

퍼지 전문가 시스템을 이용한 유리 용해로 이상 감시 시스템 구축 사례*

문운철

우석대학교 반도체 전기 자동차 공학부
(ucmoon@woosuk.ac.kr)

본 논문에서는 용해로 이상감시를 위한 실시간 유리 용해로 운전 전문가시스템을 구축한 결과를 소개한다. 유리 용해 공정에서는 운전자의 경험지식에 의해 내부의 상황을 판단하게 되고, 이는 용해로 수명과 제품의 품질에 중요한 영향을 준다. 이를 전문가 시스템으로 구현하기 위하여, 먼저 기존 운전자의 지식을 취합, 분석한다. 그 후, 취합된 각 지식들의 특성에 부합하도록 이진 규칙(Crisp Rule)과 퍼지 규칙(Fuzzy Rule)으로 구분한다. 이 때, 선형 회귀분석을 통하여 퍼지 규칙의 입력을 결정함으로써 보다 정확한 운전 지식의 표현이 가능하도록 하였다. 설계된 알고리즘은 젠심(Gensym)사의 실시간 전문가 시스템 개발 툴인 G2를 사용하여 구현하였다. 제시된 퍼지 전문가 시스템은 삼성코닝(주) 수원사업장의 실제 생산 용해 공정에 직접 적용하여 그 효율성이 검증되었다.

1. 서론

전문가 시스템은 각종 감시, 예견, 제어, 진단, 처방 등의 각종 분야에서 활발하게 적용되어 왔다(이재규, 주석진, 오상봉 1995). 이는 어떤 대상을 숙련된 전문가가 축적된 경험과 지식을 바탕으로 처리하고 있을 때, 이를 체계적으로 정리하여 구현하는 것으로 요약될 수 있다(김화수, 조용범, 최종욱, 1998). 이런 관점에서 보았을 때 유리 용해로는 전문가 시스템의 좋은 적용분야가 될 수 있다.

유리 용해로(Furnace)의 공정은 크게 용해, 성형, 연마로 분류된다. 주로 모래성분으로 구성된 원료가 용해로에 투입되면, 용해로 내부에서 오일을 연소시켜 가열함으로써 생성된 복사에너지

원료에 전달하게 된다. 유리로 용융된 원료는 안정된 온도로 유지된 후, 다음 공정으로 흘러 보내지게 된다.

그러나, 용해로의 특성상, 가시적인 용해로 운전 이상의 유무를 직접 판단하기는 매우 어려우며, 이는 용해로에 설치된 각종 압력, 온도, 유속 센서에 의지한 운전자들의 경험과 과거 사례로 판단하게 된다. 순간적인 센서 값보다는 과거 일정기간의 경향에 기반하여 판단을 하게 되고, 여러 센서의 값과 그 경향을 가지고 종합적으로 분석한 후 이상유무에 대한 결정을 내리게 되고, 그에 따른 조치를 취하게 된다. 또한, 여러 운전자들의 경험과 지식이 다양하기 때문에 체계적인 작업 지침이 존재하기 힘든 실정이다. 따라서, 시스템을 이용한 용해로 이상감시(Fault Diagnosis)는

* 본 연구는 우석대학교 신입교수 연구비지원에 의하여 수행되었음.

운전원의 실수, 용해로의 경험부족에서 오는 오작을 막고, 고장진단, 사고 복구 및 대책 마련에 소요되는 비용을 줄이는데 크게 기여할 수 있다. 정형화되고 체계적으로 설계된 전문가시스템은 용해로의 생산성 향상에 크게 기여할 수 있으며, 특히 지식의 모호함을 표현할 수 있는 방법이 마련되어야 한다(Schneider, Kandel, Langholz and Chew, 1996).

