0.422 W/m · K 이었다. 상온에서 측정한 기공율에 대한 용융회의 열전도율이 Fig. 7에 도시되어 있다. 그림으로부터 용융회의 열전도율은 기공율과 큰 관

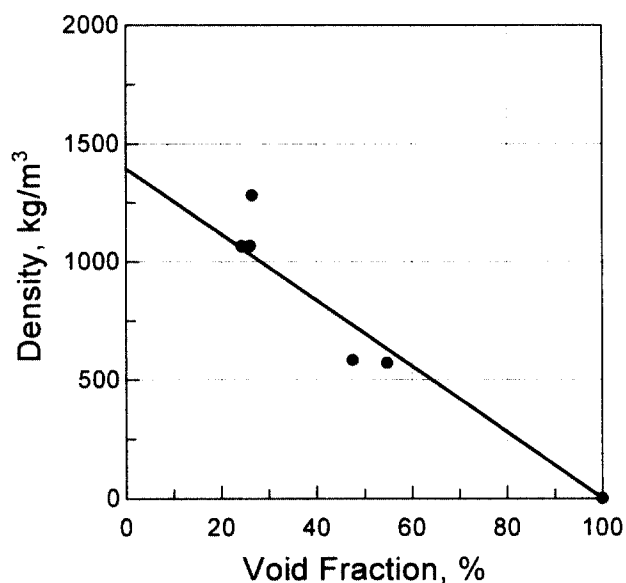


Fig. 6 Density vs. void fraction of clinker

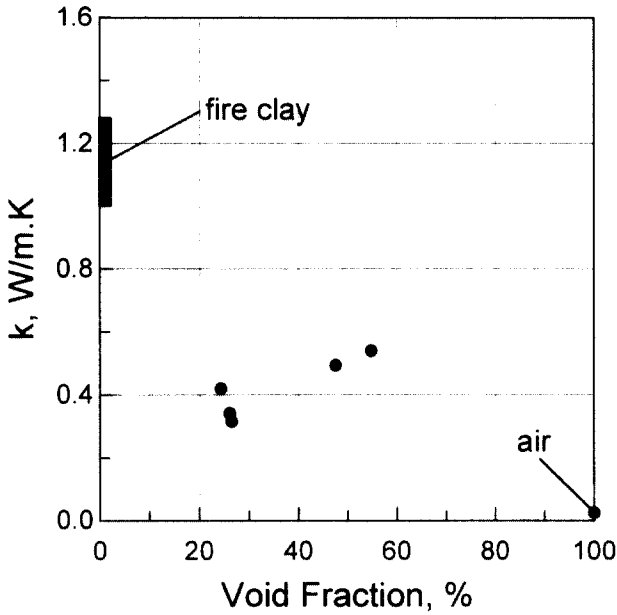


Fig. 7 Thermal conductivity vs. void fraction of clinker

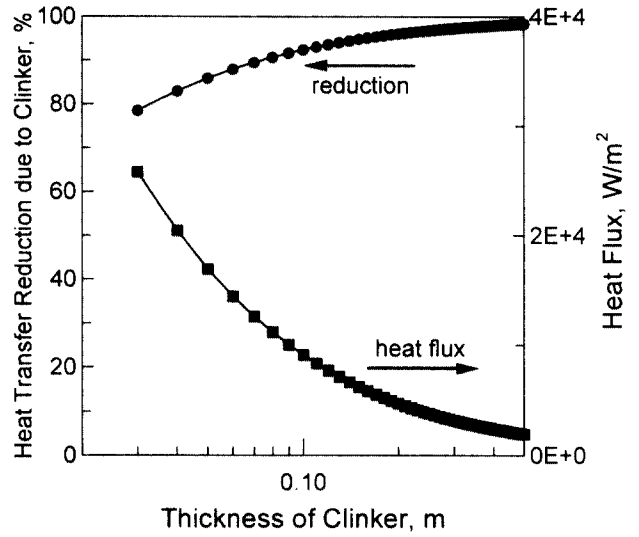


Fig. 9 Heat flux and heat transfer reduction due to clinker along the thickness of clinker

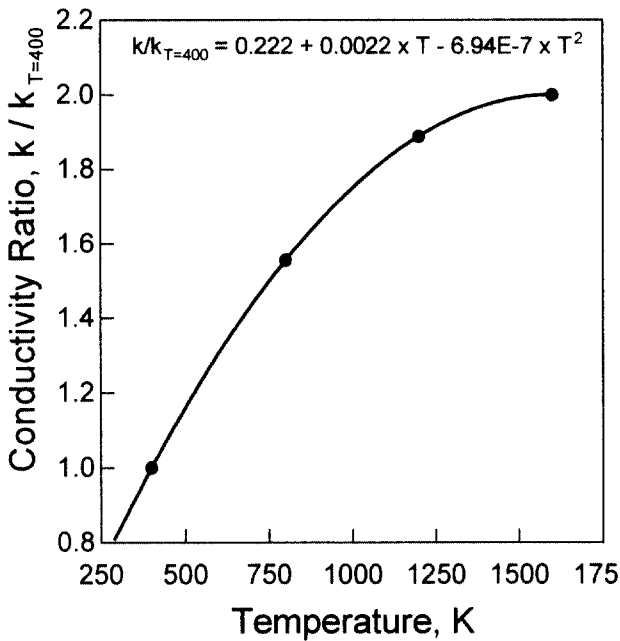


Fig. 8 Effect of temperature on the thermal conductivity of fire clay, data from the reference⁵⁾

