Journal of the Korean Society of Civil Engineers
Vol. 34, No. 4: 1261-1267/ August, 2014
DOI: http://dx.doi.org/10.12652/Ksce.2014.34.4.1261

ISSN 1015-6348 (Print)
ISSN 2287-934X (Online)
www.kscejournal.or.kr

Transportation Engineering **교통공학**

철도노선의 생애주기비용에서 노반건설비와 에너지비용의 상대적 비중 분석 - 경부고속철도 사례를 중심으로

서선덕* · 김정현**
Suh, Sunduck*, Kim, Jeong Hyun**

Comparison of Relative Weights of Cost for Road-bed Construction and Energy on Life Cycle Cost of Railroad -in Case of Seoul-pusan High Speed Rail

ABSTRACT

It is generally recognize that the weight of energy cost for railroad alignment in the life cycle cost is higher than that for roadway. This study analyzed the relative weights of railroad road-bed construction cost and energy cost in the case of Seoul-Pusan High Speed Rail. Recently, the optimization of railroad alignment with computerized methodology has been studies. The optimization is supposed to aim the minimization of life cycle cost including the energy cost as well as the minimization of the construction cost. The operation period of the Seoul-Pusan High Speed Rail is limited to ten years, then various future operation scenario were developed for the next 20 years. The weight of energy cost is estimated 10~30% of the construction cost by scenario, and it is lower than the figure generally expected. It may be meaningful to provide the method to include the energy cost in the railroad alignment optimization.

Key words : Rail route optimization, Rail construction cost, Rail operating cost, High speed rail

초 록

철도노선은 도로노선과 달리 운행비용, 특히 에너지비용이 전체 생애주기 비용에서 차지하는 비중이 높은 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 경부고속철도의 사례를 중심으로 철도 노반건설비와 에너지비용의 상대적 비중을 분석하였다. 이는 최근 활발하게 연구가 이루어지고 있는 전산화된 철도선형 최적화가 단순히 건설비 최소화만을 목적으로 할 수 없으며, 에너지 비용을 포함한 전반적인 생애주기 비용의 최소화를 목표로 하여야 함을 의미한다. 경부고속철도 운행실적이 아직 10년에 불과하기 때문에 향후 20년간의 운영 시나리오를 다양하게 설정하여 분석한 결과, 에너지비용이 건설비용의 10~30% 수준으로 나타났으며, 이는 일반적으로 알려진 비중보다 낮은 수치이다. 철도 선형 최적화를 위한 방법론 정립에 있어 에너지 비용을 고려할 경우, 그 상대적 비중을 고려할 수 있는 방안을 제시한데 본 연구의 의미가 있을 것이다.

검색어 : 철도노선 최적화, 철도건설비, 철도운영비, 고속철도

* 한양대학교 교통시스템공학과 교수 (Hanyang University · sunduck@hanyang.ac.kr)
** 정회원 · 교신저자 · 한국철도기술연구원 책임연구원 (**Corresponding Author** · Korea Railroad Research Institute · kimjh@krri.re.kr)

Received March 10, 2014/ **revised** March 21, 2014/ **accepted** June 2, 2014

Copyright ⓒ 2014 by the Korean Society of Civil Engineers
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 연구의 개요

철도노선의 경우 도로노선과 달리 운행비용, 특히 에너지 비용이 전체 생애주기비용(Life Cycle Cost; LCC)에서 차지하는 비용이 높다고 이해가 되고 있기 때문에 도로설계와는 또 다른 추가적인 요소에 대한 고려가 필요하다. 즉, 철도노선 계획에 있어, 공사비뿐만 아니라 에너지비용을 포함한 운영비 규모도 사업의 타당성을 판단하는 중요한 요소인 것이다.

이러한 배경에서 철도노선의 종·횡단 설계에 따라서 토공량등 초기 노반공사비의 규모를 생애주기 동안 발생할 에너지 비용을 LCC로 비교하여 이들 2개 항목의 상대적인 비중 또는 중요성을 실제적인 철도운영상황에 대하여 다양한 시나리오 하에서 하고자 한다.