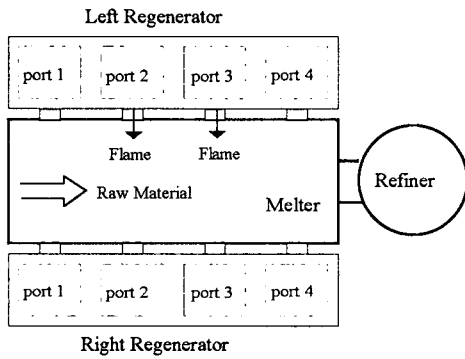
본 논문에서는 삼성코닝(주) 수원사업장의 용해로를 대상으로 하여 용해로 이상감시를 위한 실시간 퍼지 전문가 시스템(Fuzzy Expert System, FES)을 구축한 결과를 소개한다. 전문가 시스템에 퍼지 로직(Fuzzy Logic)의 적용 가능성은 여러 문헌에서 언급되어 왔다(Schneider, Kandel, Langholz and Chew 1996; 이운재, 1993). 일본의 동경전력(株)에서는 퍼지이론을 이용하여 발전소의 기동 스케줄 관리 시스템을 구축하였으며, 삼변(三變)전기(株)에서는 퍼지전문가 시스템을 이용하여 엘리베이터들의 운전 관리 시스템을 개발하였다(이운재, 1993). 하지만 유리 산업에 전문가 시스템이 적용된 문헌은 찾기 힘든 실정이다.

본 논문에서는 먼저, 설문조사를 통하여 용해로 운전자의 경험과 지식을 정형화하였고, 이들과 각 지식의 특징에 따라 이진 규칙(Crisp Rule)과 퍼지 규칙(Fuzzy Rule)으로 구분하였다. 또한, 선형 회귀분석을 통하여 퍼지 규칙의 입력을 결정함으로써 보다 정확한 운전 지식의 표현이 가능하도록 센서 값을 처리하는 방법을 제시한다. 개발 툴로써는 젠심(Gensym)사의 실시간 전문가 시스템 개발 툴인 G2를 사용하여 실제 용해로에 직접 적용하였다.

2. 유리 용해로 (Glass Melting Furnace)

그림 1은 전형적인 유리 용해로의 구조로서 상부에서 내려다본 그림이다. 유리 용해로는 크게 두개의 독립된 공간, 즉, 멜터(Melter)와 리파이너(Refiner)로 구성되어 있다. 멜터는 짧은 선으로 그려진 사각형, 그리고 리파이너는 짧은 선으로 그려진 원으로 나타내어져 있다. 멜터의 좌우에는 연소공기 공급 및 연소장치를 포함하는 축열실(Regenerator, 리제너레이터)이 설치되어있다. 3차원적으로, 멜터와 축열실은 직육면체의 구조이고 리파이너는 원기둥 형태의 구조이다. 유리의 원료는 그림에서 멜터의 왼쪽에서 공급되며, 좌우의 포트(Port)들에서 벙커-C유를 교대로 연소하여 가열함으로써, 유리로 화학변화를 일으키게 된다. 멜터에서 용해된 유리 물은 스로트(Throat)라고 불리는 통로를 통하여 리파이너로 흘러 들어가게 된다. 리파이너에서는 용해된 유리 물이 성형하기 적당한 온도로 다시 조절되게 된다. 리파이너에서는 다시 포허스(Forehearth, FTH)를 통하여 유리물을 제품으로 성형하는 공정을 통과하게 된다.

용해로 내부의 상태를 파악하기 위하여, 멜터의 바닥과 천장에는 여러 개의 온도 센서들이 설치되어 있다. 즉, 그 위치에 따라 천장에는 MC1 (Melter Crown 1), MC2, ..., MC5 그리고, 바닥에는 MBDH (Melter Bottom Dog House), MB1, MB2, ..., MB6, CMB (Ceter Meltor Bottom), RB (Refiner Bottom) 등의 센서가 설치되어있다. 이때, 바닥온도 센서 중, MB1, ..., MB6는 각각 바닥의 왼쪽과 오른쪽에 한쌍씩 설치되어 있다.



<그림 1> 유리 용해로의 상단면도

연소 공기는 그림 1에서의 멜터 위 아래의 축열실을 통하여 공급되고 빠져나간다. 그림에서와 같이 각 축열실은 몇 개의 포트를 포함하고 있고 이 포트에는 연소 공기의 공급과 배출을 위한 통로들과 연료를 연소시키는 버너(Burner)가 장착되어 있다. 한쪽 축열실에서 연료와 산소가 공급되어 연소가 일어나는 동안 다른 쪽의 축열실에서는 연소 가스가 배출되게 된다. 연소 불꽃과 연소 공기의 방향은 20분 주기로 바뀌게 된다. 즉, 한쪽의 축열실이 연소 공기와 불꽃을 공급하는 동안, 다른 쪽에서는 연소 가스를 방출하는 역할을 하게 되고, 20분 후에는 그 역할을 바꾸게 된다. 이러한 주기적인 연소의 방향전환을 리버싱(Reversing) 이라고 한다. 따라서, 방출되는 연소 가스의 열에너지는 축열실에 의해서 재활용되게 된다.

