

도시철도시스템을 위한 가변편성시스템의 적용성 연구

이한민, 김길동, 오세찬, 이장무
한국철도기술연구원, 한국철도기술연구원, 한국철도기술연구원, 한국철도기술연구원

A Study on Application of Changeable Set System for Urban Transit System

Hanmin Lee, Gildong Kim, Sechan Oh, Changmu Lee
KARI, KARI, KARI, KARI

Abstract - The changeable set system need to be developed to devoid a traffic congestion for rush hour. We will apply the changeable set system to solve this problems. The cost-effectiveness is reviewed when we apply this system on Korean urban transit system.

1. 서 론

오늘날 우리나라의 경제, 사회적 규모의 확대발전에 따라 교통량이 급격히 증가하면서 이동시간이 길어지고 있다. 특히 도심의 경우에는 교통문제가 심각한 상황에 이르렀으며, 이를 해소하기 위하여 서울, 부산, 대구, 인천 및 광주 등 대도시의 경우 각 지자체에서 도시철도를 건설하여 교통 혼잡을 해소하고 대중교통을 활성화하는 긍정적인 효과를 얻고 있다. 그러나 각 지자체에서 운영하고 있는 차량의 편성체계는 서울의 경우 1-4호선은 1편성 10량이며 5-7호선은 8량, 8호선은 6량 등, 시간대별 교통 수요에 관계없이 호선별로 고정편성으로 운영되고 있으며 혼잡시간대에는 운전시격을 조정하는 방법으로 교통수요에 대처하고 있다. 이로 인하여 비 첨두시간대에는 에너지의 낭비요소 및 승객의 대기시간 증대 등의 현실적인 문제점이 존재함으로 교통수요에 탄력적으로 대응할 수 있는 가변편성차량의 개발과 이에 대한 적용 검토연구가 무엇보다 중요한 과제로 부각되고 있다.

2. 국내외 기술개발현황

2.1 국내 기술개발현황

2.1.1 철도공사의 가변차량편성사례조사

국내 새마을호 PP동차 중 13편성에 다방향 복합연결기를 설치하여 8량 2편성을 복합연결하여 서대전에서 8량씩 분리하여 경부선, 호남선 각각 8량1편성으로 하행 운행하고 상행 시에는 서대전에서 다시 8량 2편성을 복합연결하여 서울로 상행운전하는 방식으로 가변편성운행이 시행되고 있다.

2.1.2 국내 도시철도 운영기관의 가변편성사례 조사

기존 도시철도 전동차의 경우 제작시방서에는 기본편성을 4량 2M2T, 또는 6량 3M3T를 기본편성으로 하고 영업운전은 6량, 8량 및 10량까지 가변편성 가능토록 규정하고 있으나 위의 편성현황에 나타난 바와 같이 차량의 편성체계는 서울의 경우 1-4호선은 1편성 10량이며 5-7호선은 8량, 8호선은 6량 등, 시간대 별 교통수요에 관계없이 호선 별로 고정편성으로 운영되고 있으며 혼잡시간대에는 운전시격을 조정하는 방법으로 교통수요에 대처하고 있다.

아울러 1998년 2월에 제정된 건설교통부고시 도시철도 차량 표준사양 1.4항의 운전조건에는 "제작되어지는 노선의 수송수요에 따라 4량 편성(2M2T), 6량 편성(3M3T), 8량편성(4M4T), 10량편성(5M5T)등으로 정할 수 있다."라고 기술되어 있어 고정편성을 기반으로 하는

편성단위의 선택적 개념으로 규정되어있다. 기술적인 측면에서는 차량의 연결장치도 기존의 밀착식 연결기로서 체결 및 분리가 원활한 구조가 아님으로 하드웨어적으로도 가변편성운영은 불가능한 상황이다.

2.1.3 국내 경량철도의 가변편성 사례조사

현재 각 지자체에서 경량전철 건설사업을 활발하게 추진하고 있으나 현재 시험운영중이거나 실시설계가 완료된 사업을 기준으로 차량의 편성체계 및 가변편성 운영 사례는 다음과 같다.

(가) 한국철도기술연구원 경량전철시험선

한국 철도기술연구원에서 추진 중인 경량전철 기술개발사업을 통하여 확정예정인 경량전철 표준사양의 경우 2.2항(차량편성)에는 다음과 같이 가변편성을 규정화 하고 있다.

① 차량형식 : 고무차륜방식의 AGT

② 차량편성체계

차량의 편성은 동력대차와 부수대차를 각각 포함한 2량 1편성 고정편성으로 운행하며 첨두시간 대에는 동일 편성을 증결하여 운행함으로써 요구 수송수요를 만족 할 수 있어야 한다.

