

확산모형을 이용한 보급특성 변화와 학습곡선을 이용한 시장가격 변화 분석을 통한
전동기의 에너지효율기준 수준 설정 방안 연구

황성욱* 김정훈* 원종률** 오민혁*** 이병하***
*홍익대학교 **안양대학교 ***인천대학교

A Study on the Energy Efficiency Standard for Motors
Using Diffusion Models and Learning Curves

Hwang, Sung-Wook* Kim, Jung-Hoon* Won, Jong-Ryul** Oh, Min-Hyuk*** Lee, Byung-Ha***
*Hongik University **Anyang University ***Incheon University

Abstract - In this paper, the situation of energy efficiency standards for motors and diffusion states are analyzed and a new methodology is proposed using diffusion models and learning curves. The existing diffusion models could not explain affects from new appliances' penetration during the diffusion. But a mixed diffusion model with learning curves or learning ratio is studied to explain this penetration.

2. 본 론

1. 서 론

우리나라의 에너지소비는 고도정보화의 진전, 사회구조와 생활양식의 고도화에 따른 에너지소비의 확대에 의해 높은 성장세를 유지하고 있다. 그 결과 환경문제는 점점 심각화 현상이 나타나고 있다. 이러한 배경으로부터 생활환경의 향상과 지구온난화 방지를 양립시키면서 민생기기의 에너지절약을 한층 추진시키려는 시도가 각국에서 실시되고, 에너지 소비효율에 대하여 일정한 수준을 만족하도록 하는 것을 법적으로 규제하는 기준이 작성되어 있다. 그러나 현재 이러한 고효율기기의 에너지 효율 기준에 대한 국내외 기준에 대한 체계적인 분석은 아직 이루어지고 있지 않은 실정이다.

최근 효율기준과 관련된 연구 동향을 보면 T.M.I. Mahlia[1]와 Turiel[2] 등은 주로 냉장고, 에어컨, TV 등 가전기기를 대상으로 하여 효율기준 연구를 수행하여 왔고, 효율기준의 설정시 선형적인 수리모형을 개발하여 단순하게 일괄적으로 적용하는 방안을 제시하였다. 이는 정책을 시행하는 자가 손쉽게 이해하고 적용할 수는 있으나 오차와 시행착오가 발생할 가능성이 커서 합리적인 방안이라고는 할 수 없으며, 전력시스템 부하 가운데 가장 큰 비중을 차지하는 부분인 동력 부하, 즉 전동기의 효율기준에 관한 연구는 본격적으로 시행되고 있지 않다. 한편, 국내에서는 고효율기기의 보급모형과 관련하여 Bass의 확산모형을 이용하여 고효율기기의 보급추이를 정교모형, 단순모형, 간이모형 등으로 다양하게 적용 가능한 모형을 개발하였으며, 그에 따른 절감량을 전력 및 전력량 두 가지 모형으로 구분하여 추정한 연구가 진행된 바 있다[3]. 그러나 이 연구는 기기 보급 중에 새로운 기기의 등장으로 인하여 보급곡선에 주는 영향을 반영할 수 없는 단점이 있다.

본 논문에서는 기존 연구의 문제점으로 지적된 보급률의 변화를 확산모형에 학습률 개념을 반영한 수리모형을 개발함으로써 추정하며, 선형적으로 단순화된 효율기준의 적용으로 보다 합리적인 적용이 가능하도록 수리모형을 개발한다. 사례연구는 가장 큰 부하기기의 전동기를 대상으로 하였다.