3. 유리용해로 퍼지전문가시스템

3.1 지식 수집

본 연구에서는 기본적인 지식의 표현 방법과

구조, 특성을 파악하기 위해 용해로 운전 실무자들을 대상으로 설문지를 배포, 지식베이스를 구축하기 위한 작업을 하였다. 용해공정 업무는 유리의 원재료인 배치(Batch) 및 멜터, 리파이너, FTH(Forehearth)의 공정 수순에 따라, 정기적인 점검작업 및 돌발상황에 대한 조치작업, 그리고 설비에 대한 지속적인 유지작업으로 구분되어진다. 이에 운전자의 지식이나 작업형태도 공정별 설비별로 구분되어질 수 있다.

경험 및 지식 수집을 위하여, 공정 및 설비별의 21개의 범주(Category)로 나눈 후, 세부적인 사항에 대해 발생 가능한 상황에 대한 묘사를 답하는 설문조사를 실시하였다. 그 결과, 21개의 범주내에 세부 104개의 감시항목을 설정하고 이에 따른 현상을 정리하였다.

<표 1> 용해로 이상 종류 및 현상

Category	Trouble 종류	현상
TANK 내화물	Checker 막힘	MC 온도의 Unbalance 발생
		MC 온도가 일주일내 걸쳐 50도 이상 하락
Damper	Slag 쌓임	로압이 서서히 상승
		Glass온도가 15일동안 3도 이상 상승

표 1은 정리된 용해로 이상의 종류 및 이에 따른 현상의 몇 가지 예를 나타낸다. 표 1에서 축열실의 내부 구조물인 Checker가 막히면 MC 온도의 비대칭이 발생하거나 MC온도가 일주일내 걸쳐 50도 이상 하락함을 나타낸다. 또한, Damper에 slag가 쌓였을 경우, 로압이 서서히 상승하거나 유리온도가 15일 동안 3도 이상 상승한다는 사실을 나타낸다.

3.2 지식의 표현 및 추론

표 1에서와 같이 수집된 이상 항목별 현상은 다음과 같은 규칙으로 표현한다.

Rule 1)

IF (MC 온도의 비대칭이 발생) or (MC온도가 일주일에 걸쳐 50도 이상 하락)

Then (Checker 막힘) (1)

Rule 2)

IF (로압이 서서히 상승) or (유리온도가 15일 동안 3도이상 상승)

Then (Slag 쌓임) (2)

즉, 각 규칙의 전건부는 (MC 온도의 비대칭이 발생), (MC온도가 일주일에 걸쳐 50도 이상 하락), (로압이 서서히 상승) 그리고 (유리온도가 15일 동안 3도이상 상승) 등, 여러 종류의 사실(Fact)들의 AND, OR 조합으로 표현되며, 각 규칙의 후건부는 운전자에게 제시해야 할 용해로 이상의 종류로 표현된다. 따라서, 각 전건부 사실들을 실시간으로 감시하고 있다가 각 규칙의 전건부 추론을 통하여, 규칙의 후건부를 운전자에게 제시한다.

본 논문에서는 수집된 규칙의 표현 및 추론 방법에 따라, 이진 규칙(Binary Rule)과 퍼지 규칙(Fuzzy Rule)으로 구분하여 추론을 시행하였다.

(1) 이진 규칙의 추론

수집된 규칙 중에는, 구체적인 판단 값에 근거하여 그 판단 값의 관리 목표치와 그 허용한계를 명확하게 할 수 있는 것들이 있다. 예를 들어, 다음과 같은 운전자의 경험 지식이 수집되었다고

가정하자.

“Reversing 후의 안정된 MC1의 온도 값이 평소 때 보다 높아지면, 병커-C 오일의 온도가 높아진 상황이다.” (3)

위의 규칙 중, (Reversing 후의 안정된 MC1의 온도 값)이라는 사실은 (Reversing 후의 10분 경과 후의 MC1 센서 값의 평균)으로 표현될 수 있다. 또한, (평소의 온도 값)이라는 사실은 표준으로 관리하는 온도 값으로, 그리고 운전자가 지정한 상한과 하한의 온도범위를 이용하면 G2상에서 아래와 같은 코딩된 규칙으로 표현이 가능하게 된다.

