

용해로 운전에서 Setting고정(4M 표준화)의 효율적 방안

조진형[†] · 장도수 · 이세재 · 서정열 · 김이남 · 정종원

금오공과대학교 산업시스템공학과

Efficient Method of Fixing the Setting(4M standardization) in Melting Furnace Operation

Jin-Hyung Cho[†] · Do-Soo Jang · Sae-Jae Lee · Jung-Yul Suh · I-Nam Kim · Chong-Won Chung

Department of Industrial Engineering, Kumoh Institute of Technology

Glass melting process is influenced by both control and observation factors, where control factors include quantity and mixing ratio of raw material, the amount of fuel and air in-take. Further observation factors include temperature and pressure at each step of process inside glass melting furnace.

Ambient Control is an effective means to eliminate complications from excessive variation among raw materials, or external disturbance from wide fluctuation of environment around equipments. Ambient Control uses both control and observation factors mentioned above.

This study suggests an effective Proactive Control System that can enable genuine 4M standardization in glass melting furnace by applying Ambient Control.

Keywords : Proactive, Reactive, Ambient, Furnace, 4M

1. 서론

생산 현장에서는 공정간 발생하는 문제점을 찾아 해소하고 각각의 공정을 종합적으로 관리함으로써 인원, 장비, 자재 등의 자원을 가장 효율적으로 활용하여 최적의 품질을 생산하고자 한다. 일반적으로 제품불량, 사고 등은 공정내부의 예기치 못한 사건에 의해서 발생되는데, 대부분의 기업들은 이러한 문제점의 가능성을 인식하고 이를 줄이기 위해서 품질 관리 체제의 확립과 개선, 재난 방지 활동 등을 전개한다.

공정을 조립과 장치로 이분화 하는것이 최근에는 명확하지 않지만, 구분하여 볼 때 조립공정이 장치공정보다는 재현성 확보 등 관리시스템의 확립이 용이함은

주지의 사실이다. 또한 장치공정에서는 다음과 같은 특이사항이 나타난다고 말할 수 있다.

첫째로, 공정의 재현성이 확보되지 않아서 문제발생의 예측이 어렵고, 또한 그것을 확률적으로 판단할 수 있다 해도 언제 어디서 어떻게 발생하는 지를 파악하기가 쉽지 않다.

둘째로, 일단 문제가 발생하면, 작업자의 능력으로는 현실적으로 이를 통제하기가 어렵고, 통제가 가능하더라도 그 시점에서는 이미 치명적인 위험에 처해 있는 경우가 대부분이므로 구조나 회복이 쉽지 않다.

셋째로, 위험발생의 책임소재나 원인관계의 규명이 불명확하다.

장치공정은 대부분 위와 같은 세 가지 문제점을 지니

[†] 교신저자 joy@kumoh.ac.kr

※ 본 연구는 산업자원부 지정 금오공과대학교 전자부품산업 고품질화 및 공정자동화 연구센터의 일부 지원에 의한 것임.

기에, 공정관리를 사후대응적(reactive control)방법에만 의존하는 것이 올바른 대책인가에 대해서 많은 의문을 낳게 한다. 예컨대 전통적 SPC 공정에서는 제품이 생산되면 통계적인 기법을 이용하여 제품을 측정하게 된다. 그래서 제품이 이상이 있으면 작업자가 제어장치를 조정하여 설비와 공정이 변하게 되고, 그 공정에서 나오는 제품들은 다시 측정하여 제어장치를 조정하는 사후대응적 관리를 함으로서, 공수(man-hour)가 증가하고, COPQ(cost of poor quality)가 높아진다. 장치공정의 대표적 예인 유리용해로에서도 이러한 문제점이 발생한다. 유리용해공정은 우선 주원료인 모래를 비롯한 여러 원료들을 용해로(furnace)에 투입한 다음 특정 시간 동안 용해시킨다[12]. 용해시키는 과정 중에는 용해 물질의 품질 유지 및 불량방지를 위해 운전자들은 관측인자들을 통해 용해로의 상태를 수시로 감시하며 제어인자를 통해 용해로 내의 온도 및 압력 등을 원하는 수준으로 유지하려 하지만 외부적 환경변수의 통제가 힘들어서, 외부환경의 변화(외란)때마다 장치의 셋팅(setting)값을 수시로 변경하여 외부환경의 변화가 공정에 미치는 영향을 없애려고 노력한다. 즉, 용해운전자들은 4M 표준을 준수하여 운전하려하지만 외란이라는 큰 영향 때문에 아직까지 감각에 의존하는 대응적관리를 하고 있어 4M 표준화를 이룩하는데 큰 어려움이 있다.

본 연구에서는 용해로공정에서 기류관리, 인풋관리 등의 외란관리(ambient control)를 통하여 4M 표준화를 성공적이고 경제적으로 이루기 위한 방법을 모색해 보고자한다.

