고효율 전동기 수요관리 프로그램 분석

이태용* 박종근 김진호**
서울대학교 서울대학교 기초전력공학 공동 연구소**

An Analysis on Energy Efficiency Motor Program

Tae-Yong Lee* Jong-Keun Park, Jin-Ho Kim**
Seoul National University, Electrical Engineering & Science Research Institute**

Abstract - 국내에서는 전력산업의 구조개편이 한창 진행중에 있다. 과거에는 하나의 전력회사가 발전, 송전, 배전을 함께 운영하면서 소비자에게 전력을 공급하였다. 하지만 매년 전력사용량의 급격한 증가와 전력산업이 규모의 경제이론에서 점차 벗어남에 따라 구조개편에 대한 요구가 일어나기 시작하였다. 발전부문에서 경쟁이 도입되어지며 배전부문도 지역적으로 분할되어져 과거의 전력회사는 송전부문만을 담당하게 될 것이다. 여기에 풀(pool)시장이 생겨 전력의 수급을 담당하는 전력계통의 '운영기능'과 전력을 사고 파는 전력의 '시장기능'을 함께 담당하게 될 것이다. 특히 전력사용량의 급격한 증가로 인해 머지않은 미래에 전력의 수급에 문제가 생길 것이 예측된다. 이러한 이유로 구조개편 이후에는 발전이나 송전부문에서의 변화보다 배전에서의 변화가 두드러질 것으로 보인다. 구조개편 후 지역적으로 나누어진 배전사업자들은 그들의 이익을 최대화하기 위해 여러 가지 부하삭감을 위한 수요관리 프로그램을 시행할 것이다. 이것은 발전량의 조절만으로 경제급전을 실시한 과거와는 달리 부하량의 감소가 함께 사용됨으로 보다 나은 편익을 발생시킬 수 있다. 이 논문에서는 고효율 전동기를 사용한 부하삭감으로 전력의 생산자 뿐만 아니라 소비자에게도 편익이 발생하여 사회적 후생을 증가 시킬 수 있다는 것을 고효율 전동기 수요관리 프로그램에 참여하는 참여자의 비용과 편익을 분석함으로서 나타내었다.

1. 서 론

국내에서의 전력산업은 하나의 기업에 의해 발전, 송전, 배전부문을 함께 운영하여 왔다. 하지만 전력 소비량이 해마다 급격히 증가하면서, 또 규모의 경제에서 얻는 이득이 점차 소멸되어감에 따라 전력산업에 구조개편의 요구가 일어나게 되었다. 발전부문에서는 경쟁이 도입되고 배전부문에서는 지역적으로 분할되어져 기존의 전력회사는 송전부문만을 운영하게 될 전망이다. 구조개편 후 배전부문에서 변화가 두드러질 것으로 예상이 된다. 지금까지는 하나의 전력회사가 발전, 송전, 배전을 통합 운영하여 최종소비자(end-user)에게 전력을 공급하였다. 새로운 전력시장의 구조에서는 전력 풀(pool)시장으로부터 전력을 구입한 배전사업자들은 자신들의 이익을 최대화 시키기 위해 전력을 공급함에 있어서 과거와는 다르게 다양한 서비스를 최종소비자에게 공급할 것이다. 이들은 전력의 품질에 있어서 등급을 정해 어떤 소비자에게는 양질의 전력을 제공하는 반면에 어떤 소비자에게는 일정기간동안 전력을 공급하지 않는 대신 차등 요금을 적용하여 배전사업자나 최종소비자의 편익을 증가시키는 경우도 발생할 것으로 예상된다. 발전량의 배분만으로 경제급전을 이룩한 과거와는 달리 배전사업자들은 부하량의 삭감을 통해서 생산측(supply-side)에서 뿐만 아니라 수요측(demand-side)에서도 부하량을 조절하여 사회적 후생을 높이려 한다. 부하량의 삭감은 상대적으로 발전량의 증가로 생각할 수 있어 추가적인 설비투자를 지연시켜 주며 효율적으로 전력을 사용하게 한다. 따라서 배전사업자들은 능동적으로 부하삭감을 위한 여러 가지 수요관리 프로그램에 참여하게 된다. 하지만 수요관리의 효과가 배전사업자에게 유리한 경우도 있지만 불리한 경우도 흔히 발생한다. 왜냐하면 부하삭감은 배전사업자에게는 판매수입의 감소를 발생시키기 때문이다. 그리고 수요측 부하 관리는 최종소비자에게 편익을 제공할 수 있다. 수요측 부하관리에 참여하는 배전사업자나 최종소비자는 그들의 편익이 증대되어지는 수요관리 프로그램은 자신들의 이익을 위해 능동적으로 부하삭감을 실행할 것이다. 하지만 배전사업자처럼 수요관리 프로그램 실행자에게 편익이 적으면서 장기적인 투자를 필요로하는 경우, 최종소비자의 편익이 많이 발생하여 사회적 편익이 높은 경우일지라도 배전사업자에게 외면될 것이다. 이 논문에서는 그러한 대표적인 수요관리 프로그램인 고효율 전동기에 대한 수요관리 프로그램을 수치적으로 분석하여 해결책을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 수요관리의 정의

