

디지털 이미지 프로세싱과 신경망을 이용한 시멘트 Kiln 소성의 온라인 진단 및 최적 제어

허정원* Dirk Schmidt

<강남드라이브> <POWITEC>

요 약

소성 영역 (Sintering zone)에서 클링커 (Clinker)의 형상 형성은 시멘트 생산 공정에서 가장 중요한 생산 공정중의 하나이다. 소성 공정의 진단 및 최적 제어의 핵심은 써모그래프(Thermo graph), 즉 적외선 카메라를 이용한 온도 분포의 측정이다. 여기에서 다들 'PIT Indicator' 시스템은 분진이 많은 열악한 산업 현장의 연소 시스템에 적용할 수 있도록 특별히 설계한 공냉식의 2개 채널을 가진 광학 장비에 기초하고 있다. 비디오 영상과 써모그래프 이미지 그리고 다양한 연소 특성이 카메라를 통하여 얻어지고 자기 학습 기능을 가진 소프트웨어에서 기록되고 분석된다. 이때 얻은 데이터는 수학적 모델에서 온라인으로 Free Lime 함유율을 예측하는데 이용된다. 열 분포의 써모그래프 표시와 공정상의 다양한 운전 특성을 분석하여 주는 'PIT Indicator' 소프트웨어를 통하여 다른 공정 제어 시스템과 연결이 가능하다. 이와 같은 하드웨어와 소프트웨어를 이용하여 최적화가 필요한 여러 요소들의 최적화를 동시에 그리고 온라인으로 수행할 수가 있다. Free Lime 함유율의 연속적인 온라인 연산을 통해 생산 설비 및 공정에 맞는 최소한의 에너지를 Kiln에 공급함으로써 근본적으로 1차 연료의 절감이 가능하고 NOx와 같은 유해 가스의 배출량도 제어할 수 있다. 또한 별도로 NOx에 대한 모델을 개발하여 NOx를 정확하게 예측하는 것도 가능하다.

1. 서 론

시멘트 생산에서 공정의 최적화는 고품질의 제품 생산, 경제성 그리고 환경적인 측면에서 도입되고 있다. 공정의 최적화로 클링커 품질의 향상 및 균일화와 더불어 에너지 소모량 감소, 유해 가스 배출 감소, 인력의 효율화 등을 얻을 수 있다. 에너지 비용이 전체 생산 비용에서 35% 가까이 차지하는 상황에서 에너지 사용량 감소 및 저가의 에너지 사용은 경제적으로 매우 중요한 요소이다. 현재는 대부분의 연료가 재생이 불가능한 화석 연료이며 대체 연료의 사용은 운전 비용을 낮추는데 아주 중요한 요소이다. 또한 생산성 향상 뿐만 아니라 엄격한 환경 보호 법률 그리고 인근 주민의 의견도 고려해야 할 상황이다. 에너지와 관련한 CO2 배출량은 시멘트 생산에서 Kiln과 분쇄 공정의 최적화 그리고 일정한 분량의 2차 연료 대체로써 가능하다.

NOx 감소를 위한 일차적인 방법은 설비의 에너지 흐름을 원활하게 하여 Kiln 운전을 일정하게 유지하는 것이다. 입력되는 물질들을 균질이 되게 하고 원료와 연료의 균일한 양 투입, 최신의 Kiln 제어 시스템을 이용한 연소 과정의 적절한 제어를 통하여 NO를 형성하는 공정의 급격한 변동을 줄이고 그에 따라 최고 온도값을 낮추는 것이 가능하다. NOx를 줄일 수 있는 연소 시스템은 화염의 연소 상태에 긍정적으로 영향을 미치고, 회전하는 Kiln 내의 화염의 온도 분포가 확장되며, 이로 인하여 소성 영역 (Sintering zone)에서 최대 온도를 낮춘다.

소성 영역(Sintering zone)에서 클링커의 형상

형성의 제어는 시멘트 생산 공정에서 가장 중요한 생산 공정중의 하나이지만 아래와 같이 계속해서 변하는 요인들로 인하여 최적 제어가 쉽지 않다.

- 원료의 구성이 균일하지 않다.
- 특히 2차 연료를 사용하는 경우 연료의 특성이 변한다.
- 배출물의 규제가 심해진다.
- 설비의 부품이 계속해서 마모되어 간다.
- 동일 설비로 여러 등급의 클링커를 생산하여야 한다.