2. 이론적 배경

2.1 4M 표준화

대량생산의 제조과정에서 아무리 똑같은 조건하에서 만들어진 제품이라 하더라도 그 품질특성을 조사해보면 반드시 산포가 존재한다. 제조공정조건인 4요소인 4M(man, machine, material, method)을 동일조건으로 하는 즉, 동일한 작업자의 배치, 사용하는 원재료품질의 일정한 유지, 기계·설비의 동일조건 유지, 작업방법의 동일한 유지 등 공정 전반에 걸쳐 표준화에 의한 공정관리를 하여 산포를 일정하게 유지하는 것(산포가 크든지 작든지 랜덤오차(random error)의 범위에서 움직이도록 하는)이 중요하다[1]. 4M 표준화를 한국인의 키를 예로 들어 다시 설명하면, 한국인은 키가 다 틀리지만 통계학적으로는 같다고 한다. 이것은 한국인은 같은 음식을 먹으며 살아온 환경이 거의 같기 때문이다. 이것이 바로 4M 표

준화(identically and independent distributed 혹은 random sample)가 되었다는 것이다. 현재 우리는 4M을 같게 할 생각은 하지 않고 결과치(키)만 같게 하려는 경향이 강하다. 4M을 표준화 하여 동질성을 확보하면 재현성이 이루어져 검사가 편해지고 정밀해지며 공수절감과 바로 연결될 수 있다[21, 23].

장치설비의 외란관리를 통하여 셋팅값을 고정하고 (4M을 표준화 하고) 통제하기 힘든 외부 환경변화를 최소화하게 되면(preventive control) 장치공정의 주변환경과 공정상황, 제품특성이 예측가능해지고(predictive control), 제품, 부품, 원재료, 설비, 기기 등의 사양이나 형식을 고정하는 제품의 표준화와 작업방법에 대한 규정으로서 일의 순서, 절차, 방법 등을 고정하는 작업표준화가 이루어질 수 있다. 다시 말해 예측하기 힘들고 통제할 수 없는 외란에 임기응변으로 대응하는 혼란스러운 상황(reactive control)은 사라지고 선형적관리(proactive control)로 이어질 수 있다는 것이다. 그 결과로는 제품공정의 안정성과 그에 따른 각종 비용의 절감, 적합율(양품율, 수율)의 증가를 가져오게 되고, 궁극적으로는 고객만족도와 기업수익의 증가, 시장점유율의 상승도 가져온다[18, 19].

2.2 선형적관리(Proactive Control)

최근에 선형적 SPC기법은 품질관리를 하는 사람들에게 전폭적인 지지를 받고 있다. 선형적 SPC는 중요한 공정의 개선을 위해 문제점을 적극적으로 찾아가는 방법이다.

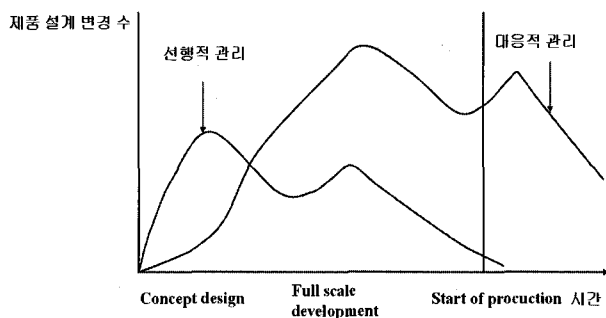
대응적 SPC기법은 수동적 공정개선을 위한 방법으로써 우연변동에 의해 얻어진 SPC 프로그램에 불과하다. 대부분의 현장에서는 문제를 해결하기 보다는 그들의 문제에 영향을 미치는 다른 것들을 비판하기 위해 대응적 SPC 방법을 사용한다.

대응(reactive)과 선형(proactive)을 비교하면 다음과 같다. 대응은 검사중심, 결과(result)중심, 품질과 비용의 트레이드오프(trade-off), 품질비용에 대한 대략적 짐작, 품질은 품질부문의 문제로만 국한하며, 규격에만 적합하면 수용하고, 품질은 기술적 문제라고 단정 지우는 것 등이다. 대응적기법은 문제의 해를 찾을 때만 사용함으로써 또 다른 문제들에 대해서는 또 다르게 접근해야 한다. SPC 프로그램을 정착시키기 위해서 비싼 설비를 투자하는 것만으로는 공정 안정화를 이루기가 힘들다. 프로그램을 지속시키는 시스템이 없으면 SPC 활동이 완전히 멈추거나 다른 동기를 부여하기가 힘들다. 선형은 예방중심이며, 6σ가 표준이 되고, 과정중심(process-oriented)적이며, 품질향상과 비용절감의 동시추구, 개발에서부터 서비스까지, 품질비용에 대한 공식적 조사, 품

질은 전부분의 문제, 지속적 개선(continuous improvement)이 요구된다.

선행적관리는 4M 표준화를 바탕으로 문제해결(troubleshooting)도 포함되는 원활하고 원숙한 대응적관리(reactive control)체제와 일어날 수 있는 공정변화를 감지할 수 있는 예측관리(predictive control), 예방관리(preventive control)을 모두 유기적으로 엮어내는 시스템 접근방법(systems approach)이고 상황 적합적 접근방법(contingency approach)이라 할 수 있다[14]. 즉, 선행적관리(proactive control)는 아래의 5가지 요건이 모두 갖추어 졌을 때 가능하다는 것이다

- 1) 5S 및 4M 표준화
- 2) 대응관리(reactive control)
- 3) 예측관리(predictive control)
- 4) 예방관리(preventive control)
- 5) Fool-proof(보까요끼)



<그림 1> 고객 니즈(needs)파악

있어 용해불량에 직접적인 영향을 미친다. 예를 들어 용해로 하우스 내부의 바깥 기상변화에 따라 용해로 하우스 내부의 기압이 변하게 된다. 따라서 용해로 하우스 내부에는 압력차이가 발생하고, 압력의 변화로 인해 용해 유리물의 흐름이 불안정할 뿐만 아니라 용해로 주변에 배치된 분사 노즐에서 분출되는 불꽃 길이의 변화로 인해 유리원료를 균일하게 가열하는데 매우 힘이 든다. 또한 용해로 내부의 기압차이로 인해 불꽃을 제어하는 오일의 양과 공기압력을 수시로 조정하는 불편함과 번거로움 등 효율적으로 관리를 할 수 없으며, 위와 같은 관리상의 어려움으로 인해 정제된 유리물의 내부에 이물질이 존재하는 등 결점으로 인한 부적합품이 빈번하게 발생하는 문제점이 있었다.