수요관리(Demand Side Management, DSM)란 소비자의 에너지 사용 패턴을 합리적인 방향으로 유도하기 위한 전력회사의 제반활동을 말한다. 전력의 사용패턴은 특정시간대에 소비량이 많은 경우가 있다. 예를들면 여름철 에어컨 수요의 급증으로 특정시간대에 전력의 수요량이 갑자기 증가한다. 이 경우 갑자기 늘어난 전력량을 소비자에게 안정적으로 공급하기 위해서 전력회사는 추가적인 설비투자의 부담을 가진다. 따라서 전력회사들은 최대전력에 대한 평균전력의 비율, 즉 부하율을 높여 설비투자의 부담을 낮추려 노력한다. 전력사용의 또 다른 패턴은 효율이 좋은 고효율기기를 사용함으로서 전력사용량을 줄이는 것이다. 전력사용량 점유율이 큰 기기를 효율이 높은 고효율 기기로 대체함으로서 전력사용량을 크게 줄일 수 있다. 전동기 부하가 국내 전력사용량의 60%를 차지하고 있으며 이것을 효율이 뛰어난 고효율 전동기로 대체할 경우 많은 전력을 절감할 수 있다. 수요관리의 유형에는 크게 부하관리와 전략적 소비절약으로 나눌 수 있다. 부하관리란 부하율을 높이는 방법으로 최대부하억제, 최대부하이전, 기저부하증대로 분류된다.

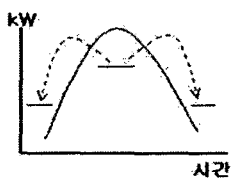


그림1.부하관리의 유형

그림2.전략적 소비절약의 유형

위의 그림은 특정시간대의 전력사용량을 나타낸 것이다. 그림1에서는 특정시간대의 전력 소비량이 증가하여 부하삭감을 통하여 최대치 전력소비량을 줄임으로서 더 이상의 설비투자를 억제함으로서 전력을 소비자에게 안정적으로 공급할 수 있다. 그림2는 모든 시간대에 걸쳐서 전력소비량을 절약함으로서 전력을 안정적으로 공급하는데 기여하고 있다.

