

## 차세대전동차 개발목표에 대한 계량화 방안연구

# A Study on a Measurement Scheme for the Development Goals of the Next Generation EMU

오세찬†  
Oh, Seh-Chan

박성혁\*  
Park, Sung-Hyuk

김길동\*\*  
Kim, Gil-Dong

---

### ABSTRACT

The development goals of the next generation EMU are to improve the system maintainability, transportation capacity, reliability, passenger service and energy efficiency. In this paper, we propose a measurement scheme for the development goals of the next generation Electric Multiple Unit(EMU). To achieve that, we drew meaningful characteristics for each development goal, which mainly affect effectiveness and performance of vehicle system. Finally, the measurement scheme for the development is obtained by using the characteristics, which could be a numerical values such as maximum velocity, acceleration of the vehicle and so on or subjective values such as a results of surveys from passengers and so on. We expect the proposed measurement scheme will be used to measure the development goals of other similar system as well as the next generation EMU.

---

## 1. 서 론

본 논문은 차세대전동차의 개발 목표로 설정한 시스템의 성능향상 목표치에 대한 성능향상 지표를 논리적인 접근방법과 객관화된 방식을 적용하여 성능향상 목표에 대한 계량화 방안을 제안한다. 차세대전동차 성능향상 목표인 수송능력 10%, 유지보수성 향상 20%, 승객서비스 향상 30%, 신뢰성 향상 20%, 에너지절감 20%, 친환경성 향상 10%에 대한 입증자료 또는 연구가 이루어지지 않아 공감할 수 있는 논리적 접근방법을 통한 계량화 연구가 필요한 실정이다.

이를 달성하기 위해 차세대전동차의 주요 성능 목표인 수송능력, 유지보수, 승객 서비스, 신뢰성, 에너지 절감, 친환경성 향상 등의 목표에 대해 성능 향상에 미치는 주요 성능 지표를 도출하였으며, 이들 성능지표에 대한 계량화는 수치적으로 표현 가능한 차량 가속도 향상 정도, 최고 속도 향상 정도 등의 산술적 접근 가능한 성능 지표를 종합화하여 진행하였다. 반면, 승객 서비스 향상 등과 같은 평가 항목은 승객의 주관적 기준에 의한, 이전 연구 자료 및 설문을 통하여 각 성능지표가 성능에 미치는 분담에 대한 기여도를 평가, 산정하는 방식을 통하여 이루어졌다.

## 2. 차세대전동차 개발목표에 대한 계량화

차세대전동차 성능향상에 대한 성능향상 계량화를 위해 평가항목을 수송능력 향상, 유지보수성 향상, 승객서비스 향상, 신뢰성 향상, 에너지 절감, 친환경성 향상의 6가지 항목으로 분류 한 후, 각 항목에 대해 계량화의 방법 및 범위를 정의하고, 성능지표 도출 및 지표별 가중치를 부여하며, 이에 대한 비교 대상을 선정하여 장치별 비교 또는 연구 자료를 분석하여, 최종적으로 각 항목별 계량화를 도출하였다.

## 2.1 수송능력 향상

일반적으로 수송능력이란 일정 시간당 승객 수송량으로 정의되며, 수송능력 향상을 위한 방안으로는 운전시각 최소화, 최대속도 향상, 가감속도 향상, 승차정원의 극대화, 정차시간 단축, Skip-Stop 방식 운행 (급행열차 운행) 등의 방법이 있다. 본 연구에서는 차세대전동차 시스템 개발과 관련성이 있는 최소운전시각을 중심으로 연구를 추진하였으며, 다음의 최대 수송능력 산출식을 이용한 기존시스템과의 수송능력을 비교하였다.

$$\text{시간당최대수송량} = \text{편성당승차정원} \times \text{승차효율} \times \frac{60\text{분}}{\text{최소운전시각}}$$

