LCC 분석을 이용한 대차교환과 자동궤간가변 시스템의 효율성 평가

Effectiveness Evaluation of the Bogie Exchange and the Automatic Variable Gauge System using LCC Analysis

정광우 · 안준용* · 김철수 · 나희승

Kwang-Woo Chung · Joon-Yong An · Chul-Su Kim · Hee-Seung Na

Abstract It is connected with various gauges existing in Euro-Asian continents. Such differences impedes the operation seriously as on the contact of railway tracks of different gauge the cargo must be either transshipped or the running assemblies of rail vehicles must be exchanged. Those operations are costly, time-consuming and require extended infrastructure together with very expensive storage and transshipment facilities at border-crossing point. Moreover, those operations extend transportation time considerably. Therefore, effectiveness of railway transportation systems significantly depends on track gauge change 1435/1520mm, which connects with complicated handling-shifting operations. The paper concerns assessment of effectiveness in strategical rail systems with gauge changing. The paper presents short description of transport system with gauge changing and initial assessment of shifting technologies. Method of system assessment comparison based on Life Cycle Cost model is described here as well.

Keywords : Track gauge change, Bogie exchange, Automatic variable gauge system, LCC analysis, Effectiveness of railway transportation system

초 록 유라시아 대륙에는 다양한 궤간이 존재하고 있다. 이런 차이는 서로 다른 궤간의 접속점에서 화물을 환적하거나 혹은 차량 운행 조립체를 교환하여야 하는 등 철도수송 시스템의 운영에 많은 영향을 준다. 그러므로, 철도 수송 시스템의 효율성은 복잡한 하역 및 교환 기술에 관련된 궤간 극복 방법에 매우 의존한다. 본 논문은 대륙철도 연결을 통한 국제 화물 수송에서 발생하는 1520/1435mm 궤간차이를 극복하기 위한 철도 수송 시스템의 효율성 평가를 목적으로 하였다. 먼저 궤간 변경지점에서 현재 수행되고 있는 수송 시스템을 간략하게 설명하고, 교환 기술에 대한 사전 분석을 수행하였다. LCC 모델에 기초하여 리프트에 의한 대차교환 방식과 자동궤간가변 시스템의 효율성을 비교평가 하였다.

주요어 : 궤간 변경, 대차교환, 자동궤간가변시스템, LCC 분석, 수송 시스템의 효율성

1. 서 론

세계 경제의 글로벌화에 의한 사회적/경제적 요인으로 인하여 유라시아 대륙의 국가간 수출입 화물의 증가는 철도산업 부흥을 위한 좋은 기회의 장을 만들고 있다. 철도를 이용한 화물 수송은 대륙횡단 수송회랑의 특징인 장거리 수송에 특히 적합하며, 다른 수송 수단에 비하여 시간적 측면이나 경제성 측면에서 많은 이점을 가지고 있다. 그러나 철도에 의한 수출입 화물의 자연스러운 흐름을 방해하는 장애중의 하나는 일부 국가에 존재하는 궤간 차이이다. 이런 차이는 서로 다른 궤간의 철도 접속 점에서 화물을 환적하거나 혹은 철도 차량의 운행 조립체를 교환하여야 하는 등 철도 운영의 효율성을 심각하게 저해하는 요인 중에 하나이다. 더욱이, 궤간 차이는 수송 시간에 상당한 영향을 주게되어 철

도 수송의 장점을 희석시킬 수 있으며, 특히 위험물 수송의 안전성에도 많은 영향을 미치게 된다. 이러한 궤간 변경으로부터 제기되는 기술적 그리고 운영적 문제를 해결하고 전체 철도 수송 시스템의 효율성을 제고할 수 있는 최적의 해결책이 요구되고 있다.

서로 다른 궤간 차이를 극복하기 위한 목적의 연구들이 오래 전부터 국내외적으로 수행되었다[1]. 그들 중 하나는 자동궤간가변 윤축을 갖고 있는 궤간가변대차의 개발이다[2-5]. 국내에서도 2008년 한국철도기술연구원에서 화차용 궤간가변대차(KGCW-1)를 개발하여 시험 중에 있다[6]. 그러나 대차교환이나 환적없이 신속하고 안전하게 직결 운행할 수 있는 궤간변환시스템의 기술적 개발뿐만 아니라, 대륙철도 연계에 따른 운영 및 효율화 방안 등에 대한 기술적/경제적 타당성 확보에 관한 연구 또한 시급히 요구되고 있다.