2. 신기술의 도입

회전형 Kiln의 소성 공정을 최적화하는 기술의 핵심은 적외선 카메라의 적용이다. 온도 분포를 모니터에 써모그래프로 표시해 줌으로써 운전자는 공정의 운전 상태를 파악할 수 있다. 이때 운전자는 공정에 투입되는 연료와 공기의 투입량을 수동으로 조절할 수도 있다. Free Lime 함유율을 실시간으로 연산하는 것은 연소 공정과 그에 따른 클링커의 품질을 측정하는 아주 중요한 요소이다. Free Lime 함유율의 최적화는 Kiln에 공급되는 에너지량을 바꿔 온도를 조절함으로써 가능하고 온도는 공정의 기본 매개 변수로써 써모그래프(Thermograph)나 파이로미터(Pyrometer)를 통하여 얻을 수 있다. 그러나 온도 측정은 자주 문제를 일으키므로 많은 사람들이 다른 공정상의 특성들을 찾고자 한다. 온도를 통한 간접적인 특성의 분석과 비교하여 본질적인 향상이 Free Lime 함유율의 연속적인 측정을 통하여 이루어질 수 있다. X-Ray 회절과 같은 복잡하고 분석적인 방법이 측정 오차를 최소화하는데 도움이 되지만, 표본의 대표성 등의 문제가 있다. 그리고 이와 같은 방법은 온라인으로 적용하기에는 시간 지연에 따른 문제 등 극복해야 할 과제가 있고 개발 초기 단계로 실제 적용하기에는 많은 시간이 필요하다.

앞으로 진정한 온라인 측정 방법을 이용하여 클링커의 품질의 최적화를 위해 소성 공정을 제어하고 주요한 공정의 변수를 검출하는 것이 가

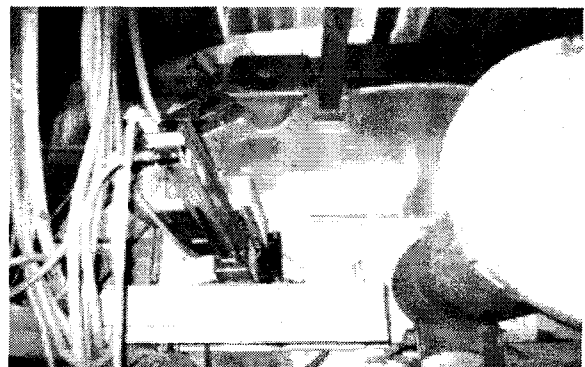
능해질 것이다. 동시에 경제성 및 환경 보호 관점에서 연료의 소모량이 최적화될 것이다.

2. 새로운 공정상태 표시 시스템의 구성

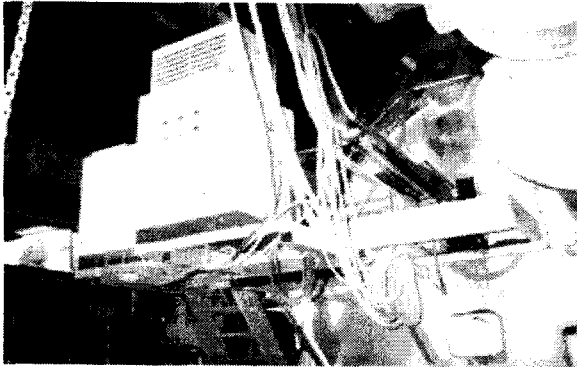
POWITEC에서 개발한 모듈화된 시스템은 운전자가 복잡한 소성 공정을 최적으로 제어할 수 있도록 도와준다. 이는 매순간 공정 상황과 운전 특성들을 분석하여 적절하게 표시하여 줌으로써 가능하다. 이와 같은 분석으로 버너의 최적 운전 즉, 에너지 투입량을 최적으로 제어할 수 있다. 써모그래프로 공정을 시각적으로 보여주고 온라인으로 Free Lime 함유율을 예측하는 것은 공정 최적화의 1단계이다.

POWITEC에 의해 자체 개발된 'PIT Multi-sensor'는 튼튼한 공압식 이송 장치에 이중 지지대로 탑재되어 있으며, 고온의 영역에서 자동으로 센서를 빼내는 반송 기능이 포함되어 냉각 공기 라인에 이상이 발생되어도 센서를 안전하게 보호할 수 있는 구조로 되어 있다. 산업 현장의 연소 설비와 같은 열악한 환경에서도 견딜 수 있는 특별히 고안된 초경량의 광 시스템은 수냉식과 같은 복잡한 냉각 방식이 불필요하다. <그림 1>에서 Kiln 후드에 설치한 'PIT Multi-sensor'의 모습을 보여 준다.

