

기술혁신학회 2001년 춘계학술대회

수율(yield)을 이용한 TFT-LCD산업의 학습곡선 실증분석 연구

박성배 (연구원, KIST)

유진혁 (석사과정, 서울대 기술정책대학원과정)

이정동 (조교수, 서울대 기술정책대학원과정)

김태유 (교수, 서울대 기술정책대학원과정)

1. 서론

인터넷과 디지털 기술의 발전으로 급속하게 진행된 정보화사회의 본격도래에 따라, 정보내용을 시각적으로 전달하는 장치로서 LCD의 중요성이 크게 부각되고 있다. 또한 LCD는 반도체와 더불어 고도정보화 시대를 주도해나갈 핵심 전자부품으로, 타산업에 비해 신장율이 높고 부가가치가 월등히 높아 국가간·기업간 주도권 쟁탈을 위한 경쟁이 가장 치열한 분야이다.

전세계 LCD 시장의 80%를 차지하는 TFT-LCD는 삼성과 LG가 1995년 첫 양산을 시작한 이후 불과 4년만에 세계 1,2로 도약하였으며 99년 한해동안 1,529백만 달러(전년대비 268%) 수출할 정도로 반도체에 이어 우리나라 경제의 주력제품으로 급부상하고 있다. 반도체에 비해 단기간에 선진국과의 경쟁에서 정상을 차지하였으며 고부가가치의 대형제품 시장이 빠르게 성장하고 있어 국가경제적 중요성이 향후 더욱 높아질 것으로 전망된다.

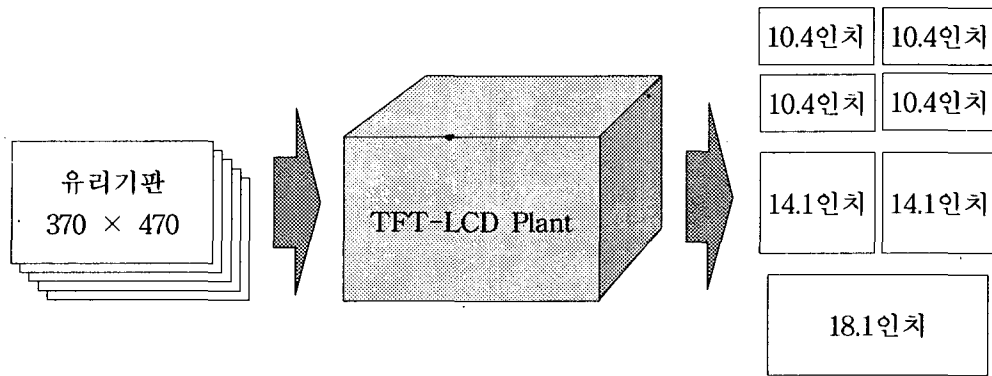
TFT-LCD 산업의 가장 두드러진 특성은 유리기판(Mother Glass)에 개개의 제품이 연속적으로 배열된 상태에서 컬러필터공정과 TFT 공정(박막형성공정)이 진행되고, 이후 액정주입공정 및 모듈 조립공정을 거치는 제조특성에서 잘 드러난다. 컬러필터공정과 TFT 공정은 미세한 재료들을 유리기판 표면에 증착하는 것으로 미세한 먼지 입자하나도 허용하지 않는 고도의 정밀성과 정확성이 요구된다. 이에 따라, 플랜트 운영의 초기에는 총투입 유리기판 대비 완성된 패널의 비율이 20~30% 정도에 불과하다. 그러나, 끊임없는 공정개선 및 생산노하우의 습득으로 2~3년 정도후에는 60~70%에 이르게 된다. 이러한 공정개선은 학습(learning by doing)을 통하여 진행되며, 학습의 정도는 기업마다 플랜트마다 차이를 보인다.

본 연구에서는 본격적인 학습곡선 연구의 예비단계로서 단일 공정에서 다양한 사이즈의 패널 생산이 가능한 LCD공정의 특성을 고려하여 누적산출량과 수율(yield)을 계산하고 수율을 비용의 대리변수로 사용하여 학습곡선을 추정한 연구결

과를 제시하고자 한다. 이를 바탕으로 LCD 산업의 경제적 특성을 간략히 고찰하고, 향후 본격적인 연구의 방향에 대하여 간략히 언급하고자 한다.