③ 가변편성방법

비 첨두시에는 2량 1편성으로 운행 함으로써 운영의 효율성을 높이고 증결편성 시에는 차량의 신속한 증결을 위해 기존 편성에 별도의 설비를 추가하거나 개조 없이 증결편성이 가능하도록 하여야한다.

(나) 용인경전철

① 차량형식 : LIM 방식의 ART (Advanced Rapid Transit)

② 차량편성체계 : 1량 1편성

③ 가변편성 적용여부

공기, 전기 및 기계식 연결기 가 복합적으로 구성된 복합연결기를 사용하여 가변편성이 가능하도록 설계되었다.

(다) 부산 지하철 3호선 (미남-안평구간) 경전철

① 차량형식 : 고무차륜방식의 AGT

② 차량 편성은 동력을 가진 차량을 포함한 차량으로 6량 1편성으로 구성한다(총 17개편성 102량).

③ 가변편성 적용여부

④ 차량제작사양서의 2.4항 운전조건에는 "차량의 최소 운전시격은 2분 이내로 하며 이러한 운행시격은 수송수요에 따라 가변될 수 있다."라고 규정되어있다.

⑤ 선두차의 전면연결기는 기존 전동차에 사용하는 밀착식 연결기를 설치하고 공기, 전기연결기는 별도로 설치함으로써 고정편성개념으로 운영예정이다.

2.2 해외 기술개발현황

해외 주요국가의 가변편성열차의 운행사례는 다음과 같다.
표 1. 가변편성의 운행사례

국가	시행처	열차종류	운영구간	가변편성	개요
일본	동일본 철도	400계+200K	Tokyo-Fukushima	7량1편성+8량1편성	과부하시 가변편성
		400계+E4		7량1편성+8량1편성	
		E2+E3	Tokyo-Morika	10량1편성+6량1편성	
		8000계	Tokyo 경왕선	4량1편성+6량1편성	
프랑스	SNCF	TGV-PSE	파리-리용	10량1편성 × 2	과부하시 가변편성
독일	DBAG	ICE #3	베를린-함-도르트문트	8량1편성 × 2	과부하 구간 복합편성
			베를린-함-에센		

3. 적용성 검토 및 방향설정

3.1 에너지절감 측면의 적용성검토

3.1.1 비교 분석을 위한 개념 설정

① 검토대상노선 선정

기존 지하철 노선 중 가장 혼잡한 구간인 서울메트로 2호선을 대상노선으로 선정한다.

② 가변편성 개념설정

- 서울 메트로 2호선(본선)

서울 메트로 2호선(본선)의 기존역사의 시설변경 없이 운영가능한 가변편성은 10량 1편성, 5량 1편성 또는 2량 1편성의 세가지 방식이나 2량 1편성의 경우는 첨두시 5개 편성을 연결해야 하는 등 연결작업이 번거롭고 연결소요 시간과다로 운영상 문제가 있어 현실적인 대안에서는 제외하고 10량 1편성과 5량 1편성의 2가지형태를 가능한 가변편성으로 확정한다.

3.1.2 비교분석 방법

본 가변편성 시 경제적 효과분석의 항목으로는 운영기관의 보유차량수량 증감, 유지보수비, 운영요원의 증감에 따른 인건비 및 운행 전력비 등을 들 수 있으나 보유차량수는 첨두시 최대편성을 기준 함으로 가변편성에 관계없이 고정편성과 동일하며 따라서 유지보수비도 동일하다. 아울러 운전승무원의 수도 차량의 편성형태만 다를 뿐 운전시격은 기존과 동일함으로 고정편성과 다르지 않다. 결과적으로 가변편성운영 시 경제적 효과가 가장 현저하게 차이나는 부분은 운영전력비이며 이를 중심으로 에너지절감 효과를 분석하였다.

3.1.3 에너지절감효과 분석

① 기존 10량 1편성 고정편성 시 전력비 분석

② 운행 횟수 및 시간당 운행차량 수 검토(1억 내선 기준)

