

공정시스템 연구회

석유 및 화학산업 공정시스템 연구 개발의 새로운 이슈들

한 종훈*, 박선원**, 여영구***

*서울대학교 응용화학부, *한국과학기술원 생명화학공학과, ***한양대학교 응용화학공학과

1. 서론

최근 정유, 석유 및 화학 산업은 변화하는 세계 시장환경에 적응하며 지속 가능한 생산성 혁신을 통해 경쟁력을 유지하기 위하여 부단한 노력을 하고 있다. 본 원고는 이러한 노력 중 공정시스템 분야와 관련된 주요 주제들을 선택하고 해당 분야 전문인들에 함축된 원고를 의뢰하여 얻은 글을 모은 것이다. 선택된 주제는 화학산업에서의 supply chain management, 식스 시그마 경영기법, 및 유틸리티 공정의 최적화이다.

각 주제에 대해 기고해 주신 분들께 감사 드리며, 아무쪼록 본 고에 기술된 화학산업 공정시스템 분야의 새로운 방향이 실무자 뿐 아니라 연구자들에게도 향후 연구 개발의 좋은 지침이 될 수 있기를 기대한다.

2. Supply Chain Management와 정유 및 화학산업

2.1. 등장

CIO Magazine에서 2002년에 실시한 조사에서 제조 30개사 CIO들의 관심사 1위는 SCM이고 유통 6개사 CIO의 관심사 중에서 SCM은 ERP에 이어 2위이다. 즉, SCM이 제조, 유통 업계에서 CIO들의 최대의 이슈로 떠오르고 있다.

최근 세계적으로 많은 기업들이 정보통신 기술의 진보, 시장의 글로벌화, 인터넷의 활용, 고객의 요구 수준의 상승으로 유례없는 환경변화를 겪고 있다. 무엇보다도 기업 중심적 사고에서 고객 중심적 사고로의 가치변화는 기업간 경쟁을 심화시키고 있다. 이러한 환경변화에 대응하기 위해 기업은 다양한 전략을 수립, 실행해 나아가고 있는데, 생산성 및 효율성을 향상시키고 고객 서비스를 극대화하여 개별 기업 및 국가경쟁력을 향상시키는 중요한 수단으로 공급사슬관리(SCM, Supply Chain Management)가 부각되고 있다.

전체적으로 물류비용이 꾸준히 증가하는 추세로 기업내외의 물류 문제가 해결되지 않고서는 경쟁력 제고와 고객만족, 나아가 기업의 재무구조에 효과를 보는 것이 어렵게 되었다. 기업이 물류관리의 중요성을 인식한 것은 부분 최적화가 결국에 가서는 전체의 최적화에 도움이 되지 않을 수도 있다는 것을 알게 되었기 때문이다. 1990년대에 기업경영혁신

(BPR)의 수단으로 전사적자원관리(ERP)가 등장하였지만, 각 기업은 업종, 규모, 역사 등이 제각각이기 때문에 ERP가 보편성이 높은 분야에서 큰 효과를 발휘하였지만 뛰어난 생산성, 최대의 고객만족을 실현하기 위해서는 기업이 고객 위주의 비즈니스 프로세스를 실현하여야 하였다. 비즈니스 프로세스 통합의 목적은 고객의 고객과 공급자의 공급자까지도 자사를 중심으로 통합하는 것이다. 기업은 글로벌 공급사슬 경쟁 시대를 맞이하였다. 각 지역의 차이점 때문에 하나의 글로벌 기업을 이끌어 갈 수가 없게 되어, 각각의 요구에 맞는 경영이 필요하게 되었다. 과거의 물류 개념에서 탈피하여 원자재 조달에서부터 최종 제품이 고객에 이르는 전과정의 모든 업무를 통합하여 이를 최적화하는 통합 물류 또는 공급사슬이라는 개념으로 물류의 개념이 발전하고 있다.

SCM을 통해서 전체적인 물류비를 절감할 수 있으며 구매 비용을 절감할 수 있고, 생산계획을 합리화하고, 전체적인 생산의 효율성을 극대화할 수 있다. 제품의 흐름에 대한 가시성이 확보되어 제품의 제조 및 유통공정을 보다 명확히 할 수 있고 고비용의 재고관리 업무를 보다 저렴하게 대체할 수 있다.

2.2. 정의

Supply Chain(공급사슬)이란 고객·소매상·도매상·제조업·부품/자재/운송 협력업체 등의 공급활동의 연쇄구조를 나타내며, Supply Chain Management(SCM)란 "불확실성이 높은 시장변화에 Supply Chain 전체를 기밀하게 대응시켜 Dynamic하게 최적화를 도모하는 것"이다.

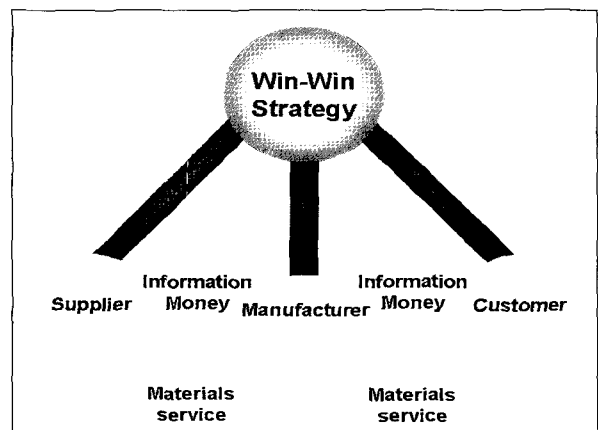


그림 1. SCM 개념도.

지금까지 부문마다의 최적화, 기업마다의 최적화에 머물렀던 정보, 물류, 현금에 관련된 업무의 흐름을 공급사슬 전체의 관점에서 재검토하여 정보의 공유화와 Business Process의 근본적인 변혁을 꾀하여 공급사슬 전체 구성원 모두가 win-win을 추구하는 것을 목표로 하고 있다.

접근 방식으로는 최소의 재고량으로 Supply Lead time을 가장 작게 하는 것이며, 공급자원과 설비는 그대로 두고 Throughput을 최대화 하는 것이다.

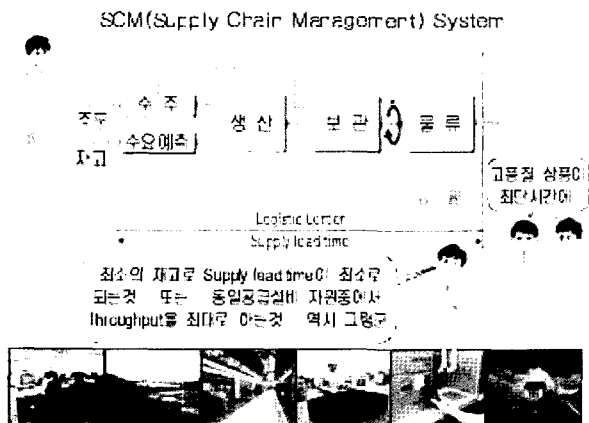


그림 2. SCM 최적화.

2.3. SCM의 발전 단계.

SCM의 가장 첫 번째 단계는 창고와 수송기능 간의 연관 관계에서 시작된다. 물리적 유통관리는 이들 두 기능을 통합하여 더 빠르게, 더 자주, 그리고 특히 더 확실한 수송방법을 이용함으로써 재고 감소를 이루며, 더 빠른 창고 운용을 통한 더 짧은 주문 응답시간과 더 빠른 수송으로서 예측기간의 길이를 줄이고, 이에 의해 예측의 정확도를 증가시키는 것이다. 또 수송과 창고운용을 동시에 고려하는 능력에 중점을 두어, 이에 의해 더 나은 서비스와 더 낮은 총비용을 위해 창고의 위치를 최적화하는 것이다. 물리적 유통관리는 서로 다른 계층의 창고들(공장, 지역 유통센터) 간의 개선된 자료 교환과 더 복잡한 분석들(예를 들어, 총 창고-수송비용, 수송/창고 네트워크의 최적화 등)에 의해 가능해진다. 더 나은 자료와 더 진보한 분석 기법들은 더 복잡한 요인들의 집합들 간의 의사결정을 촉진한다. 따라서 모든 개선된 정보교환과 분석은 더 복잡한 의사결정을 하는 능력을 강화시켜준다.

