

대륙철도 운영을 위한 기술적 상호운용성에 대한 계량적 분석

박수명^{1*}, 박은경²

¹한국철도공사, ²동양대학교 철도전기융합학과

Quantitative analysis on the technical interoperability between railway systems for the operation of trans-continental railways

Su-Myung Park^{1*}, Eun-Kyung Park²

¹Korea Rail Corporation

²Dept. of Electric Railway Convergence Science, Dongyang University

요약 최근 한국이 OSJD(Organization for Cooperation of Railway) 정회원에 가입함에 따라 우리나라도 OSJD의 협약을 적용받을 수 있어 소프트웨어적으로는 대륙철도와 연결되었다고 볼 수 있다. 그러나 오랜 세월 각 주변국들의 철도시스템들이 개별적으로 개발되고 운용된 결과 하드웨어적으로는 제약이 있어 현 상태의 철도시스템의 기술적 상호운용성에 대한 진단이 필요하고 장기적으로 상호운용성을 향상시키기 위한 방안 또한 필요하다. 이에 본 연구에서는 현 상태의 대륙철도 국가들의 철도시스템의 기술적 상호운용성을 유럽에서 활용하였던 기술적 상호운용성 기준인 TSI(Technical Specifications for Interoperability)를 기준으로 각 국의 철도시스템을 분석하였다. 실제 특정구간의 열차운행을 가정한 열차의 운행모델을 바탕으로 필요한 인프라 벡터와 철도차량 벡터의 모델을 만들고 열차운행에 따른 인터페이스에 의해 발생하는 상호운용성 행렬을 바탕으로 상호운용성 지수인 IOP(Interoperability Of Percentage)를 계량화하였다. 부산에서 블라디보스톡까지 디젤기관차와 화차를 활용하여 운행할 경우 IOP값은 22.2%에 불과하여 상호운용성이 낮은 편이었다. 즉 77.8%의 상호운용성 제약요인이 존재하는 것이다. 이와 같은 제약요인들은 장기적으로 기술적 상호운용성을 높이는 방향으로 건설 및 제작되어야 대륙철도구간의 열차운행의 장애요인을 감축할 수 있으며 상호운용성이 100%인 대륙철도 노선을 만들어 운용효율성이 높은 철도가 될 것이다.

Abstract Recently, as South Korea has joined the OSJD, the rules of the OSJD need to be applied to South Korea. Therefore, the railways are connected to the continent railway in terms of software, but the railway systems in neighboring countries have been developed and operated for a long time, and are quite different with some restrictions in terms of hardware. Therefore, this study analyzed the current railway systems of neighboring countries' based on the TSI used in Europe for technical interoperability. A real operation with the operation models within the specific route was assumed and vector functions for the Infrastructure vector & Rolling stock vector were produced. The IOP value was calculated by working out the interfacing matrix value between the infrastructure vector and rolling stock vector. As a result of calculating the IOP in a specific route, which is from Busan South Korea to Vladivostok with the diesel locomotive hauling freight cars, the value was only 22%, which is fairly low in terms of the interoperability. In other words, there are 77.8% restricting items preventing their interoperability. Such restricted causes should be improved to increase the technical interoperability in the long term. Moreover, and when railway systems are constructed and manufactured, it is important to keep IOP 100% to increase the operating efficiency in continental railways.

Keywords : OSJD, Inter-operability, Vector, IOP, TSI

*Corresponding Author : Su-Myung Park(KORAIL)

Tel: +82-2-519-5202 email: smartdaddy@korail.com

Received September 13, 2018

Revised (1st October 18, 2018, 2nd October 23, 2018)

Accepted December 7, 2018

Published December 31, 2018

1. 서론

철도는 대량수송, 장거리 수송에 강점을 가지고 전쟁 시 군수물자수송에서 핵심적인 역할을 해왔다. 그래서 각 국가들은 전쟁의 승리를 위해 또는 침략을 막기 위해 선로의 간격을 달리하여 궤간의 차이가 발생되었다. 즉 궤간을 달리하여 국가간 수송을 어렵게 하려고 했다. 그러나 현대에 와서는 이러한 다양한 궤간구성으로 인해 각 국가간 상호운용성이 저해되었다. 국가 간 교류 없이 살아갈 수 없는 국제화 시대와 함께 철도운영의 장애를 극복하려는 노력이 철도의 상호운용성이라는 이름으로 유럽연합 중심으로 많은 연구와 시도가 이뤄지고 있다.

