틸팅차량 투입 기술적 타당성 기초연구(1)

A Basic Technical Feasibility Study for Operation of Tilting Train in Conventional Railway(1)

유 원희*, 김 남포*, 정 우진*, 김 경태*

You, Won-Hee* Kim, Nam-Po* Jung, Woo-Jin*, Kim, Kyung-Tae*

ABSTRACT

Recently the operation of tilting train is considered in order to speed up the conventional railway. The vehicle and track should be studied to operate the tilting train. In this study, the basic technical feasibility was studied in order to operate the tilting train in the specific line.

1. 서론

경부고속철도의 2004년 개통과 함께 국토의 균형발전과 철도의 경쟁력 제고를 위해, 기존노선에서의 고속서비스 제공의 필요성이 크게 대두되고 있다. 이를 위하여 곡선궤도가 많고 상대적으로 교통수요가 많지 않은 구간에 틸팅차량을 투입 운행하기 위한 방안이 강구되고 있다.

틸팅차량은 차체의 자세제어에 의해 승차감의 큰 저하 없이 일반차량보다 곡선부를 빠른 속도로 주행할 수 있는 장점이 있는 차량으로서, 곡선부가 많은 노선에서의 운행시간 단축 효과가 큰 특징이 있다. 틸팅차량은 고속화의 폭은 크지 않지만 기존의 하부구조를 최대한 활용하여, 효과적으로 고속서비스를 제공할 수 있다는 장점이 있어, 세계 여러 철도 운영자들의 높은 호응을 받고 있다. 현재 전 세계적으로 13개국에서 틸팅차량을 적용하고 있으며, 틸팅 기술의 성숙과 경제성의 입증, 경제적 여건변화에 따라 틸팅차량의 적용은 급속히 확산되고 있는 실정이다.

국내에서도 최근의 어려운 경제환경을 감안, 큰 투자를 필요로 하지 않는 틸팅차량을 적용하여 기존노선의 속도향상을 도모하려는 노력이 기울여지고 있다. 따라서 본 연구는 이의 일환으로 곡선이 비교적 많은 국내 특정 노선에 대하여 틸팅차량 운행에 따르는 기술적 문제점 검토 및 틸팅차량 도입의 경제적 타당성을 검토하고자 하였다.

2. 운행소요시간 분석

2.1 해석 차량

차종별 운행시간 단축효과를 분석하기 위하여 전후동력 새마을호 열차와 ICT411 틸팅열차의 2개 차종을 사용하였다. 각 차량의 주요 제원은 표 1과 같다. 전기식 틸팅열차는 독일에서 운용중인 최고속도 230km/h급 ICT(Class 411) 차량을 대상으로 하여 5량 편성으로 모델링하였다.

* 한국철도기술연구원

표 1 전후동력 새마을호 및 ICT411 열차의 제원

항 목	새마을호 제원	ICT411 제원
차량편성	PMC + 6T + PMC(8량)	T+3M+T(5량)
편성중량(영차)	405 ton	280 ton
견인력	Fig. 2-3	Fig. 2-4
감가속도	1.75 km/h/s 적용 비상시:3.31km/h/s	1.8 km/h/s 적용 비상시:3.45km/h/s
최고속도	140 km/h	230 km/h

2.2 선로 및 속도 제한

운행시간 예측을 위해선 차량, 운용선로, 정차역 및 정차시간, 곡선통과속도 및 하구배 제한속도 등과 같이 운용조건에 대한 정밀한 데이터를 요한다. 그러나 계획 단계인 현 단계에서는 이에 대한 데이터가 불충분하고, 따라서 모든 데이터를 가정하여 개략적인 운행소요시간 해석을 수행할 수 밖에 없다. 다음은 운행소요시간 해석을 위하여 가정한 각 분야의 해석조건을 나타낸다.

(1) 선로조건

본 해석에서 대상으로 한 선로는 개량 예정인 장항선 천안~대야 구간(이하 개량장항선이라 함)을 대상으로 하였다. 해석에 사용되는 구배, 곡선데이터는 장항선 선로제표와 개량장항선에 대한 설계데이터를 사용하였다.