SCM 개발의 두 번째 단계는 "물류단계"이다. 이는 첫 번째 단계에 제조, 조달, 주문관리 기능들을 더한 것으로 EDI, Worldwide Communications, 자료를 저장하고 분석을 수행하는 컴퓨터의 능력의 증대 등에 의해 지원된다.

세 번째 단계인 현재는 "통합 SCM 단계"이다. 통합된 기능들의 사슬이 연장되어 한 쪽 끝에는 공급자가 또 다른 한 쪽에는 고객이 추가된다. 이는 다기능의 Supply Chain이 되는데, 두 가지 기능의 물리적 유통망보다 훨씬 복잡해진다. 이러한 복잡성을 다루기 위해, 전자적 자료, 전자적 자금 이동,

더 높은 대역의 통신, 계획과 실행을 위한 전산화된 의사결정 시스템 등에 의존하게 된다. 교육도 물론 필수적인 요소이다.

2.4. SCM의 효과

SCM을 통해 얻어지는 효과와 이익은 SCM을 적용하는 산업과 적용하는 범위와 깊이에 따라 다르다. 또한 여기에 참여하는 기업에 따라 차이가 있게 마련이다. SCM의 가장 기본적인 사상인 정보를 적시에 제공하고 그 정보를 SCM에 참여하는 모든 거래 당사자들이 공유하는 것과 공급사슬 전체의 당사자들이 공동으로 계획하고 실천함으로써 SCM의 효과와 이익은 모든 부분에서 얻어질 수 있다.

일반적인 SCM의 도입 성과는 공급사슬 재고의 50~80% 감소, 100% 주문 충족률, 100% 납기 달성률, 운전자금의 감소, 운영비용의 절감, 공정 유연성 증가, 신제품 도입 기간의 단축 등이 있다. 주목할 만한 것은 SCM을 이용하면 고객에 대한 서비스 수준과 공급사슬의 효율성이 동시에 개선된다는 것이다.

표 1. SCM의 도입효과

	도입전	도입후
제조 업체	예측에 의한 생산	판매동향에 맞춰 생산
	상품의 시장응답도 파악 지연	시장응답도의 신속한 파악
	과다한 재고 보유	최적수준의 재고보유
물류 업체	수작업 발주/수주	EDI를 통한 발주/수주
	비표준 팔레트로 적재효율 저하	팔레트 표준화로 적재효율 증대
	수작업에 의한 상품 분류	바코드에 의한 자동 분류
유통 업체	수작업에 의한 입고/출고	자동 입고/출고
	과다한 재고 보유	최적수준의 재고 보유
	수작업 발주/수주	EDI를 통한 발주/수주
	수작업에 의한 검품	바코드, 스캐너를 통한 자동 검품
	매장 구성의 비효율성	최적의 매장 공간 활용
	재고조사에 시간, 인력 과다 소요	자동적인 재고 파악
	계산에 오류 발생 및 장시간 소요	POS에 의한 신속한 계산, 무오류
상품의 품질현상 발생	품질현상 해소	

2.5. SCM 적용사례

화학 산업에서는 Dow사가 94년 처음으로 홈페이지 www.dow.com을 구축하였는데, 이 사이트에서 모든 브랜드를 통합적으로 관리할 수 있다. Dow사의 e비즈니스 전략은 첨단 신기술의 적용을 통해 고객들이 자사의 사업을 보다 쉽고, 빠르고, 편리하게 할 수 있는 지원체제를 구축하는데 초점을 두고 있다. Dow사의 e-SCM 전략은 다음의 두 가지 핵심 영역을 중심으로 추진되고 있다.

2.5.1. 고객 접점(Touch-Point) 개선을 통한 협력관계의 구축

Dow사는 모든 고객 접점을 고객과 Dow사의 거래를 보다

쉽고, 빠르고 편리할 뿐만 아니라 원가 절감을 이룰 수 있는 기술 적용의 기회로 인식하고, 정보 기술, 프로세스 및 자원의 통합을 통해 고객과의 상호작용을 확대 강화하는데 초점을 두고 있다. 또한 첨단 전자통신 수단을 이용하여 실시간 정보 공유를 통해 직원들에게 권한을 이양함으로써 고객과의 끊임 없는 의사소통이 가능해졌다. 이를 통해 Dow사는 다양한 제품이 거래되는 화학 산업에서 특정 세분시장의 고객의 요구를 충족시키고 동시에 다양한 고객을 만족시키는 것이 가능해졌다.

2.5.2. 공급사와의 유연한 상호작용과 조달효율 극대화를 위한 신기술 활용

Dow사는 조달분야에서 e-MART와 같은 전자상거래 기술을 활용하여 운영자원 및 원재료 구매효율을 극대화하였다. 전자 구매를 통해 구매부서의 효율성이 극대화되었음은 물론이고 각 부서의 구매 건을 한 번에 모아 처리하여 구매비용을 크게 절감하였다. 원재료 선적 자동입력 시스템 및 인공지능을 활용한 위치 추적 장치를 적용하여 공급자와의 관계에서도 IT 통합을 추진하고 있다.

조립 산업에서는 Dell computer이 경쟁사인 Compaq을 압도하며, Internet을 통한 구매, 발주 등 internet을 통해 매출을 급격히 향상시키고 고객에 신속한 대응체계를 구축한 것으로 유명하다. 이것을 가능하게 하는 것이 Dell의 근본적인 경영철학과 고객중심의 Process에 SCM를 구축함으로써 가능하게 되었다. 그 과정은 다음과 같다.

- 고객과 부품공급사를 직결, 7일분의 재고를 1일로 단축
- 지불보다 입금이 빠름

이와 더불어 델이 중시하는 경영지표가 'Cash Conversion Cycle'이라는 수치다. 이것은 매출금 회수일과 재고일수를 더하고 매입금 지불일수를 뺀 수치. 이른바 '상품을 어떻게 빨리 현금화시킬 것인가'를 표현한 것으로 일반기업의 경우 출하에서 대금회수까지 시간이 걸리기 때문에 이 수치는 '-'가 되는 경우가 많다. 그런데 델은 '98년 1월 시점으로 '-8일'이 되었고, 지불보다 입금이 빠르게 되었다. 공급사슬에 의해 수주에서 부품의 차입, 생산, 입금과 지불 Timing 등 각 프로세스의 속도를 최적화하여 이런 효율경영의 달성이 가능했다.

- Supply Commerce 추진

Dell과 부품공급회사의 공급사슬 강화이다. '98년에는 중요한 부품공급 회사를 위해 개별의 전용 홈페이지를 설치하여, 서로 정보연계를 밀접하게 추진하였습니다. 구체적으로는 델에서 고객과 판매동향, 생산계획, 향후 수요예측, 현재의 생산진척과 부품재고의 정보를 실시간으로 제공합니다. 역으로 부품공급사로부터도 부품의 납기와 가격, 공급능력, 생산진척 상황, 생산계획, 품질 등의 상세한 정보를 제공받습니다. 서로를 실시간으로 연계시키므로써 델과 부품공급회사가 마치 일체화되어 움직이게 됩니다.

