

Implementation of Model Predictive Control

Samir Pandya

<Westinghouse Process Control, Inc.>

1. 개 요

시멘트산업에서의 생산성은 지속적인 이익을 내기 위한 중요한 요소이다. 최대 생산량을 요구하는 시점에서의 운전비용 감소와 전체 운전 효율을 높이는 것은 24시간 연속 운전되는 시멘트 산업에서는 전체적으로 상당히 중요한 요소이다.

Model Predictive Control(이하 "MPC")은 Emerson Process Management사에서 개발한 최적의 소프트웨어로서 시멘트 생산공장의 요구 사항에 맞춰 개발되었으며, Mill optimizer와 Kiln optimizer와 같은 2종류의 모듈이 있으며 이에 대한 Software사양과 적용사례를 아래와 같이 기술하였다.

2. Mill Optimizer

2.1 개 요

MPC Mill optimizer는 시멘트 폐순환 raw meal과 최종 분쇄 공정을 위한 최적의 MPC 다변성 소프트웨어이다. Mill optimizer는 공정 내에서 최초 원료투입량과 분류기의 운전 파라메타의 감시제어를 하며 제어목표치를 운전원이 정한 값 이내에서 다양한 전체 공정을 유지시키고 생산품의 질적 요구량과 제어 목표치 사이에서 최적의 목표치에 적합(에너지 소비를 최소화)하도록 만들어 준다.

Mill Optimizer는 또한 'softsensor'라는 소프트웨어를 사용하여 최종 생산품의 세밀한 품질 변화를 on-line으로 생산품의 품질 파라메타를

나타내어 평가하기도 한다.

Mill Optimizer는 최소의 운전원 개입으로 공정을 원만하게 운영하는게 주된 운영이익이라 할 수 있다.

<특징>

- 최상위 Level에서의 예측제어
- on-line 에서 생산 품질을 나타내는 softsensor의 사용
- 신속한 공정의 안정화
- 기존 제어 시스템과의 쉬운 결합
- 빠른 설치와 시운전
- 쉬운 tuning과 사용자에게 친숙한 공정화면

<운영이익>

- 공정 내 처리용량의 평균치를 높임
- 유지보수의 기대치를 높임
- 에너지소비량의 감소시킴
- 변동이 심한 처리용량과 생산품의 품질을 안정시킴
- 전체 중요 공정기기의 원활한 운전

2.2 Configuration

<Software 요구사항>

- Operating system : Windows NT
- Control Software : API application(FIX32[®]와 DCS Application software)
- API communication driver

<Hardware 요구사항>

- DCS
- DCS Network device
- Mill Optimizer supervisory receivers
- DCS와 연결 가능한 전자식 Field Instruments
- 기존시스템이 PLC일 경우에는 일부 항목은 DCS로 upgrade하여야 됨

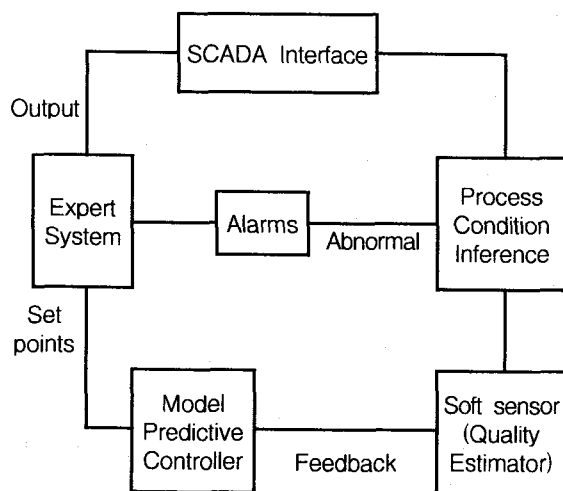
2.3 Package and Customization

Mill Optimizer 제어시스템 Package는 기본적으로 아래의 software들을 포함한다.