철도노선설계의 중요변수들 중에서 노선의 종·횡단 선형 및 노반공사비와 에너지소모에 영향을 미치는 요소들을 확인하고, 노반공사비와 에너지 소모의 상관관계를 실제 기존의 노선에 대해서 분석하는 것이 본 연구의 구제적인 목적이다. 철도노선설계는 종·횡단의 설정 이외에도 다양한 변수와 절차가 작용을 하지만, 현재 진행중인 최적노선설계가 궁극적으로 지형상의 노선의 종·횡단의 위치를 최적화하는 것이기 때문에, 종·횡단의 노선설계에 따른 노선공사비에 초점을 맞추었다.

이를 위해서 다음의 사항들을 확인하여야 한다.

① 노선공사비와 에너지소모에 영향을 주는 철도노선설계의 주요 설계변수
② 설계변수에 따른 종·횡단의 노선설정에 따른 노선공사비와 에너지 소모의 이론적인 사항,
③ 노선공사비와 에너지 소모의 상관관계를 LCC로 분석할 수 있는 개념 정립
④ 정립된 개념을 활용한 실제 철도노선에서의 공사비와 에너지 소모의 크기의 범위 확인
⑤ 다양한 운행상황에 대한 노반공사비와 에너지비용의 비중의 범위 확인

2. 문헌고찰

2.1 철도노선 최적화와 에너비 비용

철도노선상에서의 에너지 최적화 운행 문제에 대해서는 활발한 연구가 있어 왔으며, Wang et al. (2011)에 잘 정리가 되어 있다. 또한 주어진 노선의 구배특성 들에 대해서 에너지 최적 열차운전을 연구한 것으로는 Golovitcher and Liu (2003)의 문헌을 예로 들 수 있다. Feng, et al. (2013)은 에너지 절약 연구를, 열차운행(coasting), 궤도 선형, 차량 성능, 그리고 시스템 운영의 측면에서 연구된 각종 논문을 검토한 바 있다.

새로운 노선의 최적노선설계문제는 도로부문에서 상대적으로 일찍 시작되어 평면 곡선 및 종단곡선을 조합하여 가장 적은 공사비 또는 토공량을 줄일 수 있는 선형을 도출하는 방식으로 진행되어 왔다. 대부분의 이러한 모형은 궁극적으로 노반공사비의 최소화가 그 목적함수 이었다. 최근 철도에서도 공사비뿐만 아니라 운행비 및 유지보수비를 최소화 하는 노선의 설계를 위한 수리모형들이 작성이 되고 연구결과가 보고가 되고 있다.

철도의 경우, 공사비를 최소화하는 노선특성에다 에너지를 최소화하는 노선특성을 같이 고려 하는 것이 매우 중요한 사항이 된다. 이는 생애주기 동안 본다면 에너지 비용이 시설비용보다 높을 수 있다는 것도 매우 중요한 이유가 된다. 전통적으로 채택이 되고 있는 도시철도에서의 Positive Hump를 사용하는 설계 관행 이외에도 Bababeik and Monjajjem (2012)의 연구는 이러한 노력의 한 예라 할 수 있다. 그러나 여전히 모형의 구조를 보면, 에너지 최적화 열차운전 형태가 명시적으로 고려되고 있지는 못한 것을 알 수 있다. 또한 에너지 최적화 열차운전을 다루고 있는 연구들에서는 주어진 노선형태하에서의 최적 운전행태를 확인할 뿐, 노선설계변수를 결정변수로 다루고 있지는 않다. 따라서 현실적인 철도설계규칙에 근거한 철도공사비와 에너지최적화 열차운전형태를 동시에 고려하는 통합모형 등의 개발과 해석이 중요하다고 하겠다. 이와 같은 통합모형개발의 노력은 Shin (2013)에서 확인할 수 있다.

이러한 연구들에서 보면, 철도 노선설계과정에서 에너지 비용을 고려하는 것이 중요하고, 열차의 운전방법에 따라 에너지 비용이 차이가 날 수 있다는 것을 알 수 있다. 하지만 명시적으로 에너지 비용이 생애주기비용에 얼마만한 비중을 차지하는지는 제시하고 있지 못한 것을 알 수 있다.

2.2 철도부문 생애주기비용 분석

생애주기비용분석(Life Cycle Cost Assessment; LCA) 또는 생애주기분석은 최근 정책 의사결정에 많이 사용되고 있으며, 철도부분에서도 예외는 아니다.