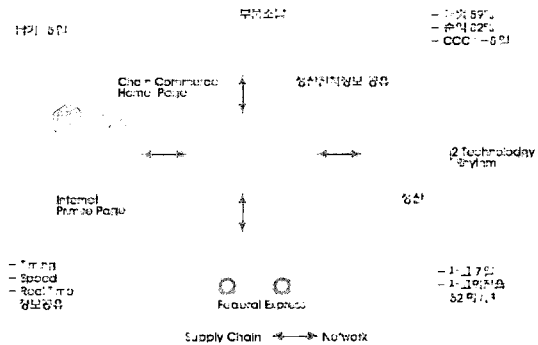


그림 3. Dell computer SCM 효과.

대한상공회의소가 '97년~'01년 5년간 상장기업 624개 (제조업 445개, 유통업 35개, 기타 144개)의 회계자료를 이용하여 작성한 보고서에 따르면, 국내기업의 SCM 성과는 매년 개선되는 추세를 보이고 있지만(그림 4), 소비재를 제외한 산업에서는 글로벌 기업의 성과에 비해 뒤떨어지는 것으로 나타났다(그림 5). 화학 산업의 경우 현금화사이클타임 기준으로 볼 때 국내 기업이 글로벌 기업에 비해 상당히 뒤쳐져 있다.

1997~2001년 성과지표별 공급사슬성 조사관계

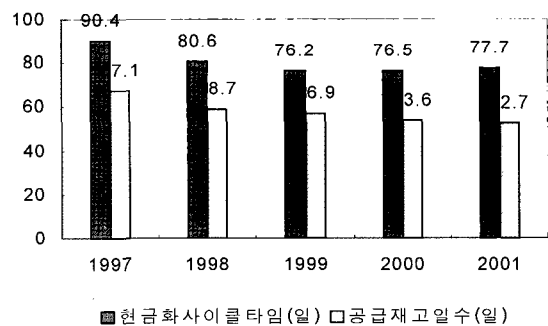


그림 4. 국내기업의 SCM성과분석, 대한상공회의소.

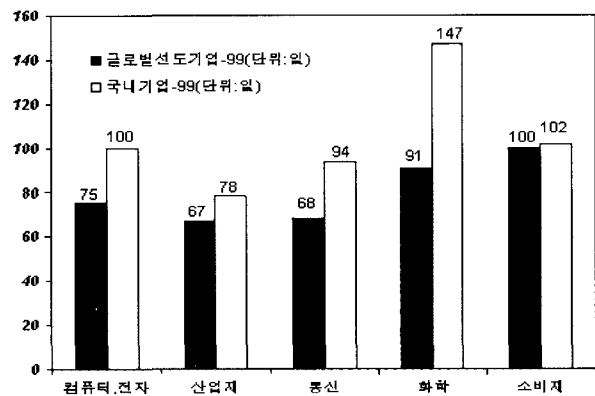


그림 5. 글로벌 기업과 국내기업간의 SCM 성과 비교, 대한상공회의소.

대한 상공회의소는 기업들이 SCM 개선을 위한 유용한 벤치마킹 자료로 활용할 수 있도록 SCM 성과를 주기적으로 분석하여 데이터베이스를 구축할 것이라 밝혔다.

2.6. 전망

SCM은 제품개발, 마케팅, 고객 서비스와 같은 더 많은 기능들을 통합하게 될 것이다. 이는 훨씬 고도화된 통신, 질과 양에서 더 증대될 사용자에게 친숙한 전산화된 의사결정 지원 시스템들, 그리고 증가되는 교육 등을 통해 가능해질 것이다. 이러한 예들 중의 일부는 벌써 사용되고 있다. 이러한 통합된 프로세스를 가능케 한 것은 컴퓨터 기술과 통신기술의 폭발적인 발전, 즉, 정보기술혁명이다.

정유 및 화학 산업에서는 SK, LG칼텍스와 내부 시스템 통합을 마친 LG화학, 삼성아토포나, 한화석유화학 등 주요 석유화학업체들이 e비즈니스 전략의 일환으로 ERP 기반 SCM 구축을 위한 작업을 본격화하고 있고 이 추세가 다른 기업에도 확산될 전망이다.

프로세스 산업은 조립산업과는 달리 하나의 원재료로부터 다양한 제품이 나온다. 나프타 원료가 파이프라인을 타고 가면서 다양한 제품으로 분리되는 것이 한 예이다. 그러나 노트북 제조와 같은 조립산업은 여러 개의 부품들이 서로 끼워 맞춰져 최종 완제품이 나오게 된다. 따라서 프로세스 산업은 최종 제품이 나오기까지 다양한 단계가 필요하며 한 단계에서 다음 단계로 넘어가는 공정사이의 순서가 매우 중요하다. 또한 프로세스 산업은 공정이 매우 복잡하고 길며 재고 관리에 제약도 크다(화학제품을 아무렇게나 관리할 수는 없기 때문이다). 이러한 산업적 특성이 있기 때문에 SCM도 조립산업과는 다르게 접근해야 한다. 프로세스 산업에 있어 경쟁력은 공정효율화를 통해 원가를 얼마나 낮출 수 있느냐 하는 것이다. 조립산업은 이보다는 스피드와 고객에 대한 서비스 수준을 얼마나 높일 수 있는가에 초점을 맞춘다. 따라서 프로세스 산업의 SCM 솔루션은 원가를 최소화 하기 위해 복잡하고 다양한 문제를 얼마나 잘 해결할 수 있느냐에 초점을 맞춰야 한다.

3. 식스 시그마 경영 기법을 통한 화학산업의 지속 가능한 생산성 혁신

3.1. 머리말

“변하지 않으면 안 될 상황에 처하기 전에 먼저 변화하라” GE의 잭 웰치 회장이 변화와 혁신을 선도하며 했던 말이다. “기술의 미국, 품질의 일본, 가격의 한국”이란 말처럼 70, 80년대 우리는 저가 제품의 수출을 통해 눈부신 성장을 이루어 왔다. 하지만 중국, 인도 등 신흥 개발 도상국들이 풍부한 노동 인력과 대규모의 외국인 투자를 통해 급속도로 저가 제품 시장을 잠식해 나가고 있는 21세기에는 오로지

품질과 기술로 승부해야 하는 것이 우리 한국의 운명이 아닐 수 없다. 본 고에서는 이미 세계적으로 수많은 성공 사례들을 창출한 6 시그마 기법을 화학 산업의 품질 및 생산성 혁신을 위한 기법으로 소개하고자 한다. 화학 산업의 경우, 공장이 대규모이고 수많은 단위 공정들이 있으며 공정 변수들간에 상관 관계가 복잡하여 기존의 6 시그마 기법을 적용할 때 주관적 판단에 의한 시행착오가 늘어나 많은 시간과 비용이 소모될 수 있다는 어려운 점이 있다. 본 고에서는 이러한 6 시그마의 약점을 극복하고 화학산업에 적합하도록 개발된 새로운 연구결과와 이를 실제 화학공정에 적용한 성공사례를 소개하여 화학 기업들의 생산성 혁신에 도움이 되고자 한다.