- Mill Optimizer application software
- Mill Optimizer training simulator software
- Mill Optimizer user manuals
- API software with communication drivers
- Mill Optimizer computer with all software loaded and tested

2.4 Control Methodology(Control 방법론)

Mill Optimizer controller는 다음의 module들로 이루어진다



<Process Condition Inference Module(PCI)>

PCI module은 어떤 방해요인(예를들면, 원료 투입 또는 수분함유량 등의 변화)이 공정에 영

향을 주는 작용을 할 때 운전원들과 기술자들이 널리 사용한 추천규칙을 포함하고 있어서 방해요인 보다 MPC module이 보다 빠르게 값들을 조정하여 탄력적인 운영을 한다. 또한 PCI module에서 받은 data를 토대로 다음 제어 사이클들이 MPC 또는 expert system을 경유한다.

<Model Predictive Control Module(MPC)>

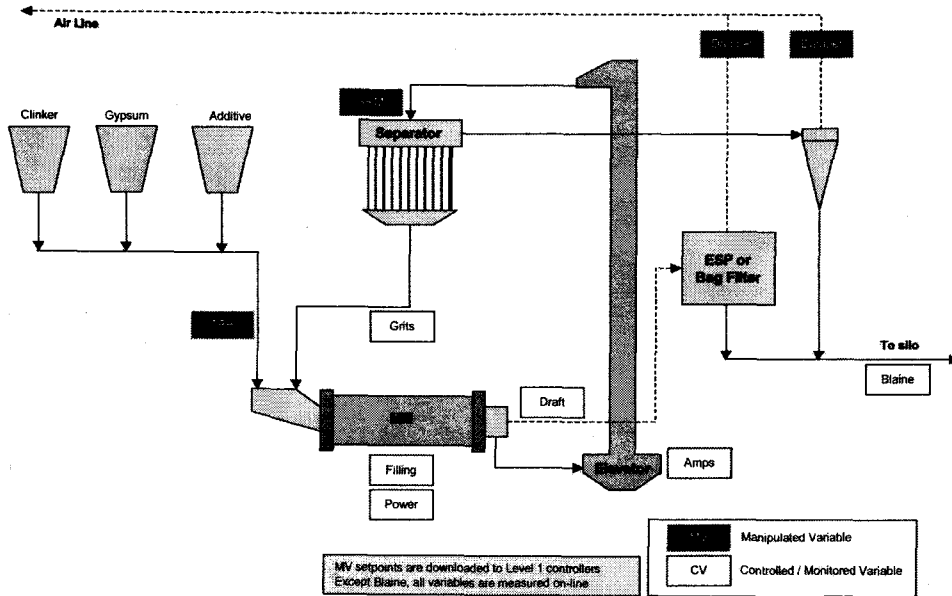
PCI module에서 운전상태를 'normal'로 결정하면, MPC는 다음 제어사이클을 동작시키고, MPC module은 분쇄공정의 MVs와 관련된 CVs의 동적 다변수 model을 사용하여 campaign 기간 중 수집한 플랜트 data를 토대로 개발되어졌다. 공정의 전체 운전영역을 커버하기 위한 적합한 Model은 각각의 근거있는 운전영역의 부분집합과 충분히 큰 모델 설정으로 정의되어진다. MPC 알고리즘은 예측 제어용으로 사용하는 모든 model 출력에 가중된 평균치를 사용한다. 모델 가중치는 어떤 순간의 운전 point를 결정하여 동적인 on-line상에서 계산을 한다.

<Expert System for Abnormality>

PCI module에서 운전상태를 'abnormal'로 결정하면, alarm이 발생되고, expert system은 다음 제어사이클을 일으킨다. expert system은 MPC에 대한 전단의 Processor module이다. 이 module의 기능은 비정상 process 상태를 감시하고, 상황에 적절한 빠른 수집활동을 하지만 process model에 의해 적절한 기술을 하지는 않는다. On-line expert system은 운전원의 정상운전 행동을 기본으로 한 규칙을 가지고 있다.

<Softsensor>

On-line 측정을 하지 않았던 분쇄공정 중 몇 개의 중요한 제어 변수가 있다. 이중 마지막 제품의 정밀도(Blaine 또는 residue)는 대개 가장 중요하다. Softsensor는 process data를 MPC에서 제어 계산을 위한 feedback으로서 제품의 정밀함을 평가하기 위해 사용한다.



예측모델이 실험 값의 경향으로 보여진다면 이것은 또한 실험실에서 분석 data로 사용하는 모델 파라메타들의 정밀도를 update하기 위한 값으로 사용되어지기도 한다.