<그림 2>는 Kiln 후드 부분에 설치한 기기의 전체 모습이다. 여기에서 오른쪽 부분이 이송 장치에 탑재된 센서이고 왼쪽부분이 에어컨이 설치된 현장 제어반인데 여기에는 반송 장치를 위



<그림 1> Kiln 후드에 설치된 'PIT Multisensor'



<그림 2> Kiln 후드에 센서와 제어반을 설치한 사진

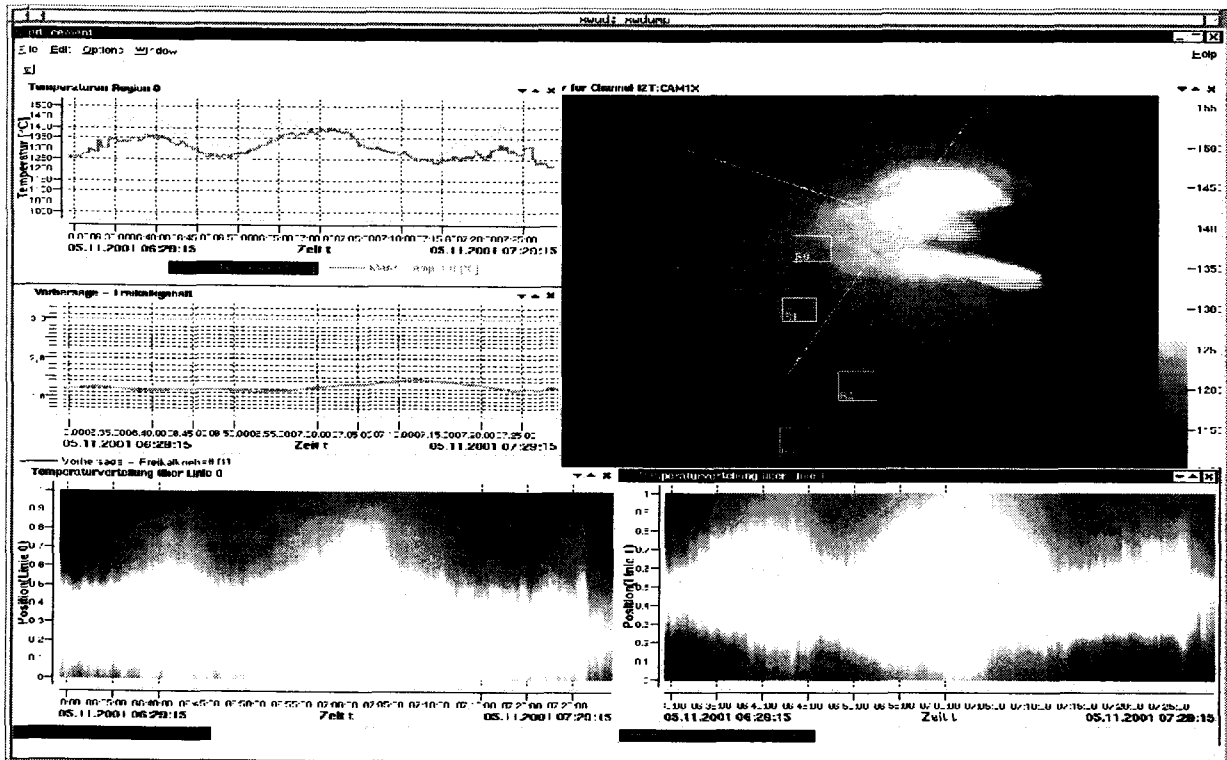
한 요소 뿐만 아니라 현장 컴퓨터도 포함되어 있다.

센서는 공냉식의 광학 기계에 기초하고 있다. 비디오 영상, 다양한 연소 특성과 써모그래프 이미지를 3단 RGB 비디오 카메라의 도움으로 표시할 수 있다. 컬러 비디오 영상은 설비의 운전실에 있는 모니터에 표시가 되고 동시에 현장에 있는 이미지 프로세싱 카드에도 보내진다. 최신

의 데이터가 Ethernet 통신 버스를 이용하여 운전실에 있는 시스템 컴퓨터로 보내진다. 이 시스템 컴퓨터에서 Kiln 출구측에 있는 소성 영역(Sintering zone)이 써모그래프로 표시된다. 카메라의 노출 시간은 현장 컴퓨터에서 Kiln의 복사열 강도에 따라 완전 자동으로 제어되어 써모그래프 표시가 충분한 콘트라스트를 유지할 수 있도록 한다.

특별한 이미지 프로세싱 과정을 거쳐 계산된 데이터는 수학적 모델을 통해 온라인으로 Free Lime 함유율을 예측하는 시스템 컴퓨터로 전송된다. 팡 카메라는 자유롭게 관찰 각도를 조절할 수 있는 현장 기기를 포함하여 추후에도 쉽게 조절이 가능하다.

시스템 컴퓨터에 설치된 'PIT Indicator' 소프트웨어는 리눅스 시스템에서 구동되며 여러 종류의 공정 제어 시스템과 연결이 가능하다. 'PIT Indicator'는 써모그래프 표시뿐만 아니라 공정의 속성 및 운전 특성을 알 수 있는 다양한 특성 자료를 보여줄 수 있다. 측정 지점과 영역



<그림 3> 'PIT Indicator' 소프트웨어의 화면 표시 사진

은 컴퓨터 마우스의 커서를 이용하여 자유롭게 선택 가능하다. 영역의 수량은 이론적으로 무한대이다. 계산 값은 각 측정 영역이나 측정 지점에 대해 수치로 표시하거나 트렌드를 그래프로 표시하는 것이 가능할 뿐만 아니라 각 측정 영역은 상한과 하한 값이 함께 제공된다. 내장된 입/출력 카드를 통하여 아날로그 트렌드 또는 디지털 신호로 출력도 가능하며 이 데이터는 외부에서 사용 가능하다.

