

500MW 급 접선분사형 미분탄보일러의 NO_x 저감에 관한 수치해석적 연구

최청렬*·강대웅*·김창녕**·박만흥***·김광추***·김종길***

A Numerical Study on the NO_x Reduction in 500MW Pulverized Coal Tangential Firing Boiler

Choeng-Ryul Choi, Dae-Woong Kang, Chang-Nyung Kim, Man-Heung Park,
Kwang-Chu Kim and Jong-Kill Kim

Key Words: Tangential Boiler(접선분사형 보일러), Combustion(연소), Burner(버너), NO_x

Abstract

The emission of NO_x during coal combustion is a major reason of environment impact. NO_x is an acid rain precursor and participates in the generation of smog through ozone production. NO_x can be divided into thermal NO_x , fuel NO_x and prompt NO_x . Thermal NO_x is formed in a highly temperature condition dependent. Fuel NO_x is dependent on the local combustion characteristics and initial concentration of nitrogen bound compound, while prompt NO_x is formed in a significant quantity in some combustion environments, such as low temperature and short residence times. This paper presents numerical simulation of the flow and combustion characteristics in the furnace of a tangential firing boiler of 500MW with burners installed at the every corner of the furnace. The purpose of this paper is to investigate the reduction of NO_x emission in a 500MW pulverized coal tangential firing boiler with different OFA's and burner angles. Calculations with different air flow rates of over fired air(OFA) and burner angles are performed.

1. 서 론

석탄연료는 지구상에서 존재하는 최대 매장량을 가진 자원으로서 화력발전 시 높은 효율을 얻을 수 있는 에너지원이지만 연소 시 다량의 분진, 황산화물 (SO_x : SO_2 , SO_3 등) 및 질소산화물(NO_x : NO , NO_2 등) 등이 배출되며 이는 산성비, 산림파괴와 호흡기 질환 등의 환경문제를 유발시킨다[1]. 화력발전 시 SO_x 의 배출은 연료 중의 유황성분 제거, 배기 탈황설비 설치, 대체청정연료의 사용 등의 방법을 통하여 규제치 이하로 저감시키는 것이 가능하지만, NO_x 는 발전시

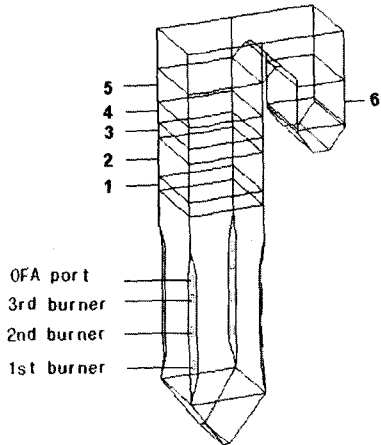
설, 소각시설, 보일러, 가열설비, 내연기관 등 다양한 배출원으로부터 발생되지만 NO_x 발생의 저감 방법은 보일러 내에서의 연소방법의 개선에 의해서 제어하는 방법이 대부분이다[2].

질소산화물의 생성은 온도, 체류시간, 산소와 연료의 농도, 연료의 성분, 화염형상 및 혼합정도 등 다양한 인자에 의해 결정되고, NO_x 의 발생원에 따라 thermal NO_x , fuel NO_x 그리고 prompt NO_x 로 분류한다[3]. Thermal NO_x 는 연료의 열분해 시 고온에 의해 공기 중의 질소가 고온 영역의 산소와 반응하여 생성되는 것으로서 산소농도가 높은 고온영역에서 연소가스의 체류시간이 길 때 많이 생성되고, Fuel NO_x 는 연료 중에 포함되어 있는 질소성분이 연소과정에서 산소와 결합하여 발생한다. 그리고 Prompt NO_x 는 낮은

* 경희대학교 대학원 기계공학과

** 경희대학교 기계·산업시스템공학부

*** 한국전력기술(주)



1: Primary superheater	4: Final superheater
2: Platen superheater	5: Primary reheater
3: Final reheater	6: Economizer

