

시멘트 소성공정 자동제어시스템 개발

정재익* · 이호형 · 유재상 김광호

〈쌍용중앙연구소 시멘트연구실〉

〈영월공장 생산과〉

1. 서 론

시멘트 제조공정에 있어서 소성공정은 시멘트 반제품인 클링커를 제조하는 공정이다. 클링커를 제조하는 설비는 일반적으로 예열기(가소로), 킬른, 쿨라로 크게 구분할 수 있다. 시멘트 소성공정에 있어서 가장 많은 에너지를 필요로 하는 부분은 석회석의 탈탄산 반응이다. 따라서, 에너지 소비량을 감소시키기 위해서는 효율적인 탈탄산반응을 얻을 수 있어야 하는데 1970년대 이후에 일본에서 효율적인 탈탄산반응을 위한 가소로를 개발한 이후 현재는 대부분의 소성공정에 가소로를 설치하여 운전하고 있다.

시멘트 반제품인 클링커는 약 1450°C의 고온에서 생성되는데 이 온도를 일정하게 유지하는 것이 매우 중요하다. 그러나 클링커링 반응이 이루어지는 소성대는 로타리 킬른 내부에 위치하여 반응조건의 변화를 직접적으로 측정할 수 없으므로 킬른 main motor ampere, 킬른 출구 NOx, 화염온도 등을 측정하여 간접적으로 킬른 내부의 소성대 온도변화를 측정하게 된다. 또한 로타리 킬른 내부에서 coating 형성, 화염조건, 원료 중 미량성분 함량 등에 기인하는 소성반응의 변화를 정확히 알기 어렵기 때문에 소성공정의 운전은 대부분 운전자에 의한 수동운전에 의존하고 있으며, 또한 클링커의 품질을 일정하게 유지하기 매우 어려운 실정이다. 따라서 소성공정의 변화를 빨리 감지하여 적절한 조치를 취함으로써 클링커 품질을 안정시키고, 또한 인력의 성력화를 통한 경쟁력 강화를 위해 자동운전제어시스템의 개발이 요구되어 왔다.

1980년대 FLS사에서 최초로 시멘트 소성공정에 있어서 운전자의 운전방법을 모사한 퍼지

(fuzzy) 제어를 이용한 자동제어시스템을 상용화한 이후 ABB-LINKman사 등에서 다투어 개발·상용화하여 판매하고 있다.

당사에서도 클링커의 품질향상, 최적인전을 통한 생산성 향상 및 인력의 성력화를 위해 ABB-LINKman사의 자동제어시스템을 설치·운용하고 있으나, 시스템의 보수관리가 어렵고, 자동운전 가능영역이 좁아 효율적으로 사용하지 못하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 당사 실정에 맞는 소성 공정 자동제어시스템을 자체적으로 개발하여, 당사 각 공장에 설치함으로써 적은 투자비용으로 생산성 향상, 품질안정 및 성력화 기반을 구축하고, 기설치된 자동제어시스템의 제어 logic을 보완하는데 그 목적이 있다.

2. 자동제어시스템의 개발

산업기술이 발전함에 따라 시멘트산업에 있어서 제어시스템은 각 단위공정의 분산된 C.O.P내에 각 운전원의 relay panel 운전에서, 각 단위공정의 현장에 PLC(Programmable Logic Controller)를 설치하여 sequence 제어를 행하고 통합된 C.O.P내에 computer를 이용한 MMI(Man Machine Interface)를 설치하여 운전자가 여러 공정을 운전·관리할 수 있도록 발전되어 왔다. 그리고 현장에서 수집된 데이터를 저장·관리하고 MMI를 지원하는 computer는 PDP/11에서 VAX로 발전되어 왔고, 현재는 PC 및 OS(Operating System)의 급속한 발전으로 PC-based control system이 사용되기 시작하고 있다.

당사에서는 당사 각 공정의 단계적인 자동제어

시스템 설치공사를 통해, 시멘트공정에 있어서 자동제어시스템의 설계·설치 및 commissioning의 시스템 엔지니어링 기술을 확보하여, 당사 동해공장 #1~5 cement mill 운전자동제어시스템(CAMOS : Computer Aided Mill Optimization System)를 자체 기술로 기 설치하였다.

