



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2022년 2월

석사학위논문

고체연료의 측정된 연소율과
소결광 내 Calcium-Ferrite
형성량을 이용한 수치모델링을
통한 소결 공정의 동역학적 평가

조선대학교 대학원

첨단소재공학과

류 근 용

고체연료의 측정된 연소율과 소결광 내 Calcium-Ferrite 형성량을 이용한 수치모델링을 통한 소결 공정의 동역학적 평가

Kinetic assessments for sintering process by numerical modeling
with the measured combustion rates of solid carbon sources and
Calcium-Ferrite formation in the sintered ore

2022년 2월 25일

조선대학교 대학원

첨단소재공학과

류 근 용

고체연료의 측정된 연소율과
소결광 내 Calcium-Ferrite
형성량을 이용한 수치모델링을
통한 소결 공정의 동역학적 평가

지도교수 김 선 중

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함.

2021년 10월

조선대학교 대학원

첨단소재공학과

류 근 용

류근용의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김희수 (인)

위 원 조선대학교 교수 김선중 (인)

위 원 조선대학교 교수 장희진 (인)

2021년 12월

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLES	iv
LIST OF FIGURES	vii
ABSTRACT	xii
제 1 장 서 론	1
제 2 장 모델 설명	9
제 1 절 Heat balance of gas & solid	10
제 2 절 Mass Heat balance of gas	13
제 3 절 Model algorithm	14
제 3 장 실험방법	16
제 1 절 고체연료의 연소 속도	16
제 2 절 저유량에서의 고체연료 연소 온도	20
제 3 절 고유량에서의 고체연료 연소 온도	25

제 4 장 결과 및 고찰	28
제 1 절 고체연료의 연소 속도	28
1. 고체연료의 연소 속도 측정	28
2. 고체연료의 연소 속도 상수	31
제 2 절 저유량에서의 고체연료 연소 온도	33
1. 저유량에서의 고체연료 연소 온도 측정	33
2. 저유량에서의 소결광 EPMA 분석	35
3. 저유량에서의 소결광 ICP-OES 분석	44
제 3 절 고유량에서의 고체연료 연소 온도	46
1. 고유량에서의 고체연료 연소 온도 측정	46
2. 고유량에서의 소결광 EPMA 분석	48
3. 고유량에서의 소결광 ICP-OES 분석	58
4. 고유량에서의 압력손실 및 공극률 측정	60
5. 온도데이터와 압력손실 데이터의 비교	66
제 4 절 시뮬레이션과 실험 결과값 비교	68
1. 높이(Z)와 고체연료비의 시뮬레이션 비교	68
2. Heat Pattern 시뮬레이션	70

제 5 장 결 론	72
참 고 문 헌	73

LIST OF TABLES

Table 1.1	The difference method used in previous studies.	8
Table 2.1	Symbols in this modeling.	12
Table 3.1	Conditions of experiment.	19
Table 3.2	Conditions of solid fuels.	19
Table 3.3	Proximate analysis of solid fuels.	19
Table 3.4	Mixing ratio of slag basicity 1.4, 1.7 and 2.0.	24
Table 3.5	Conditions of solid fuels.	24
Table 4.1	Symbols in modeling.	32
Table 4.2	Composition of various phases in sample with 1.4 of C/S and sintererd by cokes.	37
Table 4.3	Composition of various phases in sample with 1.7 of C/S and sintererd by cokes.	37
Table 4.4	Composition of various phases in sample with 2.0 of C/S and sintererd by cokes.	37
Table 4.5	Composition of various phases in sample with 1.4 of C/S and sintererd by anthracites.	39

Table 4.6 Composition of various phases in sample with 1.7 of C/S and sintererd by anthracites. 39

Table 4.7 Composition of various phases in sample with 2.0 of C/S and sintererd by anthracites. 39

Table 4.8 Composition of various phases in sample with 1.4 of C/S and sintererd by mixture of solid fuels. 41

Table 4.9 Composition of various phases in sample with 1.7 of C/S and sintererd by mixture of solid fuels. 41

Table 4.10 Composition of various phases in sample with 2.0 of C/S and sintererd by mixture of solid fuels. 41

Table 4.11 Composition of various phases in sample with 1.4 of C/S and sintererd by cokes. 50

Table 4.12 Composition of various phases in sample with 1.7 of C/S and sintererd by cokes. 50

Table 4.13 Composition of various phases in sample with 2.0 of C/S and sintererd by cokes. 50

Table 4.14 Composition of various phases in sample with 1.4 of C/S and sintererd by anthracite. 52

Table 4.15 Composition of various phases in sample with 1.7 of C/S and sintererd by anthracite. 52

Table 4.16 Composition of various phases in sample with 2.0 of C/S and

sintererd by anthracite. 53

Table 4.17 Composition of various phases in sample with 1.4 of C/S and
sintererd by mixture of solid fuels. 54

Table 4.18 Composition of various phases in sample with 1.7 of C/S and
sintererd by mixture of solid fuels. 55

Table 4.19 Composition of various phases in sample with 2.0 of C/S and
sintererd by mixture of solid fuels. 55

Table 4.20 Conditions of simulation data. 69

LIST OF FIGURES

Fig. 1.1 The cross-sectional situation of the charge layer during the sintering process.	4
Fig. 1.2 Schematic diagram of CaO-Fe ₂ O ₃ formation.	5
Fig. 1.3 Schematic diagram of NSC model.	6
Fig. 1.4 Schematic diagram of JFE model.	7
Fig. 2.1 Schematic diagram of sinter bed.	9
Fig. 2.2 The grid model used in this study simulation model.	11
Fig. 2.3 Algorithm of Sinter bed model.	15
Fig. 3.1 Schematic diagram of TGA and combustion rate experimental.	17
Fig. 3.2 Time overview of TGA and Combustion rate experiment.	18
Fig. 3.3 Schematic diagram of temperature profile experimental.	21
Fig. 3.4 Detailed schematic diagram in sample area.	22
Fig. 3.5 Time overview of temperature profile experiment.	23
Fig. 3.6 Schematic diagram of temperature profile experimental.	26
Fig. 3.7 Time overview of temperature profile experiment.	27

Fig. 4.1 Effect of temperature(1273, 1373 and 1473K) on the reduction ratio by combustion reaction of solid fuels. 29-30

Fig. 4.2 Effect of time on the temperature profile of coke, anthracite and mixture. 33-34

Fig. 4.3 Mineralogical structure (A) and Area ratio (B) of sample with C/S 1.4 sintered by cokes. 36

Fig. 4.4 Mineralogical structure (A) and Area ratio (B) of sample with C/S 1.7 sintered by cokes. 36

Fig. 4.5 Mineralogical structure (A) and Area ratio (B) of sample with C/S 2.0 sintered by cokes. 36

Fig. 4.6 Mineralogical structure (A) and Area ratio (B) of sample with C/S 1.4 sintered by anthracites. 38

Fig. 4.7 Mineralogical structure (A) and Area ratio (B) of sample with C/S 1.7 sintered by anthracites. 38

Fig. 4.8 Mineralogical structure (A) and Area ratio (B) of sample with C/S 2.0 sintered by anthracites. 39

Fig. 4.9 Mineralogical structure (A) and Area ratio (B) of sample with C/S 1.4 sintered by mixture of solid fuels. 40

Fig. 4.10 Mineralogical structure (A) and Area ratio (B) of sample with C/S 1.7 sintered by mixture of solid fuels. 40

Fig. 4.11 Mineralogical structure (A) and Area ratio (B) of sample with C/S 2.0 sintered by mixture of solid fuels. 41

Fig. 4.12 Effect of solid fuels on the area ratio of Slag, Calcium-Ferrite and Matrix phase of C/S. 42-43

Fig. 4.13 Comparison of Fe₂O₃ and CaO contents measured by ICP-OES analysis and calculated by area ratio EPMA results. 45

Fig. 4.14 Effect of time on the temperature profile of coke, anthracite and mixture. 46-47

Fig. 4.15 Mineralogical structure (A) and Area ratio (B) of sample with C/S 1.4 sintered by cokes. 49

Fig. 4.16 Mineralogical structure (A) and Area ratio (B) of sample with C/S 1.7 sintered by cokes. 49

Fig. 4.17 Mineralogical structure (A) and Area ratio (B) of sample with C/S 2.0 sintered by cokes. 49

Fig. 4.18 Mineralogical structure (A) and Area ratio (B) of sample with C/S 1.4 sintered by anthracites. 51

Fig. 4.19 Mineralogical structure (A) and Area ratio (B) of sample with C/S 1.7 sintered by anthracites. 51

Fig. 4.20 Mineralogical structure (A) and Area ratio (B) of sample with C/S 2.0 sintered by anthracites. 52

Fig. 4.21 Mineralogical structure (A) and Area ratio (B) of sample with

C/S 1.4 sintered by mixutre of solid fuels. 53

Fig. 4.22 Mineralogical structure (A) and Area ratio (B) of sample with C/S 1.7 sintered by mixutre of solid fuels. 54

Fig. 4.23 Mineralogical structure (A) and Area ratio (B) of sample with C/S 2.0 sintered by mixutre of solid fuels. 54

Fig. 4.24 Effect of solid fuels on the area ratio of Slag, Calcium-Ferrite and Matrix phase of C/S. 56-57

Fig. 4.25 Comparison of Fe_2O_3 and CaO contents measured by ICP-OES analysis and calculated by area ratio EPMA results. 59

Fig. 4.26 Effect of time on the pressure drop of coke, anthracite and mixture. 60-61

Fig. 4.27 Effect of porosity of basicity 1.4. 62

Fig. 4.28 Effect of porosity of basicity 1.7. 66

Fig. 4.29 Effect of porosity of basicity 2.0. 64

Fig. 4.30 Effect of porosity on basicity by solid fuels. 65

Fig. 4.31 Temperature profile and Pressure drop(Coke) C/S 1.4 at 1423K. 66

Fig. 4.32 Temperature profile and Pressure drop(Coke) C/S 1.7 at 1423K. 67

Fig. 4.33 Temperature profile and Pressure drop(Coke) C/S 2.0 at 1423K.
67

Fig. 4.34 Effect of time and temperature by height of simulation data and
experimental data. 68

Fig. 4.35 Effect of time and solid temperature by mass ratio of coke. .. 69

Fig. 4.36 Effect of time and temperature by height of simulation data · 70

Fig. 4.37 Heat pattern image by simulation results. 71

Abstract

Kinetic assessments for sintering process by numerical modeling with the measured combustion rates of solid carbon sources and Calcium-Ferrite formation in the sintered ore

Geun-Yong Ryu

Advisor: Prof. Sun-Joong Kim, Ph. D.

Dept. of Advanced Materials Engineering

Graduate School of Chosun University

In general, the sintered ores were generated by mixing raw materials such as iron ore, CaCO_3 and solid fuels. The forming fraction of CaO based liquidus phases was dependent on the mixing ratio of raw materials and temperature. In order to improve the quality of sintered ore, it is very important to control the temperature distribution of the sintering process. However, the controlling temperature for sintering the iron ore is not simple because the complex reactions among the combustion of cokes, the decomposition of CaCO_3 , the melting of CaFe_2O_4 and slag occurred immediately. The controlling temperature in the sintering process can be conducted by simulation of the complex reactions. In this study, the formation fraction of CaO based liquidus phases was investigated by changing sinter basicity at ~ 1423 K. In the experiment, when the temperature increased from room temperature to target temperature, the atmosphere was controlled by the N_2 gas. After reaching target temperature, atmosphere was changed to dried air gas and then combustion of solid fuels has been carried out for 2 hours. The samples were evaluated using EPMA and image analysis. Furthermore, we measured the combustion rate of solid fuels which is one of the factors to determine the temperature of the sintering process. In the experiment, when the temperature increased from room temperature to target temperature, the atmosphere was controlled by the (N_2) gas. After reaching target temperature, atmosphere was changed to dried air gas and then combustion of solid fuels has been carried out for 2 hours. The numerical model of the sintering process was developed by 4th Runge-Kutta method using combustion rate of solid fuels which is obtained from the experiment. The distribution of temperature was simulated by the developed model.

제 1 장 서 론

현재 전 세계적으로 제철 고로에서 연간 약 10억 톤이 넘는 매우 방대한 양의 조강이 생산되고 있다.[1] 대부분의 고로에서 주요 철 함유 공급 물질은 소결광이다.[2-3] 소결광은 소결 대차에서 철광석, 석회석 및 연료 코크스를 혼합하여 생성된다. 그림 1.1은 소결 공정 동안의 대차 내에 일어나는 전하 층의 단면이다. 소결 대차는 대차의 상부에 위치한 점화로에 의해 층의 상부로부터 연소가 시작된 후, 전체 층이 이동하는 동안 하부로 공기를 강제 흡입하여 점차 소결이 진행된다.[3] 그리하여 후미로 갈수록 소결이 진행되어 수축 현상이 일어나게 된다. 소결 공정 동안, 층 내의 원료들은 수분의 증발, 석회석의 분해 반응, 코크스의 연소 반응과 슬래그의 생성 반응 등 다양한 물리 화학적 및 열 이동현상이 일어나게 된다.[4]

이 중, 석회석의 분해로 인해 형성된 Calcium-Ferrite는 CaO 기반 액상선상의 형성 비율로 원료의 혼합비와 온도에 의존한다. 그림 1.2는 석회석의 분해로 CaO 계인 Calcium-Ferrite의 형성을 보여준다. 소결광의 용융상태는 CaO 계 양으로 추정할 수 있다. 소결광의 품질을 향상시키기 위해서는 소결 공정의 온도 분포를 제어하는 것이 매우 중요하다. 그러나 철광석을 소결하기 위한 온도 조절은 코크스의 연소, CaCO_3 의 분해, CaFe_2O_4 의 용융 및 슬래그의 복합반응이 즉시 일어나기 때문에 간단하지 않다. 또한 고품질 철광석의 고갈 및 맥석 성분의 증가에 따라 소결 공정에서의 염기도 제어는 반드시 필요하다.[5] 다음과 같이 형성된 Calcium-Ferrite의 결정화 거동과 결정 형태는 소결의 품질을 평가하는데 사용되는 강도 및 환원성과 같은 다양한 지표에 영향을 미친다.[6] Calcium-Ferrite 생성은 고로 효율 및 충분한 기계적 강도로 인해 고로 생산성 및 효율을 향상시킬 수 있기 때문에 소결 광석에서 바람직한 결합상으로 여겨진다.[7] 소결 된 광석의 용융상인 CaO 계 Calcium-Ferrite상은 염기도에 따라 그 양과 형성 온도가 변한다. 또한 편석이 잘 일어날 수 있도록 입자와 입자 사이에 공간이 필요하며 통기성을 향상시킬 수 있는 공극률과 그에 따른 압력손실은 소결 품질을 결정하는 중요한 요소 중 하나이다.

이렇게 만들어진 소결광은 제철 공정에서 고로에 대한 철 사용량의 약 80%를 차지한다.[8] 다시 말해, 소결광의 품질을 고로내에서 선철을 만드는데 직접적이고 큰 영향을 미친다.[8] 소결광의 생산성과 품질을 결정짓는 요인은 소결 시의 열적 조건, 연료 조건, 원료의 이동속도, 분 코크스의 배합량, 원료 층의 두께, 장입 밀도 등이 있다.[2] 또한, 철광석 소결 공정 내 온도 분포에 대한 정보는 철광석 소결의 품질을 향상시키는데 필요하며, 소결 품질을 결정하는 가장 중요한 요소 중 하나이다. 또한 소결 층의 온도 분포를 추정하는데 있어 고체연료 즉 코크스의 연소 속도에 대한 지식이 필요하다.[9]

소결 대차 모델에 활용된 차분법은 국내 POSCO를 제외하고 하우스 코딩으로 구축된다. 최근까지 일본에서는 Runge-Kutta 법, 전방 차분법 등이 활용되고 있으며, Modified Ergun's Method, Adams-Moulton Prediction-Correction Method 등이 활용되고 있다.

표 1.1[10-17]은 기존에 발표된 논문에서 사용된 차분법에 대한 정리이다. NSC의 경우는, 1970년대부터 전방 차분법을 이용하여 소결 대차 모델을 개발하고 있으며, 1971년에는 JFE에서도 전방 차분법을 활용하여 소결 대차 모델을 개발하였다. NSC 모델을 바탕으로 1984년에 일본 Tohoku 대학에서 Runge-Kutta 법을 활용한 모델을 개발하였으며, Tohoku 대학의 모델에서는 고체 연료인 코크스의 연소 및 $\text{CaO-Fe}_2\text{O}_3$ 등의 생성으로 인한 통기성 및 압력 손실을 반영하였다. 이후, 2015년에도 Kusu 대학에서 전방 차분법 모델에 코크스의 배합비에 따른 연소 속도를 측정하여 모델에 반영하였다. NSC 모델은 소결 대차의 높이를 n 등분하여 X 축으로서는 시간, Y 축으로서는 단위 셀의 높이로 간주하여 그림 1.3처럼 각 높이 별로 온도를 계산한다. 그림 1.4은 JFE 모델로 동일한 방법으로 채택하여 계산을 하였으며, 배가스의 유속을 측정하여 대차 내 유량 변화를 반영하여 연소대 내의 온도 변화를 모사하였다. 또한 Young[18]은 소결이 진행됨에 따라 가스 흐름과 혼합물의 특성이 변화할 때, 층의 거동을 연구할 수 있는 수학적 모델을 만들었다. Patisson 외 등[19]은 수축률을 도입하여 철광석의 표면 용융으로 인한 층 높이 및 공극률의 세부적인 처리를 고려하였다. 본 연구에서는 고체 연료의 연소 속도를 측정하였고, 소결광 내 염기도를 제어하여 Calcium-Ferrite의 형성량과 온도와 압력손실을 측정 후 모델에 반영하였으며, 상기의 모델들을 바탕으로 Runge-Kutta 법을 활용하

여 NSC 와 동일한 형태로 소결 대차 높이를 n 등분하여 셀 단위로 계산이 되도록 모델을 개발하였다.

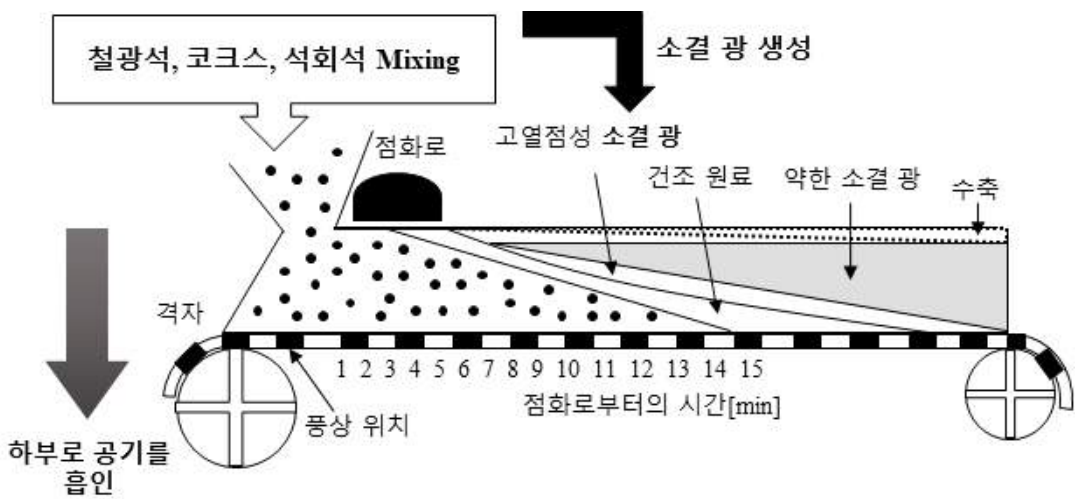


Fig. 1.1 The cross-sectional situation of the charge layer during the sintering process.

Decomposition of Limestone

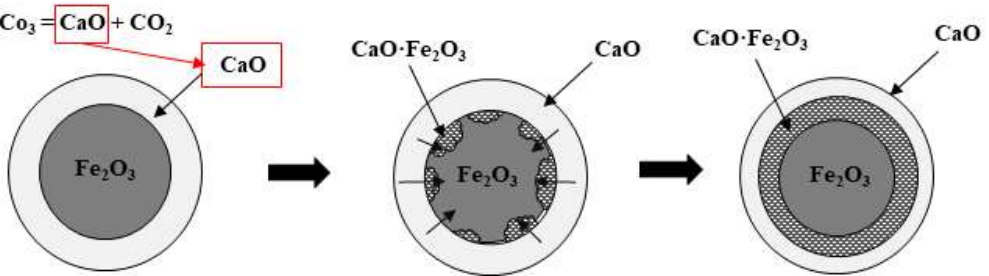
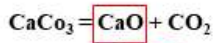


Fig. 1.2 Schematic diagram of CaO-Fe₂O₃ formation.^[6]

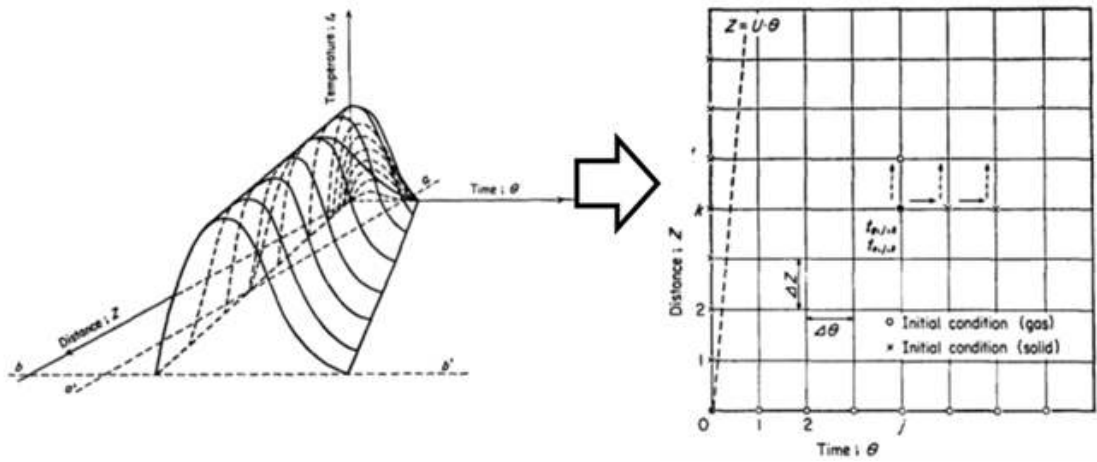


Fig. 1.3 Schematic diagram of NSC model.^[10]

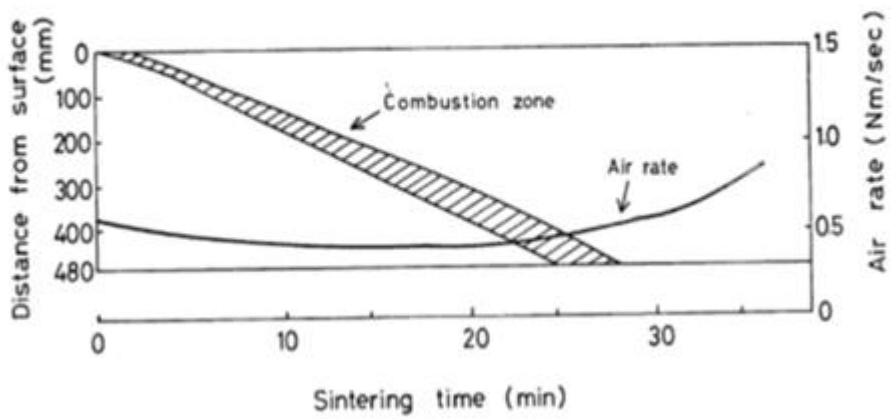


Fig. 1.4 Schematic diagram of JFE model.^[11]

Table. 1.1 The difference method used in previous studies.