2.1 효율기준을 고려한 보급모형

고효율기기의 보급모형은 기존 연구에서 정교모형, 단순모형, 간이모형으로 구분하였는데[3] 본 연구에서는 이 가운데 단순모형을 확장 개발하여 효율기준을 고려한 개선된 보급모형을 제안한다. 제안하는 모형은 기존기기 보급, 고효율기기 보급 및 효율기준 시행에 따른 보급 등 세 가지로 구분하며, 수리적 모형은 각각 식 (1), (2), (3)과 같다. 여기서, FC 는 대상기기의 잠재량을 의미하며, 기존기기는 식(1)에서 이 잠재량에 대하여 s 기간 동안 적분 부분의 비율로 보급 특성을 나타내게 된다. 고효율기기는 대상기기의 잠재량에서 기존기기 보급부분을 제외한 $FC - RC_s$ 에 대하여 s 기간 동안 적분 부분의 비율로 보급특성을 나타낸다. 식(3)은 효율기준, 특히 최저효율제 시행하는 시점에 기존기기가 고효율기기로 대체되어가는 특성을 반영한 것으로서, $\Delta RC_{k,s}$ 는 효율 k 이하인 기존기기 제품이 수명(l)이 다되어 고효율기기로 대체되는 양을 의미하고, $\sum_k \Delta RC_{k,s-l}$ 는 수명에 상관 없이 고효율기기로 대체되는 양을 의미한다. 이때, n 이 0이면 최저효율제가 시행되기 전, n 이 1이면 최저효율제가 시행되는 시점부터를 의미하며, 식(1)에서 VC_s 를 빼주는 형태, 식(2)에는 더해주는 형태로 모형이 구성되어 있다.

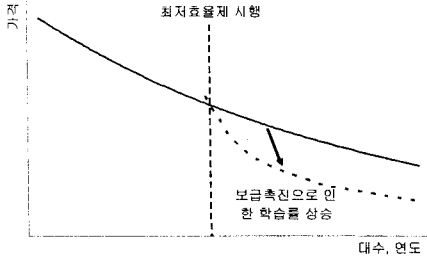
$$RC_s = FC \int_s^{s+1} \frac{p(p+q)^2 e^{-(p+q)t}}{(p+qe^{-(p+q)t})^2} dt - nVC_s \quad (1)$$

$$DC_s = (FC - RC_s) \int_s^{s+1} \frac{p(p+q)^2 e^{-(p+q)t}}{(p+qe^{-(p+q)t})^2} dt + nVC_s \quad (2)$$

$$VC_s = (\Delta RC_{k,s} + \sum_k \Delta RC_{k,s-l}) \int_s^{s+1} \frac{p(p+q)^2 e^{-(p+q)t}}{(p+qe^{-(p+q)t})^2} dt \cdot C_k \quad (3)$$

여기서, $\Delta RC_{k,s} = RC_{k,s-l} - RC_{k,(s-1)-l}$

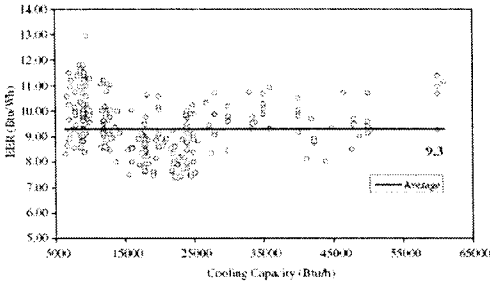
이어서 VC_s 만큼 고효율기기로 교체되는 양이 늘어나면, 최저효율제가 시행되기 전까지 보급된 고효율기기의 양에 더해져서 고효율기기 보급 추이가 빨라지는 효과를 나타내게 된다. 이는 <그림 1>과 같이 학습곡선 상에서 가격의 하락을 가져오는 것으로서, 여기서 학습률의 향상과 보급량 증대의 관계를 유추해낼 수 있다. 이 학습률의 영향을 계수 C_k 로 하여 식(3)에 곱해진 형태로 수리모델화하였다. 제안한 모형을 통하여 여러 가지 효율기준의 수준 안에 따라 보급특성을 분석함으로써 타당한 효율기준 수준을 설정하게 된다.



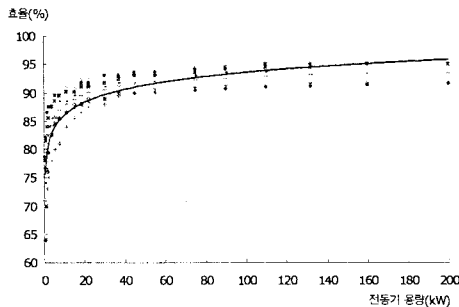
<그림 1> 보급량 증대와 학습률 향상 관계

2.2 효율기준의 설정

Mahljal[1]와 Turiel[2] 등은 효율기준을 설정할 때 대상기기 모델과 규격에 상관 없이 일괄적으로 평균효율을 사용하였다. <그림 2>에서 보는 바와 같이 324개 모델에 대하여 평균 효율을 적용하고 이를 기준으로 선형적으로 최저효율을 설정하였는데, 이는 모델과 규격, 메이커마다 갖고 있는 특성과 효율 향상 기술의 정도를 무시함으로써 실제 적용하게 될 때 효율 향상을 실행할 수 없는 부분이 발생하게 된다.