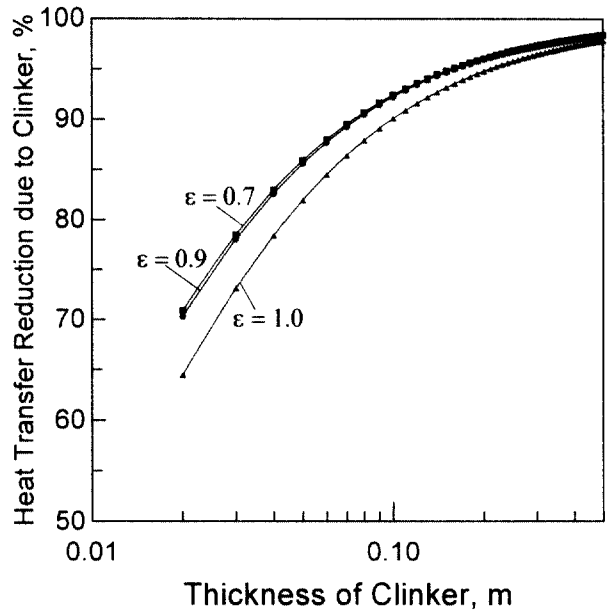


Fig. 10 Reduction of heat transfer due to the emissivity of clinker

련이 없는 것으로 사료된다. 이는 용융회의 열전도율이 연소실내의 생성 위치에 따라 물질의 조성이 다르기 때문으로 해석된다. 참고로 내화 흙(fire clay)과 공기의 열전도율을 비교하였다. 용융회의 열전도율은 내화 흙의 열전도율의 절반 수준을 보이고 있다. 열전도율은 일반적으로 온도의 함수이다. 한 예로 내화 흙의 온도에 따른 열전도율의 예

가 Fig. 8에 도시되어 있다. 용융회의 열전도율도 내화 흙과 유사한 경향을 갖는다고 가정하고 고온 영역으로 값으로 환산한다면 본 연구의 대상영역인 350, 875, 1400°C에서 각각 $k_c=0.68, 0.94, 1.01$ W/m·K일 것으로 예상된다. 열전도율의 온도의 영향을 고려한다면 용융회의 열전도율은 내화 흙과 거의 유사한 경향을 갖는다고 할 수 있다.

용융회의 평균비열은 930 J/kg·K로 측정되었고 이는 내화 흙의 비열 960 J/kg·K과 거의 일

치한다.

4.2 용융회에 의한 열전달감소

이상과 같은 열물성치의 추산으로부터 용융회에 의한 열전달감소를 식(1)-(10)으로 계산하였다. 계산에 사용한 대표적인 값은 Table 1에 정리된 바와 같다. 계산결과를 Fig. 9와 10에 도식화하였다. 용융회의 두께가 증가할수록 열전달감소는 급격하게 증가하며 10 cm 이상에서는 열전달감소는 92% 정도로 나타났다. 따라서 적은 두께의 용융회가 존재하더라도 열전달은 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 용융회가 존재하지 않을 경우에는 연소실과 수냉각관 사이에 주된 열저항이 수냉각관 내부와 수냉각관 외부의 방열재이다. 용융회 벽의 복사열저항의 계산에서 흡수율의 영향이 Fig. 10에 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 용융회의 두께가 2 cm 이상에서는 흡수율이 0.7-1.0으로 변화한다 하더라도 열전달감소에는 큰 영향을 미치지 못하는 것을 보이고 있다. 이는 외벽의 복사열저항이 전체 열저항에 비하여 무시할 만하다는 것을 의미한다.

본 연구결과로부터 용융회는 연소실 내부에서 열전달을 크게 감소시키며 용융회의 제거가 열전달 성능을 향상시키는데 매우 중요하다.

5. 맺 음 말

본 연구는 미분탄을 사용하는 화력발전소의 수냉각관 벽에 부착되어 열전달감소를 유발시키는 용융회에 대하여 고찰하고 실제 용융회의 열전도율, 밀도, 기공율, 비열을 측정하였다. 측정된 결과를 토대로 용융회에 의한 열전달감소를 계산하고 결과를 비교·검토하였다.

- 1) 열전도율, 비열, 기공율 측정장치를 제작하여 실험을 실시하였고, 기준시료인 테프론에 대하여 약 3% 이내의 정확도로 열전도율을 측정할 수 있었다.
- 2) 용융회의 평균 열전도율은 $0.42 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 이었고, 비열은 $930 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ 로서 내화 흙의 $960 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ 와 거의 같은 값을 나타냈다. 또한 용융회의 기공율은 24-55% 정도로써 그 편차가 크게 나타났다.
- 3) 용융회의 기공율과 밀도는 비교적 관련은 있으나 기공율과 열전도율은 상관성이 크지 않았다. 이로부터 용융회는 생성위치 및 조건에 따라 그 조성이 다른 것으로 판단된다.

라) 측정결과를 기초 자료로 용융회의 두께가 0.1 m 이상인 경우에는 용융회에 의한 열전달 감소가 92% 이상을 차지하여 이에 대한 대책이 매우 중요할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. P. J. Potter, 조경해 역, "발전소 그 이론과 설계", 구미기술, pp. 297~318, 1998
2. 김동원, "증기보일러 및 원동기", 동명사, pp. 64~92, pp. 74~92, 1998
3. A. F. Mills, "Heat and Mass Transfer", Irwin, pp. 24~29, 1995
4. F. P. Incropera and D. P. Dewitt, "Introduction to Heat Transfer", John Wiley & Sons, pp. 404~408, 1981
5. American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, ASHRAE Handbook of Fundamentals, ASHRAE, New York, 1981