

패드에 동하중을 증가시켜 마모가 증가되는 원인이 된다. 베어링의 등가 강성과 댐핑이 증가된 베어링 간격과의 관계는 그림 16, 17에 나타나 있다. 베어링 간격이 증가함에 따라 등가 베어링 댐핑, 강성 모두 감소한다. 베어링 간격이 7.5mil에서 18mil까지 변화함에 따라 베어링의 수평 등가 강성은 4.6×10^6 lb/in에서 2.0×10^6 lb/in까지 변하는데 이는 약 57% 감소이다. 유사하게 베어링의 수직 등가 강성은 8.7×10^6 lb/in에서 4.0×10^6 lb/in까지 변하는데 이는 약 54% 감소이다.

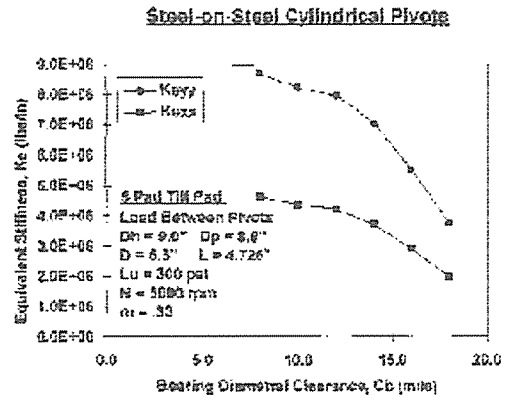


그림 17 등가 베어링 댐핑과 베어링 간격

또한 베어링의 유효 댐핑도 수평 성분이 4.7×10^3 lb/in에서 1.3×10^3 lb/in 변하는데 이는 72% 감소이고, 수직 성분은 7.8×10^3 lb/in에서 2.6×10^3 lb/in으로 67% 감소한다. 만약 베어링 내경이 6.3 Inch라고 하면 일반적인 설계 간격은 약 9.5에서 12.5mil로 된다.(저어널 직경 당 인치 간격은 1.5에서 2.0mil이다)

Steel-on-Steel Cylindrical Pivots

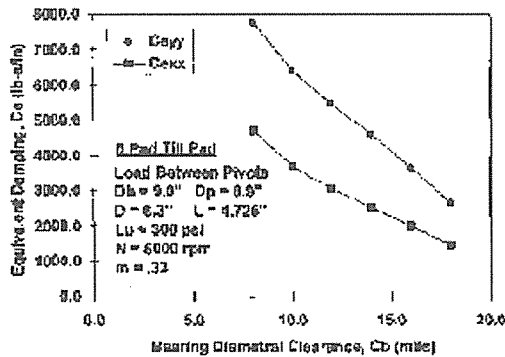


그림 16 등가 베어링 강성 대 베어링 간격

탈질설비 적용사례(보일러, 소각로, 시멘트 설비)



Fuel Tech. Korea
박정봉 이사장
TEL : (0502) 669-7627

1. 개요(ABSTRACT)

Urea(요소)를 사용하는 SELECTIVE NON-

CATALYTIC NOx REDUCTION 장치는, 한국의 Cement kiln이외에 많은 보일러에도 성공적으로 적용되어 있다. 1993년 이후로, Urea SNCR 기술인 "NOxOUT Process" 장치는 상업적으로 250Mwe 발전 용량의 석탄연료 사용 유틸리티 보일러(Coal-Fired Utility Boilers) 2대와, 4대의 석탄을 연료로 하는 공업용 열병합발전 보일러들(Coal-Fired Industrial Co-Gen. Boilers), 10대 이상의 도시생활 폐기물 소각로들(Municipal Solid Waste Incinerators)과 다수의 산업폐기물 소각로들에 설치되어 있다. 또한 단기간의 시험 적용들(short-term tests)은 정유공장의 Process heater, Refinery Package Boiler와 클링커 생산 시멘트

킬른(Clinker Cement Kiln)에 대하여 수행 되었다. 상업적으로 설치된 SNCR 시스템들은 효율 및 모든 요구사항들을 만족시켰고, 이들은 현재 원활한 운전이 계속 되고 있다.

NOxOUT Process(SNCR system)는 각기 다른 Plant에, 각기 다른 운전의 특성과 서로 다른 Design 기술이 적용된다. Plant의 운전 상태가 50%에서 105%까지의 사이에서 급격한 부하변동을 보이거나, 고르지 못한 연료의 성분에 따라 달라지는 연소공정에서도, NOx 배출량 제어를 만족시키기 위한 설비를 Design 해야만 한다. 이를 위해서는 연소설비의 전산 유동해석(Computational Fluid Dynamics Modeling (CFD)과 화학반응해석(Chemical Kinetics Modeling)을 통해서, 반응온도, 반응시간(Residence Time) 그리고 환원제의 분포(Regent Distribution)와 같은 중요한 매개 변수(parameter)들을 동시에 분석하게 된다.

결과물로 얻어지는 SNCR에서의 가장 중요한 다음과 같은 요소를 해석한다.

- * Furnace Temperature, * Residence Time
- * NOx Baseline, * Furnace CO
- * Distribution of Chemical, * NOx Reduction Required
- * NH3 Slip Limit (Operational)

이러한 과정을 통하여 System을 설계하여 그 성능(performance)을 극대화하고, 또한 Plant load cycling에 대응하기 위한 다단분사방법(multi-level injection)등을 적용한다.