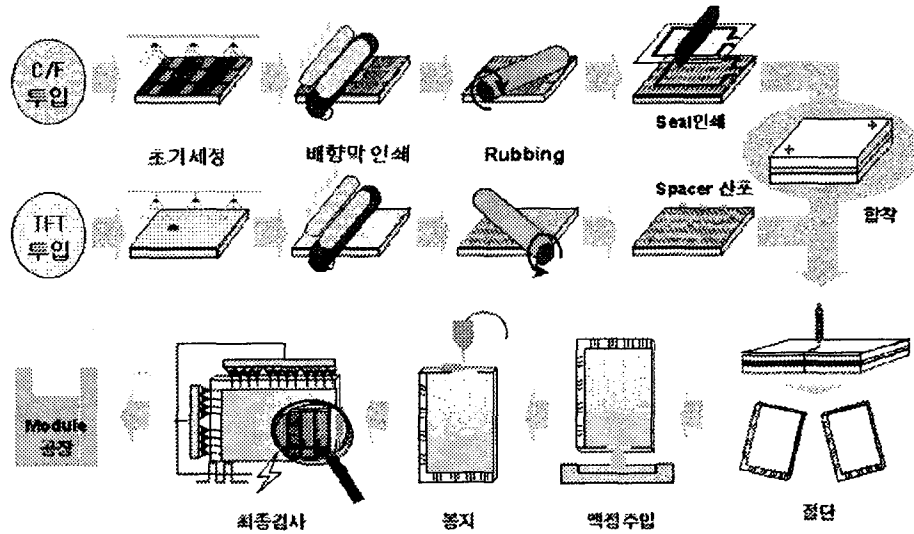
2. TFT-LCD 산업의 특징

TFT-LCD 산업의 기술은 집적화된 회로를 박막기술을 이용하여 증착시킨다는 점에서 반도체 산업에서와 같이 고도의 정밀성이 요구된다. 패널당 백만여개의 화소 중 단 하나의 화소에서 에러가 발생하더라도 불량품으로 처리될 정도이다. 반도체 기술과는 다른 점은 단일공정에서 복수산출물 생산된다는 점이다. 아래의 [그림 1]에서와 같이 예를 들어, 2세대 플랜트에서는 10.4인치, 14.1인치, 18.1인치 등 여러 제품들이 생산 가능하다.



[그림 1] LCD 제조공정의 개념 (예시)

한편, 개별 제품들의 상대적 생산비용은 일정비율로서 주어지는 특징이 있다. 위의 예에서 유리기판 한 장으로 10.1인치는 4장, 14.1인치는 2장, 18.1인치는 1장을 생산할 수 있는데, 서로 다른 규격의 제품들은 공정의 대부분을 공유하기 때문에 각각의 생산비용이 일정한 비율로 나타낼 수 있다. 즉, 2세대 플랜트에서는 “4×10인치 패널의 비용” ≅ “2×14.1인치 패널의 비용” ≅ “18.1인치 패널의 비용”과 같은 관계가 만족된다. 아래의 [그림 2]에서는 보다 상세한 TFT-LCD 공정을 제시하였는데, 한 장의 유리기판에 TFT 공정, 컬러필터 공정까지는 제품의 사이즈에 관계없이 동일하게 진행됨을 알 수 있다. 액정주입 공정과 봉합 공정만이 서로 다른 관계로 액정 재료비에 다소 차이가 발생할 수 있으나, TFT-LCD의 제조원가 중 액정재료비는 2%에 불과한 실정이므로 이 차이는 거의 무시할 수 있다.



[그림 2] TFT-LCD 생산공정의 모식도¹⁾

3. 학습곡선의 논리적 배경 및 기존연구

학습곡선(learning curve)은 생산경험을 성과와 연결시키는 함수로서 정의되며, 경험의 축적을 통한 학습으로 평균 또는 한계비용의 변화를 설명하는 방안으로 종종 언급된다. 학습(learning by doing)은 생산방식, 생산설비, 및 제품디자인의 변화 등을 모두 포함하는 기술변화(technical change)보다 협의의 개념으로 주어진 생산 시설에서 일정한 디자인의 제품을 생산하는 과정에서 축적되는 생산노하우 및 노동자들의 숙련을 의미한다. 그리고 학습에 의한 비용감소를 학습효과(learning effect)라 한다.