Fig. 1 Schematic view of the 500MW tangential firing boiler

연소실 온도와 연료 과잉조건, 체류시간이 짧을 경우에 발생한다[4]. NO_x 의 발생은 보일러 연소실 내 유동특성, 온도분포, 화염형상 및 체류시간 등 다양한 인자들에 의해 결정되므로 질소산화물 저감을 위해서는 보일러 내의 연소 시 이러한 인자들에 대한 자세한 정보를 통해 질소산화물 저감대책을 마련하여야 한다[5].

본 연구에서는 미분탄을 연료로 사용하는 접선분사형 보일러(Tangential firing boiler)의 정상가동 시 OFA(Over-Fired Air : 공기 다단공급방법) 양과 연료/공기 분사각의 증·감에 따른 연소과정의 수치해석적 방법을 통해 운전조건에 따른 유동특성, 온도분포, 화염형상, 체류시간 그리고 NO_x 발생량 등을 예측하였다.

2. 연구방법

접선분사형 보일러는 연소실 각 모서리에 버너가 설치되어 연소실 중앙으로 공기/연료를 분사시켜 연소실 중앙부에서 회전하는 형태의 화염을 형성하면서 연소시키는 방식으로서, 연소 공기를 선회시키지 않아도 연료와 공기의 혼합이 잘 이루어져 화염이 연소실 내 전체에 고르게 퍼지면

Table 1 Analysis of Bituminous coal

Higher calorific value		6,736 kcal/kg
Lower calorific value		6,080 kcal/kg
Proximate Analysis	Moisture	5.0 % wt
	Volatile matter	28.0 % wt
	Fixed carbon	52.0 % wt
	Ash	15.0 % wt
Ultimate Analysis	Carbon	69.0 % wt
	Hydrogen	4.3 % wt
	Nitrogen	1.4 % wt
	Oxygen	8.7 % wt
	Sulfur	0.8 % wt
	Ash	15.8 % wt

서 연소가 이루지는 방식이다[6]. 접선분사형 보일러의 간략한 형상을 Fig. 1에 나타내었다.

연소실 내의 각 모서리 상단부에 OFA 포트가 있고, 그 아래쪽에 시동 시에 사용하는 한 개의 버너와 정상 가동 시에 사용하는 6개의 버너가 배치되어 있다. 연료와 공기는 각각의 버너에 설치된 한 개의 연료노즐과 2개의 공기 노즐을 통하여 각각 분사된다. OFA 포트와 연료/공기 노즐은 운전조건에 따라 -30° (하향)부터 30° (상향)까지 분사각을 조절할 수 있게 되어 있다. 본 연구에서는 각 모서리에 설치된 6개의 버너를 두 개씩 묶어 3개의 버너로 단순화 시켰으며(Fig. 1), 각 버너에 설치된 연료/공기 노즐은 하나로 간단화하여 연료와 공기가 동일 노즐을 통하여 분사되는 것으로 설정하였다.

접선분사형 보일러의 외형적 특징은 긴 관들로 구성되어 있으며, 보일러 상부에는 superheater (Primary superheater, Platen superheater, Final super heater), reheater (Primary reheater, Final reheater), economizer가 장착되어 있다. 본 계산에서는 이 열교환기 부분도 Fig. 1과 같이 간략화하여 다공성매질로 처리하여 계산하였다.

본 연구에서 계산되어진 보일러에서 사용되는 연료는 Bituminous 석탄으로 질소성분이 약 1.4%이고 유황성분이 약 0.8%가 포함되어 있으며, Bituminous 석탄에 대한 자세한 분석자료는 Table 1에 나타내었다. 연소 시의 유동특성 및 NO_x 발생량 등을 수치해석적 방법으로 계산하기

위해 사용된 지배방정식, 수치해석방법과 경계조건을 아래 절에 나타내었다.