<그림 2> 말레이시아 실내에어컨 효율기준[1]



<그림 3> 삼상유도전동기 전폐형 효율기준 분포

예를 들어, <표 1>에서 보는 바와 같이 우리나라 삼상 유도전동기의 효율은 용량이 클수록 좋아지는 경향을 띠고 있는데, 모든 용량의 효율을 가장 근사적으로 표현할 수 있는 방법은 <그림 3>의 실선과 같이 로그함수 형태로 표현하는 것이다. 만약 이를 선형으로 나타낼 경우, 용량이 작은 모델은 목표 효율 달성이 매우 어렵고 용량이 큰 모델은 이미 목표 효율에 도달하여 기술 개발의 필요성이 없어지게 된다. 따라서, 본 연구에서는 효율기준 평가를 위한 안을 제시할 때 효율자료 분계를 커브피팅한 식을 기준으로 적용한다. 커브피팅은 주어진 효율 분포 데이터를 대상으로 하여 최소자승법 식(4)를 이용하여 행한다. 단, y 는 효율의 실제값, x 는 용량, \hat{y} 는 효율의 추정값을 의미한다.

$$\min \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2 \quad (4)$$

이에 따라, 추정한 식은 식(5)와 같다.

$$\hat{y} = 3.2583 \ln(x) + 78.599 \quad (5)$$

3. 사례연구

사례연구에서는 우리나라 전동기를 대상으로 최저효율제를 시행할 경우 보급 추이가 어떻게 변화하는지 검토하고 효율이 낮은 기기의 생산 및 판매 금지 조치 방안과 효율 기준 설정을 위한 방안을 제안한다. 우선적으로 전동기 효율기준 현황, 보급 현황 및 가격 변화 추이에 관하여 정리하고, 앞서 수립한 수리모형에 기반하여 사례연구를 수행한다.

3.1 전동기 효율기준 현황

1992년에 50HP 이하 3상 유도전동기에 대한 한국공업규격(KS C 4202)에 고효율형 효율을 신설하였고, 1997년에 200 kW 이하로 적용 용량을 확대 규정하였다. 현재 고효율 에너지기자재의 적용범위에서 3상 유도전동기는 '전압 600V이하의 일반용 3상 유도전동기로서 KS C 4202 규정 이상의 삼상 유도전동기'로 규정하고 있다. 이는 일반전동기보다 손실을 20~30% 정도 감소시켜 효율이 4~10% 정도 상승되는 전동기를 말하며, 국내에서는 1996년 1월 KS 규격의 효율이 2~3% 정도 상승되었고, 1992년 12월 한국산업규격(KS C 4202)에 일반용 저압 3상 유도전동기의 50HP 이하에 대하여 고효율 기준이 신설됨에 따라 표준형과 고효율형으로 이원화하여 운영하고 있다.

<표 1> 삼상 유도전동기 전폐형 효율기준[KS C 4202] (단위 : %)

전동기용량		2극(3,600rpm)		4극(1,800rpm)		6극(1,200rpm)		8극(900rpm)	
kW	HP	표준형	고효율형	표준형	고효율형	표준형	고효율형	표준형	고효율형
0.4	0.5	64.0	78.6	65.0	79.3	64.0	78.0	64.0	74.0
0.75	1	70.0	81.6	71.5	82.5	70.0	82.0	70.0	79.5
1.5	2	76.0	84.0	78.0	84.0	76.5	86.5	73.0	82.5
2.2	3	79.5	85.5	81.0	87.5	79.5	87.5	75.0	84.0
3.7	5	82.5	87.5	83.0	87.5	82.5	87.5	78.0	85.5
5.5	7.5	84.5	88.5	85.0	89.5	84.5	89.5	80.0	85.5
7.5	10	85.5	89.5	86.0	89.5	85.5	89.5	81.0	88.5
11	15	86.5	90.2	87.0	91.0	86.5	90.2	84.0	88.5
15	20	88.0	90.2	88.0	91.0	87.5	90.2	85.5	89.5
18.5	25	88.0	91.0	88.5	92.4	88.0	91.7	86.5	89.5
22	30	89.0	91.0	89.0	92.4	88.5	91.7	87.5	91.0
30	40	89.0	91.7	89.5	93.0	89.0	93.0	88.0	91.0
37	50	90.0	92.4	90.0	93.0	90.0	93.0	89.5	91.7
45	60	90.2	93.0	90.5	93.6	90.0	93.6	90.0	91.7
55	75	90.2	93.0	90.5	94.1	90.5	93.6	90.2	93.0
75	100	90.5	93.6	90.7	94.5	90.7	94.1	90.5	93.0
90	120	90.7	94.5	91.2	94.5	91.0	94.1	90.7	93.6
110	150	91.0	94.5	91.5	95.0	91.0	95.0	91.0	93.6
132	175	91.2	94.5	91.7	95.0	91.5	95.0		
160	215	91.5	95.0	92.0	95.0	91.5	95.0		
200	270	91.7	95.0	92.4	95.0				