본 연구에서는 궤간 변경지점(1435/1520mm)에서 사용되고 있는 대차교환 방식과 자동궤간가변 방식의 화물 처리과정에 대한 수송 시나리오를 설정하고, LCC 분석을 수행하여 비교 분석하였다. 특히, 유해물질 화물그룹의 수송 서비

*Corresponding author

Tel.: +82-70-8855-1635, E-mail : jyahn@ut.ac.kr

©The Korean Society for Railway 2012

http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2012.15.4.334

스 관점에서 각 시나리오의 비용 효율성 측면을 분석하였다.

2. 궤간 극복을 위한 철도 수송 시스템

2.1 수송 서비스 시나리오

유라시아대륙에서 철도 수송시스템의 화물 이동은 15,000km에 이르며, 적어도 2~3회 이상의 상이한 궤간이 존재한다. 이런 궤간변경지점에서는 수송 화물에 따라 특별한 유형의 서비스를 요구한다. 서로 다른 철도 궤간의 장벽을 극복하기 위한 방법은 하역기술과 교환기술이 이용되고 있다[7].

일반적으로, 하역기술은 서로 다른 궤간의 철도 접속점에서 하나의 궤간의 화차에서 다른 궤간의 화차로 화물 수송을 다루는 것으로, 이런 기술은 화물 종류에 매우 의존한다. 교환기술은 하나의 궤간에서 다른 궤간으로 수송 수단을 교환하는 것으로 이해할 수 있다. 현재 널리 이용되고 있는 교환기술은 복합 스크루 리프트 잭에 의해 차체를 들어 대차를 교환하는 방법과 자동 궤간가변장치를 이용하는 것이다. 리프트 잭에 의한 대차교환방식은 주로 위험물 수송

에 사용되고 있으며, 현재 많은 나라의 국경지점에서 널리 사용되고 있는 방법이다. 수송시스템의 효율성은 화물의 유형에 따라 궤간 차이를 극복하기 위한 적합한 기술을 선택하는 것에 많은 영향을 받는다.

2.2 국내외 궤간가변장치 개발 현황

궤간가변장치 기술은 대륙철도의 통합연계 운행에 필요한 핵심적인 기술로서 시간적 측면이나 비용적 측면에서 경제적인 뿐만 아니라 친환경적인 시스템이다. 유럽을 중심으로 스페인(Talgo RD, CAF BRAVA), 독일(DBAG/Rafil Type V), 폴란드(SUW2000), 일본(RTRI) 등 세계 각국은 대륙철도의 수송효율을 극대화하고, 자국의 물류수송체계에 적합한 철도 네트워크의 확보를 위해 궤간가변장치를 개발하고 상용화중에 있다. 우리 나라의 경우도 남북철도를 연결하고 더 나아가 철의 실크로드를 연계하여 21세기 동북아 교통물류 중심지로 도약하고자 궤간가변장치 KGCW-1을 개발하여 시험 중에 있다. KGCW-1은 해외에서 개발된 궤간가변 장치들과 비교하여 부품의 수, 장치의 부피, 무게, 유지보수 비용이 적도록 설계되어 있으며, 한-러 철도 연결 뿐만 아니라 해외 시장에서도 경쟁력을 갖추고 있다[6].

3. LCC 분석을 이용한 교환방식의 비교

3.1 LCC 분석을 위한 결정 모델

이중 궤간의 극복을 위한 수송서비스의 각 기술은 운영 시간에 관련된 기술적/경제적 기준뿐만 아니라 수송 시스템의 신뢰성과 안전성을 고려한 수송시스템의 평가가 필요하다.

Table 1 Transportation service by freight type

화물 유형	수송 서비스 기술	
	하역기술	교환기술
석유/액화가스	양수, 환적	대차교환, 자동궤간가변장치
컨테이너	환적	대차교환, 자동궤간가변장치
포장화물	환적	대차교환, 자동궤간가변장치
벌크화물	유출	대차교환, 자동궤간가변장치

