



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](#)

공학전문석사학위 연구보고서

CFD를 활용한 코크스 오븐 연소실 내 연소반응 모사

2018년 2월

서울대학교 공학전문대학원

응용공학과 응용공학전공

허재원

초 록

제철산업에서 코크스 오븐(Coke oven)의 효율적인 운영은 코크스 품질 향상을 통한 고로(Blast furnace)의 안정적 운영과 소비열량 절감을 통한 에너지 절약과 직접 관련되기 때문에 많은 관심을 받고 있다. 그리고 코크스 오븐의 효율적인 운영을 위해서는 코크스 오븐 연소실(Combustion chamber) 내에서 일어나는 연소반응을 최적으로 관리해야만 한다.

이 연구는 코크스 오븐 연소실 내 연소반응을 최적화하기 위해, 연소실 내에서 일어나는 연소반응을 전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics)을 통해 모사하는 연구이다. 이를 위해 코크스 오븐 연소실 중 1개 Flue chamber를 3-D Modeling 하였고, 동시에 연소과정에 대한 지배방정식을 도출하였다. 그 후 상용 CFD Tool인 Ansys Fluent를 활용해 다양한 연소조건에 대응하는 Flue chamber 내 온도분포를 시뮬레이션 하였다.

마지막으로 얻어진 결과물을 실제 코크스 오븐 연소실 내 온도 분포와 비교하였고, 이 결과물은 향후 코크스 오븐 연소관리를 위한 자료로 사용될 것이다.

주요어 : 코크스 오븐, 연소실, 연소반응, 전산유체역학, CFD

학 번 : 2016-22261

목 차

제 1 장 서론	1
제 1 절 연구 배경	1
제 2 절 연구 내용	4
1. 연구 목적	4
2. 연구의 필요성	4
3. 연구 결과물	5
제 2 장 코크스 오븐 시스템	6
제 1 절 코크스 제조 공정	6
제 2 절 코크스 오븐 구조	8
제 3 절 석탄의 건류	11
제 3 장 연소실 연소반응의 수학적 모델링	15
제 1 절 기본 가정	15
제 2 절 지배방정식	17
제 3 절 경계 조건	23
제 4 장 기하학적 모델링	25
제 1 절 연소실 3-D Modeling	25
제 2 절 격자 생성 결과	27

제 5 장 일상 조업에 대한 CFD 모델링	31
제 1 절 Setup of the model	31
제 2 절 모델링 결과 및 검증	34
제 6 장 Case별 시뮬레이션	38
제 1 절 시뮬레이션 Case	38
제 2 절 Case별 시뮬레이션 결과	43
1. 코크스 오븐 가동률 변화 시, 연소실 내 온도분포 변화	43
2. 연소용 Air 유량 증감 시, 연소실 내 온도분포 변화	47
3. Mixed Gas 조성 변화 시, 연소실 내 온도분포 변화	51
제 7 장 결론	56
제 1 절 요약	56
제 2 절 후속 연구	58
참 고 문 헌	59
Abstract	61

표 목차

[표 3-1] Chemical composition of the fuel and Air	24
[표 5-1] Boundary conditions (Standard operation)	32
[표 6-1] 시뮬레이션 Cases	38
[표 6-2] Boundary conditions for case 1.1	40
[표 6-3] Boundary conditions for case 1.2	40
[표 6-4] Boundary conditions for case 1.3	40
[표 6-5] Boundary conditions for case 1.4	40
[표 6-6] Boundary conditions for case 2.1	41
[표 6-7] Boundary conditions for case 2.2	41
[표 6-8] Boundary conditions for case 2.3	41
[표 6-9] Boundary conditions for case 2.4	41
[표 6-10] Mixed Gas compositions of Case 3.1~3.4	42

그림 목차

[그림 1-1] 일관 제철 공정 프로세스	1
[그림 1-2] 세계 철강회사의 고로 대형화 추이	2
[그림 1-3] 고로 내에서의 코크스의 역할	3
[그림 2-1] 코크스	6
[그림 2-2] By-Product Coke Production 프로세스	7
[그림 2-3] Otto type 코크스 오븐 설비	8
[그림 2-4] 코크스 오븐 탄화실 & 연소실 병렬 배치 구조	9
[그림 2-5] 탄화실 Taper 형상	10
[그림 2-6] 코크스 오븐 연소실 구조	10
[그림 2-7] 탄화실 내 코크스의 생성 과정	11
[그림 2-8] 석탄의 열분해 유형	12
[그림 2-9] 코크스 냉간강도와 건류시간의 상관성	13
[그림 2-10] 코크스 열간강도와 건류조건의 상관성	14
[그림 3-1] Control volume 및 외부 열전달 방향	15
[그림 3-2] PDF Look-up Table 생성과정	22
[그림 3-3] Main boundary conditions	23
[그림 4-1] 코크스 오븐 연소실 벽면 모델링	25
[그림 4-2] 연소실 내부 유체에 대한 모델링	27
[그림 4-3] 연소실 내부 유체에 대한 격자 생성 결과	28

[그림 4-4] Skewness mesh metrics and spectrum	29
[그림 4-5] Orthogonal mesh metrics and spectrum	29
[그림 4-6] Named selections of boundary	30
[그림 5-1] PDF Look-up Table 생성결과	33
[그림 5-2] Pyrofill machine을 이용한 연소실 내 온도측정 ·	34
[그림 5-3] Cross-sections of combustion chamber	35
[그림 5-4] 일상조업 시, 연소실 내 온도분포도	35
[그림 5-5] 모델링 결과 검증을 위한 온도 프로파일 비교	36
[그림 6-1] 가동률 100% 시, 연소실 온도분포도	43
[그림 6-2] 가동률 110% 시, 연소실 온도분포도	44
[그림 6-3] 가동률 120% 시, 연소실 온도분포도	44
[그림 6-4] 가동률 130% 시, 연소실 온도분포도	45
[그림 6-5] 가동률 140% 시, 연소실 온도분포도	45
[그림 6-6] Upward flue 온도 프로파일 비교 (Case 1.)	47
[그림 6-7] 기준 대비 90% Air 시, 연소실 온도분포도	48
[그림 6-8] 기준 대비 95% Air 시, 연소실 온도분포도	48
[그림 6-9] 기준 Air 시, 연소실 온도분포도	49
[그림 6-10] 기준 대비 105% Air 시, 연소실 온도분포도	49
[그림 6-11] 기준 대비 110% Air 시, 연소실 온도분포도	50
[그림 6-12] Upward flue 온도 프로파일 비교 (Case 2.)	51
[그림 6-13] 연소실 온도분포도 (BFG/COG Ratio=17.8)	52

[그림 6-14] 연소실 온도분포도 (BFG/COG Ratio=15.8) …	52
[그림 6-15] 연소실 온도분포도 (기준 BFG/COG Ratio) ……	53
[그림 6-16] 연소실 온도분포도 (BFG/COG Ratio=11.8) …	53
[그림 6-17] 연소실 온도분포도 (BFG/COG Ratio=9.8) ……	54
[그림 6-18] Upward flue 온도 프로파일 비교 (Case 3.) …	55

제 1 장 서론

제 1 절 연구 배경

일관 제철 공정 프로세스는 연원료(철광석, 원료탄)를 이용하여 철강 제품을 생산하는 프로세스로, 원료탄을 이용해 만든 코크스로 철광석을 환원 및 용융시켜 쇳물을 만들고, 이를 제련 및 연속 주조 후 압연하여 철강제품을 만드는 공정이다. 일관 제철 공정 프로세스에는 여러 공정이 있지만, 크게 제선, 제강, 연주, 압연 공정으로 나눌 수 있다. [그림 1-1]



[그림 1-1] 일관 제철 공정 프로세스

이 중 제선 공정은 쇳물을 생산하는 기초공정으로서, 철광석을 소결 공장에서 사전 처리하여 만든 소결광과 원료탄인 유연탄(Coking Coal)을 코크스 오븐(Coke Oven)에서 건류(Carbonization)하여 만든 코크스(Coke)를 고로(Blast Furnace)에 장입한 후, 고온(약 1,200℃)의 열풍으로 코크스를 연소시켜 철광석을 환원, 용융해 쇳물(용선, Pig Iron)을 만드는 공정이다.

그 동안 제선 공정의 발달은 용선 생산성 향상과 용선 제조원가 절감을 목표로 진행되었고, 이를 동시에 달성하기 위한 수단으로 고로의 대형화를 추구하였다. 그 결과 고로의 내용적은 1970년대에 2,000m³ 수준에서 2010년대에는 6,000m³ 수준까지 증가하였다. [그림 1-2] 그 결과 대형 고로의 조업 안정화를 위해 코크스 품질의 중요성이 더욱 강조되고 있다.¹⁾



[그림 1-2] 세계 철강회사의 고로 대형화 추이

고로 내에서 코크스는 열풍에 의해 연소되면서 CO, CO₂를 발생시켜 철광석을 환원시키고, 연소열을 발생시켜 환원된 철광석을 용선으로 만드는 역할을 한다. 또한 고로 하부로부터 들어오는 열풍의 통로 역할도 수행하며, 고로에 장입된 장입물을 지탱(Burden support)하는 역할도 수행한다. [그림 1-3] 이처럼 코크스는 고로 내에서 일어나는 물리/화학적 반응을 핵심적으로 주도하기 때문에 코크스의 품질은 용선의 품질, 생산성, 제조단가 등에 큰 영향을 준다.²⁾

- 1) Haraguchi H, Nishi T, Miura Y, Ushikubo M & Noda T, "Some aspects of deterioration of coke in blast furnace" T Iron Steel I Japan 25(3), 1985, pp. 190~197.
- 2) M.A. Diez, R Alvarez, C Barriocanal, "Coal for metallurgical coke production: predictions of coke quality and future requirements for cokemaking", 2001.



[그림 1-3] 고로 내에서의 코크스의 역할

코크스 제조 공정에서는 제철소 내에서 발생하는 부생가스인 COG(Coke Oven Gas)와 BFG(Blast Furnace Gas)를 혼합한 Mixed Gas를 열원으로 사용하며, Mixed Gas는 코크스 오븐 연소실에서 연소된다. 이때 발생한 열은 인접한 탄화실로 간접 전달되어 유연탄을 건류시켜 코크스를 만들게 된다. 따라서 연소실의 온도분포는 인접 탄화실 온도분포에 직접적인 영향을 미친다. 또한 코크스 제조공정은 제철산업에서 가장 많은 에너지를 소모하는 공정 중의 하나이기 때문에 에너지 소비를 줄이고, 원하는 코크스 품질을 얻기 위해서는 코크스 오븐 연소실에 대한 정밀한 연소관리가 필요하다.³⁾⁴⁾

3) Kyong-Ho Yoon, Ki-Hong Kim, Yong-Kuk Lee, "Method of Estimation and Characteristics for Coke Heat Quantities of Coking Coal", HWAHAK KONGHAK Vol. 35, No. 4, August, 1997, pp. 585~589.

4) Kyong-Ho Yoon, Ki-Hong Kim, Yong-Kuk Lee, "Characteristics of Fuel Gas Distribution in combustion Chamber of Coke Oven", HWAHAK KONGHAK Vol. 38, No. 3, June, 2000, pp. 416~422.

제 2 절 연구 내용

1. 연구 목적

코크스 오븐 연소실(Combustion chamber) 내에서 일어나는 연소 프로세스의 전산모사를 통해 코크스의 최적 건류(乾溜, Carbonization)를 위한 연소조건을 도출하고자 한다. 내화벽돌로 축조된 코크스 오븐은 연소실 내부를 관찰하거나 내부 온도 프로파일을 측정하기가 매우 어려우며, 더구나 약 2,400여 개의 연소실을 개별로 측정하는 것은 매우 번거로운 일이다. 따라서 다양한 외부 연소조건 변화에 따른 연소모사를 사전에 실시해 향후 조업에 활용하고자 한다.

2. 연구의 필요성

코크스 오븐 탄화실(Coking Chamber)에 장입된 원료탄은 필연적으로 발생하는 원료탄 자중(自重)에 의한 다져짐(Compaction)과 연소실 상하온도 편차로 인해 코크스화 이후 상하부에서 품질 편차가 발생한다. 일반적으로 코크스의 품질편차는 최종 코크스 온도를 높이거나 치시간(Soaking Time)을 연장시켜 줄일 수 있으나, 최종 코크스 온도를 높이기 위해서는 연소실의 온도를 높이 관리해야 하며, 치시간을 연장시키면 총 건류시간이 증가하게 된다. 이 두 경우는 코크스 오븐의 소비열량을 증가시키거나 코크스 생산성을 떨어뜨리는 요인이다. 따라서 추가적인 에너지 투입 없이 연소실 내 온도 프로파일을 최적으로 관리하는 것은 코크스 품질과 생산성 향상 측면에서 매우 중요하다.

그러나 코크스 오븐은 연돌(Chimney stack)의 자연 통풍(Natural draft)을 통해 연소용 공기를 흡입하기 때문에, 외기 조건에 따라 유입되는 공기의 유량 변동이 커 정밀한 연소관리가 어렵다. 또한 연소실에 공

급되는 가스의 조성은 제철소 내 부생 가스 발생비율 변화에 따라 달라진다. 따라서 다양한 외부 연소조건 변화에 대응하는 연소모사를 사전에 수행해 이를 향후 조업에 활용할 필요가 있다.

3. 연구 결과물

코크스 오븐 연소실 내 연소반응을 컴퓨터를 통해 모사하기 위해, 코크스 오븐 연소실 중 1개 Flue chamber를 3-D Modeling 하였다. 또한 수치 해석을 위한 지배방정식을 도출하였고, 그 후 상용 전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics) Tool인 Ansys Fluent로 일상조업 시 연소실 내 온도분포를 시뮬레이션 하였다. 모델링의 정합성을 검증하기 위해 이를 실제 코크스 오븐 연소실 내 온도분포와 비교하였으며, 마지막으로 다양한 연소조건에 대응하는 연소실 내 온도분포를 시뮬레이션 하였다.

제 2 장 코크스 오븐 시스템

제 1 절 코크스 제조 공정

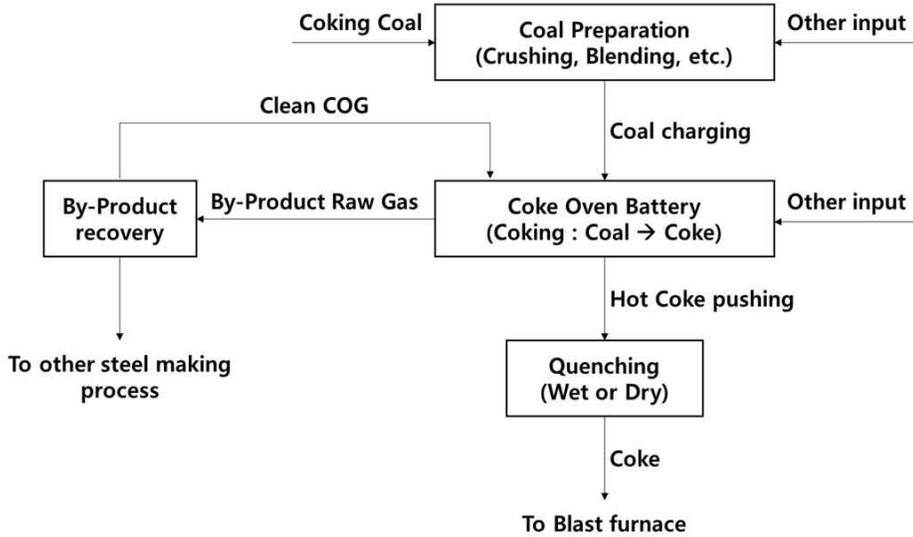
코크스(Coke)란 점결성을 지닌 유연탄을 산소를 차단한 상태에서 고온 건류한 다공질의 고체 연료이다. 코크스의 어원은 독일어 Koks에서 왔으며, 색상은 회색을 띠는 흑색이며 금속성의 광택을 지니고 있다. 코크스의 성분은 탄소가 80~94% 함유되어 있으며 그 외에도 6~18%의 회분과 0.5~2%의 휘발분을 가지고 있다. 코크스의 발열량은 약 6,000~7,500 kcal/kg이며, 착화온도는 약 400~600℃이다. [그림 2-1]



[그림 2-1] 코크스

코크스 제조 공정은 크게 원료탄 사전처리(Coal Preparation) 공정, 코크스 오븐(Coking and Pushing) 공정, 코크스 소화(Quenching) 공정, 그리고 화성(By-product recovery) 공정으로 나뉜다.⁵⁾ [그림 2-2]

5) Daniel C. Mussatti, Coke Ovens: *Industry Profile Draft Report*, 1998, pp. 2-1.

