

DEA와 AHP 모형을 이용한 제조공정들 간 효율성 평가

김준범¹ · 김우제^{2†} · 조남욱²

¹서울산업대학교 NIT공학과 / ²서울산업대학교 산업정보시스템공학과

An Efficiency Evaluation among Manufacturing Processes using Hybrid DEA/AHP Model

Jun Beom Kim¹ · Woo Je Kim² · Nam Wook Cho²

¹Department of Nano Information Technology Engineering, Seoul National University of Technology

²Department of Industrial and Information Systems Engineering, Seoul National University of Technology

Efficiency evaluation methods of manufacturing processes have relied on absolute measures such as defective rate and throughput per person, ignoring various process characteristics. To overcome the limitation, we propose an evaluation model which reflects characteristics of each process. It is composed of three measures : utilization, performance, and improvement. The suggested model utilizes a combination of DEA and AHP methods. The proposed method has been applied to efficiency evaluation of cellular phone case manufacturing processes.

Keyword: AHP, DEA, B/C ratio, efficiency evaluation, manufacturing process

1. 서론

중국의 성장, 인건비 상승, 정보시스템의 발전 등과 같은 대내외적인 환경의 급격한 변화로 인하여, 국내 제조산업은 큰 위협을 받고 있다. 전통적인 제조 생산방식만으로는 국내에서 제조기업으로 성공할 수 없게 되었다. 성공적인 기업으로 성장하기 위해서는 자사 공정의 효율성을 평가하여 생산성향상 및 생산방식 변경으로 인하여 변화를 피할 수밖에 없다. 하지만 각 공정마다 고유의 특성을 보유하고 있어, 서로 다른 공정을 평가하기에는 한계점이 있다. 그러하기 때문에 본 논문에서는 서로 다른 공정의 효율성을 평가하는 방법을 개발하고 휴대폰 케이스 제조공정 사례로서 검증하고자 한다.

일반적인 휴대폰 케이스 제조공정은 <그림 1>과 같다.

개발과정을 통해 PC(Polycarbonate)원료를 이용해 사출을 하

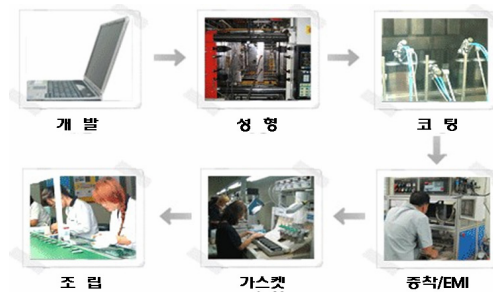


그림 1. 휴대폰 케이스 제조공정

고, 제품에 UV코팅을 한 후, 휴대폰으로부터 전자파를 차단하기 위해 증착/EMI 공정을 거친다. 그 후 사출 내부의 접지와 전자기로 간의 전기적 충동을 차단하는 역할을 하는 가스켓 공정을 거친 후, 최종적으로 부자재를 조립하여 완성품인 휴대폰 케이스가 제조되는 것이다.

†연락처 : 김우제 교수, 139-743 서울 노원구 공릉2동 172번지 서울산업대학교 산업정보시스템공학과, Fax : 02-974-2849,

E-mail : wjkim@snut.ac.kr

투고일(2008년 03월 04일), 심사일(1차 : 2008년 03월 28일), 게재확정일(2008년 06월 26일).

증착/EMI의 역할은 같으나 작업방식에서 차이가 있다. EMI는 스프레이 방식이며, 증착은 진공방식인데, 제품의 사양에 따라 둘 중 하나의 공정을 거치게 된다.

본 논문에서는, <그림 1>의 휴대폰 케이스 제조공정에서 개발과정을 제외한 사출부터 조립까지의 총 6개의 제조공정의 효율성을 비교/평가해 보고자 한다.

기존의 일반적인 평가모형은 각 대안의 성격 혹은 특성이 유사해야지만 비교/평가가 가능하다. 그러나 본 논문에서 다루는 휴대폰 케이스 제조공정들은 각 공정마다 고유의 특성이 존재한다. 예를 들면, 비교대상 공정이 인력에 의존하느냐 기계에 의존하느냐에 따라 각 공정에 투입되는 종업원 수는 다를 수 있으며, 고가의 재공품을 생산하는 공정과 저가의 재공품을 생산하는 공정을 단순히 매출액으로 비교하기에는 무리가 있다.

따라서 본 논문에서는 고유 특성이 다른 제조공정을 동일한 기준으로 평가할 수 있는 평가항목을 도출하고 이를 DEA(Data Envelopment Analysis)와 AHP(Analytic Hierarchy Process)를 적용한 평가모형을 적용하고자 한다.

본 논문에서는 제조공정들 간 효율성 평가를 위해 Kim and Cho(2005), Lee *et al.*(2006)를 참조하여 전통적인 DEA 모형인 CCR(Charnes, Cooper and Rhodes)모형의 상대적 효율성평가 뿐만 아니라 AHP/DEA-AR(Assurance Region)모형과 AHP-B/C(Benefit/Cost) Ratio 모형을 적용하여 효율성 측정치의 순위를 비교 분석하였다.

DEA와 AHP 모형의 적용방안 단계는 <그림 2>와 같다. 가장 먼저, 전문가 및 참고문헌을 토대로 AHP와 DEA 변수를 선정하였으며, AHP 모델링을 만들어 전문가를 대상으로 AHP 설문 조사를 실시한다.



그림 2. 공정 효율성평가 모형 적용방안

다음 단계에서는 아래에 제시된 세 가지 방법론을 활용하여 각 공정의 효율성을 비교/평가하였다.

첫 번째는 AHP-B/C Ratio 방법론으로 AHP를 통하여 도출된 변수들의 가중치를 이용하여 공정 별 비용대비 효과의 효율성을 평가하는 방법론이다.

두 번째는 일반적인 DEA 모형인 DEA-CCR 모형을 적용하여 공정 별 입력요소 대비 출력요소의 효율성을 평가하는 방법론이다.