3.2. 6시그마 변천사 및 효과

1930년대 미국에서 발표된 품질관리(QC)는 통계적품질관리(SQC)로 발전되고, 다시 1960년대 이후 전사적품질관리(TQC)로 발전했는데, 특히 일본이 이를 적극 도입, 발전시켜 품질고급화를 이루는데 획기적으로 기여했다. 이에 따라 품질경영(QM)의 필요성이 대두되고, 나아가 6시그마 개념이 도입되기 시작했다. 지난 99년 국내 산업계의 경영혁신을 위한 방법론으로 제창, 캠페인을 벌여오면서 전기, 전자업종의 제조업 중심에서 출발해온 6시그마가 화학 업종으로 확산되어 다양한 기업을 거쳐 빠르게 퍼져나가고 있다. 6시그마는 제품 1백만개를 만들었을 때 불량품은 3.4개에 불과한 품질 수준으로써 쉽게 도달하기 어려운 목표이다. 6시그마 목표를 달성하기 위해서 모든 프로세스를 정량적으로 평가하여 품질 개선 활동의 우선 순위를 설정하고 이에 따라 효율적으로 프로세스 관리를 수행해야 한다. 그간 품질 개선 활동이 엔지니어의 경험적 지식, 체계적이지 못한 문제해결 방법에 의존한데 비해 6시그마는 주어진 여건 아래서 객관적 통계 데이터에 근거하여 효과를 최대로 올릴 수 있도록 지혜롭게 일한다는 것이 큰 차이점이다. 80년대, 모토로라 연구진이 품질개선의 일환으로 추진했던 활동이 1세대 6시그마였다면, 90년대로 접어들면서 6시그마를 기업의 전략적 목표와 일치시키고 전사적 차원에서 큰 수익을 창출할 수 있도록 기업의 수익 제고와 직결시키는 2세대 6시그마 활동을 펼쳐왔다. 최근 들어서는 기업의 중요한 과제가 원가절감 및 수익 제고라는 의식이 고취되면서 제품의 설계 및 개발 단계에서 6시그마를 달성하여 보다 확실한 목표 원가 확보 및 기업 수익 추구에 관심이 집중되고 있다. 6시그마는 1987년 창시 이래 급속한 속도로 전세계에 퍼졌으며, 이후 텍사스 인스트루먼트, IBM, ABB, 얼라이드 시그널, 코닥, GE, 플라로이드 등 많은 일류기업이 6시그마를 도입해 큰 효과를 거뒀다. 이들 기업이 6시그마를 통해 얻은 수익은 프로젝트당 평균 25만달러에 달했다고 징그라프 미 SBTI사 회장은 전했다. 국내에서는 LG, 삼성, 현대 등 대기업에서 6시그마를 그룹 경영전략으로 채택해 활용하고 있다. LG화학은 지난 99년 전사적인 경영혁신활동의 일환으로 6시그마

를 도입했다. 당시 최고 경영층의 강력한 의지로 시작된 이 경영혁신 활동으로 LG화학은 첫째 1차 기간 동안 모두 56건의 프로젝트를 수행해 3백40억원의 외형적인 재무성과를 거뒀다. 이후 6차 기간 활동을 진행하여 4백건의 프로젝트에 3천5백억원의 성과를 냈다.



그림 6. 식스 시그마.

3.3. 화학산업 적용 시 문제점

화학산업에서의 6시그마 활동은 제조, 연구개발, 그리고 사무간접분야의 3가지 분야로 구분할 수 있다. 6시그마 프로젝트 진행은 3가지 분야 모두 Define-Measure-Analyze-Improve-Control (DMAIC)라 불리는 정형화된 문제 해결절차를 따르고 있다. 정의단계(Define)에서는 프로젝트의 목표를 구체화하고, 개선 대상이 되는 프로세스에서 제품/서비스의 품질을 결정해주는 주 품질특성을 찾아야 하는데, 이를 CTQ (critical to quality)라 부른다. 측정단계(Measurement)에서는 CTQ에 영향을 줄 것으로 판단되는 모든 입력 변수들을 열거하여 프로세스 맵을 만들고, 이 중에서 품질에 영향을 적게 준다고 판단되는 변수들을 제거한다. 하지만 규모가 크고 다양한 단위 공정들로 이루어진 화학 공정에서는 프로세스 맵 작성 시 가능한 입력 변수들 모두를 열거하기가 무척 어려우며, 영향력을 평가하는데 주로 사용되는 특성요인도(Cause and Effect Diagram)나 FMEA (Failure Mode Effect Analysis) 등은 엔지니어의 경험적 지식을 필요로 하므로 평가의 기준이 애매하고 판단 시간도 오래 소요되기 쉽다는 단점을 지닌다. 분석단계(Analysis)에서는 측정단계에서 주요입력변수로 판명된 변수들에 대해 데이터를 수집하고, 이들이 품질에 미치는 효과를 파악한다. 이 단계부터는 엔지니어의 공학적 지식보다는 철저히 데이터에 기초해서 프로젝트를 진행한다. 필요에 따라 Histogram, Box plots, Time series plot, Scatter plots 등의 그래프를 활용한 분석 뿐 아니라, 다변량 분석, Normality 검정, 카이제곱검정, t 검정을 포함한 가설검정 등의 여러 가지 통계적 기법들을 활용하여 "vital few"로 불리는 핵심입력 변수를 3-4개 이내로 압축하게 된다. 분석단계야말로 품질 혁신의 핵심단계라 할 수 있지만 이 단계 또한 화학공정에서는 몇몇 어려운 점들을 드러낸다. 먼저 센서의 부족, 오지시, 에러, 편향성 등 측정 정보 자체의 문제와 단위공정 간의 Time delay, balancing 등 데이터의 상관성의 문제로 인해

수집된 데이터의 신뢰도가 낮고 데이터 기반 상관성 규명의 정확도가 저하된다. 게다가 소개된 다양한 기법 중 최적의 기법을 선택하는 문제가 있고 수천 개 규모의 화학공정 변수들 간의 강한 상관관계로 인해 vital few의 규명 또한 난제로 부각되고 있다. 개선단계(Improvement)는 "vital few"로 규명된 핵심입력변수에 대한 최적 조건을 설정하는 단계이다. 특히 최적 조건의 설정을 위해 널리 쓰이는 DOE (Design of Experiment)를 적용하기 위해서는 다양한 실험을 통해 데이터 수집을 해야 하는데, 일반적으로 데이터 수집을 위한 실험은 많은 비용 및 시간을 필요로 한다. 따라서 실험을 수행하지 않고도 vital few 변수들의 영향력을 제거할 수 있는 방법론이 필요하다. 관리단계(Control)에서는 규명된 최적의 작업 조건을 유지할 수 있는 시스템을 구축하는 단계이다. 작업표준을 설정하며, 종업원의 교육도 병행하게 된다.

3.4. 체계적 의사결정 방법론

Six Sigma가 전략적인 가이드 역할에서는 충분히 훌륭하지만 단계별 문제해결을 위한 구체적인 기술이 미흡하여 여러 번의 시행착오를 통한 시간과 비용이 과다 지출되어왔음을 부인할 수는 없다. 이와 같은 한계는 기존 화학산업에서 활발히 적용되어오던 Process Systems Engineering 분야의 기술들을 도입함으로써 효과적으로 극복할 수 있다. (그림 7)은 새로 개발된 화학산업에서의 생산성 혁신 (Productivity Innovation) 방법론이다. 제안된 방법론은 6시그마의 DMAIC의 전략적 사이클을 하위 단계들 (sub-steps)로 상세화 함으로써 화학산업에서의 기존 6시그마의 한계를 극복하였다.

Phase I. Definition	STEP 1	Definition of "critical to quality"
	STEP 2	Selection of major unit processes
Phase II. Measure and Analysis	Empirical Knowledge STEP 3	Identification of all the potential causes
	Operational history STEP 4	Selection of "vital few causes"
	Technical knowledge STEP 5	
	Validation STEP 6	Validation of "vital few causes"
Phase III. Improvement	STEP 7	Identification of all the candidates and cost analysis
	STEP 8	Process improvement
Phase IV. Control	STEP 9	Process control

그림 7. Systematic decision procedure for productivity innovation.

