

자동차 Steering Wheel 제조공정의 누적수율 개선을 위한 6시그마 적용사례

박종인* · 이동규** · 변재현***†

** LG화학 혁신지원팀

** LG화학 울산공장 혁신추진팀

*** 경상대학교 산업시스템공학부, 공학연구원

A Six Sigma Application Case Study to Improve a Rolled Throughput Yield of an Automobile Steering Wheel Manufacturing Process

Jong-In Park* · Dong-Kyu Lee** · Jai-Hyun Byun***†

* Management Innovation Team, LG Chemical

** Leading Innovation Team, Ulsan Plant, LG Chemical

*** Dept. of Industrial and Systems Engineering and Engineering Research Center, Gyeongsang National University

Key Words : Six Sigma, Automobile Steering Wheel, Rolled Throughput Yield, Hidden Factory, Taguchi Method

Abstract

This paper presents a six sigma application case study for an automobile steering wheel manufacturing process using rolled throughput yield improvement activity. Hidden factory and first pass yield concept is introduced and a DMAIC procedure is implemented to maximize the first pass yield. The result of the six sigma project amounts to the reduction of failure cost of 1.2 billion won per year in the steering wheel manufacturing process. This paper can benefit six sigma practitioners in some ways.

1. 서 론

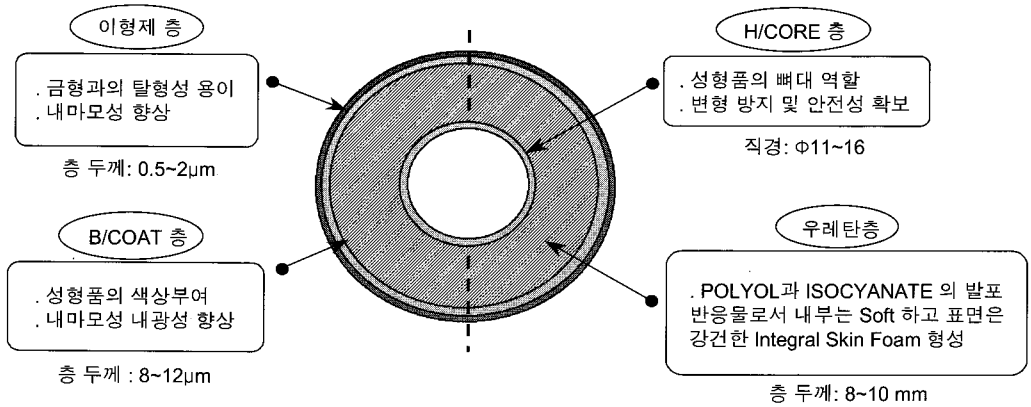
6시그마는 품질 혁신과 고객 만족을 달성하기 위한 종합적인 기업경영전략이다. 6시그마는 1980년 중반 모토롤라에서 기존의 품질개선 활동에 다양한 통계적 기법을 체계적으로 결합시켜 사내의 주도적인 품질혁신 활동으로 발전시킨 것으로서, General Electric(GE)의 경쟁력을 세계 최고 수준으로 끌어올리는 데 지대한 역할을 하였다. 국내에서는 1996년 중반 LG 전자, 삼성 SDI 등이 처음 도입한 이래, 기업 내 성공적인 경영 전략으로 주

목받고 있으며, 현재는 국내 대표적 기업들이 6시그마를 도입하여 품질혁신 활동을 추진하고 있다. 특히, 기존의 품질 관리 활동이 기계 및 전자 산업을 중심으로 전개되었던 것에 반해, 6시그마는 응용분야에 상관없이 탁월한 성과를 올릴 수 있는 품질혁신 활동으로 각광 받고 있다. 고객 관점에서의 품질에 대한 구체적인 목표를 제시하고, 정형화된 문제해결 절차에 따라, 정량적인 통계적 도구를 이용하고, 조직 내 품질혁신을 주도할 인재를 체계적으로 양성함으로써, 6시그마는 궁극적으로 전사적 품질경영 혁신활동으로 완성되었다고 할 수 있다(Harry and Schroeder, 2000 ; Shina, 2002 ; Snee and Hoerl, 2003).

6시그마는 기업전략으로부터 달성해야 할 사업 목표 또는 고객의 관점에서 중요한 요구사항으로부터 수행해야 할 과제를 선정하여 고객 만족도를 최대화하는 활동과 고객 품질과 직접적인 연관관계는 없으나 가치 사슬(Value Chain) 각 부분의 낭비를 최소화하는 활동으로 나눌 수 있다. 이중 후자는 1980년대 모토로라(Motorola)의 사내 개선 활동에서 시작되었는데, 각 프로세스의 비부가가치적 요소를 찾아내어 제거함으로써 프로세스 효율성의 극대화하는 활동이다. 당시 모토로라는 모든 부분의 낭비를 줄이는 방법에 대한 연구를 활발히 진행 중이었으며, 현장 애프터서비스 데이터를 조사한 결과 고장 제품이 대부분 재작업이나 수리를 거쳐 양품으로 출하된 것들이었음을 알게 되었다. 즉, 모토로라는 제품의 초기 고장과 재작업 이력 간에 큰 상관관계가 있음을 간파하고 제품의 제조 과정에서 수리나 재작업이 필요 없는 제품을 생산하기 위해 구체적인 품질개선 실천전략을 구상하게 되었고, 이러한 전략이 6시그마 활동으로 발전하게 된 것이다(Harry and Schroeder, 2000). 여기서, 주목해야 할 점은 재작업 그 자체가 비부가가치적 활동이라는 사실 외에도 이러한 활동이 궁극적으로 고객 불만족을 야기하는 주된 요인이 된다는 것이다. 더구나, 양품에 대한 프로세스 이력을 고려하지 않는 상황 하에서는 재작업이 해당 프로세스의 성과와는 무관하게 취급될 수 있다. 예를 들어, 중요 엔진 부품을 만드는 A라인에 100개의 부품이 투입되어, 이중 90개가 양품으로 가공되고, 나머지 10개 중 5개만이 재작업(Rework)을 거쳐 양품이 되었다고 하자. 이 때, 수율을 총 투입 개수 대비 최종 양품 개수로 정의하면 95%가 계산된다. 만일 동일한 부품을 만드는 B라인에는 100개의 부품 중 95개가 재작업 없이 양품으로 가공되었다면, 이 때의 수율도 마찬가지로 95%로 계산될 것이다. 과연 프로세스 성과 측면에서 A라인과 B라인에는 차이는 없다고 할 수 있을까? 재작업 유무의 차이에도 불구하고, 프로세스 성과 측도인 수율 상으로는 아무런 차이도 발견할 수 없게 된다. 이러한 점에서 재작업을 종종 프로세스 성과의 '숨겨진 공장(Hidden Factory)'이라 부르며, 이것을 프로세스 효율화 관점에서의 개선 대상 요소로 부각시키기 위해 성과에 반영할 필요가 있다. 이를 위하여 수율을 총 투입 개수 대비 재작업 없이 해당 공정을 단 한번에 통과한 양