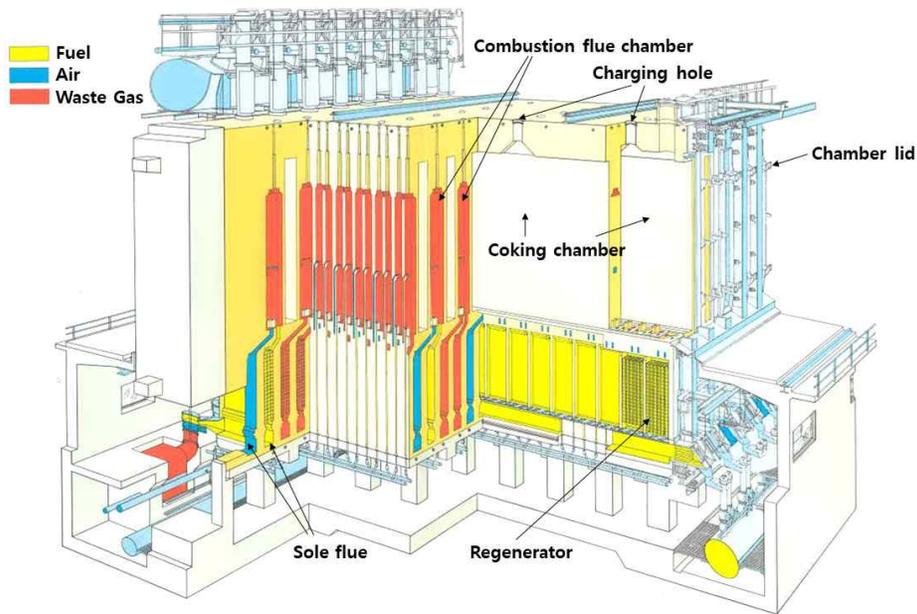


[그림 2-2] By-Product Coke Production 프로세스

원료탄 사전처리 공정은 해외에서 수입한 유연탄을 야드에 적치한 후 사용하고자 하는 원료탄 Brand를 불출하여 파쇄하고, 파쇄된 원료탄 Brand를 원하는 비율로 혼합하여 코크스 오븐 배터리에 장입하는 공정이다. 코크스 오븐 공정은 장입된 원료탄을 공기를 차단한 상태에서 18~24시간 정도 간접 가열하여 원료탄을 코크스로 건류시켜 압출하는 공정이며, 코크스 소화 공정은 압출된 고온(약 1,100℃)의 코크스를 습식 혹은 건식으로 소화하는 공정을 말한다. 마지막으로 화성공정은 코크스 건류 중 발생하는 가스를 정제하여 재사용하기 위한 공정으로 여기서 생산된 COG(Coke Oven Gas)나 타르, B.T.X(Benzene, Toluene, Xylene) 등은 제철소 내 열원으로 재사용 되거나 제철소 외부로 판매된다.

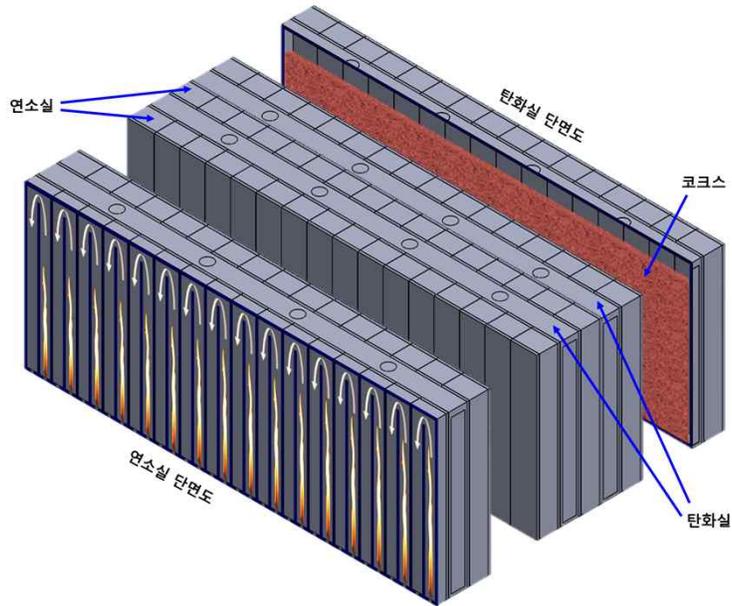
제 2 절 코크스 오븐 구조

[그림 2-3]은 대표적인 By-Product 코크스 오븐인 Otto type 코크스 오븐으로 한 쌍의 연소실과 가열벽을 가지고 있으며, 연소실 바닥에서 연소가 일어나는 Under Jet 방식을 택하고 있는 긴 역사를 가진 전통적인 오븐이다.



[그림 2-3] Otto type 코크스 오븐 설비

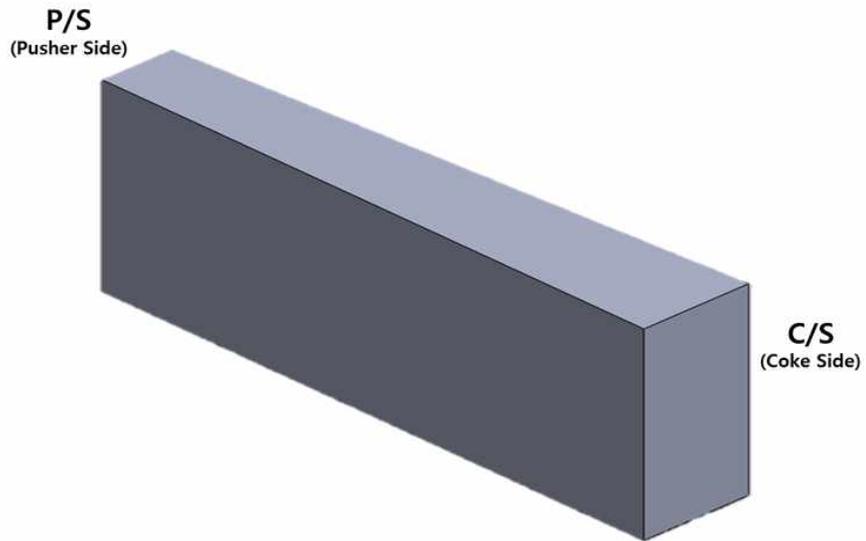
원료탄은 코크스 오븐 상부의 Charging hole(장입구)을 통해 Coking Chamber(탄화실)로 장입되며, 인접한 Combustion flue chamber(연소실)에서 일어나는 연소열에 의해 간접가열 되어 코크스화 된다. 건류가 완료된 코크스는 탄화실 양쪽 Chamber lid가 탈착된 후 압출된다. 코크스 오븐은 일반적으로 연소효율 향상을 위해 연소실(Combustion flue chamber)과 탄화실(Coking chamber)이 교대로 병렬 배치된 구조를 가진다. [그림 2-4]



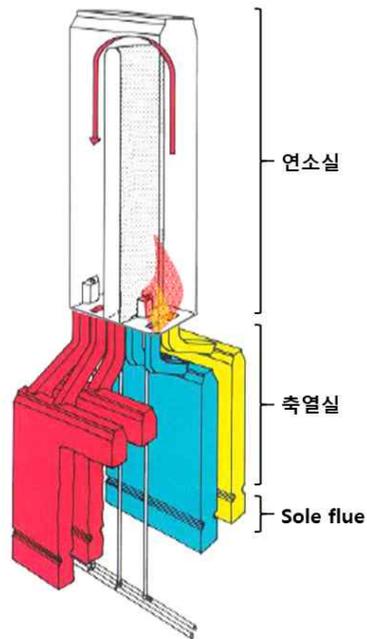
[그림 2-4] 코크스 오븐 탄화실 & 연소실 병렬 배치 구조

탄화실은 P/S(Pusher Side)와 C/S(Coke Side)의 폭이 다르며, 코크스가 압출되어 나오는 C/S는 P/S보다 더 넓게 설계되어 있어 압출이 용이하다. [그림 2-5] 이로 인해 탄화실 내에 장입된 석탄의 양은 P/S에서 C/S로 갈수록 많아진다. 따라서 장입된 석탄의 건류에 필요한 열량을 동일하게 공급하기 위해서는, 인접한 연소실의 Flue별 온도 역시 이를 고려해 P/S에서 C/S로 갈수록 더 높게 관리해야만 한다.

연소실은 32개의 Heating flue로 구성되어 있으며, 2개의 Heating Flue는 하나의 Unit으로 작용한다. 연소실 하부에는 연소용 Gas와 Air가 들어오는 Gas Pot과 Air Pot이 있으며, 이 Gas와 Air는 연소효율 향상을 위해 연소실 하부의 축열실(Regenerator)에 의해 가열되어 연소실로 공급된다. 축열실은 연소실로 들어가는 Air와 Gas가 연소실로부터 나오는 폐가스(Waste Gas)와 간접적으로 열교환을 하는 장소이다. 축열실 하부에는 Air와 Gas가 외부에서 코크스 오븐으로 들어가는 첫 통로인 Sole Flue가 있다. [그림 2-6]



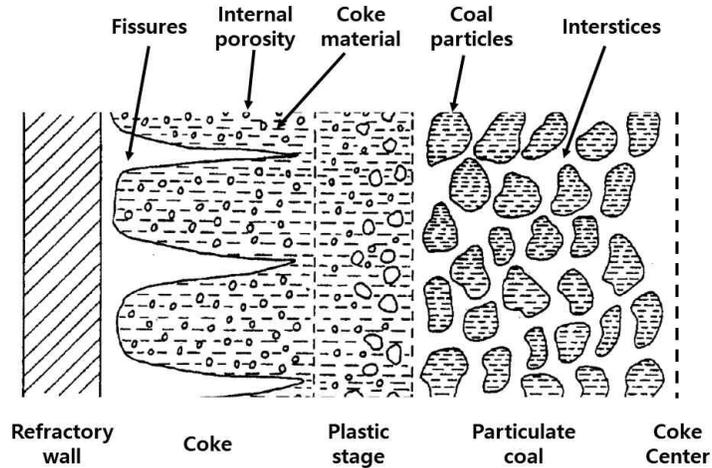
[그림 2-5] 탄화실 Taper 형상



[그림 2-6] 코크스 오븐 연소실 구조

제 3 절 석탄의 건류

탄화실에 장입된 석탄은 연소실로부터 전달된 열에 의해 가열이 시작되며, 100℃에 이르러 수분이 증발하기 시작한다. 수분 증발이 모두 끝난 석탄은 내부의 휘발물질을 서서히 방출하기 시작하며, 350℃에 이르러서는 연화(Softening) 되기 시작된다. 그 후 400~500℃ 영역에서는 그 정도가 더 심해져 용융층(Plastic layer)을 생성하며, 이곳에서 휘발성 가스, 타르의 열분해가 일어나게 된다. 계속되는 가열에 의해서 석탄이 약 550℃에 도달하게 되면 용융층은 재고화(Re-solidification)되어 반성 코크스(Semi-coke)가 된다. 550~600℃에서는 주로 수소와 일산화탄소의 방출이 일어난다. 그 후 계속되는 가열로 인해 수축이 발생하여, 코크스 내부에 균열이 발생하고, 중심부 온도가 950℃에 도달하면 코크스의 건류가 다 끝났다고 판단한다.⁶⁾ [그림 2-7]



[그림 2-7] 탄화실 내 코크스의 생성 과정

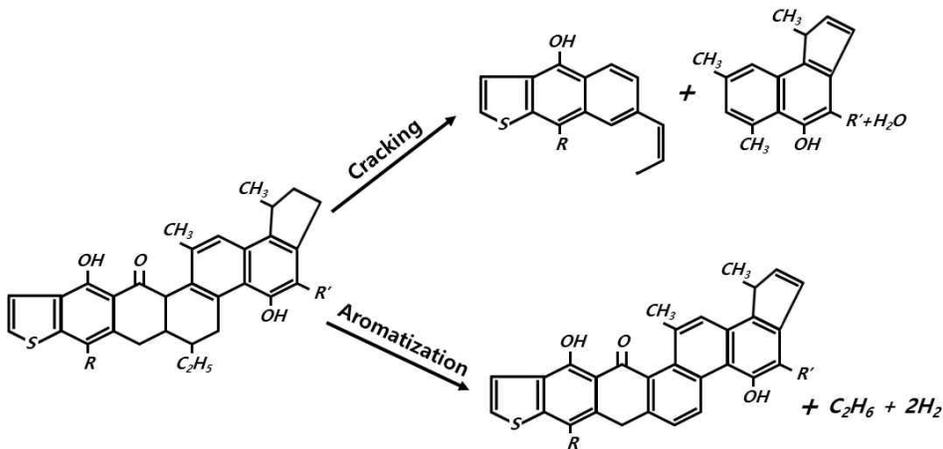
6) Young-ha Bae, "A study on Heat Transfer for Various Coal Properties in Coking Process", 2000

코크스의 건류가 진행될 때, 온도의 상승에 의한 석탄 내 휘발물질의 열분해가 일어나며, 이는 크게 두 가지 반응으로 나눌 수 있다. 하나는 탄소-탄소 결합의 균열을 의미하는 Cracking reaction이며, 다른 하나는 이와는 반대로 보다 큰 방향족 그룹을 형성하는 방향족화 및 응축반응이 있다.⁷⁾ [그림 2-8]

Cracking은 C-C 결합이 붕괴되는 반응으로 액체탄화수소의 경우와 유사하다. C-C 결합의 붕괴로 발생한 Radical을 포화시키기 위해 수소가 필요하며, 이는 두 번째 형태의 반응에 의해 공급된다.

방향족화 및 응축은 포화고리의 탈수소화(방향족화)와 방향족 그룹간의 C-C 결합에 의해서 더 많은 종류의 방향족화합물이 생성된다. 이 반응으로 수소를 방출하고 생성된 중간체인 액체탄소 또는 석탄으로부터 고체탄소를 생성할 수 있게 된다.

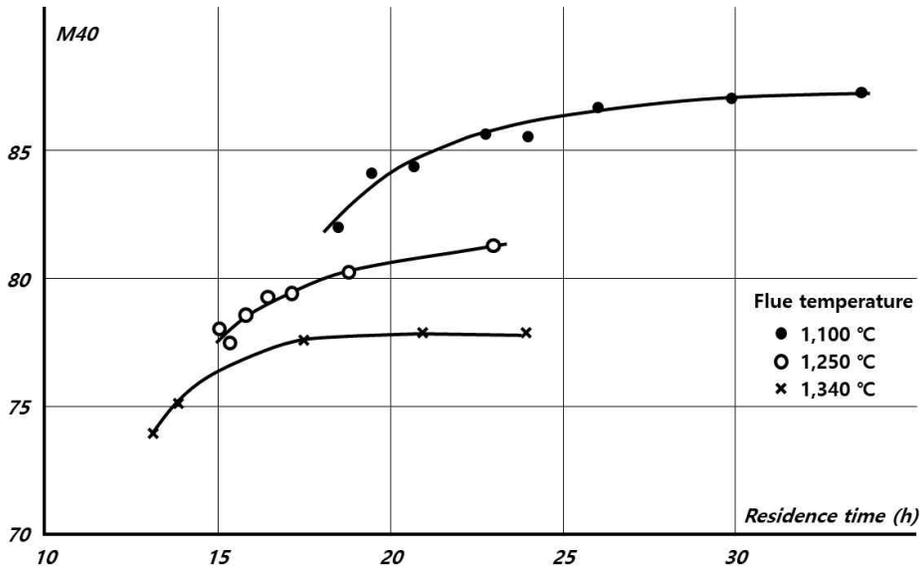
다시 말해, Cracking은 주로 타르를 생성하고, 방향족화 및 응축은 이 타르를 고체 잔존물로 바꾸어 준다. 두 반응의 평형은 산소와 탄소에 결합할 수 있는 수소량에 달려있다.



[그림 2-8] 석탄의 열분해 유형

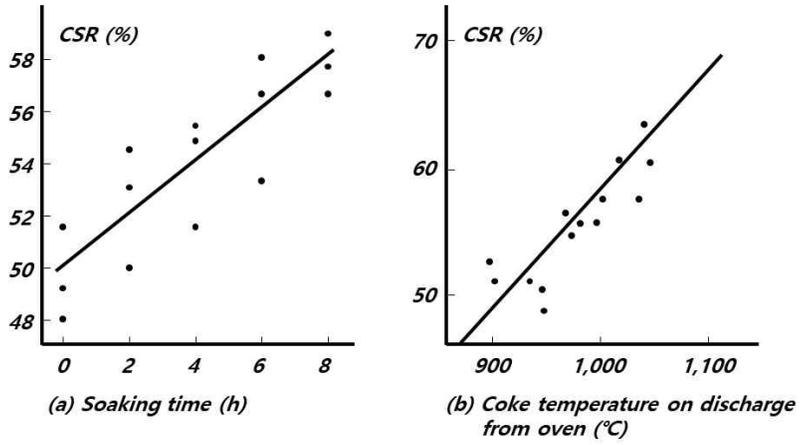
7) R. Loison, P. Foch, A. Boyer, *Coke: Quality and Production*, Butter worths, 1989, pp. 62~63.