한계 극복을 위해 기존 방법론과 차별화 시키는 제안된 방법론의 핵심 요소는 다음과 같다. 첫째, 처음부터 vital few cause (VFCs)를 찾던 기존 방법론과는 달리 개발된 방법론에서는 major unit process, potential causes를 거쳐 VFCs를 찾음으로써 큰 규모의 화학공정의 복잡성 (Complexity)을 효율적으로 처리하여 분석 시간을 단축

시켰다. 둘째, 그간 전문가들의 고유 영역으로 치부되어 오던 VFCs 도출단계를 비전문가들도 쉽게 활용할 수 있도록 다음과 같은 체계적인 문제해결 방법론을 제시했고, 이로 인해 도출된 VFCs의 정확성이 대폭 향상되었다: 1) house of quality (HOQ (그림 8))를 이용하여 경험적 의견을 수치화하고 객관적인 근거로 활용하여 major unit process와 potential causes를 도출한다 2) data reconciliation (DR)과 data pre-processing을 활용한 데이터 신뢰도를 확보하고 검증된 variable selection techniques을 이용하여 operational history data로부터 중요 공정변수를 선정한다 3) 공정지식(process knowledge)을 활용한 인과관계 분석 (causal analysis)을 통해 여러 개의 원인들의 근원적 원인인 root causes를 규명한다 4) 민감도 분석 (sensitivity analysis)을 이용하여 규명된 root cause를 다시금 검증하여 최종적인 VFCs를 결정짓는다. 셋째, design of experiment (DOE), response surface method (RSM), optimization으로 대변되던 기존 개선 절차와 달리, 조업 지침 마련, 예측모델 활용 감시/진단, 품질 예측 제어 등을 활용한 다양한 후보 개선안을 먼저 제시하고 경제성 분석 (cost analysis)을 통해 경제성 측면에서 가장 유리한 개선안을 도입하여 공정개선에 소요되던 기간과 비용을 대폭 절감하였다. 소개한 화학산업용 생산성 혁신 방법론은 그간 국내 유수의 화학회사에 다양하게 도입되어 큰 성과를 거뒀었다. 그 대표적인 성과는 (표 2)과 (그림 9)에서 확인할 수 있다.

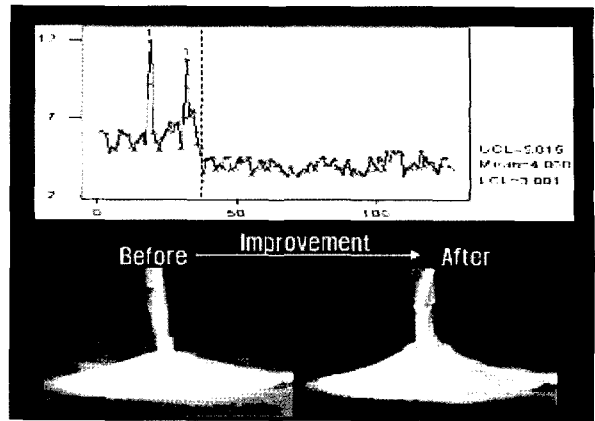


그림 9. 최고 품질의 제품 생산.

3.5. 사고의 전환으로 가치 창조 '3세대 6시그마'

지난 20여년간 전세계 기업들의 경영혁신 도구로 활용되어 온 1, 2세대 6시그마를 한단계 업그레이드한 "3세대 6시그마"가 지난 6월 11일 한국 경제신문, 한국표준협회, 미국 애리조나주립대가 개최한 "6시그마 메가 컨퍼런스"에서 마이클 해리 박사에 의해 한국에서 처음으로 공표되어 큰 관심을 끌고 있다. 마이클 해리 박사는 과거의 6시그마가 상품과 제조 공정의 결점을 찾아내 비용을 절감하는 수준에 머물렀다면 3세대 6시그마는 가치를 창조하는데 초점이 맞춰져 있다고 강조했다. 해리 박사가 강연한 3세대 6시그마는 다음의 세가지 핵심요소로 압축된다. 첫째는 변화의 속도를 높여야 한다는 것이다. 우리나라의 대기업들의 시그마 수준은 기존 1, 2세대 6시그마를 통해 이미 4~5시그마 수준까지 도달했지만 변화의 속도에 주목하지 않는다면 6시그마 수준에 이르는데 20년이 걸릴 수도 있으므로 변화의 속도를 혁신적으로 끌어 올려야 한다. 둘째는 전 조직원이 주역이 되어야 한다는 것이다. 1세대 6시그마에서는 상품에, 2세대 6시그마에서는 프로세스에 초점을 맞췄다면, 3세대 6시그마는 투입 혁신 산출로 이어지는 회사 조직 전체의 비즈니스 사이클 개선이 중요한 이슈가 될 것이다. 이런 이유로 6시그마를 주도하는 사람들도 과거의 블랙벨트나 그린벨트와 같은 소수의 전문가들이 아니라 조직원 전체가 새로운 주도세력인 화이트벨트가 되어야 한다. 특히 인터넷의 발달로 화이트벨트를 양산하는 데도 과거처럼 비싼 비용을 투입할 필요가 없어졌으며, 2세대 6시그마를 도입한 비용의 10%정도면 직원들을 화이트벨트화 하는 것이 가능해졌다. 이 같은 도입 비용의 절감은 그 동안 대기업 중심으로 수행돼 온 6시그마를 중소기업으로까지 확산시키는데 결정적인 역할을 할 것이라고 전망된다. 셋째, 리더십이 3세대 6시그마의 관건이라는 것이다. 모든 문제에는 항상 원인이 존재하는데 아직까지 많은 기업 리더들은 증상만 보고 원인을 찾아내는데 주목하지 못하고 있다. 혁신을 위해서는 리더들부터 다른 질문을 던져 다른 결과를 유도하는 습관을 가져야 한다. 이와 같은 핵심 요소들은 사람들이 창의력을 분출할 수 있는 파워

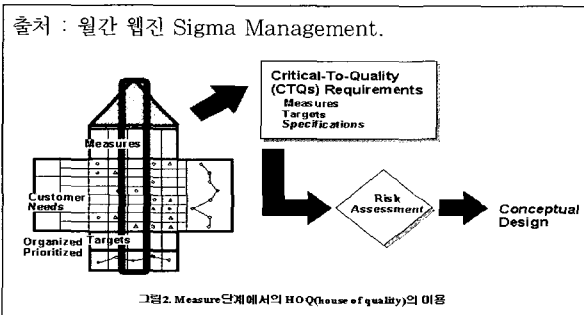


그림 8. House of quality.

표 2. 화학산업용 생산성 혁신 방법론의 적용성과 요약.

년도: 기업명	프로젝트 목표	효과
2002: SK케미칼	Six Sigma 기반 품질 균일화 컨설팅	TA 제품 품질 편차의 41.4% 감소, 4.1억원/년 절감 효과 달성
2001: 삼성석유화학(주)	Six Sigma 기반 품질 개선 컨설팅	PTA 제품 PSD, 개선 목표의 93% 달성으로 인한 고객 Claim 해결
2000: LG화학 PVC공장	실시간 모니터링/진단 시스템 구축을 통한 품질 개선 컨설팅	1) Batch Cycle Time의 5% 감소로 인한 생산량 증대. 2) 미세 분말 발생량 제어 수준 2시그마에서 6 시그마로 증대. 3) 병렬 연결 반응기 조업 분석을 통한 수율 증대
2000: 삼성아토피나(주)	Quality Control 기반 생산성향상 컨설팅	공정 안정화 및 off-spec 제품 발생량 30% 절감

생킹(Power Thinking)이란 틀을 기반으로 구현된다. 파워 생킹은 혁신(Innovate), 수립(Configure), 실현(Realize), 리스크 축소(Attenuate)의 ICRA로 구성된다. 이미 국내 기업 중 삼성SDS는 3세대 6시그마를 적용시키고 있는데 고객과 기업간의 '가치사슬'로 고객의 가치를 창조하자는 취지가 SI업체에 가장 적합한 모델로 판단되기 때문이다. 최근 화학산업에서는 중국 화학 산업의 급격한 성장속도에 주목하고 있으며 추후 3~5년 이내에 과잉공급으로 인한 가격 저하 현상이 도래하지 않을까 우려하고 있다. 때문에 불량 감소와 비용절감에 주력했던 6시그마의 차원을 뛰어 넘어 사고의 전환으로 고객이 필요로 하는 "가치 창조"를 주장하는 3세대 6시그마야말로 화학산업의 생산성 혁신에 있어서 필연적으로 요구되는 방법론이라 할 수 있다.