그림 1은 개량장항선의 선형을 나타내는 선도로 기존선 구간은 60.8~78.9km, 92.7~108.7km 구간의 약34km로 전체구간 142.6km의 24%를 차지하고 있다.

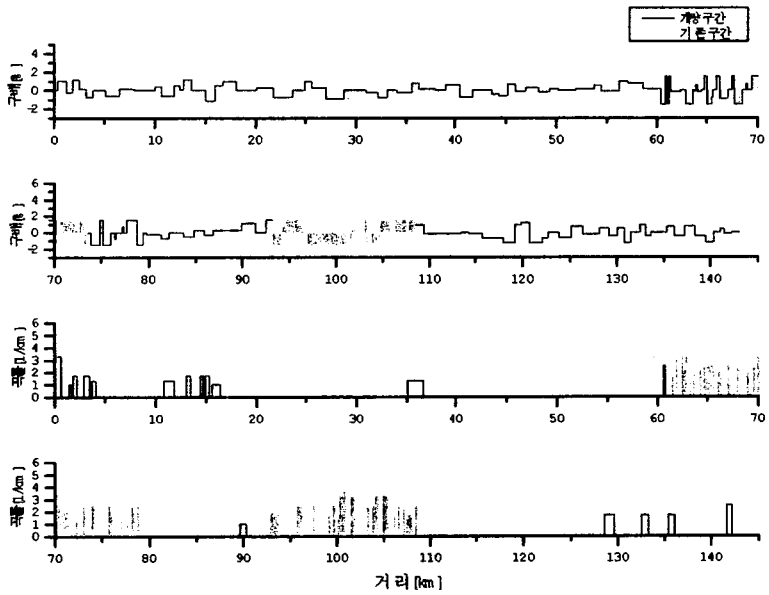

그림 1 개량장항선의 선형특성

(2) 선로제한속도 조건

하구배 제한속도는 새마을호 열차에만 적용하는 것으로 가정하였으며, 틸팅열차는 전 운용구간에서 하구배속도 제한을 받지 않는 것으로 가정하였다. 표 2는 철도청 열차운전시행절차 규정에 의거하여 새마을호 열차에 적용한 하구배 제한속도이다.

표 2 새마을호 열차 하구배 제한속도 (단위 : km/h)

하구배(%)	0.5~0.8	0.9~1.2	1.3~1.5	1.6~1.8	1.9~2.2	2.3~2.7	2.8~3.2	3.3~3.5
기존선	110	105	90	85	80	75	70	65
개량선	125	120	90	85	80	75	70	65

곡선제한속도에 대해서는, 새마을호 열차는 철도청 열차운전시행절차 규정에 의거하여 현재 운용되고 있는 속도조건으로 가정하였고, 틸팅열차는 새마을호 열차대비 약 30% 향상된 속도조건으로 가정하였다.

새마을호 열차의 운용 최고속도는 140km/h로 가정하였으며, 틸팅열차의 운용 최고속도는 150km/h로 가정하였다. 표 3과 표 4는 해석에서 적용한 차종별 곡선제한속도와 정차역 및 정차시간을 가정한 표이다.

표 3 곡선제한속도 (단위 : km/h)

곡선반경 (m)	장항선(기존구간)		장항선(개량구간)	
	새마을호	틸팅열차	새마을호	틸팅열차
300	70	100	75	100
400	80	↑	90	116
500	90	↑	100	130
600	100	↑	110	142
700	↑	↑	115	150
800	↑	↑	125	↑
900	↑	↑	130	↑
직선구간	100	100	140	150

표 4 정차역 및 정차시간

차 종	정차역(정차시간)
새마을호 열차 틸팅열차	천안, 온양(1), 홍성(1), 대천(1), 신장항(1), 대야

2.3 운행소요시간 해석 결과

검토중인 주요 안에 대하여 차량, 선로, 운행조건등에 대한 모델을 설정하였고 이에 대한 운행소요시간 해석을 수행하였다. 그림 2와 그림 3은 새마을호와 틸팅열차의 해석결과 속도선도를 보여주고 있다.