2-1 지배방정식

보일러 연소실 내에서는 화학반응을 동반한 유동장이 형성되며, 일반적으로 난류, 상변화/화학 반응 및 대류/복사 열전달을 수반한다. 이와 같은 연소 유동장을 수치적으로 해석하기 위해서는 이와 관계된 여러 방정식들이 적절히 선택/적용되

어져야한다. 본 연구에서는 연소 시 연소실 내의 유동장과 온도분포를 계산하기 위해 질량보존 방정식, 운동량보존 방정식, 에너지보존 방정식을 사용하였으며, 난류모델로는 standard $k-\epsilon$ 모델, 복사모델로는 P1 모델을 사용하였다. 연료에 포함된 각 화학종의 계산을 위해서 화학종 보존방정식을 사용하였고 연료의 연소 시 화학반응 과정을 예측하기 위해서 여러 가지 연료에 대해 광범위하게 사용할 수 있고, 난류확산 화염 및 이와 유사한 화학반응 과정을 정확히 예측할 수 있

Table 2 The equations used in the present calculations

<p>Mass conservation equation</p> $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = S_m$ <p>where, S_m : mass source</p> <p>Momentum conservation equation</p> $\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$ <p>where, $\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij}$</p> <p>Energy conservation equation</p> $\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i h)}{\partial x_i} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} \sum h_j J_j + S_h$ <p>where, $h = \sum m_i h_i$, $h_i = \int C_{p,i} dT$ J_i : flux of species j S_h : chemical reaction, radiation source etc.</p> <p>Standard $k-\epsilon$ model</p> $\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \epsilon$ $\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + G_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - G_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$ <p>where, $u_i = \rho C_\mu k^2 / \epsilon$, $G_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$ $G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i}$ $G_\mu = 0.99$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$</p> <p>P1 model</p> $\nabla(\Gamma \nabla G) - aG + 4a\sigma T^4 = 0$ <p>(※ go to right column)</p>	<p>where,</p> $q_r = \frac{1}{3(a + \sigma_s) - C\sigma_s} \nabla G = \Gamma \nabla G$ $\Gamma = \frac{1}{(3(a + \sigma_s) - C\sigma_s)}$ <p>q_r = radiation flux G = incident radiation</p> <p>Chemical species conservation equation</p> $\frac{\partial(\rho m_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j m_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial(J_{i,i})}{\partial x_i} + S_i$ <p>where, $J_{i,i} = -\rho D_{i,m} \frac{\partial m_i}{\partial x_i} - \rho D_{i,T} \frac{\partial m_i}{\partial x_i}$ m_i : mass fraction of i $D_{i,m}$: diffusion coefficient of i species (lam.) $D_{i,T}$: diffusion coefficient of i species (tur.) S_i : source term of i species</p> <p>Mixture fraction/Probability Density Function</p> $\frac{\partial(\rho \bar{f})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \bar{f})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_f} \frac{\partial \bar{f}}{\partial x_i} \right) + S_m$ <p>where, $f = \frac{Z_k - Z_{k0}}{Z_{kf} - Z_{k0}}$: mixture fraction \bar{f} : time averaging of f</p> <p>NO_x model</p> $\rho \frac{\partial(Y_{NO})}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial(Y_{NO})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D \frac{\partial Y_{NO}}{\partial x_i} \right) + S_{NO}$ $\rho \frac{\partial(Y_{HCN})}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial(Y_{HCN})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D \frac{\partial Y_{HCN}}{\partial x_i} \right) + S_{HCN}$ <p>where, Y : mass fraction of gas phase S_{NO}, S_{HCN} : source term</p>
--	---

Table 3 Pressure drop and heat absorption adapted in the superheater, reheater and economizer

	Pressure drop (mmH ₂ O)	Absorbion (Gcal/h)
Primary superheater	-0.6	76.7
Platen superheater	-2.2	91.8
Final superheater	-1.3	65.3
Primary reheater	-40.4	123.5
Final reheater	-0.6	61.5
Economizer	-49.6	49.3