일반적으로 최종 코크스의 온도를 올리거나 총 건류시간(Residence time)을 길게 하면 코크스의 품질(기계적 강도 및 화학적 강도)이 향상된다. [그림 2-9, 그림 2-10] 그 중 총 건류시간을 늘리는 것을 Soaking이라고 하며, 코크스 건류에 필요한 시간보다 연장된 건류시간을 치시간(Soaking time)이라고 한다. 따라서 코크스 품질을 향상시키고 코크스의 품질편차를 줄이기 위해 Soaking time을 약간(1~2시간)의 시간을 연장할 수는 있겠지만, 이 시간을 무작정 늘리는 것은 코크스 생산비용과 생산성 측면에서 큰 손해로 작용한다.⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾



[그림 2-9] 코크스 냉간강도와 건류시간의 상관성

- 8) Kyong-Ho Yoon, Ki-Hong Kim, Yong-Kuk Lee, "The Effect of End Temperature on Coke Qualities", HWAHAK KONGHAK Vol. 35, No. 6, December, 2000, pp. 889~892.
- 9) R. Loison, P. Foch, A. Boyer, *Coke: Quality and Production*, Butter worths, 1989, pp. 169~170.
- 10) R. Loison, P. Foch, A. Boyer, *Coke: Quality and Production*, Butter worths, 1989, pp. 337~338.



[그림 2-10] 코크스 열간강도와 건류조건의 상관성

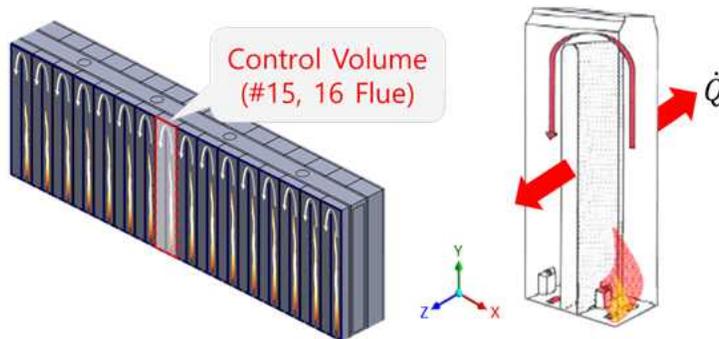
(a) 치시간, (b) 압출 시 코크스 중심부 온도

제 3 장 연소실 연소반응의 수학적 모델링

제 1 절 기본 가정

이 연구에서는 Otto type 코크스 오븐의 1개 연소실(Combustion Chamber)을 대상으로 모델링을 실시하였다. 코크스 오븐 연소실의 폭은 P/S(Pusher Side)에서 C/S(Coke Side)로 갈수록 넓어지며 이에 따라 연소실의 온도 역시 P/S에서 C/S로 갈수록 높게 관리되나, 모델링을 위해 전체를 대표할 수 있는 연소실인 #15, 16 Flue를 모델링 대상으로 선정하였다. 이 연소실은 코크스 오븐 열간온도(Cross-wall temperature) 관리를 위해 온도를 측정하는 연소실이다. [그림 3-1]

연소실에서 인접 연소실(YZ 평면) 및 상하부(XZ평면)로의 열전달은 없으며, 인접 탄화실(XY평면)로만 열전달이 발생한다고 가정하였다. 인접 탄화실로의 열전달은 건류 초기에 최대 $14,000\text{W/m}^2$ 에서 건류말기에 최소 $2,000\text{W/m}^2$ 로 시간에 따라 다르나, 모델링의 편의를 위해서 평균 열전달인 $6,000\text{W/m}^2$ 이 인접 탄화실로 전달된다고 가정하였다.¹¹⁾ [그림 3-1]



[그림 3-1] Control volume 및 외부 열전달 방향

11) Selkow, A.K., *Guidebook for Coke Oven Engineers (in Russian)*, Metallurgia, Moscow, 1966.

코크스 오븐 연소실의 고온 분위기와 축열실 형상의 복잡함으로 인해 코크스 오븐 연소실로 유입되는 연소용 가스와 공기의 양을 정확히 측정하기는 매우 어려워, 코크스 오븐 전체에 공급되는 연소용 가스와 공기의 유량을 이용해 이를 1개 연소실로 유입되는 질량 유량으로 환산하여 사용하였다.

제 2 절 지배방정식

코크스 오븐 연소실에서 일어나는 연소반응은 비예혼합 연소반응(Non-premixed combustion)으로 연료와 산화제가 별도의 흐름으로 반응영역에 유입되어 연소가 일어난다. 이는 연소 전, 연료와 산화제가 분자수준에서 혼합되는 예혼합 연소(Premixed combustion)와는 대조적이다. 비예혼합 연소의 예로, 고로 내 미분탄 취입, 디젤 내연기관 등이 있다.

많은 연구자들이 비예혼합 연소를 PDF(Probability Density Function) 모델을 적용해 연구해왔다.¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾ 이는 3차원 해석이 많은 자원을 필요로 하기 때문에, PDF 모델은 특정한 가정 하에서 비예혼합 연소반응을 하나의 파라미터인 혼합물의 분율 형태로 간략히 표시해 줄 수 있다. 이 연구는 PDF 모델을 활용해 연소반응을 모사하였다.

혼합물의 분율은 연료로부터 기인한 질량 분율이다. 다시 말해, 모든 화학종에서 연소가 되었거나 연소가 되지 않은 연료 성분의 국부적인 질량분율이라 할 수 있다. 혼합물의 분율은 스칼라양이며, 따라서 수송 방정식은 소스항을 가지지 않아, 연소반응을 혼합물의 혼합 문제로 단순화할 수 있고 비선형 평균 반응율과 관련된 어려움을 회피할 수 있다.¹⁵⁾

따라서 코크스 오븐 연소실 내 비예혼합 연소반응을 연료와 공기로부터 기인한 혼합물의 유동으로 해석해 연소실 내 유체의 혼합 분율을 구하고, 미리 유도한 열화학 계산을 위한 테이블(PDF Look-up Table)에서 온도를 참조해 연소반응을 모사할 수 있다.

12) Ishii, T., Zhang, C. and Sugiyama, S., "Numerical Simulations of Highly Preheated Air combustion in an Industrial Furnace," Transactions of the ASME, Vol. 120., 1998.

13) Liu, F., Guo, H., Smallwood, Gulder, G.J., O.L. and Matovic, M.D., "A Robust and Accurate Algorithm of the β -pdf Integration and Its Application to Turbulent Methane-air Diffusion Combustion in a Gas Turbine Combustor Simulator," International Journal of Thermal Science, Vol. 41, 2002, pp.763~772.

14) Jiang, Lei-Yong and Campbell, Ian, "A Critical Evaluation of NOx Modeling in a ModelCombustor," Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 127 2005.

15) ANSYS FLUENT Theory Guide ANSYS, Inc. Release 14.0, November 2011, pp. 225.

연소실 내 유체의 유동을 해석하기 위해 Continuity conservation equation, Momentum conservation equation 그리고 Energy conservation equation을 사용하였다. 난류모델은 Realizable k-ε model을 적용하였다. 연소실 내 온도는 고온이므로 복사효과를 고려해 P-1 모델을 적용하였다.

Continuity conservation equation은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (3.1)$$

여기서 S_m 은 질량에 대한 소스항이다.

Momentum conservation equation은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3.2)$$

여기서 $\rho \vec{g}$ 와 \vec{F} 는 중력과 외력이다. 응력텐서는 $\vec{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right]$ 로 정의되고, μ 는 분자 점도이며, I 는 유닛 텐서이다.

비예혼합 연소반응에서의 Energy conservation equation은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot \left(\frac{k_t}{c_p} \nabla H \right) + S_h \quad (3.3)$$

여기서 총 엔탈피는 $H = \sum_j Y_j H_j$ 로 정의되며, Y_j 는 화학종 j 의 질량분

을이며, 화학종 j 에 대한 엔탈피는 $H_j = \int_{T_{ref,j}}^T c_{p,j} dT + h_j^0(T_{ref,j})$ 로 정의된다. $h_j^0(T_{ref,j})$ 는 화학종 j 의 생성 엔탈피이며, S_h 는 기타 열원으로부터 생성되는 소스항이다.

Realizable $k-\epsilon$ 모델에서 Turbulence kinetic energy k 와 Rate of dissipation ϵ 는 다음 두 식을 이용해서 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \\ & + \rho C_1 S \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b \end{aligned} \quad (3.5)$$

여기서, $C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right]$, $\eta = S \frac{k}{\epsilon}$, $S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$ 이다. G_k 는 평균 속도 구배로 인한 난류 운동 에너지의 생성을 나타내며, G_b 는 부력으로 인한 난류 운동 에너지의 생성을 나타낸다. Y_M 은 전체 소산율에 대한 압축성 난류의 변동 팽창의 기여도를 의미하고, C_2 와 $C_{1\epsilon}$ 은 상수이다. σ_k 와 σ_ϵ 는 k 와 ϵ 에 대한 난류 Prandtl number이다.

복사에너지 계산을 위한 P-1 Model은 다음과 같다.

$$-\nabla \cdot q_r = aG - 4an^2 \sigma T^4 \quad (3.6)$$

여기서 q_r 은 복사 플럭스이고 a 는 흡수계수이다. G 는 입사복사를 나타내며, a 는 매질의 굴절률을 의미한다. σ 는 Stefan-Boltzmann 상수이다.

비에혼합 연소모델은 균등 확산의 가정 하에 유체의 열화학적 상태가

혼합분율 f 로 알려진 보존 스칼라량과 연관이 있다. 혼합 분율은 원자 질량 분율의 항으로 쓰일 수 있다.

$$f = \frac{Z_i - Z_{i,ox}}{Z_{i,fuel} - Z_{i,ox}} \quad (3.7)$$

Z_i 는 요소 i 의 질량분율이며, ox 는 산화제 유입구에서의 값을, $fuel$ 은 연료 유입구에서의 값을 의미한다. 혼합물 요소들이 균등 확산을 한다는 가정 하에 화학종 방정식은 혼합 분율에 대한 단일 방정식으로 단순화시킬 수 있으며, 이 방정식에서 소스항은 없어진다. 균등 확산성의 가정은 층류에서는 문제가 있지만, 난류의 경우 난류가 분자 확산을 압도하기 때문에 균등 확산의 가정은 일반적으로 받아들여진다. 혼합 분율(f) 및 분산($\overline{f'^2}$) 대한 보존 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{f}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \bar{f}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \bar{f} \right) + S_m \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{f'^2}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \overline{f'^2}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \overline{f'^2} \right) + C_g \mu_t (\nabla \bar{f})^2 - C_d \rho \frac{\epsilon}{k} \overline{f'^2} \quad (3.9)$$

여기서 $f' = f - \bar{f}$ 이다.

화학 평형의 가정 하에서 모든 열화학적 스칼라(화학종 분율, 밀도, 온도)는 혼합 분율과 관련되며, 비단열 시스템에서 이 스칼라량은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$\phi_i = \phi_i(f, H) \quad (3.10)$$

여기서 H 는 엔탈피로 열손실 또는 열 획득에 해당하는 파라미터이다.

그러나 이 연구에서 다룰 연소 시스템은 화학 평형에 있지 않아, Ansys Fluent에서 제공하는 RFL(Rich Flammability Limit) Option을 사용해 화학적 비평형을 모델링하였다. RFL 모델은 혼합되었지만 연소되지 않은 연료 혼합물과 희박한 평형 연소 혼합물로 모델링된다. 식 (3.10)는 화학 평형 가정 하에 혼합 분율과 화학종 분율, 밀도 및 온도 사이의 순간적인 관계를 설명하고 있지만, Ansys Fluent는 난류 유동에서 변동하는 스칼라의 평균값 예측과 관련이 있다. 이 평균값과 순간적인 값의 차이를 줄이기 위해서 Ansys Fluent의 확률밀도함수(PDF) 접근법을 사용하였다. 난류에서 f 의 시간적 변동을 설명하는 확률밀도함수 $p(f)$ 는 비단열 시스템에서 다음과 같으며,

$$p(f, H) = p(f)\delta(H - \bar{H}) \quad (3.11)$$

평균 스칼라는

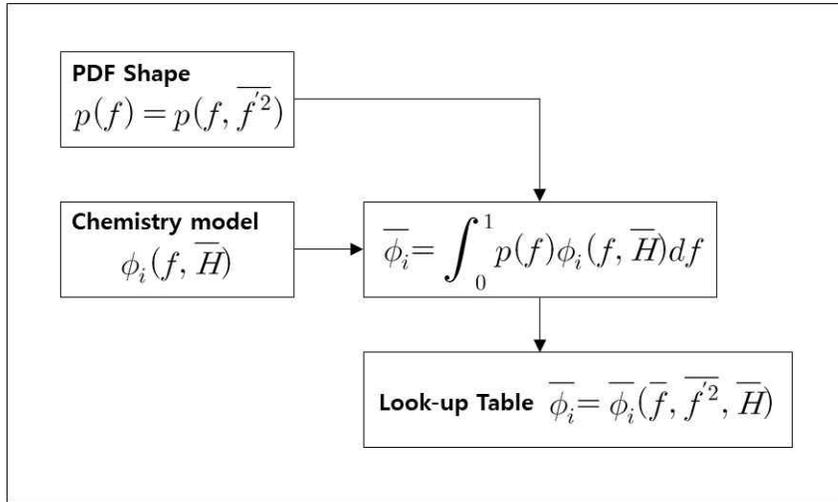
$$\bar{\phi}_i = \int_0^1 \phi_i(f, \bar{H})p(f)df \quad (3.12)$$

$\bar{\phi}_i$ 는 다음 평균 엔탈피 방정식을 통해서 구할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\bar{H}) + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\bar{H}) = \nabla \cdot \left(\frac{k_t}{c_p} \nabla \bar{H} \right) + S_h \quad (3.13)$$

S_h 는 복사나 벽으로의 열전달 등으로 인한 소스항을 의미한다.

이래의 [그림 3-2]는 비단열 비예혼합연소를 확률밀도함수와 혼합분율 모델을 이용해 열화학 계산을 위한 PDF Table을 만드는 과정을 요약한 것이다.

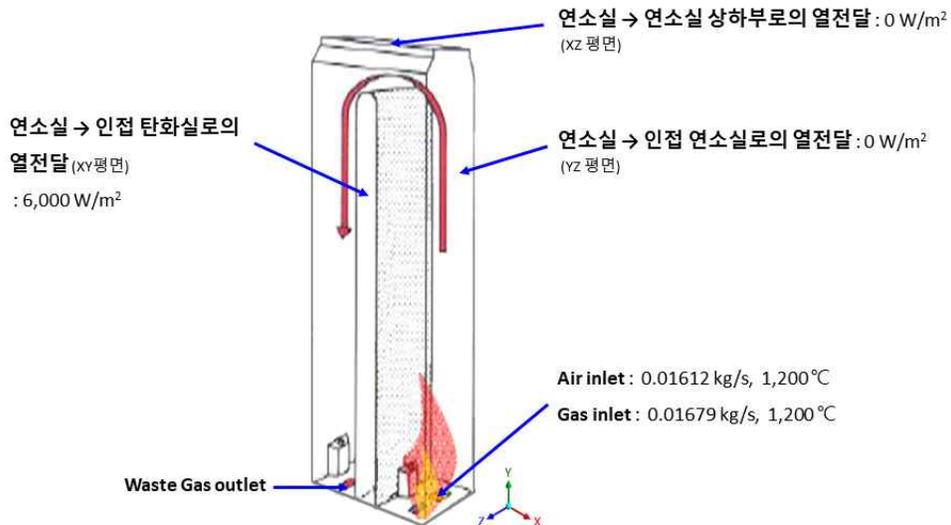


[그림 3-2] PDF Look-up Table 생성과정

제 3 절 경계 조건

위에서 언급한 수학적 모델의 해를 구하기 위한 경계 조건은 [그림 3-3]에 나타나 있다. 경계 조건은 다음과 같이 정의하였다. 먼저 가스 및 공기의 유입구에서는 가스와 공기의 질량 유량과 온도를 경계 조건으로 사용하였고, 배기가스의 배출구는 유출(Outflow)조건을 사용하였다. 코크스가 건류되고 있는 탄화실에 인접해 있는 벽의 경우 일정한 열유속이 인접 탄화실로 유출되는 조건을 사용하였고, 그 외의 벽은 단열로 가정하였다.

[표 3-1]에는 코크스 오븐 연소실에서 열원으로 사용되는 Mixed Gas의 조성이 나와 있다. 일상적인 조업 상황(Standard operation)에서 COG와 BFG의 부피 기준 혼합비율(COG/BFG Ratio)은 13.8 수준이지만, 제철소 내 부생가스 발생 비율 변경 및 외기 조건에 따라 혼합비율을 달리 사용할 수도 있다.