2.2 수요관리의 필요성

과거 국내의 전력산업은 하나의 전력회사가 발전, 송전, 배전을 통합하여 운영해 왔다. 그동안 전력회사는 공급위주로 운영되었으며 발전, 송전, 배전에서 많은 설비투자를 하여 왔다. 하지만 매년 전력사용량은 급격히 증가하여 왔으며 그에 따르는 설비투자 또한 상당한 금액을 요구하였다. 예전의 통합운영에서 가질 수 있었던 규모의 경제에 대한 이점은 막대한 설비투자로 점점 사라지고 있다. 그에 대한 대안으로 전력회사는 점차 수요관리의 필요성을 느끼게 되었다, 많은 수요관리 프로그램에서 전력회사는 주로 부하율을 높임으로서 자신들의 이익을 최대화 시킬 수 있는 부하관리에 주력하였다. 하지만 소비자의 이익을 최대화 시킬 수 있는 수요관리에는 무관심 하였다. 따라서 사회적인 이익을 최대화하지는 못하였다. 이 논문에서는 고효율 전동기 수요관리 프로그램을 선정하여 수요관리 프로그램에 참여하는 각 참여자들(전력회사와 소비자)의 입장에서 비용과 편익을 나타내어 사회적 편익을 최적화시키기 위한 방안을 제시하였다.

2.3 고효율 유도전동기 비용/편익 분석

고효율 유도전동기라 함은 표준형 유도전동기보다 효율이 4%~6%정도 높아 전동기 사용 시 전력을 절감할 수 있는 전동기를 말한다. 국내 전력량의 약 60%를 전동기 부하가 차지하여 표준형 유도전동기를 고효율 유도전동기로 대치 시 에너지 이용효율향상으로 전력수요의 절감에 크게 기여한다. 우선 국내 고효율 유도전동기의 보급상황은 표1과 같으며 평균용량도 함께 나타내었다.

표1. 고효율 유도전동기의 보급현황

구분	총대수	평균용량 (kW)	평균효율(%)	
			표준형	고효율
2001	81,775	15.16	84.935	89.408

표1은 2001년 국내 고효율 유도전동기의 보급대수와 평균용량, 평균효율을 나타내고 있다. 이러한 값을 이용하여 표준형 유도전동기와 고효율 유도전동기의 전력사용량을 구하였다. 참여자별로 고효율 유도전동기의 비용과 편익을 계산하기 위해서 DSManager를 사용하였다

2.3.1 부하 데이터

전동기의 전력사용량은 식(1)을 이용하여 구해진다.

$$\text{전력사용량} = \text{평균용량} \times \text{부하율} / \text{평균효율} \quad (1)$$

여기서 부하율은 실제 전동기가 사용되어지는 전력량과 전동기의 정격용량의 비를 나타낸다. 식(1)에 의하여 전동기의 전력사용량을 구한 것은 표2와 같다.

표2. 표준형 전동기, 고효율 전동기 전력사용량

구분	평균용량	부하율	평균효율		전력사용량	
			표준형	고효율	표준형	고효율
데이터	15.16kW	0.8	84.92%	89.48%	14.28kW	13.55kW

표준형 전동기의 전력사용량에 고효율 전동기의 전력사용량을 뺀 값인 0.73kW 모두가 계통시스템의 피크부하 발생시 고효율 전동기의 기기보급에 의해 발생하는 부하절감량의 크기로 나타나지는 않는다. 0.73kW중 어느 정도가 피크부하 발생시 부하절감량의 크기로 나타나는지를 알기 위해 피크시 수용율을 고려하였다. 피크시 수용률은 계통시스템의 피크부하 시 전력총사용량에 대한 전동기의 전력사용량에 대한 비율로 구하였다. 그리고 시스템 피크 시 전체 전동기와 실제로 사용되는 전동기의 비율을 나타내는 이용율을 곱하여 피크 시 사용하는 부하량과 평일, 주말에 사용하는 부하량으로 구분하였다. 고효율 유도전동기는 산업용에 대해서만 보급이 이루어 진다고 가정하고 산업용 유도전동기에 대한 피크시 수용율과 이용율을 나타내었다.