남북간의 혼풍 및 한국의 국제철도협력기구(OSJD: Organization for Cooperation of Railway)가입으로 인해 대륙의 섬으로 남아 있던 한국이 대륙철도로 나아갈 수 있는 기회가 찾아왔다. 그러나 동북아의 주변국가인 북·중·러의 철도시스템이 상이한 부분이 있어 상호운용성에 제약으로 철도수송에 한계가 존재할 수밖에 없다. 예를 들어 남한의 전기기관차가 북한으로 갈려고 해도 사용전압이 남한은 AC 25KV, 북한은 DC 3KV로 다르고, 러시아의 궤간이 광궤로 남북한이 다르고 중국의 열차제어 시스템과 남한, 북한, 러시아의 열차제어시스템이 달라서 열차운행이 제약되어진다. 그래서 각 국가간 철도 시스템의 상호운영을 확보하는 것이 중요하다.

2. 이론적 고찰

2.1 철도시스템의 상호운용성

상호운용성은 둘 이상의 교통시스템이 효과적으로 작동하고 교통시스템에 대한 고객들의 요구조건을 함께 효과적으로 실행하는 것을 말한다[1]. 또 다른 대안적 정의로는 출발지와 도착지 사이를 끊임없이 운행할 수 있는 능력이라고도 한다[1]. 상호운용성은 교통시스템에서 분명하게 바람직스러운 특성이지만 이러한 일반적인 정의들은 상호운용성에 영향을 미치는 교통시스템들의 일반적인 상호작용을 식별하기에는 별 도움이 되지 않는다. 철도시스템의 상호운용성을 이해하기 쉽게 지역적, 철도시스템간, 하부시스템간 상호운용성으로 분류하였다[5]. 지역적 상호운용성, 국가별 기술기준에 따른 지역적 철도시스템의 차이가 유럽에서 상호운용성 기술 사양(TSI:

Technical Specification of interoperability)이 발생하게 된 계기가 되었다. TSI에서는 기후조건으로 추운 북유럽 지역과 따뜻한 남, 서유럽으로 분류하였다. 법적 제도적 차이에 따라 국가별 차이가 존재한다. 소음과 장애인 편의시설 그리고 열차내 화장실 오물의 처리기준, 서비스 전원 등이 해당한다. 서비스전원을 제외한 소음, 장애인 편의시설, 화장실 오물처리 등은 상호운용성을 크게 제약하지는 않지만 타 국가에서 열차를 운행하기 위해서는 제약요소로 작용을 한다.

철도시스템간 상호운용성 항목중 건축한계는 철도차량의 운행에 장애가 되지 않도록 여유거리를 유지하는 것을 말한다. 차량한계는 차량이 건축한계 내에서 여유 있게 운행하도록 차량의 외부적 한계를 정해 놓은 값이다. 이 둘 각각은 서로 제약이 존재할 때 차량의 외부에 훼손이 발생하므로 중요한 상호운용성 제약조건이다. TSI에서 건축한계 값은 허용범위에 넓은 순서대로 GA, GB, GC 3종류가 존재하고, 차량한계도 허용 범위가 넓은 순서대로 G1, GA, G2, GB, GB1, GB2, GC 7개 종류가 존재한다[7].

궤간과 차량은 기본적인 상호운용성 항목이다. 이 두 요소간의 차이가 발생할 경우 끊임없는(Seamless) 열차 운행에 제약이 되어 이를 극복하기 위한 방안으로 환적, 대차교환을 시행하고 보다 더 적극적인 방안으로 가변궤간대차를 적용하기도 한다, 이와 같이 교통수단 간에는 상호운용성과 상호연계성이 존재한다[6].

최대구배와 차량과의 관계는 구배가 있는 경우 구배 저항이 발생하고 구배저항을 극복하기 위해서는 더 큰 동력이 필요하게 된다. 그러나 구배가 일정수준이상으로 올라가면 큰 동력의 차량도 점착력한계에 의한 공전으로 운행에 제약이 발생한다. 차량의 제동력도 하구배에서는 중요한 요소가 된다. 역 플랫폼과 차량의 관계는 일반적으로 우리나라에서는 승강장 높이를 저상홈, 고상홈, 화물홈 이렇게 3가지 종류로 분류한다. 각 승강장의 높이가 각각 다르기 때문에 사용되어지는 차량 또한 거기에 맞춰서 설계되어야 하는데 이 부분이 인터페이스가 되지 않을 경우 상호운용성 제약요인이 된다. TSI에서는 표준 플랫폼 높이로 3종류를 제시하고 있고 차량의 계단 높이도 같게 제시하고 있다. 이는 상호운용성 뿐만 아니라 교통약자의 이동권 보호측면에서도 중요한 항목이다.