3.6. 맺음말

6시그마의 빠른 확산에도 불구하고 국내의 전체 화학 공장 대비 현재 6시그마 운동을 전개하고 있는 공장은 극히 일부에 불과하다. 특히 지속적인 내수침체에 빠져 점점 경쟁력을 상실하고 있는 중소기업의 경우 6 시그마를 적용하는 공장들은 거의 없다. 소개된 바와 같이 6시그마는 침체된 국내 화학산업에도 새로운 전환점을 제시할 돌파구임에 틀림없다. 혁신은 묵은 관행이나 의식 방법을 새롭게 바꾸는 것을 말한다. 대기업과 중소 기업은 품질 혁신이야말로 초일류로 가는 지름길이라는 인식 하에 최고의 품질 확보를 위해 노력해야 할 것이다. 지난 1984년 미국 모토로라사가 품질개선운동의 도구로 활용하기 시작한 6시그마가 이렇게 발전할지 아무도 예상하지 못했다. 하지만 GE와 여러 기업들은 6시그마를 적극적으로 도입하고 능동적으로 응용하기 위한 노력으로 그간의 괄목할만한 성과를 이뤄냈다. 국내 모든 화학공장이 3세대 6시그마를 성공적으로 도입하여 모두가 초일류 기업의 대열에 합류하게 될 그날을 기대해 본다.

4. 유틸리티 공정의 최적화

오늘날 모든 공장들의 운전은 유틸리티 시스템에 의존하고 있다. 유틸리티는 공장의 운전에 필요한 에너지를 말하며 유틸리티 시스템은 유틸리티의 공급에 관련되는 각종 설비를 일컫는다. 공장의 운전에서 요구되는 전기, 수증기, 공업용수, 그리고 공기 및 각종 가스류들은 유틸리티 시스템을 통하여 공급된다. 그러므로 공장의 운전에서 유틸리티 시스템의 효율적인 관리와 운영은 공장의 안전운전과 경제성에 가장 큰 영향을 미친다. 그러나 이러한 유틸리티 시스템의 중요성에도 불구하고 공장의 경영에서 유틸리티 시스템은 큰 주목을 받지 못하고 있다. 유틸리티는 공장에서 생산되는 최종 제품과 같이 눈에 띄는 것이

아니기 때문에 어떤 문제가 생기기 전에는 거의 무시당하는 경향이 있다. 특히 불경기가 이어지거나 회사의 경영상태가 악화되거나 경우에는 유틸리티 시스템은 투자 우선 순위에서 아주 뒤로 밀리는 것이 일반적이다.

대부분의 화학공장에서 가열 및 냉각에 소요되는 유틸리티는 중앙 집중화된 유틸리티 시스템에 의해 제공된다. 아울러 공장 현장에서의 열병합 발전의 사용이 나날이 증가되고 있는데 이는 운전 현장에서 소요되는 전력도 유틸리티 시스템을 통하여 공급됨을 의미하는 것이다. 따라서 에너지 소비와 관련된 공장의 운전효율은 공정조업 자체의 효율뿐만 아니라 유틸리티 시스템의 운전 효율에 따라서도 좌우됨을 알 수 있다. 그러므로 유틸리티의 운용에 대한 중요성을 간과하는 것은 상당한 규모의 경제적 손실로 이어질 수 있다. 전기 전자 및 제약 등의 분야에서는 전체 운전비용에서 유틸리티가 차지하는 부분이 비교적 소규모이지만 석유화학, 시멘트, 제지 등의 분야에서는 유틸리티 비용이 전체 운전비용의 상당부분을 차지한다. 화학관련 산업분야의 공장에서는 대체적으로 사용되는 에너지의 약 70% 정도가 유틸리티 시스템을 경유하는 것으로 알려져 있다. 따라서 보일러와 수증기 분배 시스템을 포함하는 유틸리티 시스템의 효율이 80%라 하면 유틸리티 시스템을 경유하는 공장 에너지의 14%가 손실되는 셈이 된다. 그러므로 유틸리티 시스템의 효율적인 운용을 통하여 상당한 에너지 절감, 나아가 조업비용의 절감을 이룰 수 있다.

유틸리티 가운데 대부분의 공장에서 가장 큰 비중을 차지하는 것은 수증기이다. 수증기 수급운용의 효율적인 관리는 공장의 전력 및 용수의 수급에도 직접적인 영향을 미친다. 따라서 본 시리즈에서는 수증기의 수급을 중심으로 하는 유틸리티 공정의 최적 운용에 대해서 살펴보고자 한다. 수증기와 관련되는 유틸리티 설비로서는 수증기의 생산을 위한 보일러, 보일러에서 생산된 수증기로부터의 전력 생산 및 수증기의 감압을 위한 터빈, 그리고 공장조업 현장에서 요구되는 다양한 압력수준의 수증기를 적절히 분배하기 위한 수증기 분배계통을 들 수 있다. 따라서 이들 유틸리티 설비 각각에 대한 최적 운용방안을 규명할 필요가 있다. 그러나 이들 유틸리티 설비는 매우 복잡하며 공장조업과 직접 연관되어 있기 때문에 간단한 계산이나 수작업에 의한 계산으로는 이들 설비들에 대한 최적 운전조건을 규명할 수 없다. 그러므로 컴퓨터의 도입 활용이 필수적으로 요구되는데 컴퓨터를 통한 계산에서는 각 유틸리티 설비와의 운전에 대한 모델이 필요하다. 유틸리티의 효율, 그리고 보일러, 터빈 및 수증기 분배계통과 같은 주요 유틸리티 설비의 모델을 통하여 최적 운전조건을 규명하고 유틸리티 시스템의 최적 설계를 구현할 수 있다.

4.1. 보일러 공정

보일러는 연료를 연소하여 얻은 열이나 다른 열원으로부터

의 열을 이용하여 밀폐용기 내의 물로부터 수증기를 발생시키는 장치이다. 수증기를 이용하는 증기기관은 18세기 초부터 활용되기 시작하였으나 보일러가 제대로 실용화된 것은 19세기 초부터이다. 보일러는 유틸리티 플랜트에서 가장 큰 비중을 차지한다. (그림 10)은 보일러의 대략적인 구조를 보인 것이다.

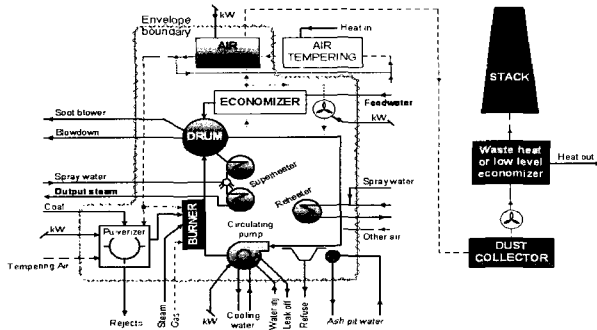


그림 10. 보일러의 개략적인 구조.