표3. 산업용 유도전동기의 피크시 수용율과 이용율

구분	피크시 수용율	이용율		
		피크	평일	주말
산업용	0.65	0.8	0.77	0.75

표4 표준형 전동기와 고효율 전동기의 부하데이터

구분	표준형(kW)			고효율(kW)		
	피크	평일	주말	피크	평일	주말
부하량	7.426	7.147	6.962	7.046	6.782	6.606

2.3.2 프로그램 데이터

고효율 전동기 프로그램의 분석기간은 고효율 전동기의 수명을 15년으로 가정하여 2001년에서 2015년까지 기간동안 분석을 시행하였다. 그리고 각 연도별 고효율 전동기 수요관리 프로그램의 효과를 계산하여 각 연도별 미래의 효과를 2001년도로 환산시켜 분석하였다.

표5. 고효율 전동기의 프로그램 데이터

항목	값
분석기간	2001-2015
기기수명	15년
참여자 할인율	10%
전력회사 할인율	8%
총자원 할인율	8%
분석년도	2001

2.3.3 시스템 데이터

계통시스템에 대한 부하량과 한계비용은 시간대별로 입력하였으며 부하량과 한계비용 데이터는 1999년도의 자료를 사용하였다. 분석기간 중 부하량과 한계비용 값은 전력사용량의 증가분을 곱하여 계산하였다. 발전, 송전, 배전의 회피비용은 연도별 5% 상승하는 것으로 고려하였고 전기요금의 상승은 기존의 상승률로 고려하였다.

표6. 발전, 송전, 배전의 회피비용

구분	회피발전비용	회피송전비용	회피배전비용
2001	115,221원/kW	77,810원/kW	14,110원/kW
상승율	5%	5%	5%

2.3.4 기본 확산모형

고효율 전동기의 분석기간은 2001-2015년 까지이며 이 기간동안 고효율 전동기의 보급대수 예상은 확산함수 모형에 의해 보급되어진다고 가정한다.확산함수 모형은 Bass모형을 사용하였고 Bass모형의 미분방정식은 식

(2),(3)과 같다.

$$\frac{dN(t)}{dt} = p[m - N(t)] + \frac{q}{m}N(t)[m - N(t)] \qquad (2)$$

$$N(t) = m\frac{1 - e^{-(p+q)t}}{1 + (q/p)e^{-(p+q)t}} \qquad (3)$$

여기서 $N(t)$: 시간t에서의 누적 전동기 대수
m : 초기 전동기 대수
p : 혁신계수
q : 모방계수

혁신계수는 대중매체를 통한 광고 효과를 대변하며 모방계수는 이전 수요자와 잠재 수요자의 상호작용에 의해서 결정된다. 전동기의 계수는 표8에 나타내었다. 표8에 나타낸 계수를 식(2), (3)에 각각 대입하여 그림(3),(4)에 나타내었다.

표7. 2001년 산업용 전기요금표

요금별	요금(원/kW)	비고
기본요금	4490	-
전력량 요금	64.8	여름
	48.9	봄, 가을
	52.5	겨울

표8. Bass모형의 계수

계수	p	q	m
값	0.001	0.659	81,775

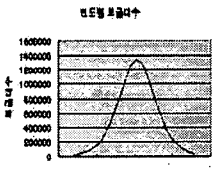


그림3.연도별 보급대수

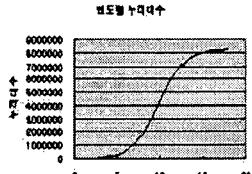


그림4.연도별 누적대수

2.3.5 고효율 유도전동기의 비용/편익 분석

확산모형에서 구한 고효율 전동기의 보급예상대수를 가지고 소비자 입장, 전력회사 입장, 사회적 입장에서의 비용과 편익을 분석하였다. 소비자의 비용은 기기구입비용을 편익은 전기요금의 감소만을 고려하였고 전력회사의 비용은 요금 수입의 감소, 편익은 회피비용과 발전비용감소를 고려하였다. 사회적 입장에서는 소비자와 전력회사의 비용과 편익을 각각 더하였다. 표9는 고효율 전동기의 비용/편익 분석을 나타낸다.