IF (Average-MC1-After-Reversing) > (TargetValue)+ (Upper- Margin),
Then (병커-C 오일의 온도 상승) (4)

이때, (Average - MC1 - After - Reversing)은 “reversing 후 10분 경과 후의 MC1 값의 평균 값”을 나타내고, Target-Value와 Upper-Margin은 각각 운전자가 미리 지정한 표준으로 관리하는 온도 값과 상한의 온도범위를 나타낸다.

이와 같이 각 사실이 객관적인 판단에 근거하여 그 참-거짓 여부를 파악할 수 있는 규칙의 경우에는 기존의 이진 논리를 통하여 그 규칙의 활성화 여부를 판단한다.

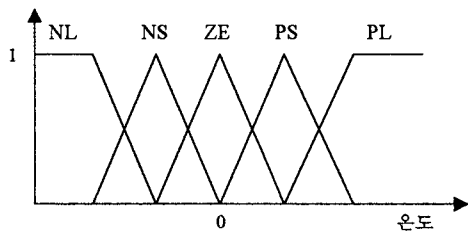
(2) 퍼지 규칙의 추론

이진 규칙에 비하여, 센서 값의 급격히 증가하는 경향, 일정한 추세, 완만하게 감소하는 추세 등의 모호하거나 정형화하기 어려운 사실(Fact)들이 있다. 전체적인 경향을 표현하는 지식이나 구

체적인 표현으로의 접근이 어려운 운전자들의 지식은 퍼지 집합을 바탕으로 한 퍼지 규칙을 이용하여 표현하였다. 예를 들어 다음과 같은 운전자의 경험지식이 규칙으로 수집되었다고 가정하자.

“Center Melter Bottom (CMB)의 온도가 서서히 증가하는 경향이고, Refiner Bottom (RB)의 온도가 상당히 증가하는 경향이면, 스톱트 상부 부분의 침식이 상당부분 진행된 상태이다.” (5)

위와 같은 규칙을 처리하기 위하여, 먼저 그림 2와 같은 NL(Negative Large), NS(Negative Small), ZE(Zero), PS(Positive Small), PL(Positive Large)라는 5개의 퍼지 집합을 정의하였다.



<그림 2> 온도경향의 퍼지 분할

그 후, 용해로 운전자의 판단에 따라 각 CMB, RB등의 온도 경향을 위의 퍼지 분할에 따라서 Scale하여 각 사실들을 표현하도록 하였다. 위와 같은 언어적인 표현을 이용하면, 스톱트 상부 침식에 관한 규칙 (5)는 다음과 같은 형태로 표현된다.

“CMB의 온도 경향이 PS이고, RB의 온도경향이 PL이면, 스톱트 상부 부분의 침식이 상당부분 진행된 상태이다.” (6)

위와 같이 퍼지 규칙 베이스(Fuzzy Rule Base)를 구축한 후에는, 용해로에서 실시간으로 발생하는 센서 값을 전문가 시스템의 퍼지 규칙에 입력하여야 한다. 운전자와의 인터뷰를 통해서, CMB와 RB의 온도 경향이라는 사실은 3일 정도의 온도경향으로 표현될 수 있는 것으로 파악되었다. 하지만 용해로의 온도 값은 4~5시간 주기로 연동하기 때문에 실제 값을 직접 퍼지 규칙에 입력하기에는 상당한 무리가 있는 것으로 파악되었다.

따라서, 본 논문에서는 이와 같은 3일 정도의 온도 경향을 전문가 시스템에 입력하기 위해서, 다음과 같은 3일간 온도분포의 1차 선형회귀분석을 통하여 그 증가 감소하는 경향을 판단하였다.

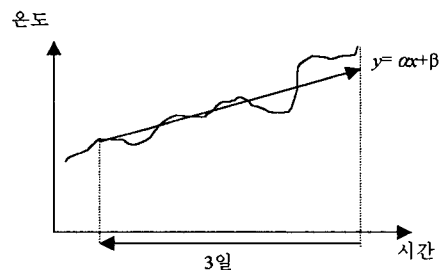
$$y = \alpha x + \beta, \quad (7)$$

이때, y 는 온도 그리고 x 는 시간을 나타내며, α 와 β 는 각각 회귀직선의 기울기 및 절편을 나타낸다. 이때, α 와 β 는 다음과 같은 식을 통하여 계산된다(Johansson, 1993).

$$\begin{pmatrix} \beta \\ \alpha \end{pmatrix} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T Y \quad (8)$$

여기서,

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 2 & \dots & n \end{bmatrix}^T, Y = [y(1) \dots y(n-1) y(n)]^T.$$



<그림 3> 온도 경향의 선형 회귀 분석

그림 3은 본 논문에서 사용된 1차 선형회귀 분석의 예를 보여준다. 즉 3일간의 1차 선형 회귀 분석에서 나온 직선의 기울기 α 를 이용하여 퍼지 규칙의 입력으로 사용하였다.