세 번째 방법론은 DEA-AR 모형으로서, AHP를 통해 도출된 가중치에 제약을 줌으로써 DEA-CCR 모형에서 구할 수 없던, DMU(Decision Making Unit) 간의 우선순위를 알아보하고자 한다.

위에서 제시한 세 가지 방법론을 이용하여, 공정 별 효율성을 보다 효과적이고 논리적인 방법으로 비교/평가하였다.

2. 관련 연구

DEA의 특성상 DMU 간의 특성이 같아야지만 비교/평가가 가능하기 때문에 DMU 간의 특성이 서로 다른 경우에는 DEA를 이용한 효율성 평가가 매우 어렵다. 따라서 <표 1>에서와 같

표 1. 선행연구에 선정된 투입 변수와 산출변수

연구자	연 도	연구제목	투입변수	산출변수
윤문규 김재균	2006	200대 상장제조기업의 효율성 분석에 관한 연구 -DEA 기법을 활용하여-	<ul style="list-style-type: none"> • 종업원 수 • 총 자산 • 자본 	<ul style="list-style-type: none"> • 매출액 • 당기 순이익 • 시장가치 • 총자산 이익률 • 주당 순이익
문승	2003	세계 자동차 주요기업의 효율성 분석	<ul style="list-style-type: none"> • 자본 • 종업원 수 • 고정자산 	<ul style="list-style-type: none"> • 당기 순이익 • 매출액
홍봉영	2003	DEA를 이용한 국내 섬유산업의 효율성 및 생산성 변화 분석	<ul style="list-style-type: none"> • 종업원 수 • 인건비 • 총자산 • 총비용 	<ul style="list-style-type: none"> • 매출액
송동섭 김재준	2000	중소제조업의 경영 효율성 분석 : 화합물 및 화학제품 제조업을 중심으로	<ul style="list-style-type: none"> • 종업원 수 • 고정자산 • 원재료비 	<ul style="list-style-type: none"> • 매출액 • 경상이익 • 주가
Chardr.P Cooper.W.W. Li.Shangling Rahman.Atiqur	1998	캐나다 섬유기업들의 효율성 분석	<ul style="list-style-type: none"> • 종업원 수 • 10년간 연평균 투자액 	<ul style="list-style-type: none"> • 매출액

이, DEA를 이용하여 제조과정 간의 효율성을 평가한 연구는 현재 거의 없으며 주로 제조기업 및 제조업의 효율성 평가가 연구되었다(Park *et al.*, 2007).

Yoon and Kim(2006)에서는 상장제조기업의 효율성 측정을 통하여 기업의 특성을 파악하고자 하였으며, DEA 분석을 통하여 해당 기업의 시장성, 수익성 분석을 추론할 수 있다는 장점이 있었다. 반면, DMU들 간의 순위를 결정하지 못하며, 절대적인 효율성을 제시하지 못했다는 한계점이 있다.

Hong(2003)에서는 DEA를 이용하여 금융위기 직후의 섬유산업의 효율성을 분석하였는데, 기술진보에 의한 효과가 기술효율성과 규모효율성의 하락을 상쇄하지 못했기 때문에 생산성의 하락을 초래하여 금융위기 당시의 생산성에 도달하지 못했다는 결과를 추론할 수 있었으며, 한계점으로는 DMU 평가 시 기존 섬유회사들이 사업다각화를 위해서 섬유이외의 다른 업종에 진출하거나 다른 공정을 DMU에 포함했다는 데 있다.

그 밖에도 <표 1>에서 제시된 연구들을 전체적으로 보면 제조 기업이나 제조업 분야의 현재 효율성을 평가하여, 시장성 및 수익성 분석이 가능하다는 큰 장점을 갖은 반면, DMU 간의 순위를 결정하지 못하였으며, DMU 간의 고유한 특성을 고려하지 못했다는 단점 또한 갖고 있다. 그 밖에도 <표 1>에서 보는 바와 같이, DMU 간의 특성이 같은 분야에 한해서만 DEA를 활용하여 효율성을 구할 수 있었다.

투입변수의 경우, 공통적으로 종업원 수, 총 자산이 쓰였으며, 산출변수로는 매출액이 사용되었다.

본 논문에서는 특성이 서로 다른 DMU 간의 효율성을 비교/평가하기 위하여 DMU 간의 특성을 반영한 Utilization(사용효율), Performance(달성률), Improvement(향상률) 세 가지 평가지표를 도입하여 AHP 모형을 적용하였다. 또한, DEA-CCR 모형에 평가지표를 도입한 AHP를 통해 도출된 가중치를 이용하여 DEA-AR 모형을 적용하였으며, B/C Ratio에 의한 AHP 분석모형을 적용하였다. 세 가지 방법론에 의하여 서로 다른 DMU 간의 효율성 평가를 실시하여 결과 값을 비교/평가하였다.

3. 평가방법론의 이론적 배경

3.1 AHP(Analytic Hierarchy Process)

1970년대 초반 T. Saaty에 의하여 개발된 계층분석적 의사결정(AHP)은 의사결정의 계층구조를 구성하고 있는 요소간의 쌍대비교에 의한 판단을 통하여 평가자의 지식, 경험 및 직관을 포착하고자 하는 하나의 새로운 의사결정방법론이다. 현재 에너지/자원, 교통, 입지 등을 비롯한 경제문제에서부터 재무/금융/회계/마케팅 등의 경영문제, 정부, 국방 등의 정치문제, 교육, 안전, 도시, 환경 등의 사회문제, R&D/신제품 개발, 생산/제조, 품질 등의 기술문제에 이르기까지 인간이 고민하고 해결하고자 하는 문제에는 어김없이 AHP가 활용되고 있다(Cho *et al.*, 2003).

AHP는 목표들 사이의 중요도(Weight)를 계층적으로 나누어 파악함으로써 각 대안들의 중요도를 산정하는 기법이기도 하다. AHP의 수행과정은 다음과 같다.