또한, 최소운전시각 향상과 관련된 성능 인자로는 신호방식, 가속도 및 감속도, 최고속도, 중량, 견인효율, 제동효율 등이 있으며, 이는 최소운전시각의 도출을 위한 입력 값이 된다. 신호방식에 따라 최소운전시각을 산출하는 식은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\text{이동폐색식최소운전시각: } H(s) = \frac{L+P_s}{V_a} + \left(\frac{100}{K} + B\right) \left(\frac{V_a}{2d_s(1+0.1G)}\right) + \frac{a_s(1-0.1G)t_{os}^2}{2V_s} \left(1 - \frac{V_a}{V_{max}}\right) = t_{os} + \Sigma t$$

$$\text{고정폐색식최소운전시각: } H(s) = \sqrt{\frac{2(L+D)}{a_s}} + \frac{L}{V_2} + \left(\frac{100}{K} + B\right) \left(\frac{V_a}{2d_s}\right) + \frac{a_s t_{os}^2}{2V_a} \left(1 - \frac{V_a}{V_{max}}\right) = t_{os} + t_{jl} + t_{br} + t_d + t_{om}$$

H(s)	station headway	L	length of the longest train in meters
D	distance from front of stopped train to start of station	v <sub>a</sub>	station approach speed in m/s
v <sub>max</sub>	maximum line speed in m/s	k	braking safety factor - worst case service braking is K% of specified normal rate - typically 75%
B	separation safety factor - equivalent to number of braking distances that separate trains	t <sub>os</sub>	time for overspeed governor to operate on automatic systems - to be replaced with driver sighting and reaction times on manual systems
t <sub>jl</sub>	time lost to braking jerk limitation - typically 0.5 seconds	t <sub>br</sub>	brake system reaction time - older air brake equipment only (seconds)
t <sub>d</sub>	dwelt time (seconds)	t <sub>om</sub>	operating margin (seconds)
a <sub>s</sub>	initial service acceleration rate in m/s <sup>2</sup>	ds	service deceleration rate in m/s <sup>2</sup>

수송능력 산출 수식과 최소운전시각 산출 수식에 입력되는 데이터는 다음의 도표 1과 같으며, 이를 토대로 기존전동차와 차세대전동차의 최소운전시각을 산출하였다. 본 논문에서 기존전동차는 가장 최신의 직·교류 겸용전동차인 2005년 AC/DC 경부선 전동차를 의미한다.

도표 1. 수송능력 관련 영향인자

항 목	차세대전동차 (A)	기존전동차 (B)	비고
신호방식	이동폐색	고정폐색	CBTC
가속도(km/s <sup>2</sup> )	3.3	3.0	DDM 전동기 및 추진제어장치 등
감속도(km/s <sup>2</sup> )	3.5	3.5	
최고속도(km/h)	110	100	
중량 (편성) (ton)	336.5	337.5	경량 알루미늄
견인효율 (%)	0.93	0.8701	DDM 적용
제동효율 (%)	0.93	0.8701	
승차 정원(명)	1414	1570	

차세대전동차와 기존전동차의 최소운전시각을 도출하여 그래프로 표현하였으며, 그림 2와 같다. 최소운전시각은 각각 차세대전동차는 약 87초, 기존전동차는 약 110초로 나타났다.

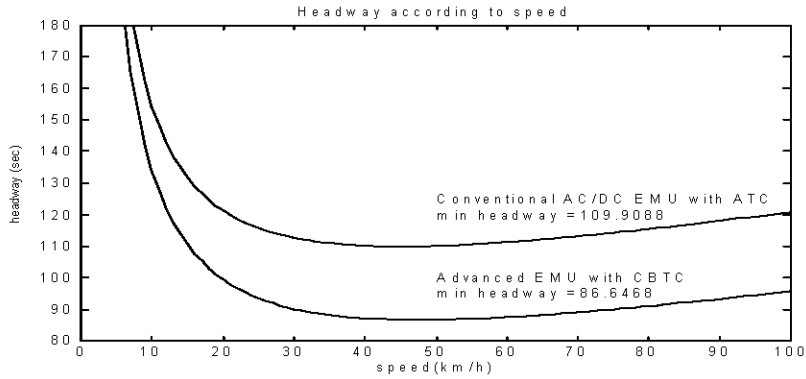


그림 2. 최소운전시격 비교 그래프

계산 결과를 바탕으로 차세대전동차와 기존전동차의 시간당 최대수송인원을 산출한 결과, 차세대전동차가 시스템 및 장치의 성능향상으로 인해 최대 수송인원이 7,129명 많으며 이는 기존전동차의 수송능력과 비교하여 13.9%의 향상으로 수송능력향상 목표치인 10%를 상회하는 결과가 나왔다.

