

AGT 시스템을 적용한 부산~김해간 경량전철 설계사례

Design Case of AGT System Applied to Busan-Gimhae Light Rail Transit

이석무* 김선곤** 임상만***
Lee, Seok Moo Kim, Sun Gon Lim, Sang Man

ABSTRACT

On August 1992, Busan-Kimhae Light Rail Transit was adopted by the first L.R.T project of Government and promoted as B.T.O configuration to cope with the rapid increase of traffic demand. The Construction of Busan-Kimhae L.R.T began on February 2006 and will be completed on July 2010. L.R.T will establish eco-friendly urban traffic system to connect Kimhae International Airport and two cities. This thesis will introduce the design case of AGT system applied to Busan-Gimhae L.R.T.

1. 서론

현대 도시는 급격한 자동차 증가로 노면교통에 의한 교통수요처리가 한계에 이르고 있으며, 대량수송이 가능하고 정시성과 신속성을 확보한 지하철을 도입하고 있다. 그러나 지하철 건설에는 막대한 초기투자비와 운영비가 소요되며 각종 지장물, 민원 및 보상비로 인해 건설이 용이하지 않은 실정이다.

수송수요와 경제성이 부족한 대도시 지선망이나 중소도시 간선망, 관광지 및 공항 등의 교통수단으로 경제적이며 효율적인 새로운 대중교통 시스템이 필요하게 되었고, 이러한 목적으로 적정한 수송용량과 정시성, 신속성을 동시에 만족하고 친환경성을 갖춘 경전철 시스템이 개발되고 있다. 현재 유럽, 일본 및 미국을 중심으로 세계 60개국 약 750~800여개 노선이 운행중에 있으며, 건설중이거나 설계중인 노선은 130~150여개 노선에 달하고 있는 것으로 파악되고 있다. 국내에서는 경전철 도입 필요성과 함께 정부에서 부산~김해간 경량전철과 하남경전철 사업을 시범사업으로 추진하였다. 민자유치사업으로 추진중인 경전철 사업은 의정부, 용인, 부산 초선읍, 광명경전철 사업 등이 있고, 재정사업으로는 부산~반송선, 광주 2호선 등이 있으며, 서울 12~13개 노선을 비롯하여 대도시와 주요 중소도시에 약 50~60여개 이상의 노선에 대해 타당성 검토 및 협상 중에 있다.

경전철 시스템은 크게 AGT(APM), 모노레일, LIM, 자기부상, 노면전철(LRT) 등이 있으며, 개발 중이거나 특이한 시스템으로는 PRT, 공기부상, Cable AGT, 도시교통형 Cable Car 등이 있다. 이 중 가장 널리 쓰이고 있는 일반적인 경전철 시스템은 AGT(Automated Guideway Transit), 모노레일, LIM, 자기부상열차가 있다.

부산~김해간 경량전철은 원활한 교통체계 구축과 도시간 연결기능 강화를 위한 광역철도망과의 연계 필요성에 따라 계획되었다. 부산광역시와 부산 서측지역의 중심인 김해시를 경전철로 연결함으로써 주거지역의 외곽 유도와 김해공항의 이용편의를 도모할 수 있으며, 신교통 시스템의 도입에 따른 국내 기술력 향상 및 국제 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 예상된다.

* 현대산업개발 토목설계팀 과장

** 현대산업개발 토목설계팀장

*** 현대산업개발 토목기술팀 과장

2. 실시설계

2.1 사업 및 노선 개요



그림 1. 노선 조감도

부산~김해간 경량전철건설 민간투자사업은 노선연장 22.986km로써 교량구조물과 정거장 18개소, 차량기지 1개소를 포함하고 있다. 사업비는 총 7,742억원(민자 4,819억원, 정부 2,923억원), 공사기간은 2006. 2월~2010. 7월로 54개월이 예정되어있으며, 사업추진방식은 BTO(Build-Transfer-Operate)로 건설 후 정부에 시설이관, 무상사용 30년간 운영을 목표로 하고 있다. 차량 운영계획은 2량 1편성으로 표정속도 38km/h, 전구간 35분 소요로 계획하였다.

부산권의 종합적인 도시철도망 구축과 도로교통 소통문제의 해소 및 광역교통망 시설과의 연계체계 구축을 위한 노선선정은 「부산권 경전철의 타당성 검토, 건설·운영 기본계획 수립 및 기술조사(교통개발연구원) 1994. 12」 및 ‘99민간투자사업 기본계획에 따른 부산~김해간 경량전철건설 민간투자시설사업 기본계획에 따라 최적 검토를 통해 사상에서 낙동강을 통과하여 김해국제공항을 거쳐, 지하철 3호선을 환승하고 대사 정거장에 이르는 부산시 구간과 불암동에서 국도14호선의 도로중앙부를 따라 원동~봉황동~신명에 이르는 김해시 구간을 선정하였다.