온도 산포의 영향을 줄임으로서 부적합률을 줄이기 위한 방법 중 가장 좋은 것은 용해하우스 전체를 항온·항습 할 수 있는 Clean Room으로 만드는 것이다. 하지만 용해하우스의 크기는 매우 크기 때문에 이를 위한 비용이 많이 소요되므로 이대진(금오공대, 2002)의 논문에서는 온도산포의 영향을 감소/제거시킬 수 있는 새로운 경제적인 외란 방지 시스템을 제안 하였다.

기류관리에 의한 용해불량 안정화 절차를 간략히 보면 다음과 같다[11, 20].

- 기류관리 4단계
 - step 1 : 주변적정온도 설정
 - step 2 : 주변온도산포 최소화
 - step 3 : 표준정립
 - step 4 : 실행

3. 외란관리(Ambient Control)1)

3.1 외란관리(1) - 기류관리

원재료를 안정적으로 용해하여 유리로 만드는 유리 용해 공정에서는 제품의 부적합률을 줄이기 위한 안정적인 온도 제어가 필수적이다. 적절하지 못한 용해로의 온도 제어는 용해된 유리물 내부에 기포 혹은 불순물을 포함하여 완제품 불량률의 원인이 될 뿐만 아니라 용해로의 안정 운전에도 큰 영향을 미치게 된다. 유리를 용해하는 로(爐)의 온도에 영향을 주는 것은 로(爐)의 온도를 직접 제어하는 연료량이나 공기(air)량 등의 직접적인 인자와, 로(爐) 주위를 감싸고 있는 외부환경 등의 간접적인 인자로 분류할 수 있는데 이 간접적인 인자 즉, 외기온도의 산포는 용해로의 온도 산포와 상관이

3.2 외란관리(2) - 인풋(Input) 관리

3.2.1 인풋 관리의 필요성

유리 제조시 파유리(cullet : recycled waste glass)를 일 정비율로 인풋의 주원료인 규사(silica sand), 소다회(sodium carbonate), 석회석(calcium carbonate) 등에 첨가하여 다시 용융공정에 되돌려 사용하는 것은 경제적인 이유뿐만 아니라, 파유리를 원료에 혼합시켜 용융하는 것이 기술적으로도 필요하기 때문이다.

유리용기 제조공업에서 파유리 혼입률은 목표조성과 동일한 조성을 가진 파유리가 30~40%일 때, 용융과정에서 발생하는 유리물의 흐름과 균질화는 물론, 제품의 열적, 물리적, 화학적 안정성의 유지에 가장 좋은 것으로 정설화 되어 있다. 특히, 파유리의 사용량은 에너지의 절약, 재료비 감소뿐만 아니라 로(爐)생산량을 증가

1) 외란관리의 목적은 대응관리의 문제점을 줄이고, 예방적 관리와 4M 표준화를 하기 위함이다.

시킬 수 있어 적절한 사용에 따라 생산성 및 효율에 매우 큰 역할을 할 수 있다. 파유리 첨가 사용량이 10% 증가 될 때 에너지(furnace melting energy)가 약 2.5%가 절감된다[2, 4, 25].

Hyslop(1930), Currie(1927), Uhrmann(1935) 등의 연구에 따르면, 동일한 조건(혼입률, 용융온도, 용융시간 etc.)에서 파유리 입자를 다르게 하여 연속용융을 한 결과, 큰 입자의 파유리는 이질성 유리가 만들어 졌고, 파유리의 입자가 작아질수록 유리구조는 향상되었고, 충격파손은 감소되었다. 입자가 큰 파유리가 용해로에 투입되었을 때 다른 원료보다 충분히 용융된, 상대적으로 비중이 낮은 조합원료(batch)를 유리물 위로 떠올리고, 입자가 큰 파유리는 뜨거운 용융유리탱크 속으로 침강 하여, 혼합되지 않은 2개의 다른 점도층이 생기게 되므로 균질화되지 않는 상태의 유리가 생성된다. 때로는 이질조성의 Cord나 Knot가 미용용 상태로 제품에 섞여서 부적합처리 되거나, 균질성의 저하로 충격 파손율이 커지게 된다. 따라서 파유리의 입자가 나머지 원료들과 비슷한 크기로 분쇄되어 충분히 혼합된다면 파유리로 인한 Cord나 Knot의 발생을 최소화시킬 수 있음을 알 수 있다.

파유리의 입자의 크기는 15mm를 초과하는 큰 조각이 로(爐)내에 투입 될 경우 상대적으로 비중이 가벼운 조합원료(batch)를 로(爐) 표면으로 뜨게하고, 큰 조각의 파유리는 로(爐) 아래 부분으로 가라앉아 혼합되지 않는 다른 점도층을 형성시켜 유리물의 균질화를 어렵게 하여서 Cord, Knot의 발생과 유리의 균질성을 나쁘게 하여 제품의 충격 파손률을 크게 하는 원인을 제공하므로, 가능한 파유리 입도를 15mm 이하로 파쇄하여 투입하는 것이 바람직하다.