시간대	수송 수요 (명)	시간당 평균시격 (분)	시간당 운행 횟수	1회 수송 인원 (명)	혼잡률 200% 기준		
					1회 수송시 필요 차량수	1회 수송 편성 차량수	시간당 운행 차량수 (량)
계산	①	②	③=60분/②	④=①/③	⑤=④/320	1편성: 10량	⑧×10
05'06	1,155	16.0	3.8	308.0	1.0	10량 1편성	37.5
06'07	9,809	5.5	10.9	899.2	2.8	10량 1편성	109.1
07'08	32,775	3.5	17.4	1884.5	5.9	10량 1편성	173.9
08'09	65,381	3.0	20.0	3269.1	10.2	10량 1편성	200.0
09'10	45,614	3.5	17.1	2660.8	8.3	10량 1편성	171.4
10'11	24,532	5.5	11.0	2230.1	7.0	10량 1편성	110.1
11'12	21,742	5.0	12.0	1811.8	5.7	10량 1편성	120.0
12'13	20,826	5.5	10.9	1909.0	6.0	10량 1편성	109.1
13'14	22,938	5.5	10.9	2102.6	6.6	10량 1편성	109.1
14'15	23,276	5.5	10.9	2133.6	6.7	10량 1편성	109.1

15'16	26,972	5.5	10.9	2472.4	7.7	10량 1편성	109.1
16'17	30,577	5.5	10.9	2802.9	8.8	10량 1편성	109.1
17'18	39,641	4.0	15.0	2642.8	8.3	10량 1편성	150.0
18'19	71,225	3.0	20.0	3561.3	11.1	10량 1편성	200.0
19'20	69,968	3.0	20.0	3498.4	10.9	10량 1편성	200.0
20'21	44,160	3.0	20.0	2208.0	6.9	10량 1편성	200.0
21'22	38,313	4.0	15.0	2554.2	8.0	10량 1편성	150.0
22'23	36,385	5.0	12.0	3032.1	9.5	10량 1편성	120.0
23'24	18,290	8.5	7.1	2591.1	8.1	10량 1편성	70.6
00'01	5,099	12.5	4.8	1062.2	3.3	10량 1편성	48.0
합계	648,698		260.6				2606.1

③ 전력비 검토

구분	총운행횟수 (회/편성)			편성당 소모 전력 /48.8km (kwh)	1일 총 소모 전력 (kwh)	1일 총 전력비용 (원)	1개월 총 전력비용 (원)
	내선	외선	계				
10량 1편성	260.6 회	260.6 회	521.2 회	1,630 kwh	849,556	60,828,209	1,824,846,270

④ 가변편성(안) 전력비 분석 [현재시격기준 Rush/H 시에만 가변편성]

[# Rush/H (수송수요 3만명이상-10량 편성), 비 Rush/H (수송수요 3만명 미만-5량 편성)]

⑤ 운행 횟수 및 시간당 운행차량 수 검토(1억 내선 기준)

시간대	수송 수요 (명)	시간당 평균시격 (분)	시간당 운행 횟수	1회 수송 인원 (명)	혼잡률 200% 기준		
					1회 수송시 필요 차량수	1회 수송 편성 차량수	시간당 운행 차량수 (량)
계산	①	②	③=60분/②	④=①/③	⑤=④/320	1편성: 10량	⑧×10
05'06	1,155	16.0	3.8	308.0	1.0	1편성: 5량	⑧×5
06'07	9,809	5.5	10.9	899.2	2.8	5량 1편성	54.5
07'08	32,775	3.5	17.4	1884.5	5.9	10량 1편성	173.9
08'09	65,381	3.0	20.0	3269.1	10.2	10량 1편성	200.0
09'10	45,614	3.5	17.1	2660.8	8.3	10량 1편성	171.4
10'11	24,532	5.5	11.0	2230.1	7.0	5량 1편성	110.1
11'12	21,742	5.0	12.0	1811.8	5.7	5량 1편성	120.0
12'13	20,826	5.5	10.9	1909.0	6.0	5량 1편성	109.1
13'14	22,938	5.5	10.9	2102.6	6.6	5량 1편성	109.1
14'15	23,276	5.5	10.9	2133.6	6.7	5량 1편성	109.1
15'16	26,972	5.5	10.9	2472.4	7.7	5량 1편성	109.1
16'17	30,577	5.5	10.9	2802.9	8.8	10량 1편성	109.1
17'18	39,641	4.0	15.0	2642.8	8.3	10량 1편성	150.0
18'19	71,225	3.0	20.0	3561.3	11.1	10량 1편성	200.0
19'20	69,968	3.0	20.0	3498.4	10.9	10량 1편성	200.0
20'21	44,160	3.0	20.0	2208.0	6.9	10량 1편성	200.0
21'22	38,313	4.0	15.0	2554.2	8.0	10량 1편성	150.0
22'23	36,385	5.0	12.0	3032.1	9.5	10량 1편성	120.0
23'24	18,290	8.5	7.1	2591.1	8.1	5량 1편성	70.6
00'01	5,099	12.5	4.8	1062.2	3.3	5량 1편성	24.0
합계	648,698		260.6				2308.8