학습곡선은 학습에 의한 비용의 변화를 통계적, 수리적 기법으로 함수형태로 나타낸 것인데, 일반적으로 누적생산량을 생산경험의 대리변수로 사용한다. 기본적인 형태는 식(1)과 같다.

$$(3.1) \quad AC_t = AC_0 (X_t / X_0)^\gamma$$

AC_0, AC_t : 0기와 t 기의 평균비용

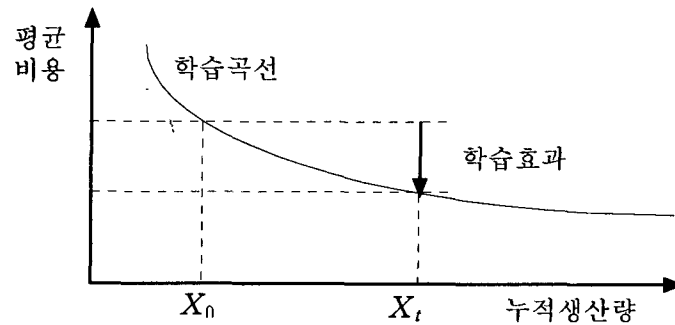
X_0, X_t : 0기와 t 기의 누적생산량

$\gamma < 0$: 학습곡선 상수, 학습에 따른 비용감소율을 의미

식(3.1)은 기본적인 형태로서 생산경험의 축적에 따라 일정한 비율로 비용이 감

1) TFT-LCD Research Center (경희대) 강의교재(2000)에서 인용.

소한다고 가정한 것으로 이를 그래프로 나타내면 [그림 3]과 같다. 학습곡선의 분석은 단순히 학습에 따른 비용감소율, 혹은 학습곡선 상수 γ 를 찾는 것으로 볼 수 있다. 학습곡선 상수는 특정시점에서의 기업의 성과지표인 수익성 및 효율성과는 달리 미래의 비용감소 및 이윤증대의 가능성을 내포하는 기업의 잠재력지표로 사용될 수 있다.



[그림 3] 학습곡선과 학습효과

지금까지 조선, 항공기 등 조립가공산업에서 뿐아니라 최근에는 화학산업, 전력산업, 반도체산업 등 다양한 분야에 걸쳐서 학습곡선에 대한 연구가 진행되고 있다. 그러나, 학습곡선 분석은 단일 디자인의 제품생산에 대한 비용정보를 구하기가 어려워 그 적용범위가 상당히 제한적이었고 앞으로도 해결해야 할 문제들이 많은 분야이다.

기존의 학습곡선 연구는 단순 상관관계 분석방법론, 대리변수 분석방법론, 가격-비용구조식 분석방법론으로 구분할 수 있다. 단순 상관관계 분석방법론은 평균비용 또는 노동비용과 누적생산량의 상관관계를 분석하는 데에 초점을 맞추었다. Wright (1936)와 Alchian(1963)의 항공기조립 산업 분석, Rapping(1965)의 조선산업 분석, Sheshinsky(1967)의 미국 제조업 분석 등 학습곡선 분석연구의 초기 단계에 많이 이용되었으며, 최근에는 Lester and McCabe(1993)에 의한 미국과 프랑스의 핵발전소 플랜트에 대한 비교 분석방법론에 사용된 바 있다. 단순 상관관계 분석방법론은 직관적으로 쉽게 이해될 수 있는 장점이 있지만 비용정보를 알 수 있는 경우에만 사용할 수 있다는 단점이 있다.