2.1 자동제어시스템의 구성

일반적으로 자동제어시스템을 구성하는데 있어서 고려해야 할 점은 첫째는, 각 단위설비의 위치, 접점의 수량 및 공정특성에 따른 적합한 PLC의 선정과 통신방법의 선정이고 둘째는, 현장에 입·출력되는 데이터 관리를 위한 적절한 실시간 데이터베이스의 선정 및 computer의 선정이며 그리고 셋째는, 실시간 데이터베이스를 이용한 적절한 MMI의 설계이다.

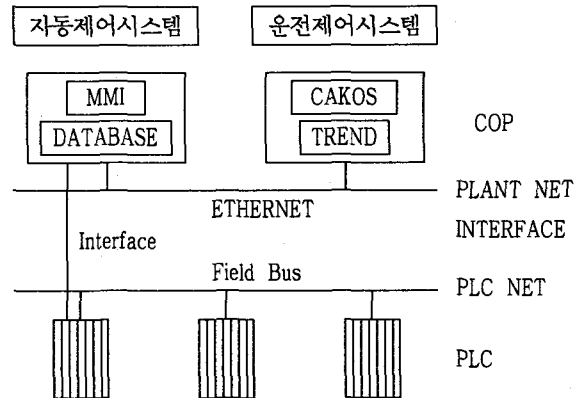
그리고 운전제어시스템이란 대상공정의 운전 데이터를 입력받아 최적 제어 logic에 의해 공정 변화를 감지, 최적의 운전조건을 계산하여 현장의 각 조절변수로 전송하는 제어시스템을 말한다. 따라서 운전제어시스템은 공정에 대한 운전정보의 입력 및 최적의 운전조건을 전송하기 위한 시스템 구성이 필요하다. 그러므로, 운전제어시스템의 구성은 대상설비의 자동제어시스템이 설치된 환경하에서는 기 설치된 실시간 데이터베이스에 접근함으로써 구성이 가능하며, 만일 자동제어시스템이 설치되지 않은 경우에는 대상공정의 운전정보의 입력 및 최적 운전조건 전송을 위한 제어시스템의 설치가 필요하다.

본 연구에서는 어느 공정에서도 실험이 가능토록 하기 위하여 대상공정의 운전정보의 입력 및 최적 운전조건 전송을 위한 제어시스템을 설치하고, 설치된 제어시스템의 데이터베이스를 이용하여 최적 운전제어시스템을 구성하였다.

자동제어시스템의 구성도는 <Fig.1>과 같다. 그리고 자동제어시스템의 각 구성요소는 <Table 1>에 나타내었다.

2.2 자동제어시스템의 기능

대상공정의 주요 운전 데이터는 PLC의 I/O module을 통해 analog 신호에서 digital 값으로



<Fig.1> Configuration of automatic control system

변환되며, 일부 데이터는 PLC에서 signal pre-processing을 거치게 된다. Digital 값으로 변환된 데이터는 computer에 설치된 SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) 소프트웨어에 의해 관리되게 된다. 또한 SCADA 소프트웨어는 실시간 데이터베이스 관리 이외에 MIMIC 화면관리, alarm 및 event 관리, trend 관리 및 report 관리 기능 등을 갖고 있다. 따라서 SCADA 소프트웨어의 기능을 이용하여 MMI를 구성하게 된다. 그리고 자동운전 소프트웨어 (CAKOS : Computer Aided Kiln Optimisation System)는 실시간 데이터베이스에서 대상공정의 조업조건을 진단에 필요한 데이터를 얻게 되고, 이 정보를 제어 logic에 의해 가공·처리하여 최적의 운전조건을 결정하여 계산된 최적 운전조건을 설정값을 실시간 데이터베이스로 전송하게 된다. 전송된 설정값은 SCADA에 의해 PLC로 전송되고 PLC에 의해 각 조절변수의 설정값을 제어된다. 각 소프트웨어의 주요기능은