보일러는 크게 탈기기(deaerator), 고압급수 가열기(HPH, High-Pressure Heater)(오일 보일러의 경우), 절탄기(economizer)(석탄 보일러의 경우), 공기식 공기에 열기(GAH, Gas-Air Heater), 증기식 공기에 열기(SAH, Steam-Air Heater), 1차 및 2차 과열기(석탄 보일러의 경우 3차 과열기까지 있다), 보일러 드럼, 증유 가열기(오일 보일러의 경우) 그리고 플래쉬 탱크로 구성되어 있다. 보일러 급수는 정수 및 중화공정과 같은 사전처리를 거쳐 탈기기로 유입된다. 보일러 급수의 사전처리에 의해 보일러 내부가 부식하거나 내부면에 노폐물이 축적되는 것을 막을 수 있다. 탈기기에서는 수증기를 유입시켜 보일러 급수와 접촉하도록 한다. 보일러 급수가 수증기와 접촉하여 가열되면 급수 내부에 용해되어 있는 기체가 제거된다. 이러한 과정을 거치지 않으면 보일러 급수에 용해되어 있는 기체가 보일러 내부에서 팽창하게 되어 보일러가 폭발할 가능성이 있기 때문이다. 기체가 제거된 보일러 급수는 급수 펌프를 통해 보일러의 절탄기로 유입된다. 절탄기는 보일러 연소소에서 연소된 가스가 배출되는 부분에 위치하여 급수를 예열시킨다. 이렇게 예열된 급수는 보일러 드럼으로 유입되어 수증기와 물로 분리된다. 보일러 드럼에서 물이 수증기로 되는 속도보다 급수가 드럼으로 들어오는 속도가 더 빠르면 과열기로 물이 나가기 때문에 드럼에 물이 넘치지 않도록 플래쉬 탱크로 일정량의 급수가 빠져나와 순수 급수를 예열하는데 쓰이게 된다. 드럼에서 나온 수증기는 과열기로 이동하여 1차, 2차 및 3차 과열기를 통과하면서 최종적으로 초고압 증기(예를 들면 510°C, 114 kg/cm²g)가 된다. 물은 보일러 연소로 벽면의 관을 통해 이동하면서 가열되어 수증기로 되고 수증기는 부력에 의해 보일러 드럼으로 다시 올라오게 된다.

오일 보일러는 유동층 보일러인 석탄 보일러에 비하여 매우

단순한 구조로 조작성이 상대적으로 간편하다. 석탄 보일러에는 석탄의 이동에 필요한 트레일러 및 미분탄 연소기와 유동층 보일러 내부의 매개물질, 석회석 등을 회수, 회귀시키는 장치가 추가되어 있다. 또한 석탄 보일러는 공기를 계속적으로 불어넣어 주어서 매개물질이 부유하도록 해야 하므로 내부 부품의 고장이 잦은 단점을 가지고 있다. 보일러의 설계 및 운전에는 소모 수증기 발생량, 수증기 입력, 수증기 온도, 보일러 급수 온도, 공기 온도, 사용연료 및 기타 운전 및 설치 조건들에 대한 검토가 필요하다.

보일러 공정의 최적 운전에는 연료에 대한 공기 비율을 적절히 유지하는 것이 매우 중요하다. 연소공정의 최적화에 있어서는 (그림 11)에서와 같이 모델을 통하여 연료 및 공기의 최적값을 제시하고 이에 따라 공정이 운전되도록 한다.

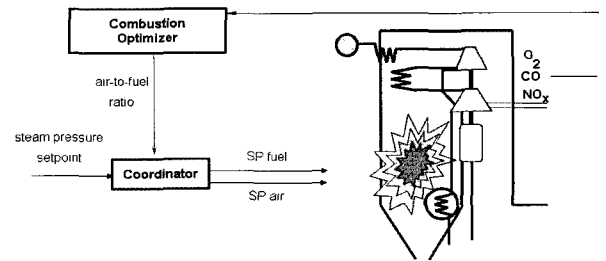


그림 11. 보일러 연소공정의 최적화.

근래에 이르러 대기오염에 대한 환경규제의 강화로 (그림 12)에서와 같이 배기가스 중의 NO_x 및 CO 함유량에 대한 허용기준이 충족되도록 연소공정이 운전되어야 한다.

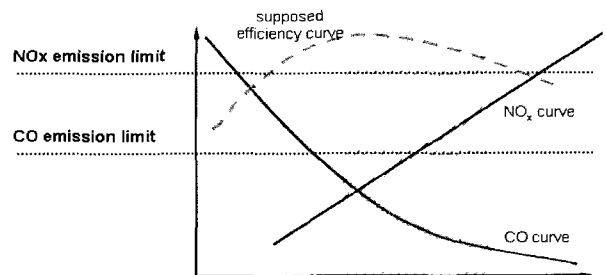


그림 12. 환경오염규제를 감안한 보일러 연소공정의 운전범위.

보일러에서 생산되는 수증기는 수증기 헤더(header)를 통해 수증기를 필요로 하는 단위 공정이나 기타 수요처로 유입되는데 요구되는 수증기의 양과 질은 계절과 기후 조건, 그리고 공장의 운전상황에 따라 빈번하게 변하는 것이 일반적이다. 따라서 공장의 안정적, 경제적 운전을 위해서는 수증기의 변동량과 소요 등급을 정확히 파악하여 분배 공급해주는 것이 필수적이다. 수증기의 안정적 공급을 위해서 엔지니어는 수증기 분배공정에 수반되는 각 유틸리티 단위 장치의 운전상태를 정확히 파악하여 변화된 요구량에 대응하도록 하고 수증기 헤더의 온도와 압력이 일정하게 유지하도록

수증기 분배공정의 각 단위 장치를 조절하여야 한다. 그러나 고압급수 가열기(HPH), 증기식 공기 예열기(SAH), 그리고 탈기 등에서 주로 소비되는 자체 소모 수증기로 인한 보일러의 부하 증가량 계산과 터빈 발전기의 열분석에는 많은 시간과 노력이 소요되므로 수증기 분배 및 공급조업을 신속 정확하게 할 수 있는 시스템을 확보하여 운용하는 것이 필요하다.

4.2. 수증기 분배

수증기 헤더는 수증기 발생 장치에서 생산한 수증기를 각각의 단위 공정이나 수요처로 공급해 주는 역할을 하며 헤더의 압력에 따라 초고압, 고압, 중압, 저압 수증기 헤더로 구분할 수 있다. 가장 대표적인 수증기 헤더의 온도와 압력 조건은 (표 3)에 나타나 있다.

표 3. 각 수증기 헤더의 온도와 압력.

	초고압 수증기	고압 수증기	중압 수증기	저압 수증기
온도 (°C)	520	380	285	200
압력(atm)	120	40	16	4

(표 3)에 보인 네 개의 헤더는 일반적으로 터빈 발전기와 유틸리티 터빈, 그리고 감압 설비로 연결되어 있으며 비상 사태를 위해 대기 방출 운전을 하도록 되어 있다.

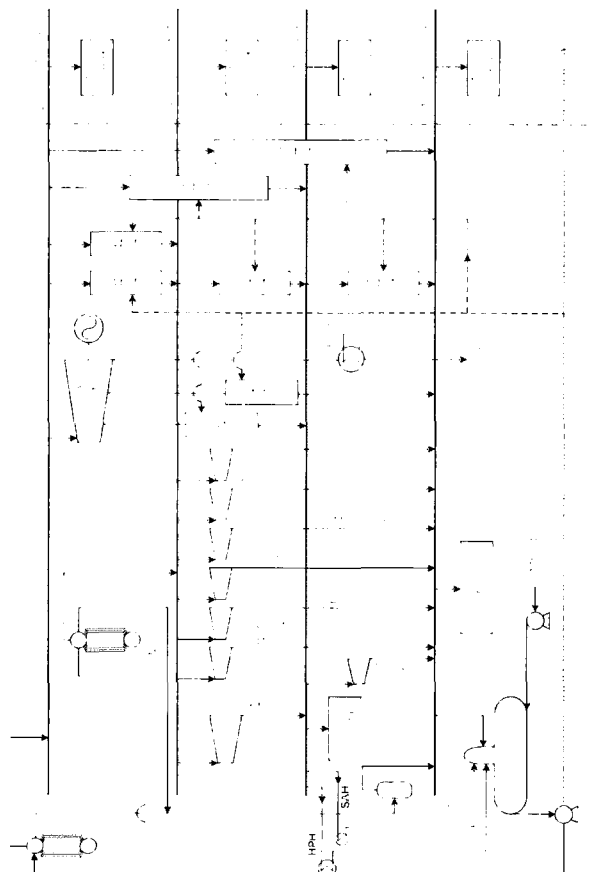


그림 13. 수증기 분배 공정의 공정도.