하부시스템간 상호운용성은 선로부담력과 축중의 상호관계에서 중요한 점은 축중이 선로부담력 이내로 설계

되어야 한다는 것이다. 그러나 선로부담력 보다 크게 측중이 설계될 경우 선로의 훼손을 가져온다. TSI-인프라에 의하면 “선로는 측중 20, 22.5 또는 25톤의 하중에 견딜 수 있도록 설계되어야 한다[7]” 라고 되어있다. 차상시스템과 지상시스템은 중요한 열차제어 및 통신시스템이다. 상호운용성이 가장 낮은 분야로서 각 국가별 열차제어 시스템이 개발되어 각각의 차상시스템과 지상시스템을 갖추고 있다. 국내의 경우 봄바르디아와 안살도 시스템이 각각 설치되어 신호시스템이 복잡하게 되었다. 유럽의 27개국을 조사한 결과 27개 종류의 신호시스템을 가지고 있고 17개의 통신시스템을 가지고 있었다. 남·북·러 또한 제각각의 신호, 통신시스템을 가지고 있다. 유효장은 필수적인 상호운용성 제약요소는 아니지만 편성량을 제약하여 경제성 측면의 제약요소가 된다. 한국의 경부선은 유효장의 거리가 500m 이내로 35량이 최대이지만 중국은 50량, 러시아는 70량에 이르고 있어 경제적 상호운용성을 제약하고 있다.

위와 같은 상호운용성을 제약하고 있는 항목들이 많음에도 불구하고 철도시스템의 통합의 필요성은 경제적 자유화, 기술적 진보보다 큰 국내시장환경과 국제화와 같은 요인들에 의해 국제무역은 크게 증대되었고[2] 국가간 효율적인 화물운송시스템이 국가간, 지역간 경제적 경쟁력을 위한 핵심적인 요소가 되고 있기 때문이다[3]. 철도시스템은 다양한 구성요소로 이루어지고, 상호운용성 확보를 위한 연구는 다양하게 진행되었다. 먼저 유럽 11개국에서의 상호운용성 변화 및 장애물들에 대한 향상 평가에서는[4] 기술적 상호운용성의 영역으로 관제와 신호 인터페이스, 수송운영 및 관리, 인프라, 에너지, 철도차량, 유지보수로 분류하여 평가하였다.

2.2 TSI

TSI는 유럽에서 철도시스템 통합의 기술적 가이드라인이었다. 왜냐하면 철도시스템은 내구연한이 길고 또한 많은 비용이 투자되기 때문에 한번에 시스템을 통일하기에는 어려운 구조이다. 유럽에서도 한 번에 상호운용성 확보를 위해 철도시스템을 통일하기 보다는 장기적으로 해당 국가의 비용 부담을 줄이면서 상호운용성을 확보하기 위한 기술적 기준으로 활용된 것이 TSI이다. 그래서 유럽철도에서 TSI는 상호운용성 확보를 위한 철도시스템의 기술적 모니터링 지표로 활용되었다. 구체적으로 철도교통과 관련된 기술 및 시설, 서비스를 조화시키

고 개선시키기 위해 유럽연합 철도국의 역할이 강화되고, 상호운용성을 위한 TSI는 모든 새로운 운영시스템을 시작하기 전에 철도차량과 망(network) 간의 호환성을 확인할 수 있는 검증절차를 두게 하는 것 등을 둘러싼 내용을 규정하고 있다. TSI는 주요 내용에 따라 TSI-인프라, TSI-에너지, TSI-신호, 제어, 명령, TSI-터널안전, TSI-교통운영관리, TSI-소음, TSI-교통약자, TSI-화차, 기관차로 분류하고 있다.

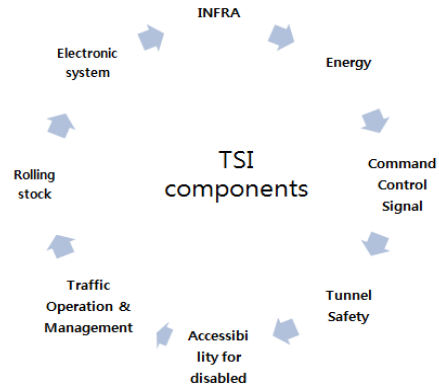


Fig. 1. Classification of railway system based on TSI.