Year	Authors	Finite Difference Method
1970	Muchi, Higuchi (NSC) Tukamoto, Simada, Taguchi and Higuchi	Forward FDM
1971	Hamada, Koitabahsi, and Okabe (JFE)	Forward FDM
1982	Nigo, Kimura, etc(JFE)	Forward FDM
1984	Kasai, Yagi, Omori	Runge-Kutta method
2000	Ramos, Kasai, Kano, Nakamura	Adams-Moulton Prediction-Correction Method
2012	Zhou, Zhao, Loo, Ellism Cen	SIMPLE algorithm (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked-Equations)
2012	Castro	Modified Ergus's Method
2013	Ahn, Choi, Cho(POSCO)	Aspen Plus (commercial flowsheep process simulator)

제 2 장 모델 설명

그림 2.1은 소결 층의 모식도이다.[13-14] 왼쪽 상단에는 점화로가 있으며, 소결 대차의 방향이 오른쪽으로 이동하며, 하부로 공기를 강제 흡인하기 때문에, 소결된 층은 시간이 지날수록 많이 생성된다. 단위 셀의 높이를 일정하게 정하고 표면에서의 거리에 따라 계산될 수 있도록 하였다. 표면에서의 거리에 따라 각 단위 셀의 Input 조건이 연속적으로 반영되므로 계산 결과의 연속성을 확보하였다. 대차 내의 가스는 항상 수직 방향으로 이동하는 것으로 가정하였으며, 계산을 위하여 다음과 같은 가정을 정하였다. 1. 외벽으로부터 열 손실을 무시한다. 2. 기체와 고체 사이의 열전달은 대류 열전달이다. 3. 입자 내의 온도 분포는 일정하다. 4. 가스와 입자의 열화학적 특성은 소결 중 일정하다.

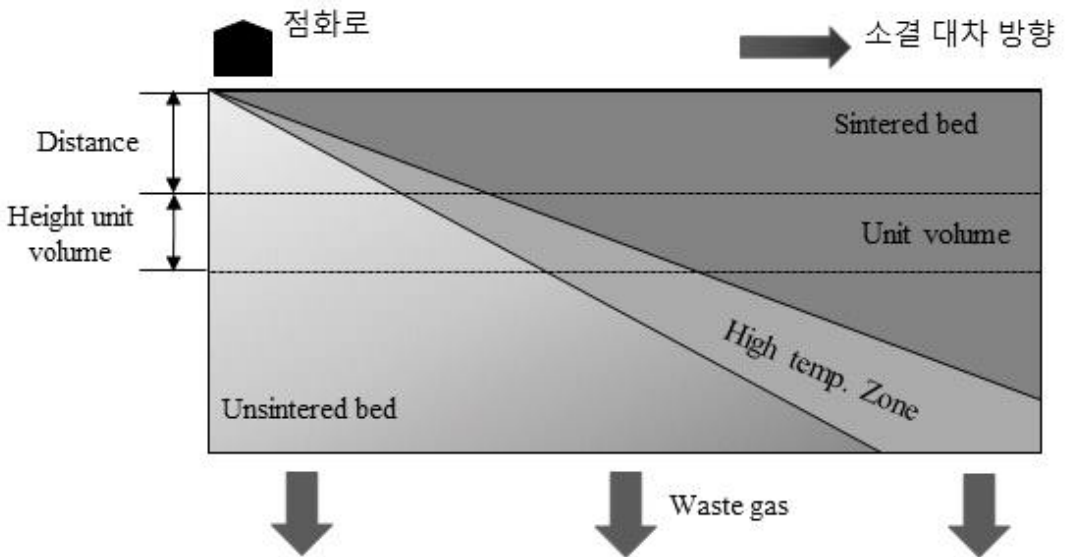


Fig. 2.1 Schematic diagram of sinter bed.

제 1 절 Heat balance of gas & solid

그림 2.2는 단일 단위 셀에서 계산의 흐름을 보여주며, 본 연구에서 사용된 grid 모델이다. X축은 시간이며, Y축은 거리를 나타낸다. X축의 시간은 소결 층의 이동 시간을 말한다. 시간 변화 Δt 에 의해, 소결 내의 가스는 하향 방향인 Z이다. 이러한 계산으로 가스와 고체 사이의 열전달 및 고체연료의 연소 속도가 계산된다.

고체와 기체 간의 열전달 및 연소 관련식은 다음과 같다. 식(1)과 (2)는 고체와 기체간의 열교환을 나타내며, 각항 별로 전열, 연소열, 반응열 등을 나타낸다. 다음은 모델에 사용된 기체 열수지와 고체 열수지의 수식이다.

$$\epsilon \rho_g C_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = - G_g C_g \frac{\partial T_g}{\partial z} - h A_s (T_g - T_s) - C_g T_g \sum (M_i n_i R_i^*) \quad (1)$$

식(1)은 기체 열수지에 관한 식이다. 식에서 사용된 ϵ 은 공극률이고, ρ_g 는 가스의 밀도, C_g 는 가스의 비열, t 는 시간이며, z 는 높이이다. T_g 는 가스의 시간이고, G_g 는 가스의 이동속도, h 는 대류 열전달 계수, A 는 표면의 비율, R 은 속도상수이다. 각 수식에 사용되는 기호와 단위는 표 2.1에 도시하였다.

$$G_g C_g \frac{\partial T_g}{\partial z} = h_p A_s (T_s - T_g) - C_g T_g (M_c n_c R_c^*) - C_g T_g (M_{CaCO_3} n_{CaCO_3} R_{CaCO_3}^*) \quad (1-1)$$

식(1-1)은 실제 모델에서 사용한 기체 열수지의 수식이다.

$$(1 - \epsilon) \rho_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = h_p A_s (T_g - T_s) + \sum (-\Delta H_i n_i R_i^*) \quad (2)$$

식(2)는 고체 열수지에 관한 식이다.

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{h_p A_s (T_g - T_s) + \sum (-\Delta H_i n_i R_i^*)}{(1 - \epsilon) \rho_s (C_s - f m(T_s))} \quad (2-1)$$

식(2-1)은 실제 모델에서 사용한 고체 열수지 식이다.

$$\frac{\partial r_c}{\partial t} = - \left(\frac{M_c}{\rho_c} \right) \left(\frac{R_c^*}{4\pi r_c^2} \right) \quad (3)$$

식(3)은 고체 열수지 내 코크스 연소 속도에 관련된 수식이다.

$$\frac{\partial r_{CaCO_3}}{\partial t} = - \left(\frac{M_{CaCO_3}}{\rho_{CaCO_3}} \right) \left(\frac{R_{CaCO_3}^*}{4\pi r_{CaCO_3}^2} \right) \quad (4)$$

식(4)는 고체 열수지 내 석회석 분해에 관련된 수식이다.

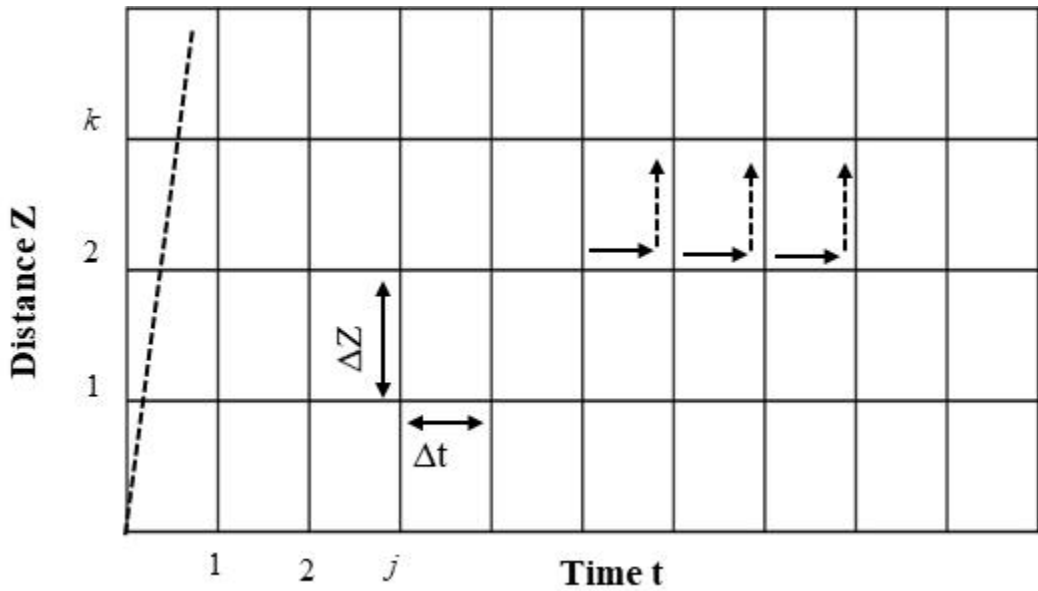


Fig. 2.2 The grid model used in this study simulation model.

Table. 2.1 Symbols in this modeling.

Symbol	Meaning	Unit
ε	Void fraction	-
t	Time	s
z	Height	m
a	Specific surface ratio	m^2/m^3_{bed}
h	대류 전열 계수	$j/m^2/s/K$
G_g	가스의 이동 속도	$Kg/m^2/s$
p_g, p_s	가스와 고체의 밀도	Kg/m^3
C_g, C_s	가스와 고체의 비열	$J/Kg/K$
T_g, T_s	가스와 고체의 온도	K

제 2 절 Mass Heat balance of gas

다음 식(5)~(9)는 기체의 물질 수지를 나타낸다.

$$\epsilon \frac{\partial \rho_g}{\partial t} = - \frac{\partial G_g}{\partial z} + R_c^* + R_{CaCO_3}^* \quad (5)$$

식(5)는 기체 물질 수지의 시간과 거리에 따른 가스의 이동 속도에 코크스와 석회석이 추가된 식이다.

$$\epsilon \frac{\partial C_{O_2}}{\partial t} = - \frac{\partial \left(\frac{G_g C_{O_2}}{\rho_g} \right)}{\partial z} - R_c^* \quad (6)$$

$$\epsilon \frac{\partial C_{CO_2}}{\partial t} = - \frac{\partial \left(\frac{G_g C_{CO_2}}{\rho_g} \right)}{\partial z} + R_c^* + R_{CaCO_3}^* \quad (7)$$

식(6)과 (7)은 O₂와 CO₂의 비열을 시간에 따라 계산되는 식이다.

$$\rho_g = (28 C_{N_2} + 32 C_{O_2} + 44 C_{CO_2}) \quad (8)$$

$$C_{N_2} + C_{O_2} + C_{CO_2} = constant \quad (9)$$

식(8)과 (9)는 기체내 농도 밸런스를 유지하는 식이다.

제 3 절 Model algorithm

그림 2.3은 모델의 계산 순서를 보여주는 알고리즘이다. 계산 순서는 Input 조건으로 계산 시간과 interval 시간이 들어가고, 원료의 사이즈[diameter, m], 초기 시간과 온도(점화로의 온도), 가스의 흐름, 수분과 원료의 조성[mass%]가 들어가게 된다. 단위 시간 Δt 동안, unit volume의 높이인 Δz 거리에 따라 계산이 되며 최종 높이에 도달하였을 때 출력이 된다. 계산 순서는 열화학적 & 물리적 특성이 계산되며, 고체연료의 연소 반응, 석회석의 분해 반응이 계산되고 Runge-Kutta 식[20]을 거쳐 Output으로 결과값이 계산되게 된다. Runge-Kutta 식에서 Bed & Gas의 온도, Gas의 흐름, O_2 & CO_2 의 농도가 계산된다. Output 결과값으로는 Gas 조성의 변화, 원료의 온도변화, 가스의 온도변화가 계산된다.

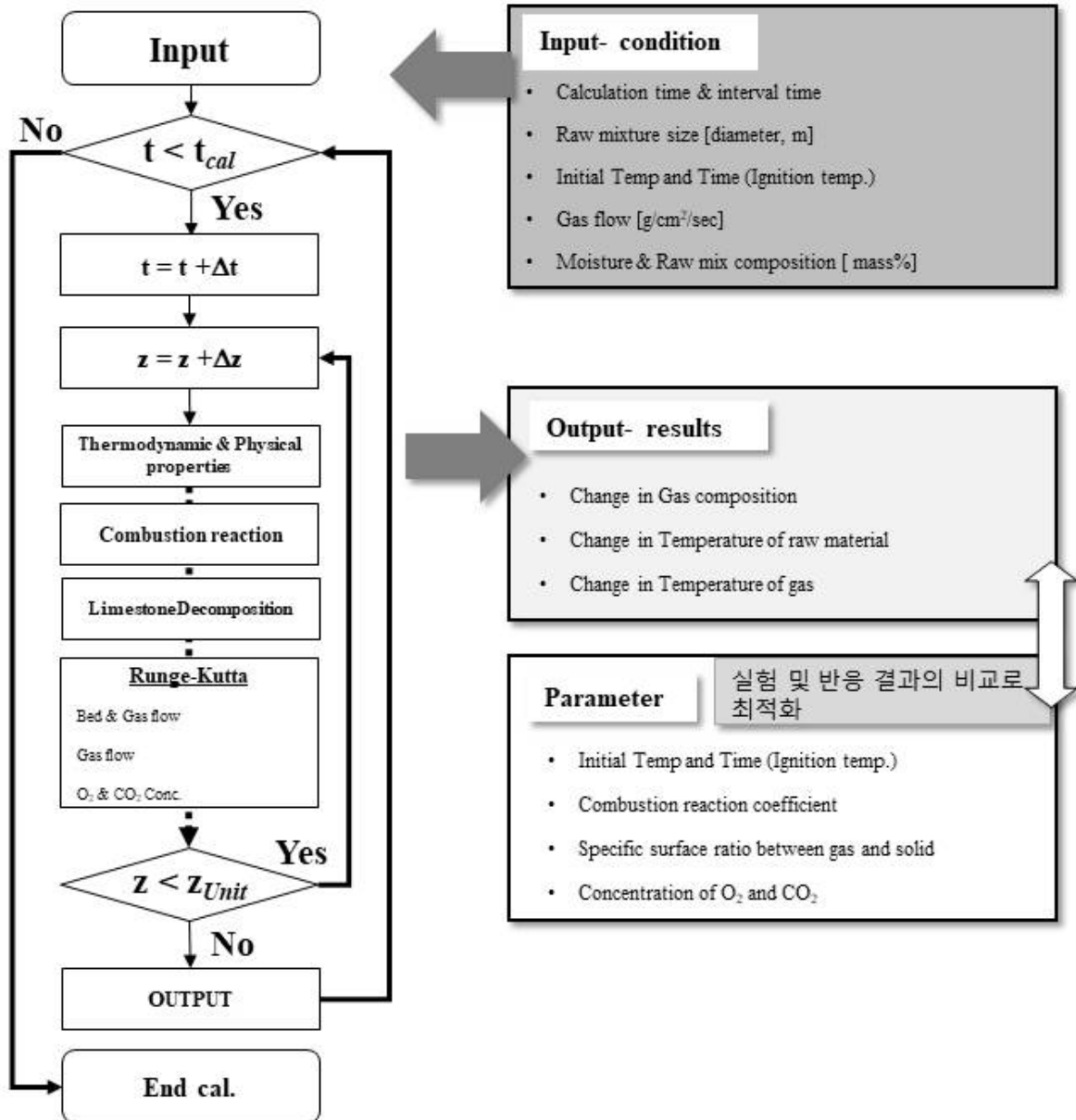


Fig. 2.3 Algorithm of Sinter bed model.

제 3 장 실험 방법

제 1 절 고체연료의 연소 속도

고체 연료의 연소 속도는 모델 내 연소열을 계산하기 위해 매우 중요한 인자이며, 일반적으로 보고되어있는 코크스에 대한 연소 속도 상수와 연소식을 활용하고 있다. 본 연구에서는 고체 탄소 연료 즉 코크스와 무연탄의 연소 속도를 측정하기 위하여 저항로에서 실험을 진행하였다. 그림 3.1은 실험의 전체적인 모식도이다. 실험방법은 저항로 내부에 알루미늄 튜브를 사용하여 Pt wire와 Pt mesh를 저항로 윗부분에 있는 저울에 매달아 무게 변화를 측정하였다. Pt를 사용한 이유는 고온에서 반응이 거의 없고, 산화 또한 잘 일어나지 않기 때문이다. 측정 방법은 TGA(Thermo gravimetric analysis)를 통하여 진행하였다. 시료는 약 105 °C에서 건조 시킨 후 사용하였다. 표 3.1은 실험에 사용된 샘플의 조건을 보여준다. 시료의 입도 크기는 150 μm 사이즈의 시브를 사용하여 150 μm 이하로 하였다. 총 고체연료 무게는 8 g으로 진행하였다. 본 실험에서 8 g으로 진행한 이유는 Pt mesh에 장입할 수 있는 최고 무게이며, 연소 실험을 Lab scale에서 진행하기에 최적의 무게이다. 연소 실험은 1273, 1373, 1473K에서 진행하였다. 표 3.2는 실험에서 사용된 고체연료의 코크스와 무연탄의 배합비를 보여준다. 배합비는 총 5가지로 진행하였으며, 10:0, 7:3, 5:5, 3:7, 0:10을 사용하여 실험을 진행하였다. 총 실험 시간은 그림 3.2에 도시하였다. 상온에서 불활성 분위기인 N_2 (500mL/min)로 약 2시간 유지 후, 목표로 하는 온도까지 4 °C/min으로 승온을 진행하였다. 목표 온도에 도달 후 불활성 분위기에서 Dried Air (500mL/min)로 분위기를 변경하였다. 그 후 고체연료의 연소가 끝나는 지점까지 실험을 진행하였다. 모든 연소 실험은 상온에서 시작하였고, 실험이 최종적으로 끝나면 하온 후 샘플을 회수하였다. 본 연구에서 사용한 고체연료의 성분은 공업 분석을 통하여 분석하였다. 표 3.3은 고체연료의 공업분석을 진행한 데이터이다.

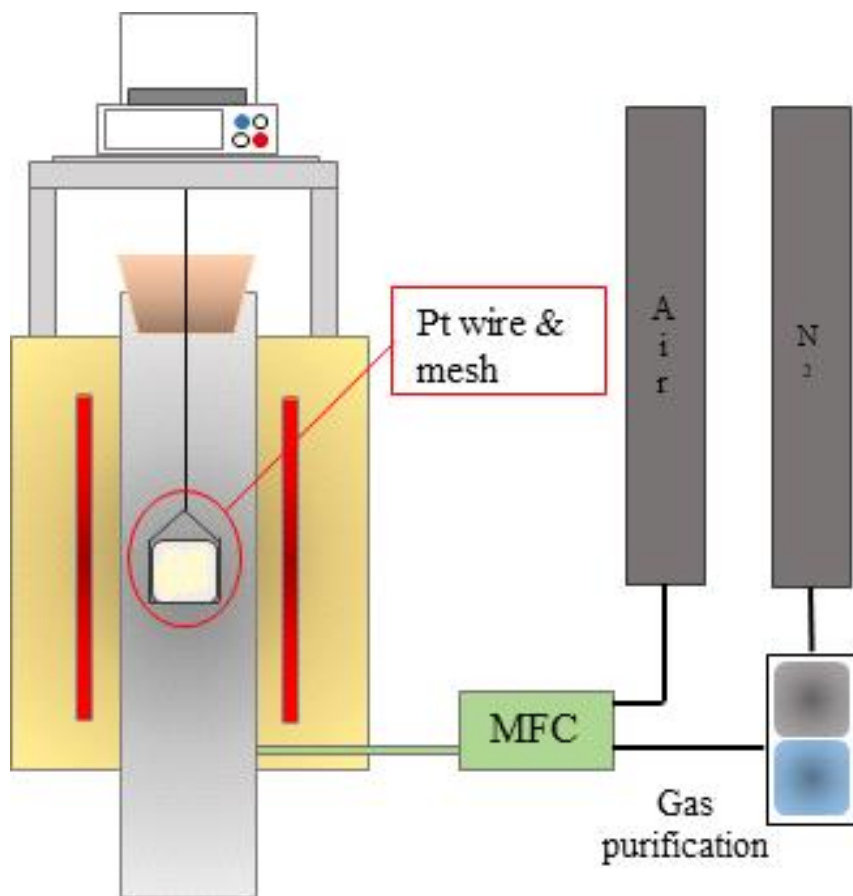


Fig. 3.1 Schematic diagram of TGA and combustion rate experimental.

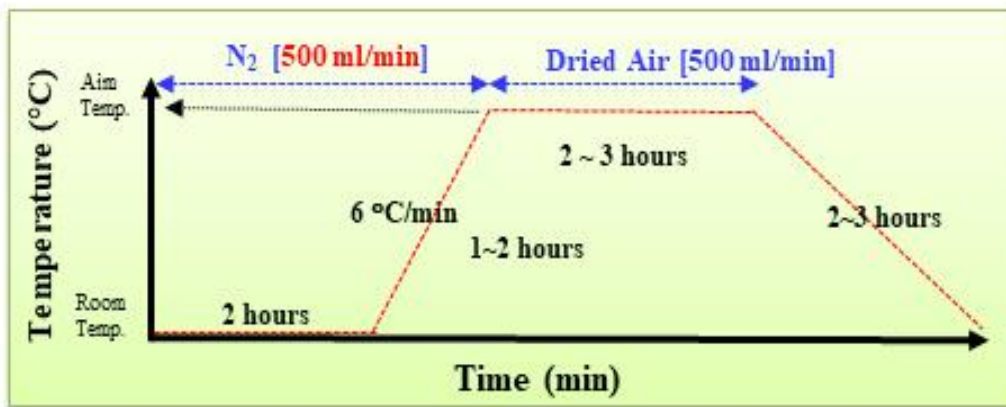


Fig. 3.2 Time overview of TGA and Combustion rate experiment.

Table 3.1 Conditions of experiment.

Case	A	B	C
Temp (K)	1273	1373	1473
Weithg (g)	8	8	8
Size (μm)	~ 150	~ 150	~ 150

Table 3.2 Conditions of solid fuels.