Cement mill circuit에 대한 Mill Optimizer의 전형적인 제어 구성도는 위의 그림과 같다.

2.5 Mill Optimizer Performance(Mill Optimizer 수행)

Mill Optimizer는 인도의 몇 개의 큰 시멘트 플랜트에서 Raw mill 뿐만 아니라 Cement Mill에서도 사용 중이다. 두 개의 시멘트 mill과 두 개의 Raw mill의 수행 결과는 아래와 같다.

performance summary	mill 1	mill 2
수동 control 평균 생산량(tph)	106.00	114.00
Mill Optimizer 평균 생산량(tph)	115.00	125.00
수동 control 평균 SEC(kWh/ton)	34.20	34.15
Mill Optimizer 평균 SEC(kWh/ton)	31.90	31.80
생산량 향상(tph)	9.00(8.5%)	11.00(9.6%)
SEC(kWh/ton) 감소	2.30(6.7%)	2.35(6.9%)
에너지 절약 비용(USD/년)	104,700	116,300
Mill Optimizer 추가된 생산	53,460	65,340

Basic & assumptions:

- ◆ 에너지 비용 : USD 0.06 / kWh
- ◆ Mill 가동시간 : 6,600hr/년
- ◆ Mill Optimizer 가동시간 : 90%

<Case 1 : Finish Grinding>

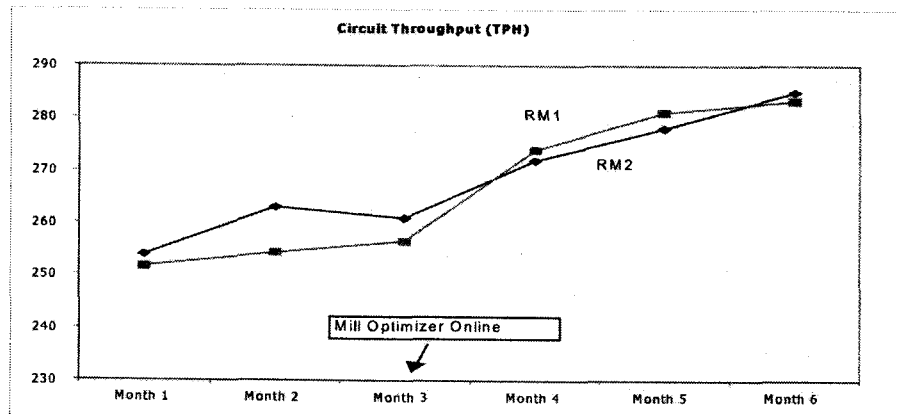
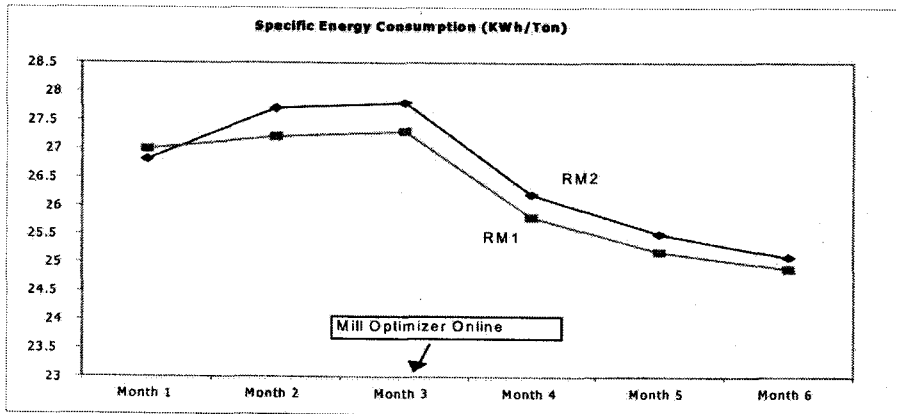
- 플랜트 위치 : 북인도
- 플랜트 용량 : 1,200,000 TPA clinker
- 혼합 제품 : PPC
- Mill 용량 : 개당 110 tph 2 mill
- Circuit : 고효율 분리기와 closed circuit 2-chamber tube mill
- 평가주기 : 1년

이 실행은 몇 달 동안의 비용절감을 돈으로 전환한 것이다. 추가로 Mill의 운전을 더욱 부드럽게 하는 무형의 이익을 얻었고 Blaine질의 변화량을 감소시켰다.