⑥ 전력비 검토

구분	총운행횟수 (회/편성)			편성당 소모 전력 /48.8km (kwh)	1일 총 소모 전력 (kwh)	1일 총 전력비용 (원)	1개월 총 전력비용 (원)
	내선	외선	계				
10량 편성	167.4	167.4	334.8	1630 kwh	545,724	39,073,838	1,172,215,140
5량편성	93.2	93.2	186.4	815 kwh	151,916	10,877,184	326,315,520
계	260.6	260.6	521.2		697,640	49,951,022	1,498,530,660

⑦ 검토결과

현행의 10량 고정편성에 비하여 연간 39.1 억원 정도의 전력비 절감이 가능하나 비 Rush Hour(수송수요 3만명미만)에 현행시격기준으로 5량 가변편성 시 수송수요를 만족시킬 수 없는 경우가 많아 이 경우는 운전시격을 보다 조밀하게 조정할 필요가 있다. 따라서 위 가변편성(안)을 기준으로 비 Rush Hour시에 5량 가변편성에 따른 수송수요를 만족시킬 수 있는 가변편성 시행대안 마련이 필요하다.

㉑ 가변편성 시행대안 제시

위의 검토결과를 기준으로 가변편성 시행 시 가장 적합한 방안은 위 가변 편성 1안을 기준으로 하되 비 Rush Hour(수송수요 3만명 미만)에 5량 가변편성 시 수송 수요를 만족시킬 수 없는 시간대에 운전시격을 적절히 조정하는 방안으로서 그 결과는 다음과 같다. ① 운행 횟수 및 시간당 운행차량 수 검토(1억 내선 기준)

시간대	수송 수요 (명)	시간당 평균 시격(분)	시간당 운행 횟수	1회 수송 인원 (명)	본점률200%기준			
					1회 수송 시 필요 차량수	1회 수송 시 편성 차량수	시간당 운행 차량수	
								1편성10량
계산	0	0	③=60분/④	⑤=0/⑥	⑦=0/320			
05'06	1,166	16.0	3.8	308.0	1.0	5량1편성	18.8	
06'07	9,809	5.5	10.9	899.2	2.8	5량1편성	54.5	
07'08	32,775	3.5	17.4	1884.5	5.9	10량1편성	173.9	
08'09	65,381	3.0	20.0	3269.1	10.2	10량1편성	200.0	
09'10	45,614	3.5	17.1	3660.8	8.3	10량1편성	171.4	
10'11	24,562	3.5	17.1	1432.2	4.5	5량1편성	85.7	
11'12	21,742	4.0	15.0	1449.4	4.5	5량1편성	75.0	
12'13	20,826	4.5	13.3	1561.9	4.9	5량1편성	66.7	
13'14	22,938	4.0	15.0	1529.2	4.8	5량1편성	75.0	
14'15	23,276	4.0	15.0	1551.7	4.8	5량1편성	75.0	
15'16	26,972	3.5	17.1	1573.4	4.9	5량1편성	86.7	
16'17	30,577	5.5	10.9	2802.9	8.8	10량1편성	109.1	
17'18	39,641	4.0	15.0	2642.8	8.3	10량1편성	150.0	
18'19	71,225	3.0	20.0	3561.3	11.1	10량1편성	200.0	
19'20	69,968	3.0	20.0	3498.4	10.9	10량1편성	200.0	
20'21	44,160	3.0	20.0	2208.0	6.9	10량1편성	200.0	
21'22	38,313	4.0	15.0	2554.2	8.0	10량1편성	150.0	
22'23	36,385	5.0	12.0	3032.1	9.5	10량1편성	120.0	
23'24	18,290	5.0	12.0	1524.2	4.8	5량1편성	60.0	
00'01	5,099	12.5	4.8	1062.2	3.3	5량1편성	24.0	
합계	648,698		291.4				2294.8	

㉒ 전력비 검토

구분	총운행횟수 (회/편성)			편성당 소모전력 /48.8km	1일 총 소모 전력 (kwh)	1일 총 전력비용 (원)	1개월 총 전력비용 (원)
	내선	외선	계				
10량 편성	167.4	167.4	334.8	1630 kwh	545,724	39,073,838	1,172,215,152
5량 편성	124.0	124.0	248.0	815 kwh	202,120	14,471,792	434,153,760
계	291.4	291.4	582.8		747,844	53,545,630	1,606,368,912

㉓ 에너지 절감효과 비교

방안	구분	전력비/월 (원)	전력비/년 (원)	절감효과/년 (원)
고정편성	10량편성	1,824,846,270	21,898,155,240	-
가변편성 (안)	R/H 기준	1,498,530,660	17,982,367,920	3,915,787,320
가변편성 시행 대안	수송수요 및 시격 기준	1,606,368,912	19,276,426,944	2,621,728,296

㉔ 결론

따라서 위 가변편성 시행대안으로 가변편성시행 시 비 Rush Hour시에도 5량 편성으로 수송수요를 만족시키면서 전력비를 연간 약 26억원 정도 절감할 수 있다. 그러나 절감 금액/년은 차량가격상승, 인건비 상승, 가변편성 추가설비비가 포함되지 않은 금액이다.