Chang and Kendall (2011)은 캘리포니아 고속철도의 공사과정에서 각 요소별로 발생하는 모든 환경오염 물질과, 운행으로 절감되는 내용을 분석하여 수명기간 동안의 대기오염 물질의 대차대조표를 만들었다. Vandanjon et al. (2012)는 상이한 노선형태(터널등)에 따른 공사비와 운행비들을 고려한 LCA 방법을 제시하여, 노선 형태를 비교하는 절차를 설명(곡선등)하고 있다. Angeles (2011)은 LCC모형을 터널건설대안의 평가에 적용하고 있으며, Stripple and Uppenberg (2010)은 철도의 각 요소별 에너지 및 대기오염량을 LCA를 통해서 분석하고 있다. Faithful Gould (2012)는 노르웨이 고속철도의 각종 노선대안을 평가한 자료로서, LCC를 사용하여 시설대체비, 유지보수

비, 에너지 비용을 비교하고 있다. 하지만 실제 자료를 사용한 것은 아니고 예측자료를 사용하였으며, 다양한 가정에 의존한 자료이다.

이들 문헌고찰을 통하여, 철도운영과 관련하여 에너지 소모를 최소화할 수 있는 운전행태에 대한 연구가 진전을 보고 있으며, 철도노선의 종·횡단을 최적조합을 통해 토공량/공사비 최소화 노력은 도로 설계에서와 같이 많이 진행이 되고 있다. 그리고 에너지 소모를 최소화 할 수 있는 철도노선설계 방법에 대한 연구가 많이 진행이 되고 있으며, 철도의 건설, 운영의 전체에 걸쳐 공사비(대체공사비), 유지보수비, 에너지 및 대기오염에 대한 LCA에 대한 최근의 많은 관심과 연구가 있어 왔다.

그러나 이러한 다양한 연구노력에도 불구하고, 본 연구에서 추구하는 질문, 즉 생애주기로 보았을 때 초기 노반공사비와 에너지 비용의 상대적 중요성이나 비중에 대해서는 명시적으로 제시한 연구가 없음을 알 수 있었다.

2.3 문헌고찰 결과

도로 및 철도 건설계획 수립에 있어 노선 및 선형의 최적화를 위한 연구는 도로부문에서 먼저 이루어졌다. 도로는 운영특성상 전체 생애주기에서 건설비가 차지하는 비중이 절대적이나, 철도는 운영비가 차지하는 비중이 상대적으로 매우 크다는 것이 일반적 인식이며, 이에 따라 운영비 중 에너지 비용의 최적화에 대한 연구가 진행되어 왔다. 그러나 철도의 전체 생애주기비용에서 에너지 비용이 차지하는 비중에 대한 명확한 분석은 이루어지지 못하였다. 철도건설계획 수립에 있어, 건설비와 더불어 에너지비용의 상대적 비중을 분석함으로써 철도사업의 전체 생애주기비용을 최적화할 수 있는 방안을 모색할 필요가 있을 것이다.

3. 분석방법론

3.1 분석의 전제

노선설계에 근거한 노반건설비와 에너지 비용을 생애주기비용에 근거하여 비교하기 위하여 같은 전제조건을 사용하였다.

① 철도 노선의 생애주기 : 30년
② 비용 현재가치화 기준년도 : 2004년
③ 할인율 : 5.5%
④ 연도별 물가 : 소비자물가지수로 보정

3.2 고려 대상 건설비용 및 에너지비용

노선의 설계와 관련이 직접적으로 있는 비용은 노반공사비와 용지비이며, 시스템 비용도 노선의 거리에 일정부분 비례한다고 할 수 있다. 노반공사비에는 토공, 교량, 터널 및 입체 공사비가 포함이 될 수 있다. 노반공사비와 시스템비용은 그 민감도에서 노선의 설계에 대응하는 정도가 다르기 때문에 다양한 시나리오를 통해서 분석을 시행하는 것이 필요할 것이다. 따라서 본 연구에서는 노반공사비만을 노선설계에 따라 직접적인 영향을 받는 비용으로 간주하였다.

에너지 비용은 통상 요소별로 구분되어 보고가 되고 있지 않다. 차량기지운행 또는 기지운행비용, 전체 노선운행 등 총에너지 비용 중에서 운행회수와 관련된 부분을 구분하여, 다양한 운행회수에 대하여 생애주기비용을 분석하는 것이 필요할 것이다. 기지운행, 역사 운행 등으로 인한 에너지 비용은 별도로 고려하는 것이 바람직 할 것이나 본 연구에서는 이를 구분하지는 못하였다. 또한 열차의 운전방식과 관련이 있는 항목들을 별도로 분리를 하기가 어렵기 때문에, 에너지 비용은 전체적인 비용을 사용하였다.