- ① 의사결정 문제를 계층 구조화
- ② 평가기준의 이원비교
- ③ 중요도 측정
- ④ 논리적 일관성의 검토
- ⑤ 대체안의 전반적인 우선순위 산출

3.2 DEA(Data Envelopment Analysis)

Charnes, Cooper and Rhodes(1978)에 의해 비영리적 목적으로 개발된 방법으로서, 복수의 투입물과 산출물이 있어 비교가 어려울 때, 조직단위의 상대적 성과를 측정하기 위한 선형계획법으로, 전통적으로 시스템의 효율성을 측정하기 위하여 사용되었다. DEA는 의사결정단위의 동질집단의 상대적 효율성을 측정하는 다요인 생산성 분석 모형으로서, 다중 투입물과 다중 산출물 요인에 의한 효율성은 다음과 같은 식에 의해 구할 수 있다.

$$\text{효율성} = \frac{\text{가중치가 부여된 산출물들의 합}}{\text{가중치가 부여된 투입물들의 합}}$$

m개의 투입물과 s개의 산출물을 가지는 n개의 의사결정 단위가 있다고 가정할 때, 의사결정단위 p의 상대적 효율성은 Charnes, Cooper and Rhodes(1978)가 제안한 CCR(Charnes, Cooper & Rhodes) 모형에 의해 구할 수 있다. 비선형계획모형식 (1)은 선형계획모형식 (2)로 변환될 수 있다.

이 변환은 식 (1)에서 효율성 비율의 분모를 1로 하여 제약식에 위치시킴으로써 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Max} \quad E_k &= \frac{\sum_{r=1}^s Y_{kr} U_{kr}}{\sum_{i=1}^m X_{ki} V_{ki}} & (1) \\ \text{Subject to} \quad E_{kj} &= \frac{\sum_{r=1}^s Y_{jr} U_{kr}}{\sum_{i=1}^m X_{ji} V_{ki}} \leq 1 \text{ for each unit } j \\ Y_{ki} &\geq \varepsilon, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ U_{kr} &\geq \varepsilon, \quad r = 1, 2, \dots, s \end{aligned}$$

E_k = DMU의 효율성

U_{kr} = DMU_k의 산출물 r에 대한 가중치($r = 1, 2, \dots, s$)

Y_{kr} = DMU_k의 산출물 r의 값($r = 1, 2, \dots, s$)

V_{ki} = DMU_k의 투입요소 i에 대한 가중치($i = 1, 2, \dots, m$)

X_{ki} = DMU_k의 투입요소 i 의 값($i = 1, 2, \dots, m$)
 ε = 매우 작은 수, $0 \leq \varepsilon_k \leq 1$
 $V_{ki} > 0, U_{kr} > 0$ & $E_k = 1$ 이면 효율적, $E_k < 1$ 이면 비효율

$$\begin{aligned} \text{Max} \quad & E_k = \sum_{r=1}^s Y_{kr} U_{kr} \\ \text{Subject to} \quad & E_{kj} = \sum_{i=1}^m X_{ki} V_{ki} = 1 \\ & \sum_{r=1}^s Y_{jr} U_{kr} - \sum_{i=1}^m X_{ki} V_{ki} \leq 0 \quad \forall j \\ & Y_{ki} \geq \varepsilon, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & U_{kr} \geq \varepsilon, \quad r = 1, 2, \dots, s \end{aligned} \quad (2)$$

E_k = DMU의 효율성
 U_{kr} = DMU_k의 산출물 r 에 대한 가중치($r = 1, 2, \dots, s$)
 Y_{kr} = DMU_k의 산출물 r 의 값($r = 1, 2, \dots, s$)
 V_{ki} = DMU_k의 투입요소 i 에 대한 가중치($i = 1, 2, \dots, m$)
 X_{ki} = DMU_k의 투입요소 i 의 값($i = 1, 2, \dots, m$)
 ε = 매우 작은 수, $0 \leq \varepsilon_k \leq 1$
 $V_{ki} > 0, U_{kr} > 0$ & $E_k = 1$ 이면 효율적, $E_k < 1$ 이면 비효율

3.3 가중치 제약모형 : DEA-AR 모형

DEA-AR(Assurance Region) 모형은 가중치의 범위를 특별 영역으로 제한하는 방법으로 Thompson *et al.*(1986)에 의해 제안되었다.

전통적인 DEA 모형인 CCR 모형은 효율성 있는 의사결정 단위들에 대한 순위를 결정하지 못한다. 이 모형에서는 일부 비효율적인 의사결정단위가 효율적인 의사결정단위보다 더 나은 상황이 발생할 수도 있다.

이는 가중치에 어떤 제약조건을 주지 않기 때문이다. 그러할 경우, 투입물과 산출물에 대한 부적절한 가중치 부여로 인해 상대적으로 높은 효율성수치를 제공할 수 있다. 이 문제는 가중치에 범위나 유연성을 부여하여 해결할 수 있다.

일반적으로 DEA-AR에서는 다음과 같은 형태로 가중치 값에 제약을 가한다.

$$\begin{aligned} \alpha_i^L \leq v_i / v_1 \leq \alpha_i^U \quad (i = 2, \dots, m) \\ \beta_r^L \leq u_r / u_1 \leq \beta_r^U \quad (r = 2, \dots, s) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 α_i^L 과 α_i^U 는 입력요소에 관한 가중치 비율 v_i / v_1 의 상한과 하한을 의미하고, β_r^L 과 β_r^U 는 출력요소에 관한 가중치 비율 u_r / u_1 의 상한과 하한을 의미한다. 따라서 DEA-AR 모형은 기존의 DEA 모형인 식 (2)에 제약식으로 식 (3)을 첨가한 다음과 같은 형태로 모형화 할 수 있다.

$$\text{Max} \quad E_k = \sum_{r=1}^s Y_{kr} U_{kr} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{Subject too} \quad & E_{kj} = \sum_{i=1}^m X_{ki} V_{ki} = 1 \\ & \sum_{r=1}^s Y_{jr} U_{kr} - \sum_{i=1}^m X_{ki} V_{ki} \leq 0 \quad \forall j \\ & \alpha_i^L \leq v_i / v_1 \leq \alpha_i^U \quad (i = 2, \dots, m) \\ & \beta_r^L \leq u_r / u_1 \leq \beta_r^U \quad (r = 2, \dots, s) \end{aligned}$$

3.4 AHP와 DEA-AR 모형과의 통합

AHP와 DEA-AR를 통합하는 방법론은 우선 효율성 평가 요인들을 정의함으로써 시작한다.