표9. 고효율 전동기의 비용/편익 분석

단위 : 백만원

구분		P테스트	RIM 테스트	TRC 테스트
편익/비용(B/C)		2.34	0.95	2.28
총 비용		1,322,027.52	3,339,791.19	1,401,177.64
총 편익		3,095,208.94	3,188,669.59	3,188,669.59
순 편익		1,773,181.42	-151,121.60	1,787,491.96
편익	요금감소	3,095,209	-	-
	회피비용	-	3,186,127	3,186,127
	발전비용감소	-	2,543	2,543
비용	투자비용	1,322,028	-	1,401,178
	판매수입감소	-	3,339,791	-

표9에서 알수 있는 것처럼 참여자 테스트(P 테스트)는 편익과 비용의 비율이 1보다 큰 2.34를 나타내어 참여자에게는 비용효과적이라는 것을 나타내어 준다. 그러나 수용가 영향도 테스트(RIM 테스트)에서는 1보다 작은 0.95인 편익과 비용의 비율을 나타내어 고효율 전동기 수요관리 프로그램 실행시 전력회사는 수지타산을 맞추기 위해 요금을 발생시킨다. 따라서 전력회사는 고효율 전동기 수요관리 프로그램에는 소극적이게 된다. 하지만 총자원 비용테스트(TRC 테스트)는 2.28로서 비용효과적이라는 것을 나타내고 있다. 결국 고효율 전동기 수요관리 프로그램은 전력회사에 의해서 시행되기가 어렵지만 사회적 입장에서는 비용효과적이므로 사회가 소비자에게 지원금을 보조해 줌으로서 고효율 전동기 수요관리 프로그램을 활성화 시킬 수 있다.

2.3.6 수정 확산모형

소비자가 고효율 전동기 구입시 보조금을 지원받을 경우 구매비용의 감소를 가져오며 가격인하와 동일한 효과를 가져 기기보급의 촉진을 가져온다. 따라서 고효율 전동기의 보급을 나타내는 확산모형도 수정되어야 한다. 가격변화에 대한 수정확산 모형의 변화를 간략화 하기 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

1. 가격은 잠재 수용가의 모집단의 크기에는 영향을 미치지 않으며 단지 확산속도에만 영향을 미친다.
2. 소비자에게 지원금을 지원할 때 Bass모형의 계수는 모방계수에만 영향을 미친다.
3. 어느 시점에선가 모든 전동기 시장을 고효율 전동기가 점유한다.

이러한 가정을 만족하는 수정확산 모형은 식(4)와 같이 주어진다.

$$\frac{dN(t)}{dt} = [p + \frac{q}{m}N(t)][m - N(t)] \cdot g(t) \qquad (4)$$

g(t) : 가격반응 함수

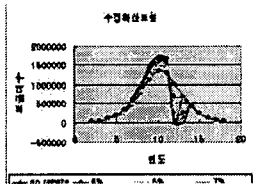
2.3.7 고효율 전동기의 보조금 책정

두 가지 사례에 대해서 수정확산 모형에 의한 고효율 전동기의 보조금을 추정하였다. 가격반응 함수는 식(5)와 같이 변화한다고 가정하였다.

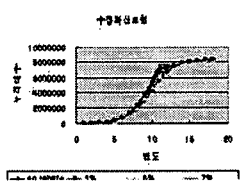
$$\text{참여율}(\%) = 2 \times \text{보조금}(\%) \qquad (5)$$

사례1. p=0.001, q=0.659 (p+q=0.66)

가격반응 함수를 식(5)와 같이 가정할 때 수정확산모형의 보급대수와 누적대수는 그림(5), (6)과 같다.