Table 2 Comparison with overseas gauge-adjustable device

	KGCW-1 (화차)	SUW2000 (화차/객차/동력차)	DBAG RAFIL-V (화차/객차)
모듈형
안전장치	예	아니오	아니오
부품 수(One-side)	9	39	23
윤축 질량(kg)	1535	1700	1750
잠금부 질량(kg)	302	449	499
축 중(ton)	22	20~22.5	23.5
차륜직경(mm)	860	920	920
부품 육안검사	쉽다(벨로우즈 제거 후 가능)	불가능(전 분해 후 가능)	불가능(전 분해 후 가능)
최고운행속도(km/h)	120	100 ~ 200	120
궤간변환속도(km/h)	10 ~ 30	30	10
변환 시 차량하중	정상하중 상태에서 궤간변환	정상하중 상태에서 궤간변환	정상하중 상태에서 궤간변환

기존 표준궤간 윤축 질량(kg) : ($\phi 860$) 1060kg, ($\phi 920$) 1136kg

한국 KGCW-1의 잠금부 질량은 폴란드/독일 시스템과 비교하여 30~40% 경량화

수송 시스템의 경제적 효율성과 신뢰성 사이에는 많은 의존 관계가 존재하며, 중장기 측면에서 수송 시스템의 신뢰성은 경제적 효율성에 심각한 영향을 미치게 된다. 일반적으로 시스템의 경제적 효율성을 측정하는 방법들은 시스템의 신뢰성과 내구성에 관련된 측면을 고려하지 않는다. 그러나 서로 유사한 경제적 효과를 가지고 있지만 서로 다른 특성을 가지고 있는 두 시스템을 비교할 수 있는 효율성 항목은 신뢰성이다. 시스템의 고유 신뢰성을 설명하고 목표로 하는 신뢰성을 얻기 위한 평가 방법은 수명주기비용을 통하여 경제적 효과를 분석하는 것이다[8-11].

3.1.1 분석을 위한 가정

수송 화물그룹은 러시아의 천연자원 수송을 대비하여 유해물질 화물그룹을 선택하였다. 수송경로는 러시아 이르쿠츠크 북방 약 450km에 위치한 코벡트스크 가스전 개발과의 연계뿐만 아니라 향후 컨테이너 수송을 대비하여 노선을 선정하였으며, 이르쿠츠크까지의 노선 중 TKR-TSR과 TKR-TMR-TSR을 경유하는 2개의 노선을 선정하였다. 울란우데는 TSR이 몽골, 중국을 거쳐 한반도 중단철도로 연결되는 길목으로 노선의 종단점으로 선택하였다. Table 3에서 노선 I은 다른 노선에 비하여 수송거리가 가장 긴 특징을 가지고 있어, 수송 거리에 대한 수송 시스템의 영향을 평가하기 위하여 선택하였다. 또한 노선 I은 다른 경로에 비하여 국경 통과 횟수가 가장 적은 특징을 가지고 있다. 노선 II는 다른 노선에 비하여 수송거리가 가장 짧은 특징을 가지고 있지만, 구간변경지점이 다른 노선에 비하여 많이 있는 특징을 가지고 있어, 구간변경지점의 변화에 따른 수송 시스템의 영향을 평가하기 위하여 선택하였다. 수송 수단은 기존 화차와 비교하여 유지보수 비용의 절감, 적재 중량의 증대, 남북철도/TSR/TCR 연계 수송 등의 목적으로 개발된 스윙모션대차 기반의 탱크화차를 선정하였으며, KGCW-1도 이를 기반으로 하고 있다. 구간 가변지점에서 대차교환을 위해 설치되는 스탠드는 현재 KTX 유지보수를 위해 사용되고 있는 동시 인양기를 선정하였다. 비록 KTX 동시 인양기는 국내에서 유지 보수 목적으로 사용되고 있지만, 리프트 잭의 인상 용량이나 동시에 10개의 객차를 인상할 수 있는 능력 등 현재 국외 구간가변지점에 설치되어 운영 중인 리프트 잭과 유사한 사양과 기능을 갖고 있다.

· 수송 시나리오 : 자동구간가변과 리프트 대차교환

· 수송 화물그룹 및 수송량 : 위험물(석유/액화가스), 120만톤/년

· 수송 수단 및 화차 적재 능력 : 스윙모션 대차 기반의 60톤 적재 능력 탱크화차

· 운행 방법 : 셔틀 운행

3.1.2 수송 시나리오의 화물처리 서비스 과정

구간변경지점에서 교환기술의 효율성을 평가하기 위해서는 몇 가지 기술적 지표의 분석이 필요하다. Table 4에는 위험물 수송을 위한 수송 시나리오에서 화물 처리를 위한 서비스 과정에서 발생하는 몇몇 파라미터를 요약하여 나타내었으며, 이에 관련된 자세한 내용은 참고문헌 [12]에 나타내었다.