## 2.2 유지보수성 향상

유지보수성 향상 기술은 시스템을 가용기간 동안 안전하고 효율적으로 사용될 수 있도록 하고, 전동차의 기본적인 설계목표를 항상 만족스럽게 충족할 수 있도록 유지하기 위해서 요구되는 필수적인 기술로 정의되어진다. 차세대전동차와 기존전동차 시스템을 비교하여 안전하며 신뢰성 있는 시스템 상태를 유지하기 위해 정기적으로 이루어지는 유지보수 활동에 대한 비용 및 시간 절감이 어느 정도 이루어질 수 있는지에 대하여 조사하고, 이를 분석하여 전체적인 유지보수성 향상 정도를 제시한다. 따라서 기존의 중수선 검사시 소요되는 유지보수 비용을 조사하고, 이를 통하여 차세대 전동차에 신규 혹은 성능 향상이 되어 변경되는 항목에 대하여, 유지보수 비용을 분석하였다. 아래 도표 2는 중수선 검수 산출비용 자료 중 절감 가능한 부분을 분석하여 재구성 한 것이다.

도표 2. 유지보수성 향상 가능 항목 및 절감률

장치 및 시스템		차세대전동차	기존전동차	절감률	절감 가능 사유
도어 엔진		일체형	분리형	10%	도어엔진 및 DCU 일체형
차체검사	인통문	없음	있음	25%	인통문 삭제
냉난방	라인테리어 정비	삭제	있음	30%	라인테리어 삭제
차량검사	차량 연결기	일체형 완충기	트라프트록, 싱크가이드 필요	20%	일체형 완충장치 적용
윤축	기어박스 분리 및 정비	해당 장치 없음	해당 장치 있음	85%	직접구동전동기(DDM) 적용
	기어커플링정비				
주회로	각종계전기류정비	PLC 배전반	일반 배전반	38.5%	계전기류 및 배선 정비 간소화
제어	계전기류, 차단기류 정비 및 시험	PLC 배전반	일반배전반	24.5%	계전기류 정 간소화
특고압	판타그래프 분리 및 정비	싱글암 판토그래프	크로스암 판토그래프	22.5%	싱글암 판토그래프 적용 및 편성당 판토 수량 절반 감소
	객실 히터 청소 및 정비	HVAC	객실의자 밑 개별 난방	10%	냉난방 일체형으로 해당 작업 삭제 가능
주전동기	주전동기 분리 및 정비	DDM (9년)	유도전동기(3년)	75%	DDM적용으로 무유지보수기간 연장
공기 압축기	공기압축기 분리 및 정비	무급유 공기압축기	급유식 공기압축기	34%	완전전기제동 사용, 무급유 공기압축기 적용으로 공기압축기 사용 최소화
	보조공기압축기 분리 및 정비				
입출창	각종 계전기, 스위치류시험	PLC 배전반	일반배전반	11%	PLC 배전반 적용으로 정비항목 감소

차세대전동차에 적용되는 시스템 및 장치의 적용으로 인한 유지보수성의 정도차이는 기존전동차 시스템과 중수선 데이터를 분석한 결과 아래 도표 3과 같이 나타나는 것을 알 수 있었다.