<Table 1> Components of automatic control system

구분	항목	수량
Hard ware	Computer (PC)	2대
	PLC (TI545)	1set
	Dot printer	1대
	Color printer	1대
Soft ware	SCADA package • Fix-Dmacs (DOS용) • Intouch (WindowsNT용)	2sets
	자동운전 package (CAKOS)	1set

<Table 2> Functions of each software

구분	기능
PLC Logic	<ul style="list-style-type: none"> • AUTO/MANL 전환조건 판단 • 데이터베이스와의 통신 check • Analog/Digital 전환 • Signal Preprocessing • 조절변수의 제어
SCADA	<ul style="list-style-type: none"> • AUTO/MANL 전환조건 판단 • 데이터베이스 관리 • PLC 및 Computer간 통신 • MIMIC, Alarm 및 Event 관리 • Trend 및 Report 관리 • CAKOS와의 통신 check
CAKOS	<ul style="list-style-type: none"> • AUTO/MANL 전환조건 판단 • 소성상태 및 운전조건 판단 • 운전조건에 따른 운전제어 • 운전조건, 상태에 따른 최적 제어

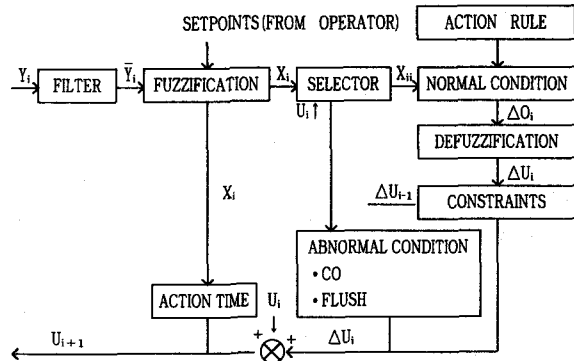
<Table 2>에 나타내었다.

2.3 자동 운전제어 Logic

소성공정의 자동운전은 소성공정의 복잡한 공정특성, 즉 공정의 비선형성, 공정의 긴 지연시간, 유용한 정보의 부족, 수많은 외란에 기인한 공정특성 변화에 기인하여 공정변화의 예측을 수치적인 모델로 표현하기가 매우 어렵기 때문에 수학적 모델을 이용하지 않고, 경험많은 운전자의 운전지식을 체계화하여 운전자의 행위를 모사한 제어를 구성하여 자동운전을 행하게 된다. 그러나 운전자의 운전에 대한 경험은 매우 모호하여 수치적으로 표현하기 곤란하므로, Zadeh에 의해 제시된 퍼지이론을 이용하여 운전자의 경험을 지식화한 퍼지제어를 구성하게 된다.

본 연구에서는 당사의 경험많은 운전원의 운전방법을 조사하여 체계화하고, 공정분석을 통해 제어전략을 정립하여, 자동운전 제어 logic을 개발하였고, 당사 동해·영월공장의 소성공정에서 실시간 자동운전실험을 통하여 제어 logic을 재조정하였다.

자동제어 logic은 주요 공정변수의 필터링 및 퍼지화, 상태변수의 합성, 운전조건 선택, 정상운전조건, 비정상조건, 경험제어, 경험적 제한조건 및 출력시간의 제어로 구분할 수 있다. 개발된 자동운전 제어전략은 <Fig. 2>에



<Fig. 2> Control strategy for rotary kiln process

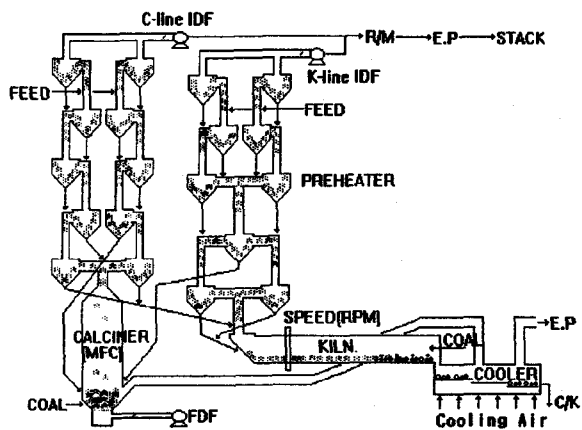
나타내었다.

