

SE를 활용한 사업제안단계의 경전철차량 전력소모량 예측방안 연구

The Predictive Study of LRT Vehicles' Power Consumption on the Business Proposal Stage using the Systems Engineering(SE)

박건영*[†], 김광혁*

Keon Yeong Pak*[†], Kwang Hyuk Kim*

초 록 국내 철도사업 제안시, 운영비 검토 중 철도차량 본선 동력비(이하 차량 전력량) 부분은 체계화된 검토 방식의 부재로 인해 주로 기존 유사 차량 전력량 실측값이나 제한적 정보에 따른 열차 운전성능 시뮬레이션(TPS) 결과를 반영한 개략적 예측으로 대신하고 있다. 하지만 이런 검토방식은 개통 후 운영비 관련 중대한 Risk로 초래할 수 있다. 이에 본 논문에서는 이런 문제점의 개선책 일환으로, 사업제안시 활용할 수 있는 정량적 차량 전력량 예측모델을 SE 기반으로 검토하고 제안시 적용 효과에 대해 살펴보고자 한다.

주요어: Systems Engineering(SE), 본선 동력비, 차량 전력량, 경전철, 운전성능 시뮬레이션(TPS)

1. 서론

그동안 국내 철도사업 제안시, 차량 전력량 검토는 주로 기존 유사 철도차량의 전철전력 사용량이나 제한적 정보(주로 제안차량 성능 및 노선 정보만 반영)에 기반한 열차 운전성능 시뮬레이션(TPS) 결과를 바탕으로 운행횟수 및 운행거리에 따른 개략적 예측으로 대신해 왔다. 하지만, 관련 논문[1]에 따르면 제대로 된 차량 전력량 검토를 위해 이런 기존 정보 외에 "예측된 수송수요", "편성별량수 및 정원수" 등의 정보도 포함해 동시에 검토해야 함으로 강조하고 있다. 따라서 현재의 차량 전력량 검토방식은 필요한 정보의 부족으로 인해 개통 후 운영비 관련 중대한 Risk를 초래할 우려가 있다.

이에 본 논문은 이런 문제점의 개선책 일환으로, 사업제안시 활용할 수 있는 정량적 차량 전력량 예측모델을 SE 기법 및 수송수요

와 연계된 TPS를 활용해 검토하고 실제 운행 중인 경전철 자료를 활용해 제안시 해당모델의 적용 효과에 대해 살펴보고자 한다.

2. 본론

2.1 예측모델 수립 위한 요인 관계 분석

2.1.1 SE를 활용한 예측모델의 요인 관계 분석

차량 전력량 예측을 위해서는 우선 차량 전력량 계산에 필요한 요인들의 관계 분석이 필요하다. 이에 본 논문에서는 2량 1편성 형태의 철제 차량의 경전철 차량을 기준으로 차량 전력량 계산에 필요한 요인들의 분석을 진행했다. 이 때, 차량 중량 조건은 변동요인(혼잡율 등)이 많은 만차조건 대신 상대적으로 적은 공차조건을 적용했다.

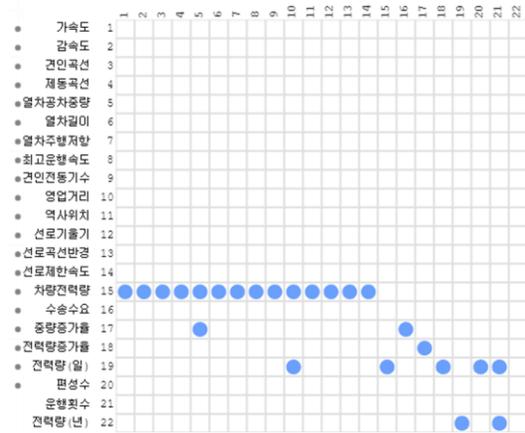
SE 분야의 인터페이스 분석기법 중 하나인 DSM(Design/Dependency Structure Matrix)[2]를 활용하여 공차조건에 차량 전력량 계산에 필요한 요인들의 관계를 분석한 결과는 [Fig. 1]과 같다. DSM 분석결과, 차량 전력량 계산에 필요한 요인 집합군은 "단위 차량 전력량(kWh/편성-km)", "수송수요 변화에 따른 차

[†] 교신저자: 현대로템 철도국내시스템PM팀
(kypark@hyundai-rotam.co.kr)

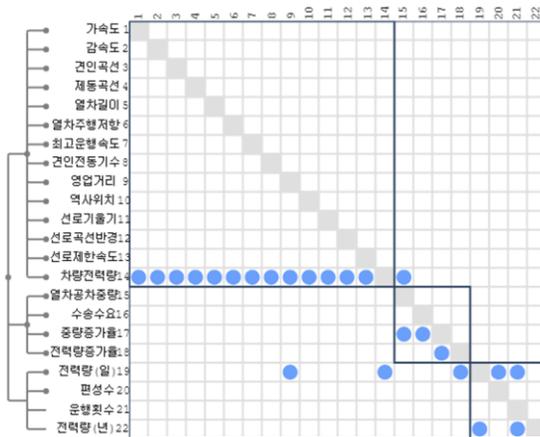
* 현대로템 철도국내시스템PM팀

량 전력량 증가율(%)", "연간 누적 차량 전력량(kWh/년)"의 3개로 분류되었다.