2.3 상호운용성 시스템 항목 도출

상호운용성의 기준으로 삼기위해 TSI를 분석하였다. 분석의 기준은 재래선 철도시스템에서의 TSI 모든 기본 변수들을 빠짐없이 나열하였다. 나열된 기본변수에 대해 인프라, 철도차량, 운영조직으로 분류한 요구조건의 만족여부에 따라 정리하였다. 예를 들면, TSI-인프라의 기본 변수는 건축한계, 선로중심간 거리, 선로두부형상, 선로부담력 등 총 38개였고 이중 건축한계나 선로부담력은 상호운용성 확보를 위한 제약적 요건이 되고 선로중심간 거리는 비제약적 변수이고 선로두부형상이라는 변수는 상호운용성과 관련이 없다. 이와 같은 방식으로 나열한 결과 표1과 같이 상호운용성 확보를 위해 적용할 항목 35가지를 선정하였다. 이중 상호운용성에 절대적인 영향을 미치는 제약적 항목 17종류는 TSI-인프라(건축한계, 최대구배, 선로부담력), TSI-에너지(전압과 주파수), TSI-지령,신호,통신(차상신호장치, 지상신호장치, GSM-R 인터페이스, 차상신호와 관제 인터페이스), TSI-안전(터널화재안전), TSI-장애인 접근(플랫폼 높이, 차량발판 높이), TSI-철도차량(소음, 위생설비, 동력차 차량한계, 화차 차량한계 측중, 차량운행 최대구배, 지상설

비 설계온도, 차량설계온도)이다.

Table 1. Major parameters to restrict interoperability

TSI	Selective parameter	Restricted	Non-restricted
INFRA	8	3	5
Energy	3	1	2
Command, Control, Signal	4	4	-
Tunnel safety	1	1	-
Accessibility for the disabled	3	2	1
Passenger& Locomotive	11	4	7
Freight	5	2	3
Sum	35	17	18

3. 계량적 분석을 위한 연구모형설계

3.1 함수 정의

계량적 분석을 위해 각 변수들을 모듈화하여 벡터함수화 하였다. 모듈화의 기준은 운행조건을 기준으로 하

였다. 즉 화차를 운행할 때, 객차를 운영할 때, 운전실을 이용할 때 등을 기준으로 각각의 모듈을 설계하였다. 위의 상호운용성을 제약하는 항목 17개를 중심으로 공통적인 항목들을 MO로 모듈화하였으며 MO에 포함되는 항목은 9가지 항목이 되고, MA(화차운행을 위한 요구조건 포함), MB(건인), MC(전기적 건인), MD(운전실 차량), ME(객차)에 각각 포함시켜서 벡터함수를 만들었다. 이렇게 만들어진 벡터함수는 인프라 요구조건, 호환성요구조건, 철도차량요구조건에 맞춰 행렬 함수화 하였다. 각 변수 중에 하나라도 0값이 나오면 상호운용이 불가능하다. 아래 표 2는 MO 모듈의 변수들을 정의 해 놓은 값이다. MO는 열차운행을 위한 기본적이고 공통으로 필요한 항목을 정의 해 놓은 것이고 여기에 추가로 열차 조합을 가져갈 경우 MA는 화차, MB는 디젤기관차, MC는 전기기관차, MD 동차, ME는 객차를 포함한다. 각 MO와 마찬가지로 MA, MB, MC, MD, ME도 같은 방법으로 정의 할 수 있다. 그러나 본 연구에서의 분석대상은 복한철도가 고속철도가 없고 대륙철도시대에는 여객 수송도 중요하지만 물류수송이 더욱 중요할 것으로 보여 고속철도가 아닌 일반철도 중에서 화물열차를 중심으로 모듈을 설계하였다. 위의 제약요건 17개중 여객을

Table 2. The definition of parameter MO, MA, MB

Classification	Parameter	Value	INFRA	Vehicle	Combination
MO1	Matching to the TSI-Infra	Matching (Y/N)	$\ln_{MO1}(2)$	-	×
MO2	Structure Gauge	GA, GB, GC	$\ln_{MO2}(3)$	-	CM_{MO2} [3,7]
	Kinematic loading gauge	G1,GA,G2,GB,GB1, GB2, GC	-	$Ve_{MO2}(7)$	
MO3	Matching to the TSI-Tunnel Safety	Matching (Y/N)	$\ln_{MO3}(2)$	$Ve_{MO3}(2)$	CM_{MO3} [2,2]
MO4	Fire safety category	None, A, B	-	$Ve_{MO4}(3)$	CM_{MO4} [3,3]
	Tunnel maximum distance	below 1km, 1-5km, 5km over	$\ln_{MO4}(3)$	-	
MO5	Matching to the TSI-Noise	Matching (Y/N)	-	$Ve_{MO5}(2)$	×
MO6	Temperature range	T_{RIV}, T_n, T_s	-	$Ve_{MO6}(3)$	CM_{MO6} [3,2]
	Ambient temperature	Conforming to T_n, T_s	$\ln_{MO6}(2)$	-	
MO7	Maximum gradient	Gradient and Distance	$\ln_{MO7}(2)$	$Ve_{MO7}(2)$	CM_{MO7} [2,2]
MO8	Track load	20~25 ton	$\ln_{MO8}(3)$	-	CM_{MO8} [3,3]
	Axle load	20~25 ton	-	$Ve_{MO8}(3)$	
MO9	Gauge	1,435mm, 1,520mm	$\ln_{MO9}(2)$	$Ve_{MO9}(3)$	CM_{MO9} [2,3]
MA1	Freight car			Ve_{MA1}	×
MB1	Locomotive			Ve_{MB1}	×