No.	Coke	Anthracite
1	100	0
2	70	30
3	50	50
4	30	70
5	0	100

Table 3.3 Proximate analysis of cokes.

	Moisture	Ash	Volatile	Fixed Carbon
	(%)	(%)	(%)	(%)
Coke	5 ~ 10	10 ~ 15	1 ~ 6	88 ~ 88
Anthracite	5 ~ 10	10 ~ 15	3 ~ 10	70 ~ 78

제 2 절 저유량에서의 고체연료 연소 온도

철광석 소결 공정 내 온도 분포에 대한 정보는 철광석 소결의 품질을 향상시키는데 필요하며, 소결 품질을 결정하는 가장 중요한 요소 중 하나이다. 본 연구에서는 고체연료인 코크스와 무연탄의 발열 온도를 측정하기 위하여 저항로에서 실험을 진행하였다. 그림 3.3은 저유량에서 고체연료의 온도 측정 실험의 전체적인 모식도이다. 실험방법은 저항로 내부에 알루미늄 튜브를 사용하였으며 내부에 샘플을 위치시켰다. 샘플층에 B-type 열전대를 위치하여 온도를 측정하였다. 실험 온도는 1423K에서 진행하였으며, 샘플의 사이즈는 1~2 mm를 사용하였다. 전체 무게의 8%만큼 물을 넣고 혼합 후 사용하였으며, 염기도에 따른 상 변화를 비교하였다. 그림 3.4는 샘플층의 모식도를 보여준다. 하부에는 알루미늄 볼 20 mm를 장입한 후 샘플을 높이 40 mm만큼 장입하였다. 상부에는 지르코니아 볼 40 mm를 장입하였다. 지르코니아 볼을 상부에 장입한 이유는 가스를 상부에서 취입하기 때문에 샘플이 흔들려 온도가 제대로 측정되지 않을 수 있어서 알루미늄 볼보다 밀도가 높은 지르코니아 볼을 상부에 장입하였다. 표 3.4는 실험에 사용된 샘플인 철광석과 고체연료 및 석회석의 비율을 보여준다. 샘플의 질량비를 활용하여 염기도를 제어하였다. 표 3.5는 실험에 사용된 고체연료의 조건을 보여준다. 그림 3.5는 온도 측정 실험의 전체적인 시간을 보여준다. 실험은 상온에서 불활성 분위기인 N_2 (500mL/min)으로 2시간 치환 후 목표 온도인 1423K까지 $6\text{ }^\circ\text{C}/\text{ml}$ 으로 승온하였으며, 목표 온도에 도달 후 분위기를 Dried Air (500mL/min)으로 변경 후 연소 즉 발열이 끝나는 지점까지 실험을 진행하였다. 실험이 끝나면 하온 후 샘플을 회수하였으며, 회수된 샘플은 Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer(ICP-OES, Perkin Elmer)와 Electron Probe Micro Analyzer(EPMA, Jeol. Japan) 및 이미지 분석프로그램을 사용하여 소결광 내 상변화 비교를 진행하였다.

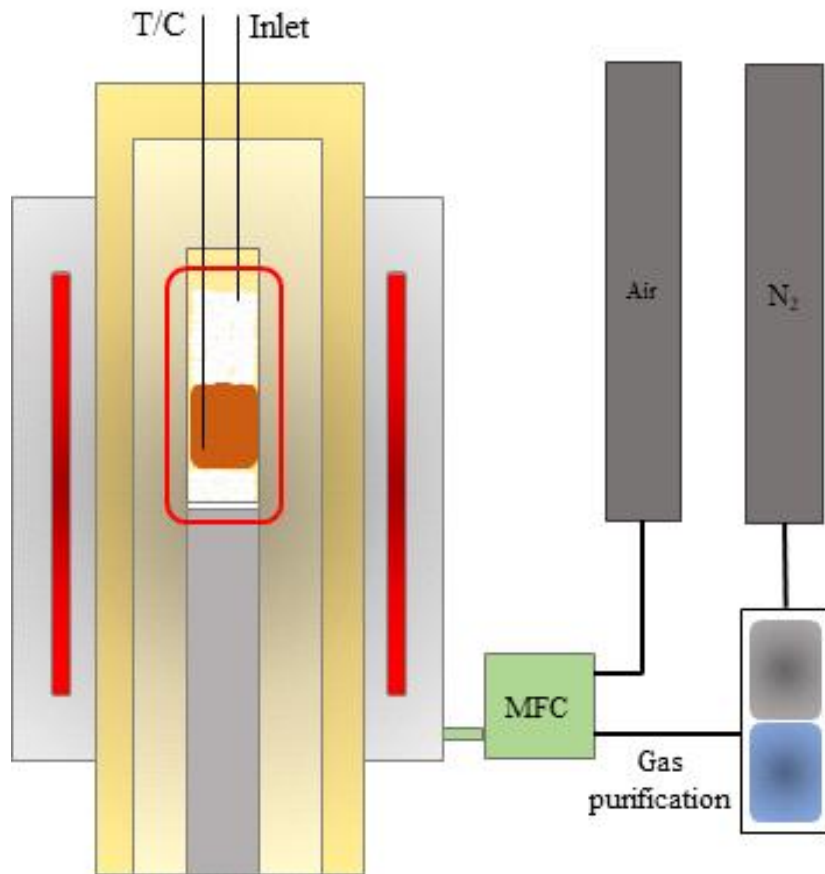


Fig. 3.3 Schematic diagram of temperature profile experimental.

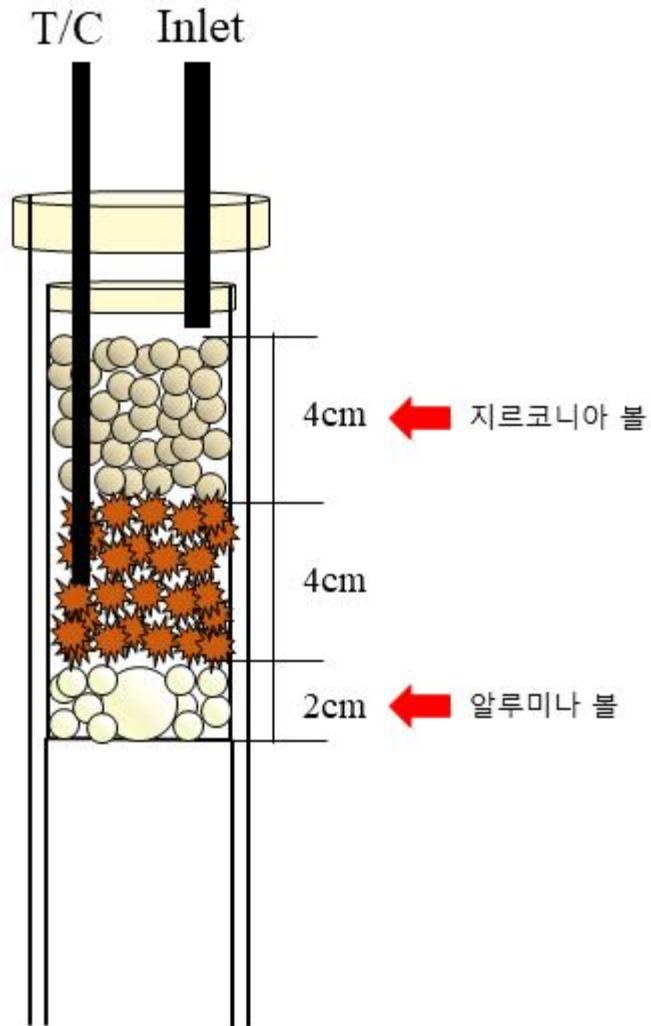


Fig. 3.4 Detailed schematic diagram in sample area.

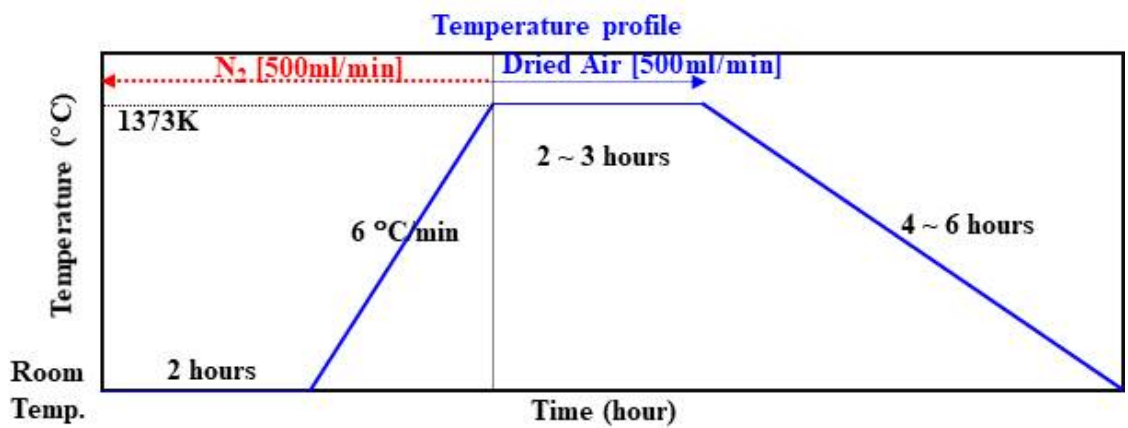


Fig. 3.5 Time overview of temperature profile experiment.

Table 3.4 Mixing ratio of slag basicity A, B and C.

Run No.	갈철광	적철광	고체연료	석회석	C/S
Initial	65 ~ 70%	25 ~ 30%	2 ~ 5%	2 ~ 5%	-
A	55 ~ 60%	25 ~ 30%	2 ~ 5%	5 ~ 10%	1.4
B	55 ~ 60%	25 ~ 30%	2 ~ 5%	10 ~ 15%	1.7
C	55 ~ 60%	25 ~ 30%	2 ~ 5%	15 ~ 20%	2.0

Table 3.5 Conditions of solid fuels.

Sample	Coke	Anthracite
1	100	0
2	50	50
3	0	100

제 3 절 고유량에서의 고체연료 연소 온도

본 연구에서는 고체연료인 코크스와 무연탄의 발열 온도를 측정하기 위하여 소결로에서 실험을 진행하였다. 그림 3.6은 고유량에서 고체연료의 온도 측정 실험의 전체적인 모식도이다. 실험방법은 소결로 내부에 알루미늄 튜브를 사용하였으며 내부에 샘플을 위치시켰다. 샘플층에 열전대를 위치하여 온도를 측정하였다. 실험 온도는 1423K에서 진행하였으며, 샘플의 사이즈는 1~2 mm를 사용하였다. 전체 무게의 8 %만큼 물을 넣고 혼합 후 사용하였으며, 염기도에 따른 상 변화를 비교하였다. 샘플층은 저유량에서의 온도실험과 동일하다. 실험에 사용된 샘플들의 조건은 저유량에서와 동일한 조건으로 실험을 진행하였다. 그림 3.7은 고유량에서의 온도 측정 실험의 전체적인 시간을 보여준다. 실험은 상온에서 불활성 분위기인 N₂ (500mL/min)으로 2시간 치환 후 목표 온도인 1423K까지 6 °C/ml으로 승온하였으며, 목표 온도에 도달 후 분위기를 Dried Air (30~35L/min)를 고유량으로 변경 후 연소 즉 발열이 끝나는 지점까지 실험을 진행하였다. 실험이 끝나면 하온 후 샘플을 회수하였으며, 회수된 샘플은 ICP-OES와 EPMA 및 이미지 분석프로그램을 사용하여 소결광 내 상변화 비교를 진행하였다.

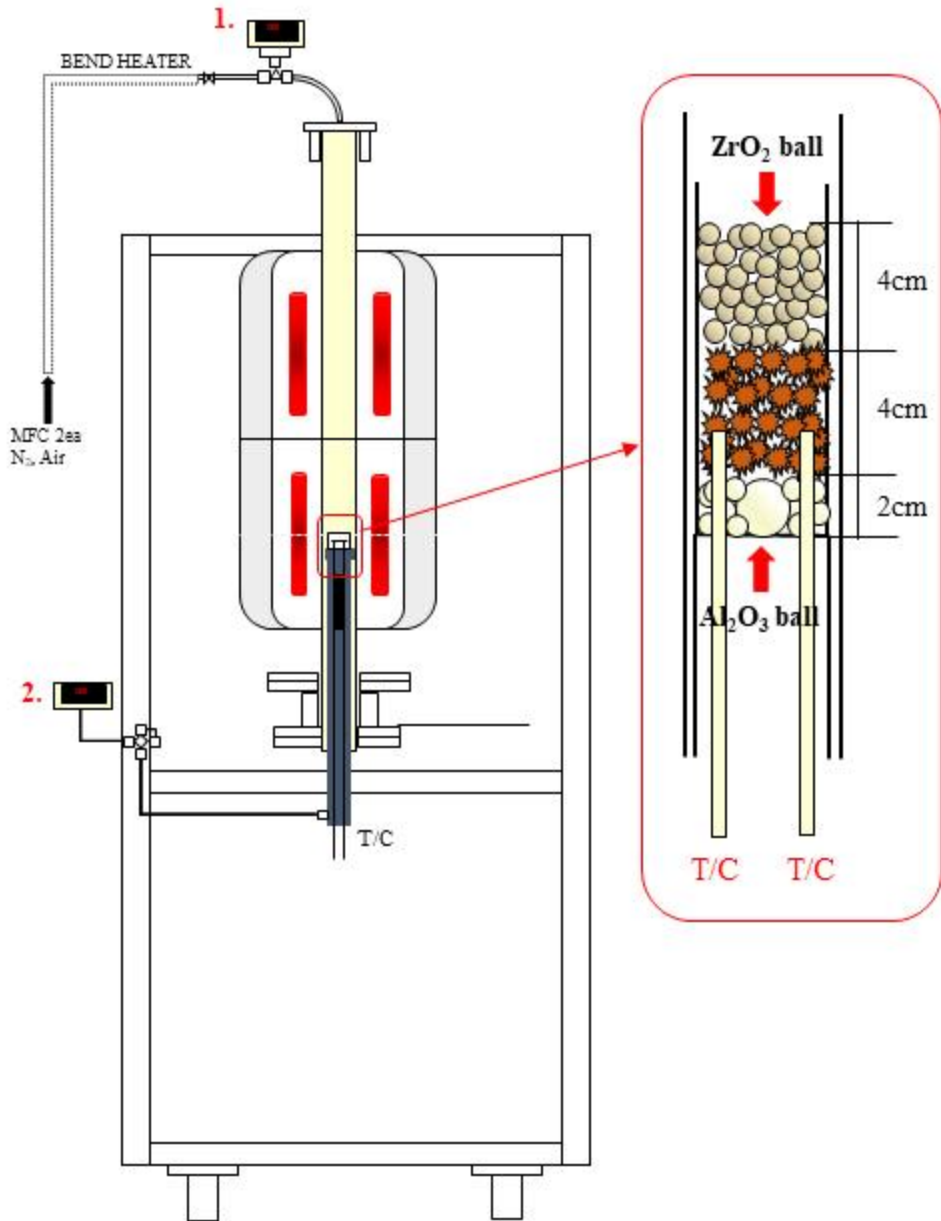


Fig. 3.6 Schematic diagram of temperature profile experimental.

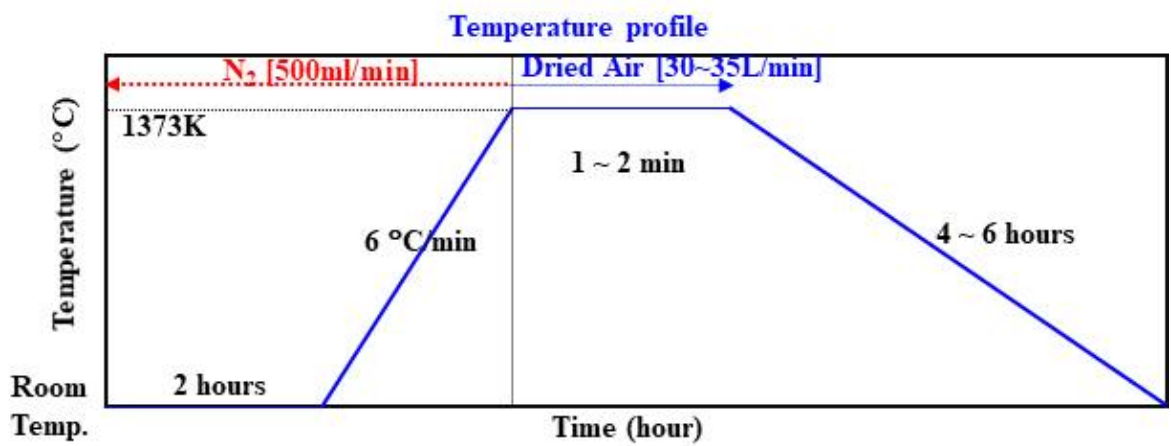


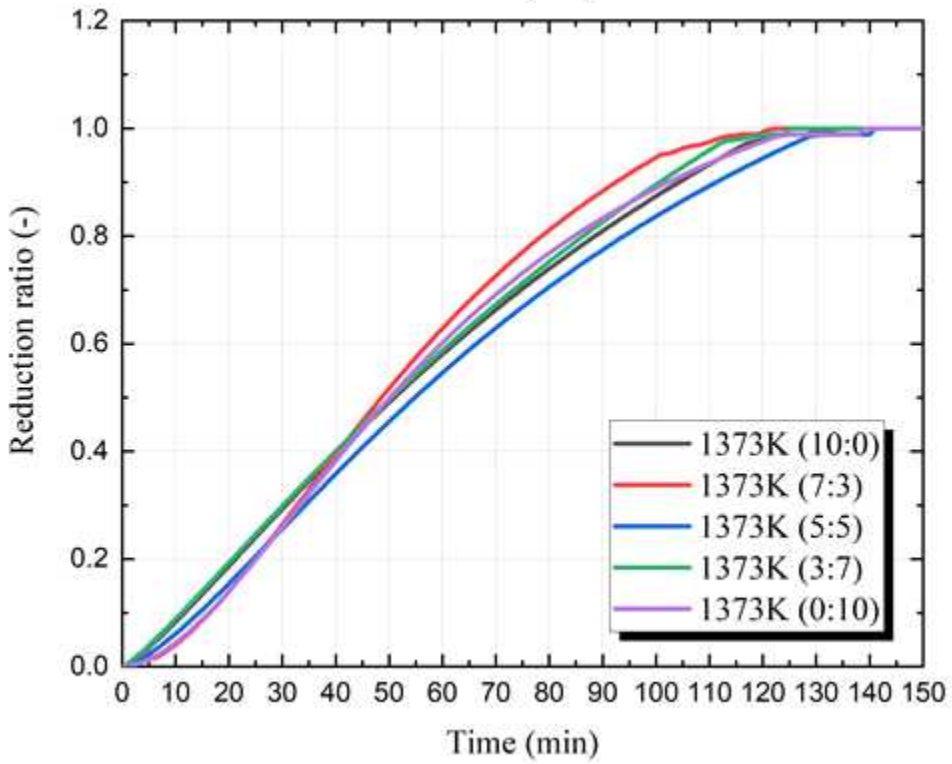
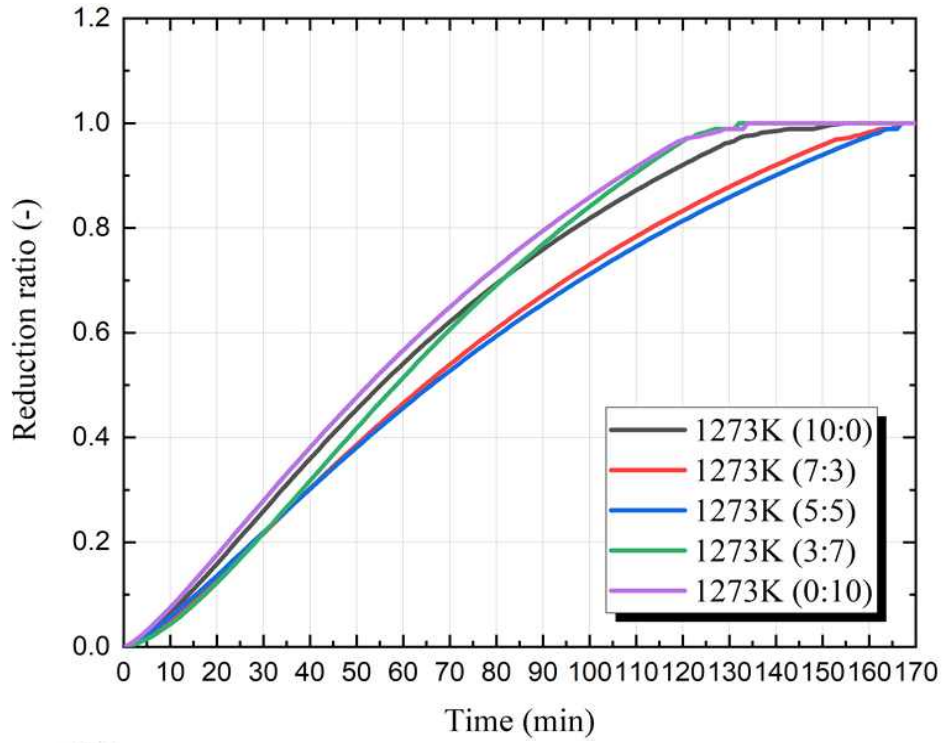
Fig. 3.7 Time overview of temperature profile experiment.

제 4장 결과 및 고찰

제 1 절 고체연료의 연소 속도

1. 고체연료의 연소 속도 측정

그림 4.1은 불활성 분위기로 목표 온도까지 승온 후, 목표 온도인 1273, 1373 및 1473K에 도달 후 분위기를 Dried Air로 변경 후 고체연료의 연소 속도에 미치는 온도 영향 그래프이다. 온도가 높을수록 고체연료의 연소 속도는 증가하였으며, 연소 반응이 최종적으로 종료되는 시간은 1273, 1373 및 1473K에서 각각 147분, 130분, 125분이 걸렸다. 다음과 같은 실험결과를 얻어 고체연료의 연소 속도인 k_c 값을 구하였다.