이와 같은 적용 프로그램은 일반 컴퓨터 프로그램(MDI 표준)에 맞게 조정된 GUI(Graphic User Interface)로 표시된다. 이로 인해 스크린 메뉴와 패스워드를 통하여 마우스로 여러 종류의 상태를 선택하여 확인할 수 있다. 온도 계산, 온도 트렌드 표시, 경고 신호, 시간을 포함한 결과의 자동적인 축적과 같은 기능들은 연속적으로 수행된다. 컴퓨터의 작업 창은 한번 활성화되면 다른 작업을 위하여 작업 창들이 활성화되더라도 계속해서 활성상태를 유지한다.

<그림 3>은 'PIT Indicator' 소프트웨어의 표시창으로 써모그래프, 각각의 측정 영역에 대한 트렌드 표시(최대/최소/평균값) 그리고 Free Lime 예측치에 대한 내용을 보여주고 있다. 특별한 점은 폴리라인(Polyline)이라는 선의 표시로 어떤 선택된 지점에서 시간의 흐름에 따른

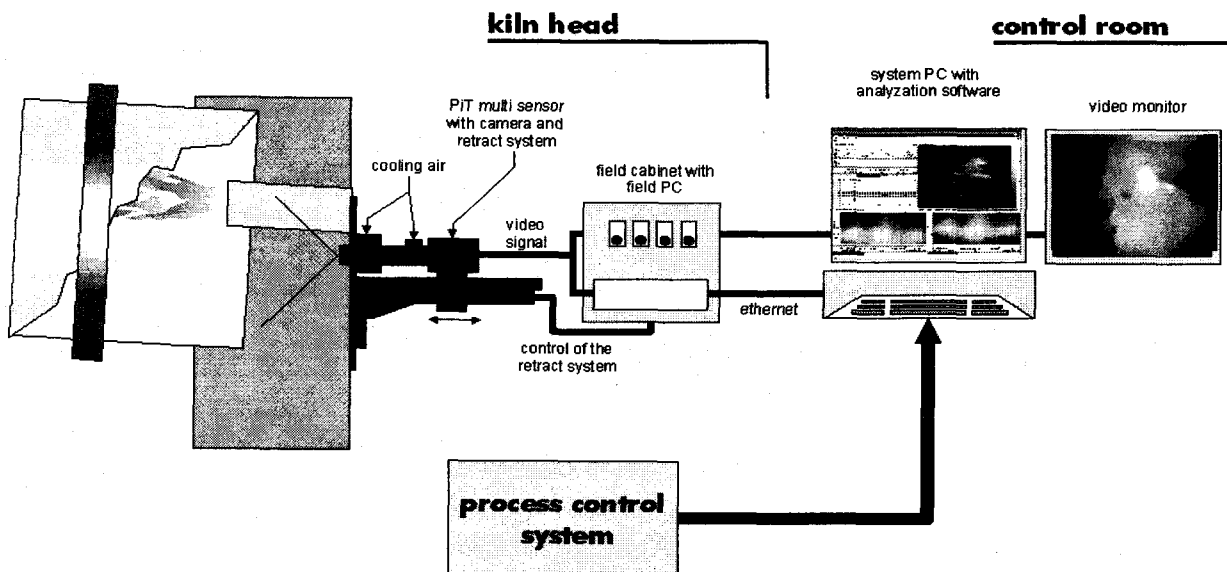
특성 변화를 연속적인 선으로 표시할 수 있다는 것이다. 이로 인해 온도 변화와 같은 공정의 특성 변화를 시간과 위치에 따라 연속적으로 관찰할 수 있다.

지금 기술하고 있는 내용들은 시간에 따라 변화하는 공정의 운전 특성들의 표시이다. 인간의 뇌는 이러한 변화들의 대략적인 인상만을 기억하므로 컴퓨터 시스템의 도움으로 일정 기간동안 나타나는 변화를 표시하는 것이 매우 중요하다. 공정에서 이상한 동작이 발생할 경우 조속히 대응하기 위해서 Kiln 운전자는 명확하고 언제라도 쉽게 재확인할 수 있을 뿐만 아니라 이해하기 아주 쉬운 형태로 표시해 주는 공정의 운전 정보에 의존하면 된다.

4. Free Lime 함유율의 온라인 예측

Free Lime 함유율을 예측하기 위해서는 지금까지 설명한 써모그래프 특성 분석과 더불어 인공 신경망 기술이 적용된다.