교환기술의 성능 비교에서 서비스 시간, 1일 최대처리능력과 소요 화차량을 비교한 결과는 자동구간가변시스템이 가장 좋은 결과를 나타내고 있다. 대륙철도를 이용한 위험물 수송에서, 구간(1435/1520mm)차이를 극복하기 위한 방법으로 이용될 수 있는 교환수송 시스템(대차교환과 자동구간가변방식)의 효율성은 구간변경지점에서의 화물연계를 위한 서비스 시간(기관차 교환시간, 10개의 화차로 구성된 그룹별 교환시간, 1그룹내의 대차교환시간, 사전 준비 및 종료 시간 등)에 많은 영향을 받게 되며, 이는 화차의 회귀율에 영향을 주게 되고, 결과적으로 화물 수송에 필요한 소요 화차 수에 영향을 주게 된다[12]. 또한, 구간변경지점에서 소요되는 서비스 시간이 수송 시스템의 효율성에 미치는 영향은 전체 화물 수송 거리가 증가함에 따라 구간 차이의 장벽을 극복하기 위하여 국경역에서 소요되는 시간 몫이 전체 수송 시간에서 차지하는 부분이 감소하기 때문에 자동구간가변 시스템의 효율성은 감소하게 된다. 이러한 영향을 살펴보기 위하여 두 가지 교환기술에 대하여 수송거리 증가에 따른 소요 화차수를 산출하였으며, 이를 백분율로 표시하여 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 1500km 화물수송에서 자동구간가변시스템을 적용한 화차를 이용하면 대차교환방식과 비교하여 약 30%정도의 소요화차 수의 절감을 가져올 수 있다.

3.1.3 LCC 모델 개발

본 논문의 LCC 분석은 교환기술간의 비교 특성을 가지고 있기 때문에 두 가지 수송시나리오에 대하여 동일한 모든 비용 범주는 비용 모델로부터 제외하였다. 예를 들어, 철도 기반시설, 기관차, 탱크등과 같이 두 가지 수송 시나리오에서 동일한 영향을 가지고 있는 일반적인 요소는 LCC 분석범위에서 제외하였다. LCC 모델은 획득비용(AQC)과 소비비

Table 3 Transportation routes and distance

경로	수송 거리[km]			궤간변경 지점
	1435mm	1520mm	합계	
노선 I : 남북철도(경부선-경원선-평라선)-TSR				
부산-서울-원산-햇산-하바로프스크-치타-울란우데	1,327	3,652	4,979	두만강/햇산
노선 II : 남북철도(경부선-경원선-평라선)-TSR-TMR-TSR				
부산-서울-원산-햇산-그로데코보-수분하-만주리-자바이칼리스크-치타-울란우데	2,815	1,085	3,900	두만강/햇산, 수분하/크로데코보 만주리/자바이칼리스크

Table 4 Parameter of shifting technique in route I and II (hazardous material, 1,200,000 tons/year)

구분		노선 I에서 수송 시나리오		노선 II에서 수송 시나리오	
		리프트 대차교환	자동케간가변	리프트 대차교환	자동케간가변
서비스 과정	교환 그룹	10개 화차	30개 화차	10개 화차	30개 화차
	평균 교환시간	200분	15분	200분	15분
	그룹 교환시간	30분	30분	30분	30분
	1일 교환그룹	6개 그룹	32개 그룹	6개 그룹	32개 그룹
	1일 처리능력	60개 화차 (3,600톤)	960개 화차 (57,600톤)	60개 화차 (3,600톤)	960개 화차 (57,600톤)
케간 변경 지점의 장비		10개의 스탠드 (40개의 리프트 잭)	케간 변경을 위한 지상설비	10개의 스탠드*3세트	케간변경을 위한 지상설비 * 3세트
		대차 이동을 위한 3개의 갠트리 크레인 (Q=5톤, L=15.5m)	차륜이동 감시 시스템	대차 이동을 위한 3개의 갠트리 크레인 * 3세트 (Q=5톤, L=15.5m)	차륜이동 감시 시스템 * 3세트
수송 수단	적재 유닛	1435/1520mm 검용 트롤리 스탠드 및 탱크(80.6m³)	탱크(80.6m³)	1435/1520mm 검용 트롤리 스탠드 및 탱크(80.6m³)	탱크(80.6m³)
	화차	1435mm 케도용 대차 1520mm 케도용 대차	자동케간가변 윤축을 장착한 대차	1435mm 케도용 대차 1520mm 케도용 대차	자동케간가변 윤축을 장착한 대차
	화차 회귀일	14.6일	11.3일	18.8일	8.9일
	소요 화차 수	920량	713량	1185량	561량
	교환 지점의 운영 인력	107명	12명	321명	36명