품 개수로 정의하면, 상기 두 공정의 수율은 각각 90%, 95%로 계산되어 성과상의 차이를 분명히 확인할 수 있게 된다. 여기서, 맨 처음 정의된 수율을 최종수율(Final Yield), 재 정의된 수율을 직행률(First Pass Yield)이라 부르며, 누적수율(Rolled Throughput Yield)은 여러 개 단위 공정의 직행률을 곱한 전체 프로세스의 수율 값으로 정의된다. 단위 공정의 수율은 항상 1(100%)보다 작으므로, 어떤 프로세스의 누적수율은 그 프로세스를 구성하는 단위공정의 수가 많을수록 떨어진다. 그러므로 누적수율을 이용하여 2개의 프로세스의 성과를 비교함에 있어서, 만일 각 프로세스를 구성하는 단위공정의 수가 서로 다르다면, 누적수율 자체 보다는 누적수율에 단위공정의 수로 제공근을 취한 정상수율(normalized yield)을 이용해야 한다. 여러 가지 다양한 상황에서 누적수율을 구하는 방법과 그 용도는 Breyfogle III(1999)에 잘 나타나 있다. 6시그마의 창시자라고 할 수 있는 마이클 해리(Mikel Harry)는 대부분의 기업에서 사용되는 최종수율이 사이클 타임과 제품의 전반적인 품질, 그리고 생산비용을 무시하게 되는 점을 지적하고, 전체 프로세스 성과를 측정하는 기준으로 누적수율을 사용함으로써 숨겨진 공장을 발견하고 제거하는 것의 필요성을 강조하고 있다.

본 연구에서는 누적수율의 개념을 도입하여 특정 플라스틱 사출 공정의 성과를 새롭게 측정하고, 이를 개선하는 과정을 소개하고자 한다. 즉, 숨겨진 공장에 의한 손실비용 분석을 통해 품질 및 생산성 혁신을 위한 과제를 도출하고 해결하는 과정을 단계적으로 소개함으로써 6시그마를 통한 누적수율 개선의 모범적 사례를 제시하는 것이 본 연구의 목적이다. 본 연구에서 다루고 있는 제품은 <그림 1>과 같은 L화학 G사업부의 자동차용 Steering Wheel인데, 이 제품은 HP사, HB사 등의 국내업체에서 주 원료인 폴리올과 이소시아네이트, 피그먼트(Pigment, 안료)와부 원료인 베리아코트를 공급받아 9개의 공정을 거쳐 최종형태로 제조된다(Oertel, 1993 ; Randall and Lee, 2002). 공정은 크게 외형 확보를 위한 성형공정과 외관품질 확보를 위한 후가공 공정 기능 확보를 위한 조립공정으로 나누어진다. 본 사례연구의 내용을 6시그마의 대표적인 문제 해결 절차인 DMAIC의 각 단계별로 요약해 소개하고자 한다.



<그림 1> 자동차용 Steering Wheel 구조도

2. 정의(Define)

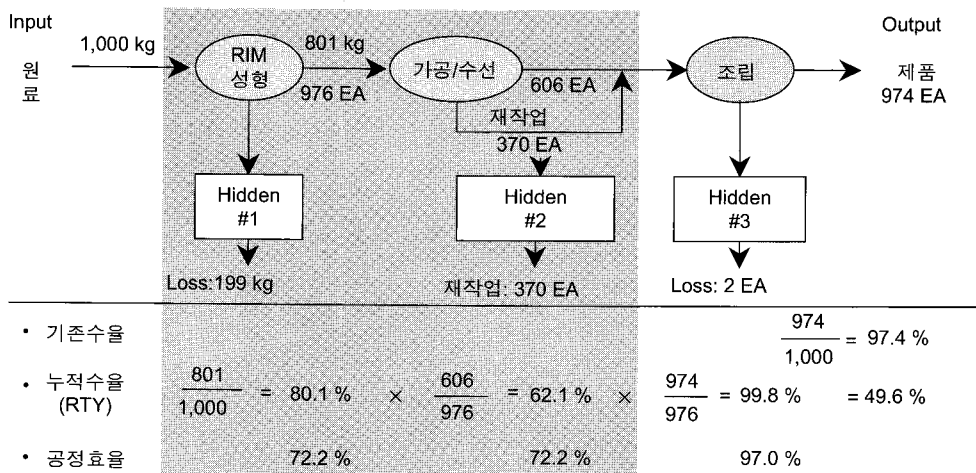
자동차용 Steering Wheel의 매출 성장률은 본 6 시그마 프로젝트를 시작할 당시 65.5%로서 타 제품보다 월등히 높음에도 불구하고, 매출액 대비 순이익은 3.9%로 매우 낮아 원가 경쟁력 확보가 시급하였다. 아울러, 본 제품은 타 제품에 비해 제품 구조가 단순하여 단 기간 내에 성공 가능성과 공유 사례로서의 전파 가능성이 매우 높아 누적수율 개선의 대상으로 선정하였다.