는 혼합분율/확률밀도 함수 (mixture fraction/Probability Density Function, PDF)를 사용하였다[6]. 이 모델은 각각의 화학종 전달방정식을 푸는 것이 아니라 화학반응에 의해 조성되는 한 개 또는 두 개의 보존 스칼라량인 혼합분율에 대한 전달방정식을 푸는 것으로서 각각의 성분 농도는 예측된 혼합분율을 이용하여 구한다. NO_x의 생성과 소멸을 예측하기 위해서 NO_x 전달방정식을 사용하였다. 사용된 각 방정식들을 Table 2에 자세히 나타내었다.

수치계산은 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) 알고리즘을 사용하는 상용 CFD 코드인 FLUENT 5.4를 사용하였으며 대류항의 차분도식(convection scheme)으로는 1차 상류도식(first order upwind scheme)을 사용하였다.

2-2 경계조건

접선분사형 보일러의 정상 가동 시 입구에서 연료공급량은 172,310 kg/h 이고 온도는 355 K이며, 공기공급량은 1,636,800 kg/h로서 20 % 과잉 공기로 공급되고 있으며 온도는 588 K 이다. 연료와 공기는 총 12개의 연료/공기 버너에서 각각 동일 유량으로 분배되어 공급된다.

보일러 연소실 상부에 위치한 super-heater, reheater 및 economizer는 다공성 매질로 처리되었으며 Table 3에 나타낸 압력강하와 열침(heat absorption)조건을 적용하였다. 연소실 내의 벽면에 대한 조건은 점착조건(no-slip condition)과 등온조건 (713K)을 사용하였으며 벽면에서의 방사율(emissivity)은 0.3으로 설정하였다.

Table 4 Classified calculation cases and air flow rates in the OFA and in Fuel/Air burners

Burner angle \ OFA	0 %	10 %	15 %	20 %
-30°	case 1	case 2	case 3	case 4
0°	case 5	case 6	case 7	case 8
30°	case 9	case 10	case 11	case 12

(a) Classified calculation cases

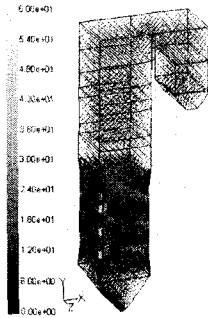
OFA	0.0 %	10.0 %	15.0 %	20.0 %
3rd burner	40.0 %	36.6 %	35.0 %	33.3 %
2nd burner	40.0 %	36.6 %	35.0 %	33.3 %
1st burner	40.0 %	36.6 %	35.0 %	33.3 %

(b) Air flow rates in the Fuel/Air burner for different air flow rates in the OFA burner

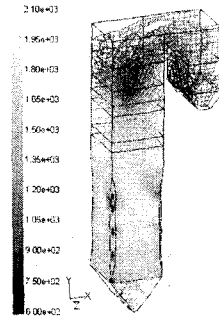
3. 결과

보일러 운전조건에 따른 NO_x 발생량을 예측하기 위하여 OFA 포트와 연료/공기 버너에서 연료/공기의 분사각도의 변화에 따른 계산과 OFA 포트와 버너에 공급되는 공기의 분배 비율(보일러에 공급되는 전체 공기공급량은 일정)에 따른 계산을 수행하였다. 계산 경우에 대한 자세한 분류는 Table 4(a)에 나타내었으며, Table 4(b)는 OFA 포트에 공급되는 공기비에 따른 각 버너에서의 공기공급비를 나타낸 것이다. 각 계산에서 OFA 포트와 버너에서의 연료/공기의 분사각은 동일하게 설정하였다.