[그림 3-3] Main boundary conditions

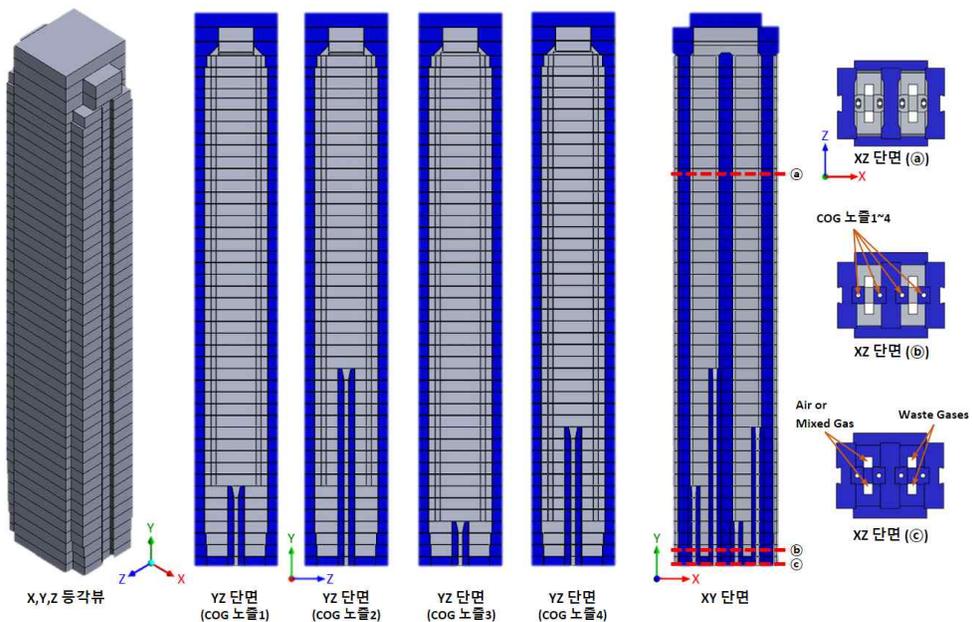
Compound	Mole Fraction	
	Mixed Gas	Air
H ₂	0.0641	–
O ₂	0.0050	0.2191
N ₂	0.4825	0.7809
CO	0.2229	–
CO ₂	0.2072	–
CH ₄	0.0162	–
C ₂ H ₂	0.0001	–
C ₂ H ₄	0.0016	–
C ₂ H ₆	0.0002	–
C ₃ H ₆	0.0001	–
C ₃ H ₈	0.0001	–
Sum	1.0000	1.0000

[表 2-1] Chemical composition of the fuel and Air

제 4 장 기하학적 모델링

제 1 절 연소실 3-D Modeling

앞서 언급한 대로 1개의 연소실에 대한 기하학적 모델링을 수행하였다. 코크스 오븐 연소실은 Upward flue와 Downward flue의 2개 Flue로 구성되어 있으며, 이중 Upward flue의 하부에서 연소용 가스와 공기가 유입된다. 유입된 가스와 공기는 연소실 내 분위기 온도에 의해 연소된다. 연소로 생성된 배기가스(Waste gas)는 연소실 상부에서 Downward flue로 넘어가며, 이 가스는 Downward flue 하부로 유출된다. 일정 시간 경과 후, 두 Flue의 역할은 바뀌며, 이 때 Inlet으로 작용하던 노즐은 Outlet 노즐이 되며, 반대로 Outlet으로 작용하던 노즐은 각각 연소용 가스와 공기가 들어오는 Inlet 노즐로 바뀌게 된다.



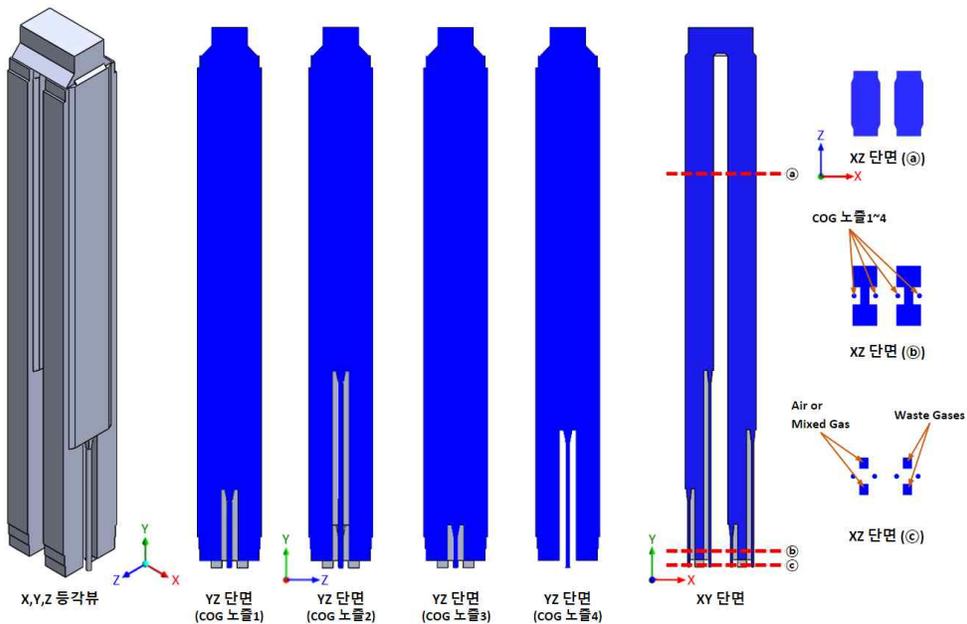
[그림 4-1] 코크스 오븐 연소실 벽면 모델링

연소실 하부에는 총 8개의 노즐이 있는데, Mixed Gas 연소 시 사용하는 Air or Mixed gas Inlet 각 1개, Waste gas outlet 2개, 그리고 COG 전소 시 사용하는 COG 노즐 4개가 있다.

[그림 4-1]은 코크스 오븐 연소실 벽면에 대한 3D 모델링 결과이다.

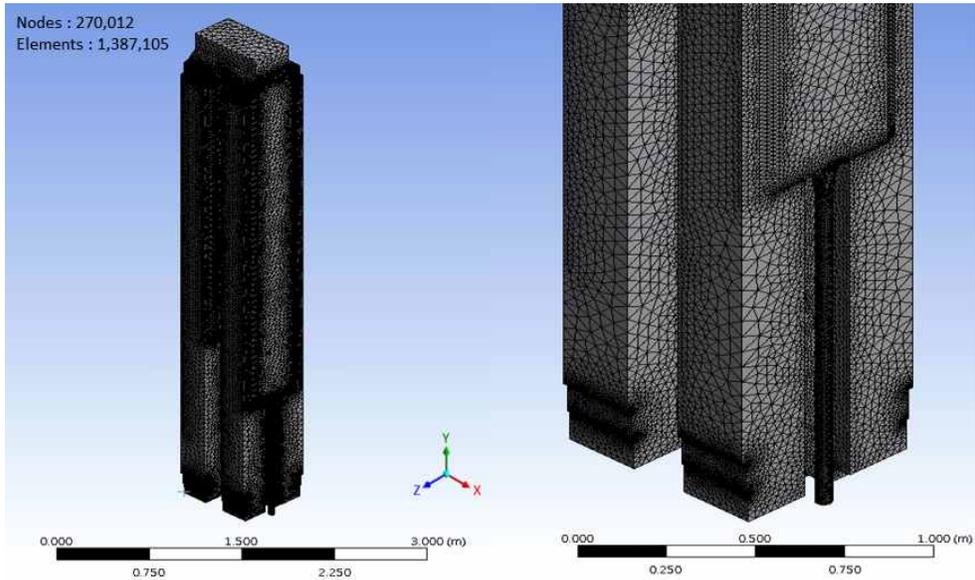
제 2 절 격자 생성 결과

Ansys Fluent를 이용해 연소반응을 모사하기 위해, 연소실 내부 유체에 대한 격자를 생성하였다. [그림 4-2]는 격자 생성에 앞서 연소실 내부 유체를 3D 모델링한 결과이다. 이 3D 모델링을 토대로 Fluent를 이용해 격자를 생성하였다.



[그림 4-2] 연소실 내부 유체에 대한 모델링

생성된 격자는 [그림 4-3]에 나타나 있다. 총 Nodes는 270,012개이며, Elements 수는 1,387,105개 이다. 생성된 격자는 결과 값 수렴과 해석 결과에 큰 영향을 미치므로, Maximum Skewness 수치와 Minimum Orthogonal quality 수치를 사용해 격자 품질을 평가하였다. [그림 4-4, 그림 4-5]

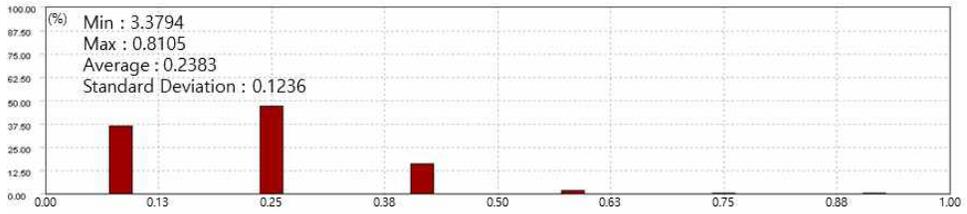


[그림 4-3] 연소실 내부 유체에 대한 격자 생성 결과

일반적으로 Maximum Skewness 수치는 0.94 이하, Minimum Orthogonal quality 수치는 0.15 이상이면 격자 품질이 확보되었다고 판단한다. [그림 4-4]를 보면 Maximum Skewness 수치는 0.8105로 Acceptable 영역에 속한다. 또한 [그림 4-5]를 보면 Minimum Orthogonal quality 수치는 0.2321로 Good 영역에 속한다. 따라서 이 평가결과를 통해 본 모델링의 격자품질이 확보가 되었다고 판단할 수 있다.

경계조건을 부여하기 위해서 경계별로 이름을 설정하였다. [그림 4-6] Air & Gas Nozzle No.1~4는 연소용 가스와 공기의 Inlet으로 작용하거나 Waste Gas의 Outlet으로 작용하게 된다. Wall neighboring cooking chamber는 인접 탄화실로 일정한 열유속이 유출되는 벽으로 작용한다. 그 외 경계는 단열로 가정하였다.

[Skewness mesh metrics]

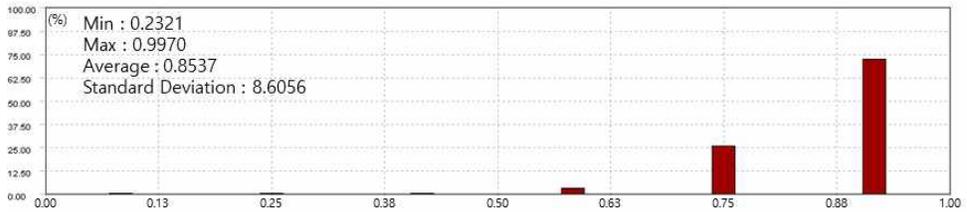


[Skewness mesh metrics spectrum]



[그림 4-4] Skewness mesh metrics and spectrum

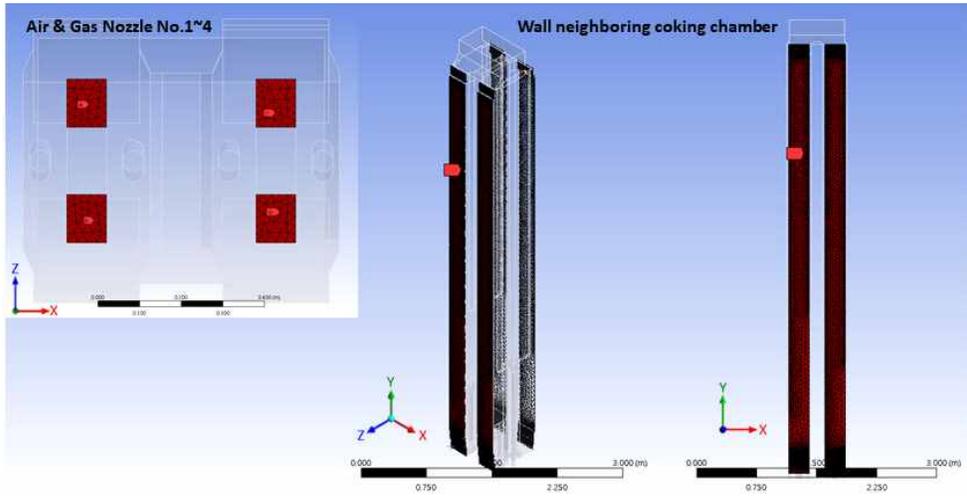
[Orthogonal mesh metrics]



[Orthogonal Quality mesh metrics spectrum]



[그림 4-5] Orthogonal mesh metrics and spectrum



[그림 4-6] Named selections of boundary

제 5 장 일상 조업에 대한 CFD 모델링

제 1 절 Setup of the model

전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)이란 컴퓨터를 이용해, 수학적 지배방정식을 풀어서 여러 가지 유체현상을 해석해주는 수치해석 기법이다. 유체의 유동을 해석하기 위한 Navier-Stokes 방정식은 오래된 방정식이지만, 이를 직접 풀 수 있는 경우는 매우 한정적이다. 따라서 이를 직접 해석적으로 푸는 것은 거의 불가능하다. 이를 해결하기 위해 비선형의 Navier-Stokes 방정식을 선형으로 가정하였고 대상을 단순화 하여 실험을 통해 유동해석을 하였다. 그러나 컴퓨터 성능의 비약적인 발전으로 여러 공학 분야에서 컴퓨터가 널리 쓰이기 시작하였고, CFD 역시 이러한 배경에서 등장하였다.

Ansys CFD는 현재 산업체에서 가장 넓게 쓰이고 있는 범용 열유체 해석 소프트웨어로 유한 체적법을 기초로 한다. 유한한 체적(Control volume)을 차분하여 생성된 격자에서 질량, 운동량, 에너지, 화학 종 등에 대한 수학적 지배방정식을 해석해 준다. 이 연구는 Ansys CFD에서 제공하는 Fluent 14.0을 사용하여 코크스 오븐 연소실의 연소반응을 모사하였다. Fluent를 사용하기 위한 설정사항은 다음과 같다.

먼저 General solver setup type은 Pressure-based, Steady state로 설정하였다. Viscous model은 k-epsilon Realizable model을 선택하였으며, Species Model은 Non-Premixed Combustion을 설정하였다. 연소실 내 온도가 높기 때문에 Radiation을 고려하였고 P-1 모델을 선택하였다.

다양한 Case에 대한 연소반응을 시뮬레이션하기에 앞서, 모델링의 정확성을 검증하기 위해서 일상조업에 대한 연소 모사를 먼저 진행하였다. 연소 모사에 사용한 Material은 [표 3-1]의 Mixed Gas와 Air를 사용

하였다. 아래의 [표 5-1]은 일상조업에 대한 연소 모사를 수행하기 위한 Named Selection 별 Boundary condition을 보여준다.

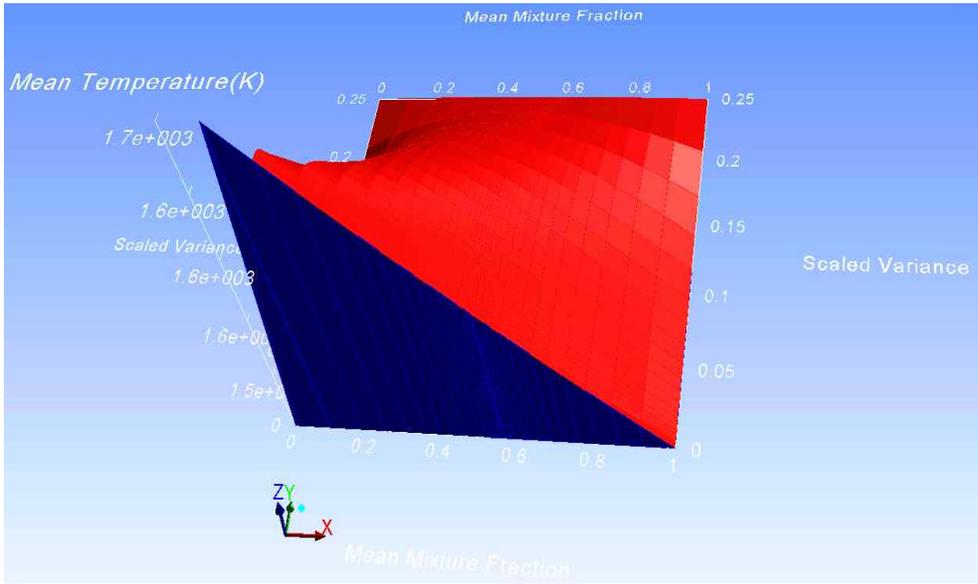
Air와 Gas Inlet은 Mass flow inlet으로 설정하였고, 방향은 Normal to the boundary로 선택하였다. 모든 Inlet과 Outlet에서 Turbulence Specification Method는 Intensity and Hydraulic Diameter를 선택하였고, Turbulence Intensity는 Medium-turbulence case의 일반적인 수준인 1~5% 중 5%로 가정하였다.