3. 대상 공정

개발된 소성공정 자동제어시스템은 당사 영월공장의 5호 킬른에 설치하여 자동운전제어 logic의 보완 및 자동운전의 효과를 파악하고자 하였다.

3.1 대상설비의 구성

영월공장 5호 킬른은 영월공장에서 가장 용량이 큰 킬른으로 일본 MHI사의 MFC (Mitsubishi Fluidized Calciner)가 설치되어 있고, 예열실은 두 개로 구성되어 있으며, 콜라는 3단 10실로 구성되어 있다. 영월 5호 킬른의 Spec.은 <Table 3>에 표시하였고, 킬른의 전체적인 공정도는 <Fig. 3>에 나타내었다.



<Fig. 3> Flow diagram of the #5 kiln process

<Table 3> Specification of #5 kiln

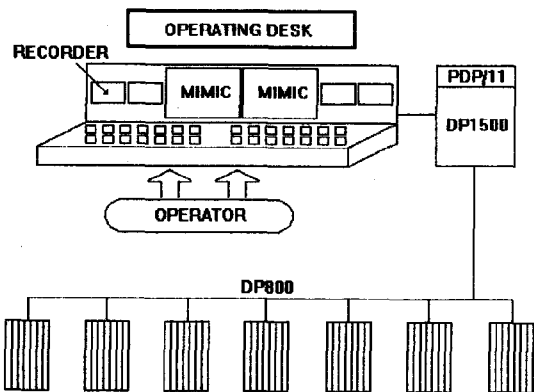
클링커 생산량	4200T/D	
로 타 리 킬 른	4.5/5.6m ϕ × 70mL	
가 소 로	MFC	
클 라	3단 10실	
예열실	K-line	5 stage, 9 cyclones
	C-line	5 stage, 10 cyclones

3.2 제어시스템의 구성

영월 5호 킬른 제어시스템의 구성은 현장에 DP800 PLC가 설치되었으며, MMI는 PDP/11 computer를 이용한 DP1500 제어시스템에 의해 구성되었다. 킬른 운전자는 COP내 desk 앞에서 두 개의 monitor와 4개의 recorder 및 화염감시 카메라를 보면서 공정을 감시·운전하도록 되어 있다. 기 설치된 영월 5호 킬른 제어시스템의 개괄도는 <Fig. 4>에 나타내었다.

3.3 공정 특성

영월 5호 킬른공정에 영향을 주는 주요 외란은 <Table 4>에 나타내었다. 킬른에 영향을 가장 많이 주는 외란은 원료 modulus의 변화이며, 특히 SM이 높거나 K₂O의 함량이 높을 때에는 분상 클링커가 생성되어 화염온도는 하락하고 CO가 발생되며, 클라에 코팅이 부착되어 정상적인 조업이 어렵게 된다. 또한 원료밀 공정변화에 기인하여 spray tower 전단에서 압력변동이 발생시



<Fig. 4> Overview of control system

<Table 4> Factors of disturbance

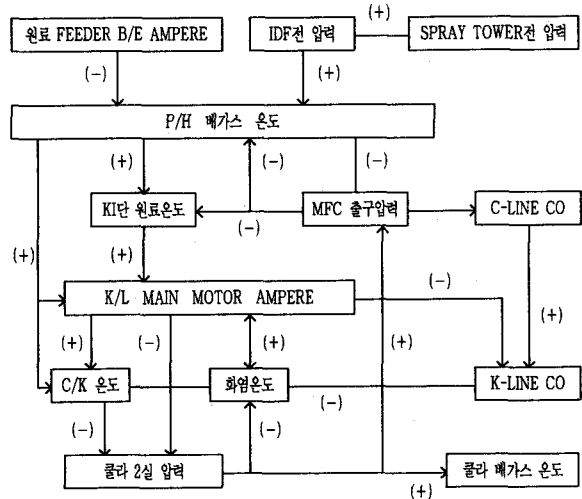
원료 및 연료측면	설비 및 운전측면
• Modulus 변화	• Feeder hunting 및 실량변화
• 알카리 함량 변화	• Fresh Air 유입
• 부원료 source 변화	• Sensor 오동작

