

철도에서의 에너지 이용효율 평가방법에 관한 고찰

창상훈 한문섭 김주락
한국철도기술연구원

A Study of the Assessment Method about Energy Use Efficiency on the Rail Traffic

Sang-Hoon CHANG, Moon-seob HAN, Joo-Rak Kim
Korea Railroad Research Institute

Abstract - 전기철도의 에너지 소비형태를 다른 수송기관과 비교해 보면 에너지 소비 분담율 측면에서 약 8% 정도를 차지하고 있으나, 수송 분담율은 약 30% 이상을 점유하고 있으며, 화물의 경우 수송량의 5%를 담당하고 있지만 에너지 소비는 약 1%미만으로 에너지 효율성이 높은 것으로 나타났다. 그러나 기존의 방법으로 에너지 소비에 대한 효율성을 비교 하는 것은 에너지 소비원이 다르기 때문에 문제가 있어 본 연구에서는 원료로부터 환산하는 효율 계산방법과 필요 에너지, 유효에너지 즉, 'exergie'에 의한 평가 방법을 제안하였다.

1. 서 론

에너지의 확보와 효과적인 사용은 인간이 문화적인 생활을 영위하는데 필수적인 기본요소이다. 인류가 발전할수록 여러 분야에서의 에너지 소비는 비약적으로 증가하고 있다. 특히 최근 에너지 소비량의 증가는 상당히 급격하여 사회적으로 많은 문제점을 유발하고 있다. 그 문제점의 하나는 지금까지 여러 가지 편리한 에너지원으로서 꾸준히 소비되어 온 화석에너지의 고갈이 예견되고 있다는 점과 막대한 에너지를 소비함으로써 발생하는 환경오염문제가 급속하게 확대되고 있다는 사실이다.

이와 같은 상황에서 많은 에너지원을 외국에서 전적으로 수입에 의존하고 있는 우리의 현실에서 에너지의 절약은 국가경제에 중요한 요소로 작용하고 있다.

전기철도의 에너지 소비형태를 다른 수송기관과 비교해 보면 에너지 소비 분담율 측면에서 약 8% 정도를 차지하고 있으나, 수송 분담율은 약 30% 이상을 점유하고 있으며, 화물의 경우 수송량의 5%를 담당하고 있지만 에너지 소비는 약 1%미만이다. 이에 비해 육로 운송의 경우 수송량은 13%이지만 에너지 소비는 48%에 이르고 있다. 또 항공은 에너지 소비는 1%로 철도와 같지만 수송량은 약 0.15%이다.

이것은 에너지-소비원 단위로 비교하면 철도에 대하여 육로 화물차는 19.4배, 항공은 48.5배이며 해운은 철도와 거의 동일하다. 따라서 철도는 화물운송에 에너지 효율면에서 상당히 우월한 수송기관임을 알 수 있으며 국가적인 차원에서 에너지의 절약을 위해 철도를 이용한 수송방안에 대해서 적극 검토할 필요가 있다.

그러나 이러한 에너지 효율의 평가방법에 대한 문제를 제기하는 경우가 있어 본 논문에서는 철도에서의 에너지 이용효율에 대한 평가 방법을 기존의 방법과 새롭게 제안하는 방법에 대해 비교하여 검토하고자 한다.

2. 철도에서의 에너지 이용합리화 및 실태분석

2.1 에너지 이용합리화

2.1.1 수송수단별 에너지효율

에너지비용절감 측면에서 전기기관차는 디젤기관차에 비해 에너지 이용이 효율적으로 이루어져 약 25% 가량의 동력비를 절감할 수 있고, 전철화하면 동력원이 전기로 전환되므로 유류대체 효과 발생으로 수입 에너지인 석유대신 복합에너지인 전기를 사용하게 되므로 에너지 안보측면에서도 유리할 것이다. 또한 철도 운전수단별 에너지 이용효율을 살펴보면, 다음 표 2.1에서 제시된 바와 같이 전기운전의 에너지 효율성이 가장 높은 것을 알 수 있고, 전기동력차와 디젤동력차의 에너지 소비 실태를 보면, 표 2.2, 2.3에서 제시된 바와 같이 전기동력차의 에너지소비가 디젤동력차의 에너지 소비량의 약 75% 가량에 불과하여 약 25% 가량의 동력비가 절감되고 있는 것으로 나타났다.