누적수율 개선의 첫 단계는 개선 대상제품 제조라인의 누적수율을 계산하고, 그 값을 비용으로 환산하여 개선효과를 정량화 하는 일이다. 대상 라인에 누적수율을 용이하게 산출하기 위해서는 전체 라인을 기능별로 재구성하되 가급적이면 단위 공정별로 직행

를 측정이 가능하도록 구분해야 한다. 이 때 공정의 종합적 손실을 계량화하기 위해 직행률 외에 아래의 식을 통해 공정효율도 함께 산출하기로 하였다.

$$\text{공정효율} = \frac{\text{단위시간 당 실제 생산량}}{\text{단위시간 당 이론 생산량}}$$

자동차용 Steering Wheel의 제조공정은 <그림 2>와 같이 기능별로 RIM 성형, 가공/수선, 조립 공정으로 구분되는데, 공정별 직행률은 80.1%, 62.1%, 99.8%, 공정효율은 72.2%, 72.2%, 97.0%로 각각 계산되었다. 여기서, RIM 성형 공정의 직행률은 원재료 수율로 계산되었는데, 원재료 수율이란 RIM 성형 공정에 투입되는 원재료의 표준 입력량 대비 사출된 제품의 실제 중량 비율로 정의된다. 가공/수선 공정은 고객 클레임의 60% 이상을 차지하



<그림 2> 자동차용 Steering Wheel 제조 라인 누적수율 및 공정효율

고 있는 사출물 표면의 기포 불량을 수선하기 위한 재작업 공정이며, 기포데코-평활가공-착색의 3단계에 걸쳐 과도한 기포불량이 발생한 사출물을 양품화하는 과정이다. 이 공정의 직행률(이후 가공 직행률로 칭함)은 사출된 제품 중 기포 불량 없이 가공/수선 공정을 거치지 않고 조립 공정으로 바로 직행하는 제품의 비율로 계산되었다. 따라서 전체 공정에 걸친 누적수율은 각 공정별 직행률을 곱한 값인 49.6%로, 기존 수율 개념으로 계산된 97.4%와 비교하면 매우 낮음을 알 수 있다. 여기에 공정효율 손실까지 더해져 당 제조라인의 실패비용은 연간 총 20.2억원에 이르는 것으로 산출되었다. 참고로 전체 손실금액에는 각 공정별 직행률 저하로 인한 원재료 손실, 완제품 폐기 및 반환, 기타 부자재 손실 등의 재료비 손실 외에, 공정효율 저하에 따른 직접 인건비 손실 등을 함께 계상해야 한다.

<그림 2>에 표시한 바와 같이, 3개 주요 공정 중 손실 규모가 가장 큰 RIM 성형 및 가공/수선 공정을 개선 대상 공정으로 선정하였다. 그런데, 기포 불량 발생은 RIM 성형 공정에 기인한 것이므로 가공/수선 공정은 그 자체가 RIM 성형 공정의 숨겨진 공장(<그림 2>의 Hidden #2)이라 할 수 있으며, 궁극적으로 100% 제거되어야 할 비부가가치적 요소이다. 결국, 누적수율을 개선하기 위해서는 RIM 성형 공정을 집중적으로 향상하는 것이 필요하다.

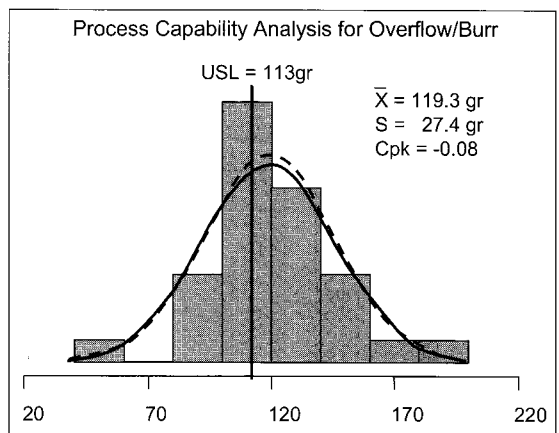
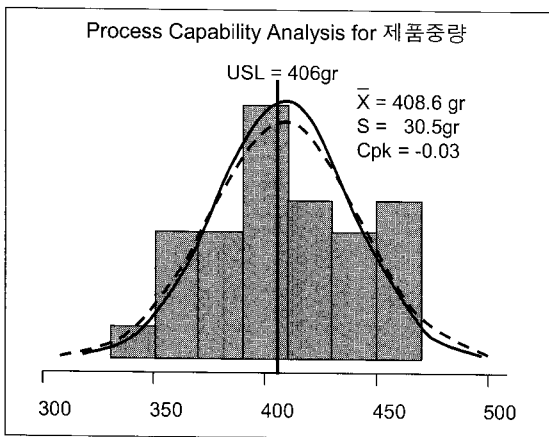
3. 측정 (Measure)

본 제품을 대상으로 6시그마 프로젝트를 성공적

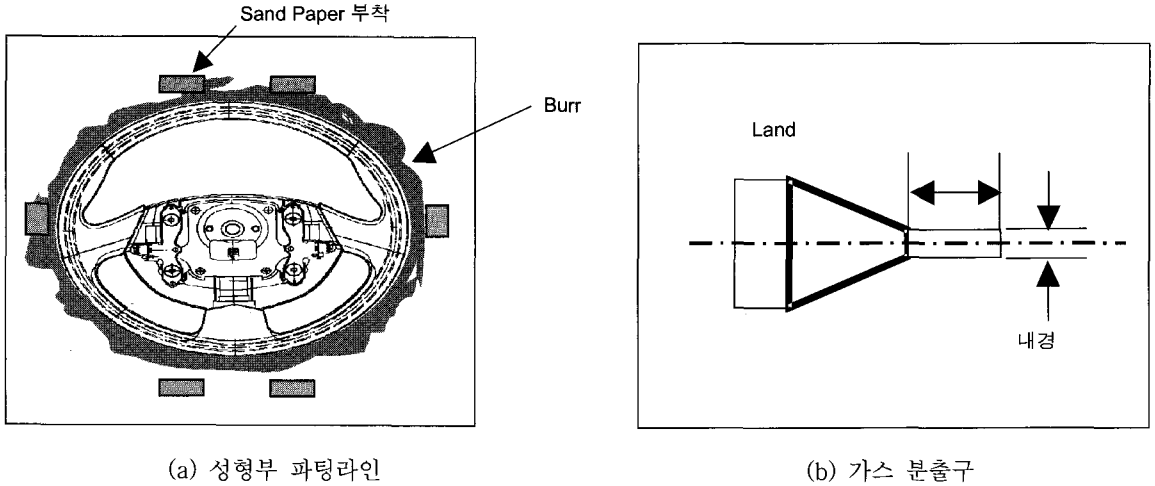
으로 수행하기 위하여 대상 공정의 직행률과 공정효율을 동시에 향상해야 하는데, 공정효율 향상 문제는 통상 시간당 생산량을 높이기 위한 활동이 주류를 이루며 정량적이고 체계적인 방법보다는 경험적인 방법들이 주로 이용되기 때문에 공유가치가 현저히 떨어진다고 판단하여 본 논문에서는 제외하였다. 아울러, 과제의 특성상 원재료 수율개선을 실시한 후 가공 직행률을 개선하는 순으로 순차적인 접근법을 취하였다.