<Table 5> Characteristics of important variables at #5 kiln process

변 수 명	특 성
클링커 온도	클링커 F-CaO
화염 온도	소성상태, 분상 클링커
킬른 압페어	소성대에서 소성상태 변화
1단 Cyc. 온도	원료의 탈탄산 정도
P/H 출구 온도	원료 투입 실량 변화
K IDF전 CO	소성대 연소상태 판단
C IDF전 CO	원료 증가 가능성

곧바로 킬른 IDF 전단의 압력변동이 발생되며 MFC에서의 압력변동 및 전계에서의 변동을 유발하게 된다. 물론 원료 및 연료 feeder의 hunting시에는 공정이 안정되게 운전되지 못하고 계속적으로 변동하게 된다.

그리고 소성상태를 판단하는 중요한 변수중 하나인 킬른 main motor 압페어는 킬른 동체가 상·하로 이동함에 따라 절대값이 변화되어 운전자로 하여금 잘못된 판단을 유발하게 한다. 소성상태 판단에 주요한 변수들의 특성은 <Table 5>



<Fig. 5> Flow diagram of correlations between variables

에 나타내었다.

그리고 주요변수간의 상관관계를 도식적으로 <Fig. 5>에 나타내었다. (+)는 정상관성, (-)는 역상관성을 의미한다.

4. 자동제어시스템의 설치

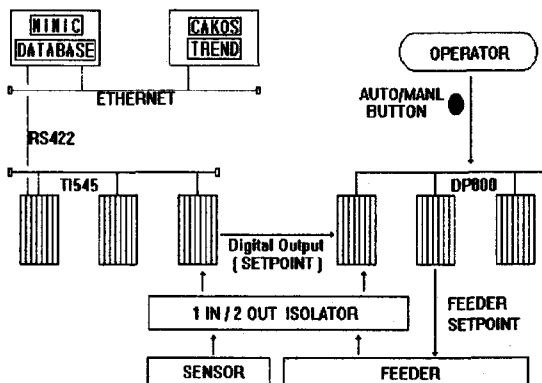
영월 5호 킬른의 기존 제어시스템은 VAX/11 computer와 DP1500 시스템으로 구성되어 있어, 본 연구에서 개발된 운전자동제어시스템과의 interface를 소프트웨어적으로 연결할 수 없어 별도의 PLC를 설치하였다.

그리고 기존 제어시스템과의 독립성을 유지하기 위하여 PLC의 I/O module에 연결되는 단자를 1 input/2 output isolator를 이용하여 독립적으로 연결하였다. 그리고 운전제어기에서 계산된 출력값은 기존의 DP800으로 전송하여 운전자가 운전 desk에서 버튼을 이용하여 관리할 수 있도록 하였다.

그리고 DP800 PLC의 프로그램을 일부 수정하여 자동운전제어기에서 출력되는 출력값들이 각 조절변수로 전송될 수 있도록 하였다. 본 시스템의 설치는 영월공장 전기과의 인력으로 자체설치하였다. 영월 5호 킬른의 운전제어시스템의 개괄도는 <Fig. 6>에 나타내었다.

5. 자동제어시스템의 적용결과

영월공장 5호 킬른에 설치된 운전자동제어시스템은 '96년도 8월에서 12월까지 실시간 자동운전 실험을 통하여 제어 logic을 보완하였으며, '97년



<Fig. 6> Overview of automatic control system

도 1월부터 본격적인 자동운전을 시작하여 자동운전의 효과를 파악하고자 하였다. 그리고 일반적으로 자동운전과 수동운전의 비교는 자동운전제어시스템의 설치 전·후를 비교하는 것이 타당하나 기존 데이터의 신뢰성 부족으로 자동운전제어시스템의 설치후 일정기간 동안의 자동운전과 수동운전과의 결과를 비교하였다.