4. 사례적용

개발된 생애주기비용평가 모형의 실제 철도노선에 대한 적용은 경부고속철도의 서울-부산구간을 대상으로 하였다.

4.1 공사비

경부고속철도의 공사비는 1992년부터 시작해서 2004년 4월 개통 까지 공사계획에 따라 투입이 되었으나, 이러한 각 연도의 투입비용의 상세내역은 잘 알려져 있지 않다. 본 연구에서는 매

Table 1. Construction Cost by Type (Seoul-Pusan High Speed Rail)
(unit : million won)

	2nd Revision - Phase 1	4th Revision - Phase 2
Land	834,730	942,103
Road Bed	8,809,666	3,766,797
Track	928,688	537,491
Building	596,582	280,034
Rolling Stock	2,710,071	0
Depot	715,653	202,192
Electricity	997,581	432,393
Communication	558,176	287,972
Signal	455,629	314,406
Design	237,456	153,402
Supervision	440,007	210,081
Facility Aux.	43,865	10,046
Project Management	210,738	29,578
R&D	67,843	27,300
Facility Maintenance	732,551	0
Connecting Line	85,800	0
Electrification	10,800	0
Cultural Asset	(design)	19,895
Total	18,435,836	7,213,690

Table 2. Transport Record (Seoul-Pusan HSR) (Korea Railroad et al. 2013)

Yr.	# of Travel	1,000 veh-km	# of Passenger	1,000 Pax-km
2004	96	7,440	1,491,984	334,898
2005	100	10,723	2,992,370	692,693
2006	104	11,218	3,685,563	838,213
2007	100	11,616	4,114,379	935,287
2008	104	11,960	4,395,510	988,213
2009	106	12,063	4,506,438	989,374
2010	120	13,261	5,610,085	1,253,208
2011	130	17,432	9,699,181	2,283,436
2012	130	19,264	10,383,160	2,441,923

Table 3. Energy Consumption (Seoul-Pusan HSR)

Yr.	Quantity (KWh)	Cost (mil. won)	won /KWh
2003	734,912,038	51,062	69.48
2004	268,211,648	22,747	84.81
2005	369,771,668	29,068	78.61
2006	375,011,509	29,304	78.14
2007	390,974,006	30,669	78.44
2008	417,015,282	32,894	78.87
2009	481,028,706	35,687	74.18
2010	558,808,165	46,308	82.86
2011	741,337,434	64,927	87.58
2012	740,746,813	74,707	100.85

연도별 투입내역이 큰 영향을 미치지 않을 것이라는 전제하에, Table 1과 같은 개통까지의 전체 금액을 활용 하였다.

4.2 운행내역 및 에너지 비용

한국철도공사에서 발표한 연도별 경부고속철도의 수송인원과 수송 인-Km와 수송에너지 사용량은 Table 2와 Table 3과 같다.

경부고속선의 열차-Km가 2012년 19,264,499.3 인 것을 감안하면, KWh/열차Km는 38.45 KWh이고 원/열차Km는 3878.0이 된다. 이는 현재의 경부고속선의 노반상태, 운행형태 및 운전행태에 따른 원단위이라고 할 수 있다.

4.3 생애주기 비용의 계산

생애주기비용을 계산하는 과정은 다음과 같다.

① 2004년 기준으로 에너지비용을 환산한 결과는 Table 4와 같다.

Table 4. Energy Cost (2004 value)

Yr.	Quantity (1,000 KWh)	Cost (Current) (mil. won)	Cost ('04 value) (mil. won)
2004	268,212	22,747	22,747
2005	369,772	29,068	31,361
2006	375,012	29,304	31,805
2007	390,974	30,669	33,159
2008	417,015	32,894	35,368
2009	481,029	35,687	40,797
2010	558,808	46,308	47,393
2011	741,337	64,927	62,874
2012	740,747	74,707	62,824

② 경부고속철도 1단계 노반공사비를 확인한 결과, 4조3956억으로 나타났다. 노반공사비는 초기에 투입이 되기 때문에, 2004년 가격으로 환산하기 위해서는 CPI를 사용하여 현실화 시키는 작업이 필요다. 그러나 이 통계는 '92년 개통이후 누적된 금액으로서 매년 투입금액이 상이하여 2004년 기준으로 환산하기 위해서는 추가적인 정보가 필요하나, 그러한 정보가 구득이 곤란하여 우선 2004년 가격으로 간주하고 분석하였다.