<그림 4>는 시스템 구성도로써 Free Lime 함유율을 예측하기 위하여 공정의 시각적 표시 시스템이 어떻게 구성되어 있는지를 보여 준다. Free Lime 함유율의 온라인 예측은 기능 분석에 기초를 두고 있다. 속성 기록 시스템(패턴 인식)



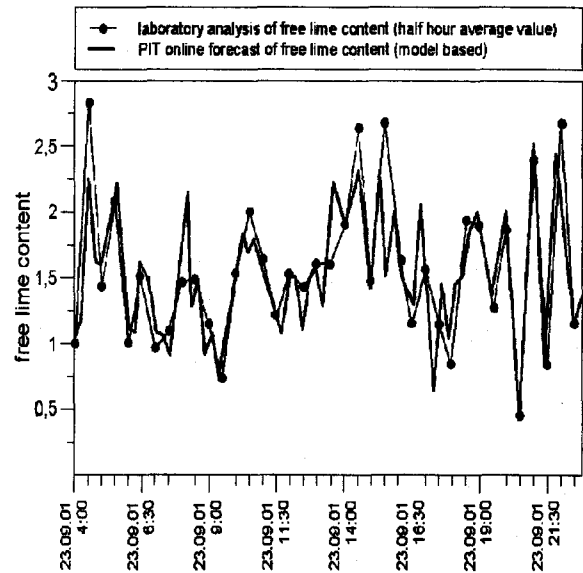
<그림 4> Free Lime 예측과 공정의 시각적 표시를 수행하는 시스템의 구성도

을 통해 얻어진 데이터는 현장 컴퓨터에서 사전에 처리된다.

속성 데이터는 Free Lime 함유율을 예측하기 위하여 수학적 모델에서 이용된다. 특히 화염으로부터 Kiln 내부, 벽면 그리고 클링커로 전달되는 열은 계속해서 관찰되고 기록된다. 소성 영역(Sintering zone)으로부터 발생하는 복사열의 움직임은 기존의 공정 운전 데이터와 함께 Free Lime 함유율을 계산하는 수학적 모델에서 완전 자동으로 실행되는 중요도 분석 시스템에서 이용된다. 실험실에서 분석한 Free Lime 함유율과 수학적 모델에서 얻은 속성과의 상관 관계에서 온라인으로 Free Lime 함유율을 예측하는 것이 가능하다.

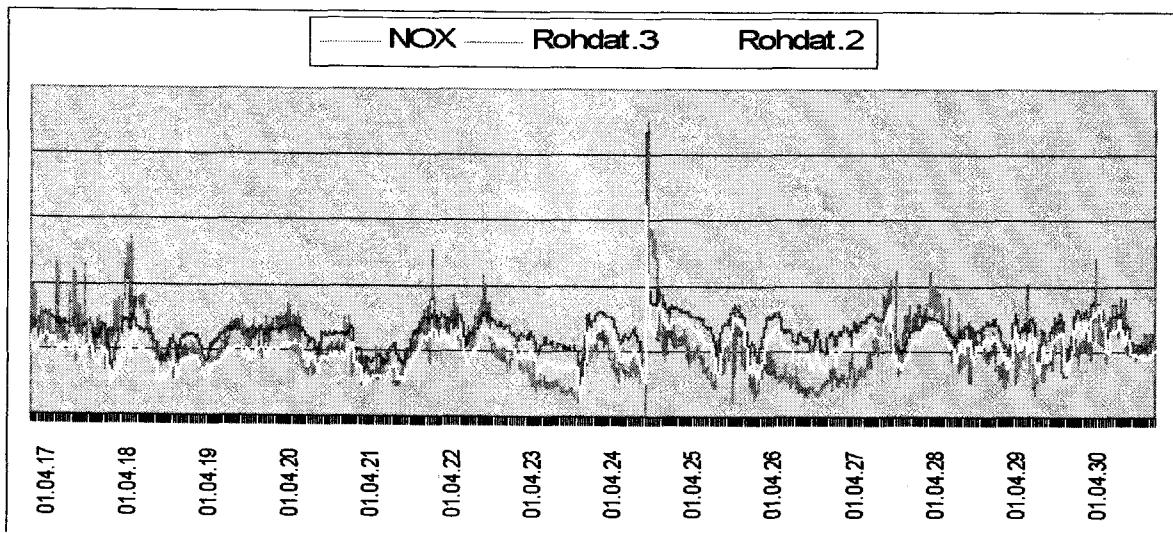
이때 안정적인 예측(데이터의 유효성)을 위해서 정확한 실험실의 분석치와 더불어 '제한치' 상황에 대해서도 고려하여야 한다. 이는 입력 연료의 종류와 변동량, 원료의 양, 그리고 생산되는 클링커의 종류 등 운전 조건 등을 포함한다. 시스템에서 예측한 Free Lime 함유율은 최종적으로 'PIT Indicator' 소프트웨어를 통해 트렌드 및 수치 값으로 표시가 된다.