제외하면 제약요건의 수는 11가지로 줄어든다. 즉 공통 모듈인 MO와 화물열차 운행모듈인 MA, 견인 모듈인 MB로 구성된다. MO1은 TSI-인프라의 기본요구조건의 만족여부를 나타내고 이는 인프라에만 해당되고 차량에는 해당되지 않고 또한 인프라만을 나타내므로 차량과 인터페이스가 발생하지 않아 행렬함수로 표현되지 않는다. MO2는 건축한계와 차량한계의 관계를 나타내는 모듈로 TSI의 건축한계는 GA, GB, GC 3가지로 구성되어 있고 GA가 가장 좁고 GC가 가장 넓은 건축한계 값을 가지고 있다. 또한 차량한계는 G1, GA, G2, GB, GB1, GB2, GC와 같이 7가지로 구성되어 있다. 건축한계는 $In_{MO2}(3)$ 라는 함수로 정의된다. 차량한계는 $Ve_{MO2}(7)$ 라는 함수로 정의 했다. MO2모듈에서 건축한계와 차량한계의 인터페이스를 나타내는 조합함수는 $CM_{MO2} [3,7]$ 로 표현했다. MO3는 TSI-터널안전항목으로 TSI규정에 적합한지에 관한항목으로 인프라와 철도차량 모두 Y/N로 구성되어 있으므로 $CM_{MO3} [2,2]$ 로 표현되어진다. MO4는 화재안전항목으로 철도차량은 화재안전에 관해 None, A, B로 구분되고 인프라는 터널의 거리에 따라 1km이내, 1-5km, 5km이상으로 구분 가능하므로 동일한 방법으로 $Ve_{MO4}(3)$, $In_{MO4}(3)$ 의 함수로 정의되고 조합함수는 $CM_{MO4}[3,3]$ 로 표현되어진다. 동일한 방법으로 공통모듈인 MO5, MO6, MO7, MO8, MO9도 정의되어진다. 모듈MA1과 모듈 MB1은 디젤기관차로 화차를 견인한다는 가정 하에 만든 함수로 MA1, MB1 모두 차량관련 함수이다. 즉 본 연구에서 사용된 함수는 MO 9, MA 1, MB 1로 총 11개의 상호운용성 제약함수를 활용하였다.

3.2 인터페이스 행렬정의

각 인프라와 철도차량의 인터페이스를 나타내는 인터페이스 행렬들이 정의되어야 한다. 행렬의 형태는 $CM_i [n,m]$ 로 표현되고 여기서 i 는 관련 변수 식별부호이고 n 은 인프라벡터의 가능한 값들의 차원이고 m 은 철도차량벡터의 가능한 값들의 차원이다. 그리고 각 인터페이스 행렬함수 cm_{xy} 값이 1이면 인프라와 철도차량의 인터페이스가 가능한 경우이고, 0이면 인터페이스가 안되는 경우이다.

예를 들어 (a)은 차량한계와 건축한계의 인터페이스를 나타내는 $CM_{MO2} [3,7]$ 의 경우 인프라 값 GA가

가장 제약적이다, 즉 다음 GB와 GC는 점점 더 큰 값들이다. 이 같은 결과 제약적인 값을 통과할 수 있는 철도차량은 더 큰 값에도 호환가능하다. 인터페이스 행렬은 다음과 같이 정의되어질 수 있다.

Table 3. The examples of parameter CMs (a)

	GA	GB	GC
G1	1	1	1
GA	1	1	1
G2	0	1	1
GB	0	1	1
GB1	0	1	1
GB2	0	1	1
GC	0	0	1

	Y_i	N_i
Y_v	1	1
N_v	0	1

	<1	1~5	>5
N	1	0	0
A	1	1	0
B	1	1	1

(b)행렬은 TSI-터널안전 인터페이스를 나타내는 $CM_{MO3} [2,2]$ 의 경우로 인프라와 철도차량 항목 모두 TSI-터널안전에 부합해야 하고 하부시스템들 또한 기존 시스템들과 호환됨을 보증해야 한다. 이러한 접근은 호환성의 측면에서 일반적으로 긍정적이다. 그러나 터널들에서 보다 제약적인 실행계획이 만들어 졌기 때문에 TSI에 합치되는 차량들은 기존 터널에서는 운행가능 하지만, 새로 만들어진 터널에서는 어떤 경과시간 후에 접근이 가능하므로 이를 반영해야 한다.