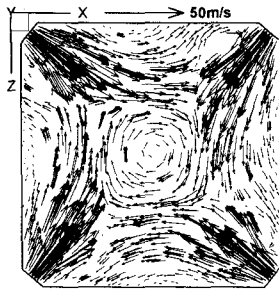
연소실 내의 전체적인 속도분포와 2단 버너 단면에서의 속도벡터를 Fig. 2에 나타내었다. 본 논문의 결과부분에 나타낸 그림(Fig. 2 ~ Fig. 4) 들은 case 6의 계산결과이다. 다른 계산경우의 유동장과 온도장, NO_x 분포형태는 국소적인 차이는 있으나 전체적으로는 거의 유사하였다. 버너 부근과 상부 목(throat)에서의 속도가 크게 나타나며, 상부의 열교환기 영역에서는 중심부의 속도가 벽면에 비해 크게 나타났으며 출구부에 위치한 economizer 영역에서는 상부의 목에서 유동방향이 바뀌면서 외측으로 유동이 크게 휘는 것을 볼 수가 있다. 2단 버너 단면에서의 속도벡터를 보면 각 모서리에 위치해 있는 4개의 버너에서 분사되어진 연료/공기로 인해 중심부에서 커다란 하나의 소용돌이 형태의 유동장을 형성함으로써 연료와 공기의 혼합이 잘 이루어져 화염



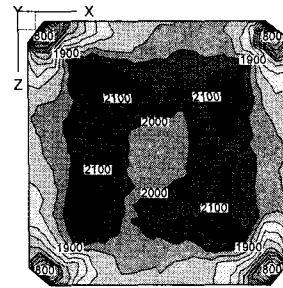
(a) Overall velocity vector distribution



(a) Overall temperature distribution



(b) Velocity vector in the 2nd burner cross section



(b) Temperature contour in the 2nd burner cross section

Fig. 2 Velocity field

Fig. 3 Temperature distribution

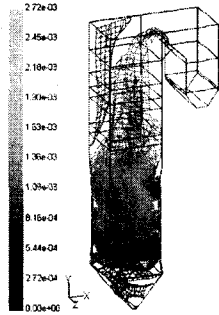
이 연소실 내 전체에 고르게 퍼질 것임을 예측할 수 있다.

연소실 내의 전체적인 온도분포와 2단 버너 단면에서의 온도장을 Fig. 3에 나타내었다. 연소실 내에서 연소로 인하여 높은 온도영역을 형성하며 상부에 설치된 열교환기를 지나면서 점차 온도가 하강한다. 2단 버너 단면에서의 온도장을 보면 연료 버너를 통해 분사된 연료는 공기와의 접촉이 발생하는 계면에서 발화가 일어나 연소실 중앙부에서 화염을 형성하므로 전체적으로 고온영역을 형성한다. Fig. 2에서 본 것과 같이 커다란 소용돌이의 유동장이 형성됨에 따라 최고온 영역이 유동장의 한가운데가 아니라 도너츠형의 영역에서 나타나는 것을 볼 수 있는데 이는 점선분사형 보일러의 유동특성을 잘 반영한 결과이다.

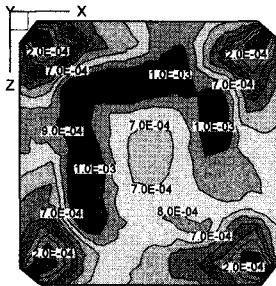
전체 보일러 내에서의 체적평균된 thermal NO_x 의 질량분율(이하 NO_x) 분포와 2단 버너 단면에서의 NO_x 의 분포를 Fig. 4에 나타내었다. NO_x 의 전체적인 분포형태는 Fig. 3에 나타낸 온도분포의 형태와 유사하였다. 버너입구부에 비해

중심부가 큰 값을 나타냈으며, 정중앙부보다는 중앙부 주위의 도너츠형 영역에서 더 큰 값을 나타내었다. 이 결과는 thermal NO_x 의 생성 조건이 고온부에서 생성된다는 것을 나타내는 것이다.