대다수 제품의 경우, 단일 디자인에 대한 평균(한계)비용정보를 구하기가 쉽지 않은 것이 보통이다. 이에 따라 Lieberman(1984), Dick(1991), Gruber(1992) 등은 가격을 비용대신 사용하여 학습곡선을 추정하였다. 화학산업을 분석한 Lieberman (1984)은 가격을 비용의 대리변수로 사용할 수 있는 조건으로 첫째, 가격/비용 마진이 분석대상 기간동안 일정할 것, 둘째, 가격/비용 마진이 변할 경우 조정해 줄 것, 셋째, 가격/비용 마진의 변화가 생산비용의 변화폭보다 월등히 작을 것, 이 세가지

를 제시하였다. 세가지 조건은 대리변수 방법론의 한계를 나타내는 것이다. DRAM, EPROM, SRAM에 대한 분석을 수행한 Gruber(1992)도 반도체산업의 마진이 시간에 대하여 U자 형태(제품의 초기와 후기에 높은 수익)를 보인다는 현실관측에 근거하여 그와 반대 형태를 보이는 제품의 각 시기별 Shipment로 보정된 가격을 사용함으로써 Lieberman(1992)의 조건을 만족시키려 하였다.

한편, 비용의 대리변수로 수율(yield)를 사용하는 방법들이 반도체 산업을 중심으로 소개되었다. Gruber(1994), Hatch(1995) 등은 수율을 비용대신 사용하여 각각 EPROM, 대표적인 반도체 플랜트들에 대한 학습곡선을 추정하였다. 반도체, TFT-LCD 공정에서와 같이 플랜트의 수율이 한계비용에 중요한 요소인 경우, 수율은 가격과 같이 마진의 영향을 받지 않는 장점이 있어 좋은 대리변수이다.

아래의 실증연구에서는 벡터 형식으로 표현될 수 있는 LCD 수율을 가중평균에 의해 단일한 스칼라 값으로 표현하고, 각 세대별 수율 중심의 학습곡선을 추정하고자 한다.

4. 실증분석

본 실증분석에서는 TFT-LCD생산공장별 수율과 누적산출량을 사용하여 LCD 공정세대에 따른 학습곡선을 추정한다. 또한 누적산출량과 현재 산출량을 사용하여 각 LCD 공정세대별 학습(Dynamic economics of scale)과 규모의 경제(static economics of scale)로 인한 효과의 상대적 크기를 비교한다.

4.1. 모형

앞에서 본 바와 같이 기본적으로 학습곡선이란 평균(또는 한계)비용과 누적생산량간의 함수이다. 그런데 대부분의 경우, 비용 데이터를 구하기 불가능하므로 대리변수를 이용하여 나타내게 되는데, 본 연구에서는 비용을 대리하는 변수로서 수율(yield)데이터를 사용하였다.

TFT-LCD 생산에 있어서 수율은 '투입된 유리기판에서 최대로 나올 수 있는 패널 수에 대한 실제 생산된 패널 수의 비'로 정의된다. 만약 기업들이 직면하는 비용의 다른 요소들(재료가격, 이자율, R&D 등)이 크게 다르지 않다고 하면, 비용을 결정하는 결정적 요소(critical factor)는 수율이 될 것이다. 또한 기존 반도체 산업 분석 연구에서는 실리콘 재료가 반도체칩 제조비용에 주요 요인이라는 사실에서 수율이 비용의 대리변수로 자주 쓰인 바 있다.(Gruber(1994))

한편, LCD 공정에서는 기본적으로 다수 산출물이 생산되는데, 예를 들어 3세대 공장의 경우, 시장의 수급상황이나 수요처의 요구에 따라 12.1" ,13.3" ,14.1"등 다양한 제품이 동일한 공정에서 생산될 수 있다. 그러므로 한 공장에서의 수율 데이터는 벡터형태를 띠게 된다. 본 연구에서는 한 공장의 수율데이터를 다음과 같이 가

중치를 이용해서 하나의 스칼라 값으로 전환하여 나타냈다.

$$(4.1) \quad Y = \sum_j^n w_j Y_j, \text{ where } w_j = \frac{GI_j}{GI_{total}}$$

단, GI_j 은 j 제품에 투입된 유리기관수, Y_j 은 제품 j 의 수출을 의미한다.