Fig. 1 Percentage decrease of demand for freight in route I

용(POC)으로 개발되었다[13]. 분석을 위하여 시스템의 수명은 30년 운영으로 가정하였다.

$$LCC = AQC + POC \quad (1)$$

Table 5 CBS structure for acquisition cost

획득 비용	리프트 대차교환	AQC ₁₁	1435/1520mm 검용 화차
		AQC ₁₂	10개의 스탠드(40개의 리프트 잭)
		AQC ₁₃	3개의 크레인(Q=5톤, L=15.5m)
	자동 케간가변	AQC ₂₁	자동케간가변 윤축이 장착된 화차
		AQC ₂₂	케간 변경 지상설비
		AQC ₂₃	차륜 이동 감시 시스템

소유 비용은 유지보수 비용과 운영비용 두 가지로 구성된다.

$$POC = MC + OC = (PMC + CMC) + (OPC + UNC) \quad (2)$$

여기서, MC-유지보수비용, OC-운영비용, PMC-예방정비비용, CMC-고장정비비용, OPC-운영인건비, UNC-비가용성비용

예방정비비용은 재료 및 예비품 비용(PMCM_i)과 인건비(PMCL_i)로 구성된다.

$$PMC = TC \times [\sum (PMCL_i + PMCM_i)] \quad (3)$$

$$= TC \times [\sum NPMA_i \times [(MPH_i \times CPH) + PMCM_i]]$$

여기서,

TC - 총화차수

NPMA_i - 수송시스템 수명주기 내에서 i번째 예방정비 활동의 총 수

MPH_i - i번째 예방정비 활동에서 평균 유지보수인시

CPH - 시간당 인시비

ACM_i - i번째 예방정비 활동에서 평균 재료 비용

i번째 성분의 고장정비비용(CMC)은 운영 중에 나타나는 고장과 관련이 있다. 운행 중 수리 때문에, 고장수 결정을 위한 기초는 각 요소의 유지보수 간격 혹은 연간 운행시간에서 나타나는 평균 고장밀도 $z(t)$ 이다. 고장밀도는 RAM 분석 내에서 정의되어야 한다.

Table 6 CBS structure for possession cost

소유비용 (POC)	리프트 대차교환	예방정비 비용 (PMC ₁)	PMC ₁₁	화차의 월상(6M) 검사(인건비, 재료비)
			PMC ₁₂	화차의 중간(4Y) 검사(인건비, 재료비)
			PMC ₁₃	화차의 전반(8Y) 검사(인건비, 재료비)
			PMC ₁₄	크레인 예방정비 비용
			PMC ₁₅	리프트 잭의 예방정비 비용
		고장정비 비용 (CMC ₁)		화차의 고장정비 비용
		운영 인건비 (OPC ₁)		교환 지점에서의 운영 인력 인건비
		비가용성 비용 (UAC ₁)		시스템의 정지로 인해 결과 비용
	자동 케간가변	예방정비 비용 (PMC ₂)	PMC ₂₁	화차의 월상(6M) 검사(인건비, 재료비)
			PMC ₂₂	화차의 중간(4Y) 검사(인건비, 재료비)
			PMC ₂₃	화차의 전반(8Y) 검사(인건비, 재료비)
			PMC ₂₄	궤간 변경 지상설비의 예방정비 비용
			PMC ₂₅	차륜이동 감시시스템의 예방정비 비용
		고장정비 비용 (CMC ₂)		화차의 고장정비 비용
		운영 인건비 (OPC ₂)		교환 지점에서의 운영 인력 인건비
		비가용성 비용(UAC ₂)		시스템의 정지로 인해 결과 비용

$$CMC_i = TC \times LC \times \sum (CMCP_i + CMCM_i) \quad (4)$$

$$= TC \times LC \times t_i \times z_i(t) \times [(MTTR_i \times P_i \times CPH) + ACM_i]$$

여기서, LC - 총 수명주기

t_i - i 번째 요소의 연간 운영시간 [h]