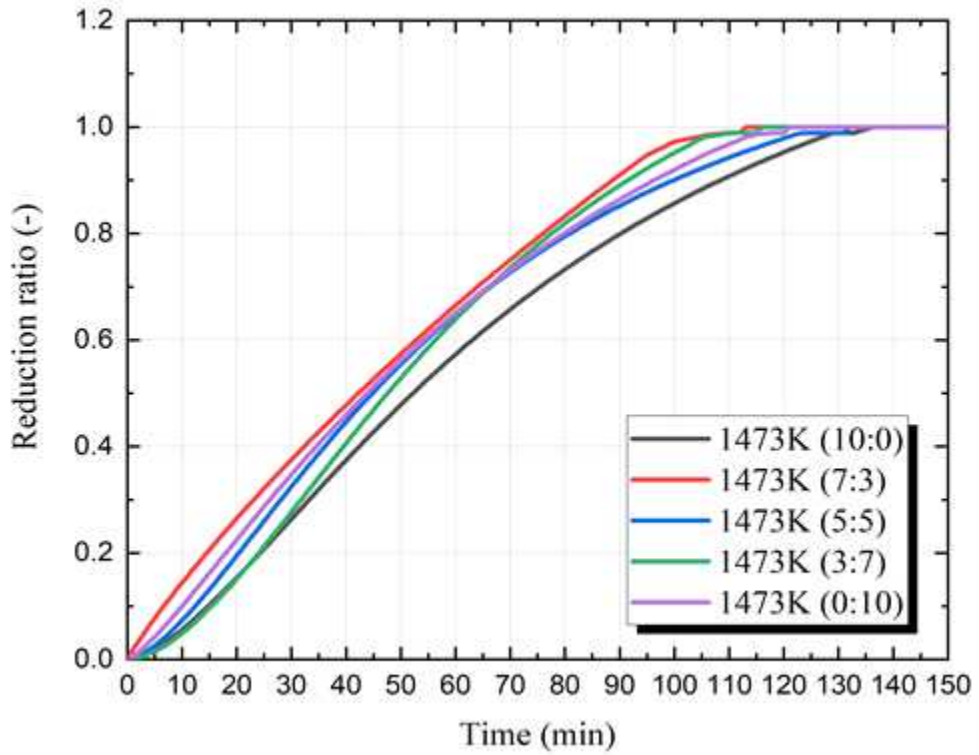


Fig. 4.1 Effect of temperature(1273, 1373 and 1473K) on the reduction ratio by combustion reaction of solid fuels.

2. 고체연료 연소 속도 상수

각 온도에서 고체연료의 연소율을 측정하여 연소 속도 식을 계산하였다.[8]

$$\frac{1}{k_c} = \left(\frac{C_{O_2}}{\rho_{cm} \gamma_0} - \frac{F}{3kf} \right) \frac{1}{1 - \alpha^{\frac{1}{3}}} - \frac{\gamma_0}{6DO_2} \cdot \frac{1 - 3\alpha^{\frac{1}{3}} + 2\alpha}{1 - \alpha^{\frac{1}{3}}} \quad (10)$$

식(10)은 고체연료의 연소 속도 식이다. 연소 속도 상수 k_c 와 온도 간의 관계를 구하기 위하여 각 온도에서 $1/k_c$ 를 구하였다. 이를 역수 취하여 k_c 값을 구하였다. C_{O_2} 는 O_2 의 농도, ρ_{cm} 는 C의 농도, γ_0 는 실험에 사용된 고체연료의 반지름을 나타내고, kf 는 가스의 열전달 계수, F 는 고체연료 연소 실험에서 얻어진 질량 감소비인 연소율을 나타내며, DO_2 는 O_2 의 분자 확산 계수이다. 각 수식에 사용되는 기호와 단위는 표 4.1에 도시하였다.

$$F = \frac{w_i - w_t}{w_i - w_e} \quad (11)$$

식(11)은 연소율에 관한 식이다. 실험을 통해 얻은 실험값을 대입하여 연소율을 구하였다. w_i 는 실험 초기의 샘플 무게, w_t 는 시간에 대한 무게, w_e 는 실험이 끝난 후 최종 샘플 무게이다.

$$k_f = \frac{Sh - DO_2}{d_{ore}} \quad (12)$$

식(12)의 k_f 는 고체연료 표면에 형성되는 가스막에서의 물질 이동 계수이다. Sh 는 sherwood number를 나타내며, DO_2 는 식 (14)를 통해 구해진 값을 대입하며, d_{ore} 는 광석의 diameter를 나타낸다.

$$\alpha = 1 - F \quad (13)$$

$$DO_2 = 1.78 \times 10^{-5} \left(\frac{T}{273.15} \right)^{1.75} \quad (14)$$

식(14)은 O_2 의 분자 확산 계수이며, 목표 실험의 온도를 T 에 대입하여 각 온도에 대한 DO_2 를 구하였다.

$$\ln k_c = -\frac{1418.8}{T} - 4.1778 \quad (15)$$

식(15)는 위의 수식들인 식(11~14)을 식(10)에 대입하여 얻어진 k_c 값을 아레니우스 방정식을 통해 구해진 온도에서의 고체연료 연소 속도 상수인 k_c 의 값을 나타낸다.

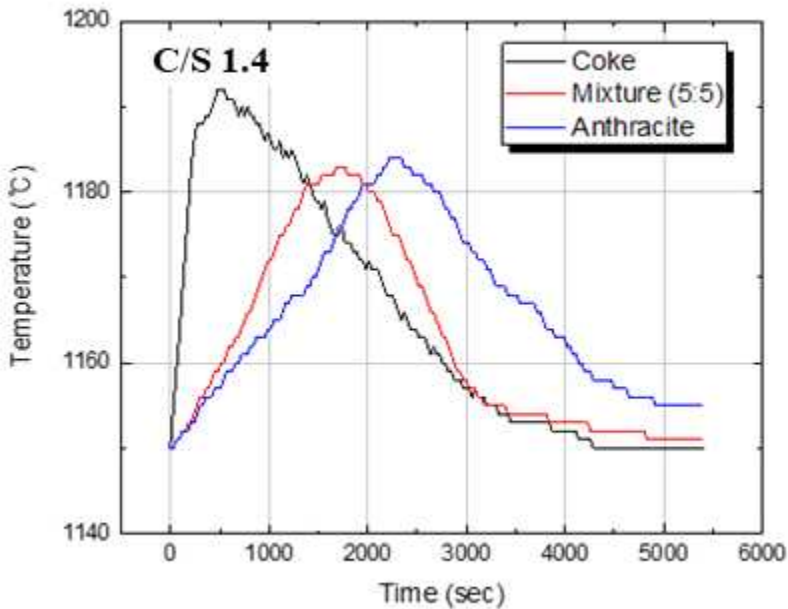
Table 4.1 Symbols in modeling.

Symbol	Meaning	Unit
C_{O_2}	Concentration of O_2	$9.374 \times 10^{12} \text{ (mol/m}^3\text{)}$
p_{cm}	Carbon concentration	$1.32 \times 10^{-8} \text{ (mol/m}^3\text{)}$
r_o	Initial radius	0.0156 m)
k_f	Mass transfer coefficient in gas film	2.604 (-)
F	Reduction ratio	(-)
ε	Void fraction	(-)
D_{O_2}	Molecular diffusion coefficient of O_2	Cal. (m^2/s)
w_i	Initial weight	Exp. (g)
w_t	Timely weight	Exp. (g)
w_e	End weight	Exp. (g)

제 2 절 저유량에서의 고체연료 연소 온도

1. 저유량에서의 고체연료 연소 온도 측정

그림 4.2는 Dried Air를 저유량인 500mL/min으로 불어 연소 온도를 측정한 그래프이다. 목표 온도인 1423K에서 염기도를 1.4, 1.7, 2.0으로 제어하여 실험을 진행하였다. 모든 염기도에서 코크스는 1423K에서 1463K까지 온도가 상승함을 확인하였으며, 온도 측정 시간 또한 무연탄보다 매우 짧음을 확인하였다. 무연탄은 1423K에서 1453K까지 온도가 상승함을 확인하였으며, 온도 측정 시간은 매우 길었다. 코크스와 무연탄을 5:5 비율로 혼합한 샘플은 최고 온도와 온도 측정 시간이 코크스와 무연탄의 절반 정도 됨을 확인하였다.



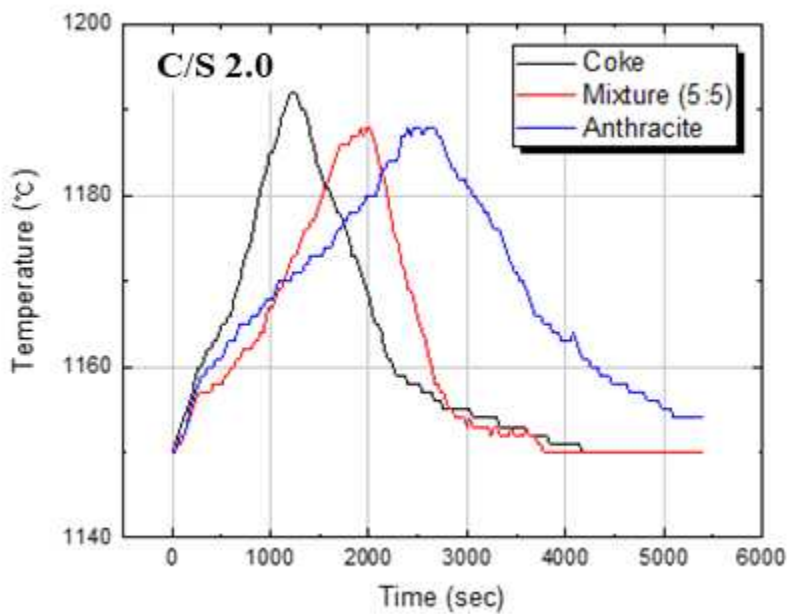
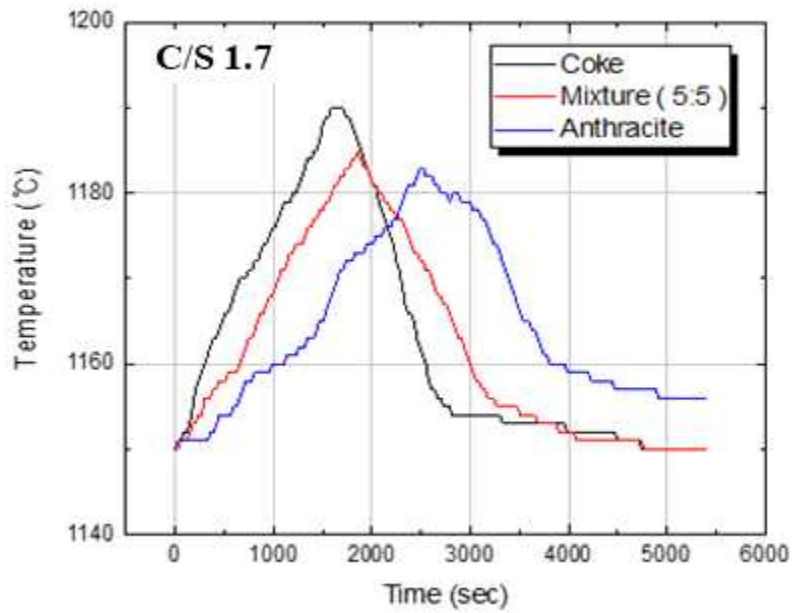


Fig. 4.2 Effect of time on the temperature profile of coke, anthracite and mixture.

2. 저유량에서의 소결광 EPMA 분석

그림 4.3부터 4.5는 고체연료가 코크스일 때, 소결 후 샘플 단면을 EPMA로 관찰한 그림(A)과 Image 분석프로그램으로 조사한 각 상의 면적율을 그림(B)에서 보여준다. 그림(A)는 EPMA의 Composition mode이며, 밀도가 높은 물질일수록 밝기가 밝게 나타나는 특징이 있다. 그림(B)에서 공극은 흰색, 슬래그상은 노란색, Calcium-Ferrite상은 초록색, 매트릭스상은 주황색으로 표시하였다. 염기도에 따라 표 4.2부터 4.4는 EPMA로 분석된 각 상들의 조성을 보여준다. 각 그림(A)에서 상 1은 슬래그, 상 2는 Calcium-Ferrite, 상 3은 매트릭스로 나타내었다. 각 표에는 조성과 함께 그림(B)에서 분석된 각 상의 Area ratio(%), 각 상의 CaO/SiO₂ 비와 CaO/Fe₂O₃ 비를 나타내었다. 먼저, 그림(B)에서 흰색으로 나타난 영역은 공극(Void)에 해당하며, 그림(A)의 상 분석 결과와 비교하면 모든 공극은 슬래그에 둘러싸여 있는 것으로 관찰되었다. 공극이 없는 영역에서도 슬래그가 일부 생성이 되나, 고체연료의 연소 반응 후 잔여 회분으로 슬래그상이 생성되기 쉬운 것으로 판단된다. Calcium-Ferrite 상에서 CaO/Fe₂O₃ 비는 배합 염기도와 함께 증가함도 관찰되었다. 표 4.2부터 4.4는 배합 염기도에 따라 소결된 상들의 조성을 나타낸다.

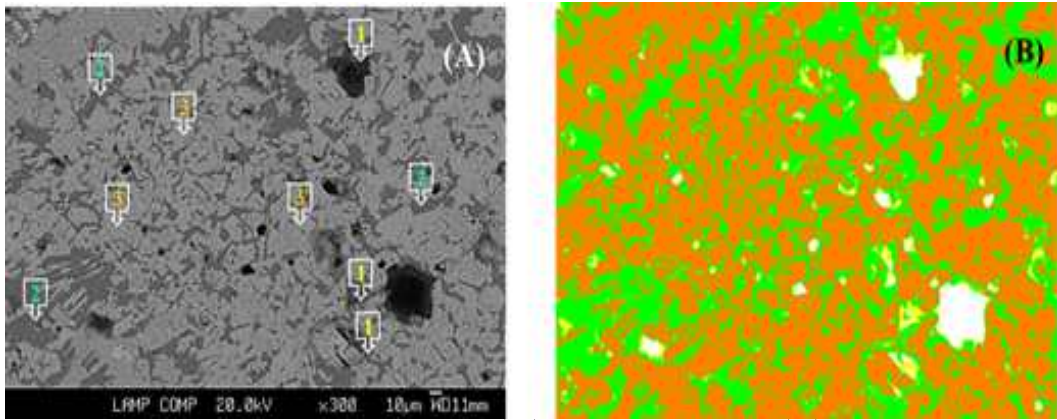


Fig. 4.3 Mineralogical structure (A) and Area ratio (B) of sample with C/S 1.4 sintered by cokes.

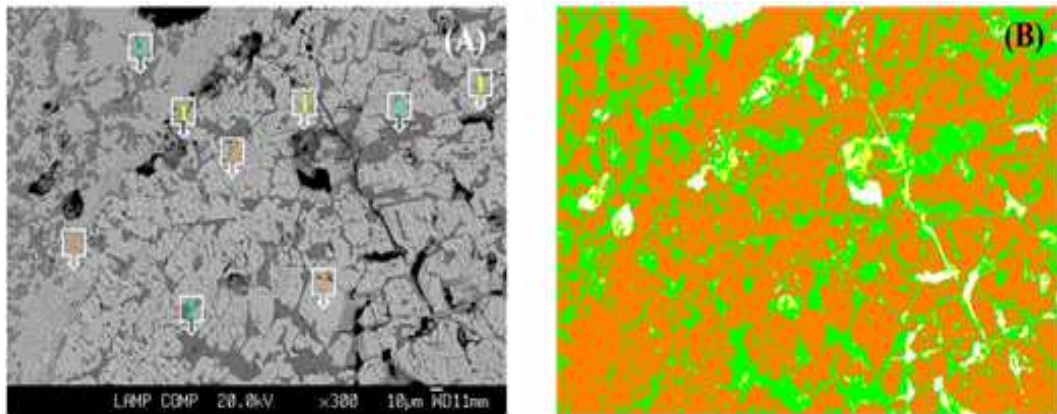


Fig. 4.4 Mineralogical structure (A) and Area ratio (B) of sample with C/S 1.7 sintered by cokes.

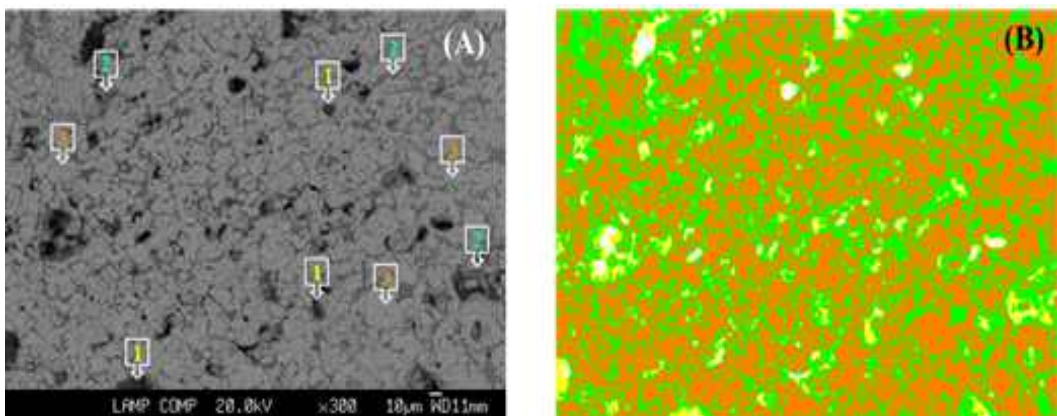


Fig. 4.5 Mineralogical structure (A) and Area ratio (B) of sample with C/S 2.0 sintered by cokes.

Table 4.2 Composition of various phases in sample with 1.4 of C/S and sintererd by cokes.

N0.	Phase	Fe ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Other	AR (%)	C/S	C/F
1	Slag phase	21.1	39.8	29.3	3.1	1.1	5.6	2	1.4	1.89
2	Calcium-Ferrite	73.2	14.3	4.9	0.8	1.5	5.3	26	2.9	0.20
3	Matrix	97.7	0.3	0.2	0.1	0.2	1.4	72	1.5	0.00

Table 4.3 Composition of various phases in sample with 1.7 of C/S and sintererd by cokes.

N0.	Phase	Fe ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Other	AR (%)	C/S	C/F
1	Slag phase	22.2	35.6	23	3.6	0.7	14.9	4	1.5	1.60
2	Calcium-Ferrite	75.9	16.2	1.6	3.8	0.6	1.9	29.5	10.1	0.21
3	Matrix	97.7	0.6	0.1	0.4	0.1	0.9	66.5	6.0	0.01

Table 4.4 Composition of various phases in sample with 2.0 of C/S and sintererd by cokes.

N0.	Phase	Fe ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Other	AR (%)	C/S	C/F
1	Slag phase	20.4	39.8	19.7	4.2	0.7	15.2	4.3	2.0	1.95
2	Calcium-Ferrite	75.3	17.4	4.1	1.7	1.1	0.5	33.5	4.2	0.23
3	Matrix	97	0.7	0.4	0.5	0.3	1.1	62.2	1.8	0.01

그림 4.6부터 4.8은 고체연료가 무연탄일 때, 소결 후 샘플 단면을 EPMA로 관찰한 그림(A)과 Image 분석프로그램으로 조사한 각 상의 면적율을 그림(B)에서 보여준다. 위와 동일하게 그림(A)는 EPMA로 관찰된 광석상이며, 슬래그, Calcium-Ferrite, 매트릭스는 각각 상 1, 2, 3으로 표시하였으며, 그림(B)는 공극, 슬래그, Calcium-Ferrite, 매트릭스의 Area ratio를 각각 흰색, 노란색, 초록색, 주황색으로 나타내었다. 코크스를 고체연료로 사용했을 때와 동일하게 공극은 슬래그상으로 둘러 쌓여 있는 경향이 있으나, 공극이 없는 곳에서도 슬래그상이 관찰되었다. 표 4.5부터 4.7은 배합 염기도에 따라 소결된 상들의 조성을 나타낸다.

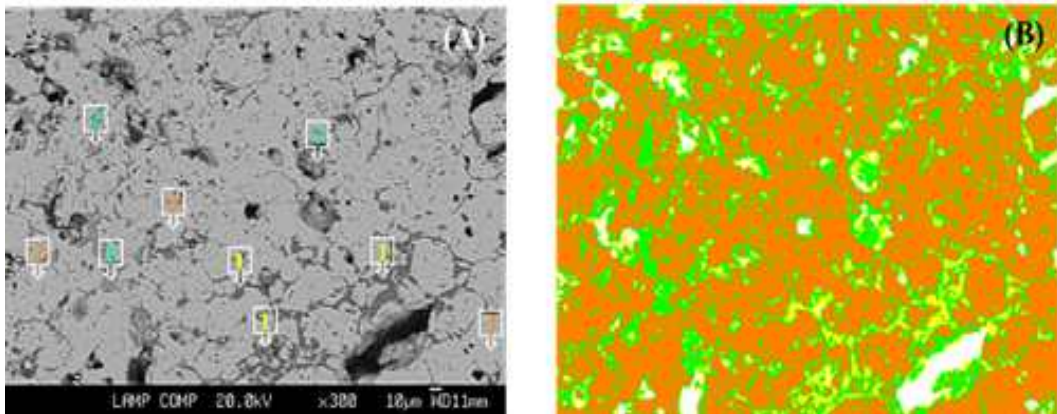


Fig. 4.6 Mineralogical structure (A) and Area ratio (B) of sample with C/S 1.4 sintered by anthracites.

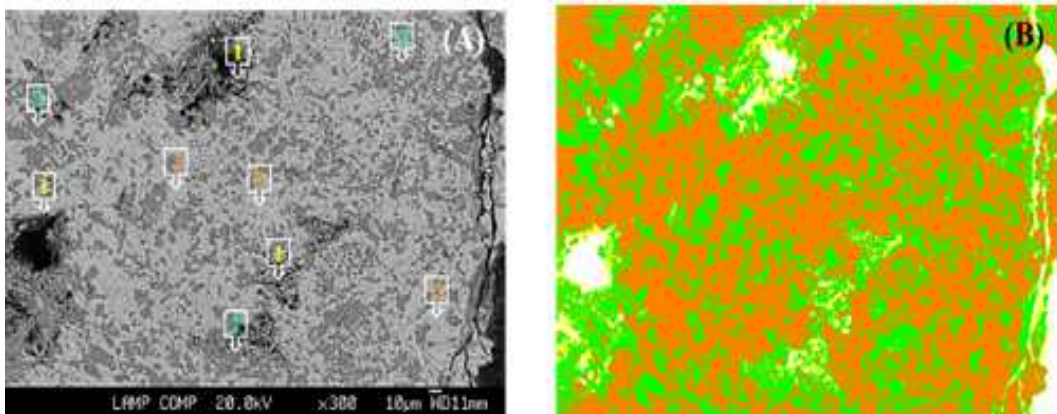


Fig. 4.7 Mineralogical structure (A) and Area ratio (B) of sample with C/S 1.7 sintered by anthracites.