RIM 성형 공정의 경우 미 성형으로 인한 제품 폐기(2.4%) 보다는 원재료의 표준 입력량 초과로 인하여 발생하는 제품 중량 편차, Overflow와 Burr량의 산포에 의한 원재료 손실 (17.5%)이 원재료 수율 저하에 지대한 영향을 미치고 있는 것으로 판명되었다. 대표적인 제품 모델을 대상으로 3개월간 수집된 31개의 로트에서 추출된 공정데이터를 이용하여 정규성 검정을 수행한 결과 실제 제품중량과 Overflow/Burr량은 각각 p-value가 0.79와 0.67로서 정규분포를 따르고, 이들의 분포를 구한 결과 규격상한 대비 평균과 산포가 지나치게 큰 것으로 확인되었다(<그림 3>).

작업일지를 검토하고 현장을 실사한 결과, Overflow 및 Burr량의 산포는 <그림 4>의 파팅라인 (Parting Line) 두께와 가스 분출구(Vent Hole) 내경의 변경에 기인한 것으로 파악되었다. 파팅라인은 금형의 이동측과 고정측의 접합면이다. 성형 불량 방지를 위해 <그림 4>의 (a)와 같이 작업자가 임의로 성형부 파팅라인에 사포(Sand Paper)를 부착하여 두께를 조정함에 따라 Burr 및 Overflow의 양이



<그림 3> RIM 성형 공정의 제품 중량 및 Overflow/Burr량 산포(개선 전)



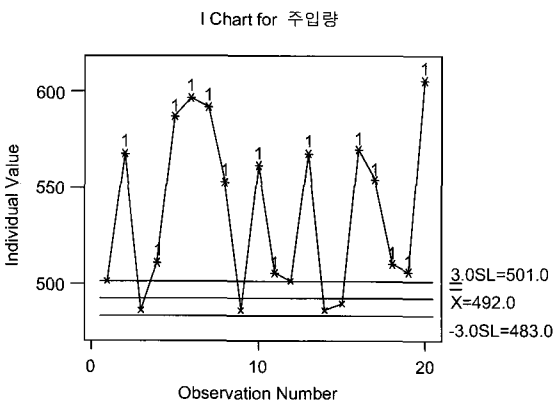
<그림 4> 성형부 파팅라인과 가스 분출구

일정한 값을 유지되지 못하고 있었다. 분출구는 성형 시 발생하는 가스(Gas)를 배출시키기 위해 파팅라인의 특정부위에 임의로 만들어준 틈새인데, 사출작업 중에 발생하는 구멍(Hole) 막힘을 해소하고자 작업자가 임의로 내경을 늘이거나 줄이기 때문에 Overflow양에 변동이 발생하고 있었다.

이를 개선하기 위해 분출구의 끝부분을 다소 크게 포켓(Pocket) 형태로 가공해줌으로써 공기 집전이 가능하도록 하였으며, 원료 절단부에 V자형 새김(Notch) 형상을 가공하여 Hole의 막힘을 방지하였다. V자형 새김 부위의 내경은 원료의 인장강도 및 Hole의 가공성을 고려하여 최소화함으로써 Burr 발생량을 41%, Overflow 발생량을 70%가량 감소시킬 수 있었다.

내경 변경 등으로 원재료의 실제 주입량이 규격한계 내에 들지 못하고 때때로 증감을 거듭하는 것이 직접적인 원인이라 할 수 있다. 실제로 <그림 5>를 보면, 표준 입력량은 $492 \pm 8\text{gram}$ 인데 실제 작업자가 투입하는 양은 486~609gram으로 규격한계를 크게 이탈하고 있다. 따라서 고객이 선호하는 제품 경도를 조사하여 표준 제품의 밀도와 체적을 정의하고, 이를 바탕으로 개선 후 파팅라인 두께와 분출구 내경 하에서 표준 입력량을 $440 \pm 10\text{ gram}$ 으로 수정한 후, 작업자로 하여금 최대한 표준을 준수하도록 교육하였다.

그러나 현장의 작업자들은 표준 입력량 준수로 인한 제품의 평균 중량과 Overflow와 Burr량의 감소는 성형성 저하, 즉, 기포 발생으로 인한 성형 불량량을 과다하게 초래할 것이라고 생각하고 있었다. 이러한 현장의 우려를 불식시키기 위하여, 약 3개월 간의 현장 데이터를 통해 <표 1>의 (a)와 같이 가공 직행틀과 제품 중량, Burr량간의 상관관계를 분석하여 이들 간에는 유의한 상관관계가 없음을 확인하였다. <표 1>의 (b)와 같이 원재료 투입량이 성형성 개선, 즉, 가공 직행틀 개선에 영향을 주지 않는다는 것을 재차 확인함으로써, 원재료 투입량 감소로 인해 기포불량이 더 발생할 수 있다는 현장의 잘못된 고정관념을 바로 잡을 수 있었다. <그림 6>은 개선 전과 개선 후의 제품 중량과 Overflow/Burr량에 대한 산포를 도시한 결과이다. <그림 3>의 개선 전과 비교하면, 평균과 산포가 상당한 수준으로 개선되었음을 알 수 있다.