위와 같은 과정을 통하면, (6)은 G2상에서 아래와 같이 코딩된 규칙으로 표현이 가능하게 된다.

IF (Difference-of-CMB-via-Linear-Regression-Coeff-during-3day) is PS, AND (Difference-of-RB-via-Linear-Regression-Coeff-during-3day) is PL
Then “스포트 상부침식”. (9)

이때, (Difference-of-CMB-via-Linear-Regression-Coeff-during-3day)는 “3일간 CMB의 온도 기울기 α ”를 나타내고, (Difference-of-RB-via-Linear-Regression-Coeff-during-3day)는 “3일간 CMB의 온도 기울기 α ”를 나타낸다. 이와 같이, 각 온도센서의 선형회귀를 통하여 각 온도 센서의 경향을 나타내는 사실들을 처리하도록 하였다.

각 퍼지 규칙은 다음과 같이 조건부의 소속정도(Membership)을 이용한 최소연산(Minimum Operation)을 통하여 최종적인 규칙의 적합도(Firing Strength)를 구하게 된다(Lee, 1990; Sugeno, 1985). 즉, (9)와 같은 퍼지규칙의 적합도는 다음과 같이 계산된다.

$$\omega = \mu_A(\alpha_1) \wedge \mu_B(\alpha_2), \quad (10)$$

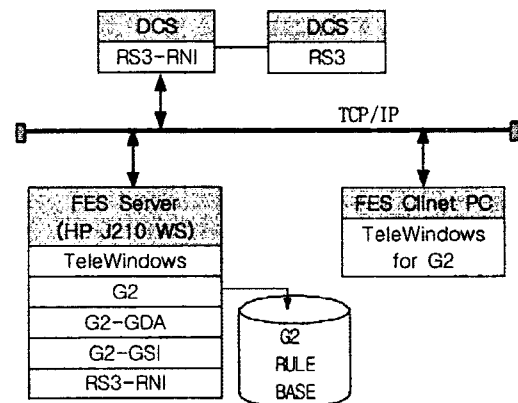
여기서, α_1 과 α_2 는 각각 CMB와 PB의 기울기이고, 퍼지집합 A는 CMB의 PS(Positive Small), 퍼지집합 B는 PB의 PS(Positive Small)를 나타내며, \wedge 는 퍼지집합의 최소 연산(Minimum

Operation)을 나타낸다.

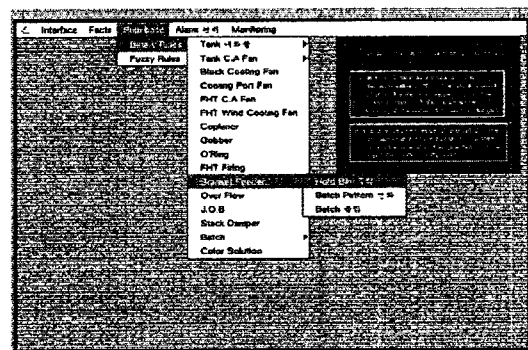
각 퍼지 규칙의 적합도가 운전자가 미리 지정한 임계치(Threshold)를 넘어서게 되면 그에 따른 후건부를 제시하도록 하였다.

3.3 구현

개발된 퍼지 전문가 시스템은 삼성 코닝(주) 수원사업장의 실제 생산 용해로를 대상으로 적용되었다. 시스템 개발에는 총 1년간의 소요기간과 30M/M (Man Month)의 개발 인력이 투입되었다.