그림(5) 보급대수



그림(6) 누적대수

위의 그림 (5), (6)에서는 보조금의 비율을 변화시킬 때마다 보급대수의 변화를 각각 나타내었다. 각각에 대한 비용/편익 분석은 표10에 나타내었고 참여자 테스트와 총자원 테스트의 변화추이를 그림 (7), (8)에 나타내었다.

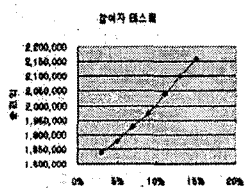
사례2. p=0.001, q=0.679

q값을 변화시켰을 경우 수정확산모형의 분포이며 참여자별 순편익의 변화를 표11에 나타내었고 순편익의 변화추이를 그림(9), (10)에 나타내었다.

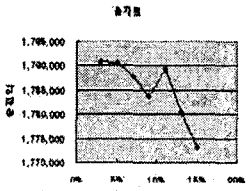
표10. 수정확산모형의 순편익(p=0.001, q=0.659)

단위 : 백만원

보조금	P 테스트	RIM 테스트	TRC 테스트
3%	1,835,438	-151,927	1,790,972
5%	1,879,696	-152,465	1,790,539
7%	1,926,236	-153,002	1,787,823
9%	1,974,202	-153,539	1,783,682
11%	2,041,136	-155,084	1,789,339
13%	2,100,888	-155,872	1,780,568
15%	2,159,315	-156,660	1,773,122



그림(7) 참여자 테스트의 순편익

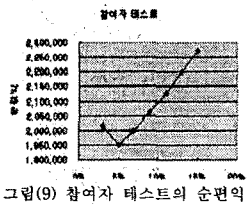


그림(8) 총자원 테스트의 순편익

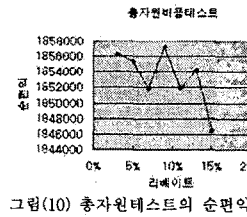
표11.수정확산 모형의 순편익(p=0.001, q=0.657)

단위 : 백만원

보조금	P 테스트	RIM 테스트	TRC 테스트
3%	2,013,918	-154,605	1,856,293
5%	1,948,776	-155,178	1,855,339
7%	1,999,600	-155,750	1,851,846
9%	2,064,756	-157,136	1,857,220
11%	2,124,962	-157,974	1,851,916
13%	2,199,460	-159,697	1,854,262
15%	2,269,728	-160,838	1,846,409



그림(9) 참여자 테스트의 순편익



그림(10) 총자원테스트의 순편익

위의 사례연구에서 고효율 전동기의 보조금은 사례1에서는 11%에서 참여자와 총자원 테스트에서 최적의 편익이 발생하였고 사례2에서는 9%에서 참여자와 총자원 테스트에서 최적의 편익이 발생하였다.

3. 결 론

지금까지 고효율 전동기 수요관리 프로그램에 대한 비용효과성을 분석하였다. 보조금을 실시하지 않았을 경우 수용가 영향도 테스트에서 살펴본 것처럼 비용이 편익보다 크기 때문에 고효율 전동기 수요관리 프로그램은 전력회사에게는 비용-효과적이지 못한 수요관리 프로그램이다. 하지만 사회적 편익이 큰 수요관리 프로그램은 사회가 보조금을 지원함으로서 수요관리 프로그램을 활성화시켜 사회적 편익을 최대화 할 수 있다.

[참 고 문 헌]

[1] 한국전력공사, "DSM평가 및 전력수급계획과의 통합방법론 개발에 관한 연구", June 1998.

[2] 산업자원부, "DSM잠재량 평가와 모니터링을 위한 기법개발 및 활용방안 연구에 관한 최종보고서," October 1998.

[3] 한국전력공사, "전동기 보급실태조사," 1994.

[4] 한국전력공사, 전동기 제어장치 보급 및 사용행태에 관한 연구," September 1997.

[5] 한국전력공사, "수요관리제도의 지원금 수준 적정성 연구," July 1999.