<그림 5> 원재료 주입량의 산포

제품 중량 변동의 경우, 파팅라인 두께 및 분출구

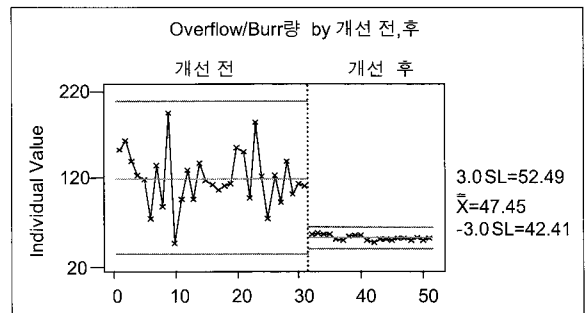
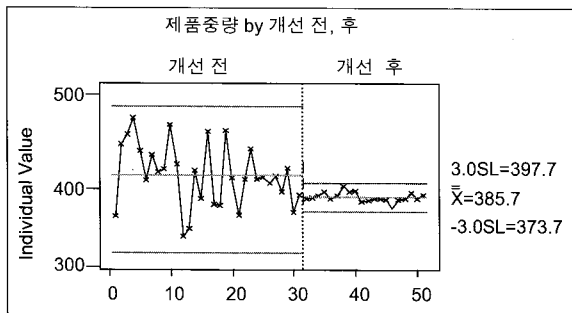
<표 1> 가공 직행률 상관 분석

(a) 제품중량, Overflow, Bufffid 파의 상관관계

(b) 원재료 투입량과의 상관관계

Correlations (Pearson)		
	제품중량	OF/Burr 량
OF/Burr량	-0.029	0.875
가공 직행률	-0.182	-0.294
	0.326	0.109

General Linear Model											
Factor	Type	Levels Values									
Machine	random	9	2	3	4	5	6	9	10	11	12
ANOVA for 가공직행률, using Adjusted SS for Tests											
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P					
원료투입량	1	451.58	74.54	74.54	1.03	0.322					
Machine	8	2162.89	2162.89	270.36	3.74	0.008					
Error	20	1447.38	1447.38	72.37							
Total	29	4061.85									



<그림 6> RIM 성형 공정의 제품중량 및 Overflow/ Burr량 개선 전 · 후 비교

4. 분석(Analyze)

분석 단계에서는 이전 단계의 원재료 수율 개선 후, 가공 직행률을 높이는 활동에 초점을 맞추었다. <그림 2>에서 알 수 있듯이 가공 직행률은 62.1%에 그쳐, 개선이 시급한 것으로 판단되었다. 앞서 언급했듯이 가공/수선 공정은 RIM 성형공정 후 발생하는 기포 불량을 수선하여 양품으로 만드는 비부가 가치적 요소이며, 가공 직행률을 높이는 활동은 가공/수선 공정의 필요성을 낮추고, 궁극적으로는 이 공정을 전체 공정에서 완전히 제거하는 것이 최종 목표라 할 수 있다. G사업부에서는 생산하고 있는 6가지 제품 모델 중 평균 가공 직행률이 낮고, 산포가 크며, 전체 생산량에서 차지하는 비율이 높은 세가지 모델을 개선 대상으로 선정하였다. 수선 공정에서 검출되는 불량 유형은 위치에 따라 금형의 원료 주입구(Gate) 갈라짐과 스포크(Spoke)부 기포의 2가지 형태로 나타나며, 그 비율도 각각 51%, 49%로 대등한 것으로 파악되었다. 아울러, 경험상 2가지 불량 형태는 근본원인이 크게 다를 바가 없을 것으로 판단되어, 데이터 수집 시 기포 불량이라는 이름으로 동일하게 취급하였다. 가공 직행률에 영향을

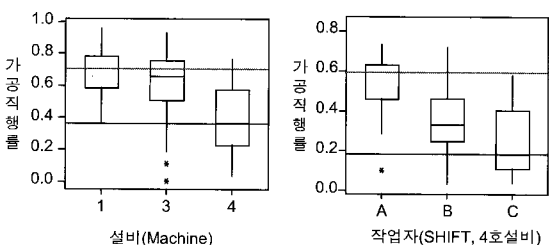
주는 원인을 파악하기 위해 4M(Men, Methods, Materials, Machines)에 입각하여 현장 검증을 실시하고, Logic Tree를 이용하여 4M별 세부 원인을 심층 분석한 결과, 33가지의 잠재적 인자를 도출할 수 있었다. 이를 토대로 16대의 생산설비(Machine) 중 3대를 임의로 선택하고, 각 설비 당 3개의 작업 교대 조(Shift)가 수행한 5개월에 걸친 작업일지 데이터를 분석하였다. <표 2>를 보면 교대 조와 월별로 직행률에 차이가 있다고 판단된다. 설비의 경우, <표 2>의 분산분석 결과를 보면 p값이 높아서 유의하지 않다고 나타나지만, <그림 7>의 상자 그림(Box Plot)은 설비 1과 설비 4간에는 확연한 차이가 있음을 보여준다. 그러므로 설비에 따라 직행률에 차이가 있다고 판단하였다. 이러한 두 가지 분석 결과의 차이는 데이터 자체에 대한 관찰 없이 통계적 분석을 수행하는 방법의 약점에서 비롯된다. 초기 공정데이터는 우선 정제(cleaning)하여 적합한 데이터베이스로 구축한 이후에 분석을 수행해야 의미 있는 분석 결과를 얻을 수 있다(박 재홍과 변 재현, 2002; Banks and Parmigiani, 1992).

이들 주요 원인에 대한 현장검증 결과를 중심으로 가공 직행률 상의 차이에 대해 세부 요인을 추적

한 결과, 1호 금형과 4호 금형 간에 Gate 단면적과 S/Runner(S/Runner) 유형에 차이와 사출기의 믹싱헤드(M/Head)의 단위 토출량과 제어압력의 불균일성에 의하여 발생하였음을 알 수 있었다. 참고적으로 원료는 원료탱크 배관 → M/Head → S/Runner → Gate의 순으로 공급되는데, 가공 직행률은 주로 원료의 반응상태와 수지층 내의 공기포집 및 발포가스의 변동에 의하여 영향을 받는다. 여기서, M/Head는 배관을 통과하여 일정 시간 혼합된 액상원료를 실린더를 통해 고압으로 금형에 주입하는 역할을 하며, 원료 혼합효율을 높이기 위한 유로인 S/Runner는 S자 또는 T자 형태로 되어 있어서 M/Head를 통해 금형 내부로 공급된 액상원료들이 적절히 혼합되도록 하는 역할을 한다. 따라서 원료 혼합과 밀접한 관련을 가지고 있는 M/Head의 토출량 및 제어압력과 S/Runner의 형태에 따라 원료의 반응상태가 달라질 수 있으며, Gate 단면적은 원료 주입속도를 좌우하므로 공기포집의 원인이 될 수 있다.