산업용 보일러에서의 적용은 기존의 Over-Fire Air System, Low NOx Burner, 또는 Gas Recirculation System등이 설치되어 있는지 분석하고, SNCR에서 발생될 수 있는 부산물인 암모니아 슬립(ammonia slip)들이 보일러 후단 설비에 어떠한 악 영향을 주지 않도록 ammonia slip을 낮게 제어되도록 하였다. 이렇게 설계되고 설치된 NOxOUT Process 시스템들은 폭넓은 적응성(flexibility)과 응용성을 가지게 된다.

또한 Cement 제조 공정에서의 SNCR적용에 대한 장치의 효율을 증명하기 위해, 미국과 유럽 등지에서 장기간의 테스트를 가졌으며, SNCR장치 성능이 Plant의 수 많은 요소(원료배합,연료배합,폐기물연료 연소..등)들에 의해 많은 문제점을 갖는다는 것을 알게 되었고, 이들의 변수를 적절히 조절할 수 있는 방법을 찾아, 대만과 독일, 미국에서 다수의 cement kiln에 상업적으로 SNCR을 공급하였다.

특히 한국의 한일Cement, 성신양회, 그리고 현대 Cement의 전체 Kiln에 적용되어 NOx의 제어가 cement kiln에도 훌륭하고 적절한 적용기술임을 입증 하였다.

2. 서론(INTRODUCTION)

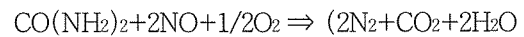
요소(Urea) SNCR은 후-연소(Post-Combustion) NOx 저감 방법이다.

그것은 요소(Urea)를 환원제(reagent)로 하여 분사 주입기(injection)를 통해 화석연료의 연소 보일러들(fossil-fired boilers)의 화실(Furnaces), 소각로(incinerators), 시멘트소성로(cement kilns) 또는 Process heater의 Combustion Gas Path에 적용되어 진다.

일반적으로 SNCR에 사용되는 40~50% Urea Solution은 고체 Urea Prill로부터 사용 현장의 요소 용해조(Urea Solutionizer)를 설치하여 사용될 수 있고, 또는 요소 수(Solution)를 직접 공급 받아 사용될 수 있다.

최초 NOx제거를 위한 요소의 사용은 미국 Electric Power Research Institute (EPRI)에서 연구되어졌고, 미 EPA의 후원 아래 Fuel Tech, Inc.에서는 크고 작은 각각의 규모별로 여러 다양한 타입의 연소에 적용 가능하도록 기술을 연구하고, 발전 시켜왔다.

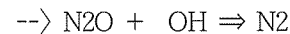
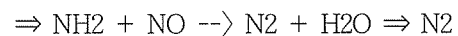
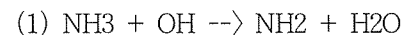
Urea SNCR 반응은 다음과 같다 :



Urea+Nitrogen Oxide+Oxygen

= Nitrogen+Carbon Dioxide+Water

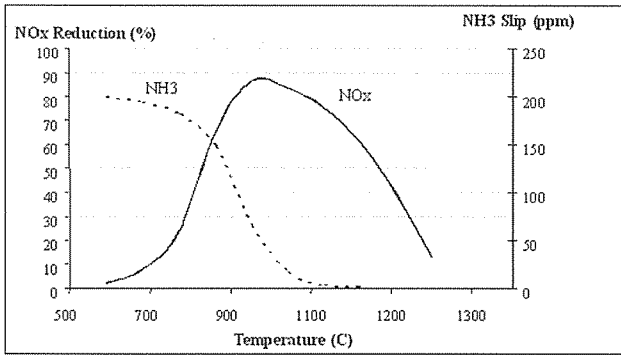
$\text{NH}_2\text{CONH}_2 \Rightarrow$



여기서 주의해야 할 사항은 부산물로 발생될 수 있는 암모니아(ammonia)와 일산화탄소(carbon monoxide)의 양을 제어할 수 있는 적절한 기술이 요구된다.

설비의 성능에 영향을 주는 세가지 중요한 인자는 반응온도, 반응시간, 그리고 반응제의 분포이다. NOx

를 줄이는 반응은 온도와 반응시간에 민감하며, Chemical Utilization에 의한 NOx Reduction은 과도하게 높은 온도에서는 그 효율이 감소하고 오히려 NOx를 만드는 결과를 가져올 수 있고, 보다 낮은 온도에서는 부산물들(By-product emissions)을 발생 시킬 수 있기 때문에 온도와 체류시간(Temperature and Residence Time)이 중요하게 작용 된다. 최적 온도와 체류 시간의 범위는 각각의 Plant 적용에서 각 기 달리 나타난다. 반응제(Regent)를 최적의 영역범위 내에서 최고의 성과를 내기 위해서는 적절한 화학적 물리적 조합이 필요하다.