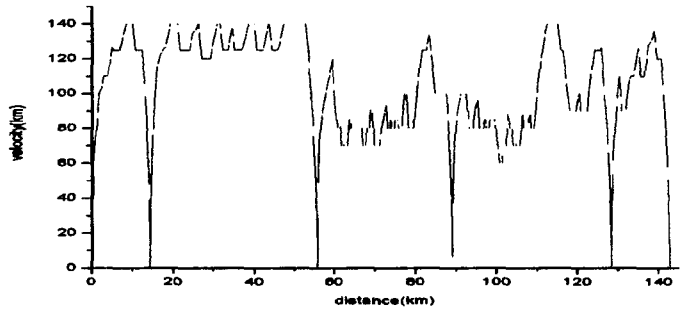

그림 2 새마을호 해석결과 속도선도

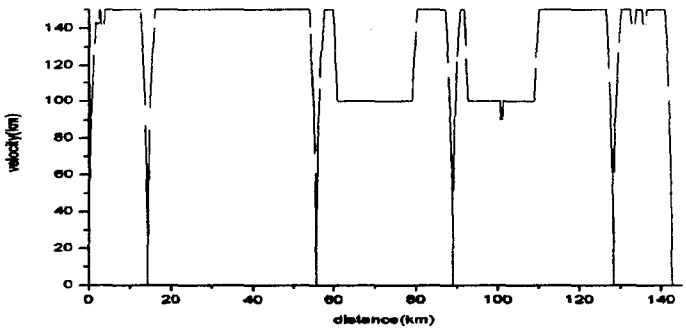

그림 3 ICT411 틸팅차량 해석결과 속도선도

장항선 천안~대야간 운행소요시간 분석을 위하여 새마을호 열차, ICT411 틸팅열차를 대상으로 소요시간을 분석하였다. 그 결과 하구배에 대한 속도제한은 설정하지 않고, 곡선통과속도는 새마을호 곡선제한속도 조건 대비 약 30% 향상시킨 경우, ICT411 틸팅열차가 19.5분(약 20.7%)의 시간단축 효과를 보일 것으로 예측되었다.

3. 선형 검토

3.1 선형 검토를 위한 평가기준

틸팅차량 투입의 타당성을 검토하기 위해서는 선형에 대한 검토가 이루어져야 한다. 선형에 대한 검토는 틸팅차량에 대한 평가기준을 기초로 하여 이루어지게 되는데, 이들 평가기준은 다음과

같다.

(1) 최대 틸팅각도 < 8 degree

시설물과의 간섭, 틸팅 메커니즘의 한계 등에 의해 거의 대부분의 틸팅차량의 최대 틸팅각도가 8도로 제한되어 있는 실정이다. 승차감 측면에서도 너무 과다한 틸팅은 바람직하지 않은 이유도 있다.

(2) 최대 틸팅각속도 < 4 degree/sec.

승차감 측면에서 과대한 틸팅 각속도는 바람직하지 않다. 엑츄에이터의 반응 한계도 고려되어야 한다.

(3) 최대 전체 롤 각속도 < 5 degree/sec.

전체 롤 각속도가 5도/sec.를 초과하면 승객들이 불쾌감을 많이 느끼기 시작한다는 연구결과들을 토대로 규정하였다.

(4) 정상 횡가속도< 0.08g

현재 적용 중에 있는 정상 횡가속도 기준 0.08g를 적용하였다.

(5) 완화곡선 승차감지수< 5

현재 승차감지수에 대한 평가 기준은 마련되어있지 않은 실정이다. 각 운영체 나름 데로의 기준을 마련하도록 권고하고 있다. 본 연구에서는 상기 평가 기준과 비교시 5정도가 적당한 기준으로 판단되었다. 실제적인 평가를 위해서는 좀 더 심도 있는 연구가 요구된다.

(6) 불평형 가속도의 시간적 변화율 < 0.03g/sec

불평형 가속도의 시간 변화율이 실험을 통하여 0.03g/sec 이하로 관리되어야 한다는 것이 설정되었으며 최대 0.04g/sec 허용될 수 있다.