<표 2> 설비(Machine), 교대조(Shift) 차이에 따른 직행률의 분산분석 결과[교대조가 설비에 지분된 형태]

General Linear Model						
Factor	Type	Levels	Values			
SHIFT(MACHINE)	random	9	A B C A B C A B C			
MONTH	random	5	1 2 3 4 5			
MACHINE	random	3	1 3 4			
Analysis of Variance for FPY, using Adjusted SS for Tests						
Source	DF	SeqSS	AdjSS	AdjMS	F	P
MACHINE	2	0.60067	0.60067	0.30033	1.61	0.276
SHIFT(MACHINE)	6	0.82437	1.12228	0.18705	8.14	0.000
MONTH	4	4.51572	1.67742	0.41936	18.26	0.000
Error	260	5.97094	5.97094	0.02297		
Total	272	11.91169				



<그림 7> 설비 및 교대조(Shift)에 따른 직행률의 Box Plot 결과

한편, 작업자 인터뷰를 실시하고, 작업조건을 세밀하게 모니터링한 결과, 동일한 작업 표준을 사용하더라도 작업자간에 심각한 차이가 발생할 수 있음을 알 수 있었다. 이러한 차이는 특히 원료 배합비율, Pigment 압력 및 온도상의 차이를 유발시켜 기포 또는 갈라짐 불량 발생률에 변동을 일으킨다. 이론적으로는 원료의 배합비율이 이소시아네이트기(-NCO)와 히드록시기(-OH) 사이의 반응에서 단위 면적당 반응기수의 양을 조절하므로 가스 발생량에 차이가 나는 것으로 생각된다. Pigment의 압력은 공기 실린더를 사용하는 설비구조상 주입량과 상관관계가 있고, 원료온도는 초기반응 시 반응열로 작용하므로 반응속도에 영향을 미칠 것으로 추측된다. 작업자들의 의견을 감안하여 선정된 이들 요인도 가공 직행률에 영향을 주는 주요 핵심인자로 선정하였다.

이상과 같이 과거의 데이터와 현장 실무자들의 의견으로부터 나온 이러한 핵심인자들의 영향정도를 객관적으로 판단하고 최적 조건을 구하기 위한 별도의 실험을 계획하였다. 아울러, 이와는 별도로 초기불량 대응방법, 작업 관심도, 제품에 대한 지식을 높이기 위한 직무교육을 별도로 실시하여 작업자간 차이를 해소하기로 하였다.

5. 개선(Improve)

분석 단계에서 도출된 가공 직행률에 영향을 미치는 핵심인자는 <표 3>에 나타난 바와 같이 Gate 단면적, S/Runner Type, Pigment 온도 및 압력, M/H 토출량의 5가지를 제어인자(Control Factor), M/H 압력과 원료 배합비율의 2가지를 잡음인자(Noise Factor)로 삼았다. 이들 인자들을 대상으로 다구치 방법(Taguchi Method)을 이용한 최적화 실험을 실시하기로 하였는데, 제어인자의 주효과와 외에 Gate 단면적과 M/H 토출량간의 2인자 교호작용을 함께 고려하였다. 각 인자의 수준 간격은 작업성이 보장될 수 있는 범위 안에서 직행률의 차이를 최대한 검출할 수 있도록 가능한 넓게 설정하였다.

제어인자를 할당하기 위한 내측 직교표는 각 제어인자의 주효과와 필요한 교호작용 효과를 파악하기 위해 Resolution V가 보장되는 L₁₆을 채택하였다. 단, 5개의 제어 인자 중 S/Runner의 수준 수는 3개이므로 다 수준 작성법에 의해 L₁₆ 직교표의 3개 열을 하나로 묶어서 4수준 인자를 만들고, 다시 의

수준(Dummy Level) 방법을 이용하여, 3수준짜리 열을 새롭게 만들어 사용하였다(다구치, 1991). 외측 직교표의 경우, 잡음인자의 개수가 많지 않기 때문에 L₄ 직교표를 채택하였다. 결국, 전체 실험계획은 <표 4>와 같이 나타낼 수 있으며, 총 실험횟수는 16×4=64회, 각 실험조건별 시료 수는 10개로 총 640개의 시료가 소요되었다. 실험은 개선 대상의 제품 모델 중 특정 모델 1개를 택하여 한 명의 작업자가 동일한 설비를 이용하여 실시하였으며, 제품의 불량 유형은 기포와 갈라짐으로 국한하였다. 아울러, 실험 시 원료 투입량에 대해서는 측정 단계에서 설정한 표준 입력량을 준수하도록 최대한 유도하였으며, 각 실험 조건별 특성치로는 가공 직행률을 사용하였다.

<표 3> 직행률 변동의 핵심인자

요인	인자명	분류	수준수	교호작용
설비	M/H 토출량	제어인자	2	Gate 단면적
	M/H 압력	잡음인자	2	
직업방법	배합 비율	잡음인자	2	
	Pigment 압력	제어인자	2	
	Pigment 온도	제어인자	2	
금형	Gate 단면적	제어인자	2	M/H 토출량
	S/Runner Type	제어인자	2	

<표 4> 핵심인자에 대한 다구치 실험계획

실험번호(i)	Spure Runner	Gate 단면적	MH 토출량	Gate 단면적 * MH 토출량	Pigment 온도	Pigment 입력	실험번호 (j)				M/H 제어입력 배합비율
							1	2	3	4	
							1	2	1	2	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
2	1	1	2	2	2	2	2	2	2		
3	1	2	1	2	2	2	2	2	2		
4	1	2	2	1	1	1	1	1	1		
5	1	1	1	1	2	2	2	2	2		
6	1	1	2	2	2	1	1	1	1		
7	1	2	1	2	1	1	1	1	1		
8	1	2	2	1	2	2	2	2	2		
9	2	1	1	1	1	1	1	1	1		
10	2	1	2	2	2	2	2	2	2		
11	2	2	1	2	2	2	2	2	2		
12	2	2	2	1	1	1	1	1	1		
13	3	1	1	1	2	1	2	1	1		
14	3	1	2	2	1	2	1	2	2		
15	3	2	1	2	1	2	1	2	2		
16	3	2	2	1	2	1	2	1	1		