도표 3. 중수선 검수 대비 절감 가능 금액

편성(차종)	부품	인건비	총계	절감액	비율
102(VVVF)	39,615,111	300,312,736	339,927,847	64,639,948	19%
111(저항)	91,660,805	356,902,660	448,563,465	97,687,172	21.8%
264(GEC)	88,757,218	410,123,428	498,880,646	95,713,776	19.2%
269(GEC)	118,017,097	320,726,252	438,743,349	96,974,263	22.1%
286(GEC)	111,028,631	305,218,162	416,246,793	76,211,148	18.3%
평균	89,815,772	338,656,648	428,472,420	59,960,236	20.1%

위의 표에서의 결과로 나타난 절감률 20.1%는 일부 데이터가 입수되거나, 주로 유지보수 활동의 간소화로 달성할 수 있는 항목을 정리하여 도출된 것이다. 개발이 진행 중이거나 초기에 목표를 설정한 항목에 대하여, 추가적인 유지보수 관련 데이터를 입수하여 분석한다면, 설정하였던 개발목표 보다 더욱 유지보수성 향상이 가능할 것으로 판단된다.

### 2.3 승객서비스 향상

승객서비스 성능지표 항목을 도출하기 위해 기존의 연구논문 및 설문조사 결과 분석을 토대로 승객서비스에 대한 평가 항목 및 가중치를 아래 도표 4와 같이 도출하였다.

도표 4. 승객서비스 평가지표별 가중치 부여 결과

평가지표	서울메트로	관련논문	가중치 도출
공급성	17.5%	20.0%	20%
편리성	2.6%	20.0%	10%
안전성	25.0%	25.0%	25%
고객만족	54.8%	35.0%	45%

도출된 세부항목을 토대로 차세대전동차의 성능향상으로 승객서비스가 가능할 것으로 사료되는 장치 및 시스템을 기존 전동차의 유사 또는 동일한 장치 및 시스템과 비교하여 성능향상이 어느 정도 가능한지에 대하여, 분석하여 도표 5와 같이 도출하였다. 이와 같이 성능지표별 향상정도를 분석하고, 정리하면 전체적으로 승객서비스 향상은 차세대전동차에서 약 32.2%에 달하는 것으로 나타났으며, 이는 개발목표인 30% 향상을 만족하는 수치이다.

도표 5. 승객서비스 항목별 비교

항목	세부항목		적용 장치 및 시스템			
			차세대전동차	성능	기존전동차	성능
공급성	운행간격 [초]		이동 폐색식	87	고정 폐색식	110
	열차최고속도 [km/h]		DDM등 견인장치 및 제어장치	130	3상농형전동기 등 견인장치 및 제어장치	110
편리성	교통약자 편의시설		슬라이딩 스텝, 휠체어 고정 리프트, 점자 안내시스템, 등	증대	장애인석 전용 손잡이	-
	승강편의 시설		슬라이딩 스텝	신규	-	없음
	장애인 석 (10량)		10석	3.3배	3석(T-car)	1
안전성	차량 안전성	전두부 구조	충돌안전 구조	적용	충돌안전 구조	미적용
		연결기 항복강도	국제규격준수	80톤	국제규격 미준수	60톤
	차내 안전설비	CCTV	적용	신설	미적용	-
고객 만족도	열차의 쾌적성	운전실	오픈형	시야 확보	밀폐형	-
		갱웨이	확장형 갱웨이		일반 갱웨이	-
	정보 제공성	승객안내시스템	안내 판넬 추가, 정차역 주변정보	증대	단순 정차역 정보	-
		무선네트워크 서비스	인터넷 단말기, 무선인터넷 설비	-	해당 없음	-
	냉난방 및 환기	냉방	HVAC 적용 (냉·난방 일체)	45,000	천정 집약 분산식	40,000
		난방		24,011	객실의자 하부 세라믹 히터	12,600
좌석 수		불연성 재질	412석	불연성 재질	513석	

## 2.4 신뢰성 향상

본 연구에서는 신뢰성 향상 정도를 차량고장으로 인한 차량의 운행 장애의 경감에 초점을 맞추어, 기존 전동차의 장애 사례를 분석하고, 차세대전동차에 투입된 장치 및 시스템으로 미연에 방지 또는 저감 가능한 장애 유형을 도출하여 저감 가능한 정도를 수치화하고, 이를 신뢰성 향상의 척도로 삼아 계량화하는 방법으로 진행하였다.