● Ammonia Slip에 의한 발생 문제점

- $\text{NH}_3 + \text{SO}_3 \rightarrow \text{NH}_4\text{HSO}_4(\text{l}), (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4(\text{s})$
- Formation temperature exists within the air heater
- Ammonium salt deposition increases pressure drop across the air heater
- Ammonia adsorbs on acidic ash

3. 설비의 설계(PROCESS DESIGN)

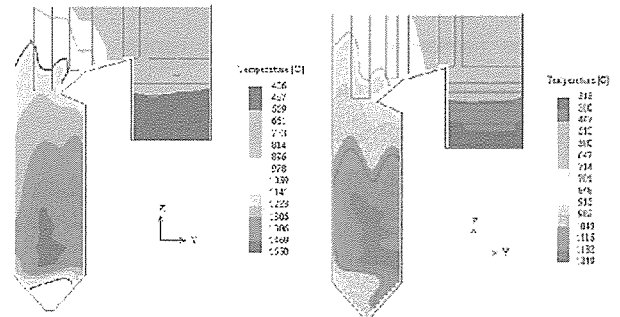
SNCR 시스템은 각각의 용도와 요구 그리고 철저한 Plant의 조사를 기초하여 설계 된다.

현장계측(Field Measurements), Plant 설계자료(Design data) 그리고, 운전자료(Operating data) 등 자료를 수집, 이를 근거로 전산 유동 해석(Computational Fluid Dynamics (CFD) Modeling)을 하게 되고, Flue Gas Flow의 특성과 온도 분포를 예측하고, 화학반응(Chemical Kinetics) Modeling을 하게 된다. 이 CKM은 CFD Modeling으로부터 온도와 Flow Information에 기초하여, Flue Gas 안의 Urea와 NOx의 반응을 모의 실험

을 한다. 이를 토대로 하여 Urea 분사 주입기(Injector) 모델 과 수량을 결정하게 되고, SNCR설비의 구성과 결합 그리고 최적 온도 지역과 injection 전략을 결정 한다.

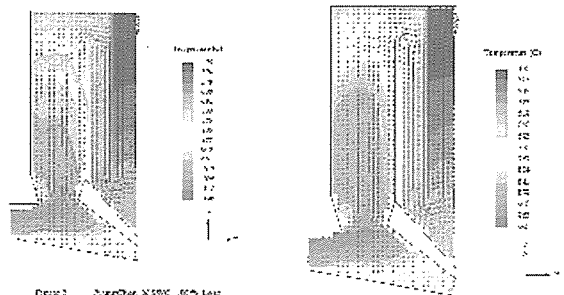
CFD 모델은 다양한 Plant load 범위에 대응하여 분사기의 위치 약품의 Flow와 화실온도에 따른 상시 적절한 운전이 가능하도록 하는 설계의 기초로 활용 한다.

그림 1과 2는 한국 여수에 있는 호남 화력에 설치된 석탄 연소 발전 보일러의 MCR Load와 50% Load의 모델로 Side Selection Temperature Profile을 보여준다. CFD 모델의 Computational Domain은 Furnace Floor에서 시작하고 절탄기(Economizer)를 넘어서 끝난다. 그림 3과 4는, 안양 평촌시에 있는 MSW Combustor의 CFD 결과로 두 가지의 Plant Load를 보여주고 있으며, 이 Modeling은 Grate에서 시작하고, Second Pass에서 끝난다.



<그림 1>

<그림 2>



<그림 3>

<그림 4>

모델의 결과는 현장에서 실측되고, 설계온도데이터(Design Temperature data)와 일치 되어야 된다. NOx Reduction은 일반적으로 낮은 온도에서는 암모니아 슬립에 의해 제한을 받게되고, 높은 온도에서는 Competing Reactions에 의해 제한을 받게 된다. 그것

은 효과적인 NOx Reduction이 아닌 Urea로부터 분리된 NH3가 N2로 전환되지 못하고, NH3 그대로 또는 부가적인 NOx로 전환 됨을 의미한다. 원하는 NOx Reduction 을 위해서 제한된 장치- 적정온도 선정이 CKM모델의 중요한 결과이다.

위에 그림에서 보았듯이, 특정 Load Conditions에서 Chemical Release Windows는 Furnace의 다른 지역 안에 존재하게 되고, 각각 빨간색과 녹색의 구분선은 높고 낮은 온도 한계선을 나타낸다. 요구된 Load Range를 충족 하기 위해 Injection의 레벨 또한 다단 분사까지 이루어 진다.

4. 장치 사양(EQUIPMENT DESCRIPTION)

NOxOUT Process의 설비구성은 Reagent storage tank, Circulation과 Metering Module, Distribution Module, Injectors, 그리고 Control Module로 구성되어 있다. 호남화력 과 구미열병합 보일러를 위한 장치 설계 개념을 그림 5에서 예를 들어 본다. Urea Solution system이 현장에 준비되어 있고, Urea Solutionizer 와 Urea silo를 포함 하고 있다. Tank에 저장된 Urea solution은 Circulation Module에 의해 이송된다. 그것은 각각 호기의 Metering Module Circulation loop에 Reagent를 공급한다. Circulation Pump Module 은 Duplex strainer, Reagent Temperature를 유지하기 위한 In-line Heater를 가지고 있다.