또한 너무 작은 파유리(0.15mm이하)는 가장 먼저 녹아서 다른 원재료(raw material)로부터 발생하는 가스의 방출/제거를 방해하여(blanket 현상) 기포(seed)의 증가 원인이 된다. 따라서 파유리는 입도분포가 좁은 0.15mm~15mm가 최적이라 할 수 있다.

국내 유리 제조업체는 식·음료병, 맥주병, 의약병, 등을 규격화된 유리병으로 제조하여 90%이상의 생산 효율을 달성하고 있다. 유리병 제조시 소요되는 주된 원가(cost)는 원재료, 에너지가 많은 부분을 차지하므로 유리 제조시 원재료의 효율적인 사용과 에너지 관리가 중요하다. 일반 병유리 공정은 파유리 비율(ratio)을 80~85% 사용하며, 철저한 파유리 입도 관리(5~13mm)를 하여 생산 효율을 올리고 있다.

3.2.2 인퓏관리 - 파유리(cullet)의 예

기류개선을 통한 외란관리 결과, 셋팅값을 고정 할 수 있었으나 MBDH(melt bottom dog house), Port의 온도

산포 변화가 커졌다. 인퓏의 변화가 가장 큰 요인이란 것을 가정하였고 그 원인을 분석한 결과 인퓏에 외란이 포함 되어있는 것을 알 수 있었다. 이러한 외란을 제거하기 위해 기간 1, 2, 3에는 파유리를 크기별로 층별 후 투입 하여 비 층별화 시기와 MBDH의 산포를 비교분석 하였다(여기에서 층별을 했던 부분과 하지 않았던 부분을 단순히 IMR-chart만 보게되면 제대로된 분석을 할 수 없다. 추세가 있는 부분은 추세를 제거하고 실질적인 변화를 봐야 하는 것이다. 물론, 이것은 어떤 원인에 의해 상향, 하향의 추세를 제거하고 분석한다는 상호간의 공감대가 형성이 될 때만 추세변동을 뺄 수 있다. 만약 층별을 했을 때 추세에 영향을 미치면 추세를 제거하면 안 되지만 배치를 층별 하는 것이라 추세는 별 관계가 없기 때문에 추세를 뺄 수 있다).

현재 로(爐) 운전에서 대응적 관리를 하고 있으므로 연소 Oil의 증가/감소에 의한 Main Crown 온도 등 로(爐)의 관리 항목의 온도 산포 추세가 발생이 되는데 이러한 추세변동을 제거한 후는 층별화 시기, 즉 투입 원재료의 균질화를 시행한 시기(위의 표에서는 파유리 층별)의 표준편차가 0.473~0.529로 비 층별화 시기인 0.774보다 작은(좋은)것으로 판별 되었다(P < 0.01). 군내 변동도 마찬가지로 결과가 나왔다. 원재료의 외란적 요소를 제거하는 것이 로(爐)의 안정화에 유의하다는 결론이다[15].

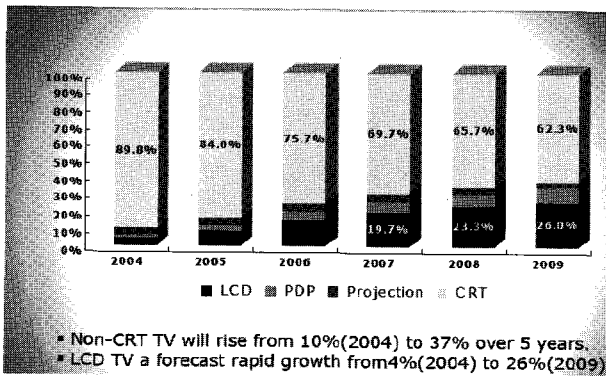
〈표 1〉 파유리(cullet)의 입자크기의 층별화에 따른 변동

		추세변동 포함	추세변동 제거	군내변동
파유리 층별	실험 1	0.830	0.529	0.345
	실험 2	1.665	0.473	0.350
	실험 3	1.116	0.495	0.370
파유리 비층별		1.062	0.774	0.537

3.3 외란관리(3) - 새로운 외란

저렴한 가격과 고화질로 오랫동안이나 디스플레이의 1위에 올라 있던 브라운관은, TFT LCD와 PDP 등 고품질 평면 디스플레이들이 등장하면서 앞으로 사양산업이 될 것이라는 관측은 수년 전부터 무성했다. 실제로 브라운관 세계시장 수요는 매년 급격히 줄어들고 있다. 특히, 모니터용 브라운관(CDT)은 LCD 모니터의 급성장과 함께 이미 퇴출질차를 밟고 있다[5, 13].

이러한 브라운관과 같이 제품주기상의 쇠퇴기에 있는 제품인 만큼 사업장에서는 원가절감(cost down)에 전력을 다하여야 경쟁력을 가질 수 있다. 최근 해의 사업장의 경우 기존의 C중유 대신에 천연가스나, 석탄오일을



<그림 2> TV Demand Forecast(quantity)[10]

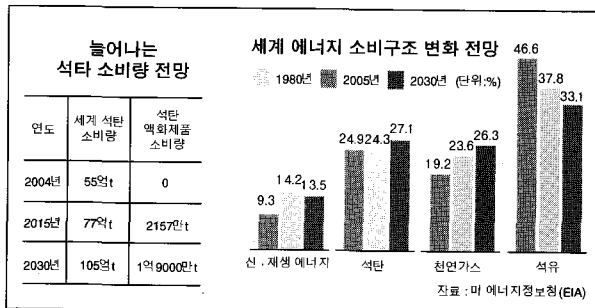
사용함으로써 에너지의 원가절감을 피하고자 한다.