현재 전동차를 운영하고 있는 서울메트로 운행 장애 보고서 (2005 ~ 2007)를 바탕으로 재구성하여 신뢰성 향상에 접근하였다. 운행 장애를 유발시킨 차량 고장의 원인을 차량 시스템 별로 분석하여 대차, 전기장치, 제동장치, 차량설비로 분류하였으며 각 항목별로 고장 건수를 분류하였으며 대차장치 15%, 전기장치 75%, 제동장치 10%, 차량설비 0%로 분석되었다.

차세대전동차에 적용되는 장치 및 시스템으로 운행 장애를 저감 또는 미연에 방지가 가능한 항목을 도출하였으며 도표 6은 기존전동차와 차별성을 보이는 장치들을 비교한 자료로써 해당 장치의 도입으로 운행 장애를 저감시킬 수 있는 장애 사례를 분석하였다.

도표 6. 신뢰성 향상 장치 비교

신뢰성 향상 관련 시스템		차세대전동차		기존전동차		저감건수/ 총건수	비 고
		장치	성능	장치	성능		
대차 장치	기어커플링		없음		있음	4/6	관련사고 전체 저감 가능
전기 장치	견인전동기	DDM	무보수유지 기간 9년 (전폐자냉형)	유도 전동기	무보수유지 기간 3년 (자기통풍식)	4/30	DDM 전동기로 신뢰성 향상
	추진시스템 방식	분산방식 (1C1M)	출력신뢰성 향상	집중방식 (1C4M)	고장 시 출력저하 큼		출력 부족으로 인한 고장 저감
제동 장치	공기압축기	무급유식	윤활유 없음	급유식	윤활유 있음	2/4	윤활유 관련 고장 없음

차량의 운행장애를 저감하는 관점으로 분석한 차세대전동차량의 신뢰성 향상 정도를 계량화한 결과 위의 표와 같이 24.7%가 나왔으며, 차세대전동차의 개발 목표인 신뢰성 향상 20%를 만족하는 것으로 나타났다.

## 2.5 에너지 절감

차세대전동차의 개발로 기존전동차와 비교하여 차세대전동차에서 신설 또는 성능 향상된 장치 및 시스템을 검토하고, 에너지 소비량을 TPS로 분석하여, 차량의 운행 중 소비되는 전력량을 산출하여, 저감할 수 있는 정도를 도출하여 이의 향상정도를 계량화하는 것으로 진행하였다.

에너지 절감을 표현하기 위해 TPS를 적용하여 위의 데이터를 기초로 기존전동차와 차세대전동차의 성능 데이터를 입력하고, 동일 노선 (서울메트로 4호선 상계~사당)을 1회 왕복하는 조건으로 수행하여 다음 표 3-25와 같이 결과를 도출하였다.

도표 7. 차세대전동차 VS 기존전동차 TPS 수행 결과

항 목	차세대전동차 (A)	기존전동차 (B)	A-B
총 주행거리 [m]	56634.0	56634.0	0
총 주행시간 [s]	5216.6	5221.3	-4.8
표정 속도 [km/h]	39.1	39.1	0
역행 에너지 [kwh]	1741.7	1798.2	-56.5
역행시의 I <sub>rms</sub> [A]	1289.7	1298.9	-9.2
역행시 평균전류 [A]	801.3	826.6	-25.3
총 회생에너지 [kwh]	737.9	676.1	61.8
회생시 I <sub>rms</sub> [A]	785.8	732.8	53.0
회생시 평균전류[A]	-339.5	-310.8	-28.7
총 AUX. 에너지	219.9	220.1	-0.2
Peak 전류 [A]	4440.0	4457.8	-17.8

차세대전동차의 개발로 이루어진 에너지저장장치의 회생에너지 재사용, 직접구동전동기(DDM)의 적용으로 전동기 및 기어 효율의 향상, 기타 제어기기 등의 성능 향상으로 최고속도 및 가속도 향상, 차량경

량화를 통한 부하중량 감소 등의 원인으로 인해 차세대전동차는 기존전동차 시스템보다 23%의 에너지 절감이 가능한 것으로 조사되었다. 이는 당초 목표였던 20%를 상회하는 것으로 완전전기 제동을 통한 회생에너지 증가, 기타 기기의 효율 향상 등을 통하여 추가 상승이 가능할 것으로 사료된다.