<그림 5>는 'PIT 멀티센서'를 통하여 예측한 값과 실험실에서 분석한 실제 값과의 상관 관계를 보여준다. 실험실 분석치는 정확한 비교를 위



<그림 5> 예측모델에 기초한 온라인 속성과 실험실에서 분석한 Free Lime 함유율 비교 자료 (실험실 자료와의 시차가 보상된 자료임)

하여 PIT 시스템에서 온라인으로 예측한 값과의 시간 차이를 보상하여 나타냈다. 기존에 실험실에서 얻는 제품 분석치는 설비에 따라 편차가 있지만 공정에서 실제 제품의 특성이 형성되고 나서 약 2시간 정도의 시간이 지나고 나서 얻을 수 있다.



<그림 6> 예측모델에 기초한 온라인 속성과 관로의 배출가스 검사로부터 얻은 NOx 값의 비료자료 (실험실 자료와의 시차가 보상된 자료임)

지금까지 설명한 PIT 시스템으로 Free Lime 함유율을 예측하는 방법은 현재 연소중인 연료의 열량 뿐만 아니라 유해 물질인 NOx(그림 6)와 CO의 방출량도 온라인으로 예측이 가능하다.

Free Lime 함유율을 실험실에서 분석하는 것은 PIT 시스템을 적용하더라도 계속해서 진행할 필요가 있다. PIT 시스템에서 속성 분석을 하는 것은 주로 공정 제어의 최적화를 위한 것이다. 그러나 표본 채취 및 실험실 분석의 횟수를 줄임으로써 비용 절감이 가능하다.

5. 새로운 공정 정보의 활용

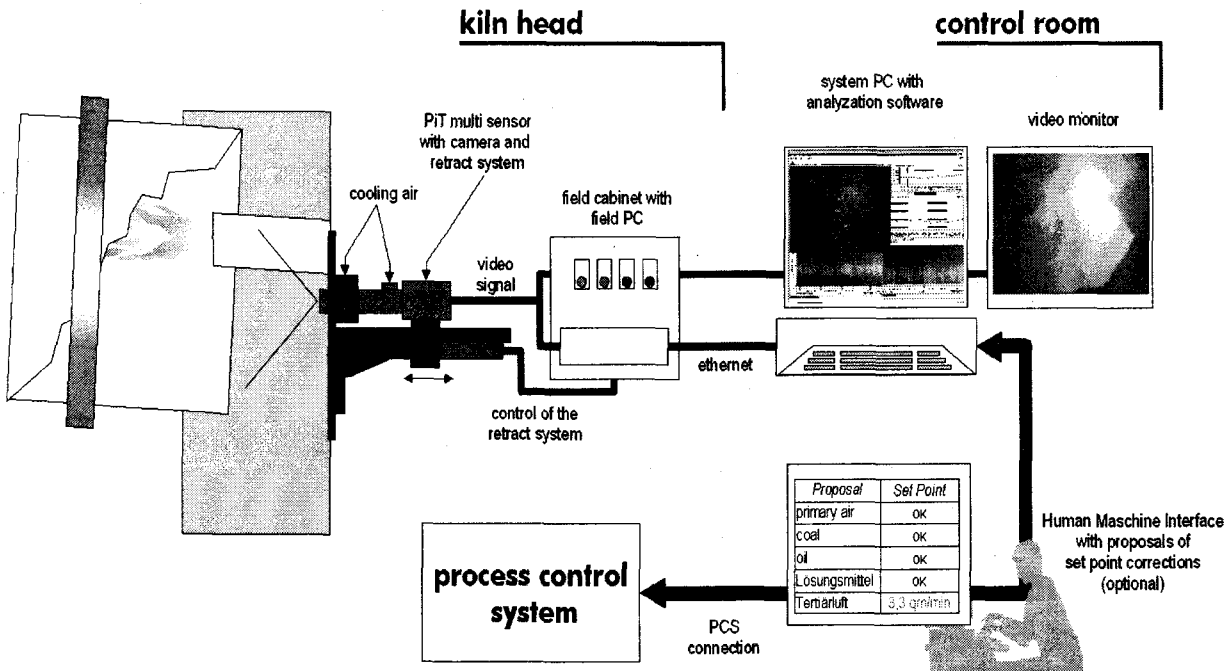
연료 투입의 최적 제어는 중요한 공정 속성을 실시간으로 계산해야만 가능하다. 공정의 조정 및 제어의 가장 주된 문제는 최적화가 필요한 여러 가지의 목표를 동시에 달성하는 것이다. 공정을 시각적으로 보여주는 시스템은 공정을 보다 잘 이해하는데 큰 도움이 되지만, 이 정보들을 이용하여 최적화를 위해 변수들을 조작하여 주는 것은 운전자에 크게 의존하여야 하며 운전자의 경험에 결정적으로 의존하여야 한다.