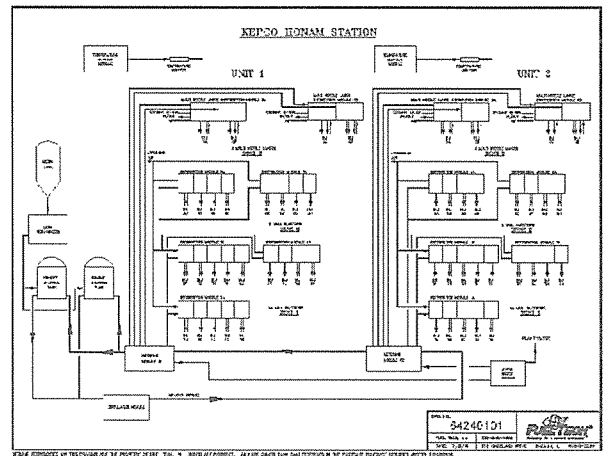
Urea solution은 NOx발생량에 따른 적정량이 계측되는, Metering Module안에서 적절한 Droplet Formation과 Distribution을 위한 Sufficient Mass를 생산하기 위해 물로 희석된다. Metering module은 일반적으로 각각의 Injection level에 단독 공급 되도록 준비하고 있다

희석수와 혼합된 Chemical은 Metering Module을 떠나서 Distribution modules로 이동한다. 여기에서 혼합된 Chemical은 균일하게 각각의 Injector로 분배되고, Injector에서의 무화는 분사공기에 의해 결정된다. 액체(liquid)와 공기는 Mixing chamber에서 초기무화되어(pre-atomized), air-cooled lance를 통해 Flue Gas속으로 운반된다.

SNCR injector는 droplet size, velocity 그리고 distributions에 깊이 관련되어 있다. 모든 Wall injectors는 자동적으로 Boiler wall ports를 통해서 injectors의

끝을 삽입하고 Retract mechanisms에 의하여 자동 복귀한다. Injectors 각각의 레벨은 독립적으로 제어되고, Plant load와 Furnace temperature에 연동하여 배치 및 운전된다. 또한 Boiler Platen super heater 안의 Flue gas path에 8미터 정도 길이의 Multi-Nozzle Lance가 설치되어 진다.

또한 선택적으로 이긴 하지만 Furnace Temperature Monitor는 Flue gas Temperature를 측정하기 위해서 Upper furnace의 Side-walls에 설치되어있다. 이 신호는 SNCR 시스템을 제어하기 위해서 Boiler Steam Flow rates와 함께 사용된다. Control Logic은 Plant DCS Room의 별도 Computer Control Station과 Local의 PLC로 제어 된다.



5. 한국에서의 NOxOUT 설치

NOxOUT SNCR 장치는 한국에서 성공적으로 6대의 석탄 연소 보일러, 12대의 도시 고체 폐기물 소각로들(Municipal Solid Waste Combustors), 액체연료 연소 패키지 보일러(Oil fired package boiler), 다수의 산업폐기물 소각로, 그리고 12대의 Cement kiln에 적용되어있다.

(가) 석탄 연소 보일러들

NOxOUT SNCR 장치는 1999년 9월에 호남화력발전소의 석탄 연소 보일러 2대에 설치되어 있다. 보일러는 50% Load (130MWe)에서 MCR Load (270MWe)사이에서 자동 운전토록 되어 있으며, 각각의 보일러는 Steam Output이 625Ton/Hr이고 상시 운전부하는 Design Steam Output의 80~100% 사이에서 운전된다.

270MWe 보일러

Honam Station Unit 1과 2는 전, 후의 Wall-Fired Burner 석탄 연소로 대략적으로 270MW의 최대 load에서 운전 되고 있다.

각각의 Boiler는 Full load에서 대략 한 시간에 600 - 800톤(tons)의 과열증기를 발생한다. 일반적으로, 알래스카, 호주, 중국 그리고 인도네시아로부터 온 유황(S)함량 0.5% 미만을 가지고 있는 저 유황 Coal이 사용된다.

Boiler 전 후 벽에 12개의 버너가 위치하고 있으며, Platen Superheaters는 Bullnose elevation위 Upper furnace에 위치하고 있다. Platens는 Secondary Superheater tubes와 Screen tubes가 계속된다. 이후 지점에서, Gas Flow는 2개의 Duct로 나누어지고, 각각은 Air Heat Exchange Surfaces를 지나게 된다.

SNCR Injectors는 (2)Two level의 Wall injectors 와 Pendant Super heater안에 위치 하고 있는 Multi Nozzle Lance가 (1)one level이 각각의 Boiler load range를 담당 하도록 되어있다. 여기서 최 하단의 Level 1에 14개 wall injector 와 중간의 Level 2에 8 injectors는 Lode 50%(130Mwe)부터 80% load (180 Mwe) 사이를 담당하고, 80% load (180Mwe)이상에서는 Level 3의 Multi Nozzle Lance와 Level 2의 wall injectors가 담당 하도록 한다, 이때는 Level 1 injectors 는 운전이 중단된다. Plant의 요구는 O₂ 농도 6% 기준으로 400ppm의 NO_x Baseline(초기발생농도)으로부터 40% NO_x reduction이다. 동시에 1.1의 NSR(몰비) 그리고 15ppm보다 낮은 NH₃ slip을 만족시켜야 했다. 이러한 요구들은 1999년 9월과 2000년 4월에 2차의 성능시험을 통해 검증되었다.