이 요인들은 각 공정을 평가하게 될 측정치 들이다. 이 요인들은 각 공정의 효율성 평가에서 중요시하는 요인들이 포함되어야 한다. 이 요인들이 결정된 다음, 의사결정자는 공정 목표와 다른 요인들에 대한 상대적 중요도를 AHP를 사용하여 결정한다. 이 평가는 비율 척도를 사용하여 다수의 의사결정자들의 주관적 평가에 의해서 수행된다.

각 의사결정자들로부터의 순위 정보는 DEA-AR 모형의 제약식에서 각 요인에 대한 중요도의 상한값과 하한값을 정하는 데 사용된다.

각 모형과 관련된 투입물과 산출물 수치를 각 가중치의 상/하한값을 가지는 DEA-AR 모형에 대입하여 DEA-AR 모형을 계산하면, 대안들, 즉 각 공정들의 우선순위를 알려주는 양수화된 효율성 수치를 구할 수 있다.

4. 공정의 효율성 평가지표

휴대폰 케이스 제조공정의 효율성 평가를 위해서는 각 공정의 공통적인 평가지표를 찾아야 한다. 각 공정마다 고유의 특성이 존재하고 있어, 근무인원 수/재료비/인건비/자본/매출액 등과 같은 변수는 공정마다 특성에 따라 다른 범위의 값을 가질 수 있기 때문에 각 제조공정을 상대비교하기에는 평가지표로 부적절하다.

<표 2>는 공정 별 존재하고 있는 고유특성을 정리한 것이다. 예를 들어, 근무인원 수의 경우, 사출은 사출설비 수와 비례하여 타 공정에 비해 비교적 많은 수의 인원이 필요하며, 재료비의 경우는 총 생산수량에 비례하기 때문에 근무인원 수나 총 생산수량에 의해 제조공정을 공정을 평가하는 것은 무리가 있다. 또한 총 생산 수나 불량률의 경우도 공정 고유의 특성 때문에 어느 공정에서는 타 공정에 비해 생산 수나 불량률이 현저히 작을 수도 있고 클 수도 있다. 따라서 이러한 정량적인 데이터에 의해서는 서로 다른 공정 간의 효율을 비교할 수 없게 된다.

이러한 이유로 본 논문에서는 가용능력 대비 현재수준을 평

표 2. 제조공정 별 고유특성

공정	고유특성	비고
사출	사출설비와 비례하여 타 공정에 비해 비교적 많은 인원 수가 필요함	EMI대비 3배 많음
도장	불량제품에 있어 타 공정에 비해 재 작업을 할 수 없기 때문에 불량률이 상대적으로 매우 높음	가스켓 대비 10배 높음
증착	원재료가 매우 비싸서, 타 공정에 비해 재료비가 많이 비쌈	사출대비 3배 비쌈
EMI	공정 Cycle Time이 타 공정에 비해 짧아서 생산량이 매우 많음	조립대비 2배 짧음
가스켓	불량제품에 있어 재 작업이 가능하기 때문에 상대적으로 불량률이 매우 낮음	도장대비 10배 낮음
조립	컨베이어 생산을 하기 때문에 타 공정에 비해 작업효율이 매우 높음	도장대비 1.5배 높음

가할 수 있는 사용효율(Utilization), 목표대비 실적을 평가하는 달성률(Performance), 전월대비 당월의 향상여부를 알려주는 향상률(Improvement)과 같이 모든 지표를 비율로 표현하여 공정 간 비교/평가가 가능하도록 하는 평가지표를 설계하였다.

공정효율성 평가지표는 <그림 3>과 같다.

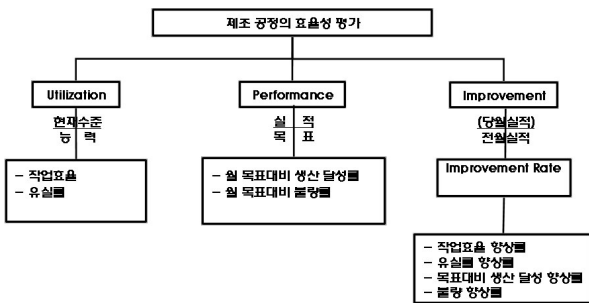


그림 3. 공정효율성 평가 지표

4.1 사용효율(Utilization)

첫째, 사용효율(Utilization)측면으로서 가용능력(capacity) 대비 현재 수준을 평가하는 변수이며 다음과 같이 정의된다.

$$\text{사용효율} = \frac{\text{현재수준} \times 100}{\text{가용능력(Capacity)}}$$

사용효율의 세부 평가지표로는 작업효율과 유실률이 있으며, 작업효율은 작업자의 효율성을 평가하는 작업공수효율과 설비를 평가하는 설비종합효율로 나뉜다. 본 논문에서 말하는 공수란 사람이나 기계가 할 수 있는 또한 한 일의 양을 시간으로 표시하는 수치를 뜻한다(Kim, 2003).