(c)행렬은 철도차량의 화재안전범주와 인프라의 터널거리와의 인터페이스를 나타내는 $CM_{MO4} [3,3]$ 의 경우 터널길이가 차량화재안전의 관계는 분명하다. 터널의 길이가 길면 차량의 안전범주는 더 높아져야 한다.

위와 같은 방법으로 MO6, MO7, MO8, MO9도 정의하면 된다.

3.3 시뮬레이션 방법

해당 구간이 위치해 있는 인프라 구간 그 자체와 해당 국가 그리고 많지만 제한된 인프라 구간의 수, 이들 각각은 S_x 라는 하나의 숫자로 식별되어진다.

다음은 관련 철도차량으로 유럽에서는 차량형식 구분을 국가차량등록부로부터 자동적으로 분류했다. 그래서 차량식별번호는 5-9자리로 부여되었다. 그러나 본 연구에서는 차량코드가 독특하지 않는 한 식별번호는 각 형식별로 정하여 T_y 로 표시한다.

다음은 결과 값의 표현으로 해당구간의 모든 변수들에서 $r(x,y) \geq 1$ 이면 이는 차량형식 t_y 와 상호운용성이 확보되었다고 할 수 있다. 그리고 이 결과 값은 결과행렬 $RM[x,y]$ 에 등록되어진다. 여기서 x 는 해당 인프라 구간의 식별번호이고 y 는 차량형식의 식별숫자이다. 행렬 rm_{xy} 의 각 구성요소의 값이 1이면 s_x 라는 인프라 구간에서 t_y 라는 철도차량과 상호운용성이 확보되었다는 뜻이고 반대로 0이라면 상호운용성이 확보되지 못함을 의미한다.

전반적인 상호운용성을 평가하는 마지막단계는 행렬에서의 값에 대한 평균을 계산하고 비율을 결과 값으로 제시하는 것이다.

$$IOP [\%] = 100 * \frac{\sum r m_{xy}}{x \times y} \quad (1)$$

이 평균은 아마도 이미 계산된 행렬의 모든 구성요소들을 포함하는 값이다. 특정 인프라와 철도차량에 성공적인 시운전이 이뤄졌다면 미래에도 정상적인 평가의 토대로 사용될 것이다. 보다 상세한 정보가 접근 가능할 때 이 기준에 대한 상호운용성은 증명되어 질 것이다.

4. 상호운용성 측정 시뮬레이션

시뮬레이션은 다음과 같은 단순한 예제에 의해 증명되어질 수 있다. $x=1, \dots, 3$ 과같이 3개의 구간으로 구성된 작은 노선을 고려했다. 구제성을 높이기 위해 s_1 은 경부선, s_2 는 평라선, s_3 는 러시아의 하산과 블라디보스톡 구간을 가정하였고, 즉 부산에서 벌크화물을 싣고 북한의 평라선을 경유하여 블라디보스톡까지 가는 경우를 가정하였다. 유사하게 차량형식도 3가지형식($y=1..3$)으로 하고 요구조건들은 화차용으로 가장 간단하게 했고 식별번호 t_1 은 남한의 7500대 디젤기관차와 벌크화차, t_2 는 북한의 내연기관차인 금성호와 벌크화차, t_3 는 러시아의