Test 방법은 ID Fan과 Stack사이에 있는 Duct에 위치한 NO_x 와 O₂ 분석기와 그리고 Flue Gas volume을 측정하고, 암모니아는 SNCR운전기간 동안

Economizer Outlet Ports를 이용하여 측정된다. 따라서 각각의 NSR 1.1이하 에서 10ppm보다 낮은 NH₃ 를 가지고 각각의 호기에 46%와 44%의 NO_x Reduction을 보였고, Full load 테스트 요약은 <표 1>에서 보여진다.

KEPCO 호남 화력(Honam station)1, 2호기에 설치된 Urea-Based SNCR 시스템은 모든 요구를 충족시켜왔다. SNCR 시스템은 지난 4년 동안 운전 되어오고 있고, 부산물 (암모니아 슬립 등)로부터 Air Pre-heater Fouling등의 문제는 이 기간 동안 보이지 않았다.

(나) 산업용 보일러들 (Industrial Boilers)

구미 열병합발전소에서 업계 최초로 3대의 석탄 연소 보일러에 NO_xOUT SNCR장치가 설치되었다. 1,2 호기는 Front Wall에 9대의 Burners를 가지고 있는 Identical Wall-Fired Boilers이다. 이 Plant는 유연탄(미분탄)을 연료로, 시간당 225톤의 과열증기를 각각 발생시킨다. 3호기 또한 Front Wall에 9대의 Burners를 가지고 있는 Wall-Fired Boiler이지만, 시간당 200톤의 포화증기를 발생시킨다. 1, 2호기는 Platen Superheaters가 Bullnose Elevation위에 Upper Furnace에 달려있고, Over Fire Air(OFA) 시스템을 가지고 있다.

여기에 적용된 NO_xOUT 설비는 1, 2호기 에서는 6% O₂기준에서 NO_x Baseline 700ppm으로부터 53%의 NO_x Reduction과 20ppm보다 적은 NH₃ slip을 충족시키기 위해 각level 당 4개의 Wall injector로 구성된 (5) Five level로 되어 있다.

3호기는 6% O₂기준에서 NO_x Baseline 550ppm으로부터 40%의 NO_x Reduction과 15ppm보다 적은 NH₃ slip을 충족시키기 위해 각level 당 4개의 Wall injector로 구성된 (3)level로 되어 있다. 이때 Reagent

<표 1> Full Load (250 MW) Performance Test Results

	Unit #1		Unit #2	
	Test 1	Test 2	Test 1	Test 2
Baseline NO _x , ppm(O ₂ ,6%)	462	384	416	333
Controlled NO _x , ppm(O ₂ ,6%)	271	230	244	208
NSR	1.1	1.1	1.1	1.1
NO _x Reduction (%)	41.4	40.1	41.4	37.4
NH ₃ Slip, ppm(O ₂ ,6%)	9.8	2.6	4.0	2.9

Flowrate는 1.9의 NSR에 제한된다. Load Range는 80~100% 사이의 Design Flowrate이다. Injection location은 Temperature와 Flue gas Species의 Field Measurements에 근거한 Computer Modeling Study로부터 결정되었고, Utility Boiler 적용과 유사하게, Multilevel Injection은 높은 NOx Reduction 및 Load Swing을 달성해왔다.

High load에서는 (3) Three Upper level의 Injectors가 사용되고, Low load에서는 (2) Low level의 Injectors가 사용된다. 장치는 각각의 호기가 독립적인 Reagent Flowrate 제어와 함께 Injection levels까지 독립적으로 운전될 수 있도록 설계되었다.

NOxOUT SNCR 장치는 2001년 8월에 1,3호기에 설치되었고, 2002년 2월에 2호기에 설치되었다. 시스템의 성능 시험은 1, 3호기는 2001년 9월에, 2호기는 2002년 3월에 통과되었다. 이들 장치는 현재 정상 운전 되고 있고, Plant에 있어 어떠한 충돌 없이 계속되는 NOx Control을 하고 있다.

(다) 도시 고체 폐기물 소각로들 (Municipal Solid Waste Combustors)

NOxOUT SNCR 장치는 특별히 도시 고체 폐기물 소각로들에 잘 맞춰져 있다. 대부분의 MSWC와 소각로(incinerators)는 2초 동안 유해 화합물(hazardous compounds)의 연소를 끝내는 850°C보다 높은 온도에서 Flue Gas를 유지하기 위해 설계되었다. Fuel Tech에 의해 조사된 대부분의 MSWS들은 Combustion Zone의 출구에서 1000°C에서 1050°C 사이의 온도를 가진다. 그러면 Flue Gas 온도는 First Pass의 꼭대기에서 대략 850-900°C로 감소한다. 이러한 Post Combustion Zone에서 전형적인 Residence Time은 2초에서 3초 사이이다. 비교해보면, Residence Time은 유틸리티 보일러에서는 900°C에서 1200°C사이일 때 0.2

초 보다 더 짧다. Post Combustion Zone의 First Pass에서 온도와 Residence Time의 좋은 결합은 높은 NOx Reduction과 Chemical Utilization을 보여준다.

유틸리티 보일러와 다르게, MSWC에서의 Combustion 환경은 다양한 연료조성 때문에 빠르게 변화한다. 폐기물의 Heating value와 질소 함유량(Nitrogen Content)을 예측할 수 없고, 수분 함유량(Moisture Content)은 계절마다 그리고 날씨 환경에 따라 변한다. 폐기물 저장조(pit)의 아래쪽에 축적된 폐기물들도 새로 반입되는 폐기물들과 다르게 연소한다.