3.2 고효율전동기 보급 현황

고효율전동기는 1990년도부터 시판 되었으며, 초기에는 생산량의 대부분을 수출했다. 에너지관리공단의 '산업용전동기의 보급실태 조사분석'에 의하면, 이후 서서히 판매량이 증가하여 2001년 기준 연간 12,285대의 내수가 있었으나 전체 판매량에 비하면 아직도 미미한 수준이다. 이에 따라 산업용의 고효율 전동기 보급률도

5%미만으로 추산되고 있다.

<표 2> 고효율전동기 보급 추이[4]

	1993	1997	2001
○ 대수(천대)	3,284	5,163	8,446
- 산업용	2,314	-	4,413
○ 용량(MW)	29,462	55,328	76,792
- 산업용	20,725	-	53,336
○ 대당용량(kW/대)	9.0	10.7	9.1
- 산업용	9.0	-	12.1

3.3 고효율전동기 가격 변화 추이

기존 연구에 의하면 고효율전동기의 가격 변화 추이는 수요관리 정책에 의한 영향으로 시장 가격을 왜곡한 것으로 평가되었다. <표 3>은 기존 연구 이후에 추가적으로 조사된 국내 A사의 고효율전동기 가격으로서 그 변화 추이에 관하여는 추가적으로 연구할 필요가 있으나, 본 논문의 주요 관심사는 아니며 본 논문에서는 보급 모형에 학습률을 반영하는데 본 자료를 활용한다.

<표 3> 고효율전동기 가격 변화 추이

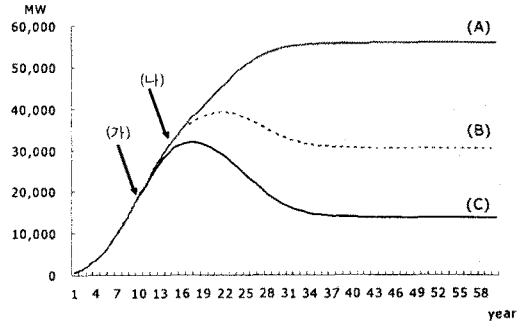
(단위 : 원/년)

마력	극수	2001/11	2001/12	2002/3	2002/12	2004/2	2005/1
1HP	2p	200	180	200	222	244	269
	4p	165	148	165	183	201	221
	6p	225	203	225	250	275	303
5HP	2p	325	292	325	361	397	437
	4p	267	241	267	297	327	359
	6p	373	335	373	414	455	501
10HP	2p	560	504	560	622	684	753
	4p	491	442	491	546	601	661
	6p	676	608	676	751	826	909
20HP	2p	1,030	927	1,030	1,144	1,258	1,384
	4p	896	806	896	995	1,095	1,204
	6p	1,310	1,179	1,310	1,456	1,602	1,762
40HP	2p	2,393	2,154	2,393	2,695	2,925	3,217
	4p	2,100	1,888	2,100	2,333	2,566	2,823
	6p	2,517	2,266	2,517	2,797	3,077	3,384
60HP	2p	3,841	3,457	3,841	4,268	4,695	5,164
	4p	3,428	3,085	3,428	3,809	4,190	4,609
	6p	4,621	4,223	4,693	5,214	5,735	6,309
100HP	2p	7,886	7,079	7,886	8,762	9,638	10,602
	4p	6,242	5,617	6,242	6,935	7,629	8,391
	6p	8,095	7,285	8,094	8,994	9,893	10,883
200HP	2p	16,958	15,262	16,976	18,842	20,726	22,799
	4p	11,323	10,191	11,323	12,581	13,839	15,223
	6p	13,829	12,447	13,829	15,366	16,903	18,593