휴대폰케이스 제조공정의 경우, 조립을 제외한 나머지 공정에서는 설비의 의존성이 매우 커서 본 논문에서는 공정의 작업효율성 산출 시 작업공수효율과 설비종합효율 지표를 동등한 위치에서 함께 사용하였다. 단, 조립은 설비의 사용이 매우 적어, 설비종합효율을 평가하기가 매우 어렵기 때문에 작업공수효율로만 평가하도록 한다.

$$\text{작업효율} = 0.5 \times \text{작업공수효율} + 0.5 \times \text{설비종합효율}$$

작업자의 효율성을 평가하는 작업공수효율은 다음과 같다 (Kim, 2003).

$$\frac{\sum(\text{기종별 표준시간} \times \text{기종별 생산수}) \times 100}{\text{재적인원} \times (\text{총 근무시간} - \text{휴식시간}) + \text{추가공수} + \text{휴업공수}}$$

여기서 추가공수란 취업공수 이외의 추가로 작업한 공수(잔업, 특근, 지원 받음 등)를 뜻하며, 추가공수는 [해당인원 × 해당시간]을 말한다.

휴업공수는 재적인원 중 실제 작업에 투입되지 않은 인원에 대한 공수로서, 즉 결근, 휴가, 출장, 조퇴, 지원 등과 같다.

공정설비의 효율성을 평가하는 설비종합효율의 평가방법은 다음과 같다(Kim, 2003).

$$\text{설비종합효율} = \frac{\text{생산수} \times \text{이론 Cycle Time} \times 100}{\text{부하시간(일 24시간 기준)}}$$

DEA 분석 시, 투입요소로 분류되는 유실률의 경우 역시 작업효율과 마찬가지로 사람과 설비의 손실시간을 효율적으로 평가하기 위하여 유실공수율과 고장정지율을 동등하게 평가하도록 하여 다음과 같은 평가방법을 사용하였다.

$$\text{유실률} = 0.5 \times \text{유실공수율} + 0.5 \times \text{고장정지율}$$

작업자의 손실시간을 평가하는 유실공수율은 다음과 같다 (Kim, 2003).

$$\frac{\text{유실공수} \times 100}{\text{재적인원} \times (\text{총 근무시간} - \text{휴식 시간}) + \text{추가공수} + \text{휴업공수}}$$

유실공수란 근무시간 중 직접 생산활동에 사용되지 못한 시간에 대한 공수를 뜻하며, 회의, 교육, 훈련, 자재품질, 기계고장 등이 이에 속한다.

공정설비의 경우, 설비의 손실시간을 효율적으로 평가하기 위하여 생산성지표에서 작업자의 유실공수율과 동등한 지표로 쓰이는 고장정지율을 지표로 삼는다.

고장정지율은 부하시간 대비 5분 이상 설비가 규정된 기능을 상실하여 정지한 상태를 비율로서 평가하는 것을 말한다 (Kim, 2003).

$$\text{고장정지율} = \frac{\text{고장정지시간} \times 100}{\text{부하시간(일 24시간 기준)}}$$

4.2 달성률(Performance)

달성률(Performance)은 목표 대비 실적을 나타내는 것으로 성능을 평가하는 변수로 일반적으로 다음과 같이 표현된다.

$$\text{달성률} = \frac{\text{실적} \times 100}{\text{목표}}$$

Performance의 세부 평가지표로는 월 목표대비 생산 달성률과 월 목표대비 불량률이 있으며, 월 목표대비 생산 달성률은 다음과 같다.

$$\frac{\text{당월 공정 별 총 생산량} \times 100}{\text{당월 공정 별 생산 목표량}}$$

당월 공정 별 생산 목표량의 경우, 각 공정마다 생산능력과 주문량이 다르기 때문에 각 공정의 생산능력을 고려함과 동시에 영업파트에서 주문량의 정보를 얻어 당월의 공정 별 생산 목표량을 결정한다.

월 목표대비 불량률 역시, 각 공정마다 공정 특성 때문에, 불량률이 다르기 때문에 비교/평가를 위하여 공정마다 과거 데이터 및 벤치마킹을 통한 목표 불량률을 설정하고, 목표치 대비 실 불량률의 비율 값을 구하여, 공정 간의 비교/평가가 가능하도록 한다.

$$\frac{\text{당월 공정 별 실 불량률} \times 100}{\text{당월 공정 별 목표 불량률}}$$

4.3 향상률(Improvement)

향상률(Improvement)은 전월 실적 대비 당월실적의 향상률을 평가하는 변수이다.

$$\text{향상률} = \frac{\text{당월실적} \times 100}{\text{전월실적}}$$

향상률의 경우, 앞에서 언급된 사용효율과 달성률 측면에서의 평가지표에 대한 향상률을 집계하여 산정한다.

즉, 작업공수효율의 향상률, 유실률의 향상률, 월 목표대비

표 3. 공정 효율성 평가변수 및 세부지표

평가 변수	세부지표
$\text{사용효율} = \frac{\text{현재수준} \times 100}{\text{가용능력(Capacity)}}$	$\text{작업효율} = 0.5 \times \text{작업공수효율} + 0.5 \times \text{설비종합효율}$
	$\text{작업공수효율} = \frac{\sum(\text{기종별 표준시간} \times \text{기종별 생산수}) \times 100}{\text{재적인원} \times (\text{총 근무시간} - \text{휴식 시간}) + \text{추가공수} + \text{휴업공수}}$
	$\text{설비종합효율} = \frac{\text{생산수} \times \text{이론 Cycle Time} \times 100}{\text{부하시간(일 24시간 기준)}}$
	$\text{유실률} = 0.5 \times \text{유실공수율} + 0.5 \times \text{고장정지율}$
	$\text{유실공수율} = \frac{\text{유실공수} \times 100}{\text{재적인원} \times (\text{총 근무시간} - \text{휴식시간}) + \text{추가공수} + \text{휴업공수}}$
	$\text{고장정지율} = \frac{\text{고장정지시간} \times 100}{\text{부하시간(일 24시간 기준)}}$
$\text{달성률} = \frac{\text{실적} \times 100}{\text{목표}}$	$\text{월 목표대비 생산달성률} = \frac{\text{당월 공정 별 총 생산량} \times 100}{\text{당월 공정 별 생산 목표량}}$
	$\text{월 목표대비 불량률} = \frac{\text{당월 공정별 실 불량률} \times 100}{\text{당월 공정 별 목표 불량률}}$
$\text{향상률} = \frac{\text{당월실적} \times 100}{\text{전월실적}}$	$\text{작업효율 향상률} = \frac{\text{당월 작업효율} \times 100}{\text{전월 작업효율}}$
	$\text{유실률 향상률} = \frac{\text{전월 유실률} \times 100}{\text{당월 유실률}}$
	$\text{생산 달성 향상률} = \frac{\text{당월 목표대비 생산달성률} \times 100}{\text{전월 목표대비 생산달성률}}$
	$\text{불량 달성 향상률} = \frac{\text{전월 목표대비 불량달성률} \times 100}{\text{당월 목표대비 불량달성률}}$