보일러에서 생산된 초고압 수증기는 먼저 초고압 수증기 헤더로 이동되는데 그 중 일부는 각각의 공정으로 이동되고 나머지는 터빈 발전기에 공급되어 중압 수증기 헤더와 저압 수증기 헤더로 추가되기도 하며 감압 설비를 거쳐 고압 수증기 헤더로 공급되기도 한다. 감압 설비를 거친 고압 수증기는 유틸리티 펌프를 구동하는 터빈으로 공급되어 중압 수증기 헤더나 저압 수증기 헤더로 추가되기도 하며 나머지는 감압 설비를 거쳐 중압 수증기 헤더로 공급된다. 유틸리티 터빈과 터빈 발전기의 고압단, 그리고 감압 설비로부터 공급된 중압 수증기는 연료 펌프를 구동하기 위한 터빈, 고압 급수 가열기, 증기식 공기 예열기, 그리고 수증기 분무 장치에서 사용되고 나머지는 감압 설비를 거쳐 저압 수증기 헤더로 공급된다. 터빈 발전기의 저압단, 감압 설비, 홀래쉬(flash) 탱크, 그리고 유틸리티 터빈으로부터 공급된 저압 수증기는 탈기기와 증기식 연료 예열기 및 각각의 공정으로 공급된다. (그림 13)는 수증기 분배 공정의 대략적인 공정도이며 (그림 14)는 상용 유틸리티 최적화 시스템의 화면이다.

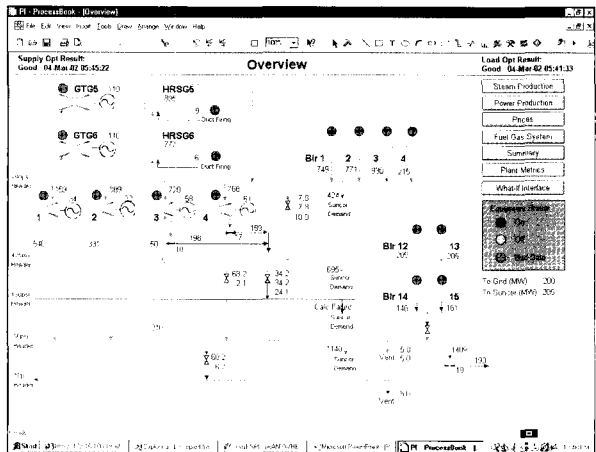


그림 14. 상용 유틸리티 분배 시스템의 보기.

유틸리티 시스템의 운용 최적화 문제는 일반적으로 MI (Mixed-Integer) 최적화 모델로 설정된다. 목적함수와 제약 조건의 형태는 다음과 같다.

목적함수

$$Min_{y_d, y_j, d, x} f(y_d, d) + \sum_{i=1}^p f_i(x_i, y_i)$$

제약조건

$$h_j(d, y_d, y_j, x_j, \theta_j) \leq 0, \quad j = 1, \dots, p$$

$$r(d, y_d, y_1, x_1, \theta_1, \dots, y_p, x_p, \theta_p) \leq 0$$

$$d \in R^n, \quad x_j \in R^{q \times R^p}, \quad y_d \in [0, 1]^N, \quad y_j \in [0, 1]^{n \times p}$$

위에서 f 는 설계비용함수, f_i 는 운전비용함수이며 y_d 는 유틸리티 단위장치의 선택여부를 나타내는 0이나 1의 값을 취한다.

유틸리티 시스템을 분석할 때 빈번히 야기되는 문제는 저압 수증기 수요를 충족하기 위해서 고압 수증기를 감압 밸브를 통과시킬 것인가, 아니면 수증기 터빈을 통과시킬 것인가를 결정하는 문제이다. 전기모터와 수증기 터빈 모두에 의해서 구동될 수 있는 펌프가 있다고 하면 다음과 같은 두 가지 운전방법을 고려하여 볼 수 있는데 이들 가운데 경제적으로 어느 방법이 유리한지 결정하여야 한다.

(방법 1): 수증기 터빈을 사용하여 펌프를 구동하고 저압 수증기를 공급한다.

(방법 2): 전기모터를 사용하여 펌프를 구동하고 저압 수증기는 감압밸브를 이용하여 공급한다.

수증기 터빈의 사용이 경제적으로 유리한지의 여부를 결정하기 위해서는 전력비용, 연료비용, 수증기 터빈 효율, 수증기 물성치, 그리고 보일러 효율에 대한 데이터가 필요하다.

참고문헌

1. W. Campagne, *Hydrocarbon Proc.*, p.117, 1981.
2. D. Lindsley, *Boiler Control Systems*, McGraw-Hill, 1991.
3. R. K. Ghosh, *Hydrocarbon Proc.*, July, p.53, 2003.
4. 수증기 분배 최적화 시스템, 한양대학교 Tech. report, 1996.
5. J. K. Clark, and N. E. Helmick, *Chemical Eng. Research*, p.116, 1980.
6. J. Broughton, *Process Utility Systems*, IChemE, 1994.
7. 일본화학공학협회, 유유틸리티의 설계, 세진사, 1987.
8. G. Harrell, *Steam System Survey Guide*, DOE (U.S.), 2002.
9. P. A. Pilavakis, and M. A. Perrin, *Hydrocarbon Proc.*, p.83, 1983.
10. 이원욱, Utility 공정의 최적운전 시스템에 관한 연구, 한양대학교, 2002.
11. D. Saez, et.al., *Optimization of Industrial Processes at Supervisory Level*, Springer-Verlag, 2002.
12. A. W. Ordys, et.al., *Modeling and Simulation of Power Generation Plants*, Springer-Verlag, 1994.

..... 저자소개



《한 중 훈》

- 1980년 3월~1984년 2월 서울대학교 화학공학(학사).
- 1984년 3월~1986년 2월 서울대학교 화학공학(석사).
- 1988년 9월~1994년 2월 MIT 화학공학(박사).
- 1987년 3월~1988년 7월 KIST(연구원).
- 1993년 6월~1993년 8월 Molten Metal Technology (선임연구원).
- 1995년 6월~2000년 8월 포항공과대학교(조교수).
- 2000년 9월~2004년 2월 포항공과대학교(부교수).
- 2004년 3월~현재 서울대학교(부교수).



《박 선 원》

- 1970년 서울대학교 화학공학과 (공학사).
- 1972년 육군중위 제대(ROTC).
- 1975년 Oklahoma State University (공학석사).
- 1979년 University of Texas at Austin(공학박사).
- 1979년~1988년 Celanese Chemical, USA (Systems Engineer, Senior Process Control Engineer, Staff Engineer).
- 1988년~현재 KAIST, 생명 및 화학공학과 교수.
- 주요관심분야 : 공정제어, 공정설계, 공정최적화, SCM, LCA, Systems Biology, Bioinformatics.



《여 영 구》

- 1973년~1979년 서울대학교 화학공학과(학사).
- 1980년~1982년 서울대학교 대학원 화학공학과(석사).
- 1982년~1986년 Auburn 대학교 화학공학과(박사).
- 1987년~1993년 KIST 선/책임연구원.
- 1993년~현재 한양대학교 화학공학과 교수.