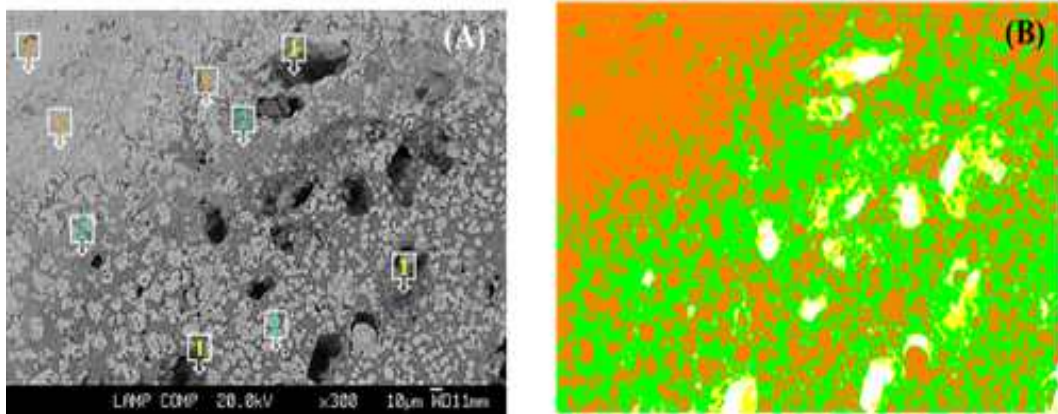


Fig. 4.8 Mineralogical structure (A) and Area ratio (B) of sample with C/S 2.0 sintered by anthracites.

Table 4.5 Composition of various phases in sample with 1.4 of C/S and sintered by anthracites.

N0.	Phase	Fe ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Other	AR (%)	C/S	C/F
1	Slag phase	21.1	40.6	30	2.1	1.2	5.2	6.7	1.4	1.92
2	Calcium-Fer rite	74.5	16.8	4.1	1.2	1.5	1.9	23.5	4.1	0.23
3	Matrix	97.6	0.2	0.2	0.5	0.2	1.4	69.8	1.0	0.00

Table 4.6 Composition of various phases in sample with 1.7 of C/S and sintered by anthracites.

N0.	Phase	Fe ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Other	AR (%)	C/S	C/F
1	Slag phase	21.2	41.1	24	3.3	0.6	9.8	7.9	1.7	1.94
2	Calcium-Fer rite	74.4	13.8	3.6	2.5	0.9	4.7	25.9	3.8	0.19
3	Matrix	97.6	0.3	0.2	0.6	0.2	1	66.2	1.5	0.00

Table 4.7 Composition of various phases in sample with 2.0 of C/S and sintered by anthracites.

N0.	Phase	Fe ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Other	AR (%)	C/S	C/F
1	Slag phase	19.4	41.2	20.5	4.7	1.3	12.9	8.3	2.0	2.12
2	Calcium-Fer rite	74	13.1	4.4	2.7	1.2	4.6	26.8	3.0	0.18
3	Matrix	97.7	0.6	0.3	0.7	0.3	0.3	64.9	2.0	0.01

그림 4.9부터 4.11은 고체연료가 코크스와 무연탄의 혼합원료(5:5)일 때, 소결 후 샘플 단면을 EPMA로 관찰한 그림(A)과 Image 분석프로그램으로 조사한 각 상의 면적율을 그림(B)에서 보여준다. 위와 동일하게 그림(A)는 EPMA로 관찰된 광석상이며, 슬래그, Calcium-Ferrite, 매트릭스는 각각 상 1, 2, 3으로 표시하였으며, 그림(B)는 공극, 슬래그, Calcium-Ferrite, 매트릭스의 Area ratio를 각각 흰색, 노란색, 초록색, 주황색으로 나타내었다. 코크스를 고체연료로 사용했을 때와 동일하게 공극은 슬래그상으로 둘러 쌓여 있는 경향이 있으나, 공극이 없는 곳에서도 슬래그상이 관찰되었다. 표 4.8부터 4.10은 배합 염기도에 따라 소결된 상들의 조성을 나타낸다.

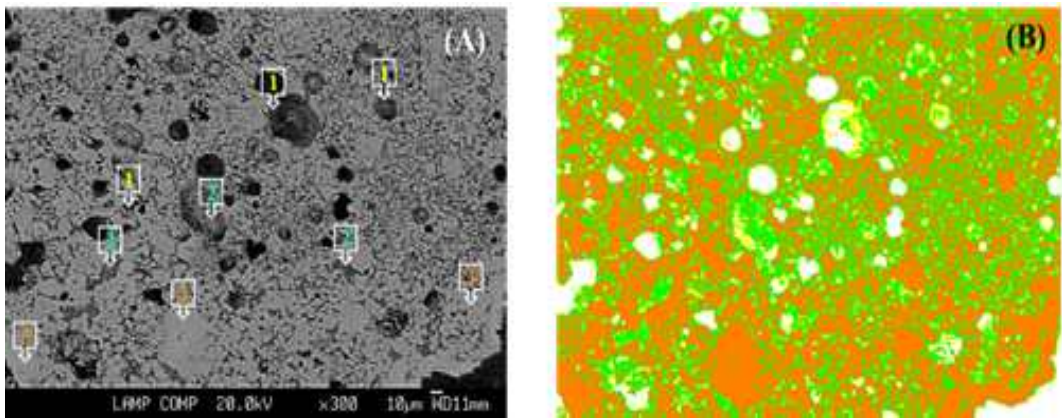


Fig. 4.9 Mineralogical structure (A) and Area ratio (B) of sample with C/S 1.4 sintered by mixture of solid fuels.

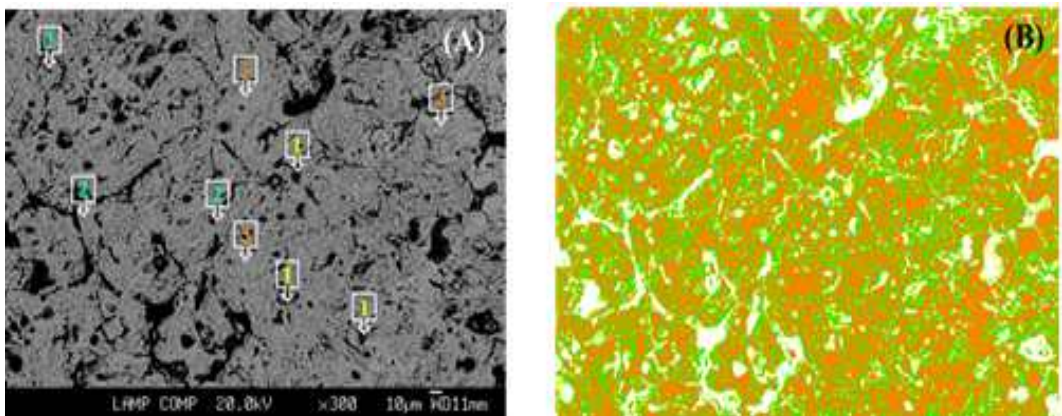


Fig. 4.10 Mineralogical structure (A) and Area ratio (B) of sample with C/S 1.7 sintered by mixture of solid fuels.

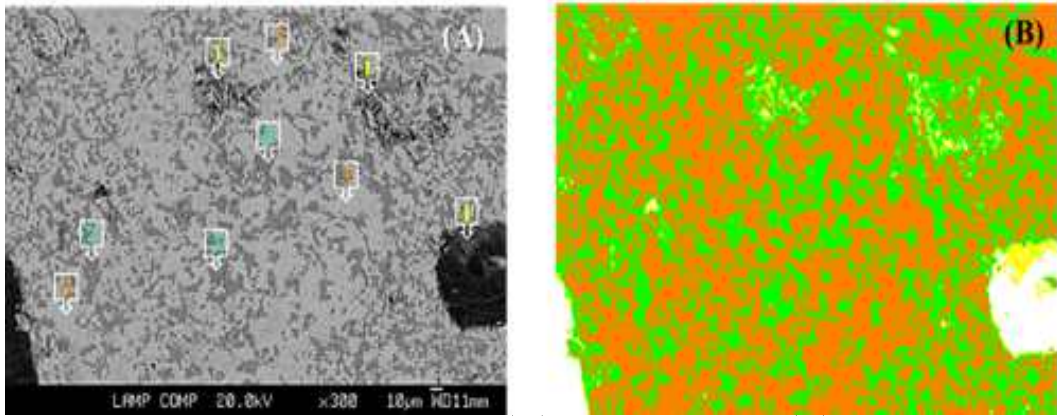


Fig. 4.11 Mineralogical structure (A) and Area ratio (B) of sample with C/S 2.0 sintered by mixture of solid fuels.

Table 4.8 Composition of various phases in sample with 1.4 of C/S and sintered by mixture of solid fuels.

NO.	Phase	Fe ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Other	AR (%)	C/S	C/F
1	Slag phase	18.5	37.5	28.6	2.8	1.1	11.5	2	1.3	2.03
2	Calcium-Fer rite	73.1	14.2	1.5	0.9	2	8.3	25.9	9.3	0.19
3	Matrix	98.7	0.3	0.2	0.2	0.4	0.2	71.4	1.5	0.00

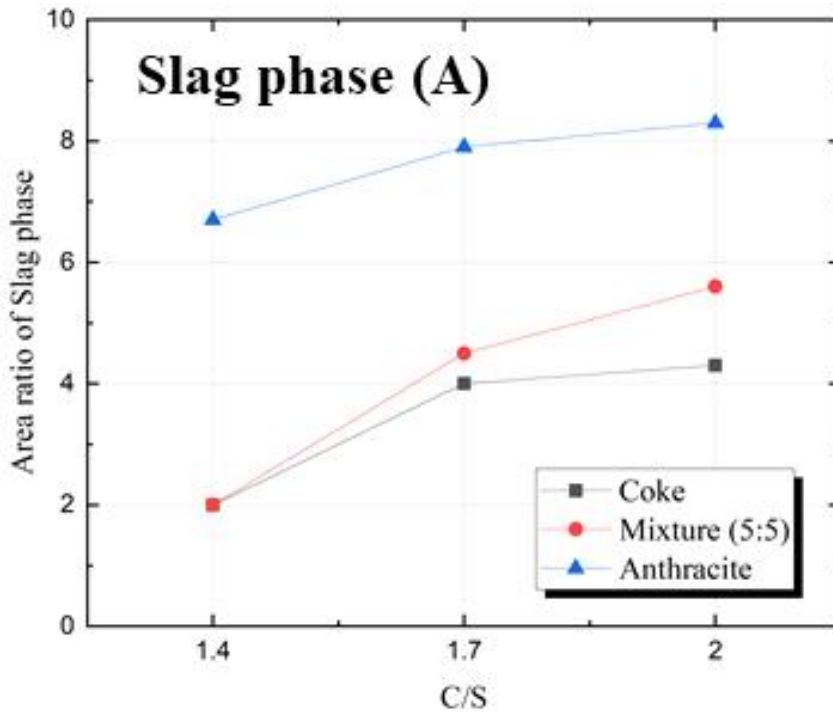
Table 4.9 Composition of various phases in sample with 1.7 of C/S and sintered by mixture of solid fuels.

NO.	Phase	Fe ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Other	AR (%)	C/S	C/F
1	Slag phase	20.3	42.1	27.1	3.6	0.7	6.2	4.5	1.6	2.07
2	Calcium-Fer rite	73.5	12.8	4	2.7	1	6	27.2	3.2	0.17
3	Matrix	97.8	0.3	0.2	0.7	0.2	0.8	68.3	1.5	0.00

Table 4.10 Composition of various phases in sample with 2.0 of C/S and sintered by mixture of solid fuels.

NO.	Phase	Fe ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Other	AR (%)	C/S	C/F
1	Slag phase	22.2	41.2	20.1	4.7	1.3	10.6	5.6	2.0	1.86
2	Calcium-Fer rite	72.8	41.2	20.1	4.7	1.3	10.6	5.6	2.0	1.86
3	Matrix	97.2	0.6	0.2	0.6	0.2	1.2	61.3	3.0	0.01

그림 4.12의 (A), (B), (C)는 고체연료가 코크스, 혼합원료, 무연탄일 조건에서 각각 슬래그, Calcium-Ferrite, 매트릭스의 면적비에 미치는 배합 염기도의 영향을 보여준다. 고체연료의 종류와 관계없이 슬래그상 및 Calcium-Ferrite상의 면적비는 슬래그 염기도가 증가함에 따라 증가하며, 매트릭스 상은 반대로 감소한다. 고체연료가 무연탄일 경우 그림(A)처럼 슬래그의 면적비는 가장 높으며, 그림(B)에서 Calcium-Ferrite상의 면적비는 낮았다. 고체연료가 코크스일 경우, Calcium-Ferrite상의 생성량은 가장 높으며, 슬래그상의 생성량은 낮음을 확인하였다. 혼합원료의 경우 슬래그상과 Calcium-Ferrite상의 면적비는 중간이었으며, 매트릭스상의 면적비는 코크스일 경우보다 높음을 확인하였다.



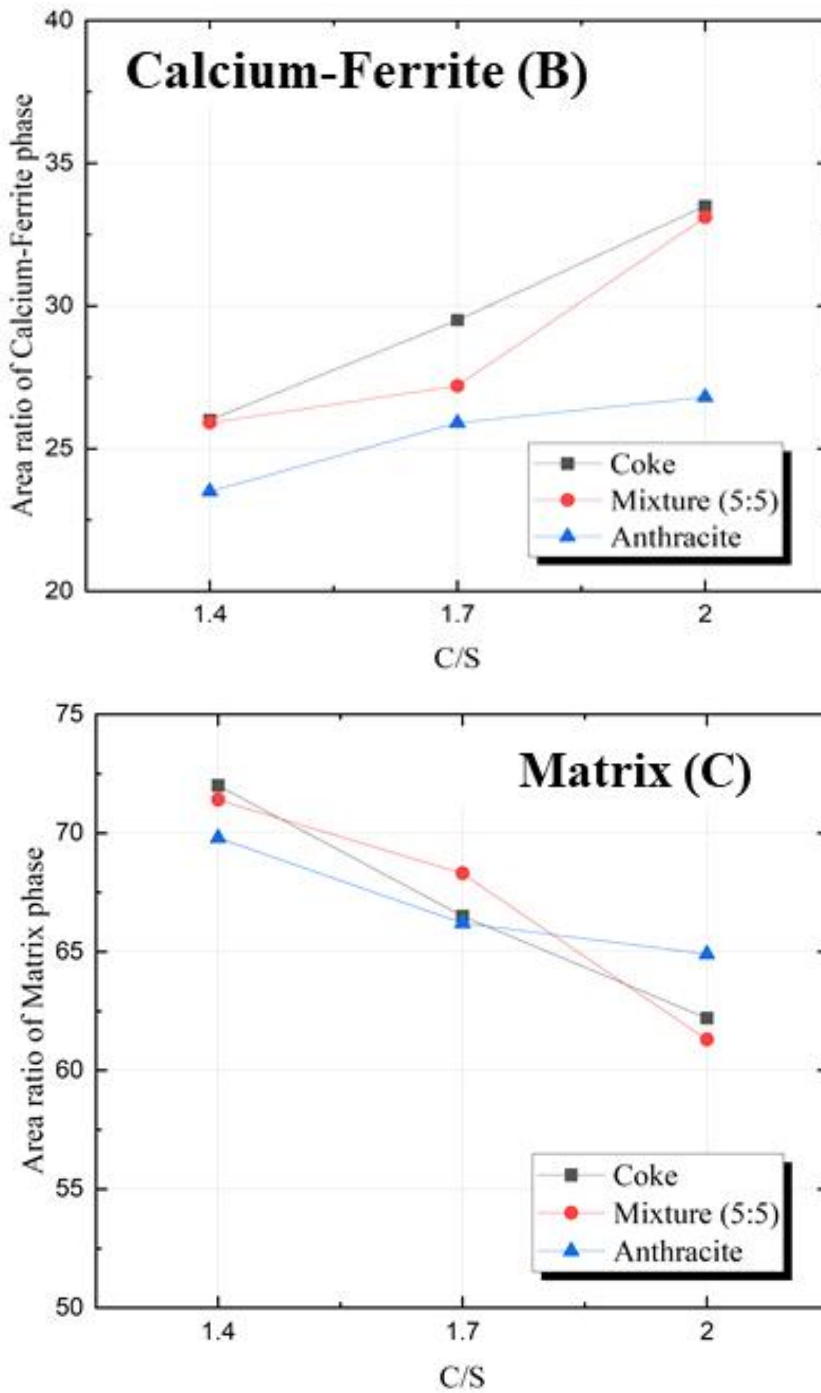


Fig. 4.12 Effect of solid fuels on the area ratio of Slag, Calcium-Ferrite and Matrix phase of C/S.

3. 저유량에서의 소결광 ICP-OES 분석

그림 4.13은 ICP-OES 분석으로 측정된 Fe_2O_3 와 CaO 농도와 아래의 식(16)으로 계산된 농도를 비교하였다. 식(16)에서 염기도 및 고체연료 조건에 따른 각 상의 Area ratio는 표 4.2부터 4.7에 나타냈으며, 각 상에서 Fe_2O_3 및 CaO 농도는 EPMA 분석으로 얻어진 조성을 사용하였다. 그림 4.12와 같이 ICP-OES 분석 결과로 얻어진 Fe_2O_3 와 CaO 의 농도와 계산 결과가 거의 일치함을 나타냈으며, Area ratio는 각 상의 생성비를 간주할 수 있다고 판단된다.

$$(\%MO)_{Total} = \sum \{ (Area\ ratio)_{Phase} \times (\%MO)_{Phase} \} \quad (16)$$

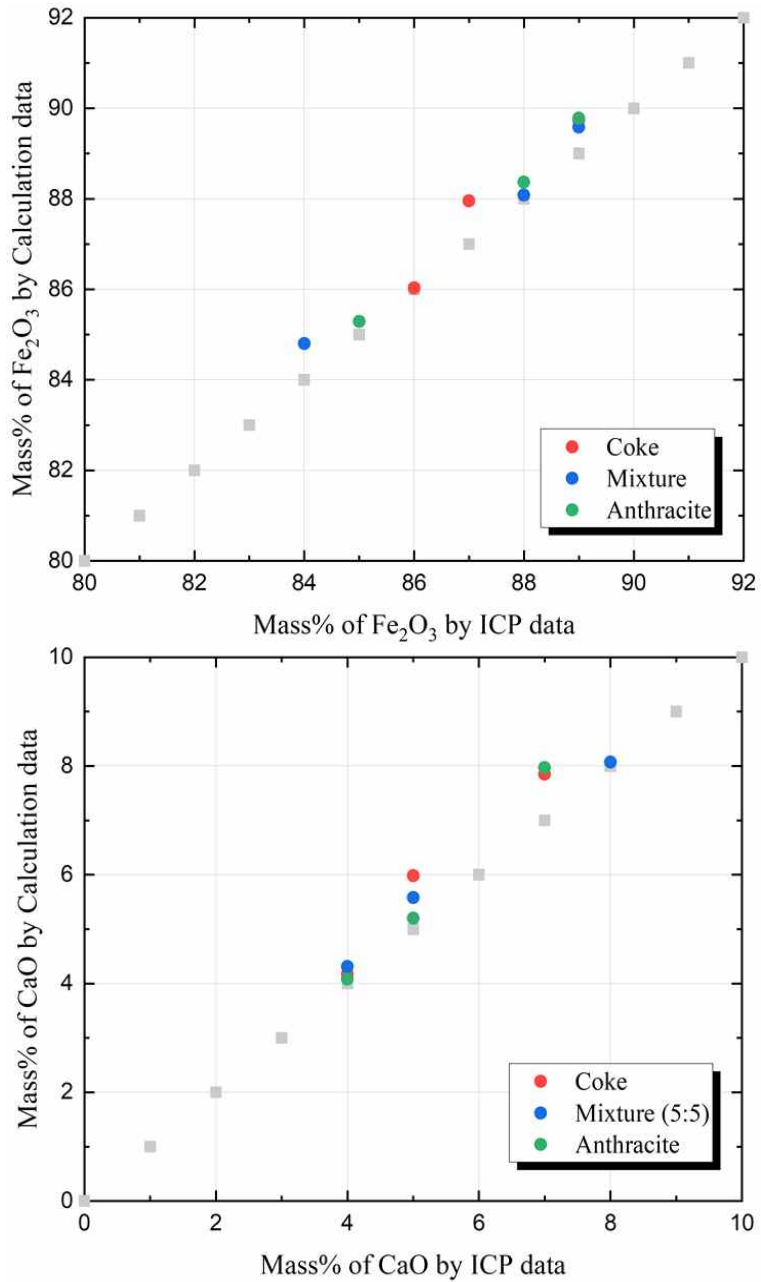
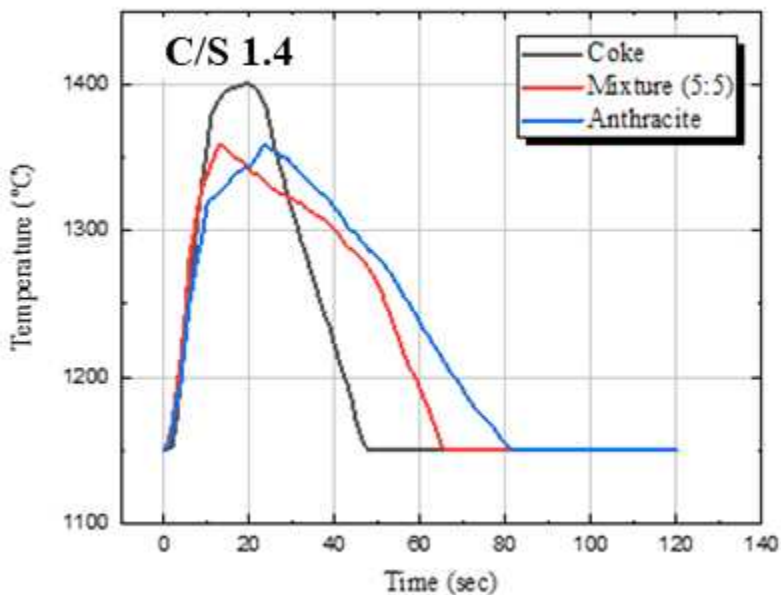


Fig. 4.13 Comparison of Fe₂O₃ and CaO contents measured by ICP-OES analysis and calculated by area ratio EPMA results.

제 3 절 고유량에서의 고체연료 연소 온도

1. 고유량에서의 고체연료 연소 온도 측정

그림 4.14는 Dried Air를 고유량인 30~35L/min으로 불어 연소 온도를 측정한 그래프이다. 목표 온도인 1423K에서 염기도를 1.4, 1.7, 2.0으로 제어하여 실험을 진행하였다. 코크스 사용시 최대 온도까지 상승하는 시간이 빨라지며 최대 온도가 1673K까지 측정되었다. 최대 온도는 코크스, 혼합원료, 무연탄 순서로 가장 높게 측정되었다. 저유량에서 코크스의 최고 온도는 1423K에서 1463K까지 측정되었지만, 고유량에서 코크스의 최고 온도는 1673K로 측정되었다. 유량이 높아짐에 따라 코크스, 혼합원료, 무연탄 모두 최고 온도가 높게 측정됨을 확인하였다.