3.2 기술적인 측면

가변편성은 기존의 역사 설비의 스크린도어 등과의 인터페이스 문제가 있으며, 신호방식 및 시설물의 전면 개조가 필요하다. 또한 가변편성은 고정편성에 비하여 운

전설 차량중대로 운전설비, TCMS, 가변 편성연결기 및 필수동력설비 등의 추가로 차량가격상승 및 추가설비 유지보수비용의 증대뿐만 아니라 이로 인한 열차중량의 증가 및 객실공간감소 등 기술적으로 불리한 점이 많다.

3.3 운전운영 측면

가변편성을 가까운 일본의 동경 Metro 및 JR의 도심 노선에서 운행사례가 없으며, 운전 시격이 다소 긴 교외 선에서 운행되고 있다. 가변편성은 고정편성에 비하여 시간대별, 요일별로 가변편성운전을 위한 편성 작업시간을 감안, 면밀한 Dia 조정이 필요하며 행사 등의 일시적인 승객수요 증대 시 사전 대응이 곤란한 점 등 운전운영 측면에서는 불리한 점이 많다.

3.4 소요인원 및 추가설비 측면

가변편성은 고정편성에 비하여 가변편성작업을 위한 시간이 5분정도 소요되는데 이는 2-3분의 도심구간에서 운전 Dia를 맞추수가 없다. 편성 및 분리를 위한 작업인원도 3명이 필요하다. 이는 가변편성 시행 대안의 예에서 3명을 한 팀으로 1시간에 12편성을 가변편성한다고 볼 때, 피크 시간대에 최대 8개 팀이 필요하다. 따라서 24명의 인원이 필요함을 알 수 있다. 1명의 1년 인건비를 0.4억으로 본다면 약 10억 정도가 인건비가 소요될 것이다. 또한 준비편성 및 대기편성유치 공간 등의 추가설비 등이 필요하다. 또한 차량가격 상승분 약 13억 및 추가시설비 1.5억원 등을 고려하면 연간 1.5억원의 에너지절감 효과 밖에 없을 것으로 판단된다.

3.5 승객안전 측면

승객안전측면에서 가변편성은 고정편성에 비하여 Platform에서 승객대기위치가 달라 편성형태별로 승객편의를 위하여 Platform에 차량번호별 대기위치 별도표기 및 안내방송이 필요하며 향후 전역에 Platform Screen Door 설치 시 가변편성차량의 길이에 따라 차량 Door와 PSD의 열림장치가 정밀하게 연동되지 않을 경우 낙상 등의 안전사고 발생의 소지가 있으므로 철도시스템 전반의 신뢰성확보에 더 많은 비용과 주의가 필요하다.

4. 결 론

고정편성 또는 가변편성 중 어떤 것이 유리한지는 위에서 검토한 바와 같이 가변편성에 따른 기술적인 측면, 운전운영측면, 소요인원 및 추가설비측면, 승객안전측면에서 소요되는 추가비용과 열차의 내용연수동안의 에너지절감비용에 대한 경제성분석을 통하여 종합적으로 판단하는 것이 바람직하다. 즉, 에너지 절감, 소요인원의 인건비, 신호방식 및 시설물의 전면 개조, 운행 Dia의 개조, 혹시 일어날지 모르는 PSD와의 안전문제 등으로 큰 장점이 없는 것으로 판단된다.

또한 가변편성에 따른 기술적인 측면, 운전운영측면, 소요인원 및 추가설비측면, 승객안전측면에서 여러 가지 문제점이 있어 당장은 가변편성방식을 도입하는 어려운 것으로 판단되나 연구로서는 장기적으로 계속되어야 할 것으로 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 철도청, "수도권전철 정기 교통량조", 2001
- [2] 교통개발연구원, "수도권전철 이용효율 증대를 위한 광역전철 운행체계 개선방안 연구", 2003
- [3] 한국철도기술연구원, "이층열차 경제적 타당성검토", 2004