③ 경부고속철도 2단계 공사는 2010년에 완료되어 11월에 개통이 되기 때문에, 2단계의 추가공사비 4조 4110억원 (8조 8097억원에서 4조 3956억원의 차이)이 2010년에 발생하는 것으로 간주하였다.

④ 2012년이후의 에너지 비용은 2012년도의 것으로 고정하거나(대안 1) 2005년부터 2012년까지의 증가율을 2012년이후에 반영한 경우(대안 2) 등 2가지를 고려하였다.

이러한 결과는 결국, 장래에 대한 다양한 운행규모에 대한 시나리오 분석이 필요하다는 것을 논증하는 것이다. 현재 서울-시흥구간이나 기타 몇몇 구간에서 기존선을 공용하는 구간이 있어 경부고속철도는 복선 신규노선의 이론적인 용량을 활용을 하는데 제한이 있는 게 사실이다. 하지만, 그러한 제약을 극복한 상태에서 복선 고속철도가 제공 가능한 용량을 어느 정도 활용하는 운행을 하는가에 대한 다양한 시나리오를 검토하여, 노반공사비와 에너지 비용의 상대적인 비중을 검토하였다.

4.4 시나리오 분석

현재의 경부고속철도의 열차는 Table 6과 같이 운행되고 있다.

이러한 운행특성, 즉 Km/열차, 인-Km /횟수, Km/인, KWh/열차-Km, 및 KWh/인-Km을 고정시킨 상태에서 경부고속철도의

Table 5. Road bed Construction and Energy Costs ('04 Price)
(unit : million won)

Yr.	Road bed Const. Cost	Energy Cost	
		Alt. 1	Alt. 2
2004	4,395,657	22,747	22,747
2005		31,361	31,361
2006		31,805	31,805
2007		33,159	33,159
2008		35,368	35,368
2009		40,797	40,797
2010	4,414,009	47,393	47,393
2011		62,874	62,874
2012		62,824	62,824
2013		62,824	69,379
2014		62,824	76,618
2015		62,824	84,613
2016		62,824	93,442
2017		62,824	103,193
2018		62,824	113,960
2019		62,824	125,852
2020		62,824	138,984
2021		62,824	153,486
2022		62,824	169,502
2023		62,824	187,189
2024		62,824	206,721
2025		62,824	228,292
2026		62,824	252,113
2027		62,824	278,420
2028		62,824	307,472
2029		62,824	339,556
2030		62,824	374,987
2031		62,824	414,115
2032		62,824	457,326
2033		62,824	505,047
2034		62,824	557,746
2035		62,824	615,945
	8,809,666	1,813,270	6,222,285
	8,132,277	772,162	1,889,162

용량이 증가되고, 용량증가분 만큼 운행횟수가 증가될 경우에 대해서 시나리오 분석을 시행하였다. 이와 같이 열차운행 패턴을 고정한다는 것은, 현재의 수송패턴, 차량특성, 및 승객의 특성등을 고정하고 운행횟수에 따른 변화만 고려한다는 것을 의미한다.

첫 번째 분석 시나리오(대안3)는 대안 2에서 용량도달 연도 이후에는 더 이상 운행횟수의 증가가 없도록 제한을 가하는 것이다. 두 번째 시나리오는 용량의 50%의 운행회수를 유지하는 것이고(대안 4), 세 번째 시나리오는 용량의 80%가 생애주기 동안 운영되는 것을 가정한 것이다(대안 5). 경부고속철도는 설비의 능력으로는 최소시격 4분이 가능하고 하루에 운영시간을 15시간으로 고려하면, 이론적으로 하루에 450회의 운행용량을 가진다고 볼 수 있다.