본 연구에서 사용하는 학습모형은 다음과 같다. 이 모형은 전통적으로 가장 많이 사용하는 학습모형으로서 변형으로서 Lieberman(1984), Gruber(2000)등에 많이 사용되었다.

$$(4.2) \quad Y_{i,t} = \pi + a_i + \alpha_1 D_1 + \alpha_2 D_2 + \alpha_3 D_3 + \beta \ln CQ_{i,t} + u_{i,t}$$

$$(4.3) \quad Y_{i,t} = \pi + a_i + \alpha_1 D_1 + \alpha_2 D_2 + \alpha_3 D_3 + \beta \ln CQ_{i,t} + \gamma \ln Q_{i,t} + u_{i,t}$$

단, $Y_{i,t}$ 은 i 공장의 t 시점에서의 수출, $CQ_{i,t}$ 은 t 시점까지의 누적산출량, $Q_{i,t}$ 은 t 시점에서의 산출량을 의미하고, D_1, D_2, D_3 는 분기별로 데이터를 조정해 주는 더미 변수이고 $a_{i,t}$ 은 각 공장별 고유한 값을 통칭하는 변수로서 이 모형에서는 개별 공장별 효과가 고정적인 것으로 본다. $u_{i,t}$ 은 오차항이고 π 은 상수이다.

4.2. 자료

본 연구에서는 공장별, 분기별 유리기관 투입량과 패널 산출량 자료를 사용하였다. 분석기간은 1994년 1사분기에서 2000년 4사분기까지이며, 분석대상은 2세대 공장(10개), 2.5세대 공장(5개), 3세대 공장(7개)이다.

4.3. 추정 결과

(1) 학습곡선의 추정

식(4.2)을 고정효과모형(fixed-effect model)에 의거 OLS 추정을 하면 오차항의 자기상관이 유의미하게 나타나므로 Cochrane-Orcutt procedure을 이용하여 자기상관을 처리하고 다시 추정함으로써 일치성을 확보한 추정결과가 얻어지도록 하였다. 추정결과는 다음의 <표 1>에 정리되어 있다.

<표 1> LCD 공정 세대별 수율곡선에 대한 추정치

	π	β	R^2	DW	observations
2 세대	16.173** (3.966)	10.733** (0.821)	0.46	1.97	226
2.5 세대	7.984 (6.083)	11.877** (1.261)	0.55	2.06	87
3 세대	14.303** (2.818)	13.410** (0.777)	0.77	1.88	106

(note: 괄호안의 값은 표준오차(SE)이며, **은 유의수준 1%에서 유의미한 추정치임을 나타낸다.)

위 표는 모든 세대의 추정결과에 대하여 학습효과를 나타내는 β 계수가 통계적으로 유의미한 것으로 도출되었음을 보여주고 있다. 즉, 생산경험이 축적됨에 따라 LCD 패널 생산 공정에 대한 학습(learning by doing)이 이루어지고 그 결과 수율이 높아진다는 점을 확인할 수 있으며, 이는 앞서 개념적으로 제시하였던 학습가설이 LCD 생산공정에서 성립하고 있는 것으로 판단할 수 있음을 의미한다.