산업(Industrial), 가정(Household) 그리고 건설(Construction)과 같은 폐기물 근원은 또한 연료 질과 그것을 태우는 방법에 큰 영향을 준다. 모든 이러한 요인들은 Post Combustion Zone에서 100°C 이상의 변화(Fluctuations)는 정상적인 MSWC의 운전상태 아래에서 조차도 대략 50ppm이상의 초기 NOx 변동폭을 일으킬 수 있다.

Furnace Temperature에 기초한 SNCR 장치 제어를 NOxOUT 장치와 연동하여 보다 제어성을 향상 하고자 Flue gas temperature를 측정하는 광학 온도계(optical pyrometer)를 시스템과 통합하고, Pyrometer Signal과 Steam Flowrate는 Chemical injection rate와 Injection location을 제어하기 위한 Feed-Forward signal로 사용되었다. 이로서 15ppm보다 적은 NH3 slip에서 대략 75%로 NOx Reduction을 향상시켰다.

NOxOUT SNCR장치는 100T/D부터 250T/D까지의 MSW 처리량의 범위에서 10여대 이상의 MSWC에 설치되었다. 목표 NOx control level는 12%의 O2에서 Baseline 200ppm의 NOx에서 50ppm이하로 제어하도록 되어 있다. 하지만 실제적인 NOx Baselines은 일반적으로 140~160ppm사이에서 발생되었다. <표 2>는 한국의 MSW적용 목록이다. 높은

<표 2> NOxOUT Process on MWCs in Korea

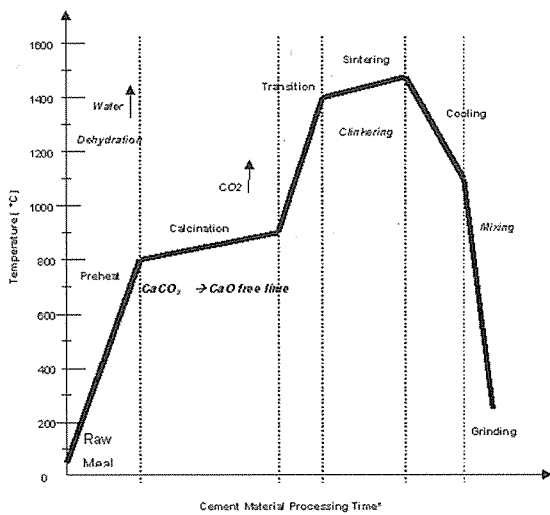
	Size	NOx Reduction	Ammonia Slip	Installed Date
MokDong MSW Plant	150 TPD	70%	<10 ppm	1995
Kwang Myung MSW Plant	2 x 150 TPD	70%	<10 ppm	1998
Pyung Chon MSW Plant	200 TPD	70%	<10 ppm	1998
Ansan MSW Plant	2 x 200 TPD	75%	<10 ppm	2000
Taian MSW Plant	50 TPD	75%	<20 ppm	2003
Mapo MSW Plant	2 x 250 TPD	75%	<15 ppm	2004

NOx Reduction을 이루기 위해서, (3) Three levels의 Injection과 광학온도계와 함께 향상된 장치 제어방법이 대부분의 Plant에 적용 설치되었다. 목동과 평촌 MSWC는 NOxOUT SNCR장치를 Retrofit 되었고, 광명, 안산, 마포, 및 평택 Plant에는 신규였다. 이 중 소각로가 사용 중지된 목동을 제외한 모든 설비는 정상운전을 계속하고 있다.

(라) Cement Kilns

Cement Kiln에서의 NOx(nitrogen oxide) 발생량은 <그림 6>에서 보이듯 Clinker를 형성하기 위한 고온의 화염 때문에 kiln으로부터 많은 양의 Thermal NOx가 발생된다. Precalciner에서 대다수의 heat input이 이루어지는 현대적인 kiln에서도 고온 층을 갖기 때문이다. Cement Plant에서의 대부분 NOx의 발생은 공기 중에서의 산소와 질소(nitrogen)가 산화한 반응이며, 이것은 Thermal NOx라 불리고, 이 물질은 고온에서 생긴다. 추가적인 NOx는 연료와 Nitrogen-Bound Raw Mix 등의 Fuel NOx라고 불리는 것으로부터 발생한다. Fuel NOx는 연료와 Raw Mix에서 질소 함유 혼합물(Nitrogen-Containing Compounds)의 Concentration에 달려있다.

<그림 6> Heat Requirements of a Preheater/Precalciner Cement Processing System.