대안 3의 경우, 2025년에 용량에 도달하여 에너지 비용은 총 217,453백만원이며,[1] 대안 4의 경우, 매년 103,193백만원의 에너지 비용이 소모되며,[2] 대안 5의 경우, 매년 173,976백만원이 소모된다.[3]

Table 6. Seoul-Pusan HSR Operation

Yr.	# of Trvl	Km /Train	1,000 Pax-Km/Trvl	Km /Pax	KWh/ Train-Km	KWh /Pax-Km
2004	96	212.32	3,489	224.47	36.05	0.80
2005	100	293.78	6,927	231.49	34.48	0.53
2006	104	295.52	8,060	227.43	33.43	0.45
2007	100	318.25	9,353	227.32	33.66	0.42
2008	104	315.07	9,502	224.82	34.87	0.42
2009	106	311.78	9,334	219.55	39.88	0.49
2010	120	302.75	10,443	223.38	42.14	0.45
2011	130	367.38	17,565	235.43	42.53	0.32
2012	130	406.00	18,784	235.18	38.45	0.30
Avg.	112	326	11,246	228	37	0.42

Table 7. Weight of Energy Cost by Alternative

	Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3	Alt. 4	Alt. 5
Weight	20.6%	70.6%	47.3%	37.5%	61.6%
Discounted weight	9.5%	23.2%	17.8%	18.9%	31.1%

Table 7은 이러한 시나리오 분석의 결과를 보여주고 있다. 여기서 비중은 에너지 비용의 노반건설비에 대한 비중을 의미한다.

이 결과에서 보면, 에너지 비용의 노반건설비에 대한 비중이 주장되었던 정도의 중요성을 가지고 있지는 못한 것을 알 수 있다. 본 자문에서 확인된 상대적 비중은 경부고속철도 기술조사에서 고려하였던, 112% (할인시 54%)보다는 크게 못 미침을 알 수 있다. 이러한 이유는 노반공사비가 상대적으로 기술조사 시 보다 많이 증가한 것과, 또한 에너지 비용이 당시에 상정한 것보다 낮아진 것이 원인이라고 할 수 있다.

1) 450/130회 × 2012년 에너지 비용
2) (450×0.5)/130회 × 2012년 에너지 비용
3) (450×0.8)/130회 × 2012년 에너지 비용

4.5 기술조사 결과와의 비교

공사비의 증가와 에너지 비용의 감소가 두 항목간의 상대적 비중이 일반적 예상과는 달리 나타나게 한 원인으로 볼 수 있다.

노반공사비의 경우, 기술조사시의 3조 7964억원에서 8조8097억원으로(1992년과 2004년의 기준연도를 각각 활용) 증가한 반면에, 동일한 기준연도를 각각에 적용하였을 때 에너지 비용은 4조 2422억원에서 2조646억원으로 줄어든 것이 가장 큰 이유라고 할 수 있다. 기술조사 시에는 1993년에서 2028년까지 고려한 금액이고, 본 연구에서는 2004년에서 2039년까지 고려한 금액이다.

에너지 비용에 있어서는, 기술조사에서 서울-부산간의 1회의 열차운행에 소요되는 에너지는 약 24,000KWh정도로 현재 사용중인 16,149KWh보다 약 50%정도 높다. 또한 운행횟수도 1998년 개통 시 181회, 2001년 210회, 2011년 337회, 2018년 407회, 및 2028년 447회로서 현재 운행중인 130회 보다는 높은 수를 보이고 있다. KWh당 에너지 가격은 기술조사 시 1992년46.03원/KWh로서 2004년의 84.81원/KWh와 차이가 있다.

4.6 결과의 일반화

경부고속철도는 계획/설계단계에서 실행과정을 거치면서, 현실적인 각종 제약으로 인해 다수의 타협방안을 수용하게 되었다. 예를 들어 서울-사흥구간이나 여타의 구간에서 기존선 열차와 노선을 공유하게 된 것들이 대표적인 것이 될 것이다. 또한 기존경부선을 고속열차가 운행하기도 하여, 집계된 통계자료로 그러한 개별 열차 운행패턴에 따른 효과를 명시적으로 고려할 수 있는지에 대해서도 의문이다. 열차의 운행 패턴이나 열차의 운행횟수 등이 이러한 제약을 반영한 것이기 때문에, 노선에 계획/설계과정에서 이러한 제한 사항들을 반영한다고 보기는 어렵다.

민감도 분석에서 나타나듯이 운행 상황이나 운전횟수 또는 기타 운전과 관련한 가정에 따라 상당히 다양한 비중 결과를 보이고 있다. 이러한 요소들을 종합적으로 고려하면, 경부고속철도는 개통한지 얼마 되지 않았기 때문에, 본 연구의 결과를 철도노선 설계 일반에 적용하는 데는 주의를 기울여야 할 것으로 판단된다.