<Case 2 : Raw Grinding>

- 플랜트 위치 : 중앙인도
- 플랜트 용량 : 2 plants, 각 1,200,000 TPA clinker

Performance Graphs



- 혼합 제품 : PPC and OPC
- mill 용량 : 개당 275 tph, 2 mills
- circuit : 고효율 분리기와 closed circuit
2-chamber tube mill
- 평가주기 : 3 개월
- 운영이익
 - 분쇄량이 8% 증가
 - Specific Energy Consumption이 6.75% 감소
 - Consistency in output quality :
SD of +212 μ residue reduced by 12%
 - Improved clinker quality : SD of free lime content reduced by 12%
 - Mill 생산능력과 부드러운 운전효과 개선 (엘리베이터와 세파레타의 과부하 방지 및 Mil Jamming 방지)

3. Kiln Optimizer

3.1 개요

Kiln Optimizer는 관리자 제어와 시멘트 rotary kilns의 최적화를 위한 진보적인 제어 package이다. 시멘트플랜트의 rotary kiln에서 clinker화하는 공정은 비 선형으로 상호 작용하는 공정으로 투입량과 공정의 최종 생산품에 열회수 system을 제공하기 때문에 자연스런 높은 순환율을 가지고 있다. 그 특징으로, 중요한 process 변수의 직접적인 측정의 결여 뿐만 아니라 시스템의 시간적 지연이 함께 이루어져 있어, 기존의 controller에서 확실히 규정 지을 수 없는 복잡한 control 문제가 야기된다.

Kiln Optimizer는 rotary kiln, pre-heater, pre-calciner 그리고 cooler에 대한 관리 제어를 제공하는 expert system에 기초를 둔 강력한 fuzzy logic을 사용한다. Expert system은 검증된 제어 규칙에 있는 pre-define된 것을 토대로 하고 있고, 플랜트를 위한(control의 운전자 model) 'best practice'로 확인된 것을 토대로 각각의 application을 주문에 맞게 만들어 내었다.

Controller는 clinker 잔재의 무게를 평가하기 위해 on-line 제공하는 새로운 종류의 고품질 softsensor를 설치했다. 이것은 품질 면에서 Control Loop의 적절한 종결을 허용하여, 양질의 control을 관리하여 생산량과 에너지소비에 적합한 생산품을 이끌어 낸다.

<특 징>

- State-of-the-art software
- Fuzzy logic을 바탕으로 하는 expert system
- Clinker 잔재 무게와 석회석을 on-line 평가를 위한 softsensor Control hardware의 간단한 조화
- 빠른 설치와 시운전 간단한 tuning
- 사용자에게 친근한 화면과 process mimics
Operational Benefits(운전이익)
- 생산량 향상
- 연료 소비율 감소
- Clinker 질 유지
- Kiln 안정화
- 모든 중요한 process 단위의 매끄러운 운전

3.2 Configuration

<S/W 요구사항>

- OS : Windows NT
- Control S/W : API interface를 지원하는 Windows application
(표준 환경은 Intellution FIX 32[®])
- 통신 : API 통신 driver

<H/W 권장사항>

- DCS
- DCS Network Device

- Kiln Optimizer supervisory receivers
- Control system과 연결 가능한 전자식 Field 계기

3.3 Package and Customization

<기본적인 control system package>

- Kiln Optimiser 응용 S/W
- 사용자 매뉴얼
- 통신 driver를 가진 API S/W
- 모든 S/W를 미리 부르고 테스트되는 감독자적인 control computer
- operator와 engineer를 위한 트레이닝 프로그램

3.4 Implementation Plan and Project

Modalities

Kiln Optimizer의 운용자 model은 운용과 klin 운용에 'best practice'를 구성하는 control 규약을 발췌하기 위한 강력한 전문 시스템을 사용하고 있다.

시멘트 klin의 전형적인 control 환경은 다음 그림과 같다.