$z_i(t)$ - i 번째 요소의 평균고장밀도 [failure/h]

$MTTR_i$ - i 번째 요소의 평균수리시간 [h]

P_i - 유지보수를 위하여 요구되는 인력

ACM_i - 평균재료비

운영 인건비는 궤간변경지점에서 대차교환 혹은 자동궤간가변시스템의 운영에 필요한 인원만을 고려한다. 따라서, 요구되는 인력의 수(PO)는 두 가지 수송 시나리오 내에서 동일한 역할의 인력은 고려하지 않는다. 예를 들어, 수리 작업장의 인력 등은 고려하지 않는다.

$$OPC = LC \times (PO \times YPC) \quad (5)$$

여기서, PO - 궤간변경지점에서 운영 인력의 수

YPC - 1인당 평균 연간 인건비(연봉)

비가용성 비용은 시스템의 정지로 인해 발생하는 여러 종류의 결과 비용의 합계로 구성된다. 이 비용은 보증비용, 책임비용, 기회비용, 대체서비스를 제공하기 위한 비용 등을 포함할 수 있다. 두 가지 수송 시나리오에서 시스템 정지비용(CSC)은 다음과 같이 가정하였다. : $CSC=100$ [천원/시간]

$$UAC = TC \times LC \times MADT \times CSC = [8,760 \times (1-A)] \times CSC \quad (6)$$

여기서, $MADT$ - 평균 비가동시간

비가용성 비용계산에서, RAM분석에서 정의되는 i 번째 요

소의 평균 가용성 인덱스(A_i)가 사용된다.

$$A_i = \frac{MUT_i}{MUT_i + MTTR} \quad (7)$$

여기서

MUT_i - i 번째 요소의 평균 가동시간 [시간/년]

$MTTR_i$ - i 번째 요소의 평균 수리시간 [시간/년]

3.2 교환시스템의 LCC 분석

3.2.1 교환시스템의 경제성 평가

1) 획득비용(AQC)

획득 비용의 구성은 위험물 수송을 위한 수송수단(즉, 화차)의 구입비용과 궤간변경지점에서 화물의 연계수송을 위한 대차교환 또는 궤간가변을 위한 기술적 장비의 구입비용으로 초기 자본투자비용이다. 획득비용은 Table 5에 제시된 각 수송 시나리오별 CBS구조의 총합으로 구성되며, 이

Fig. 2 AQC by transportation scenario

때 사용된 데이터는 철도공사의 스윙모션대차 및 KTX 동시인양기 등의 가격을 참조하여 적용하였고, 자동궤간가변 운측은 제작업체의 예상가격을 협조받아 적용하였다. 각 수송 시나리오에 대한 초기 투자비용인 획득비용의 합은 Fig. 2와 같다.

2) 소유비용(POC)

- 예방정비비용(PMC)

수송시나리오 내에서 화차의 예방정비는 Table 6에 제시된 CBS구조에서 예방정비비용(PMC1과 PMC2)의 총합으로 식 (3)을 적용하여 산출하였다. (철도공사 스윙모션 대차의 정기검수주기(6M, 4Y, 8Y) 및 평균 유지 보수 인시와 재료 소모를 참조하여 적용)

Fig. 3 PMC by transportation scenario

- 고장정비비용(CMC)

고장정비 비용은 운용 중에 나타나는 고장과 관련이 있다. 고장정비는 Table 6에 제시된 CBS구조의 고장정비비용(CMC₁과 CMC₂)으로 식 (4)를 적용하여 산출하였다. 이때 사용된 평균고장밀도는 국내에서 운영되는 스윙모션 대차의 고장밀도 값을 구할 수 없어, 2000년 11월부터 2004년 9월까지 폴란드와 리투아니아 사이의 국경지역에서 PKP Cargo에 의해 수집된 SUW2000 궤간가변시스템(대차+궤간가변장치)의 고장밀도 $z_f(t)$ 값을 자동궤간가변방식에 이용하였고[7], 대차교환방식에 대해서는 폴란드 사례에 비추어 이 값의 2/3 값을 적용하였다.

Fig. 4 CMC by transportation scenario

- 운영 인건비(OPC)

운영 인건비는 궤간변경 지점에서 대차교환 혹은 자동궤간가변시스템 운영을 위해 필요한 인원만을 고려하였으며, 식 (5)를 적용하여 산출하였다. 따라서, 요구되는 인력의 수는 두 가지 수송시나리오 내에서 동일한 역할의 인력은 고려하지 않는다. 예를 들어, 작업장의 인력 등은 고려하지 않는다. 운영인력의 연봉은 2009년 철도공사 차량 검수원의 평균직급 호봉을 적용하였다.