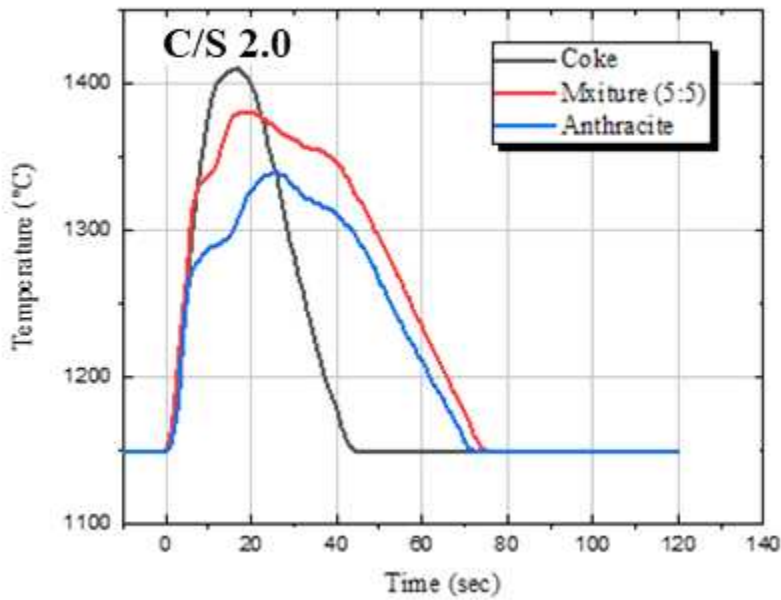
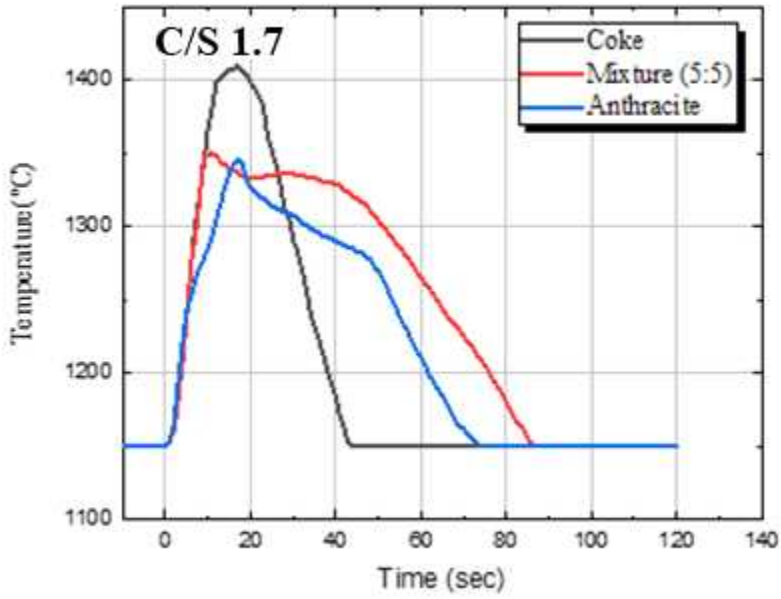


Fig. 4.14 Effect of time on the temperature profile of coke, anthracite and mixture.

2. 고유량에서의 소결광 EPMA 분석

그림 4.15부터 4.17은 고체연료가 코크스일 때, 소결 후 샘플 단면을 EPMA로 관찰한 그림(A)과 Image 분석프로그램으로 조사한 각 상의 면적율을 그림(B)에서 보여준다. 그림(B)에서 공극은 흰색, 슬래그상은 노란색, Calcium-Ferrite상은 초록색, 매트릭스상은 주황색으로 표시하였다. 염기도에 따라 표 4.8부터 4.10은 EPMA로 분석된 각 상들의 조성을 보여준다. 각 그림(A)에서 상 1은 슬래그, 상 2는 Calcium-Ferrite, 상 3은 매트릭스로 나타내었다. 각 표에는 조성과 함께 그림(B)에서 분석된 각 상의 Area ratio(%), 각 상의 CaO/SiO₂ 비를 나타내었다. 먼저, 그림(B)에서 흰색으로 나타낸 영역은 공극(Void)에 해당하며, 그림(A)의 상 분석 결과와 비교하면 모든 공극은 슬래그에 둘러싸여 있는 것으로 관찰되었다. 표 4.11부터 4.13은 배합 염기도에 따라 소결된 상들의 조성을 나타낸다.

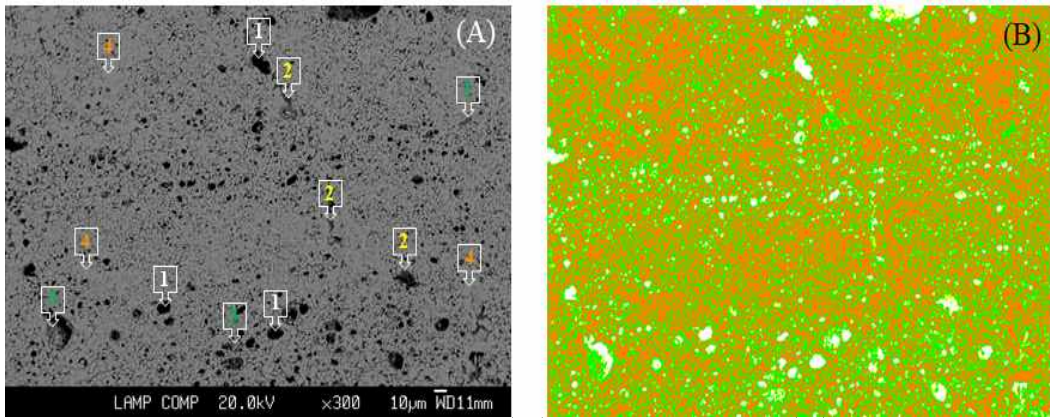


Fig. 4.15 Mineralogical structure (A) and Area ratio (B) of sample with C/S 1.4 sintered by cokes.

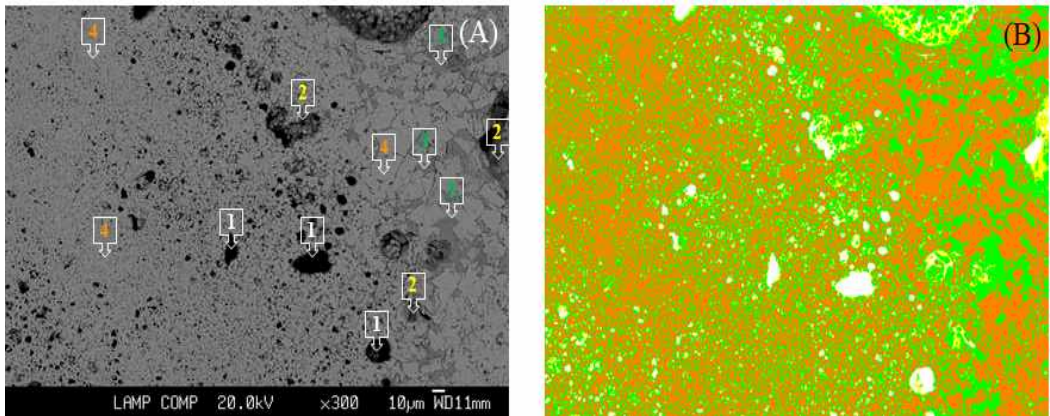


Fig. 4.16 Mineralogical structure (A) and Area ratio (B) of sample with C/S 1.7 sintered by cokes.

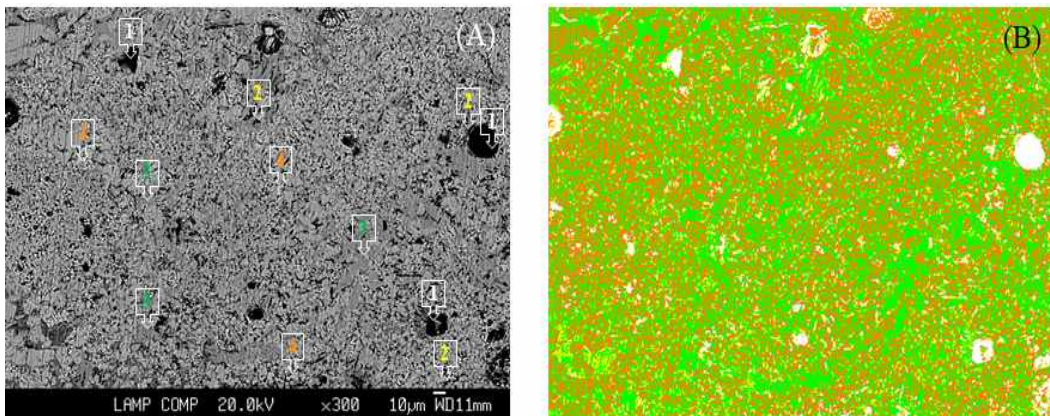


Fig. 4.17 Mineralogical structure (A) and Area ratio (B) of sample with C/S 2.0 sintered by cokes.

Table 4.11 Composition of various phases in sample with 1.4 of C/S and sintererd by cokes.

No.	Phase	Fe ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃ + MgO	Others	AR (%)	C/S
1	Pore	-	-	-	-	-	4.1	-
2	Slag phase	20.3	42.7	29.3	4.2	3.5	1.8	1.5
3	Calcium-Fe rrite	58.6	17.8	2.7	6.3	14.6	37.3	6.6
4	Matrix	95.1	1.2	0.1	1.1	2.5	56.8	12

Table 4.12 Composition of various phases in sample with 1.7 of C/S and sintererd by cokes.

No.	Phase	Fe ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃ + MgO	Others	AR (%)	C/S
1	Pore	-	-	-	-	-	3.8	-
2	Slag phase	19.6	40.7	25.2	2.9	11.6	3.6	1.7
3	Calcium-Fe rrite	63.1	21.7	2.4	2.5	10.3	38.2	9.0
4	Matrix	96.8	0.4	0.6	0.8	1.4	54.4	0.6

Table 4.13 Composition of various phases in sample with 2.0 of C/S and sintererd by cokes.

No.	Phase	Fe ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃ + MgO	Others	AR (%)	C/S
1	Pore	-	-	-	-	-	3.4	-
2	Slag phase	20.3	42.3	22.3	1.5	13.6	6.9	1.9
3	Calcium-Fe rrite	57.7	15.6	2.1	2.2	22.4	40.2	7.4
4	Matrix	94.6	1.7	0.2	0.6	2.9	49.5	8.5

그림 4.18부터 4.20은 고체연료가 무연탄일 때, 소결 후 샘플 단면을 EPMA로 관찰한 그림(A)과 Image 분석프로그램으로 조사한 각 상의 면적율을 그림(B)에서 보여준다. 위와 동일하게 그림(A)는 EPMA로 관찰된 광석상이며, 슬래그, Calcium-Ferrite, 매트릭스는 각각 상 1, 2, 3으로 표시하였으며, 그림(B)는 공극, 슬래그, Calcium-Ferrite, 매트릭스의 Area ratio를 각각 흰색, 노란색, 초록색, 주황색으로 나타내었다. 코크스를 고체연료로 사용했을 때와 동일하게 공극은 슬래그상으로 둘러 쌓여 있는 경향이 있으나, 공극이 없는 곳에서도 슬래그상이 관찰되었다. 표 4.5부터 4.7은 배합 염기도에 따라 소결된 상들의 조성을 나타낸다. 표 4.14부터 4.16은 배합 염기도에 따라 소결된 상들의 조성을 나타낸다.

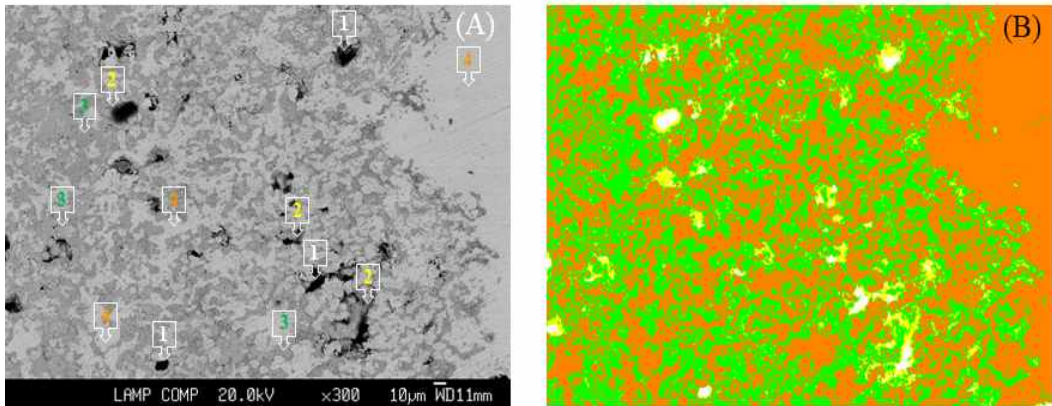


Fig. 4.18 Mineralogical structure (A) and Area ratio (B) of sample with C/S 1.4 sintered by anthracites.

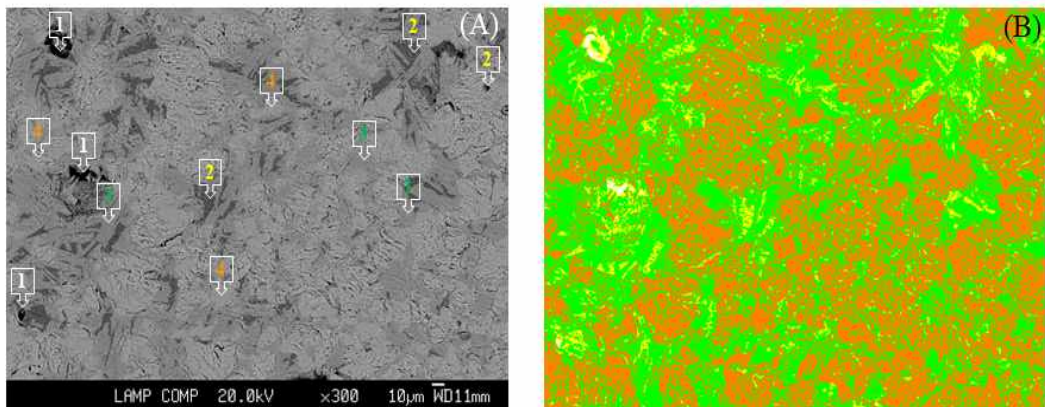


Fig. 4.19 Mineralogical structure (A) and Area ratio (B) of sample with C/S 1.7 sintered by anthracites.

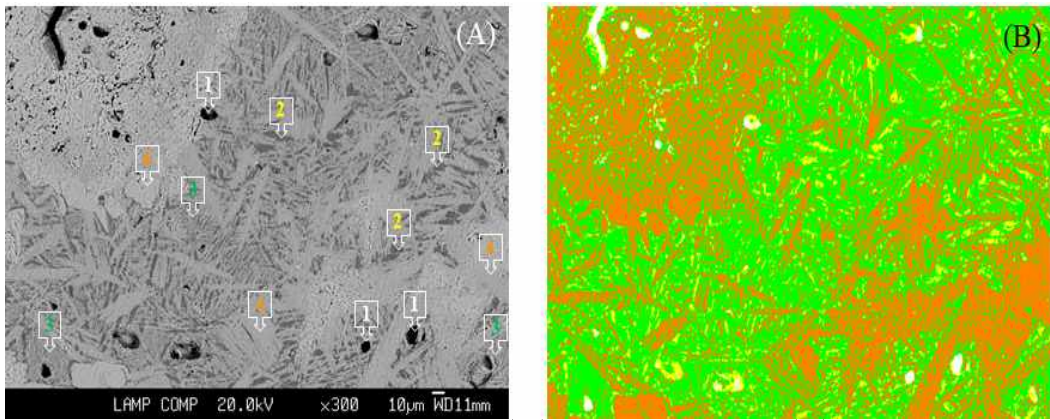


Fig. 4.20 Mineralogical structure (A) and Area ratio (B) of sample with C/S 2.0 sintered by anthracites.

Table 4.14 Composition of various phases in sample with 1.4 of C/S and sintered by anthracites.

No.	Phase	Fe ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃ + MgO	Others	AR (%)	C/S
1	Pore	-	-	-	-	-	1.5	-
2	Slag phase	22.9	40.3	28.3	1.2	7.3	3.2	1.4
3	Calcium-Fe rite	50.4	17.1	12.5	1.7	18.3	32.6	1.4
4	Matrix	98.8	0.2	0.1	0.3	0.6	62.7	2

Table 4.15 Composition of various phases in sample with 1.7 of C/S and sintered by anthracites.

No.	Phase	Fe ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃ + MgO	Others	AR (%)	C/S
1	Pore	-	-	-	-	-	0.8	-
2	Slag phase	21.6	38.8	22.3	5.4	11.9	4.5	1.7
3	Calcium-Fe rite	56.7	16.8	14.5	2.6	9.4	35.2	1.2
4	Matrix	97.4	0.2	0.1	0.5	1.8	59.5	2

Table 4.16 Composition of various phases in sample with 2.0 of C/S and sintered by anthracites.

No.	Phase	Fe ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃ + MgO	Others	AR (%)	C/S
1	Pore	-	-	-	-	-	0.6	-
2	Slag phase	28.3	38.9	20.3	3.1	9.3	5.8	1.9
3	Calcium-Ferrite	53.9	24.2	5.7	1.5	14.7	39.7	4.2
4	Matrix	96.2	0.2	0.1	0.8	2.7	53.9	2

그림 4.21부터 4.23은 고체연료가 코크스와 무연탄의 혼합원료(5:5)일 때, 소결 후 샘플 단면을 EPMA로 관찰한 그림(A)과 Image 분석프로그램으로 조사한 각 상의 면적율을 그림(B)에서 보여준다. 위와 동일하게 그림(A)는 EPMA로 관찰된 광석상이며, 슬래그, Calcium-Ferrite, 매트릭스는 각각 상 1, 2, 3으로 표시하였으며, 그림(B)는 공극, 슬래그, Calcium-Ferrite, 매트릭스의 Area ratio를 각각 흰색, 노란색, 초록색, 주황색으로 나타내었다. 코크스를 고체연료로 사용했을 때와 동일하게 공극은 슬래그상으로 둘러 쌓여 있는 경향이 있으나, 공극이 없는 곳에서도 슬래그상이 관찰되었다. 표 4.17부터 4.19은 배합 염기도에 따라 소결된 상들의 조성을 나타낸다.

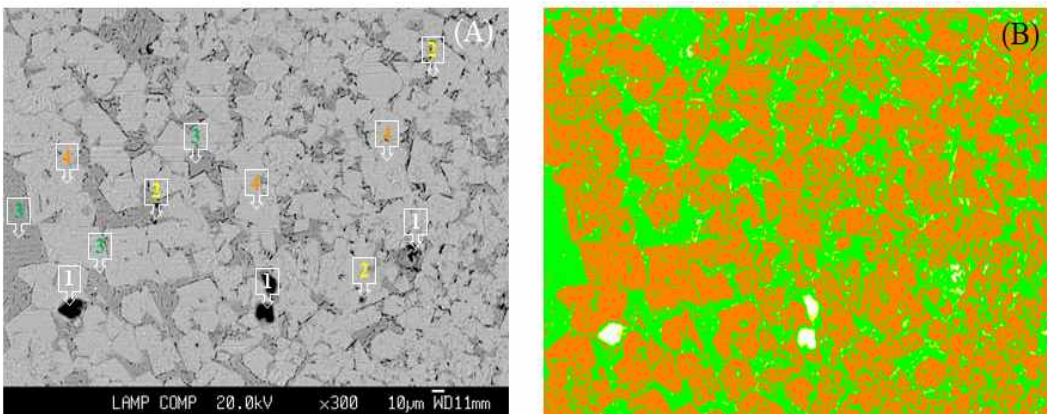


Fig. 4.21 Mineralogical structure (A) and Area ratio (B) of sample with C/S 1.4 sintered by mixture of solid fuels.

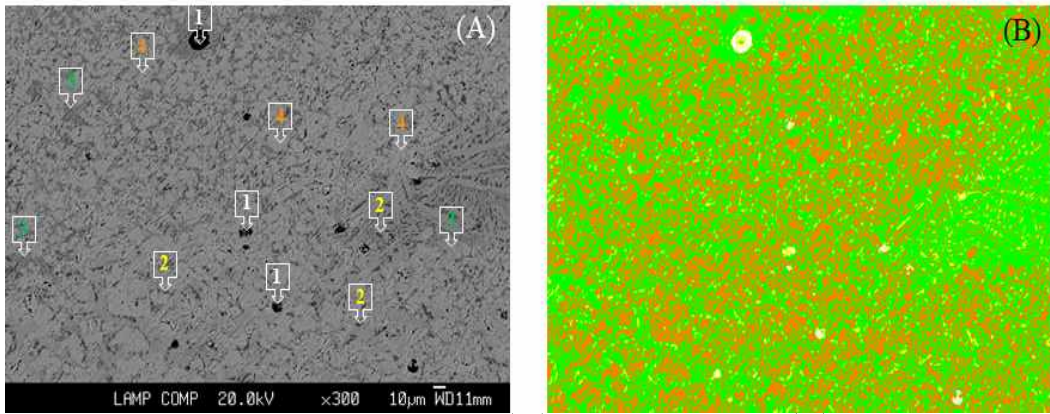


Fig. 4.22 Mineralogical structure (A) and Area ratio (B) of sample with C/S 1.7 sintered by mixture of solid fuels.

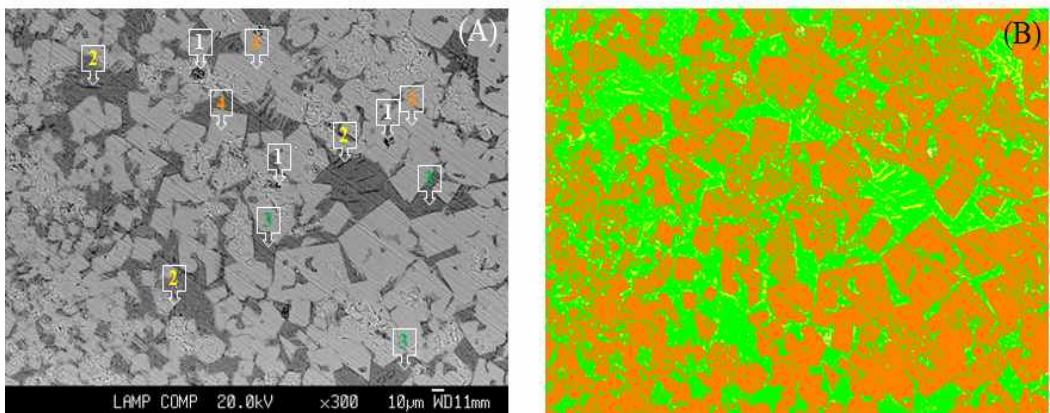


Fig. 4.23 Mineralogical structure (A) and Area ratio (B) of sample with C/S 2.0 sintered by mixture of solid fuels.

Table 4.17 Composition of various phases in sample with 1.4 of C/S and sintered by mixture of solid fuels.