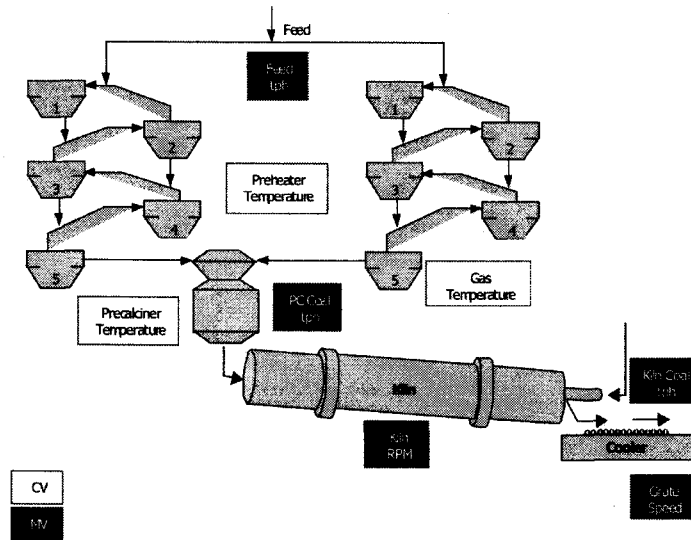
control 운용 model에서 시스템내의 모든 MVs는 다른 control 그룹으로 분산되었다. 각각의 control 그룹은 요구된 운용 상태를 유지보수함에 그것의 역할을 정의하는 control objective의 unique set을 가지고 있다.

control objectives는 다른 objective에 의해 요구된 control action하에서 가능한 충돌을 조정하기 위해 조직되어 있다. control 시스템의 기능적인 분리에서 이 결과들은 시스템의 MVs와 CVs사이의 관계에 영향을 미치고 눈에 띄는 원인에 기초를 두고 있었다.

control 방법은 heuristic과 fuzzy logic 구성을 포함한다. Heuristic control objectives는 큰 편차와 비정상적인 process 상태를 조정하는 board regulatory control을 제공하기 위해 사용된다.

Heuristic control은 특정 장애 process를 조정하는 plant 운용자에 의해 사용되는 전형적인 action을 설명하고 있는 rule sets으로 구성되어

Control Methodology



있다. Fuzzy objectives는 finer control과 regulatory action을 위해 사용된다. 기능적인 관계는 아래의 schematic에 설명되어 있다.

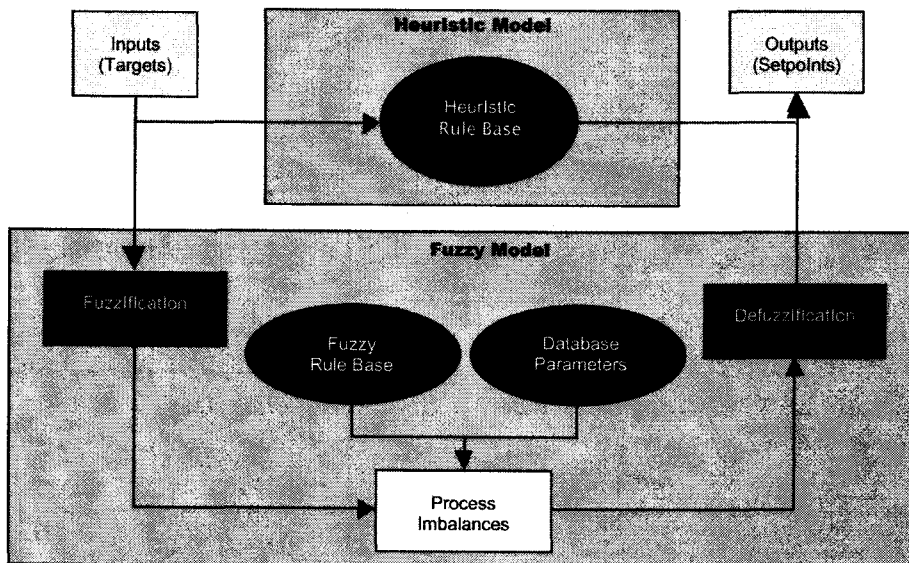
은 rotary kiln으로 인도의 한 큰 시멘트 공장에서 시행되었다. 이 설치에 대한 결과는 아래에 소개되어 있다.