이 중 "수송수요 변화에 따른 차량 전력량 증가율" 집합의 예측모델만 파악되면 나머지 집합들은 이미 기존 계산모델들이 정립되어 있어, 전체 차량 전력량을 예측할 수 있는 예측모델의 수립이 가능해진다.



(a) DSM 클러스터링 분석 전(IR/FAD방식: ✓)



(b) DSM 클러스터링 분석 후(IR/FAD방식: ✓)

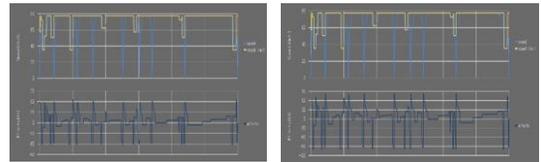
Fig. 1 차량 전력량 요인들의 관계 분석 결과

2.1.2 수송수요 변화에 따른 차량 전력량 증가율의 예측모델 검토

수송수요 변화에 따른 차량 전력량 증가율 예측모델 수립을 위해서는 승차인원 변화에 따른 차량중량의 변화와 전동기 소모 변화량 간의 관계를 알아야 한다. 따라서, 이를 파악하기 위해, 앞서 요인 관계 분석시 기준

으로 삼은 철도차량 중 하나인 김포 골드라인 차량을 모델로 TPS를 실시하여 차량 중량 증가율과 평균 전동기 소모량 증가율 간의 관계를 분석하였고, 그 결과를 [Fig. 2] 및 [Table. 1]로 나타내었다.

이 때, 유동성 영향(타행 운행, 회생 제동



(a) 100%(공차) 조건 (b) 145% 조건

Fig. 2 중량 증가율에 따른 TPS 결과의 예[하선]

중량 증가율 X(%)	105	110	115	120	125	130	135	140	145
평균 전동기 소모량 증가율 Y(%)	6	10.8	13.9	19.9	22.8	27.3	31.6	35.9	40.1

Note) 공차중량을 100%를 기준으로 했으며, 해당차량의 만차조건은 약 43% 중량증가율에 해당함.

Table. 1 중량 증가율-전동기 소모량 증가율의 관계 분석 결과

등)의 최소화를 위해 전속운전(all-out) 및 평균 전동기 전력량 조건만 고려했다. 상기 결과의 X-Y간 관계를 선형 단순회귀분석 기법으로 분석한 결과, $Y = 0.85 X + 1.83$ 의 회귀식¹ 예측모델을 도출하였다.

2.2 제안시 차량 전력량 예측모델 수립

앞서 살펴본 분석결과들에 따르면, 제안시 현실성 있는 차량 전력량 예측을 위해서는 수송수요 변화에 따른 차량 전력량의 변화 요인을 기존 차량 전력량 검토방식에 반영하는 것이 중요하다고 판단되었다. 따라서 이를 반영한 차량 전력량 예측모델은 다음과 같다.

※ 연간 예측 차량 전력량(kWh/년)

$$= \sum[\text{평일 및 휴일별 하루 예측 차량 전력량} \times \text{평일 및 휴일별 연간 운행일수}]$$

$$= \sum[\sum(\text{공차시 TPS의 전동기 소모량} + \text{시간별 승객중량 증가율에 따른 전동기 소모 증가량}) \times \text{해당시간별 총 운행횟수}] \times \text{평일 및 휴일별 연간 운행일수}$$

¹ 결정계수(R²): 0.9984, 유의한 F: 6.239E-14

이 때, "공차시 TPS의 전동기 소모량"은 전속운전시 TPS 결과로 나오며, "시간별 승객중량 증가율에 따른 전동기 소모 증가량"은 앞서 구한 $Y = 0.85 X + 1.83$ 의 회귀식으로 구할 수 있다. 또한 운행횟수 및 운행일수는 제안시 제공된다.

따라서 제안단계에서 상기 예측 모델을 사용하면, 기존 방식 대비 현실성 있는 결과를 정량적 방법으로 검토하는 효과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

2.3 제시된 예측모델의 적용조건 검토/검증

앞서 제시된 차량 전력량 예측 모델을 제안 단계시 효과적으로 적용하려면, 예측시 가능한 단순조건에서 예측할 수 있어야 하며, 동시에 예측결과와 실측치간 변환시 합리적인 환산기준도 필요하다.