No.	Phase	Fe ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃ + MgO	Others	AR (%)	C/S
1	Pore	-	-	-	-	-	0.8	-
2	Slag phase	22.6	38.3	26.3	5.2	9.9	1.4	1.4
3	Calcium-Fe rite	51.3	20.3	4.2	3.3	20.9	34.7	4.8
4	Matrix	96.3	1.1	0.1	0.7	1.8	63.1	11

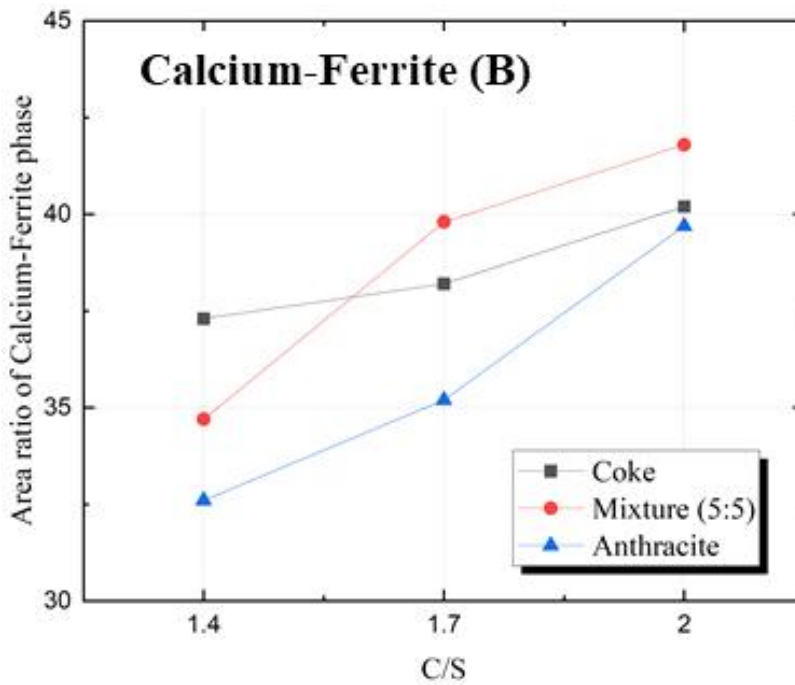
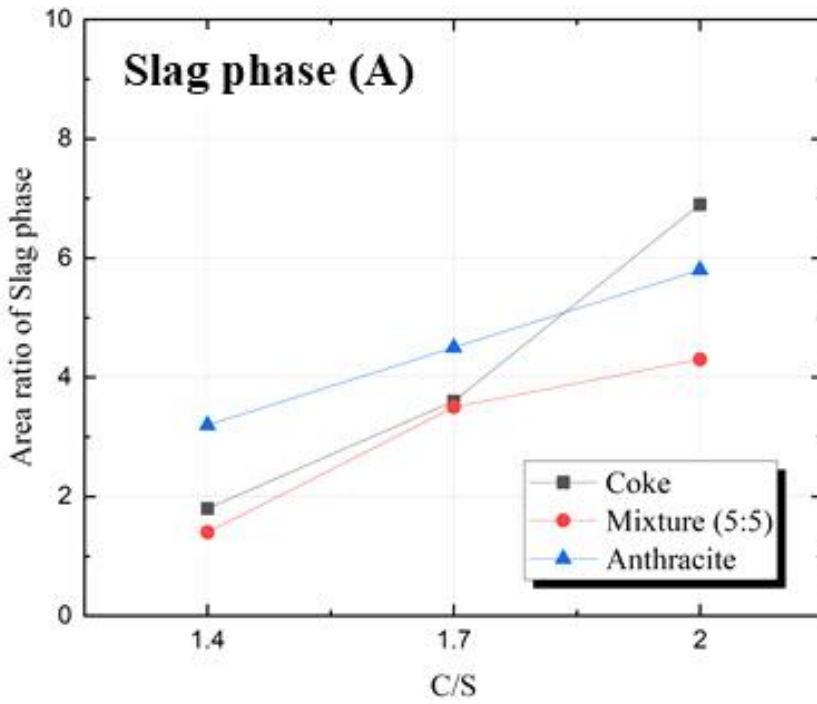
Table 4.18 Composition of various phases in sample with 1.7 of C/S and sintered by mixture of solid fuels.

No.	Phase	Fe ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃ + MgO	Others	AR (%)	C/S
1	Pore	-	-	-	-	-	0.3	-
2	Slag phase	27.9	38.2	22.4	4.7	4.8	3.5	1.7
3	Calcium-Ferrite	49.3	22.3	5.8	1.6	23	39.8	3.8
4	Matrix	96.2	0.9	0.1	0.7	2.1	56.4	9

Table 4.19 Composition of various phases in sample with 2.0 of C/S and sintered by mixture of solid fuels.

No.	Phase	Fe ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃ + MgO	Others	AR (%)	C/S
1	Pore	-	-	-	-	-	0.1	-
2	Slag phase	30.4	42.3	21.3	3.8	2.2	4.3	2.0
3	Calcium-Ferrite	50.4	25.3	11.3	7.7	5.3	41.8	2.2
4	Matrix	96.8	0.3	0.1	0.5	2.3	53.8	3

그림 4.24의 (A), (B), (C)는 고체연료가 코크스, 혼합원료, 무연탄일 조건에서 각각 슬래그, Calcium-Ferrite, 매트릭스의 면적비에 미치는 배합 염기도의 영향을 보여준다. 고체연료의 종류와 관계없이 슬래그상 및 Calcium-Ferrite상의 면적비는 슬래그 염기도가 증가함에 따라 증가하며, 매트릭스 상은 반대로 감소한다. 고체연료가 무연탄일 경우 그림(A)처럼 슬래그의 면적비는 가장 높으며, 그림(B)에서 Calcium-Ferrite상의 면적비는 낮았다. 고체연료가 코크스일 경우, 매트릭스의 면적비가 가장 낮음을 확인하였다. 혼합원료의 경우 슬래그상의 면적비가 가장 낮았으며, Calcium-Ferrite상의 면적비가 높고, 매트릭스상의 면적비는 코크스일 경우보다 높으며 무연탄보다 낮음을 확인하였다.



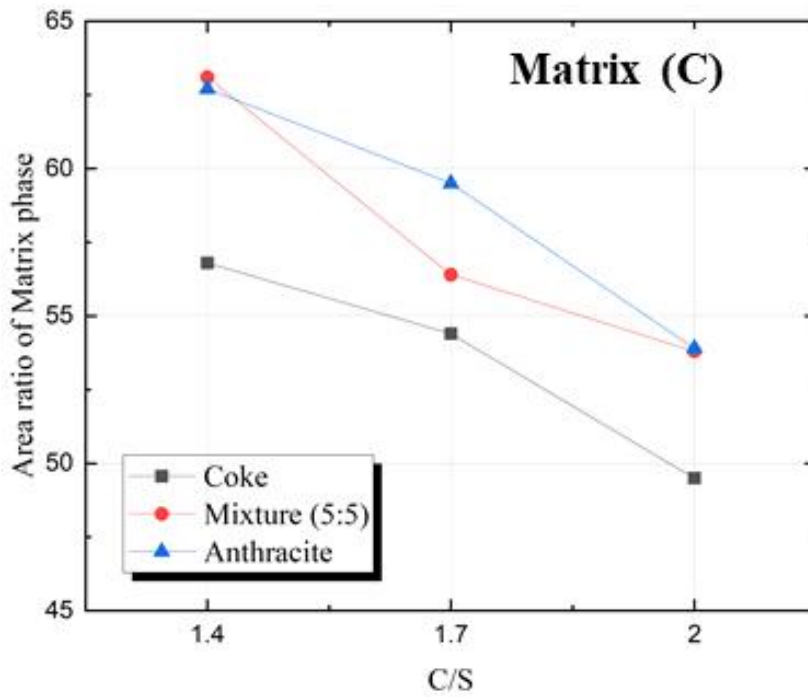


Fig. 4.24 Effect of solid fuels on the area ratio of Slag, Calcium-Ferrite and Matrix phase of C/S.

3. 고유량에서의 소결광 ICP-OES 분석

그림 4.25는 ICP-OES 분석으로 측정된 Fe_2O_3 와 CaO 농도와 식(16)으로 계산된 농도를 비교하였다. 식(16)에서 염기도 및 고체연료 조건에 따른 각 상의 Area ratio는 표 4.8부터 4.16에 나타냈으며, 각 상에서 Fe_2O_3 및 CaO 농도는 EPMA 분석으로 얻어진 조성을 사용하였다. 그림 4.24와 같이 ICP-OES 분석 결과로 얻어진 Fe_2O_3 와 CaO 의 농도와 계산 결과가 거의 일치함을 나타냈으며, Area ratio는 각 상의 생성비를 간주할 수 있다고 판단된다.

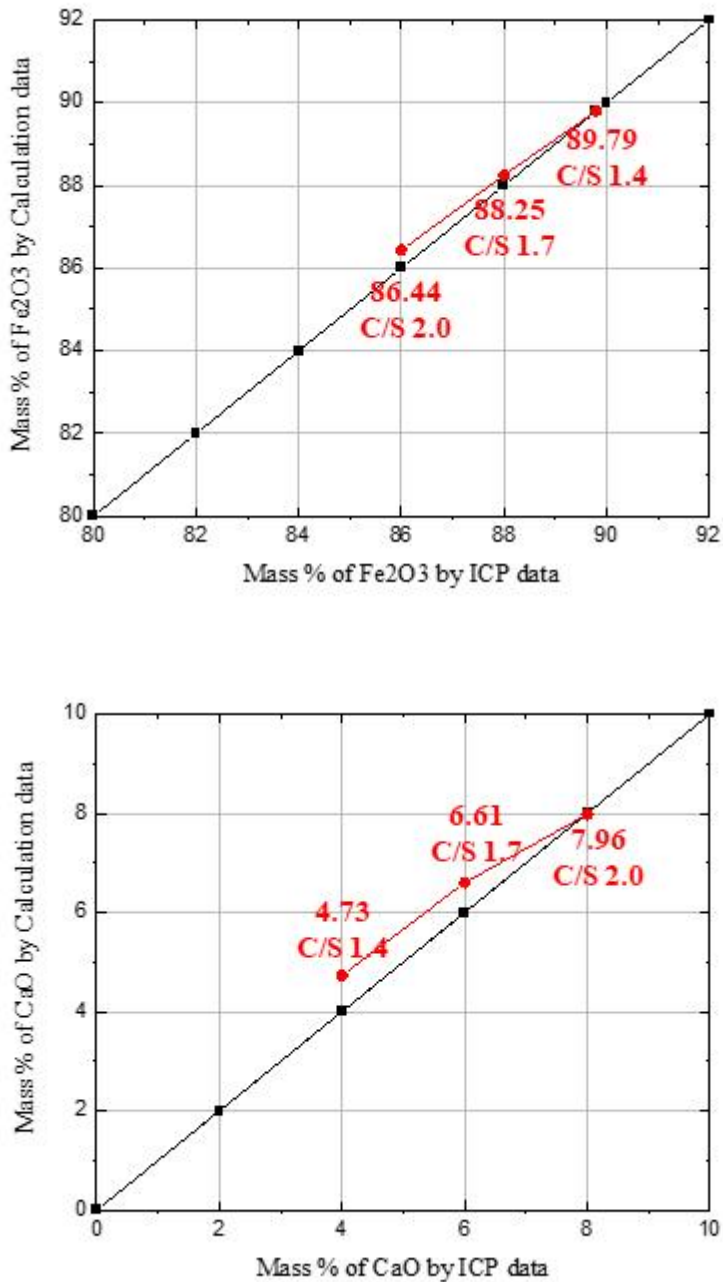
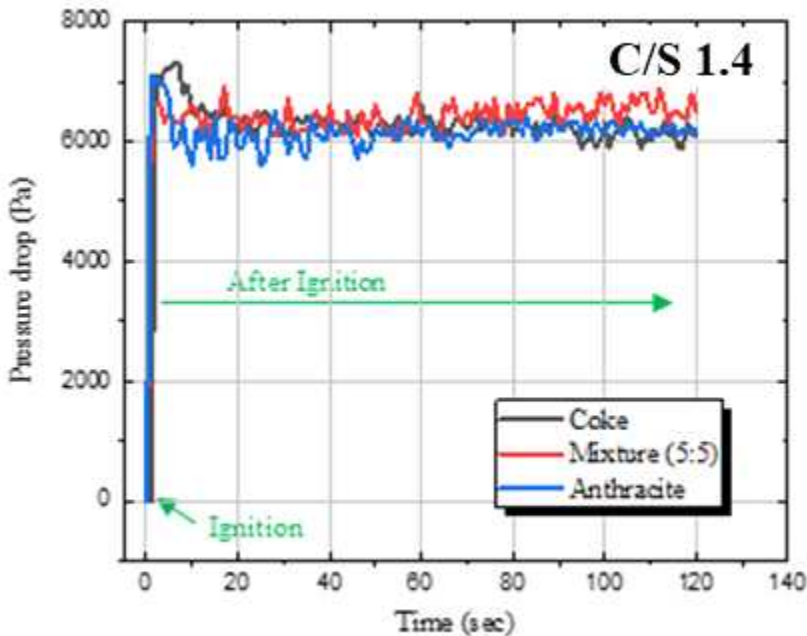


Fig. 4.25 Comparison of Fe₂O₃ and CaO contents measured by ICP-OES analysis and calculated by area ratio EPMA results.

4. 고유량에서의 압력손실 및 공극률 측정

그림 4.26은 각 염기도 1.4, 1.7, 2.0에서 고체연료에 따른 압력손실의 변화를 보여준다. 연소가 시작되어 소결이 끝나는 시간인 약 20sec 사이에 압력손실 값이 측정된다. 표 3.4인 슬래그 염기도에 따른 원료 배합비를 보면 염기도 C가 석회석의 양이 많음을 확인할 수 있는데, 목표 온도 승온 후 분위기를 Dried Air로 변경함으로써 석회석이 CaO와 CO₂로 분해되며 분해된 CO₂의 기화로 인해 공극이 많이 생기며 압력손실이 측정됨을 확인하였다. 샘플의 양이 적은 염기도 A는 약 7,000~8,000Pa이 측정되었으며, 비교적 샘플의 양이 많은 염기도 C가 실험 초반에 약 8,500Pa의 압력손실이 측정되었다. 압력손실 실험은 초반에 약 8,400Pa까지 측정되다가 소결이 진행되면서 약 6,000Pa까지 떨어짐을 확인하였다.



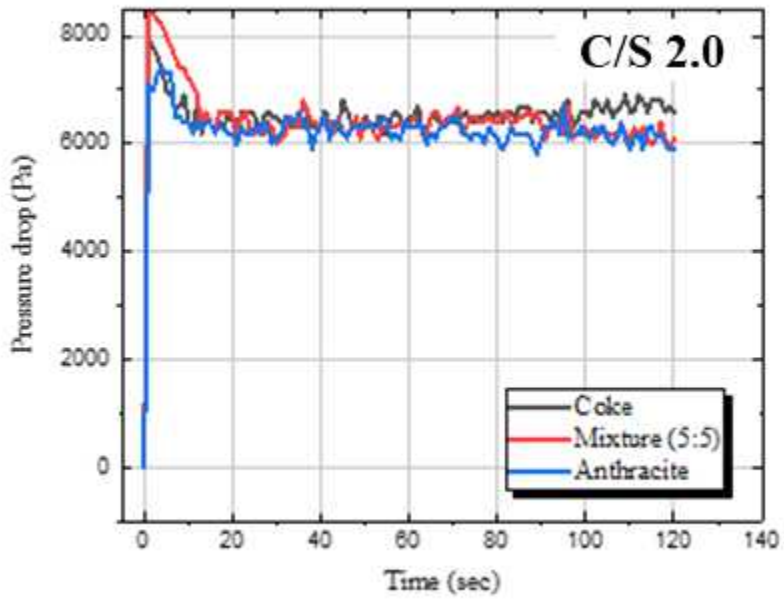
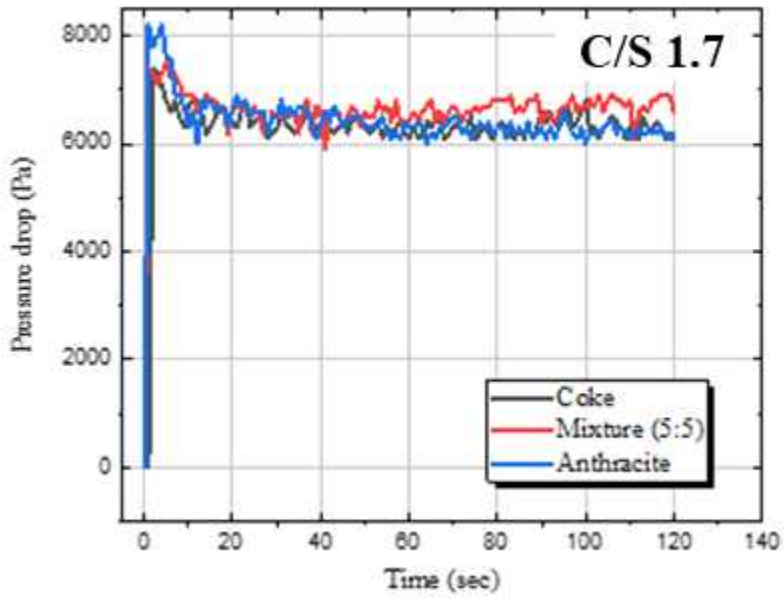
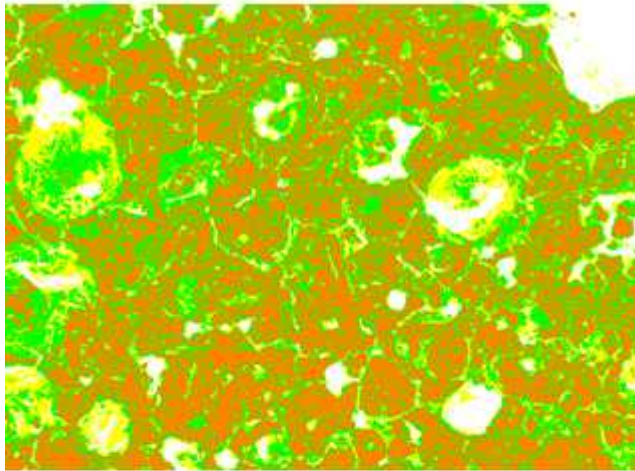


Fig. 4.26 Effect of time on the pressure drop of coke, anthracite and mixture.

그림 4.27부터 4.29는 염기도 1.4, 1.7, 2.0의 고체연료 별로 각각 EPMA와 이미지 프로그램을 활용하여 10~15번 정도 측정을 진행하였다. 공극률은 석회석이 CaO와 CO₂로 분해되면서 분해된 CO₂의 기화로 인해 공극이 생성된다고 판단된다. 그에 따라 염기도가 증가함에 따라 공극률 또한 증가함을 확인하였다.

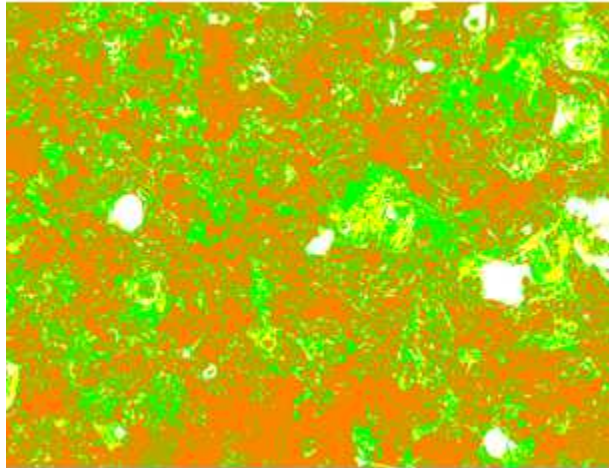
C/S 1.4 Coke



No.	Pores
1	6.2
2	4.1
3	5.3
4	6.4
5	8.2
6	6.1
7	5.4
8	4.9
9	9.2
10	7.4
Average	6.3

Fig. 4.27 Effect of porosity of basicity 1.4.

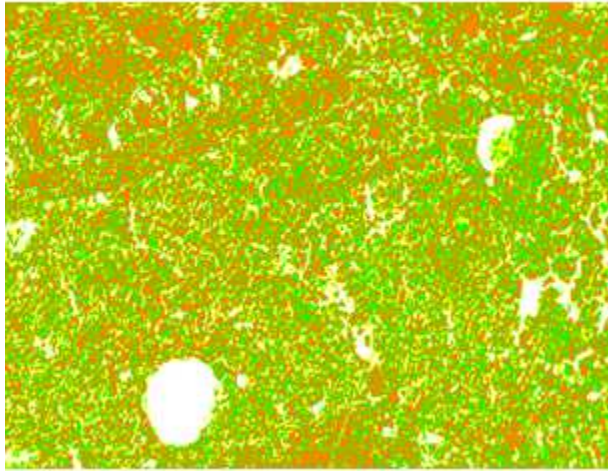
C/S 1.7 Coke



No.	Pores
1	8.6
2	7.6
3	7.1
4	9.2
5	8.6
6	8.1
7	8.9
8	7.8
9	9.2
10	9.2
Average	8.4

Fig. 4.28 Effect of porosity of basicity 1.7.

C/S 2.0 Coke



No.	Pores
1	12.1
2	15.3
3	9.8
4	13.7
5	12.4
6	13.6
7	12.8
8	11.9
9	14.3
10	12.7
Average	12.9

Fig. 4.29 Effect of porosity of basicity 2.0.

그림 4.30는 코크스와 혼합원료 및 무연탄의 공극률을 보여준다. 염기도가 증가함에 따라 공극률이 증가하며, 코크스의 공극률이 무연탄보다 더 많음을 확인하였다.

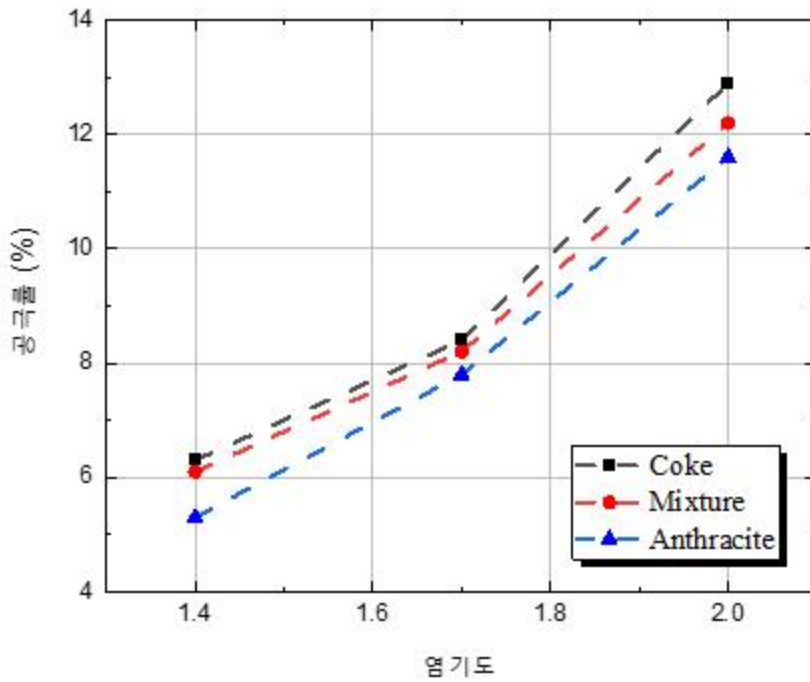


Fig. 4.30 Effect of porosity on basicity by solid fuels.