OFA 포트에 공급되는 공기비와 버너에서 연료/공기의 분사각에 따른 출구에서의 체적평균된 전체 NO_x 의 질량분율(이하 NO_x)이 Fig. 5에 나타나있다. 연료/공기의 분사각에 따른 출구에서의 NO_x 의 양을 보면 OFA 포트에 공급되는 공기비가 0%, 15%일 때는 분사각이 증가함에 따라 약간 증가하였으며, 10%, 20%일 때는 감소한다. OFA 포트에 공급되는 공기비의 변화에 대한 결과를 보면 OFA 양이 증가함에 따라 NO_x 의 양이 감소하는 것을 볼 수 있다. 연료/공기의 분사각이 30°이고 OFA 양이 20%인 case 12에서 출구에서의 NO_x 의 양이 최소로 나타났다.



(a) Overall thermal NO_x distribution



(b) Thermal NO_x contour in the 2nd burner cross section

Fig. 4 Thermal NO_x distribution

4. 결론

본 연구에서는 미분탄을 연료로 사용하는 점선 분사형 보일러의 정상가동 시 OFA 포트에 공급되는 공기비의 변화, 연료/공기 분사각의 변화의 운전조건에 따른 연소과정을 수치해석적 방법을 통하여 계산하여 운전조건에 따른 유동특성, 온도분포, 화염형상, NO_x 발생량 등을 예측하였다. 연소유동장의 수치해석을 위해 사용된 방정식과 계산방법은 연소유동장을 예측하는데 효과적으로 적용되었고, 사용된 PDF 모델은 여러 개의 화학종의 전달 방정식을 푸는 경우에 비해 계산시간이 단축되었다.

연료/공기의 분사각이 30° 이고 OFA 양이 20%인 case 12에서 출구에서의 NO_x 의 양이 최소로 나타났다. 현재 본 연구를 통해 얻어진 결과에 대한 면밀한 검토와 OFA 양이 20% 이상인 경우에 대한 연구를 진행하고 있다.

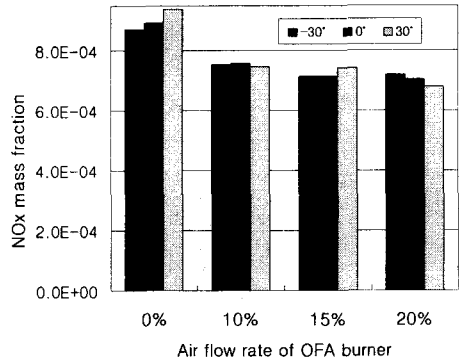


Fig. 5 NO_x mass fraction in the outlet

후기

본 연구는 1999년도 학술진흥재단(중점연구소 지원 과제 : 99-005-E00025) 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) M. Xu, J.L.T. Azevedo and M.G. Carvalho, 2000, "Modeling of the combustion process and NO_x emission in a utility boiler", *Fuel*, vol. 79, pp. 1611-1619.
- (2) 박만홍, 2000, "보일러 열유동 해석과 NO_x 발생예측 및 제거기술(I)", 한국전력기술주식회사 기술개발 보고서.
- (3) G. Liu, H.Wu, R.P. Gupta, J.A. Lucas, A.G. Tate and T.F. Wall, 2000, "Modeling the fragmentation of non-uniform porous char particles during pulverized coal combustion", *Fuel*, vol. 79, pp. 627-633.
- (4) A. Molina, E.G. Eddings, D.W. Pehring and A.F. Sarofim, 2000, "Char nitrogen convection: implications to emissions form coal-fired utility boilers", *Progress in energy and combustion science*, vol. 26, pp. 507-531.
- (5) J.R. Fan, X.D. Zha and K.F. Cen, 2000 "Study on coal combustion characteristics in a W-shaped boiler furnace", *Fuel*, vol. 80, pp. 373-381.
- (6) 김효진, 1997, "석탄가스화 및 난류연소과정에 대한 수치모델링", 한양대학교 석사학위논문.