표 2.1 운전 수단별 에너지효율

			(단위 : %)			
전기운전			디젤운전	중기운전		
화력발전소 (송전단)	직류 37(38)	교류 37(38)	기 열효율	30	보일러 열효율	80
송전선로	90(95)	90(95)				
전철용 변전소	95	98	기관차	85	중기효율	11
전차선	90	95	전달효 율	80	기관효율	80
기관차	85	80				
전선에 유효하게 이용되는 에너지	24(26)	25(27)		20		5

표 2.2 동력차별 에너지 소비 실태

구 분	전기기관차(a)	디젤기관차(b)	대비%(a/b)
(1,000톤 - km)			(영차 기준)
- 평탄 구간	7.6ℓ (28kWh)	10.1ℓ	감 25%
- 전선 구간	8.2ℓ (30kWh)	10.9ℓ	감 25%

표 2.3 여객수송 수단별 에너지소비 원단위 비교

(단위 : kcal/인-km)			
철도(전기)	영업용 버스	자가용 승용차	항공
101	179	602	430
(1)	(1.77)	(5.96)	(4.26)

이러한 동력비 절감과 관련하여 철도청은 2010년까지 전 노선의 60%를 전철화 할 경우 연간 271억원 가량의 총 동력비를 절감할 수 있을 것으로 전망하고 있다. 즉, 철도청의 연간 유류 사용량 (321,468kl) 중 약 193백만kl의 유류를 대체할 수 있을 것으로 추정되므로 271억원(193백만kl×25%×562억원 = 271억원)가량의 동력비를 절감할 수 있다고 추정된다.

2.1.2 에너지 수급관리 현황

우리 나라 수송수단별 에너지소비를 보면 철도(디젤기관차), 자동차, 해운, 항공기 등은 순수한 유류를 사용하고 있지만 전기철도는 복합에너지(수력, 석탄, 가스, 유류, 원자력)를 사용하고 있다. 전기철도에 에너지를 공급하는 발전설비는 복합에너지(수력, 석탄, 가스, 유류, 원자력)를 사용하는 설비로 구성되어있으며, 약 9.9%는 유류를 사용하고 있어 유류 의존도가 극히 낮을 뿐만 아니라 2015년까지 약7.6%로 낮출 계획인 것으로 조사되었다.

에너지원별 발전량을 살펴보면 그림 1과 같이 원자력 40.1%, 석탄 37.3%, 가스 11.1%, 석유 10.3%, 수력 1.4%로서 석유중심에서 원자력 등 다원화로 전력을 생산하고 있는 것으로 조사·분석되었다.

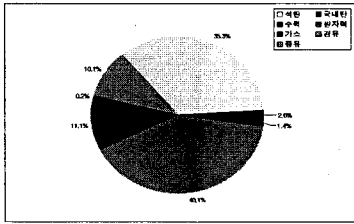


그림 1. 에너지원별 발전량

2.1.3 동력비 유지비 등 경상비 검토

전기차는 디젤차에 비하여 동력비가 약 30% 절감되며 유지보수비가 저렴하다. 일본철도에서 전철화한 후 효과를 검증하기 위하여 환산차량 백만키로당 동력소비량과 환산차량 키로당 동력비를 조사·분석한 결과 표 2.4와 같이 분석되어 약28.7%의 수송경비가 절감된 것으로 나타났다.

표 2.4 환산차량 키로당 동력비 비교

구분	전기			디젤			비교
	기관차	농차	계	기관차	농차	계	
환산차량 (백만키로)	13,796	10,043	23,839	2,823	3,028	5,851	
동력소비량 (kWh, kl)	2,281	2,281	4,950	2,286	424	710	
동력비(천만)	12,893	2,671	27,991	3,869	5,737	9,606	
환산키로당 동력비(10원)	0.94	1.50	1.17	1.37	1.89	1.64	△ 28.7%

연도별 운전용 연료단가 변동추이를 조사·분석한 결과 표 2.5에 의하면 디젤기관차 운전용 경유는 43.1%, 전기기관차 운전용 전력요금은 21.2%씩 매년 인상된 것으로 나타났다.

표 2.5 연도별 운전용 연료단가 변동추이

(단위 : l, kWh, 원)

구분	연도	1995	1996	1997	1998	1999	2000	인상율 (%)	
								(95-00)	연평균
경유		198.00	258.56	261.35	354.28	387.38	511.46	258.3	43.1
전기		53.52	56.65	58.93	63.47	64.00	68.00	127.0	21.2

2.1.4 보수율, 운용율 증대에 따른 효과

보수율, 운용율을 비교하기 위해 먼저 디젤 및 전기 동력차의 내구연한을 조사한 결과 기관차의 경우 표 2.6과 같이 전기기관차는 30~40년, 전기동차는 25년의 내구연한을 가지고 있는 반면 디젤 기관차는 25년, 디젤동차는 20년의 내구연한을 가지고 있다.