그러나 소성공정은 외란이 매우 많고, 주·부원료 및 연료를 일정하게 유지하기가 매우 어려우며, 또한 설비는 시간에 따라 변화하는 특성을 갖고 있어 자동운전의 효과파악을 위한 기준을 선정하기가 매우 어려웠다.

또한 영월 5호 킬른 각 feeder들의 hunting이 '96년 12월 보수후 심해져 '97년도 1월에서 2월중에 각 feeder들을 정상화하기 위하여 많은 조치들이 행해짐에 따라 비교기준을 선정하기가 더욱 곤란하였다. 따라서 자동 및 수동운전간의 비교를 두가지 경우로 구분하였는데, 첫번째 경우는 설비가 정상적으로 가동되는 조건하(24시간 설비가동시)에서 자동운전의 결과와 수동운전의 결과를 비교하였고, 두번째 경우는 설비가 안정된 정상조건하(24시간 설비가동, feeder 정상화후)에서 자동운전과 수동운전의 결과를 비교하였으나 두 경우 모두 비슷한 결과를 나타내었다. <Table 6>에는 두번째 경우의 자동운전과 수동운전의 비교결과를 나타내었다.

<Table 6>에서 볼 수 있는 바와 같이 자동운전의 경우가 수동운전의 경우보다 클링커 생산량이 증가했음을 알 수 있다.

그러나 열 소모량은 자동운전의 경우가 수동운전의 경우보다 증가하였는데, 이는 자동운전의 경우가 수동운전의 경우보다 더 강한 상태로 클링커를 소성했음을 의미하며, 이에 따라 자동운

<Table 6> Result of automatic control by CAKOS

구분	클링커 생산량 (T/D)	THC (Kcal/Kg-cli)	클링커 F-CaO (%)	자동운전율 (%)
자동	4289	758	1.53	95
수동	4267	756	1.65	5
대비	22↑ (0.5%↑)	2↑ (0.26%↑)	0.12↓ (7.3%↓)	전체기준 : 64%

전의 경우가 수동운전의 경우보다 클링커 f-CaO 함량이 감소하게 된 것이다. 영월 5호 킬른의 경우에 있어서는 클링커 f-CaO의 함량이 높은편이기 때문에 클링커 f-CaO 함량을 낮추는 것은 매우 중요하다.

그리고 자동운전시 일간 자동운전율은 95%로 매우 높음을 알 수 있다. 실제로 CAKOS에 의한 자동운전시 운전제어의 실패로 인해 수동으로 전환된 경우는 2회 있었는데, 그 원인은 석회석이 PBY(Pre Blending Yard)를 거치지 않고 bypass된 경우로, 이에 따라 원료의 modulus의 산포가 증가하여 급격한 공정변화가 발생되었기 때문으로 판단된다.

따라서 자동운전이 연속적으로 유지되기 위해서는 안정된 원료조정은 필수적인 전제조건이며 이는 수동운전의 경우에도 마찬가지이다. 그리고 전체 킬른가동시간 기준에 따른 자동운전율은 64%인데 이는 설비가 정상적이지 못한 경우, 즉 설

비의 부분적인 보수 또는 점검, feeder가 심하게 hunting한 경우와 BC oil을 전소한 경우에 해당한다.

6. 결론 및 향후계획

본 연구에 의해 개발된 소성공정 자동운전제어 시스템(CAKOS)에 의한 자동운전은 수동운전보다 향상된 운전결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그리고 자동운전율을 향상시키기 위해서는, 즉 공정을 안정화시키기 위해서는 균일한 원료조정이 필수적임을 확인할 수 있었다.

그리고 개발된 소성공정 운전제어시스템은 현재 개발중인 WindowsNT용으로 version-up하여 상용화하고, 영월 3호 킬른에 확대적용할 예정이다. 그리고 CAKOS의 운전결과를 활용하여 당사에 기 설치된 ABB-LINKman 제어 logic에 대해서도 제어성능을 향상시킬 계획이다.