운전자는 모든 정보를 동시에 분석하면서 또한 시스템 제어도 수행하여야 한다. 공정이 복잡하므로 여러 측면에서 분석이 필요하고 또한 여러 조작 변수들을 조절하는 일도 함께 고려하면 운전자가 모든 일을 동시에 수행하는 것은 한계에 이르게 된다. 그러므로 컴퓨터를 이용한 중요도 분석과 최신의 신경망 기술을 이용한 적응 제어 시스템을 도입하기에 이르렀다. 이제 공정 상태의 시각적인 표시라는 일차적인 접근에서 이차적인 접근 즉, 개루프(Open Loop) 또는 폐루프(Closed Loop)로써 공정을 조정하는 과정으로 넘어가게 된다.

6. 공정 조정을 위한 신경망의 적용

신경망 시스템은 수학적 모델을 사용하여 인간의 뇌와 같이 학습을 시켜주면 이후에는 스스로 기능을 향상시킬 수 있는 인공 지능 시스템이다. 신경망은 아주 복잡하고 다차원의, 비선형 시스템에도 쉽게 적용 가능하고 다방면의 적용 분야에서 실제 적용하여 사용되고 있다.

'PIT Navigator' 소프트웨어를 적용하면 설비



<그림 7> 'PIT Navigator' 시스템의 개루프(Open Loop) 제어 구성도

(공정 제어 시스템)로부터 얻은 기존의 공정 데이터를 PIT 센서 시스템에서 분석하여 얻어진 공정 속성과 함께 유용하게 이용할 수 있다. 뉴로/퍼지에 기초한 특별한 최적화 소프트웨어는 예를 들면 2차 연료의 사용량과 같은 최적 제어를 위한 변수의 목표치를 운전자에게 알려준다.

'PIT Navigator' 소프트웨어는 계속해서 변하는 공정 조건에 따라 자동적으로 적응(적응성)하도록 구성되어 있다. 일반적인 뉴로/퍼지 최적화 기능은 학습 과정에서 형성된다. 이에 반해서 'PIT Navigator' 소프트웨어는 계속해서 스스로 학습을 한다. 공정은 중요도에 따른 맵처럼 n-차원의 모델로 표현된다. 여러 가지 요소 중에서 기계적인 부분과 설비 부분의 마모 그리고 사용한 물질의 변화 등을 감지하여 자체 모델과 최적화 전략을 반복하여 재 조정한다. 이 과정에서 시스템 자체의 센서에 의한 분석 시스템이 중요한 역할을 한다.

여기에서 개루프(Open Loop) 제어는 기존 시스템에서 변화가 가능한 것은 입력이고 그에 따라 결과가 운전자에 의해 인식되는 것과 관련이 있다. 그러므로 사용자는 HMI(Human Machine Interface)를 통하여 공정을 조절하게 된다. 이는 변하는 조건들(예를 들면, 기계의 마모, 연료의 품질 변화 등)이 자동적으로 감지되고 조절이 필요한 적절한 값이 제안되어 동작 기기를 통하여 조절되는 것을 의미한다. 최적화가 제대로 동작하기 위한 기본적인 요구 사항은 최적화 목적과 설비의 제한치의 정확한 정의이다.

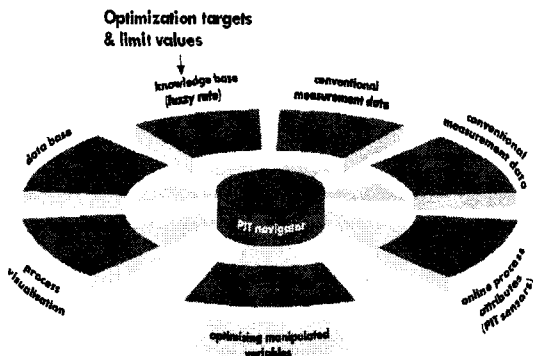
새로운 최적화 시스템의 잠재력을 최대한으로 이

용하기 위해서는 폐루프(Closed Loop) 제어가 필요하며 PIT 시스템은 공정 제어 시스템과 적절하게 연결하여야 한다. 기존에 공정 제어 시스템에서 필요하여 얻은 데이터에 더해 온라인으로 계산된 최적화를 위한 가변 변수들을 설정 목표치를 얻기 위해 공정 제어 시스템에 보내준다. <그림 8>과 <그림 9>는 기존의 공정 제어 시스템에 설치한 적응 제어기의 기능 및 'PIT Navigator'의 구조를 보여준다.