Named Selections	Boundary Condition	Properties
Air & Gas Nozzle No.1	Air Inlet / Mass Flow Inlet	0.01612 kg/s, 1,200 ℃
Air & Gas Nozzle No.2	Gas Inlet / Mass Flow Inlet	0.01679 kg/s, 1,200 ℃
Air & Gas Nozzle No.3	Waste Gas Outlet / Outflow	-
Air & Gas Nozzle No.4	Waste Gas Outlet / Outflow	-
Wall neighboring coking chamber	Wall / Heat Flux	- 6,000 W/m ² 16)

[표 5-1] Boundary conditions (Standard operation)

[그림 5-1]은 Inlet 물질의 경계조건을 이용하여 만든, 열화학 계산을 위한 PDF Look-up Table 생성결과이다.

16) 음의 Heat Flux는 System 외부로의 열전달을 의미한다.



[그림 5-1] PDF Look-up Table 생성결과

제 2 절 모델링 결과 및 검증

실제 코크스 오븐의 연소관리는 Pyrometer로 측정된 연소실 바닥 온도와 연소실 상부에 위치한 Thermocouple로 측정된 연소실 상부 온도, 이 두 가지를 이용해서 이루어진다. 이 두 지점을 제외한 곳의 온도를 측정하기 위해서는 특수한 장비가 필요하며[그림 5-2], 이를 이용해서 측정하는 작업은 매우 번거로워 일상 조업 관리를 위해서는 사용되지 않는다.

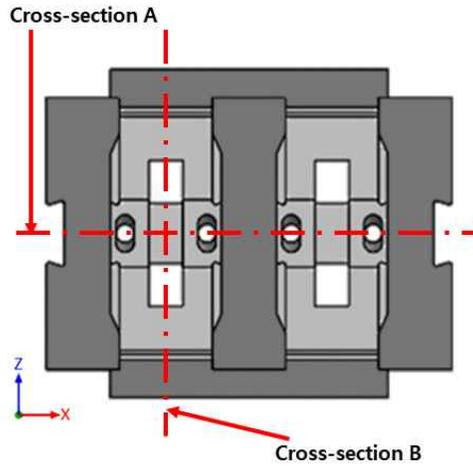


[그림 5-2] Pyrofill machine을 이용한 연소실 내 온도측정

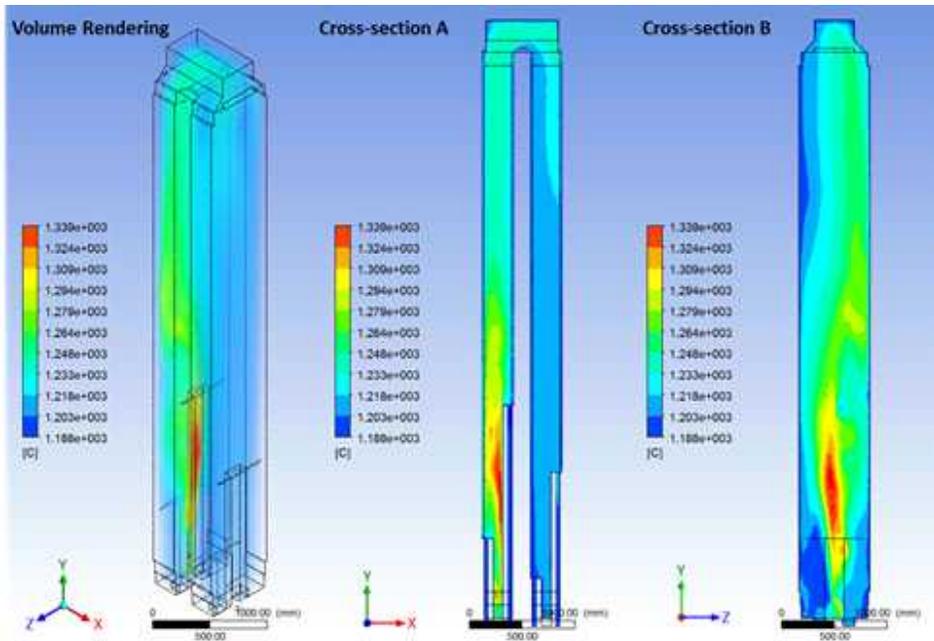
이 연구는 이러한 이유로 시작되었고, 따라서 시뮬레이션을 통해서 확인하고자 하는 것은 첫째는 연소실 내 유체의 온도 분포를 3차원적으로 확인하는 것이며, 둘째는 Upward flue에서 수직 높이 변화에 따른 유체의 온도 프로파일을 확인하는 것이다. 그 후 연소조건을 다양하게 변화시키면서 그에 대응하는 위의 2가지 자료를 확보하는 것이다.

모델링의 정합성은 Pyrofill machine을 이용해 실측한 온도 프로파일과 모델링을 통해 얻어진 온도 프로파일을 비교하여 검증하였다. 연소실 내부의 온도분포도는 [그림 5-3]의 Cross-section A와 B를 기준으로 도시하였다. Cross-section A를 통해 Upward flue와 Downward flue

의 온도분포 차이를 비교하였고, Cross-section B를 통해 Upward flame 내부의 화염의 모양을 비교하였다.

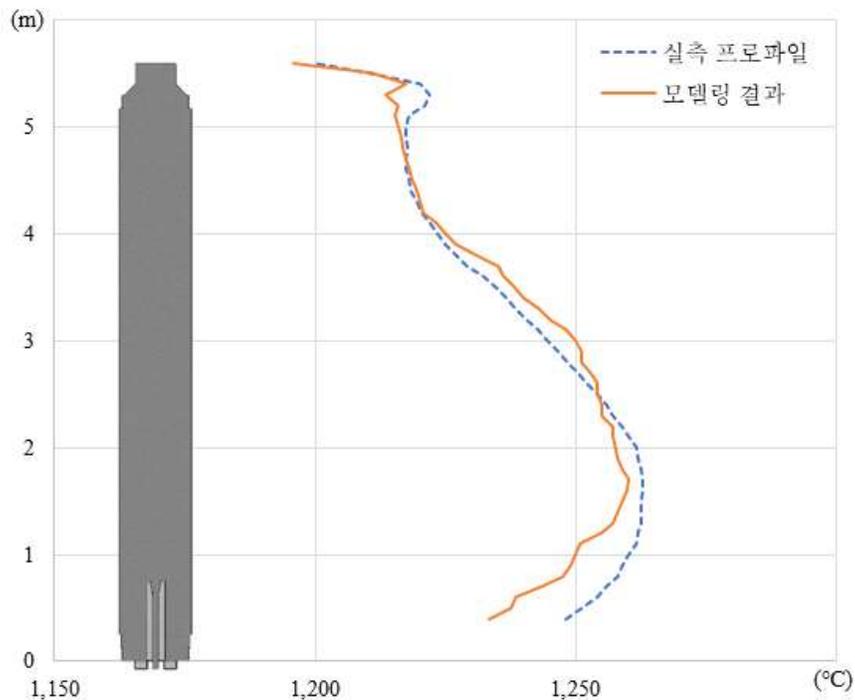


[그림 5-3] Cross-sections of combustion chamber



[그림 5-4] 일상조업 시, 연소실 내 온도분포도

[그림 5-4]는 일상 조업 시, 연소실 내 유체의 온도분포를 나타낸다. Cross-section A의 온도분포를 보면, 연소가 일어나는 Upward flue와 배기가스가 빠져나가는 Downward flue의 온도차이를 확인 할 수 있다. 또한 Cross-section B의 온도분포를 통해 화염의 위치를 확인할 수 있다.



[그림 5-5] 모델링 결과 검증을 위한 온도 프로파일 비교

[그림 5-5]는 실측 온도 프로파일과의 비교결과이다. 실측 온도 프로파일을 보면, 연소실 하부에서 Mixed Gas와 Air가 만나 연소가 일어나고, 화염의 중심이 위치한 약 1.5~2m 높이에서 최고로 가열된 후(약 1,260°C), 높이 5m 지점까지 온도가 서서히 떨어진다. 그 후 연소가스가 Downward flue로 넘어가는 Hair pin에서 온도가 약간 올라간다.

모델링을 통해 얻어진 온도 프로파일 역시 유사한 온도 구배를 보이고

있다. 다만 연소실 최하부에서 온도 차이가 발생하는 것은 Pyrofill machine을 이용한 온도 측정 시, Measuring head가 아래로 내려가면서 충분히 가열된 상태에서 온도를 측정하였기 때문에 높게 측정된 것으로 보인다. 따라서 약간의 온도 차이는 존재하지만 이 연구를 진행하기에 충분한 정확성을 가진다고 할 수 있다.

제 6 장 Case별 시뮬레이션

제 1 절 시뮬레이션 Case

[표 6-1]은 이 장에서 다룰 시뮬레이션 Case이다. 크게 다음 3가지 영역에서 연소조건을 다르게 하여 연소실 내 온도분포를 확인하였다.

Cases	Cases 상세
Case 1. 코크스 오븐 가동률 변화 시, 연소실 온도분포 변화	Case 1.1 가동률 100% (Coking time 24.0 hr)
	Case 1.2 가동률 110% (Coking time 21.8 hr)
	Case 1.3 가동률 130% (Coking time 18.5 hr)
	Case 1.4 가동률 140% (Coking time 17.1 hr)
Case 2. 연소용 Air 유량 증감 시, 연소실 온도분포 변화	Case 2.1 기준 대비 90% Air 공급
	Case 2.2 기준 대비 95% Air 공급
	Case 2.3 기준 대비 105% Air 공급
	Case 2.4 기준 대비 110% Air 공급
Case 3. Mixed Gas 조성 변화 시, 연소실 온도분포 변화	Case 3.1 BFG/COG Ratio = 17.8 (COG/Mixed Gas Ratio = 5.3%)
	Case 3.2 BFG/COG Ratio = 15.8 (COG/Mixed Gas Ratio = 6.0%)
	Case 3.3 BFG/COG Ratio = 11.8 (COG/Mixed Gas Ratio = 7.8%)
	Case 3.4 BFG/COG Ratio = 9.8 (COG/Mixed Gas Ratio = 9.3%)

[표 6-1] 시뮬레이션 Cases

첫째, 코크스 오븐 가동률 변화 시 연소실 내 온도분포 변화를 확인하였다. 코크스 오븐 가동률은 코크스 오븐 배터리 별 탄화실 수 대비 하루 동안 압출한 탄화실의 수를 의미하며(수식 6.1), 코크스 오븐의 온도 관리는 목표 가동률에 맞춰 연소실의 온도를 조절한다.

$$\text{가동률(\%)} = \frac{\text{압출 문수}}{\text{탄화실 총 문수}} \times 100 = \frac{24(hr)}{\text{건류 시간}(hr)} \times 100 \quad (6.1)$$

둘째, 연소용 Air 유량 증감 시 연소실 내 온도분포 변화를 확인하였다. 코크스 오븐 연소실의 온도 관리를 위한 활동 중 가장 중요한 것은 연소용 gas와 공기의 유량을 변경하는 것이다. 그러나 연소용 gas를 늘리는 것은 경제적이지 못하기 때문에, 주로 공기의 유량을 관리하게 된다. 따라서 두 번째 시뮬레이션에서는 연소용 공기의 유량이 바뀌었을 때 나타나는 연소실 내 온도분포 변화와 화염의 형상을 확인하였다.

셋째, Mixed Gas 조성 변화 시 연소실 내 온도분포 변화를 확인하였다. 코크스 오븐에서 연료로 사용하는 Mixed Gas는 발열량이 낮은 BFG에 발열량이 높은 COG를 혼합하여 사용한다. BFG와 COG의 일반적인 혼합비율은 대략 BFG:COG=13.8:1이나, 제철소 내 부생가스 발생비율 변동 또는 외기조건에 따라 혼합비율을 조절하기도 한다. 특히 하절기 외기 온도 상승으로 인한 통풍력(Draft head) 감소 시, COG의 비율을 높여서 사용하는 경우도 있다. 따라서 세 번째 시뮬레이션에서는 COG 비율 변화에 따른 연소실 내 온도분포 변화를 확인하였다.

제 5장에서 다룬 일상조업에 대한 시뮬레이션 결과는 가동률 120%, Air 공급 100%에 해당해, 세 가지 시뮬레이션의 기본이 된다.

다음 [표 6-2] ~ [표 6-10]은 시뮬레이션 Case별 경제조건 또는 Mixed Gas 조성을 보여준다.

Named Selections	Boundary Condition	Properties
Air & Gas Nozzle No.1	Air Inlet / Mass Flow Inlet	0.01453 kg/s, 1,200 ℃
Air & Gas Nozzle No.2	Gas Inlet / Mass Flow Inlet	0.01514 kg/s, 1,200 ℃
Air & Gas Nozzle No.3, 4	Waste Gas Outlet / Outflow	-
Wall neighboring coking chamber	Wall / Heat Flux	- 6,000 W/m ²

[圖 6-2] Boundary conditions for case 1.1

Named Selections	Boundary Condition	Properties
Air & Gas Nozzle No.1	Air Inlet / Mass Flow Inlet	0.01532 kg/s, 1,200 ℃
Air & Gas Nozzle No.2	Gas Inlet / Mass Flow Inlet	0.01596 kg/s, 1,200 ℃
Air & Gas Nozzle No.3, 4	Waste Gas Outlet / Outflow	-
Wall neighboring coking chamber	Wall / Heat Flux	- 6,000 W/m ²

[圖 6-3] Boundary conditions for case 1.2

Named Selections	Boundary Condition	Properties
Air & Gas Nozzle No.1	Air Inlet / Mass Flow Inlet	0.01691 kg/s, 1,200 ℃
Air & Gas Nozzle No.2	Gas Inlet / Mass Flow Inlet	0.01761 kg/s, 1,200 ℃
Air & Gas Nozzle No.3, 4	Waste Gas Outlet / Outflow	-
Wall neighboring coking chamber	Wall / Heat Flux	- 6,000 W/m ²

[圖 6-4] Boundary conditions for case 1.3

Named Selections	Boundary Condition	Properties
Air & Gas Nozzle No.1	Air Inlet / Mass Flow Inlet	0.01770 kg/s, 1,200 ℃
Air & Gas Nozzle No.2	Gas Inlet / Mass Flow Inlet	0.01844 kg/s, 1,200 ℃
Air & Gas Nozzle No.3, 4	Waste Gas Outlet / Outflow	-
Wall neighboring coking chamber	Wall / Heat Flux	- 6,000 W/m ²

[圖 6-5] Boundary conditions for case 1.4

Named Selections	Boundary Condition	Properties
Air & Gas Nozzle No.1	Air Inlet / Mass Flow Inlet	0.01450 kg/s, 1,200 ℃
Air & Gas Nozzle No.2	Gas Inlet / Mass Flow Inlet	0.01679 kg/s, 1,200 ℃
Air & Gas Nozzle No.3, 4	Waste Gas Outlet / Outflow	-
Wall neighboring coking chamber	Wall / Heat Flux	- 6,000 W/m ²

[圖 6-6] Boundary conditions for case 2.1

Named Selections	Boundary Condition	Properties
Air & Gas Nozzle No.1	Air Inlet / Mass Flow Inlet	0.01531 kg/s, 1,200 ℃
Air & Gas Nozzle No.2	Gas Inlet / Mass Flow Inlet	0.01679 kg/s, 1,200 ℃
Air & Gas Nozzle No.3, 4	Waste Gas Outlet / Outflow	-
Wall neighboring coking chamber	Wall / Heat Flux	- 6,000 W/m ²

[圖 6-7] Boundary conditions for case 2.2

Named Selections	Boundary Condition	Properties
Air & Gas Nozzle No.1	Air Inlet / Mass Flow Inlet	0.01692 kg/s, 1,200 ℃
Air & Gas Nozzle No.2	Gas Inlet / Mass Flow Inlet	0.01679 kg/s, 1,200 ℃
Air & Gas Nozzle No.3, 4	Waste Gas Outlet / Outflow	-
Wall neighboring coking chamber	Wall / Heat Flux	- 6,000 W/m ²

[圖 6-8] Boundary conditions for case 2.3

Named Selections	Boundary Condition	Properties
Air & Gas Nozzle No.1	Air Inlet / Mass Flow Inlet	0.01773 kg/s, 1,200 ℃
Air & Gas Nozzle No.2	Gas Inlet / Mass Flow Inlet	0.01679 kg/s, 1,200 ℃
Air & Gas Nozzle No.3, 4	Waste Gas Outlet / Outflow	-
Wall neighboring coking chamber	Wall / Heat Flux	- 6,000 W/m ²