3.4 최저효율제 시행에 따른 전동기 보급 추이 분석

우선 기존기지만 보급된다고 가정하고 60년간 보급추이를 추정하여 기준으로 삼고, 기기 수명은 10년이라고 가정한다. 잠재량(m), 혁신계수(p), 모방계수(q)는 기존 연구 결과를 활용하고, 기존기와 고효율기 모두 동일한 특성을 갖는다고 가정하여 같은 수치를 적용한다. 각각의 수치는 39,086MW, 0.013, 0.307이다 [5]. 기존기 보급중 10년째에 고효율기 도입이 시작되고(그림의 (가)), 15년째에 최저효율제가 도입된다고 가정하였으며(그림의 (나)), 민간 부분은 공공 부분보다 제도에 저항하는 부분이 있으므로 이 부분을 반영하기 위하여 편의상 최저효율제는 전체 전동기의 절반을 고효율로 대체한다고 가정하였다. <그림 4>는 전동기의 누적보급추이를 나타내는 것으로서, 곡선 (C)는 기존기의 보급추이를 나타내는데, 최저효율제 시행 이후 약 5년이 지난 시점부터 곡선이 하강하기 시작한다. 이는 전동기의 수명이 다된 경우와 수명이 다 되지 않은 경우를 모두 고려하여 고효율기로 대체되는 현상을 보여주는 것이다.

곡선 (B)는 10년째부터 고효율기가 보급되기 시작하여 약 20년째에는 고효율기의 수명(기존기와 동일하게 10년으로 고려)이 다하여 곡선이 하강하는 것을 보여준다. 이번 사례연구에서는 고효율기의 수명이 다하였을 경우 또다시 새로운 고효율기로 대체되는 것은 생각하였다. 곡선 (A)는 최저효율제 시행 이후에 기존기가 고효율기로 대체됨과 학습률이 변화함으로써 보급추이가 변화하는 모습을 보여준다.



<그림 4> 최저효율제 시행에 따른 보급 추이

분석 결과 기존의 전동기 시장의 잠재량 39,086MW는 최저효율제 시행에 따라 기존기가 고효율기로 대체됨과 아울러 학습률의 영향으로 인해 55,848MW까지 잠재량이 증가하는 것으로 평가되었다. 또한, 최저효율제 시행으로 인해 곧바로 기존기의 보급수준이 떨어지는 것이 아니라 약 5년 정도 경과한 후에 떨어짐을 확인하였다. 이상의 결과는 효율향상 정책 수립시에 기기의 수명 및 제고 현황과 기존기에서 고효율기로 전환시 시장 가격에 주는 영향 등을 장기적으로 고려해야 함을 시사한다.

4. 결 론

본 논문에서는 국내의 효율기준 설정 방법의 문제점을 분석하고 대상 기기의 보급 특성과 시장 가격 변화의 영향을 반영하기 위하여 확산모형에 학습률의 영향을 동시에 고려한 새로운 보급모형을 제안하였고, 효율기준의 설정시 수리적 모형을 이용하여 설정할 수 있는 방안을 개발하였다. 이는 효율기준의 효과를 수학적으로 추정함으로써 각 정책의 수립시에 일괄적인 시행이 아닌 합리적 근거에 기반하여 시행할 수 있도록 한다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2005-7-150) 주관으로 수행된 과제임

[참 고 문 헌]

- [1] Mahlia, "Methodology for predicting market transformation due to implementation of energy efficiency standards and labels", Energy Conversion & Management, Vol. 45, pp. 1785-1793, 2004
- [2] Turiel, "Theory and methodology of appliance standards", Energy and Buildings, Vol. 26, pp. 35-44, 1997
- [3] 황성욱 외, "고효율기의 보급확산을 고려한 전력수요관리 모니터링시스템의 방법론 개발", 대한전기학회 논문지, 제 48권, 제8호, pp. 941-950, 1999
- [4] 에너지관리공단, 산업용전동기의 보급실태 조사분석, 2002
- [5] 장승찬 외, "규제완화된 전력시스템에서의 전원개발계획방법론 고찰", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1101-1103, 1999