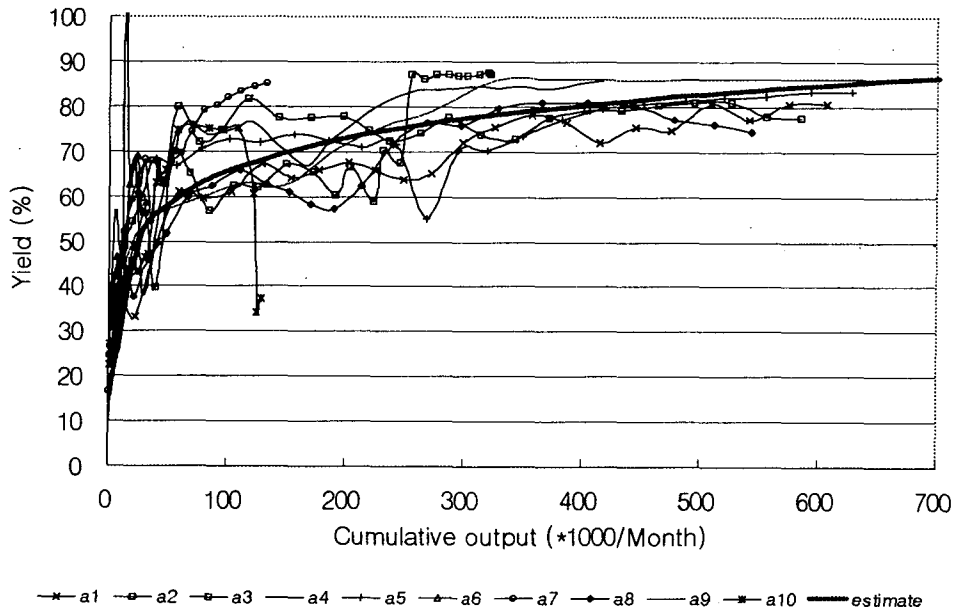
위 표에서 제시된 결과로부터 확인할 수 있는 또 다른 사실은 공정 세대가 진전함에 따라 학습율이 커지고 있다는 사실이다. 즉, 2세대에서 β 값이 10.733이었는데, 2.5세대에서는 11.877, 3세대에서는 13.410 으로 점점 증가하고 있다. 세대가 높을수록 학습율이 증가한다는 것은 이전세대보다 더 단기간내에 생산비용을 낮출 수 있다는 것을 뜻하며 이는 대부분의 TFT-LCD 제조업체의 투자가 더 높은 세대 공정(투입유리기관 크기가 큰 공정)을 갖춘 공장을 중심으로 이루어지는 현실과도 부합된다. 또한 더 높은 세대가 시간적으로 더 늦게 지어진다는 점을 상기할 때, 이는 학습이 다음 세대로 파급(spillover)될 수 있다는 가능성을 간접적으로 시사한다고 할 수 있다.

다음의 [그림 4]에서는 실제 데이터를 이용해서 그린 각 공장별 수율과 누적생산량의 그래프와 추정치를 이용해서 그린 수율곡선을 아울러 제시하였다. 이 그림은 LCD 제조공정의 학습이 비교적 단기간에 빠른 속도로 일어나고 있음을 잘 보여주고 있다.

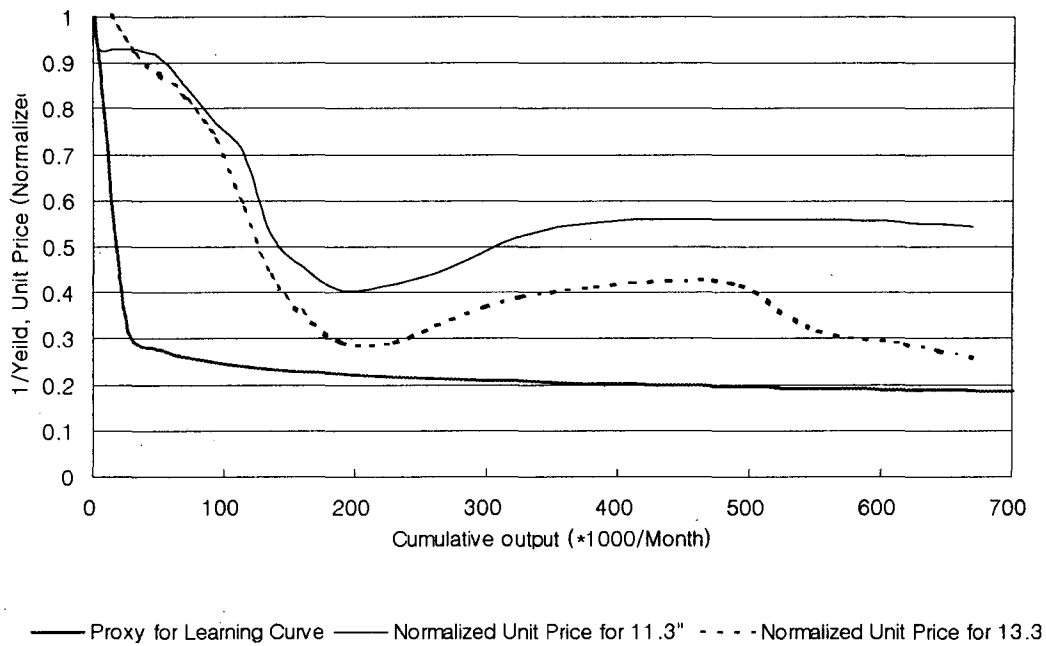
한편, 수율을 비용의 대리변수로 삼는다는 말은 정확히 표현하자면, '1/수율'이 비용변수와 비례한다는 것을 의미한다. 그러므로 다음의 [그림 5]에서와 같이 '1/수율'의 데이터를 이들 중 최대값으로 정규화해서 누적산출량과의 관계를 제시하면 이는 학습곡선의 개념적 정의와 합치하는 것임을 알 수 있다. [그림 5]에 제시된 결과를 참고하면, LCD 제조공정에서의 학습은 제품생산의 초기에 급격히 일어나고 낮은 수준의 Critical Mass 이상을 통과하면 더 이상의 학습은 진행된다고 보기 힘들다는 점을 시사하고 있다. 이러한 현상은 모든 학습현상에서 관측될 수 있는 일반적인 것으로 볼 수는 없으며, LCD 제조공정의 기술적 특성과 관련된 것으로 생각된다. 학습은 생산공정과 연관된 기술이 복잡할수록 느리게 진행되고, 기술자체가