Fig. 5 OPC by transportation scenario

- 비가용성 비용(UAC)

비가용성 비용은 시스템의 정지로 인해 발생하는 결과 비용의 합계로 구성되며, 식 (6)을 적용하여 산출하였다. 이 비용은 보증비용, 책임비용, 기회비용, 대체서비스를 제공하기 위한 비용 등을 포함할 수 있다. 두 가지 수송시나리오에서 시스템 정지 비용은 $CSC=100$ [천원/시간]으로 가정하였다.

Fig. 6 UAC by transportation scenario

3.3 LCC 모델의 분석 및 효율성 평가

교환방식을 이용한 위험물 수송 시나리오의 LCC 분석결과를 Fig. 7~Fig. 10까지 나타내었다.

Fig. 7은 각 수송 시나리오별 그리고 각 경로별 총 LCC

Fig. 7 Analysis result of LCC model by transportation scenario

결과를 나타내고 있으며, 경로 I에 대한 수송 시나리오의 비교분석 결과, 자동궤간가변방식이 대차 교환 방식과 비교하

여 총 LCC측면에서 1212억 정도 비교우위를 나타내고 있으며, 경로 II에 대해서는 5991억 정도 비교우위를 나타내고 있다. 경로 II는 본 연구에서 설정한 올란우데까지 최단 거리의 특징을 가지고 있어 동일한 자동궤간가변 방식이라면 경로 I에 비하여 경로 II가 182억 정도 비교우위를 나타내고 있다. 그러나, 대차교환 방식의 경우, 경로 II에서 3곳의 궤간가변지점이 존재하기 때문에 수송 서비스 시간과 운영적 측면에서 비효율성이 발생하여 가장 높은 LCC비용을 나타내고 있다.

Fig. 8과 Fig. 9는 각 경로의 수송 시나리오에 대하여 Table 5와 Table 6에 나타난 각각의 LCC 비용범주의 분담비율을 나타내고 있다. 수송 시나리오별 LCC 비용 범주 중에서 대차교환방식은 궤간가변지점의 서비스 인력의 인건비가 LCC에 많은 영향을 미치는 중요한 비용 인자(경로 I에서 44%, 경로 II에서 65%)를 차지하며, 자동궤간가변방식에서는 궤간가변운축의 초기투자비가 LCC에 많은 영향을 미치는 중

Fig. 8 LCC cost category by transportation scenario in route I

Fig. 9 LCC cost category by transportation scenario in route II

Fig. 10 Cumulative LCC cost by transportation scenario

Fig. 11 LCC sensitivity analysis(Bogie cost, Operating personnel cost)

요한 비용인자(경로 I에서 60%, 경로 II에서 49%를 차지)로 분석되었다. 각 경로에 대하여 두 가지 비용인자에 대한 민감도 분석의 결과를 Fig. 11에 나타내었다.

4. 결 론

동북아 지역에서 한국의 역할을 증대하고 위상을 높이며, 특히 동북아 물류 중심국으로 부상하기 위한 많은 노력들이 진행되고 있다. 동북아 물류 시장의 선점을 위해서는 국가적 차원의 외교적 노력과 더불어 대륙철도 통합 연계 기술의 연구가 시급한 실정이며, 특히 대륙철도 연계 화물 수송 시스템에서 국경 통과 시 서로 상이한 궤간의 인터페이스 문제는 시급하게 해결해야 할 과제로 부각하고 있다. 현재 국제적으로 궤간변경지점에서 화물 수송서비스의 형태는 화물 유형별로 다양한 방법이 개발되어 사용되고 있으나 대부분의 방법이 궤간변경지점에서 화물의 환적 혹은 차량 교환이 필요하게 된다. 이런 수송서비스 형태는 운영에 많은 비용이 발생되며, 서비스 제공 시간이 크고, 궤간변경지점에서 대단위 창고 및 환적 시설을 갖춘 기반 시설을 요구한다. 또한 화물 수송시간의 연장을 유발하기 때문에 철도 수송의 장점을 희석시킬 수 있으며, 위험물 수송의 안전성에 심각한 위협을 주게 된다.