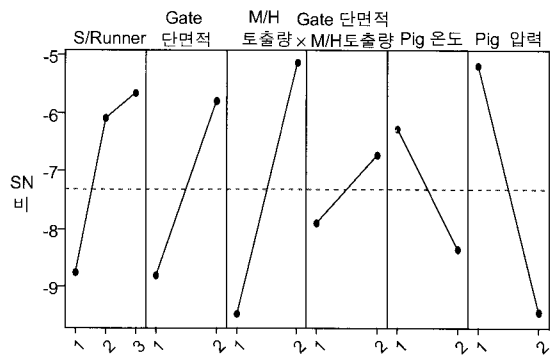
다구치는 반응치로 수율 등을 사용하지 말도록 권하고 있으나, 불량 시료마다 기포와 갈라짐의 모양과 크기, 개수가 너무 다양하며, 이에 대응하는 대

용 특성을 주어진 기간 내에 찾기가 기술적으로 매우 어려워 수율의 한 형태인 가공 직행률을 그대로 사용하였다. 가공 직행률은 망대특성이므로 아래의 식을 통해 SN비를 계산하였다(다구치, 1991). 아래 식에서 y_{ij}는 내측직교표 i번째 행과 외측직교표 j번째 열에서 구한 직행률이다.

$$SN_i = -10 \log \left\{ \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 \frac{1}{y_{ij}^2} \right\}$$

<그림 8>은 실험 데이터를 이용하여 핵심인자의 효과를 도시한 결과인데, 2인자 교호작용의 영향력은 제어 인자들의 주효과에 비하여 작게 나타남을 알 수 있다.

분산분석을 실시한 결과(<표 5>), M/H 토출량과 Pigment 압력만이 유의수준 10%에서 유의한 것으로 판명되어, 이들의 최적조건을 각각 2수준, 1수준으로 설정하였다. 아울러, Gate 단면적의 경우 <표 5>에서는 통계적으로 유의하지는 않으나, 풀링(Pooling) 후의 유의확률이 20%미만이며 수준 차에 의한 가공 직행률 차이도 3%이상이므로, 중요한 요인으로 판단하고 2수준을 최적조건으로 설정하였다. 나머지 2개 인자의 수준 조정은 별도의 추가적인 비용이나 기술적 어려움을 초래하지 않으므로, <그림 8>의 결과를 참조하여 SN비를 크게 하는 방향으로 설정하였다.



<그림 8> 핵심인자에 대한 효과 도시 결과

최적조건 하에서 SN비와 가공 직행률의 예측치는 각각 -1.488, 84.2%로 산출되었다. 예측 결과의 재현성을 확인하기 위하여 <표 6>과 같이 핵심인자의 최적조건 하에서 잡음인자인 M/H압력과 원료배합비율을 변화시켜 Run당 10개의 시료로 확인실험

을 실시한 결과, 80%의 평균 가공 직행률을 얻을 수 있었다. 따라서 재현성이 확보되었다고 판단하고 해당 최적조건을 표준화하여 양산에 적용하기로 하였다.

<표 5> 핵심인자에 대한 분산분석 결과

General Linear Model			
Factor	Type	Levels	Values
S/Runner	fixed	3	1 2 3
Gate 단면적	fixed	2	1 2
M/H 토출량	fixed	2	1 2
Gate 단면적 * M/H 토출량	fixed	2	1 2
Pig 온도	fixed	2	1 2
Pig 압력	fixed	2	1 2

Analysis of Variance for SN 비, using Adjusted SS for Tests						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
S/Runner	2	33.16	33.16	16.58	0.80	0.482
Gate 단면적	1	36.21	36.21	36.21	1.75	0.223
M/H 토출량	1	75.62	75.62	75.62	3.65	0.093
Gate 단면적 * M/H 토출량	1	5.50	5.50	5.50	0.27	0.620
Pig 온도	1	17.00	17.00	17.00	0.82	0.392
Pig 압력	1	73.11	73.11	73.11	3.53	0.097
Error	8	165.90	165.90	20.74		
Total	15	406.50				

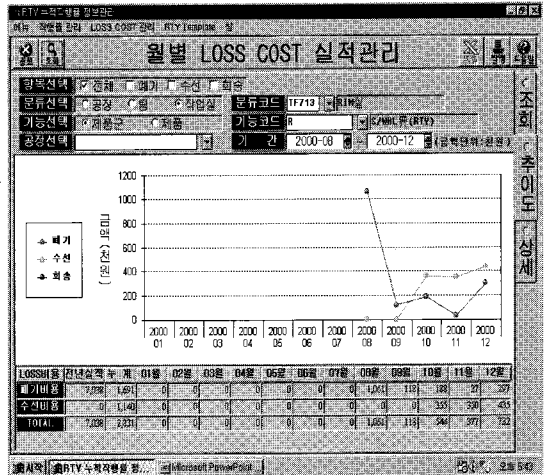
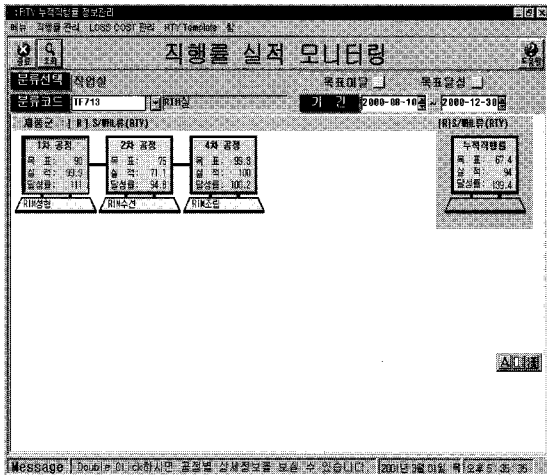
<표 6> 재현성 실험 결과

RUN	S/R	Gate 단면적	M/H 토출량	Pig 온도	Pig 압력	M/H 압력	배합비	지행율
1	3수준	2수준	2수준	1수준	1수준	1수준	1수준	0.8
2수준						1수준	0.7	
1수준						2수준	0.9	
2수준						2수준	0.8	

6. 관리(Control)

관리 단계에서는 개선 단계에서 도출된 해결안을 파일럿(Pilot) 실험을 통해 직접 현장에 적용하여 개선 효과가 현장에서도 유지되는가를 확인하고, 프로젝트를 통하여 개선된 효과를 지속적으로 유지하기 위해서 필요한 조치를 사전에 취하며, 이를 공정관리시스템에 반영하고, 개선 성과를 타 공정 또는 제품에 확산하기 위한 노력을 하게 된다.