[圖 6-9] Boundary conditions for case 2.4

Compound	Mole fraction of Mixed Gas				
	기 준 (BFG/COG=13.8)	Case 3.1 (BFG/COG=17.8)	Case 3.2 (BFG/COG=15.8)	Case 3.3 (BFG/COG=11.8)	Case 3.4 (BFG/COG=9.8)
H ₂	0.0641	0.0568	0.0600	0.0694	0.0767
O ₂	0.0050	0.0050	0.0050	0.0051	0.0051
N ₂	0.4825	0.4884	0.4858	0.4781	0.4721
CO	0.2229	0.2253	0.2242	0.2211	0.2187
CO ₂	0.2072	0.2101	0.2088	0.2052	0.2024
CH ₄	0.0162	0.0127	0.0142	0.0187	0.0221
C ₂ H ₂	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0002
C ₂ H ₄	0.0016	0.0012	0.0015	0.0018	0.0022
C ₂ H ₆	0.0002	0.0002	0.0002	0.0003	0.0003
C ₃ H ₆	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
C ₃ H ₈	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
Total	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

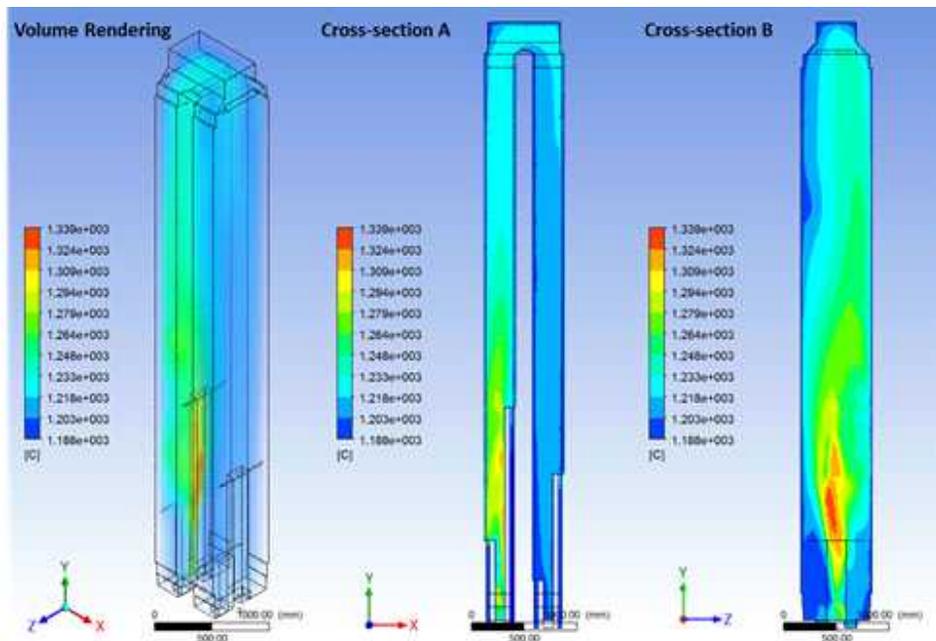
[표 6-10] Mixed Gas compositions of Case 3.1~3.4

제 2 절 Case별 시뮬레이션 결과

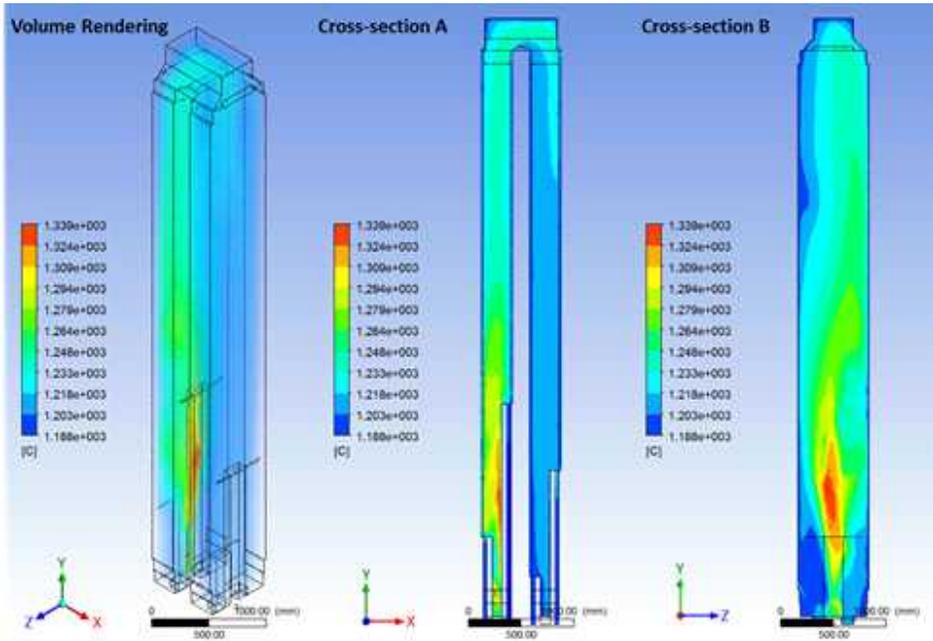
이 절에서는 총 12개의 Case에 대한 시뮬레이션 결과를 다룬다. 시뮬레이션 결과는 2가지 방법으로 확인하였다. 우선 연소실 내부의 온도분포도를 도시하여 비교하였고, 다음으로 Upward flue의 수직방향 온도 프로파일을 비교하였다.

1. 코크스 오븐 가동률 변화 시, 연소실 내 온도분포 변화

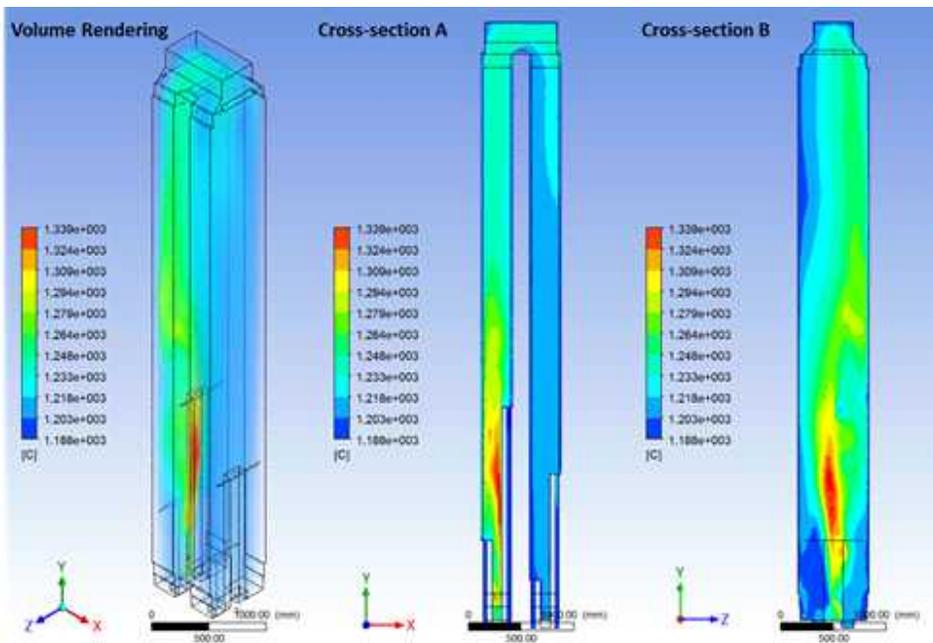
다음 그림들은 ‘Case 1. 코크스 오븐 가동률 변화 시, 연소실 온도분포도’이다. 가동률 120%인 ‘일상조업 시, 연소실 내 온도분포도’를 Case 1.2와 Case 1.3 사이에 추가하여, 코크스 오븐 가동률 변화에 따른 연소실 내 온도분포 변화를 가동률이 증가하는 순서로 비교하였다.



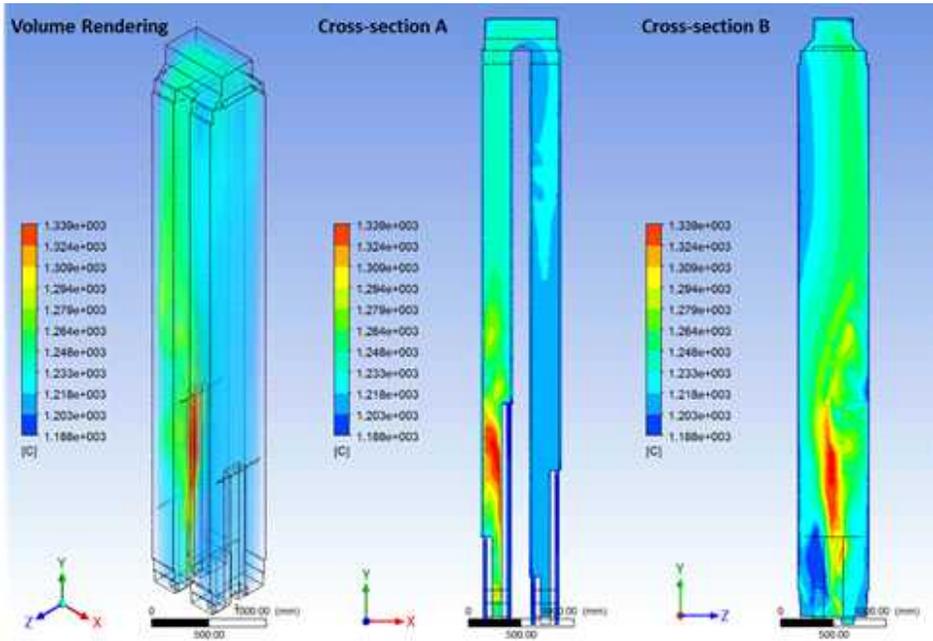
[그림 6-1] 가동률 100% 시, 연소실 온도분포도



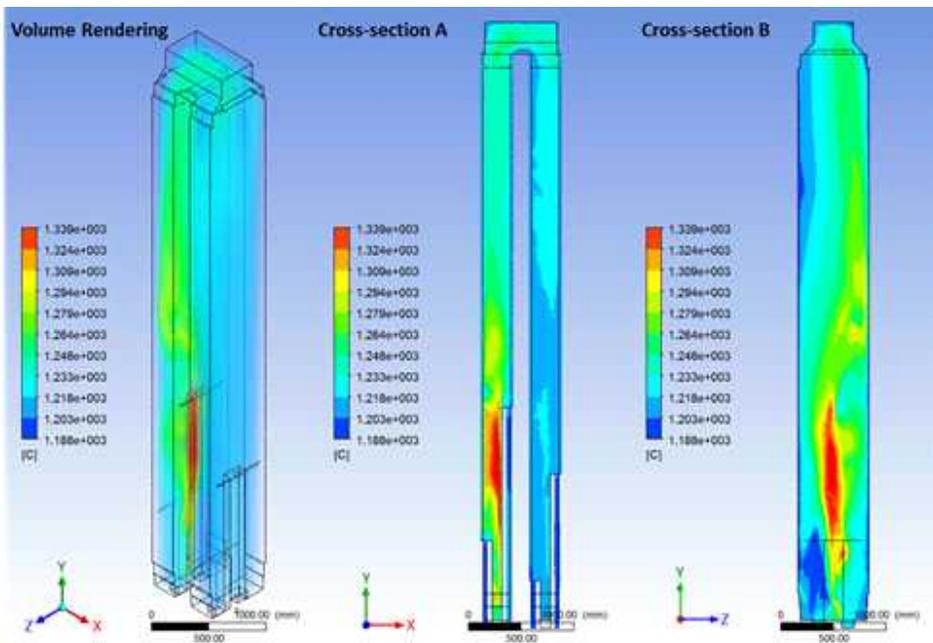
[그림 6-2] 가동률 110% 시, 연소실 온도분포도



[그림 6-3] 가동률 120% 시, 연소실 온도분포도



[그림 6-4] 가동률 130% 시, 연소실 온도분포도



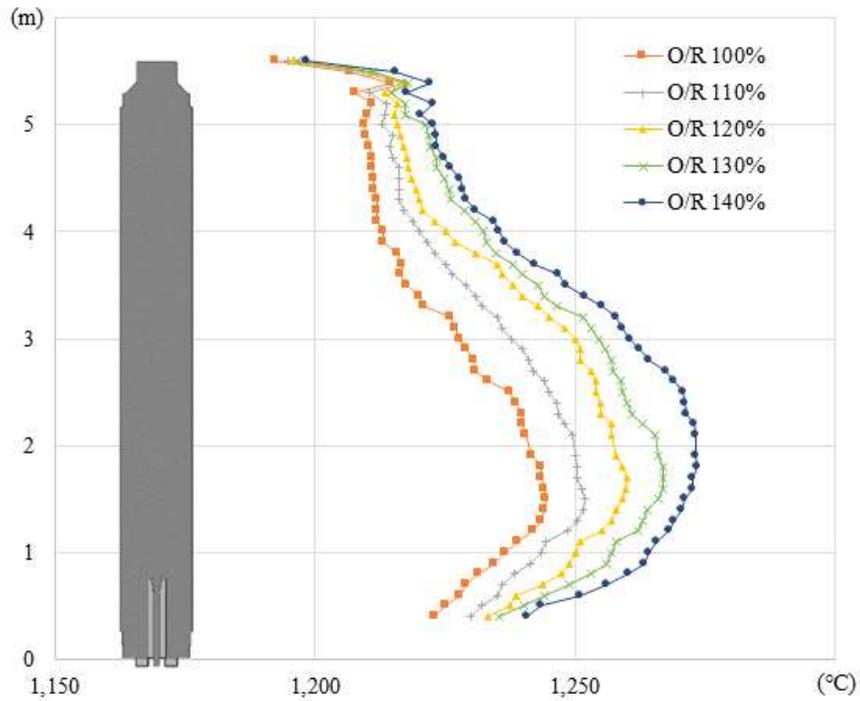
[그림 6-5] 가동률 140% 시, 연소실 온도분포도

코크스 오븐의 가동률이 증가할수록 연소실 내로 유입되는 Mixed Gas와 공기의 양은 증가한다. 그 결과 가동률이 증가할수록 연소실 내 유체의 온도가 상승하는 것을 [그림 6-1]~[그림 6-5]를 통해 확인 할 수 있다.

Cross-section A를 통해, 연소반응이 일어나는 Upward flue와 연소가 끝난 폐가스가 지나가는 Downward flue의 온도분포 차이를 확인할 수 있다. 모든 경우에서 Upward flue의 온도가 Downward flue의 온도보다 높음을 확인 할 수 있었고, 가동률이 증가할수록 Upward flue와 Downward flue의 온도가 증가하는 것을 확인 할 수 있다.

연소실 내로 유입된 Mixed Gas와 공기가 처음 만나는 Upward flue의 온도분포에 해당하는 Cross-section B를 살펴보면, 유체의 속도가 상대적으로 느린 가동률 100%, 110%의 경우 화염의 길이가 짧고 넓게 확산된 것을 확인 할 수 있고, 유체의 속도가 상대적으로 빠른 가동률 130%, 140%에서는 화염의 길이가 길어진 것을 확인할 수 있다.

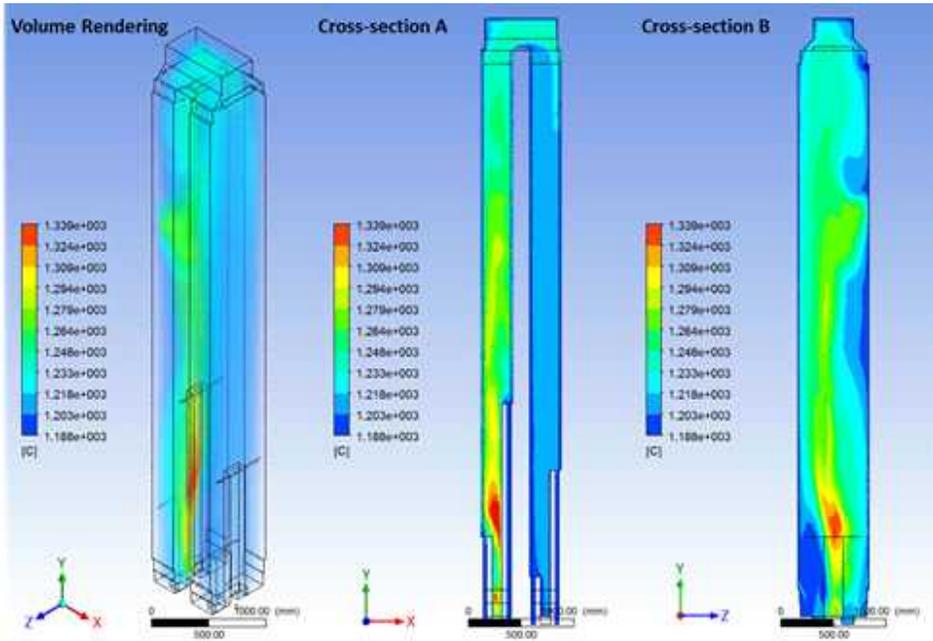
[그림 6-6]은 코크스 오븐 가동률 변화에 따른 Upward flue의 온도 프로파일을 보여준다. [그림 6-1]~[그림 6-5]를 통해 이미 확인하였던 것과 같이 가동률이 증가할수록 온도가 상승하는 것을 확인할 수 있다. 또한 가동률이 증가할수록 화염이 길어져, 온도가 최고가 되는 높이 역시 1.5m에서 2.0m까지 높아지는 것을 확인할 수 있다.