자본에 많이 체화되어 있거나, 공정이 단순할수록 급속히 진행되는 특성이 있음을 감안할 때 LCD 제조공정의 특성은 후자의 경우에 해당하는 것으로 볼 수 있을 것이며, 학습의 원인과 과정에 대한 보다 상세한 기술적 분석이 추가되어야 할 것으로 판단된다.

[그림 5]에서는 학습곡선 혹은 변형된 수율곡선과 함께 11.3"와 13.3"패널의 가격 변화를 정규화하여 제시하였다. 학습곡선과 가격곡선의 변화추이를 동시에 살펴봄으로서 첫째, 가격곡선의 하락정도가 학습곡선의 하락정도보다 완만한 것을 알 수 있다. 이는 학습이 급속히 진행되는 제품생산 초기 이윤율이 상당한 정도로 증가할 수 있음을 시사하고 있다. 즉, 새로운 세대의 LCD 제품이 시장에 출시되어 어느정도 점유율을 확보해나가는 초창기에 생산기업들의 이윤폭이 클 것임을 의미한다. 둘째, 생산누적이 일정수준을 넘어서게 되면 가격곡선과 수율이 안정된 수준을 유지하게 됨을 알 수 있다. 이는 해당 세대의 제품이 시장의 주력상품으로 자리를 잡게되면서 이윤율 또한 안정적인 상태에 머무르게 될 것임을 의미한다. 이 단계에서 현실의 기업들에서 실제로 관측되는 LCD 생산이윤의 단기적 변동은 생산비용의 특성을 반영한 것이라기 보다 시장 참여자간 전략적 행동의 결과 혹은 수요와 공급에 있어서의 예기치 못한 충격에 의한 것으로 해석할 수 있을 것이다.



[그림 4] 2세대 공정의 학습곡선



[그림 5] 2세대 공정의 학습양상과 가격변화의 비교

(2) 학습 효과과 규모경제 효과의 비교

다음의 <표 2>에서는 앞서 추정된 모형에 현기의 생산규모를 고려하여 규모의 경제성을 반영할 수 있도록 한 (4.2)식의 모형을 추정한 결과이다.

<표 2> LCD 세대 공장별 학습과 규모의 경제 파라미터 추정치

	β	γ	R^2	DW	observation
2 세대	8.562** (1.200)	5.292* (2.147)	0.48	1.98	226
2.5 세대	7.514** (0.850)	1.432** (0.542)	0.58	2.28	87
3 세대	11.512** (1.214)	3.613* (1.811)	0.78	1.92	106

(note: 괄호안의 값은 표준오차(SE)이며, **은 유의수준 1%에서 유의미한 추정치임을 나타낸다.)