생산달성률의 향상률, 월 목표대비 불량률의 향상률을 구하고 이들의 평균치를 계산하여 각 공정 별 향상률을 구한다. 단, 유실률과 불량률은 값이 낮을수록 개선효과를 보이는 것이므로 유실률과 불량률의 향상률은 다른 지표와는 반대로 전월실적을 당월 실적으로 나누어 계산한다.

5. 공정의 효율성 분석 모형

공정 효율성 평가지표는 사용효율측면에서 작업효율과 유실률, 달성률 측면에서 월 목표대비 생산 달성률, 월 목표대비 불량률로 구성된다. 또한, 향상률 측면에서 작업효율의 향상률, 유실률의 향상률, 월 목표대비 생산 달성률의 향상률, 월 목표대비 불량률의 향상률의 단순평균에 의해 향상률 지수가 도출된다.

이 중 유실률과 월 목표대비 불량률은 값이 낮을수록 효율이 높음을 나타내고 작업공수효율, 월 목표대비 생산달성률, 향상률은 값이 높을수록 효율이 높음을 나타낸다.

본 논문에서는 공정의 효율성 분석모형으로 AHP 모형을 이용한 B/C Ratio 분석모형과 투입요소와 산출요소를 고려하는 DEA 모형과 가중치 부여방식에서 AHP 모형과 DEA 모형을 결합한 DEA-AR 모형을 구축하여 세 가지 모형을 통한 실증분석을 실시하고 비교하였다.

5.1 AHP-B/C Ratio 분석모형

비용(Cost)측면의 요소인 유실률과 월 목표대비 불량률에 대해서는 AHP방법에 의해 가중치를 산정하여 비용측면의 효율성을 구하고, 효과(Benefit)측면의 요소인 작업공수효율, 월 목표대비 생산달성률, 향상률에 대한 가중치를 산정하여 AHP방법에 의해 효과측면의 효율성을 구한다.

다음으로 비용측면의 효율성과 효과측면의 효율성에 대한 B/C Ratio를 구하여 그 비율이 높은 공정을 효율이 높은 공정으로 판단한다.



그림 4. AHP-B/C Ratio 모형

5.2 DEA 분석모형

공정효율성 평가 DEA-CCR 모형은 <그림 5>와 같으며, 투입요소의 경우 AHP-B/C Ratio 모형에서의 비용측면의 효율성 부문에 해당하는 유실률과 불량률을 변수로 선언하였으며, 효

과측면의 효율성에 해당하는 작업공수효율, 생산달성률, 향상률은 산출요소로 선정하였다.

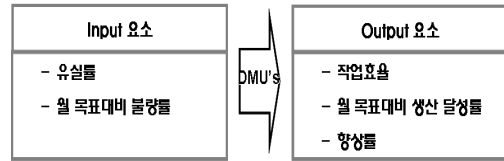


그림 5. 공정효율성 평가 DEA 모형

5.3 DEA-AR 모형

AHP-B/C Ratio 모형에서 비용측면의 효율성분석과 효과측면의 효율성분석을 실시할 때 구했던 각 평가요소의 가중치를 기준으로 이 가중치에 대한 제약을 추가하여 가중치의 범위를 부여한다.

이 값에 의해 식 (4)와 같이 각 투입요소와 산출요소에 대한 가중치가 이의 범위 내에 들어오도록 제약을 가한 후 DEA-AR 모형을 풀고 각 공정에 대한 효율성을 판단한다.

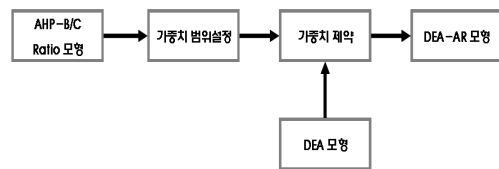


그림 6. DEA-AR 모형

6. 실증분석

6.1 평가대상 표본과 변수

본 논문에서 제안된 공정간 효율성 분석모형을 검증하기 위해 국내 휴대폰 케이스 제조업체의 6개 공정을 대상으로 실증분석을 실시한다. 6개 공정은 사출공정, 도장공정, 증착공정, EMI공정, 가스켓공정, 조립공정으로 구성된다.

본 논문에서는 이들 6개 공정 간의 효율성 분석을 3가지 모형에 의해 분석하였다.

각 공정에서의 2007년도 4월 실적 데이터를 기준으로 공정 효율성 평가지표를 산정하면 <표 4>와 같다.

<표 4>의 평가지표는 모두 비율 데이터 이지만 각 평가지표별 Scale이 다르므로 이를 규모화 할 필요가 있다. 각 평가지표별 규모화 방법은 다음방법을 사용하였다.

$$\frac{\text{각 지표 별 해당공정 값}}{\text{각 지표 별 공정합계}}$$

위의 각 평가지표 별 규모화 방법을 사용하여 비율 데이터를 규모화하면 <표 5>와 같다.