본 사례의 경우에도 개선안을 전체 제조라인에 걸쳐 시범 적용하기 위하여 총 3일간의 파일럿을 실시하고 개선결과의 양산 적용성을 확인하였다. 이 때 생산된 제품은 총 900개이며, 원재료 수율은 94.3%로서 개선 전 대비 14.2%, 가공 직행률은 80.0%로 개선 전에 비하여 18.0%가 향상됨을 확인할 수 있었다. 즉, 개선 단계에서 도출된 개선안의 효과가 현장에서도 충분히 발휘됨을 입증할 수 있었다. 따라서 지속적으로 개선 성과를 유지하기 위해 주요 개선사항을 설계 및 작업 표준에 반영하고, 필요한 관리항목과 관리기준에 관한 양식을 만들어 담당자로 하여금 일정 주기마다 점검하도록 하였다. 아울러, 전체 과정을 통해 축적된 Best Practice를 자동차용 Steering Wheel의 타 제품 모델에 확산 적용하기 위해서, 생산 수량이 많은 5개의 제품 모델에 3개월간 우선 적용하여 그 경과를 관찰한 후 전 모델에 적용하는 단계별 접근을 시도하였다. 이러한 성과 확산 노력의 결과로서 전체 누적수율이 개선 전 49.6%에서 개선 후 75.3%로 대폭 증가하는 성과를 거두었



<그림 9> 누적수율 모니터링 시스템

다. 이와 더불어, 금형 세척시간을 약 56% 줄임으로써 시간당 생산량을 15.3개에서 약 11% 향상시킨 17.0개로 높이는 공정효율의 향상도 피하였다. 이러한 누적수율 및 공정효율 개선을 통해 G사업부는 약 12.0억원의 연간 실패 비용을 절감할 수 있었으며, 지속적인 누적수율 관리 및 개선 활동 장려를 위해 <그림 9>와 같이 별도의 모니터링시스템을 구축하여 운영하고 있다.

7. 결 론

본 연구에서는 6시그마 방법을 이용하여 자동차 용 Steering Wheel 제조공정의 비부가가치 요소인 숨겨진 공장을 제거함으로써 누적수율을 향상시킨 사례를 소개하였다. 먼저, 정의 단계에서는 직행틀을 이용하여 전체 공정의 누적수율을 산출하고, 숨겨진 공장으로 인해 발생하는 손실을 체계적인 과정을 통해 연간 실패 비용으로 환산함으로써 이후 개선활동을 구체적인 경영성공과 쉽게 연계할 수 있었다. 현장 실사를 통한 즉 개선(Quick Fix)의 방법과 결과는 측정 단계에서 제시하였다. 작업자의 표준 미 준수가 원재료 수율 저하의 직접적인 원인이었음을 밝히고, 표준 입력량 재설정 등을 통해 원재료 수율을 획기적으로 개선하였으며, 이 과정에서 원재료 투입량과 가공 직행틀 간에는 유의한 상관관계가 없다는 것을 입증함으로써 현장의 왜곡된 시각을 바로 잡을 수 있었다. 분석 단계에서는 공정데이터를 정제하여 분석하는 것의 필요성에 대하여 설명하였고, 4M에 근거한 분석을 통해 기포 불량률의 원인을 Gate단면적, S/Runner Type, Pigment 온도 및 압력, M/H 단위 토출량으로 정리하였다. 개선 및 관리 단계에서 잡음 인자를 반영한 다구치 실험을 통해 최적조건을 찾고 이를 현장에 적용함으로써 원재료 수율과 가공 직행틀을 종전 대비 각각 14.3%, 18.0% 정도 개선하고 연간 약 12.0억원의 실패비용을 절감할 수 있었다. 아울러, 본 사례를 통해 정립

된 누적수율 개선의 방법론을 타 부품에 확산/전파하였는데, 특히 범퍼(Bumper) 제조라인의 경우에는 도장공정 등의 혁신을 통해 누적수율을 79.6%에서 87.7%까지 대폭 향상시키는 성과를 거둘 수 있었다. 본 논문은 제조공정을 대상으로 6시그마 프로젝트를 수행하고자 하는 현장의 엔지니어들에게 도움이 될 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

- [1] 다구치(1991), 「품질공학 강좌 4 : 품질설계를 위한 실험계획법」, 한국공업표준협회.
- [2] 박재홍, 변재현(2002), “데이터 정제와 그래프 분석을 이용한 대용량 공정데이터 분석 방법”, 「품질경영학회지」, 30권, 2호, pp. 72-85.
- [3] Banks, D. L. and Parmigiani, G.(1992), “Pre-Analysis of Superlarge Industrial Data Sets”, *Journal of Quality Technology*, Vol. 24, pp. 115-129.
- [4] Brefogle III, F. W.(2003), *Implementing Six Sigma : Smarter Solutions Using Statistical Methods*, 2nd ed., Wiley, New York.
- [5] Harry, M. and Schroeder, R.(2000), *Six Sigma : The Breakthrough Management Strategy Revolutionizing the World's Top Corporations*, Doubleday, New York.
- [6] Oertel, G.(1993), *Polyurethane Handbook : Chemistry-Raw Materials-Processing-Applications-Properties*, Hanser.
- [7] Ransall, D. and Lee, S.(2002), *The Polyurethanes Handbook*, Wiley, New York.
- [8] Shina, S. G.(2002), *Six Sigma for Electronics Design and Manufacturing*, McGraw-Hill.
- [9] Snee, R. D. and Hoerl, R. W.(2003), *Leading Six Sigma*, Prentice-Hall.