현대적인 고효율 cement 제조 장치(manufacturing process)는 kiln, Multi-cyclone Preheaters 그리고 Calciner vessel을 포함하고 있다. Kiln의 Hot End의 Clinker cooler로부터 나오는 뜨거운 공기는 Tertiary

Hot Air duct parallel에 의해 Kiln으로 이동 Combustion air로 사용된다. Preheater/precalciner 설계는 전체의 연료 요구의 65% 혹은 더 높은 양을 담당하게 되고, Raw Mix가 Kiln에 들어가기 전에 Calcinations의 80-90%를 담당 할 만큼 복잡 다양한 기술을 복합사용하고 있다. Cement Plant에서 NOx 발생 및 제거를 위한 제어는 시멘트 제조 장치와 결합된 다음의 다양한 특성들 때문에 오히려 복잡해진다:

- Multiple heat와 Fuel sources를 갖춘 발전된 Multi-staged Heat Processing과 Combustion
- Raw Mix성분에서의 높은 차이점(High diversity in the constituents of raw materials)
- 시스템 속에서의 다양한 농도 및 내부 순환 (Various cycles of concentration buildup in various parts of the systems)
- Counter-current gas와 solids flows와 흡착력의 다른 정도와 raw mix와 clinker에서 gaseous 성분의 release)

한국에서는, 최초로 동양시멘트의 단기간에 걸친 테스트는 1997년 6월에 시행되었다. 휴대용 테스트 장치를 이용, 50% urea를 사용하여 calciner의 rising duct안에 기존의 ports를 통해 주입되었다. NOx는 대략 0.8 NSR에서 30%로 그리고 1.8 NSR에서 45%로 감소되었다. 이 Test를 통해 40%-50%의 감소는 1.0의 NSR에서 이뤄질 수 있도록 Design이 가능함을 낙관, 13%의 O2에서 350ppm인 대기환경법규 준수를 위한 가능성이 이뤄질 수 있었다. Cement Plant에서는 Injection port locations는 key process parameter이다. Coal combustion이 도중에 직사각형의 모양의 rising Calciner가 생기면서, 이 영역(zone)을 피하는 chemical injection은 NOx 감소에 있어서 효과적이다. Calciner의 상층부 근처에 있는 기존의 ports에서 가장 많은 감소를 보여주었지만, port location은 제한된 반응물 분포(limited reagent distribution)를 주었다. 이러한 Port Test는 CFD 모델에 따른 상세한 테스트 프로그램(Detailed test program)을 위한 NOx Reduction효율 향상을 위해서 추천되었다. 이후 2003년 과 2004년인 지금까지 국내의 한일시멘트, 성신양

<표 3> NOxOUT Application Situation of Three Cement Kiln Systems.

	Kiln A	Kiln B	Kiln C
Production, m.t./day	2200	3200	5000
Flue Gas Flowrate, Nm ³ /hr	204000	458400	350400
Heat Ratio, Kiln:Caliner (%)	55 : 45	37 : 63	40 : 60
Heat Input to Kiln (Kcal/hr)	4.5 x 10 ⁷	4.3 x 10 ⁷	6.8 x 10 ⁷
Heat Input to Caliner (Kcal/hr)	3.6 x 10 ⁷	6.5 x 10 ⁷	10.2 x 10 ⁷
NOx Baseline, ppmd 10%O ₂	480	590	344
Controlled NOx, ppmd 10%O ₂	260	325	260
% NOx Reduction	46%	45%	24%
Normalized Stoichiometric Ratio	1.4	1.3	0.7
NH ₃ Slip, ppmd 10%O ₂	15	15	15
CO at Kiln Exit, %	0.06	0.01	negligible

<표 4> Achieved SNCR Performance

Performance Test	Kiln A		Kiln B
	I	II	
Cement Production, m.t./day	2170	2170	3302
NOx Baseline, ppmd 10%O ₂	412	389	525
Controlled NOx, ppmd 10%O ₂	203	185	284
% NOx Reduction	51%	52%	46%
Normalized Stoichiometric Ratio (NSR)	1.30	1.30	1.27
NH ₃ Slip, ppmd 10%O ₂	< 5	< 5	< 5

회, 현대시멘트의 전체 Kiln에 NOxOUT SNCR이 적용되어 성공적으로 운영되고 있다. 이렇게 성공적일 수 있는 기술적 축적은 1998년에, NOxOUT SNCR장치를 대만에 있는 3대의 Cement Kilns에 설치되었기 때문이다.

대만의 Cement Kiln에서의 NOxOUT SNCR System 적용은 대만 자치 지역 규정(Local Regulation)에 의해서 NOx발생 부과금 면제와 자금 지원 Program을 이용해 추진되었다.

이 시스템은,

3대의 Coal-Fired Kiln은 Preheater / Precaliner를 갖추고 있고, Kiln Design Type은 Kilns A와C는 SP였고, Kiln B는 RSP Type이었다.

Operation Parameter는 표 3과 같다.

Kiln A는 (4)단계의 싸이클론 예열기(Four-Stage Cyclone Preheater)를 갖추고 있다. 그곳은 Last

Cyclone Exit에서 온도가 대략 850-870°C이다. Kiln B는 (2)세트의 싸이클론(Two Sets of Cyclones)을 가지고 있고, (1)세트는 Caliner side에 있고, 다른 (1)세트는 Kiln side에 있다. Last cyclone exit의 온도는 Kiln side에서 800-820°C이고, Caliner side에서 870°C이다. Injection 방법은 Multi-level injection을 선택하였다.

물론 이를 위해 Chemical Kinetic Modeling(CKM)과 Computational Fluid Dynamic Modeling(CFD)을 시행하였으며 그 Output을 사용한 것이다.