표 4. 제조공정 별 효율성 평가지표

공정	비용요소		효과요소					
	불량률	유실률	향상률			생산율	작업효율	
			불량률	유실률	생산율			
사출	243%	27%	92%	114%	85%	105%	84%	74%
도장	295%	41%	83%	115%	88%	111%	81%	59%
증착	206%	24%	49%	109%	89%	103%	86%	76%
EMI	172%	24%	128%	119%	67%	106%	84%	76%
가스켓	143%	13%	148%	155%	66%	108%	95%	88%
조립	142%	151%	134%	126%	67%	108%	98%	77%
합계	1201%	280%	634%	738%	462%	641%	528%	450%

표 5. Scale된 공정 별 효율성 평가지표

공정	비용요소		효과요소		
	불량률	유실률	향상률	생산율	작업효율
사출	20%	17%	16%	16%	16%
도장	25%	27%	16%	15%	13%
증착	17%	16%	15%	16%	17%
EMI	14%	15%	17%	16%	17%
가스켓	12%	9%	19%	18%	20%
조립	12%	16%	17%	19%	17%

6.2 AHP-B/C Ratio 모형

AHP 방법론의 절차에 따라 공정의 효율성 평가를 위한 변수들 간 가중치를 도출하기 위해 휴대폰케이스 제조공정 생산성/품질 분석 및 평가에 경험이 풍부한 실무 전문가 13명을 대상으로 각 변수들을 이원비교(Pairwise Comparison)하는 설문지를 실시하였다. 데이터 분석 결과 AHP 방법론에서 제시하는 일관성 비율이 0.1이하인 설문지 11개를 대상으로 Expert Choice를 이용하여 가중치를 산출하였다.

각 변수 별 상대적 중요도는 전문가의 판단(Judgement)을 측정하기 위해 AHP-B/C Ratio 모형에서 제시된 비용측면의 효율성 분석과 효과측면의 효율성 분석의 각 평가지표 별 요소들

에 대해 이원비교한 후, 이원비교 행렬(pairwise comparison matrix)로부터 각 변수의 상대적 중요도를 결정한다. 이 결과는 <표 6>의 3번째 열과 같다.

이 가중치를 기반으로 AHP 분석을 실시하여 각 공정 별 B/C Ratio를 구하면 다음 <표 6>과 같다.

6.3 DEA-CCR 모형과 DEA-AR 모형

유실률과 불량률을 투입요소, 작업효율과 생산 달성률, 향상률을 산출요소로 구성된 DEA-CCR 모형에 의해 각 공정 별 효율성 지수를 구하면 <표 8>의 2번째 열과 같다. 또한 AHP-B/C Ratio 모형에서 구한 평가요소 별 가중치를 <표 7>과 같이 가중치 범위를 두어 DEA 모형에 가중치 제약을 준 후 각 공정

표 7. 평가지표 별 가중치

구분	변수명	AHP가중치	가중치 범위
투입요소	월 목표대비 불량률	0.80	0.16~0.88
	유실률	0.20	0.04~0.22
산출물	향상률	0.44	0.09~0.48
	월 목표대비 생산 달성률	0.17	0.03~0.19
	작업효율	0.39	0.08~0.43

표 6. AHP-B/C Ratio 모형 결과

요소	가중치	사출	도장	증착	EMI	가스켓	조립
비용	불량률	0.80	20%	25%	17%	14%	12%
	유실률	0.20	17%	27%	16%	15%	9%
	효율성	-	0.16	0.15	0.16	0.17	0.19
효과	향상률	0.44	16%	16%	15%	17%	19%
	생산율	0.17	16%	15%	16%	16%	18%
	작업효율	0.39	16%	13%	17%	17%	20%
	효율성	-	0.19	0.25	0.17	0.15	0.11
B/C Ratio	-	82.56	59.32	93.11	114.67	168.19	138.55

별 효율성 지수를 구하면 <표 8>의 3번째 열과 같다. 가중치 제약의 범위는 AHP 가중치의 상대적 비율을 유지하면서, 각 공정의 효율성을 최적화할 수 있는 범위 내에서 설정하였다.

표 8. DEA 모형 별 효율성평가 비교

DMU	DEA-CCR	DEA-AR
사출	52.83	49.44
도장	40.42	36.04
증착	62.00	59.52
EMI	76.69	74.58
가스켓	100.00	100.00
조립	100.00	91.68

6.4 각 모형 별 비교분석

AHP-B/C Ratio 모형, DEA-CCR 모형, DEA-AR 모형을 적용하여 효율성을 비교분석 한 결과 <표 9>와 같이, 공정 별 순위에는 큰 변화가 없었다. 하지만, DEA-CCR 모형에서 효율치가 100인 DMU가 가스켓과 조립으로 총 두 개이기 때문에, 어느 공정이 최우수 공정인지를 알 수 없었다. 이를 해결하기 위하여 기존의 DEA-CCR 모형에 가중치의 범위를 설정한 DEA-AR 모형을 적용한 결과, 가스켓만이 효율치 100이 나왔기 때문에 가스켓이 가장 효율성이 높은 공정이라는 결론을 내릴 수 있다.

표 9. 각 모형 별 효율성 비교분석 결과

DMU	AHP-B/C Ratio	DEA-CCR	DEA-AR
사출	82.56	52.83	49.44
도장	59.32	40.42	36.04
증착	93.11	62.00	59.52
EMI	114.67	76.69	74.58
가스켓	168.19	100.00	100.00
조립	138.55	100.00	91.68

7. 결론

7.1 요약

본 논문은 휴대폰 케이스 제조공정에서의 공정 간의 효율성 평가를 위해 각 평가요소들의 특성을 고려해 공정 간의 효율성을 평가하는 모형을 제안하였으며, 이를 실증 데이터를 통하여 검증하였다.

효율성 평가지표의 설정에서는 서로 다른 특성을 가진 공정들에 대한 비교/평가를 위해 사용효율(Utilization), 달성률(Performance), 향상률(Improvement) 등의 기준을 평가요소로 도출하였다. 효율성 평가모형으로는 이들 평가요소를 비용측면의 요소와 효과측면의 요소로 분리하여 AHP를 적용한 AHP-B/C

Ratio모형과 평가요소를 투입요소와 산출요소로 분리하여 분석하는 DEA-CCR 모형, AHP와 DEA가 결합된 DEA-AR 모형으로 총 3가지의 모형이 제시되었다.