1/2단계로 나눈 단계별 개통이나, 현재까지의 개통 이후의 시간이 얼마 되지 않는다는 차원에서 여전히 장래에 대한 다양한 시나리오에 따라서 에너지 비용의 상대적 비중이 변화가 생기게 될 것으로 보인다. 이러한 변화에 대한 효과를 명시적으로 고려하기 위해서는 이론적인 접근과 일반적으로는 가용하지 않은 운영주체의 세밀한 에너지 사용 정보가 필요할 것이다. 본 연구에서 사용한 통계연보 수준의 자료로는 그러한 효과를 명시적으로 분석하는 데에는 한계가 있었다.

또 다른 대안으로 개통한 지 오래된 노선에 대해서 이러한 분석을 시행하는 대안이 있을 수 있으나, 차량 기술의 진화로 인한 효과들에 대한 별도의 분석이 추가로 수반되어야 하는 점들이 본 연구에서 목적하는 질문에 일반적인 답변을 주는 데는 여전히 제약이 있을 것으로 판단된다.

또한 기술조사보고서에서 보듯이 계획/설계 당시에 상정했던 운행패턴이 실제로 지켜지는지에 대해서 장담할 수 가 없는 것도 현실이다. 철도노선설계 시 이론적으로 접근하는 것도 최적설계에 대한 요구조건을 정하는 하나의 방법이 될 것이다. 실제운행결과를 사용했다고 해서 논리적으로 이론적인 접근보다 더욱 현실적인 결과를 제공하지는 않을 것이기 때문이다.

추가적으로 도로와 철도에서의 노반공사비/에너지 비용의 비중이 차이가 나는지, 에너지 최적화 운전패턴이 미치는 영향에 대해서도 많은 질문이 있을 수 있다. 본 연구에서는 철도에서의 노반공사비/에너지 비용의 비중의 차이가 어느 정도 인지를 경부고속철도의 결과를 활용하여 답을 구하고자 하였으나, 그 결과가 일반성을 가지기에는 한계가 있다는 점을 발견을 하였고 반면에 추가적으로 여러 새로운 연구과제를 발굴하게 되었다.

5. 결 론

철도의 최적노선설계 과정에서 노반공사비의 비해서 에너지 비용의 비중이 높기 때문에, 일반적으로 도로에서 사용하는 노반공사비 최소화만을 목적함수로 채택하는 데는 무리가 있다는 통념을 구체적으로 확인해 보는 것이 본 연구의 목적이었다.

이러한 목적을 위해서 간단하게나마, 노선설계에서 자본비와 에너지 비용에 영향을 미치는 요소를 검토하여 보았다. 자본비중에서 노선설계와 직접적인 관계를 가지는 항목은 노반 설계비로 한정하였다. 에너지 비용은 운전방법(감가속패턴), 노선에 따른 열차저항(구배, 곡선, 터널), 및 운행횟수에 비례하는 것으로서, 이를 근거로 하여 노선설계와 에너지 비용의 관계에 대해서 검토를 하였다.

정립된 분석틀에 근거하여 경부고속철도에서 2004년 개통이후 에너지 소모비용을 철도통계연보에서 구득하여 노반설계비와 에너지비용의 상대적 비중에 대해서 LCA를 시도하였다. 분석과정에서 경부고속철도 개통후 운행기간이 현재 8년에 지나지 않고 그 과정에도 2단계개통이라는 운행패턴의 변화도 발생하였기 때문에 자료의 Aggregation효과가 발생하였을 것으로 의심하였으나 별도로 이들 효과를 분리해 낼 수 있는 자료는 구득이 어려웠다. 주어진 자료에 근거하여 장래에 대한 다양한 운행 시나리오를 활용하여 상대적 비중을 분석한 결과, 30년간의 불변가격을 합할 경우, 에너지 비용의 비중은 20%에서 70%, 5.5%로 할인하였을 경우 10%에서 30%수준으로 파악이 되었다.