표 2.6 동력차별 내구연한 비교

(단위 : 년)

구분	기관차		동차		비고
	전기	디젤	전기	디젤	
대형	40	25	25	20	(EL:8000)
중소형	30	25	25	20	(EL:8100)

전기기관차는 디젤기관차에 비해 가·감속도와 견인 및 제동특성이 좋고, 점착계수가 커서(EL은 0.30~0.32, DL은 0.26~0.28)견인력이 크므로 같은 운전조건에서 약30%이상의 속도향상과 수송량에 따라 차량의 분할합병이 용이하고, 급수와 급유 없이 장거리운전이 가능하여 차량의 운전효율이 높아짐에 따라 차량의 생산성을 나타내는 일차(日車)키로가 증가되므로 같은 물량을 수송하는데 소요되는 차량수가 적어지는 것으로 조사·분석되었다. 즉, 차량의 회차율이 증대되어 차량운용효율을 높일 수 있는 장점을 가지고 있다. 표 2.7과 같이 일본철도에서 조사·분석한 결과 전동차의 1차량 1일 주행키로(이하 일차키로)는 디젤동차의 약1.21배이고, 전기기관차는 디젤기관차의 약 1.73배 가량 되는 것으로 나타났다.

표 2.7 1차량 1일 주행키로(일차키로) 추이

(단위 : km)

연도별	전기기관차 (a)	디젤기관차 (b)	대비 (a/b)	전기동차 (c)	디젤동차 (d)	대비 (c/d)
1960	293	222		399	334	
1961	313	223		405	366	
1962	309	221		418	385	
1963	307	217		421	396	
1964	313	208		414	397	
1965	302	196		428	396	
1966	298	180		432	391	
1967	305	181		437	387	
1968	313	181	1.73	462	382	1.21
평균	306	203	1.51	424	382	1.12

그러므로 우리나라 철도 개통이래 철도의 전철화는 철도를 움직이게 하는 동력을 증기에서 디젤 그리고 전기로의 변화를 그리고 동력을 디젤에서 전기로 바꿈에 따라 철도수송의 대용량, 고속, 저비용 체제로 전환하여

철도차체의 경쟁력을 높이는 교통수단으로의 변화를 갖게 되는 것이다.

3. 에너지 이용효율 평가방법의 고찰

3.1 기존의 평가

종래 전기철도는 에너지 소비를 표현하는 방법은 ① 1차량당 1[km] 주행하는데 몇 [kwh] 필요한가를 나타내는 [kwh/Car · km], ② 차량중량 1[t]당 1[km] 주행하는데 몇[Wh] 필요한가를 나타내는 [Wh/ton · km], ③ 사람 1명을 1[km] 주행시키는데 몇[Wh] 필요한가를 나타내는 [Wh/인 · km]가 주로 사용되고 있다. ①에 대해서는 기존의 선로를 주행하는 차량에 탑재되어 있는 전력계와 차량주행거리에 의해 계산이 가능하다. 따라서 간이로 계산이 가능하기 때문에 운영자가 차량의 에너지 절약 가능성을 검증하는 경우에 사용되는 경우가 많다. 동일 선로구간에 저항제어차, 초퍼제어차, VVVF 인버터 제어차가 도입되어 있을 경우 어느 제어방식의 차량이 에너지 절감이 우수한 것인가를 검증하는 경우에 실질적으로 비교할 수 있는 장점이 있다. ②의 경우 차량제작사가 새로운 제어방식 차량을 제작하는 경우 기술적으로 차량 1[ton]을 움직이는데 필요한 에너지를 종래 방식 차량과 비교할 때 이 방식으로 평가한다. 리니어 모터 지하철의 평가를 수행할 때 회전형 모터차와의 비교를 하기위해 동일한 차량을 제작하여 시험선을 주행하여 비교하는 경우가 있다. ③은 전기철도의 에너지 절약 성능을 다른 교통수단과 비교하는 경우 가장 중요한 지표로 삼는다. 대도시의 통근선로와 지방의 한산한 선로에서는 차량의 평균 혼잡을 값이 매우 다르며 영업선로에서 승차인원을 정확히 측정하여 주행조건을 엄밀하게 설정함에는 한계가 있다. 따라서 현재 상황에서는 차량의 주행거리, 승객의 승차실적 등의 설계에서 환산하여 구한다.

통상적으로 차량의 크기가 작은 신교통에서는 [kWh/c · km]가 유리하며 차량의 크기가 큰 VVVF 인버터제어차에서는 [Wh/t · km]가 유리한 것으로 분석되고 있다. [Wh/인 · km]는 정확한 승차인원이 불명확하므로 환산치를 적용한다.