기존의 DEA-CCR 모형에서는 <표 8>에서 보듯이 효율성 계수가 1(Efficiency 100)이 되는 공정이 두 개가 존재하고 있다. 그러나 본 논문에서 제시하고 있는 AHP/DEA-AR 결합모형은 효율성 계수가 1(Efficiency 100)인 공정은 한 개이고 각각의 값에 따라 각 공정의 순위를 매길 수 있다는 점에서 공정의 현재 위치와 개선방향을 보여 줄 수 있다.

이러한 DEA 분석기법은 SCM에서 협력업체 평가 시, 매우 유효한 방법론이 될 수 있다. 특히 요즘과 같이 급변하는 제조 환경 속에 서로 다른 특성을 가진 내부공정들에 대한 평가를 알 수 있는 자사만의 평가모형으로 자사 공정, 취약점 파악 및 개선을 위한 실행계획 수립 시 이용할 수 있다.

7.2 연구의 한계점

본 논문은 이질적인 고유특성으로 인하여 동일한 기준평가가 어려운 DMU 간의 효율성평가를 DEA와 AHP 방법론을 활용하여 평가하였다. 또한, 휴대폰 케이스 제조공정을 평가사례로 제시함으로써 본 논문에서 제안하는 방법론을 검증하였다.

통상 DEA 분석에 있어 투입 및 산출 변수의 합이 많고, 평가 대상 DMU 수가 적으면 대부분의 DMU 효율성이 1이 될 가능성이 크게 되기 때문에, 비효율적인 DMU의 판별이 어렵다는 문제점이 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 DMU의 수는 투입 및 산출변수의 합보다 최소 2배 혹은 3배 이상 되어야 한다. 하지만 본 논문에서는 투입 및 산출변수의 합이 5개이고 평가대상 DMU는 6개에 불과하여 다른 산업 공정들에 본 논문에서 제안하는 방법론을 일반화하기에는 한계가 있을 것으로 보인다.

본 논문의 이러한 한계점을 해결하기 위해 추후연구에서는 제안된 DEA-AHP 방법론을 평가단위 DMU의 수가 최소 10개 이상이 되는 공정에 적용하여 DEA 효율성을 구함으로써 보다 더 의미 있는 연구결과를 도출해 낼 수 있다고 사료된다. 또한, DEA 윈도우 분석기법을 활용하여 DMU의 구간 별 효율성을 분석함으로써 DMU의 부족을 해결할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- Banker, R. D., A. Charnes, and Cooper, W. W. (1981), A Bi-Extremal Principles for Frontier Estimation and Efficiency Evaluation, *management Science*, 1370-1382.
- Charnes, Cooper and Rhodes (1978), Measuring the efficiency of decision making units, *European Journal of Operational Research*, 2, 429-444.
- Thompson, Singleton, Thrall, and Smith (1986), Comparative site evaluations for locating a high-energy physics LAB in Texas, *Interfaces*, 16(1), 35-49.
- Cho, K.-T., Cho, Y.-K., and Kang, H.-S. (2003), The Analytic Hierarchy Process,

- Donghyun Publisher, Seoul, Korea.
- Hong, B.-Y. (2003), Measuring Productivity Changes in Korean Textile Industry by DEA, *Korea Academic Society of Industrial Organization*, 11(3), 61-96.
- Kim, T.-S. and Cho, N.-W. (2005), The Efficiency Analysis for DMU Using the Integration Method of DEA and AHP, *Journal of the Korea Industrial and Systems Engineering*, 29(2), 1-6.
- Kim, Y.-T. (2003), Industrial Engineering Expert course for Manufacturing Innovation, GMI Consulting, Seoul, Korea.
- Lee, D.-J., Bae, S.-S., and Kang, J.-S. (2006), Development of R&D Project Selection Model and Web-based R&D Project Selection System using Hybrid DEA/AHP model, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 32(1), 18-28.
- Lee, D.-J. and Yang, W.-M. (2004), Performance Evaluations of Professional Baseball Players using DEA/OERA, *IE Interfaces*, 17(4), 440-449.
- Moon, S. (2003), The Efficiency of Automobile Firms using DEA Approach, *Research Institute of Industry and Economy in In-Ha University*, 17(2), 63-90.
- Park, W.-R., Kim, M.-J., Kwon, O.-K., Kim, M.-Y., and Cho, W.-H. (2007), A Data Envelopment Analysis for Estimating the Efficiency of Korean Apparel Industry, *Journal of the Korean Society of Costume*, 57(2), 69-85.
- Song, D.-S. and Kim, J.-J. (2000), *An Analysis on the Efficiency Productivity Review*, 14(2), 177-197.
- Yoon, M.-K. and Kim, J.-K. (2006), The Efficiency Analysis of Korea Stock Market Listed Top-200 Manufacturing Firms : Using the DEA Technic, *Korea Corporation Management Association*, 13(2), 79-97.



김준범

서울산업대학교 산업정보시스템공학 학사
세신전자(주) 제조혁신팀
현재: 서울산업대학교 NIT공학과 석사과정
관심분야: 비즈니스 프로세스 관리, 다 기준 의사결정 분석, 생산정보시스템



김우제

서울대학교 공과대학 산업공학 학사
서울대학교 대학원 산업공학 석사
서울대학교 대학원 산업공학 박사
현재: 서울산업대학교 산업정보시스템공학
과 교수
관심분야: 최적화, 정보시스템



조남욱

서울대학교 산업공학과 학사
서울대학교 산업공학과 석사
Purdue 대학교 산업공학과 박사
Lucent Technologies, Member of Technical Staff (MTS)
현재: 서울산업대학교 산업정보시스템공학과 교수
관심분야: 비즈니스 프로세스 관리, 기업정보시스템