디젤기관차인 2M62와 벌크화차를 가정했다. 본 예제구간 및 차량의 변수벡터들을 디젤기관차와 화차편성이므로 공통모듈 MO와 화차모듈 MA와 기관차 모듈 MB만 고려하면 된다, 그리고 이 예제를 계산하기위해 하부시스템들의 기술적 특성을 아래와 같이 고려하였다. 각 모듈별 하부시스템을 세부기술자료 및 합리적 가정으로 아래와 같이 정의하였다. MO1= TSI 인프라 요구조건에의 합치, 북한의 인프라가 좋지 않으므로 북한을 제외한 남한과 러시아는 합치된다고 가정하였다. MO2=건축한계와 차량한계, 건축한계는 남과 북이 GB, 러시아가 GC이고 차량한계는 남과 북은 GC를 제외한 6가지 중에 선택할 수 있으나 GB로 선택하고 러시아는 GC를 선택하였다. MO3=TSI-터널안전에의 합치, 북한의 인프라가 좋지 않다는 가정 하에 북한은 N, 남한과 러시아는 Y로 가정하였다. MO4=인프라 터널길이, 차량의 화재안전범주, 인프라의 터널길이는 남·북·러 모두 5km보다 길다고 가정했고, 차량의 화재안전범주는 N, A, B 중 북한은 화재안전범주를 맞추지 못하는 N, 남과 러시아는 B라고 가정하였다. MO5=TSI-소음합치, 차량의 소음 값으로 각 운행 중인 차량이므로 남·북·러 모두 만족한다고 가정하였다. MO6=온도범위, 인프라는 따뜻한 기후 Ts와 추운 기후 Tn으로 구분하였고, 차량은 따뜻한 기후 Ts, 추운 기후 Tn에 중간기후 Tmid로 구분되어 남한의 인프라와 차량은 Ts, 북한의 인프라는 Tn, 차량은 Tmid, 러시아의 인프라와 차량은 각각 Tn으로 가정하였다. MO7=최대구배, 기준 값은 최대구배 21% 또는 연속구배 46km를 만족시키는지 여부로, 남한의 경부선은 N, 차량은 Y, 북한은 Y, 차량 Y, 러시아는 인프라는 N, 차량은 Y로 가정하였다. MO8=선로부담력과 축중, 남북한의 선로부담력은 22.5ton, 러시아의 선로부담력은 25ton, 남북한 차량의 축중은 22ton, 러시아 차량의 축중은 23.5ton이다. MO9=궤간, 남한은 100% 표준궤, 북한은 협궤, 표준궤, 광궤가 존재하나 평라선은 표준궤이고, 러시아는 궤간은 광궤, 철도차량도 광궤차량이다. 남북한 표준궤용, 러시아는 광궤용으로 가정하였으나 가변궤간대차를 가정하여 IOP 값의 향상도를 검토하였다. MA1= TSI-화차와 MB1= TSI-기관차는 현재 운행 중인 화차와 기관차를 가정하였으므로 남·북·러 모두 합치하는 것으로 가정하였다.

$r(1,1)_1 = [\ln_{MO1}] = 1$, 즉 경부선구간을 남한 차량으로 운행하는 인프라 모듈1은 TSI에 합치된다.

$$r(1,1)_2 = In_{MO2} \times CM_{MO2} \times Ve_{MO2} = 1$$

$$= \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times |0001000| = 1 \quad (2)$$

r(1.1)1과 r(1.1)2의 예와 같이 아래 행렬 값을 활용하여 각각 r(1.1)11까지 계산한 결과가 Table 4이다.

Table 3. Matrix value of each parameter

Infra V	s ₁	s ₂	s ₃	Rolling V	t ₁	t ₂	t ₃
In _{MO1}	1	0	1		-	-	-
In _{MO2}	0	0	0	Ve _{MO2}	0	0	0
	1	1	0		0	0	0
	0	0	1		0	0	0
					1	1	0
					0	0	0
					0	0	0
					0	0	1
In _{MO3}	1	0	1	Ve _{MO3}	1	0	1
	0	1	0		0	1	0
In _{MO4}	0	0	0	Ve _{MO4}	0	1	0
	0	0	0		0	0	0
	1	1	1		1	0	1
				Ve _{MO5}	1	1	1
In _{MO6}	1	0	0	Ve _{MO6}	0	1	0
	0	1	1		1	0	0
					0	0	1
In _{MO7}	0	1	0	Ve _{MO7}	1	1	1
	1	0	1		0	0	0
In _{MO8}	0	0	0	Ve _{MO8}	0	0	0
	1	1	0		1	1	0
	0	0	1		0	0	1
In _{MO9}	1	1	0	Ve _{MO9}	1	1	0
	0	0	1		0	0	1
					0	0	0
				Ve _{MA1}	1	1	1
				Ve _{MB1}	1	1	1

같은 방법으로 경부선을 북한차량으로 운행하는 r(1.2)도 러시아 노선을 남한차량이 운행하는 r(3.1)과 같은 방법으로 r(3.3)까지의 값을 11개의 모듈에 각각 적용하여 값을 구한다.

Table 4. Matrix value of factor vector

Assumption	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	result
r(1,1)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
r(1,2)	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
r(1,3)	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0
r(2,1)	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0
r(2,2)	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0
r(2,3)	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0
r(3,1)	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0
r(3,2)	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0
r(3,3)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Table 4의 값을 행렬로 나타내면, r(1,1)과 r(3,3)만이 상호운용성이 있는 것으로 나타났다.

$$RM [3,3] = \begin{bmatrix} r(1,1) & r(1,2) & r(1,3) \\ r(2,1) & r(2,2) & r(2,3) \\ r(3,1) & r(3,2) & r(3,3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