하지만 석탄오일의 경우는 오일에 수분이 포함 되어 있어 화력이 일정하지 않는 문제점이 발생하고 천연가스 역시 불균형한 밀도의 가스로 인해 인풋관리가 힘들다.

용해로의 온도 제어는 용융에 사용되는 연료를 조절하여 유리물의 온도를 일정하게 유지하는 역할을 하게 되는데 여기서 연료의 열량산포는 용해의 불량과 직접 관련이 되어 연료의 열량 산포관리의 필요성이 대두된다. 과거에는 외란이 외기와 인풋에 국한 되었지만, 석탄오일, 천연가스 모두 열량의 엄청난 산포를 가지고 있다. 즉 새로운 외란이 되었다. 외란은 새로운 이벤트(event)가 생길 때 마다 나타나며 4M 표준화를 무너뜨리는 정도의 외란은 즉, 셋팅값 고정을 저해하는 요인은 끊임없는 개선(kaizen)을 통하여 개선하여야 한다.

3.3.1 석탄액화오일

석탄은 가격과 매장량, 지리적 분포 등의 측면에서 큰 장점을 갖고 있어, 고유가 시대를 맞아 석유를 대체할 가장 현실적 에너지 대안으로 떠오르고 있다.



<그림 3> 세계 에너지 소비구조 변화전망

같은 무게를 기준으로 석탄 값은 현재 배럴당 60달러를 웃도는 유가의 10분의 1수준에 불과하고, 액체나 가

스로의 변환 과정을 거친다 해도 유가가 배럴당 40달러 밑으로 떨어지지 않는 한 가격 경쟁력을 유지할 수 있기 때문이다. 또한 석유와 천연가스가 각각 41년, 67년 후 고갈될 것으로 예상되는데 비해 석탄의 추정 채굴가능 연수는 164년에 이르며, 더구나 석유 자원이 특정 지역에 집중된 것과 달리 석탄은 전 세계에 고루 퍼져 있어 자원 독점의 우려도 크지 않다.

석탄액화(coal to liquid, 이하 CTL)는 석탄을 휘발유나 디젤유 같은 액체로 바꾸는 기술을 말한다.

CTL 공정은 고체인 석탄을 액화시켜 오일제품으로 전환시키는 과정이다. 보통 고체 상태의 석탄은 수소 함량이 5%인데 반해 액체 연료는 14%를 차지한다. 따라서 석탄을 액화시키기 위해서는 부족한 수소함량을 높이기 위해 석탄에 수소를 제공해 주어야 한다.

CTL은 수소를 보충해 주는 방법에 따라 두 가지로 분류된다. 우선 직접석탄액화(direct coal liquefaction, 이하 DCL)는 건조 분쇄된 석탄을 수소, 촉매와 함께 고온 고압에서 처리하여 액화시키는 공정이다. 액화 후 정제 과정을 통해 가솔린, 디젤 연료 등을 생산한다.

간접석탄액화(indirect coal liquefaction, 이하 ICL)는 가스화 과정과 이를 통해 만들어진 합성가스를 가공하는 단계로 구성된다. 이를 통해 얻어진 생성물은 정제 처리를 거쳐 LPG, 나프타, 디젤, 왁스 등의 최종제품이 된다. 남아프리카공화국의 Sasol은 50여 년 전부터 ICL을 상용화시켜 공장을 가동 중에 있다.

CTL은 사실 이미 오래 전부터 사용되었던 기술로, 독일은 제2차 세계대전 이전부터 DCL 및 ICL 공장을 가동한 경험이 있다. 이후 저유가 시대로 접어들면서 CTL은 경제성을 상실하였으나, 1970년대 오일쇼크를 겪은 미국, 일본, 독일 등의 국가에서는 DCL 신기술 개발을 위해 약 50억 달러를 투자하기도 했다. 1980년대 중반 이후 저유가가 지속되면서 CTL의 상용화가 활성화되지 못했으나, 최근 고유가가 장기화되면서 발전이 계속되고 있다[7, 8, 22].

3.3.2 천연가스

천연가스는 생산지에서 정제된 후 장거리 수송을 목적으로 부피를 줄이기 위하여 액화공정을 거친 후 액체 상태로 변화시켜 운송한다. 액체상태로 된 천연가스를 액화천연가스(LNG)라 하며 부피가 천연가스(NG)의 600분의 1로 감소된다.

액화천연가스의 성분은 생산지에 따라서 다르나, 주 성분은 경질의 탄화수소인 메탄이 대부분이고 그 외에 약간의 중질탄화수소(C2~C5) 및 질소가스를 함유하고 있다.

천연가스를 생산지에서 전처리하여 영하 162°C로 냉

각 액화하여 부피를 600분의 1 정도로 축소시켜 LNG 전용 탱커를 이용하여 소비지에 수송한다. 소비지에서는 LNG를 다시 상온의 기체로 만들어 발전용이나 도시가스용 연료 등으로 사용한다. 위와 같이 주성분인 메탄을 -162°C 까지 냉각하여 액화하면 부피는 600분의 1로 감소되는데, 천연가스는 임계온도가 낮기 때문에 보통의 냉동기로는 액화가 어려움으로 다음의 3가지 방법을 이용한다. 첫째 방법은 팽창법(turbo expander cycle)으로 가압된 천연가스를 급격히 터빈 안에서 단열팽창 시켜, 팽창된 천연가스의 온도가 급강하되어 상이액상으로 되는 원리를 이용한 공정이다. 둘째 방법인 다단냉동법(the cascade cycle)은 천연가스를 압축하여 냉각시키는 냉각회로에 에틸렌 냉각기를 사용하고 이 에틸렌 냉각기의 냉각회로에는 프로판 냉각기를 사용하는 방법이다. 그리고 세 번째 방법인 혼합냉매법(multi component refrigerant cycle)은 탄화수소와 질소혼합물을 냉매로 이용하여 응축한 후 팽창시켜서 천연가스를 액화하는 공정이다.