성능확인(performance test) 표 4에 나타난 것과 같이, 목표성능(Target process performance)보다 더 나은 결과를 보여준다. 기초설계(Basic design)와 비교하여, NOx Reduction rate는 더 높아졌고, 암모니아 슬립은 더 낮아졌으며 그리고 사용된 반응제(Reagent flowrate)사용은 더 낮아졌다. 더군다나, 이 성능 시험

(Performance test)이 진행되는 동안 Kiln 에서의 생산량은 변함이 없었다. Performance test이후 운전이 계속되어온 지난 5년 동안 특별히 Cement 품질 (quality), Cement 생산(Rate of Cement Production), CO(CO Emissions) 그리고 석탄 소모(Coal Consumption)에서 변화가 없었다. 그것은 SNCR 운전자로 인하여 Plant에 미치는 영향이 하나도 없다는 것을 확실히 했다.

NOxOUT SNCR 시스템의 시멘트 제조설비와의 조합은 Cement Plant 발생하는 NOx를 가장 효과적인 방법으로 제거 되어야 한다. 최종적으로 달성 가능한 SNCR NOx Reduction을 위해 완전한 SNCR System 설계는 Reagent의 경제적 사용과 함께 만족한 성능, 그리고 설비의 유연성(Flexibility)를 가지도록, 실제적인 Plant 운전 요소들을 고려(Considerations of real process operating parameters)해야 한다. 적절한 자동 제어 능력과 Emissions의 정확한 제어를 통해 그 결과가 연속적이고 확실하여 Cement 생산에 영향이 없이 운전되게 하였다.

6. 결론(CONCLUSIONS)

그간 한국에서 Urea에 기초한 SNCR 시스템은 석탄 연소 보일러와 고체 폐기물 소각로 등에 효과적인 NOx 저감을 계속해왔다. 한국에서 실행된 단기간 테스트와 대만에서 이루어진 상업적으로 설치된 SNCR 이 Cement kilns에서 실용적인 NOx 제어 기술이라는 것을 확립했고, 한국의 전체 Kiln에 적용을 무리 없이 진행할 수 있었다. 지금까지의 Urea SNCR의 경험상 Plant 운전에서 중요한 장치 충돌은 관찰되지 않았다. 현재 미국에서는 SCR에서의 Regent를 암모니아에서 Urea로 점차적으로 바꿔 나가고 있다. 이는 Retrofit(기존설비적용) Plant를 위한 NOx저감기술의 선택이 대단히 중요함을 알 수가 있다.

충분히 고려 되어야 할 모든 요소들은

NOx저감 요구치를 충족시키거나, 잠재적 시나리오 분석, 수행 등을 계획할 때, 시스템 특성을 잘 이해해야 하는 문제가 대두될 것이다.

그리고 이러한 문제는 각기 서로 다른 연소시스템이나 Plant에 그 특성이 일치하지 않을 수도 있다. 때로는 그 문제들이 동일 Plant의 동일한 연소 장치에 대해서 조차 다르다. 많은 서로 다른 시스템들 중

에서도 필수적으로 공간성, 안전성, NOx 유연성과 같은 중요한 요구사항들을 가지고 있다. 올바른 결정을 위해, 기획자들과 의사 결정자들은 다른 구성 요소들과 관계된 필수적이고 더욱 중요한 변수를, 더 높은 우선순위로 결정해야 한다. 어떠한 설비로부터 고려해야 할 사항들이 공통으로 다른 설비에 적용될 수도, 안될 수도 있다. 이러한 상황을 직시 하여 Option을 평가하고, 적용의 우선순위를 결정하고, 상황에 맞게 의사를 결정해야 한다. 우리는 기술의 이해와 투자이익의 증진, 또한 더 나은 계획과 개선에 도움을 주기 위해, 이 들 문제를 기초로 한 기술적용 및 투자자의 우선순위들 중에서 몇몇에 대해 간단히 약속한다면,

- NOx Compliance - 장, 단기 NOx 규제정책 모두에 대응하는 유연성을 고려 앞으로의 변할 수 있는 정책에 대비 향후 확장이 쉽고 가장 경제 적일 수 있는 대안이 필요한 것이다. SNCR NOxOUT 또는 SNCR/SCR HYBRID-NOxOUT CASCADE 시스템 등을 이용한 2004년 이후에 다가올 NOx 규제 기준을 충족시킬 수 있을 것이다.
- 안전성 - 환원제의 사용 선택에서 부과적으로 누설 관점에서, 암모니아 수송은 특별히 새로운 주의를 받는다. 왜냐하면, 수송중인 암모니아는 지역사회를 위협하는 잠재적 요소를 가진 물질이기 때문이다. 그리고 선택적 촉매 NOx저감 (SCR)방법과 SNCR/SCR HYBRID-NOxOUT CASCADE 시스템에서도 사용되는 환원제가 제거된 되고 있다.
- 가격 - 적용기술의 설비가격과 운전 유지보수 비용을 비교할 때, Retrofit Plant 서는 종종 다른 요소들이 지배적 역할을 할 때가 있다. 이러한 다른 요소들은 일반적으로 Plant정지 및 운전의 시간 과 기동정지의 빈도수, 설치 공간의 가능성, Plant의 구조적 증강의 필요성, 통풍 균형 수정가능 여부, Fouling, 유지 와 Plant의 수명과 관계되어 있다. 이 경우 등을 고려 생산성과 전력 손실이 가장 크게 역점을 두고 검토해야 할 것이다.