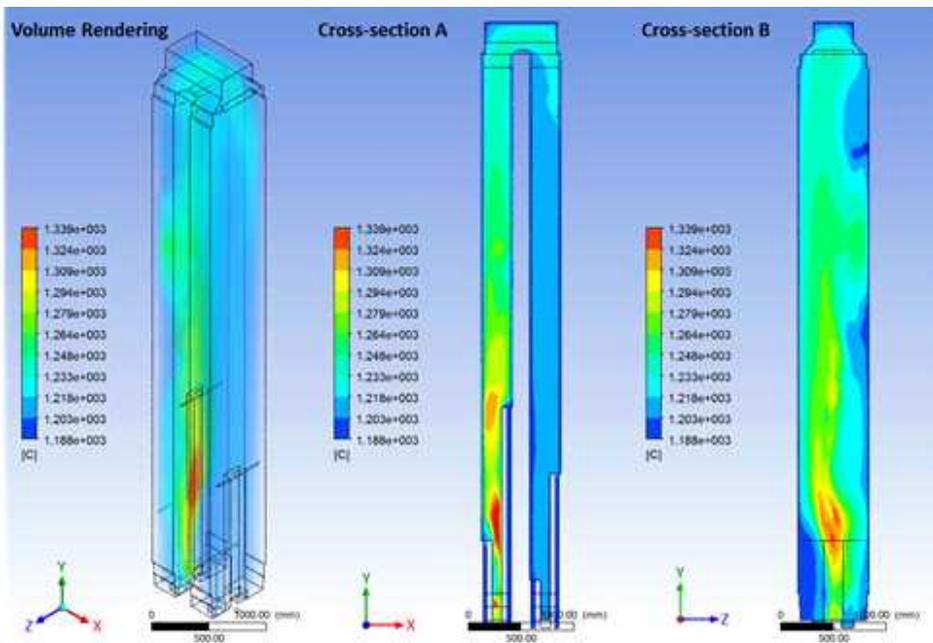
[그림 6-6] Upward flue 온도 프로파일 비교 (Case 1.)

2. 연소용 Air 유량 증감 시, 연소실 내 온도분포 변화

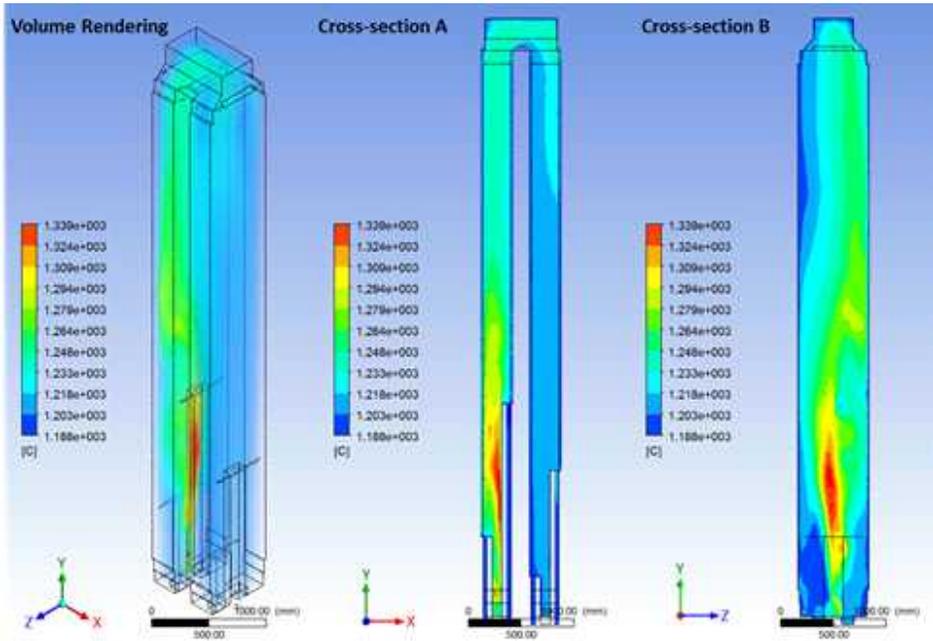
다음 그림들은 ‘Case 2. 연소용 Air 유량 증감 시, 연소실 온도분포도’ 이다. 기준에 해당하는 ‘일상조업 시, 연소실 내 온도분포도’ 를 Case 2.2와 Case 2.3 사이에 추가하여, 연소용 Air 유량 변화에 따른 연소실 내 온도분포 변화를 연소용 Air를 증가시키는 순서로 비교하였다.



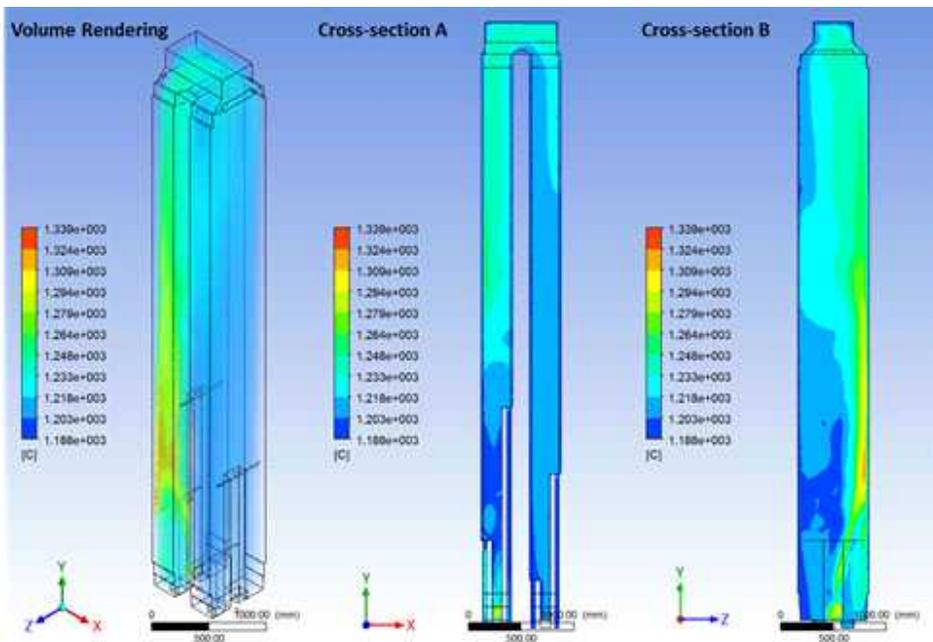
[그림 6-7] 기준 대비 90% Air 시, 연소실 온도분포도



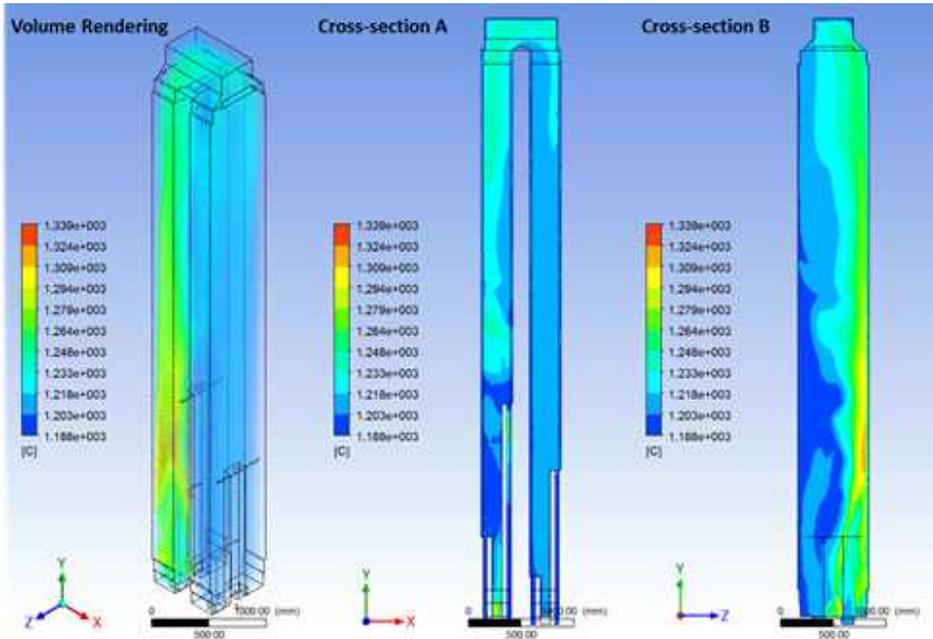
[그림 6-8] 기준 대비 95% Air 시, 연소실 온도분포도



[그림 6-9] 기준 Air 시, 연소실 온도분포도



[그림 6-10] 기준 대비 105% Air 시, 연소실 온도분포도



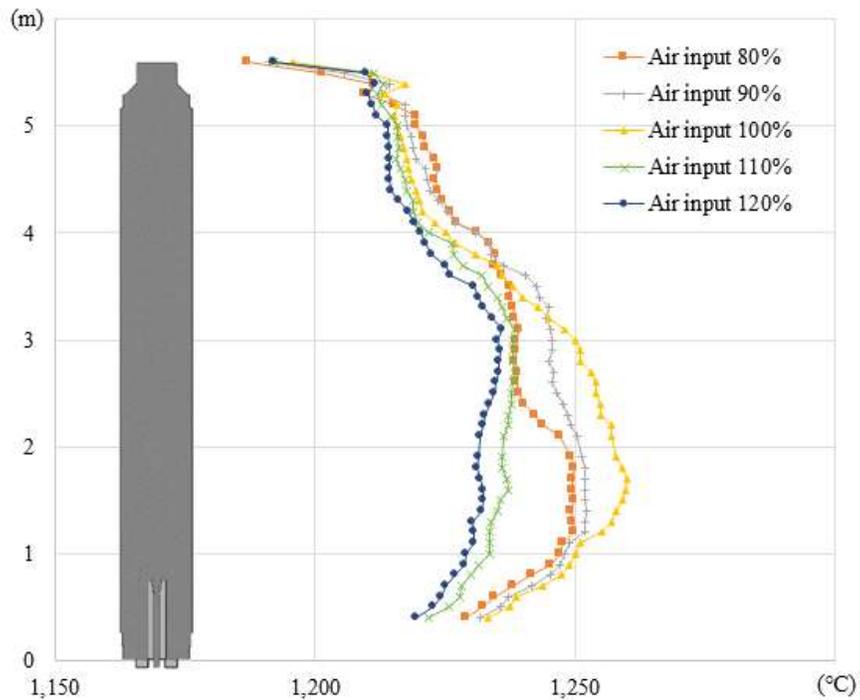
[그림 6-11] 기준 대비 110% Air 시, 연소실 온도분포도

연소용 Air의 유량이 기준 대비 5% 이상 부족하게 공급되었을 경우와 5% 이상 과잉 공급되었을 경우에 나타나는 현상은 극명하게 다르다. 먼저 기준 대비 5% 이상 부족 공급 시에는 화염이 Mixed Gas가 유입되는 No.2 Nozzle 방향으로 휘어졌고, 연소실 하부에서 생성되는 화염의 길이는 기준 대비 짧아졌다. 다음으로 연소용 Air의 유량이 기준 대비 5% 이상 과잉 공급 시에는 화염이 Air가 유입되는 No.1 Nozzle 방향으로 휘어졌고, 화염은 연소실 Wall 표면에서 약하게 형성되었다.

[그림 6-7]~[그림 6-11]을 통해서 화염의 방향은 2개 Inlet의 유량 차이가 클 때 유량이 큰 방향으로 휘어지려는 것을 확인할 수 있었고, [그림 6-9]의 기준 온도분포도와 온도분포도 형상이 더 크게 차이를 보이는 경우는 Air가 과잉 공급되었을 때라는 것을 [그림 6-10]과 [그림 6-11]을 통해서 확인할 수 있었다.

[그림 6-12]은 연소용 Air 유량 증감 시, Upward flue의 온도 프로

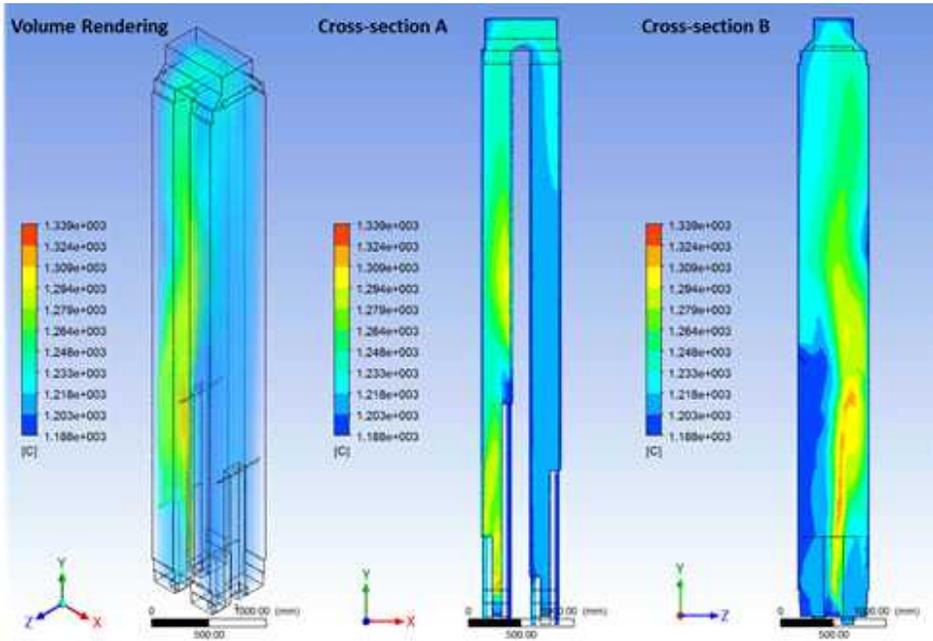
파일을 보여준다. 앞서 언급한 바와 동일하게 Air가 부족하게 공급된 경우와 Air가 과잉 공급된 경우에 나타나는 차이를 온도 프로파일을 통해서도 확인할 수 있으며, Air가 과잉 공급되었을 때의 온도 프로파일이 Air가 부족하게 공급되었을 때 보다 더 기준 온도 프로파일과 다른 것을 확인할 수 있다.



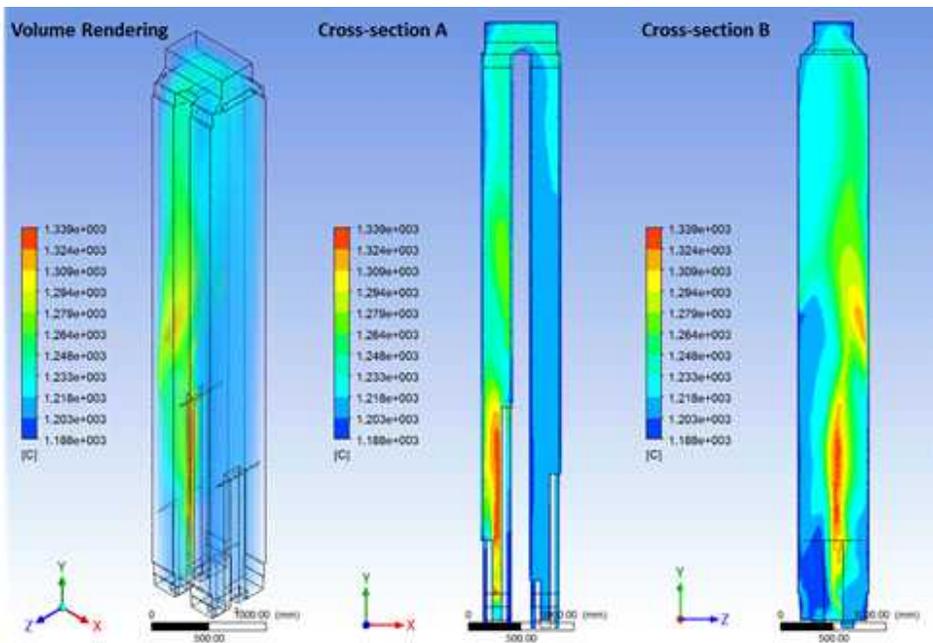
[그림 6-12] Upward flue 온도 프로파일 비교 (Case 2.)