3.2 효율에 의한 평가

전기철도 이외의 교통기관과의 에너지 절약 실적을 검토하는 경우 동일한 차원에서 검토가 필요하다. 전기철도에서는 3.1절에서와 같은 전력량으로 [Wh]를 중심으로 한 단위를 사용하고 있지만 예를들면 자동차에서는 가솔린 1[l]당 몇 [km]주행 가능한가를 표시하는 [l]를 중심으로 한 단위를 사용하고 있다. 이러한 단위를 동일 차원으로 나타내는 시험으로서는 원유단가에서의 효율로 환산하는 방법이 있다.

여기서 전기철도의 역행효율로는 (관성에너지+운동에너지)/(차량주행 에너지)로, 회생효율은 (회생전력량)/(역행전력량)으로 정의한다. 관성·운동에너지는 계산에 의해 구하며 차량주행 에너지는 실제의 주행에서 구한다.

3.3 유효에너지(Exergie)에 의한 평가

전기철도, 자동차를 주행시키는 것은 어느 정도의 원유에 의한 발열량이 필요한가를 계산하는 방법도 고려할 필요가 있다. 예를들면 자동차는 가솔린 1[l]로 10[km] 주행한다고 하면 가솔린 1[l]의 발열량은 원유에서의 정제효율을 87%라 하면 10,810[kcal]이므로 1[km]주행시키는데는 1,018[kcal]필요하게 된다. 이에 대하여 전기철도는 승객 1인을 1[km] 주행시키는데 20[Wh]필요하다면 1[kWh]당 발열량을 2,250[kcal]로 45[kcal]의 에너지가 필요하다는 결과를 얻을 수 있다. 이 방법에 의해 동일한 1[km]를 주행시킬 때 필요한 발열량으로 에너지 특성에 대한 비교가 가능하다.

그러나 자동차는 원유에서 90%정도의 효율로 가솔린으로 발열시켜 구동시키는데 대하여 전력은 원유를 전기로 변환하여 송전하여 이용하므로 도중에 많은 에너지 변환 손실이 생긴다. 따라서 에너지 환산에 있어도 유효에너지에 대한 정의가 필요하다. 유효에너지를 정의하는 단위로써 'exergie'가 사용되고 있다. 이것은 연료에 포함되는 화학에너지는 직접 기계에너지로 변환하는 것은 어려우나 전기에너지를 거쳐 기계에너지로 바꿀 수 있다. 이 경우 연료는 엑서지를 가지고 있다고 말한다.

즉 엑서지 E는 다음과 같이 정의된다.

$$E = Q \times (1 - T_0 / T_h)$$

여기서, Q : 열원의 발열, T_h : 열원의 온도, T_0 : 주위 온도

따라서 각 교통기관의 1[km] 주행에 필요한 엑서지에 의해 성에너지 특성을 비교 분석할 수 있다.

표 3.1에 각 교통기관 시스템이 1[km] 주행한 경우에 필요한 에너지 및 엑서지 계산결과를 나타낸다.

표 3.1 각 시스템의 1[km]주행시의 에너지

구 분	에너지 [kcal]	유효에너지 [kcal]
가솔린 자동차	1,081	105
전기자동차	765	193
리니어 지하철	62	15
VVVF 제어차	39	14

단, 자동차는 가솔린 1[l]로 10[km] 주행

표 3.1의 결과에서 전기철도는 자동차에 비해 필요로 하는 에너지가 작으며 유효에너지인 엑서지로 비교하여도 작아 에너지의 유효이용의 관점에서 보아 우수한 것으로 나타났다.

3. 결 론

에너지 효율의 새로운 평가방법에 대하여 원유로부터 환산하는 효율 계산방법과 필요 에너지, 엑서지에 의한 평가 방법을 제안하였는데 어떠한 방법을 적용해도 전기철도의 에너지 효율성에 대한 우수성을 입증할 수 있었다. 에너지 유효이용의 관점에서는 유효 에너지인 엑서지를 적용하는 것이 타 교통기관과의 에너지 효율에 대한 비교에 보다 정확성을 기할 수 있을 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 창상훈, "전기철도용 전력에너지 저장장치 도입을 위한 기초연구", 한국철도기술연구원, 2005
- [2] 전기철도에서의 성에너지 기술조사전문위원회, "교통과 에너지", 일본 전기학회, 제597호, 1996
- [1] 峠田, "エクセルギー 講義", 태양에너지 연구소, 1986
- [2] 平田, "省エネルギー論", ohm사, 1994