5. 온도데이터와 압력손실 데이터의 비교

그림 4.31부터 4.33는 염기도 1.4, 1.7, 2.0의 고체연료 코크스의 온도데이터와 압력손실 데이터의 비교 그래프이다. 고체연료의 연소가 진행되면 온도가 상승하며 압력손실이 측정된다. 최고 온도에 도달하는 순간 Coke의 연소 반응이 멈추며 공극이 생성되어 압력변화가 일정해진다. 염기도가 증가함에 따라 고체연료의 양 또한 증가하며 공극률 또한 증가한다.

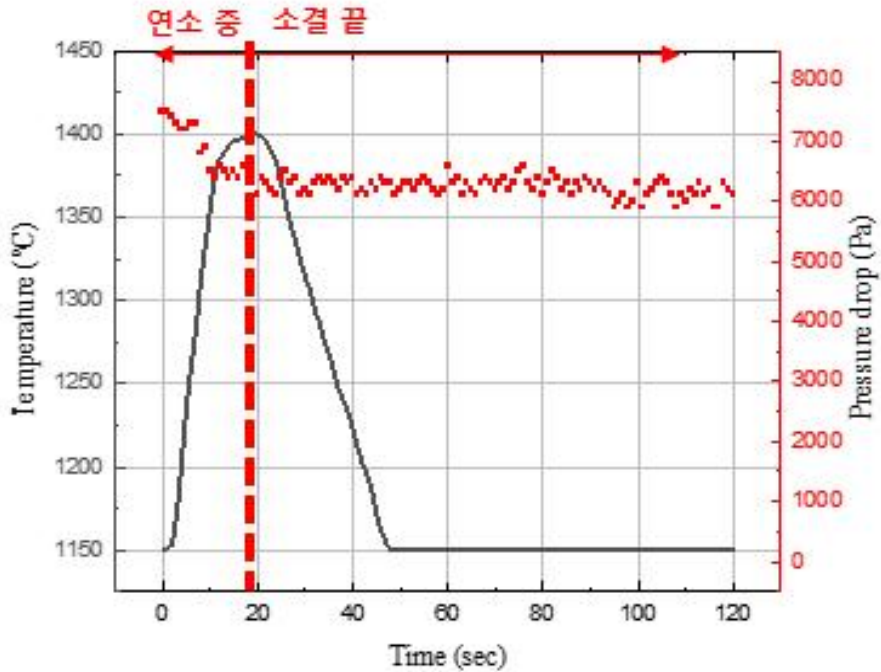


Fig. 4.31 Temperature profile and Pressure drop(Coke) C/S 1.4 at 1423K.

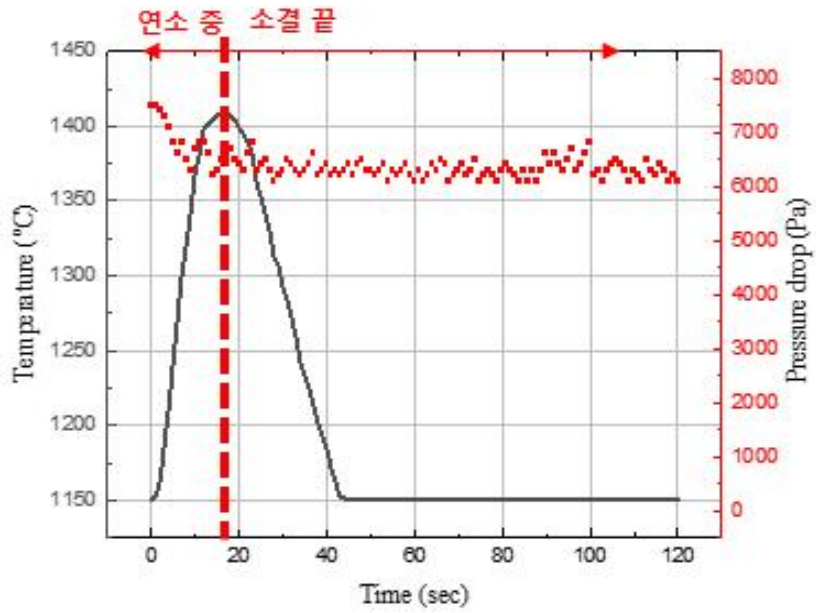


Fig. 4.32 Temperature profile and Pressure drop(Coke) C/S 1.7 at 1423K.

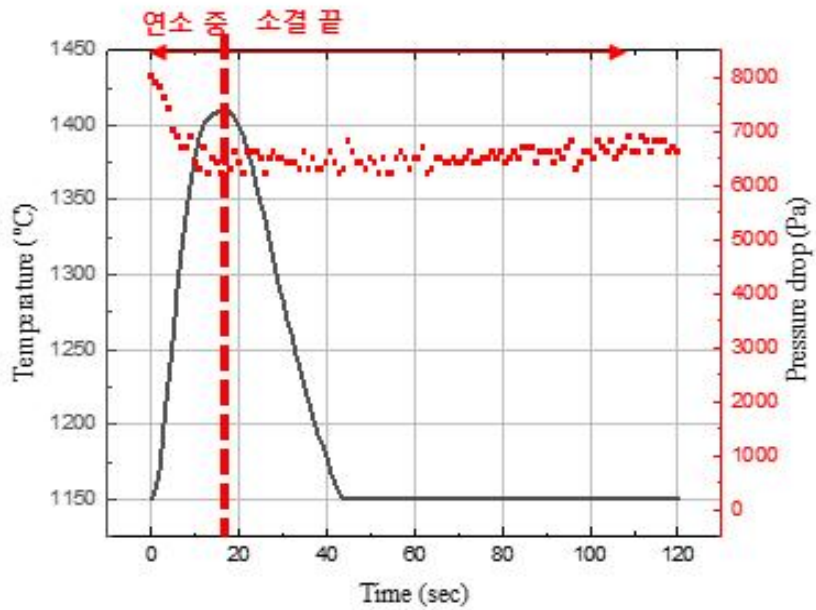


Fig. 4.33 Temperature profile and Pressure drop(Coke) C/S 2.0 at 1423K.

제 4 절 시뮬레이션과 실험 결과값 비교

1. 높이(Z)와 고체연료비의 시뮬레이션 비교

그림 4.34는 높이의 변화에 따라 온도에 미치는 영향을 보여주는 시뮬레이션 결과 그래프이다. 높이는 소결 대차의 표면으로부터 떨어진 거리를 나타낸다. 시뮬레이션 조건은 표 4.20에 도시하였다. 점화 온도를 1323K, 높이는 H1이 가장 낮고, H5가 가장 높게 설정하였다. 그리고 혼합물 중 고체연료비는 4 %를 사용하였다. 높이가 증가함에 따라 최대 온도 또한 증가하였고, 반응 시간 또한 증가하였다. 계산값은 모델을 사용하여 얻은 값이고, 측정값은 조업에서 Pot 실험을 통해 얻은 결과값이다. 높이 H3의 계산값과 측정값이 거의 일치함을 보였다. 그림 4.35는 혼합물 중 고체연료비에 따라 온도에 미치는 영향을 보여주는 시뮬레이션 결과 그래프이다. 조건으로는 높이 H5를 사용하였고 고체연료비를 변화하였다. 고체연료비가 증가할수록 최대 온도 또한 증가함을 확인하였다.

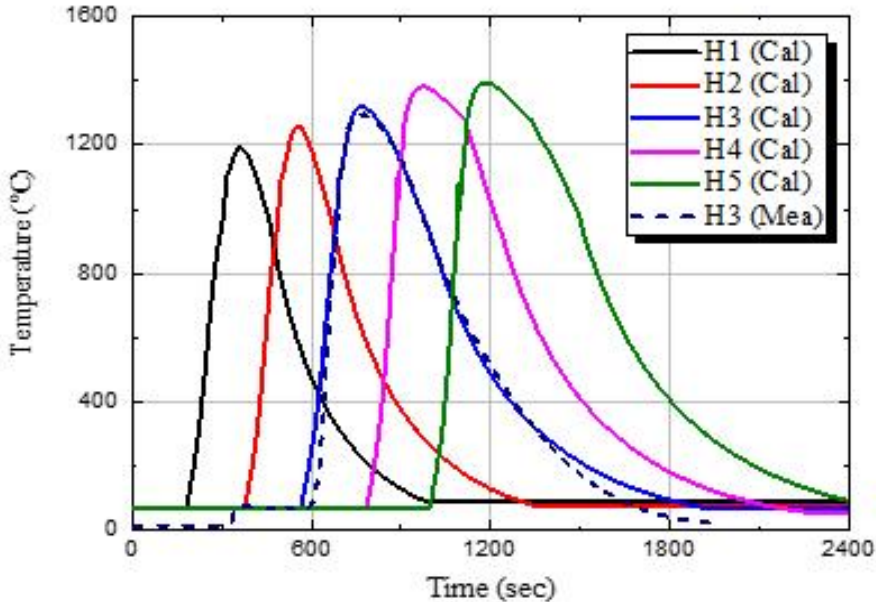


Fig. 4.34 Effect of time and temperature by height of simulation data and experimental data.

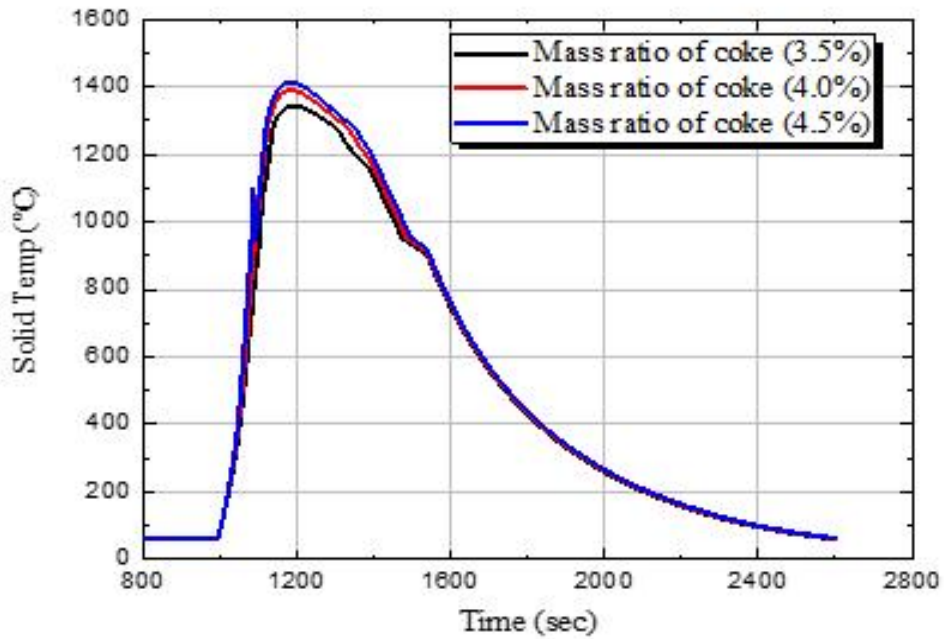


Fig. 4.35 Effect of time and solid temperature by mass ratio of coke.

Table 4.20 Conditions of simulation data

Temp (K)	1323
Height (mm)	H1<H2<H3<H4<H5
Mass ratio of Coke (%)	4

2. Heat pattern 시뮬레이션

그림 4.36은 Hx의 높이를 사용하여 얻어진 Heat pattern 그래프이다. 실험을 통해 얻은 고체연료의 연소 속도 데이터와 온도 측정 데이터 및 압력손실 데이터를 Input으로 대입하여 최종적으로 그림 4.37과 같은 소결 대차 이미지와 비슷한 Heat pattern 이미지를 도출하였다.

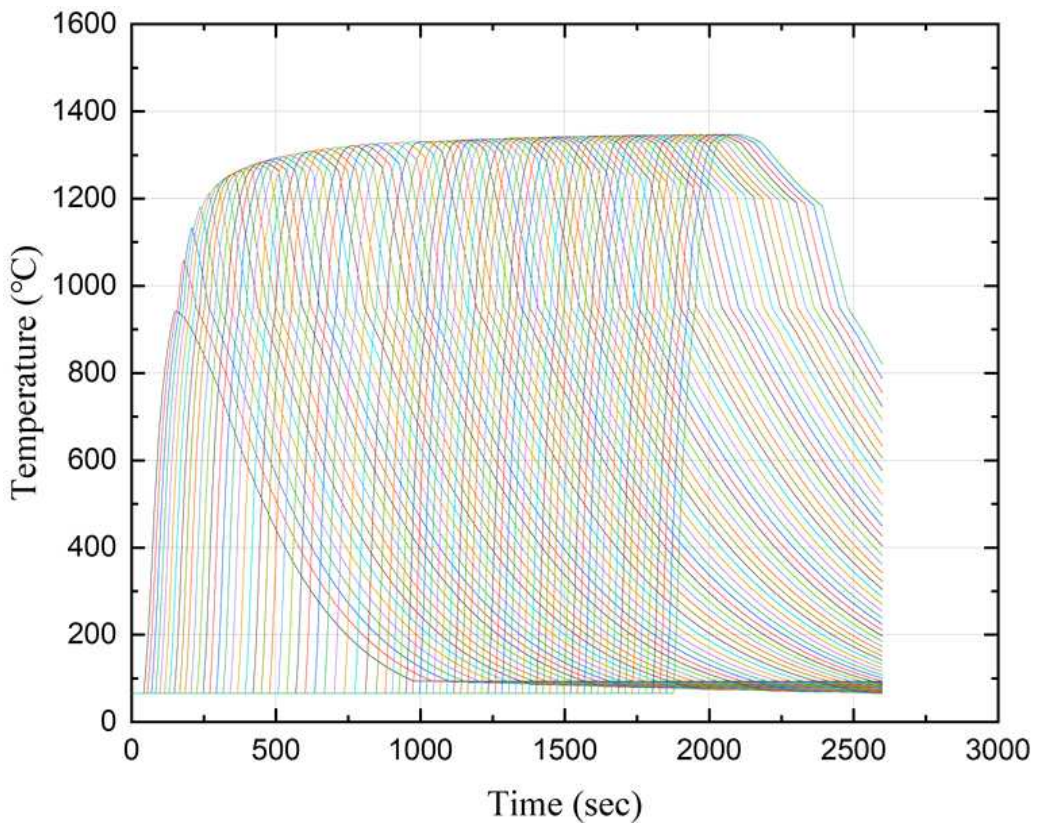


Fig. 4.36 Effect of time and temperature by height of simulation data

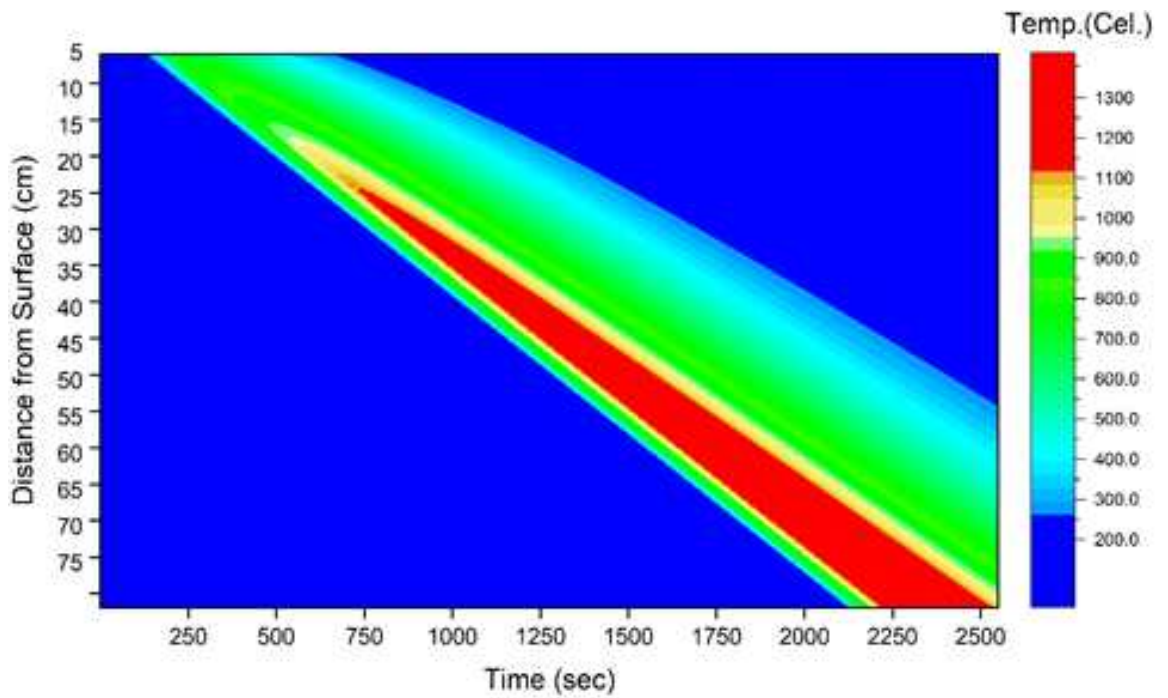


Fig. 4.37 Heat pattern image by simulation results.

제 5장 결 론

본 연구에서는 소결 층의 온도 분포를 예측하기 위하여 소결 공정의 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 또한 시뮬레이션 모델에 적용하기 위하여 불활성 분위기로 목표 온도까지 승온 후 Dried Air로 변경한 뒤 고체연료의 연소 실험과 온도 측정 실험 및 압력손실 실험을 진행하였으며, 고체연료의 연소 속도 상수인 k_c 의 값을 도출하였다. 최종적으로 시뮬레이션 모델에 Input으로 대입하여 모델을 구축하였다. 실험결과는 다음과 같다.

1) 코크스의 연소 속도는 TGA 분석법을 사용하였고, 불활성 분위기로 목표 온도까지 승온 후 Air로 변경 후 연소 속도 측정 실험을 진행하였다. 그리하여 온도와 관계된 연소 속도를 얻었다.

2) 모델의 계산 순서를 알고리즘으로 만들어 Δt 시간과 Δz 거리를 거쳐 열화학적 & 물리학적 특성과 연소 속도, 온도 데이터, 압력손실 데이터와, 석회석 분해반응, Runge-Kutta 식을 사용하여 소결 공정에서 온도를 측정하기 위한 시뮬레이션 모델을 개발하였다.

3) 저유량에서의 온도 실험은 코크스는 1423K에서 1463K까지 온도가 상승함을 확인하였으며, 온도 측정 시간 또한 무연탄보다 매우 짧음을 확인하였다. 무연탄은 1423K에서 1453K까지 온도가 상승함을 확인하였다. 또한 소결광 내 상분석을 통해 염기도가 증가함에 따라 슬래그상과 Calcium-Ferrite상은 증가하지만 Matrix상은 감소함을 확인하였다.

4) 고유량에서의 온도 실험은 코크스는 최대 온도까지 상승하는 시간이 빠르며 최대 온도가 1673K까지 측정되었다. 최대 온도는 코크스, 혼합원료, 무연탄 순서로 가장 높게 측정되었다. 또한 소결광 내 상분석을 통해 염기도가 증가함에 따라 슬래그상과 Calcium-Ferrite상은 증가하지만 Matrix상은 감소함을 확인하였다.

5) 공극률은 염기도가 증가함에 따라 증가하며, 코크스가 무연탄보다 공극률이 더 높게 측정되었다.

6) 실험을 통해 얻은 고체연료의 연소 속도 데이터와 온도 측정 데이터 및 압력손실 데이터를 Input으로 대입하여 최종적으로 그림 4.37과 같은 소결 대차 이미지와 비슷한 Heat pattern 이미지를 도출하였다.

참고 문헌

- [1] J. S. Zeng, C. H. Gao, H.Y. Su, Computers and Chemical Engineering, Vol. 34, 1854-1862 (2010).
- [2] D. David, and C. E. Loo, ISIJ Int, Vol. 47, 652-658 (2007)
- [3] N. OYAMA, Y. IWAMI, T. YAMAMOTO, S. MACHIDA, T. HIGUCHI, H. SATO, M. SATO, K. TAKEDA, Y. WATANABE, M. SHIMIZ and K. NISHIOKA, ISIJ Int, Vol. 51, 913-921 (2011)
- [4] T. KAWAGUCHI, C. KAMIJO and M. MATSUMURA, Tetsu-to-Hagane, Vol. 92, 779-787 (2006)
- [5] 주요 대형 철강사 시장환경 변화에 대응 Multi Focusing 연원료 전략 추진 : 허진석 수석연구원, 경영인프라연구센터
- [6] C. DING, X. LV, T. CHEN and C. BAI, ISIJ Int, Vol. 56, 1157-1163 (2016)
- [7] J. W. JEON, S. M. JUNG and Y. SASAKI, ISIJ Int, Vol 50, 1064-1070 (2010)
- [8] T. UMADEVI, A. BRAHMACHARYULU, A. K. ROY, P. C. MAHAPATRA, M. PRABHU and M. RANJAN, ISIJ Int, Vol. 51, 922-929 (2011)
- [9] K. OHNO, K. NODA, K. NISHIOKA, T. MAEDA and M. SHIMIZU, ISIJ Int, Vol. 53, 1588-1593 (2013)
- [10] I. MUCHI and J. HIGUCHI, Iron and Steel, Vol. 56, 371-381 (1970)
- [11] T. HAMADA, T. KOITABASHI and K. OKABE, ISIJ Int, Vol. 16 1567-1578 (1971)

- [12] S. NIGO, K. KIMURA, M. ICHIMIVA, S. YASUMOTO, K. NAKASHIMA and T. KASAHARA, *ISIJ Int*, Vol. 68, 2182-2189 (1982)
- [13] E. KASAI, J. I. YAGI and Y. OMORI, *ISIJ Int*, Vol. 70, 1567-1574 (1984)
- [15] H. ZHOU, J. P. ZHAO, C. E. LOD, *ISIJ Int*, Vol. 52, 1550-1558 (2012)
- [16] J. A. CASTRO, Y. SAZAKI, J. I. YAGI, *Materials Research*, Vol. 15, 848-858 (2012)
- [17] H. AHN, S. CHOI and B. CHO, *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 40, 120-127 (2013)
- [18] R. W. YOUNG, *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 4, 321-328 (1977)
- [19] F. PATISSON, J. P. BELLOT, D. ABLITZER, E. MARLI, C. DULCY and J. M. STEILER, *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 18, 89-95 (1991)
- [20] T. TUKAMOTO, S. SIMADA, T. TAGUCHI and J. HIGUCHI, *ISIJ Int*, Vol. 12, 661-670 (1969)