3. Mixed Gas 조성 변화 시, 연소실 내 온도분포 변화

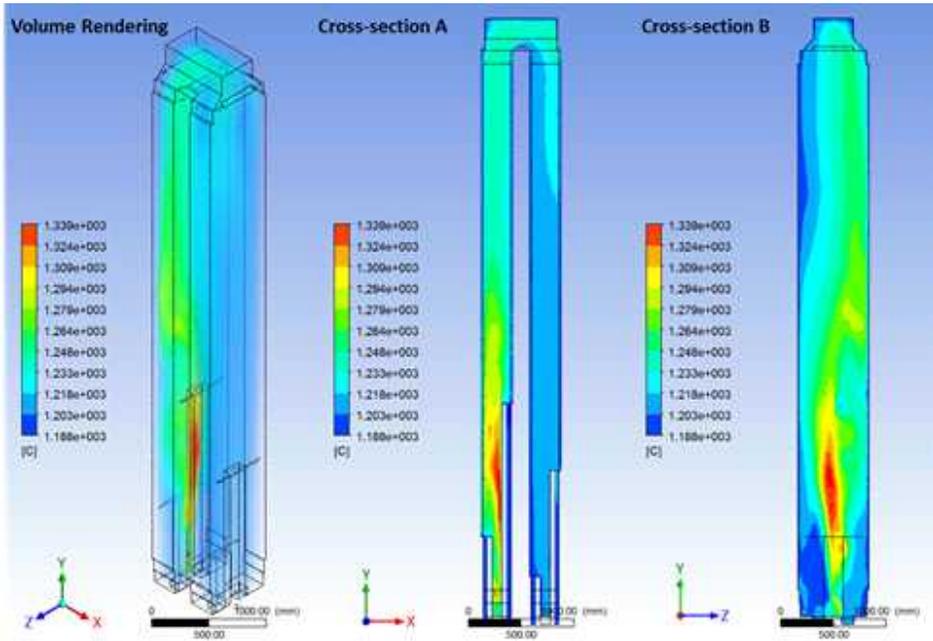
다음 그림들은 ‘Case 3. Mixed Gas 조성 변화 시, 연소실 내 온도 분포도’이다. 기준인 ‘일상조업 시, 연소실 내 온도분포도’를 Case 3.2와 Case 3.3 사이에 추가하여, Mixed Gas 조성변화에 따른 연소실 내 온도분포 변화를 COG 혼합비율이 증가하는 순서로 비교하였다.



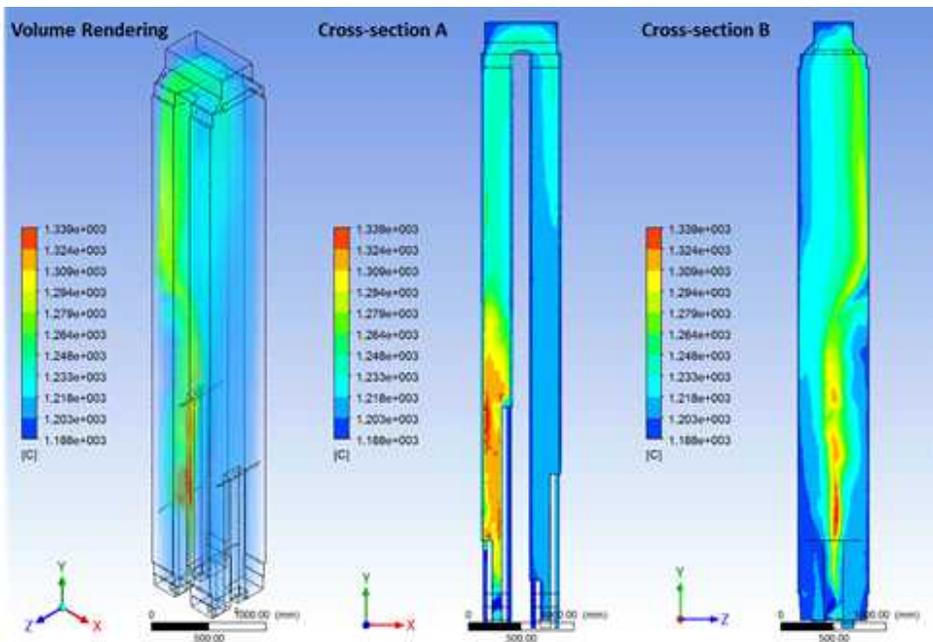
[그림 6-13] 연소실 온도분포도 (BFG/COG Ratio=17.8)



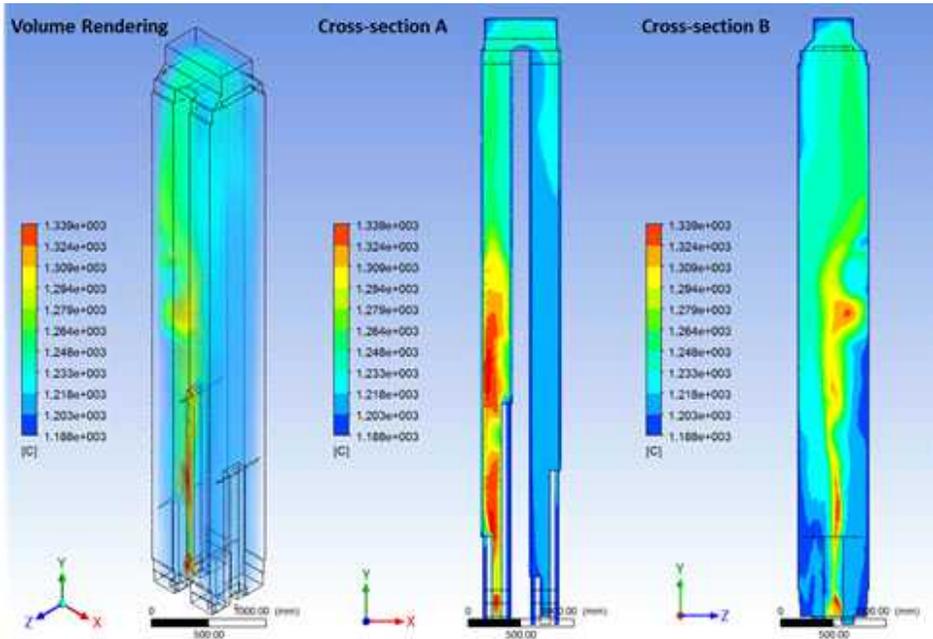
[그림 6-14] 연소실 온도분포도 (BFG/COG Ratio=15.8)



[그림 6-15] 연소실 온도분포도 (기준 BFG/COG Ratio)



[그림 6-16] 연소실 온도분포도 (BFG/COG Ratio=11.8)



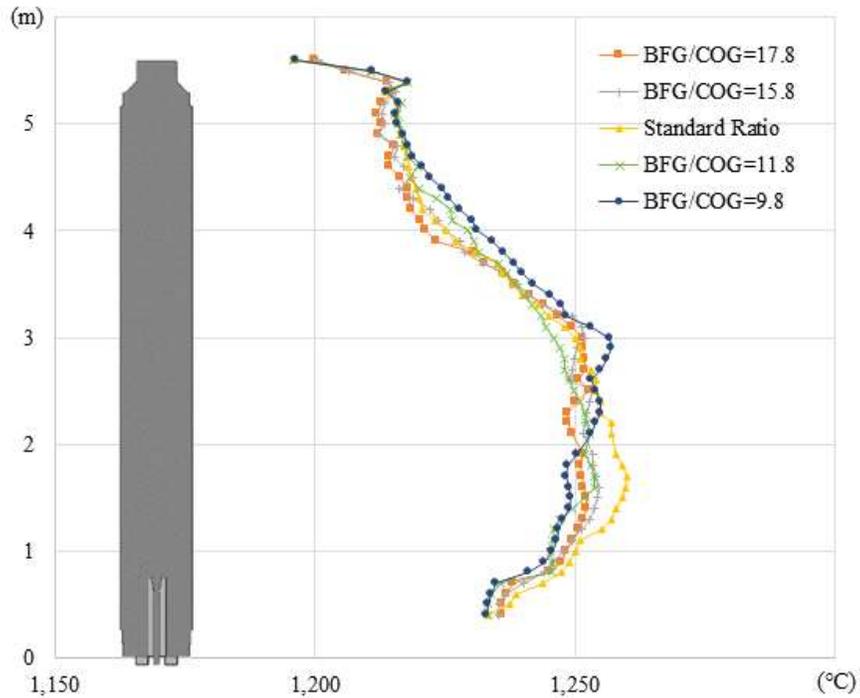
[그림 6-17] 연소실 온도분포도 (BFG/COG Ratio=9.8)

먼저 [그림 6-13]~[그림 6-17]의 Cross-section A, B를 살펴보면, Mixed Gas 내 COG의 비율이 증가할수록 화염의 길이가 길어지는 것을 확인할 수 있다. 비교적 BFG와 COG의 혼합비율이 기준 혼합비율 (BFG/COG=13.8)과 비슷한 Case 3.2(BFG/COG=15.8)와 Case 3.3 (BFG/COG=11.8)의 경우 화염의 길이가 기준과 비슷하였지만, Case 3.1(BFG/COG=17.8)의 경우 화염이 잘 생성되지 않았고, Case 3.4(BFG/COG=9.8)는 화염 매우 길게 생성된 것을 확인할 수 있다.

기준 혼합비율을 제외한 모든 Case에서 화염의 두께가 얇게 생성되어 연소실 하부의 온도가 낮아진 것을 온도분포도를 통해 확인할 수 있다. 이는 Mixed Gas의 조성을 변화시켰을 때, 연소에 필요한 Air량 역시 변화시켜야 하지만, 연소용 Air의 유량을 동일하게 유지하였기 때문으로 보인다.

[그림 6-18]은 Mixed Gas 조성 변화 시, Upward flue의 온도 프로

파일을 보여준다. 앞서 확인한 바와 동일하게 기준 혼합비율을 제외한 나머지 모든 경우에서 연소실 하부 온도가 낮아진 것을 확인할 수 있으며, Mixed Gas 내 COG 비율이 증가할수록 화염의 길이 증가로 인해 연소실 상부의 온도가 높아진 것을 확인할 수 있다.



[그림 6-18] Upward flue 온도 프로파일 비교 (Case 3.)

제 7 장 결론

제 1 절 요약

이 연구는 코크스 오븐에서 일어나는 연소반응을 최적으로 관리하기 위해, 코크스 오븐 연소실 내 연소반응을 상용 CFD Tool인 Ansys Fluent로 모델링한 것이다. 얻어진 연소모델을 활용해 다양한 운전조건 변화에 따른 연소실 내 온도분포를 시뮬레이션 하였고, 크게 3가지 운전조건 변화에 대한 연소실 내 온도분포도와 연소실 Upward flue의 온도프로파일을 얻었다. 각각의 경우에 대한 결론은 다음과 같다.

먼저 코크스 오븐의 가동률 변화 시, 연소실 내 온도분포 변화에 대한 시뮬레이션 결과는 가동률이 증가할수록 연소실 내 온도가 증가하고, 화염의 길이가 길어지며, 이로 인해 온도가 최고가 되는 지점의 높이가 높아지는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 코크스 오븐의 가동률이 증가할 때, 연소실로 유입되는 연료와 공기의 양 역시 증가하기 때문에 발생하는 당연한 결과이다.

다음으로 연소용 Air의 유량 증감 시, 연소실 내 온도분포 변화에 대한 시뮬레이션 결과는 연소용 Air가 부족하게 공급되었을 경우에는 화염이 Mixed Gas 유입구인 No.2 Nozzle 방향으로 휘어졌으며, 연소용 Air가 과잉 공급되었을 경우에는 화염이 Air가 유입되는 No.1 Nozzle 방향으로 휘어졌다. 다시 말해, 2개 Inlet의 유량 차이가 클 때, 화염의 방향은 유량이 큰 방향으로 휘어지려고 한다. 또한 Upward flue의 온도프로파일을 통해서 Air의 과잉공급이 과소공급보다 연소실 내 온도분포에 더 나쁜 영향을 주는 것을 확인하였다.

마지막으로 Mixed Gas의 조성 변화 시, 연소실 내 온도분포 변화에 대한 시뮬레이션 결과는 Mixed Gas 내 COG의 비율이 증가할수록 화염의 길이가 길어지고 이로 인해 연소실 상부 온도가 높아지는 것을 확

인하였다. 또한 BFG와 COG의 혼합비율이 기준 혼합비율에서 많이 벗어날수록 화염의 두께가 얇아지는 것을 확인할 수 있었는데, 이는 연소용 Air의 유량을 Mixed Gas 조성 변화에 맞춰 조정하지 않고 동일하게 유지하였기 때문으로 보인다.

제 2 절 후속 연구

이 연구를 통해 코크스 오븐 연소실 내에서 일어나는 연소반응 모델을 얻을 수 있었다. 이를 바탕으로 향후 코크스 오븐 운전조건 혹은 외부 연소조건 변화에 대응하는 연소 시뮬레이션을 사전에 수행해, 이를 토대로 실제 코크스 오븐 조업을 최적화 할 수 있을 것으로 기대한다.

이 연구에서는 Mixed Gas를 연료로 사용하였고 연료의 Inlet으로 Air & Gas Nozzle을 선택하여 모델링을 수행하였는데, 향후에는 COG를 연료로 사용하고 연료의 Inlet으로 COG Nozzle을 선택한, COG 전소 시 연소모사를 수행할 필요가 있다고 생각한다.

마지막으로, 앞서 3번째 시뮬레이션에서 연소용 Air의 유량을 Mixed Gas 조성 변화에 맞춰서 조정하지 않았는데, 향후에는 Mixed Gas 조성 변화 시 적정 Air 유량을 찾는 연구 역시 수행할 필요가 있다고 생각한다.

참 고 문 헌

- 1) Haraguchi H, Nishi T, Miura Y, Ushikubo M & Noda T, “Some aspects of deterioration of coke in blast furnace” , T Iron Steel I Japan 25(3), 1985, pp. 190~197.
- 2) M.A. Diez, R Alvarez, C Barriocanal, “Coal for metallurgical coke production: predictions of coke quality and future requirements for cokemaking” , 2001.
- 3) Kyong-Ho Yoon, Ki-Hong Kim, Yong-Kuk Lee, “Method of Estimation and Characteristics for Coke Heat Quantities of Coking Coal” , HWAHAK KONGHAK Vol. 35, No. 4, August, 1997, pp. 585~589.
- 4) Kyong-Ho Yoon, Ki-Hong Kim, Yong-Kuk Lee, “Characteristics of Fuel Gas Distribution in combustion Chamber of Coke Oven” , HWAHAK KONGHAK Vol. 38, No. 3, June, 2000, pp. 416~422.
- 5) Daniel C. Mussatti, *Coke Ovens: Industry Profile Draft Report*, 1998, pp. 2-1.
- 6) Young-ha Bae, “A study on Heat Transfer for Various Coal Properties in Coking Process” , 2000
- 7) R. Loison, P. Foch, A. Boyer, *Coke: Quality and Production*, Butterworths, 1989, pp. 62~63.
- 8) Kyong-Ho Yoon, Ki-Hong Kim, Yong-Kuk Lee, “The Effect of End Temperature on Coke Qualities” , HWAHAK KONGHAK

- K Vol. 35, No. 6, December, 2000, pp. 889~892.
- 9) R. Loison, P. Foch, A. Boyer, *Coke: Quality and Production*, Butterworths, 1989, pp. 169~170.
 - 10) R. Loison, P. Foch, A. Boyer, *Coke: Quality and Production*, Butterworths, 1989, pp. 337~338.
 - 11) Selkow, A.K., *Guidebook for Coke Oven Engineers (in Russian)*, Metallurgia, Moscow, 1966.
 - 12) Ishii, T., Zhang, C. and Sugiyama, S., "Numerical Simulations of Highly Preheated Air combustion in an Industrial Furnace," *Transactions of the ASME*, Vol. 120., 1998.
 - 13) Liu, F., Guo, H., Smallwood, Gulder, G.J., O.L. and Matovic, M.D., "A Robust and Accurate Algorithm of the β -pdf Integration and Its Application to Turbulent Methane-air Diffusion Combustion in a Gas Turbine Combustor Simulator," *International Journal of Thermal Science*, Vol. 41, 2002, pp.763~772.
 - 14) Jiang, Lei-Yong and Campbell, Ian, "A Critical Evaluation of NO_x Modeling in a ModelCombustor," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 127 2005.
 - 15) *ANSYS FLUENT Theory Guide ANSYS, Inc. Release 14.0*, November 2011, pp. 225.

Abstract

**CFD modeling of thermal processes
within a coke oven combustion
chamber**

Jaewon Hur

Department of Engineering Practice
Graduate School of Engineering Practice
Seoul National University

The efficient operation of the coke oven in the steel industry is attracting much attention, because it is directly related to stable operation of blast furnace by improving the coke quality and energy saving by reducing energy consumption. In order to efficiently operate the coke oven, it is necessary to optimally manage the combustion reaction occurring in the coke oven combustion chamber.

This project is a study of the combustion reaction simulation within the combustion chamber using CFD (Computational Fluid Dynamics). For this purpose, one of the flue chambers in the coke oven combustion chamber was modeled in 3-D, and the governing equations for the combustion process were derived. Then, the

temperature distributions in the flue chamber corresponding to various combustion conditions were simulated using Ansys Fluent, CFD tool.

Finally, the results obtained are compared with the actual temperature distribution in the coke oven combustion chamber and used as data for future coke oven combustion management.

**keywords : Coke oven, Combustion chamber, Combustion,
Computational Fluid Dynamics, CFD**

Student Number : Jaewon Hur