먼저 제안시 예측모델에 적합한 단순조건은 여러 조건들을 검토한 결과, TPS에서 전동기 발생 전력량만 반영하는 것으로 정리하였다.

다음으로 예측결과와 실측치 간의 적합한 환산기준 선정을 위해, 김포골드라인의 통계 [3]를 활용하여 검토한 연간 차량 전력량 예측모델의 환산조건은 [Table. 2]와 같다.

검토결과, 앞의 단순조건에 해당되는 "TPS에서 전동기 전력량 조건"만 고려시 연간 차량 전력량 예측값이 실측값 대비 약 1.65배(수송인원 기준) 높게 나타나 환산기준을 "실측치:예측치 = 1:1.65" 비율로 선정하였다.

지금까지 검토한 내용의 검증을 위해 김포골드라인의 통계 [3]를 활용하여 예측모델 계산결과와 실측치('22년)간 비교한 결과, 약 6%의 차이를 확인할 수 있었다.

따라서 제안단계에서 김포골드라인과 유사한 경전철 사양의 차량 전력량 검토시, 상기 선정된 조건에 따른 차량 전력량 예측모델을 활용하면 기존 방식 대비 실제값에 유사한 정량적 검토 결과의 도출이 가능할 것으로 예상된다.

3. 결론

본 논문에서는 사업제안단계에서 현실성

노선	구분	승차인원(시간대별 평균)					
		주중			주말		
		인원 (명/시)	1회당 인원 (명/시-회)	1회당 인원 중량환산 (ton/시-회)	인원 (명/시)	1회당 인원 (명/시-회)	1회당 인원 중량환산 (ton/시-회)
	계	29,445	N/A	N/A	7,211	N/A	N/A
김포골드라인	05~06	495	62	3.84	91	15	0.94
	06~07	1,940	121	7.52	165	9	0.57
	07~08	4,379	129	7.99	280	14	0.87
	08~09	3,771	99	6.15	437	22	1.35
	09~10	1,943	75	4.63	487	24	1.51
	10~11	1,373	69	4.26	488	24	1.51
	11~12	1,262	63	3.91	521	26	1.61
	12~13	1,318	66	4.09	569	28	1.76
	13~14	1,319	66	4.09	569	28	1.76
	14~15	1,217	61	3.77	533	27	1.65
	15~16	1,364	68	4.23	525	26	1.63
	16~17	1,615	81	5.01	539	27	1.67
	17~18	1,892	63	3.91	494	25	1.53
	18~19	1,978	58	3.61	408	20	1.27
	19~20	1,024	34	2.12	296	15	0.92
	20~21	805	34	2.08	272	14	0.84
	21~22	806	37	2.27	267	13	0.83
	22~23	666	33	2.06	209	13	0.81
	23~24	221	12	0.75	62	8	0.48
	00~01	58	7	0.45	N/A	N/A	N/A

(a) 시간대별 승차인원 중량 증가비율('21년)

항목	연간 전력소모량(kwh/년)		평균 전철전력량 대비 비율		비고
	승차인원('21년)	수송인원('21년)	승차인원('21년)	수송인원('21년)	
실측	7,789,663		100%		- 승차/수송 비율 : 66.7% - 승차인원 : 해당 노선의 역에서 승차한 인원수 - 수송인원 : 승차인원과 유입(환승)인원의 합계
TPS (전속조건) (원생 보조전원 제외)	12,518,248	12,873,134	161%	165%	
전동기(TPS) + 회생&보조전원(실측)	12,275,141	12,630,027	158%	162%	

(b) 실측치('21년) 통한 예측모델의 조건 검토

항목	연간 전력소모량(kwh/년)		예측치/실측치 비율	비고
	수송인원('22년)			
실측	8,394,552		100%	- 승차/수송 비율 : 67.5%
차량 전력량 예측모델(1:1.65)	7,881,102		94%	

(c) 실측치('22년) 통한 예측모델의 검증

Table. 2 제시된 예측모델의 적용조건 검토/검증

있는 차량 전력량 검토를 위해 SE기법 및 수송수요와 연계된 TPS를 활용하여 검토된 차량 전력량 예측모델을 제시하였다.

또한 실제 데이터를 활용하여 제시된 예측모델의 제안단계 적용조건 및 효과를 검토한 결과, 기존 방식 대비 실제값과 유사한 정량적인 차량 전력량의 예측 검토 가능성을 확인할 수 있었다.

향후 다양한 철도노선 및 철도차량의 데이터가 확보되면, 본 논문에 제시된 차량 전력량 예측모델의 범용적 활용을 위한 추가적인 보완 연구를 진행할 예정이다.

참고문헌

- [1] 박건영 (2022) 철도 공공데이터를 활용한 철제-고무차륜 경전철 차량간 전력소모량 비교, 2022년도 한국철도학회 하계심포지엄.
- [2] <https://dsmweb.org/>
- [3] 한국철도공사, 철도통계연보(2021~2022)