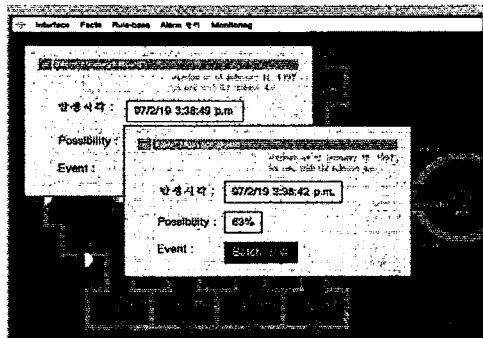
<그림 4> 퍼지전문가 시스템 구성도



<그림 5> 규칙의 시스템 표현 화면

그림 4는 구현된 퍼지전문가시스템의 구성도이다. 개발 S/W 툴로써는 젠심(주)사의 실시간 전문가 시스템 개발 툴인 G2 V.4.0 을 사용하였고, H/W는 HP의 워크스테이션 J210을 사용하였다. 또한, 기존에 설치되어 있는 로즈마운트(Rosemount)사의 DCS (Distributed Control System) RS3와의 인터페이스를 위해 RNI(Rosemount Network Interface) 라이브러리를 이용하여 C Programming을 하였다.

그림 5는 규칙의 표현 화면으로써, 모든 규칙을 이진규칙과 퍼지규칙으로 나누고, 이를 각각의 범주별로 나누어 표현/수정/추가/삭제 하는 화면을 나타낸다. 그림 6은 하나의 규칙이 활성화되어 용해로의 이상을 운전자에게 나타내는 화면이다. 그림에서는 “배치 풀림”이라는 규칙의 적합도가 0.63으로써, 미리 운전자가 설정한 임계치를 넘어서서 활성화된 것을 나타내고 있다.



<그림 6> 규칙 활성화 화면

비록 정량적인 효과 분석은 되지 않았지만, 본 시스템을 도입함으로써 용해로 운전자가 항상 용해로 이상유무를 확인하지 않아도 되기 때문에 용해로 운전자의 작업 부담이 현저하게 줄어들게 되었다.

4. 결론

본 논문에서는 퍼지 로직을 이용하여, 모호한 지식을 표현하도록 한 실시간 용해로 전문가 시스템의 적용 사례를 소개하였다.

유리용해공정의 특성에 맞게 범주를 나누고, 각 관리단위로 설문지 및 인터뷰를 통하여 용해로 지식을 수집하였다. 수집된 용해로의 지식들에 적합하도록, 이진 규칙과 퍼지 규칙으로 나누어 처리하는 방식을 제시하였다. 또한 실시간 전문가 시스템에 적합하도록 시계열 회귀분석을 이용하여 센서 값을 처리하는 방식을 제시하였다.

결론적으로, 본 논문은 퍼지 전문가 시스템의 개념 위에 유리용해공정의 특성에 맞는 범주의 구분과 경향규칙의 표현을 제안하고 이를 실제 생산 공정에 성공적으로 적용함으로써 그 효용성을 입증하였다.

참고문헌

- 김희수, 조용범, 최중욱(1998), 전문가 시스템, 집문당.
- 이윤재(1993), 전문가 시스템, 홍릉과학출판사.
- 이재규, 주석진, 오상봉(1995), 전문가 시스템의 응용과 사례분석, 법영사.
- Johansson R.(1993), *System Modeling and Identification*, Prentice Hall.
- Lee, C. C.(1990), "Fuzzy logic in control system : fuzzy logic controller - Part I & II", *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern.*, vol. SMC-20, no. 2, pp. 404-435.
- Schneider M, Abraham Kandel, Gideon Langholz and Gerard Chew(1996), *Fuzzy Expert System Tools*, John Wiley.
- Sugeno M.(1985), "An introductory survey of fuzzy control", *Inform. Sci.*, vol. 36, pp. 59-83.

Abstract

A Fault Diagnosis System of Glass Melting Furnace Using A Fuzzy Expert System

Unchul Moon*

This paper presents an application result of on-line fault diagnosis system for glass melting furnace using a fuzzy expert system. Operators maintain the furnace using the furnace knowledge and experience, which directly influence the furnace and glass product. Firstly, knowledge and experience is achieved and analyzed to implement the furnace knowledge and experience into fuzzy expert system. The acquired knowledge is determined as a crisp rule or a fuzzy rule to reflect its characteristics. And, a linear regression is used as the input of fuzzy rule to consider the exact knowledge of human operator. The fuzzy expert system is implemented with G2 which is an on-line expert system tool of Gensym Co. The application to a production furnace of Samsung-Corning Co. in Suwon shows successful results of proposed fuzzy expert system.

Key words: Fuzzy Expert System, Glass Furnace, Linear Regression

* Dept. of Electronic Engineering, Woosuk University.