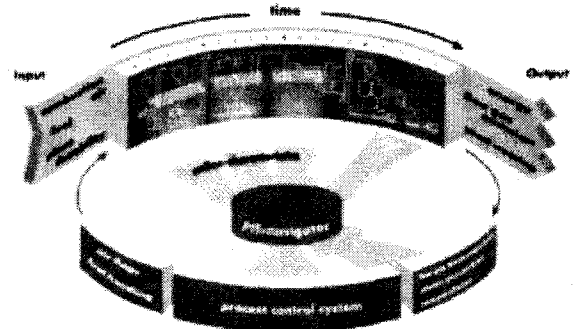
7. 공정 제어로써 절약 가능한 영역

위에서 설명한 하드웨어와 소프트웨어를 이용하여 여러 종류의 최적화 목표들을 동시에 그리고 온라인으로 달성할 수 있다. Free Lime 함유율의 연속적인 온라인 진단으로 계속해서 공정에 맞게 조절된 최소의 에너지를 공급할 수 있다. 이에 따라 근본적으로 1차 연료의 공급량을 최소화 할 수 있다. 유해 가스의 배출량을 연속적으로 예측하고 확인하여 2차 연료의 공급비율을 늘리고 최적화하는 것도 가능하다.

생산할 클링커의 품질 및 분말 정도의 요구에 따라 Free Lime 함유율을 최적으로 제어 함으로써 다음 공정에서 분쇄하는데 소요되는 에너지 소모량을 최소화 하고 또한 분쇄 시간도 최소화 할 수 있다. 생산할 클링커의 품질 수준에 보다 빠르게 도달하고 또한 필요한 품질보다 낮은 품질의 제품 생산을 감소시킬 수 있다. 온도 변동폭을 줄여줌으로써 Kiln 운전을 보다 원활하게



<그림 8> 'PIT Navigator'의 구조



<그림 9> 기존의 제어시스템에 추가된 적응 제어기의 운전모드

할 수 있고 이로 인해 내화 벽들의 수명도 연장시켜 준다.

최적으로 제어된 연료/공기 공급 비율을 통하여 1차 연소 시스템에서의 유해한 물질의 배출을 현저하게 그리고 영구적으로 감소시킬 수 있다는 점이 또 다른 큰 장점이다. 새로운 기술을 채용함으로써 시멘트 공장에서 2차 연료의 사용량을 늘려 공공의 이익에 부합할 뿐만 아니라, 1차 연소 시스템을 최적화하여 CO2 배출을 감소시키는 새로운 접근 방법을 제공해 주고 있다. 칼사이너(Calciner)와 3차공기(Tertiary air) 덕트를 장착한 회전 Kiln 설비에서는 연료와 연소 공기 흐름의 적절한 분배로 단계적인 연소가 가능하다. 공기가 부족해지는 영역을 줄이는 방법으로 Kiln 입구 부분 또는 칼사이너의 하부에서 연료를 공급하는 것이 가능하며, 결과적으로 Kiln 배출 가스에서 NO의 분해로 인한 감소가 나타난다. 이와 같이 NO가 감소된 후, 배출 가스의 흐름은 가스를 태우기 위해 Tertiary air와 섞이게 된다. 이 공정을 신경망 공정 모델과 결합시켜 전체적인 감시 및 제어 시스템 구성이 가능하다. 현재 시각적인 속성 기록 시스템은 Kiln 출구에 적용되고 있지만 'PIT Navigator'를 적용하여 연소와 공정의 최적화가 종합적으로 가능해질 것이다.

8. 결 론

- Kiln에 투입되는 1차 연료 공급을 2.5% 절감
- EUR 114,000
- 2차 연료의 사용량 증가 - EUR 56,000

- 향상된 클링커 품질로 밑에서 분쇄시 사용 전력 절감
- EUR 10,000
- 원활한 Kiln 운전에 따른 내화 벽들의 수명 연장
- EUR 20,000
- 총합계
- EUR 200,000/년

여기에서는 중요한 직접적인 경비 절감 요소만 계산해 보고자 한다. 계산은 'PIT Navigator' 시스템을 적용한 연간 350,000톤 규모의 클링커를 생산하는 회전형 Kiln 설비에 기초한 값이다. 직접적인 비용 절감은 위와 같이 계산될 수 있다.

위 계산은 실제와 유사한 경우이면서 상대적으로 소규모의 Kiln 설비를 선택하여 적용하였다. 대부분의 Kiln 설비는 위의 경우보다 많은 원료를 투입하고 연료 소모량도 훨씬 크다. 그러므로 위의 계산은 대부분의 설비에 여유 있게 적용 가능한 수치이다.

POWITEC에서 제공하는 공정의 시각적 표시, 공정 분석 및 공정 제어는 기존의 최적 제어 모델과 비교하여 확실한 새로운 접근 방법을 제공한다. 새로운 최적화 방법의 잠재성은 단지 온도에만 의존하는 어려운 방법이 아닌 공정에 결정적인 변수들을 실시간으로 결정함으로써 크게 열려 있다. Free Lime의 온라인 예측과 공정의 시각적 표시는 그 가치가 이미 충분히 검증이 되어 있다. 공정의 시각적 표시를 광신호 속성 기록과 신경망에 기초한 적응 제어와 함께 조합한 'PIT Navigator' 시스템은 이미 유럽의 시멘트 공장에서 상용 운전하여 그 성능의 우수성을 인정 받고 있다.