### 2.6 친환경성 향상

차세대전동차에 적용된 장치 중 친환경성 향상과 연관성을 가지는 장치 및 시스템을 분석하여 기존전동차와 비교하여 성능 향상 정도를 계량화 하였다. 성능 향상인자는 기존의 선행 연구자료를 토대로하여 재활용성 향상, 환경오염물질 저감, CO2 발생저감으로 선정하였다. 친환경성과 관련하여 기존전동차와 성능 비교한 결과는 도표 8과 같다.

도표 8. 친환경성 비교결과

영향 인자	차세대전동차	기존전동차	비 고
재활용성 향상	알루미늄 구체	스테인레스 구체	경량화 및 재활용률 향상
환경오염물질 저감	완전전기제동(M-car)	공기+전기제동	제동 시 분진 발생 저감
	무급유식 공기압축기	급유식 공기압축기	폐유발생 저감
	냉방장치 친환경 냉매 적용 (R-407C, R-410A)	일반 냉매 (R-22, 등)	환경오염 저감
	발암물질 zero 내장재	발암물질 zero 내장재	동일
CO <sub>2</sub> 발생저감	저장시스템 적용	저장시스템 미적용	에너지 저장장치 설치

친환경성과 관련된 비교 데이터는 표 3-28과 같으며 각 항목에 대한 가중치는 균등하게 하여 재활용성 33%, 환경오염물질 저감 33%, CO2 발생저감 33%로 책정하였고 친환경성의 특성상 zero가 되는 것에는 무리가 있어 보여 성능 향상이 없는 항목은 0%를, 성능이 향상되는 항목에는 5%, 신설 또는 zero가 가능한 항목에는 10%의 향상치를 부여하였다.

본 항목의 연구 결과 차세대전동차의 개발로 친환경성은 기존전동차와 비교하여 약 11% 이상의 향상이 가능한 것으로 조사되었다. 이는 개발 목표인 10%를 만족하는 것으로 나왔으나, 추가적인 보완 연구를 통하여 보다 광범위한 항목에 대하여 검토할 필요가 있을 것으로 판단된다.

### 3 결 론

본 논문은 차세대전동차의 주요 성능 목표인 수송능력, 유지보수, 승객 서비스, 신뢰성, 에너지 절감, 친환경성 향상 등의 목표에 대한 성능 향상에 미치는 주요 성능지표를 도출하였으며, 성능지표에 대한 계량화 연구를 진행하였다.

본 연구의 결과는 차세대전동차 개발로 얻어지는 평가 항목별 성능 향상에 대한 객관성을 가지는 입증 자료로 활용되는 것뿐만 아니라 계량화를 위해 적용된 접근방법과 입수 자료 등은 차후 이와 유사한 연구에도 유용한 자료로 사용되어 질 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 김용기 (2007) 외, “전동차 환경성 평가 S/W RACE의 개발”, 한국철도학회 논문집.
2. 김성남 (2003), “철도 고객만족서비스 향상을 위한 이용자 행동에 관한연구”, 한국철도학회.
3. 진미자 (1996) 외, “지하철 차량 실내디자인의 편의성과 안전성 증진요소 분석”, 한국철도학회.
4. Transportation Research Board(1977), “Rail Transit Capacity”, TCRP REPORT.
5. 서울메트로 경영관리팀 (2008), “지하철 이용고객 여론조사 결과 보고”
6. 김연규 (2003), “철도서비스 평가를 위한 항목 및 지표의 선정방안”, 한국철도학회.
7. 박덕신 (1996) 외, “철도 전동차내의 쾌적성 평가에 관한 연구”, 한국철도학회.