LNG 수송선에 실려온 액화천연가스는 인수기지에서는 하역 배관을 통해 저장 탱크에 저장된다. 그리고 가스 공급망을 통해 가정이나, 천연가스이용 발전소로 이송하기 위하여 다시 가스상태로 변환시켜야 한다. 저장된 LNG는 펌프에 의하여 가압되어 기화기로 이송되고, 기화기에서는 해수를 이용하여 LNG를 기체상태의 천연가스로 변환을 시킨 후 주배관로에 공급한다.

LNG는 생산지에서 생산된 천연가스를 -162°C 까지 냉각 액화하기 전에 $\text{CO}_2\text{H}_2\text{S}$, 중질 탄화수소 등을 정제하기 때문에 기화된 천연가스는 불순물을 포함하지 않는 가스이다[3].

4. 셋팅(Setting) 고정(4M 표준화)의 효과²⁾

품질향상을 위한 노력은 성과가 입증되지 않으면 합리화 되지 않기 때문에 실질적인 성과가 있어야 한다.

셋팅값 고정은 품질 관리를 통하여 공수절감 등 수익향상을 하였기 때문에 R.O.Q(return on quality)와 맥락을 같이한다고 볼 수 있다[24].

4.1 관리상태 파악의 용이

Western Electric Co.의 (Statistical Quality Control Handbook)

에서는 “공정능력이란 통계적 관리상태에 있을 때의 공정의 정상적인 움직임(behavior), 다시말해 외부원인에 방해됨이 없이 조작되었을 때 공정에 의해 만들어진 일련의 예측할 수 있는 결과를 말한다.”라고 정의하고 있다[17]. 여기에서 외부원인이 방해됨이 없는 상태는 공정이 안정화 되었을 때의 상태, 즉 4M 표준화가 이루어 졌을 때를 말하며 4M의 표준화가 이루어지지 않은 상황에서는 결과가 수많은 상황들 중에 하나만 나타난다.

셋팅값 고정은 사회과학에서 말하는 경제학의 기본가정인 Ceteris Paribus(other things being equal)와 같은 개념이다. 다시 말해 다른 인자들이 불변일 때 한 인자가 미치는 영향을 정확히 파악할 수 있다는 말이다.

셋팅값 고정에 의해 모든 조건이 고정되어 있으므로 이상요인을 쉽게 발견할 수 있었다. 셋팅값을 고정하지 않았으면 문제점을 한 번에 찾아내기가 어려워서 여러 변수를 조작하여 로(爐)에 무리가 되었을 것이다.

예 : T/C 고장, Oil의 온도변화, Throat 막힘

4.2 주요변수들의 산포감소

아래 <표 2>에서 보는 바와 같이 4M 표준화에 의한 공정 운영의 결과는 먼저 주요 투입인자인 연료 등은 당연한 것이고, 주요 관측인자인 로(爐)의 내부 온도의 산포가 감소한 것을 직관적(intuitive)으로 판단할 수 있다. 또한 부적합율의 감소도 유의적이었다($p < 0.01$).

<표 2> 셋팅값 고정 후 각 주요변수들의 표준편차

구분 \ 항목	연료사용량 표준편차	Cooling Air 량 표준편차	비덕온도 표준편차	Crown 온도 표준편차
Setting 값 변동	5.0951	21.7635	1.2766	1.2953
Setting 값 고정	0.5066	2.3572	0.9702	0.4428

<표 3> 부적합율의 감소

구분 \ 항목	시료크기	평균 부적합율	부적합율의 표준편차	SE Mean
Setting 값 변동	27	15.68	2.65	0.51
Setting 값 고정	207	18.06	6.70	0.38

2) 용해로 운전이 있어서 많은 제어인자가 존재하고 환경(외란)에 따른 각 인자마다의 경우의 수가 또한 많이 존재한다. 따라서 사실상 지금까지 셋팅값 고정은 불가능하다고 알려져 왔다. 외란에 의한 환경변화요인(기류, 인풍 등)을 제거함으로써 셋팅값 고정을 이룰 수 있었다.

Difference = $\mu(1) - \mu(2)$
 Estimate for difference : -2.383
 95% CI for difference : (-3.658, -1.108)
 T-Test of diferene = 0 (vs \neq 0)
 : T-Value = -3.74
 P-Value = 0.000

4.3 공수생략

주요 관측 항목인 온도 등을 대응관리하는 공수가 생략된다. 외관관리에 의하여 4M 표준화가 실현되면, 공정관리상 주요 관측항목인 온도 등의 변수를 대응관리하는데 들어가는 공수(man-hour)가 상당히 줄어들게 된다. Operator들의 업무량 강도 조사를 한 결과 업무강도가 약 54% 약해 졌다.

공정실내의 온도를 시간이 지나도 일정하게 유지하고, 또한 실내에서도 장소에 따라 온도차이가 나는 것을 최소화하도록 대응적관리 하는 것은 상당한 공수와 원재료(연료)등이 소요되는 작업이다. 이런 대응관리의 필요성을 없애주면 상당한 비용 절감효과를 볼 수 있다.