<표 2>에서 LCD 공정 세대별 학습과 규모의 경제 파라미터들의 추정치를 볼 수 있는데, 모든 세대에서 두 변수의 추정치가 통계적으로 유의미하게 추정되었다는 사실은 비용감소(수율증가)에 있어서 학습과 규모의 경제가 공히 영향을 미친다

는 점을 제시하고 있다. 또한 2.5세대를 제외한 2, 3세대의 학습율이 앞(식1)의 추정치보다 작아졌다는 점은 규모의 경제가 있음에도 불구하고 규모의 경제를 고려하지 않았을 경우, 학습율이 일부 과대평가될 수 있는 위험이 있음을 보여준다. 이는 기존의 이론적 연구들의 시사점과 일치하는 것으로 볼 수 있다.(Windsperger(1992))

위의 표에서는 세대에 따라 학습효과와 규모경제 효과의 상대적 크기가 달라짐을 확인할 수 있다. 즉, 규모의 경제 효과를 1로 정규화했을 경우, 2세대 학습율은 1.618, 2.5세대 학습율은 5.247, 3세대 학습율은 3.186으로 나타나 있다. 전반적으로 높은 세대에서 학습효과가 규모경제효과보다 크다는 점은 낮은 세대로부터 높은 세대로의 파급된 학습효과(spilled over learning effect)가 존재할 가능성을 시사한다. 또한 학습효과가 유효한 진입장벽(entry barrier)의 하나임을 감안할 때 낮은 세대를 거치지 않는 상위 세대로의 중간진입이 쉽지 않을 것임을 의미하는 것이기도 하다.

5. 결론

본 연구에서는 향후 본격적인 학습효과 분석을 위한 예비단계로서 LCD 공정을 대상으로 수출 중심의 학습효과 추정결과를 간단히 제시하였다. 비록 예비분석의 단계이기는 하나 학습효과 추정의 결과 TFT-LCD 생산은 급속한 학습효과로 특징 지워질 수 있음을 확인할 수 있었으며, 제품 세대별 학습효과에도 차별성이 있음을 알 수 있었다.

본 예비분석에 이어 향후 시장참여자간 전략적 행동과 학습효과 및 가격변화와의 관계를 규명하고, 세대간, 플랜트간, 회사간, 국가간 학습효과와 spill-over 효과를 별도로 규명하는 연구가 진행되어야 한다. 또 다른 한편으로는 학습효과를 감안한 기업의 성과분석체계가 수립되어 학습효과를 지닌 생산활동에서 관측된 성과 가운데 어느 정도가 학습효과로부터 기인한 것인지를 정량적으로 파악하는 연구가 수반되어야 한다.

학습효과는 정해진 공정에 따라 다량의 제품을 신속히 시장에 내놓아야 하고, 제품의 세대진전이 빠르게 이루어지는 하이테크 산업에서 성과를 결정짓는 중요한 요소가 될 수 있다. 특히, DRAM 반도체나 LCD 같이 첨단산업의 기초재 생산에서 많은 성과를 거두어온 우리나라의 입장에서 향후 학습의 효과를 배증시키고, 이를 통해 시장선점 및 리더십 유지가 가능하도록 하는 정책적 방안이 무엇인지에 대하여 연구하는 것은 국가경쟁력 향상 유지라는 궁극적 목표를 달성하는데 중요한 과제가 될 것으로 판단된다.

참고 문헌

강진구, 「TFT-LCD 산업의 공정표준 경쟁과 경영성과에 관한 계량적 연구」,

한국과학기술원 (1998)

H. Gruber, The Yield Factor and the Learning Curve in Semiconductor Production, *Applied Economics*, Vol. 26 (1994), pp. 837-843.

_____, Learning by Doing and Spillovers: Further Evidence for the Semiconductor Industry, *Review of Industrial Organization*, Vol. 13 (1998), pp. 697-711.

_____, The evolution of market structure in semiconductors: the role of product standards, *Research Policy*, Vol. 29 (2000), pp. 725-740.

D.A. Irwin and P.J. Klenow, Learning-by-Doing Spillovers in the Semiconductor Industry, *Journal of Political Economy*, Vol. 102 (1994), pp. 1200-1227.

M.B. Lieberman, The Learning Curve and Pricing in the Chemical Processing Industries, *Rand Journal of Economics*, Vol. 15 (1984), pp. 213-228.