이러한 결과는 경부고속철도에 대해서는 그 동안 많은 전문가들

이 주장해 왔던 에너지비용의 중요성보다는 크게 낮은 것으로, 예를 들어 기술조사 시 예상했던 110%나 50% (할인 시)보다 크게 낮았으며, 그 원인에 대한 추가적인 검토를 하였다. 공사비의 증가와 에너지 비용의 감소라는 차원에서 주어진 집계된 자료를 가지고 분석결과 계획단계에서 상정한 단위에너지 소모보다 실제 에너지 소모가 적은 것은 객관적으로 확인이 되었고 운행횟수 또한 계획 당시 보다 크게 낮은 것으로 파악이 되었다. 단위 에너지 가격의 효과나 계획당시에 고려한 운전방식과 실제로 사용되어진 운전방식의 차이 등에 대해서는 본 연구에서 분석이 이루어지지는 못하였다.

노반공사비와 에너지 비용의 비중은 운행 상황이나 운전횟수 또는 기타 운전과 관련한 가정에 따라 상당히 다양한 비중 결과를 보이고 있고, 경부고속철도는 개통한지 얼마 되지 않았기 때문에, 본 연구에서 목적으로 하는 일반성을 가지는 답을 도출하는데에는 한계가 있었다. 따라서 여기서 나온 결과를 철도노선 설계 일반에 적용하는 데는 주의를 기울여야 할 것으로 판단된다.

철도노선설계 시 이론적으로 접근하는 것도 최적설계에 대한 요구조건을 정하는 하나의 방법이 될 것이다. 이는 최적노선에 대한 의사결정이 계획단계에서 발생하고, 실제 운행패턴이 상정했던 것과 동일할 것이라는 보장이 없기 때문이기도 하다. 실제운행결과를 사용했다고 해서 논리적으로 이론적인 접근보다 더욱 현실적인 결과를 제공하지는 않을 수 있다는 것을 확인하였다.

References

Angeles, J. V. V. (2011). *The development of a life cycle cost model for railroad tunnels*, Ph.D. Dissertation, MIT, Cambridge, MA, U.S.A.

Atkins Highways and Transportation (2012). *Norway high speed rail assessment study: Phase III, Estimation and Assessment of Investment Cost*, Final Report, London, U.K.

Bababeik, M. and Monjajjem, M. S. (2012). "Optimizing longitudinal alignment in railway with regard to construction and operating costs." *J. of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 138, pp. 1388-1395.

Chang, B. and Kendall, A. (2011). "Life cycle greenhouse gas assessment of infrastructure construction for California's high-speed rail system." *Transportation Research*, TRB, Part D 16, pp. 429-434.

Cheng, J. F. and Lee, Y. (2006). "Model for three-dimensional highway alignment." *J. of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 132, pp. 913-920.

Feng, X, Zhang, H., Ding, Y., Liu, Z., Peng, H. and Xu, B. (2013). "A review study on traction energy savings on rail transport." *Discrete Dynamics in Nature and Society*, Vol. 2013. Hindawi Publishing Corporation, pp. 1-9.

Fwa, T., Chan, F., Chan, W. T. and Sim, Y. P. (2002). "Optimal vertical alignment analysis for highway design." *J. of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 128, pp. 396-402.

Golovitcher, I. M. and Liu, R. (2003). "Energy-efficient operation of rail vehicles." *Transportation Research Part A*, TRB, Vol. 37, pp. 917-932.

Hay, W. W. (1982). *Railroad engineering*, John Wiley and Sons, Inc. New York, N.Y.

Korea Railroad, Korail Airport Railroad and Korea Rail Network Anthority (2013). *Statistical yearbook of railroad, Korea railroad, Korail airport railroad, Korea Rail Network Anthority*, Daejon, Korea (in Korean).

Shin, Y. H. (2013). *Formulation and evaluation of railway optimal alignment design model under energy efficient train control*, Ph.D. Dissertation, Hanyang University, Kyonggi, Korea.

Stripple, H. and Uppenberg, S. (2010). *Life cycle assessment of railway and rail transport*, Swedish Environmental Research Institute, Stockholm, Sweden.

Vandanjon, P. O., Coiret, A. Paslaru, B. M., Fargier, A., Bosquet, R., Dauvergne, M., Jullien, A., Francois, D. and Labanthe, F. (2012). *Practical guideline for life cycle assessment applied to railway project*. LCA 2012, IFSTTAR, Paris, France.

Wang, Y., Ning, B., Cao, F., De Schutter, B. and van den Boom, T. J. J. (2011). "A survey on optimal trajectory planning for train operations." *Proc. of the 2011 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation*, Shanghai, China, pp. 589-594.