4.4 냉각공기(cooling air)사용량 감소

냉각공기(cooling air)의 사용량이 현저히 줄어들었다. 냉각공기를 사용한다는 것은 전체적인 칼로리를 뺏는 이야기이다. 용해는 다이렉트(전도), 대류, 복사에 의해 이루어지는데, 이 모든 부분의 칼로리를 뺏는 것은 온도 프로파일 구현에 한 방편은 되겠지만 바람직한 것은 아니다. 셋팅값을 고정하고 나서는 냉각공기의 사용량이 거의 없을 정도로 감소하였다.

4.5 로(爐)의 수명연장

고정적이라고 할 수 있는 인풋의 작은 산포 및 일정한 화염 등으로 인해 로(爐)의 수명을 연장시킨다. 인풋의 산포를 줄이기 위해 파유리 층별을 통하여 원재료의 외관을 방지하고, 한편 공정주변 환경관리(ambient control)의 성공으로 온도 등의 주요 관측변수가 일정하게 유지될 수 있으면, 로(爐)의 가동상태를 일정하게 계속 유지할 수 있다. 예를들어 로(爐)의 화염강도의 변화 빈도도 훨씬 줄어들게 된다. 이러한 항상성의 유지는 잦은 가동조건 변화로 인한 로(爐)에 대한 스트레스를 줄임으로써, 로(爐)의 수명을 훨씬 연장시키게 될 것으로 기대된다. <표 4>는 로(爐) 운전의 참고사항을 나타내는 것으로 Back Current, Sinking Line, Scum Line, Hot Spot

Temp Profile은 용해운전에 있어서 주요지표가 되는 항목이다[6, 9]. 셋팅값 고정 전·후를 비교해 보면 로(爐)가 훨씬 더 편해졌다는 것을 알 수 있다.

<표 4> 로(爐)운전의 참고 사항(비교항목 or 참고항목)

구분 \ 항목	Back Current	Sinking Line	Scum Line	Hot Spot Temp Profile(Δ index t)
로가 정상상태 일 때 참고 값	30~40도	76%	35%	1
Setting치 고정 전	7~8도	52%	28%	0.52
Setting치 고정 후	16~17도	70%	31%	0.8

단순히 매일 매일의 공정이 더 효과적으로 진행되는 데서 생기는 비용절감 뿐만 아니라, 장기적으로 로(爐)의 수명연장으로 인한 장기적 비용 절감효과도 가져오게 되는 것이다.

5. 사례분석의 결과

유리 용해로의 목적은 가장 경제적인 방법으로 결점(defects)이 없는 균온·균질한 유리를 만들어 항온의 유리를 성형기에 지속적으로 공급하여 주는 것이다. 이러한 용해로의 목적을 달성하기 위해서는, 첫째로 기류관리를 하여 외기온도의 산포가 용해 내부온도와 용해 불량에 영향을 못 미치게 하여야 하며, 둘째로 대량으로 사용되는 원료는 변화가 거의 없는 성분과 일정한 입도 분포를 유지시킴으로서 유리물의 일정한 조성관리를 하여야 할 것이고, 셋째로 예측게임을 실시하여 구체적으로 어떤 문제점에 직면할 가능성이 있는지를 예측하고, 이러한 문제점을 예방하기 위해서 필요한 사전적 노력을 기울여야 한다. 그럼에도 불구하고 문제점이 발생했을 때는 피해를 최소화하기 위한 신속한 대응 노력이 필요하다. 마지막으로 용해로 내에서 용융, 청징, 균질화, 균온화가 진행될 때 일어나는 유리물의 움직임은 습관적이고 경험적인 권위의식에 따른 이론의 거부의를 버리고, 과학적인 해석에 근거를 둔 추리와 가정으로 용해로 운전의 이론적인 체계를 확립시켜야 할 것이다.

6. 결론 - 장치산업의 선행적관리

지금까지의 용해로 공정에서는 재현성이 없다는 것이 상식처럼 되어 있어 공정을 예측가능하게 하는 것은 불

가능 하다고 알려져 있었다[16].

하지만 본 연구에서 용해로공정에서 기류관리, 인풋 관리 등의 외란관리를 통하여 4M을 표준화(셋팅값 고정)한 결과 진정한 4M 표준화에 의한 운전이 이루어 질수 있었다.

이에 대한 효과는 재현성을 확보로 인한 공수절감과 부적합율(non conforming rate)의 감소, 로 수명연장 등이며 보다 안정적이고 경제적인 용해로 공정의 운영이 가능해졌다. “실제로 제어인자의 셋팅값 고정은 작업자의 조작에 의한 산포를 줄이고 지금까지 경험과 감에 의한 운전으로 인한 과도한조치(over action)를 방지함으로써 재현성이 확보되어 과학적이고 효율적인 관리가 가능해졌다.”는 것이 현장 작업자의 증언이다.

4M 표준화를 통한 선행적 관리 시스템의 정착은 급변하는 사회와 다양화·다층화 되어 가는 고객니즈를 충족시킬 수 있는 유연(flexible)하고 선행적인 공정의 바탕이 될 것이다. 이는 공정의 안정화 후 문제해결(trouble-shooting)도 포함되는 원활하고 원숙한 대응적관리(reactive control), 일어날 수 있는 공정의 변화를 감지하는 예측관리(predictive control), 예방관리(preventive control)를 모두 유기적으로 엮어내는 시스템적 접근방법(systems approach)이고 상황 접합적 접근방법(contingency approach)이라 할 수 있다.