3.2 장항선 속도향상을 위한 선형 검토

장항선 개량은 총 2단계 계획으로 구성되어있다. 1단계인 1997~2006년 동안 전체 구간의 76%를 개량할 예정이며 이외의 부분은 기존 선로를 이용할 계획이다. 따라서 선로는 개량선 구간과 기존의 선로 구간이 공존하는 형태가 되며 장항선을 통과하는 차량은 이들 통과 구역에 따라 운행 조건을 다르게 가져가야 만 한다. 개량선 구간은 1급선을 기준으로 설계되므로 차량 운행속도가 150km/h로 설정되어지고 곡선반경도 600m 이상으로 건설되지만 기존선 구간은 상대적으로 선형 조건이 노후하므로 고속운행에 많은 제약을 가지게 된다. 이러한 제약조건과 차량의 기본 성능을 함께 고려하여 열차운행시간 예측(TPS) 해석이 수행되었고 본 절에서는 그 결과를 바탕으로 천안~장항간 선형 검토를 수행하였다.

본 연구에서는 곡선부를 통과하는 차량들의 차량운동 한계와 이에 따른 승차감 변화를 분석하여 이것이 1절에 기술한 평가기준에 합당한지의 여부를 판별하였다. 앞에서 제시한 6가지 평가기준을 적용하였을 때 장항선 문제구간의 수는 표 5와 같이 정리될 수 있다. 결과에서 볼 수 있듯이 적절한 보완조치가 취하여 진다면 틸팅차량이 투입되어도 큰 무리가 발생되지는 않을 것으로 예상된다.

표 5 TPS 조건에 따른 선형분석

차종	선로 종류	문제구간[개소/전체]	문제 곡선부 거리[개소/전체]
ICT411	개량선 구간	0/51	0/51
	기존선 구간	0/65	6/65

4. 경제성 분석 결과

틸팅차량 투입의 기토적인 타당성을 검토하기 위하여 경제성 측면에서 분석하여 보았다. 본 연구와 같이 철도투자사업에 있어 편익의 가장 중요한 부분은 철도이용자의 교통시간 감소와 도로교통이 철도부분으로 전환됨으로 인하여 도로교통여건의 통행시간의 절약, 차량운행비 절감 등을 들 수 있다. 본 연구에서는 계량화 가능 편익으로서 시간가치 절감 및 차량운행비 절감 편익, 환경오염감소 편익, 교통사고감소 편익을 사용하였다. 그 결과는 표 6과 같다.

표 6 대안별 편익 산출 결과 단위: 백만원

구 분	ICT411 틸팅차량
2004	80,424
2005	93,948
2010	126,325
2020	155,276
2030	164,273

한편, 설문조사를 기준으로 틸팅차량에 대한 경제성 분석결과를 보면 B/C가 1.22이고 NPV가 85,821백만원, IRR이 17.26%로 나타나 상당한 우수한 사업으로 분석되었다.

5. 결론

장항선 천안~대야간 운행소요시간 분석을 위하여 새마을호 열차, ICT411 전기틸팅열차를 대상으로 소요시간과 기술적 타당성에 대한 분석을 하여 보았다.

그 결과, 하구배에 대한 속도제한은 설정하지 않고, 곡선통과속도는 새마을호 곡선제한속도 조건 대비 약 30% 향상시킨 경우, ICT411 틸팅열차가 19.5분(약 20.7%)의 시간단축 효과를 보일 것으로 예측되었다. 한편, 선형의 검토 결과 적절한 보완조치가 취하여 진다면 틸팅차량이 투입되어도 큰 무리가 발생되지는 않을 것으로 예상되었다. 또한, 설문조사를 기준으로 틸팅차량에 대한 경제성 분석결과를 보면 B/C가 1.22이고 NPV가 85,821백만원, IRR이 17.26%로 나타나 상당한 우수한 사업으로 분석되었다.

감사의 글

본 연구를 위하여 아낌없는 지원을 해주신 철도청 관계자 여러분께 감사의 말씀을 드립니다.