이에 따라 상호운용성 값 IOP=100* 2/9로 22%이다. 예를 들어 r(1,2)는 북한의 차량으로 남한의 경부선을 운행하는 경우를 나타내고 이때 MO3, MO4를 만족시키지 못하여 RM[r(1,2)]=0 이다. 즉 MO3는 TSI-터널안전으로 북한의 터널과 차량이 모두 만족하지 못한다고 가정하였으므로 북한의 터널과 차량이 개량을 통해 TSI-터널안전 항목을 만족하고 또한 MO4 값을 만족했을 경우 RM[r(1,2)]는 1이 된다. 이 경우 해당 항목들은 개선대상이 되고 모니터링 항목이 된다. 위 Table 4의 99개 항목중 모듈 전체를 만족시키는 r(1,1)과 r(3,3)을 제외하고 22개 항목을 모두 만족시켜야 상호운용성이 100%를 이룰 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 기술적인 측면에서의 상호운용성을 나타내는 TSI를 기준으로 남·북·중·러간의 상호운용성을 계량적으로 분석하고자 분석함수를 만들어 각 국가간 상호운용성을 저해하고 있는 요인이 무엇이며 현재의 상호운용성은 어떻게 나오는지를 측정해 보고자 했다.

분석함수가 타당함을 보여주기 위해 남북러간의 간단한 가정을 통해 타당함을 검증하였다.

(1) 계산결과 s1, 2, 3구간을 t1, 2, 3편성의 차량으로

운행할 경우 상호운용성을 나타내는 IOP의 값은 22 %로 나타났다.

- (2) 만일 예를 들어 $r(3,1)$, 러시아 하산에서 블라디보스톡으로 가는 선로를 남한의 차량으로 운행하는 경우 MO9 항목만 0이므로 이 값을 1로 만들어 주기위해 가변계간대차를 장착한 남한차량을 사용한다면 IOP의 값은 33%로 향상된다. 이와 같은 방법으로 IOP의 값을 올리기 방안을 마련해야 한다.
- (3) 본 연구에서의 시물레이션은 가장 간단한 노선과 차량으로 한정했지만 남·북·중·러의 전 구간으로 뿐만 아니라 고속차량을 포함한 전 차량으로 확장 가능하고 IOP 값이 100%가 될 때 까지 상호운용성 향상을 위한 모니터링 지표로 활용할 수 있다.

[9] The 2013-236th notification of MOLIT, "The code to the railway construction design guideline", 2013.

References

- [1] C. Mulley, J. D. Nelson, "Interoperability and transport policy: the impediments to interoperability in the organization of trans-European transport systems", *Journal of Transport Geography*, Vol.7, No.2, pp.93-104, 1999.
DOI: [https://dx.doi.org/10.1016/S0966-6923\(98\)00046-5](https://dx.doi.org/10.1016/S0966-6923(98)00046-5)
- [2] M. Dessouky, Q. Lu, J. Zhao, R.C. Leachman, "An exact solution procedure to determine the optimal dispatching times for complex rail networks", *IIE Transactions*, Vol. 38, No.2, pp.141-152, 2006.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1080/074081791008988>
- [3] A. Rushton, P. Croucher, P. Baker, "The Handbook of Logistics & Distribution Management", *The chartered institution of Logistics and Transport*, 2010.
- [4] W. E Walker, G. Barse, A. V. Velzen, T. Jarvi, "Assessing Barriers to improving interoperability in European countries", *Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2043, No.1, pp.20-30, 2008.
DOI: <https://dx.doi.org/10.3141/2043-03>
- [5] B. GyÖrgy, "Theoretical principles for quantitative evaluation of railway interoperability", *Budapest University*, 2008.
Available From : <https://repozitorium.omikk.bme.hu/bitstream/handle/10890/709/ertekezes.pdf?sequence=1> (Accessed Aug. 20, 2018)
- [6] B. Stone, "Critical Success Factors: Interconnectivity and Interoperability", *The future of intermodal Freight Transport*, pp 225-231, 2008.
- [7] ERA IU, "Guide for the application of the TSI ", Published by : *European Railway Agency*, 2011.
Available From : https://www.era.europa.eu/activities/technical-specifications-interoperability_en (Accessed AUG. 21, 2018)
- [8] MOLIT, "Railway design guideline", 2013.

박 수 명(Su-Myung Park)

[정회원]



- 2012년 8월 : 서울과학기술대학교 철도차량시스템학과 (공학석사)
- 2017년 8월 : 우송대학교 철도시스템학과 (공학박사)
- 1994년 2월 ~ 현재 : 철도청 및 코레일 근무

<관심분야>

철도시스템, 철도차량, 대륙철도

박 은 경(Eun-Kyung Park)

[정회원]



- 2006년 10월 : 러시아 모스크바 국립 철도대학교 (교통공학 박사)
- 1994년 3월 ~ 2014년 2월 : 한국 철도공사 근무(연구원 책임연구원, 물류본부)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 동양대학교 철도전기융합학과 교수

<관심분야>

남북철도, 대륙철도 분야