참고문헌

- [1] 강병구 외; “미래사회와 표준”, 한국표준협회, 2006.
- [2] 김병호; 유리공학, 청문각, 1996.
- [3] 김지동; “액화천연가스 냉열이용 공기액화분리기술”, KISTI 기술 동향 분석 보고서, 2003.
- [4] 노광홍; “Soda-Lime-Silica Glass에서 Cullet와 장식원료 첨가가 제조공정에 미치는 영향”, 미출간 박사학위논문, 배재대학교, 2002.
- [5] 문병무, 주병권; “CRT 기술의 동향과 전망”, Technical Series, Display Technology 5-CRT, 2006.
- [6] 문운철, 김홍식; “고전고급제어(Conventional Advance Control)를 이용한 TV 브라운관 유리 용해로의 온도제어에 관한 연구”, 제어·자동화·시스템공학 논문지, 6(9), 2000.
- [7] 박정아; “석탄, 포스트 오일로 급부상하고 있다”, 주간경제, 910, 2006.
- [8] 성동원; “급부상하는 중국의 석탄화학 산업”, 주간경제, 912, 2006.
- [9] 연상현; 유리의 概念과 實際, 學研社, 2001.
- [10] 이경남; “세계 디지털 TV 시장의 현황”, EIC, 2003.
- [11] 이대진; “용해 불량감소를 위한 외란방지System의 제안”, 미출간 석사학위논문, 금오공대, 2002.
- [12] 이명주; “CRT용 Glass 제조공정의 이해”, 한국정보디스플레이학회, 2(5), 2001.
- [13] 이상훈, 추성훈; “FPD에 대응한 CRT의 최근기술 동향 및 전망”, 한국정보디스플레이학회, 2(5), 2001.
- [14] 이종원; “생산 공정에서 선행적 관리 정착을 위한 관리시스템의 제안”, 미출간 석사학위논문, 금오공대, 2000.
- [15] 장도수; “장치공정에서 설비주변 환경관리에 관한 연구”, 미출간 박사학위논문, 금오공대, 2005.
- [16] 정호상, 정봉주; “유전 알고리즘을 이용한 유리용해 공정에서의 불량 예측 시스템”, 대한산업공학회지, 13(1), 2000.
- [17] 황의철; 품질경영, 박영사, p. 598, 1996.
- [18] Jin-Hyung, Cho; “Preventing Strategy of, External Disturbance in Glass,” *Korean Information Display Society*, 2nd pp.1068-1071, Exhibition & Convention Center (EXCO), 2002.
- [19] Cho, Jin-Hyung, Sae-Jae Lee, and Do-Soo Jang; “A Diagnostic Method of Control-in/out in the glass Furnace,” *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, Forth, 2006.
- [20] Cho, Jin-Hyung, Sung-Ho Jang, Sae-Jae Lee, Do-Soo Jang, Jung-Yul Suh, and Hyun-Seung Oh; “Using Ambient Control to prevent External Disturbances in Large-scale Furnace,” *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, Forth, 2006.
- [21] Drummond III, C. H., ed.; “Ceramic Engineering & Science Proceeding,” 20(Issue 1), 59th Conference on Glass Problem, The American Ceramic Society, 1999.
- [22] England DTI(Department of Trade and Industry) Technology Status Report 010, “Coal Liquefaction,” 1999.
- [23] Eugene L. Grant; *Statistical Quality Control*, McGraw-Hill, 1988.
- [24] Juran Joseph M.(ed); *Juran’s Quality Hnadbook*, Fifth Edition, McGraw-Hill, Inc., pp. 8.15-8.17, 1998.
- [25] Volf, Milos B. “Mathematical approach to glass,” Elsevier, 1988.

<부록> 용해관련 용어

용어	내 용
back current	Reverse Current라고도 불리우며 원료투입구로부터 유리물로 인출되기까지의 전진하는 흐름인 인출류(pull current)에 역행하는 역류 또는 용융조(main tank)와 청정조(refinery)의 온도차이 때문에 발생하는 유리물의 역행 흐름.
batch	용해로에 장입시키기 위하여 적당한 비율로 조합한 혼합원료
cord	광학적 또는 기타 성질이 주위의 유리부분과 다른 가늘고 긴 결점부분
cullet	원료 조합물에 가하는데 적합한 폐품유리
hot spot	유리 용융로에서 온도가 가장 높은 부위
knot	성분이 다른 유리가 유리 내에 존재함으로써 발생한 결합으로 덩어리 형태의 것
scum	용융 유리면 위에 떠 있는 불용해물의 층
scum line	기포선(foam line) 또는 꺼풀선(scum line)이라고도 불린다. 기포선은 용융청정된 맑은 유리구역(mirror zone)과 용융중에 있는 배합원료구역(batch zone)을 구분하게 되며, 기포선이 뚜렷하게 분명히 관찰 될 수 있을 때에는 미용융 및 미청정의 유리가 고온중심부(hot center)를 벗어나지 않고 있다는 것을 뜻한다. 기포선은 후벽에서부터 로의 용융조 전장의 약 35%의 길이에 해당하는 위치가 적절하다.
seed	0.2mm 이하의 공기 기포로서 용해불량의 한 종류
sinking line	유리물이 Throat를 통과하기 직전의 상부에 위치하는 점도가 다른 구간(약 76%지점)을 말하며 Sinking Line의 이동에 따라 불량이 대량으로 발생한다.
throat	탱크 가마에서 용융부와 청정부 사이에 용융 유리가 통하도록 뚫려 있는 구멍