향후, 대륙철도 연계 수송시스템에서 궤간 극복을 위한 의사 결정은 궤간변경을 위한 수송시스템의 초기 투자비용뿐만 아니라, 수송서비스의 신뢰성과 효율성, 안전성 및 경제성측면의 검토가 필요하며, 수송시스템의 전체 수명주기 동안에 발생하는 소유 및 운영비용에 대한 고려가 필요하다.

본 논문에서는 기존의 경제성 평가 방법과는 달리 수송시스템의 신뢰성을 고려할 수 있는 LCC분석 방법을 이용하여 궤간변경 철도 수송시스템에 대한 효율성 평가를 수행하였다. 분석결과, 5000km 미만의 위험물 수송에서 자동궤간가변 방식이 대차교환방식에 비하여 경제적 측면에서 우수함을 확인하였다. 또한 자동궤간가변장치를 이용한 화물 수송의 효율성은 수송거리(혹은 화차의 회전율)가 짧을수록 그리고 궤간변경지점이 많을수록 더욱 경제적인임을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업 “남북 및 대륙철도의 실용주의적 진출을 위한 상호연계기술 개발”의 과제 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

“이 논문은 2012년도 한국교통대학교 교내학술 연구비의 지원을 받아 수행된 연구임”.

참고문헌

- [1] Y.S. Ham, J.N. Yoon (2003) International Development Direction of Variable Gauge Vehicles, *Proceedings of Korea Society for railway*, Oct. 2003, pp. 418-423.
- [2] H. Jurgen Geissle (2009) Results of Feasibility Study : Automatic Gauge Changeover Systems, *UIC Seminar, Russia Sochi*.
- [3] J.L. Sanchez-Gonzalez (1984) Variable gauge axle, *Rail International*, pp. 139-148.
- [4] W. Saliger (2000) Gauge-Adjustable Wheelsets, *Rail International*, pp. 7-12
- [5] Broche, SUW2000, Polish System of Automatic Track Gauge Changing for Wagons, Coaches and Traction Vehicles in Transcontinental Railway Traffic.
- [6] KRRI Report (2008) Technical Development of Variable Gauge Device.
- [7] M. Szkoda, A. Tulecki (2008) Decision Model in Effectiveness of Europe-Asia Transportation Systems, *Proceedings of World Congress Railroad Research*, Seoul, Korea.
- [8] IEC 60300-3-3 (2004) Application Guide for Life Cycle Costing, *IEC International Standard*.
- [9] J. Stern (1994) Life Cycle Cost : A Method for Reducing Costs and Improving Railway Vehicles, *Proceedings of World Congress Railroad Research*, pp. 661-666.
- [10] UNIFE LCC Group (1997) Guidelines for Life Cycle Cost, Union of European Railway Industry.
- [11] P. Hokstad (1998) Life Cycle Cost Analysis in Railway Systems, *SINTEF Industrial Management*.
- [12] K.W. Chung, C.S. Kim, S.H. Jang (2012) Technical Evaluation of Railway Transportation System with the Change of

Gauge”, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 13(5), pp. 1954-1962.

- [13] J.W. Kim, K.W. Chung, J.S. Park, J.D. Chung (2010) A Life Cycle Cost Model and Procedure for the Acquisition of Rolling Stock, *Journal of the Korean Society for Railway*, 13(3), pp. 257-263.

접수일(2012년 5월 22일), 수정일(2012년 7월 19일),
게재확정일(2012년 7월 24일)

Kwang-Woo Chung : ckw1201@ut.ac.kr

Department of Railway Operation System Engineering, Korea National University of Transportation, 157 Cheoldobangmulgkwon-ro, Uiwang-si, Kyeonggi-do, 437-763, Korea

Joon-Yong An : jyahn@ut.ac.kr

Department of Railway Management and Logistics, Korea National University of Transportation, 157 Cheoldobangmulgkwon-ro, Uiwang-si, Kyeonggi-do, 437-763, Korea

Chul-Su Kim : chalskim@ut.ac.kr

Department of Railway Vehicle System Engineering, Korea National University of Transportation, 157 Cheoldobangmulgkwon-ro, Uiwang-si, Kyeonggi-do, 437-763, Korea

Hee-Seung Na : hsna@krri.re.kr

Principal Researcher, New Transportation System Research Center, Korea Railroad Research Institute, 360-1 Woram-dong, Uiwang-si, Kyeonggi-do, 437-757, Korea