3.5 Kiln Optimizer Performance

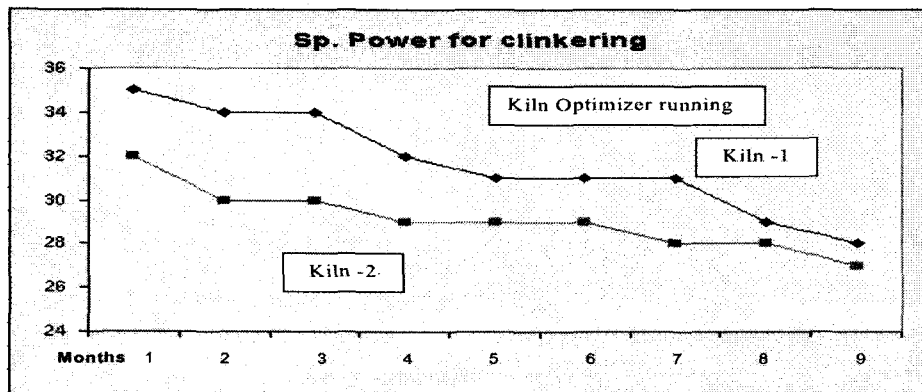
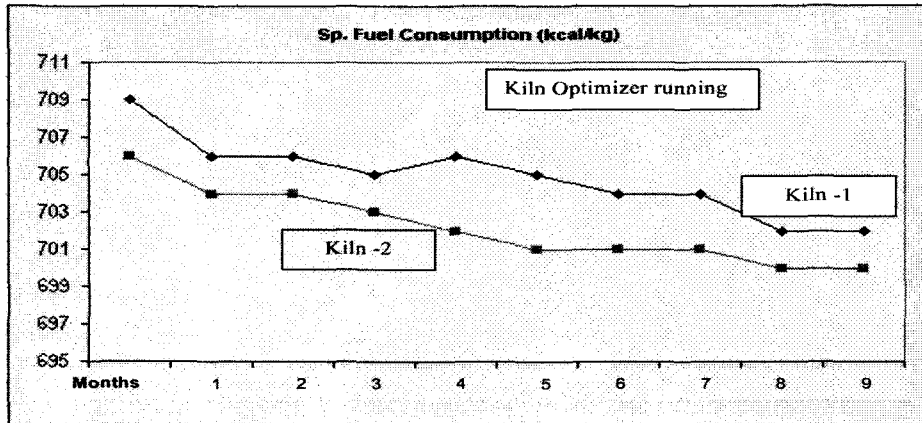
<case 1 : Klin with Pre-calciner>

- Plant 위치 : 중앙 인도
- Plant 수용능력 : 2개의 Plant (각각 1.2M TPA clinker)

Kiln Optimizer는 6 stages pre-calciner를 갖



Performance Graphs



- Circuit : 6 stages를 가진 Rotary klin
- Product mix : OPC, PPC
- 평가기간 : 9개월
- 이 익
 - clinker의 7kCal/kg까지 특정 연료소비 감소
 - clinker의 3kWh/ton까지 특정 전력소비 감소
 - 안정된 clinker의 질 : 12%까지 석회 SD가 감소됨
 - 시멘트 밀에 일어나는 개선된 grindability
 - Kiln refractory에서 열의 하중과 응력의 환원

4. 결론

기존의 많은 시멘트공정 개선을 위한 소프

트웨어가 개발되고 적용을 무수히 하였지만 개발당시 사용되었던 시스템들이 반응 계산속도나 통신의 속도가 떨어져 실제 이론을 접목시키는 데에는 무리가 따랐었다. 그러나 현재 빠르게 진보되는 시스템 개발속도와 신뢰성 향상으로 예측제어가 가능해 졌고 이를 적용한 성공사례가 다수 나오게 되었다

기존의 제어설비를 갖고 플랜트를 운영하면서 생산 원단위를 절감하는 것은 한계에 다다랐으며, 운전원의 피로도를 줄이는 데에도 크게 기여를 하지 못했다. 이를 극복키위해서는 보다 신뢰성 있는 제어시스템의 교체와 MPC 같은 소프트웨어의 적용으로 기기의 효율향상을 기해 원단위 절감과 기기 수명연장 및 운전원이 운전중의 피로도를 감소시켜 안전하고 신뢰성 있는 플랜트 운영을 하여야 할 것이다.