2.2 AGT(Automated Guideway Transit) System

미국이나 유럽에서는 일반적으로 APM(Automated People Mover)이라 불리우며 “콘크리트 혹은 철제 가이드웨이 위를 전기동력을 이용한 1량 혹은 다량편성의 무인자동운전으로 움직이는 시스템”으로 정의하고 있고, 일본에서는 “고가 등의 전용궤도를 소형경량차량이 고무타이어를 부착하여 가이드웨이를 따라 주행하는 시스템”으로 정의하고 있다. 일반적으로 AGT라 함은 자동무인운전을 전제로 소형 경량의 차량을 짧은 시격으로 운행하여 대규모 수송을 할 수 있는 경전철 시스템으로 차륜형식에 따라 철제차륜 AGT, 고무차륜 AGT로 구분한다.

AGT 시스템은 크게 차량, 전용궤도, 안내방식 및 자동운전시스템으로 구성되어 있다. 차량은 제작사, 차량모델에 따라 다르나 일반적으로 차량폭 2.08~2.85m, 길이 9.0~15m 이내로 소형으로 제작되며, 차체는 경량화를 위해 알루미늄 혹은 알루미늄 합금으로 제작하고 있다. 차량의 성능은 기존 도심지 통과를 감안하여 최소곡선반경, 최급기울기의 성능을 증가시키고 있으며, 적정 표정속도를 유지할 수 있도록 가속속도를 증가시켜 제작하고 있다. 또한 정시성 확보를 위해 타교통수단과 완전 독립적으로 건설하고 있으며, 무인운전을 기본으로 하고 전력공급방식이 대부분 제3궤도로 하부에서 전력을 공급받기 때문에 보행자가 들어올 수 없도록 안전장치를 설치하고 있다. 철제차륜 AGT의 경우 안내방식이 일반철도와 동일하게 레일에 의해 유도하는 방식을 사용하고 있으며, 궤도, 도상구조 및 전력방식도 일반철도와 동일하다. 반면 고무차륜 AGT의 경우 안내륜을 이용하여 주행하는 방식을 채택하고 있으며 안내륜의 위치에 따라 중앙안내방식, 측방안내방식, 중앙측구안내방식으로 구분할 수 있다.

부산~김해간 경량전철에 사용된 차량은 철제탄성차륜방식의 완전 무인운전 시스템인 “로템-미쓰비시 전장품-ALCATEL신호 차량”으로 소음·진동 감소를 고려한 최적설계 및 차체 30년 이상의 내구성을 확보하고 있다. 1량 수송인원은 좌석 60명, 입석 240명으로 총 304명이며, 차량의 제원은 다음과 같다.

항 목	제 원	항 목	제 원	항 목	제 원
차량 편성	2량 1편성	운전방식	무인운전	공차 중량	465kN
차량 길이	27m	차체 재질	알루미늄	만차 중량	665kN
차체 폭	2.65m	가 속 도	1.1m/s ²	최대 설계속도	80km/hr
차량 높이	3.6m	감 속 도	1.2m/s ²	최대 운행속도	70km/hr
승객용 출입문	8EA/편성	비상 감속도	1.3m/s ²	소 음	70dBA

표 1. 차량제원

2.3 설계기준

2.3.1 선로 설계기준

본선구간의 평면과 종단선형계획은 공항정거장 시점부와 중점부, 서연정정거장 시점부, 봉황정거장 시점부 및 신명정거장 시점부에 최소곡선반경 100m를 계획하였고, 직선구간의 연장은 15.388km로 직선화율 68%를 이루어 열차운행에 효율성을 갖도록 하였다. 종단곡선의 최급기울기는 50‰로 차량기지 진입부 부근에 계획되었다. 설계기준 및 적용현황은 다음 표와 같다.

항 목	기 준	적 용	항 목	기 준	적 용	
궤 간	1,435mm	1,435mm	열차최고속도	70km/h	-	
곡선 반경	본 선	50m 이상	선로 구배	본 선	60‰ 이하	최급구배 50‰
	정거장	300m 이상		정거장	3‰ 이하	3‰ 이하
	측 선	50m 이상		반입선	60‰ 이하	-

표 2. 선로설계기준

2.3.2 설계하중

기본적인 설계기준과 적용하중의 항목들은 “철도설계기준(철도교편)”을 준용하였으며, 활하중인 차량하중은 “로템-미쓰비시전장품-ALCATEL신호 차량”을 적용하여 공차중량은 465kN, 만차중량은 665kN을 적용하였다. 차량의 수평하중 및 횡하중에 대한 경량전철용 설계기준은 없으나, 차량성능에 따라 다음과 같이 제시하였다. 차량의 수평하중은 차량시스템의 성능인 가속을 1.1m/s², 감속을 1.3m/s² 적용하여, 시·제동하중은 각각 차량하중의 10.2%와 13.3%를 설계기준으로 설정하였다. 또한 차량의 횡하중은 Jerk한계 0.8m/s²을 적용하여 차량하중의 8.2%를 설계기준으로 적용하였다. 장대레일의 축방향 응력 변화량 평가를 위해 RSI해석을 실시하였으며, 그 결과 교량의 고정점간 최대거리는 130m인 것으로 나타났다. 본선의 부가 고정하중으로는 레일 및 레일패드, 연속 Plinth 및 Cable 하중을 적용하였으며, 충격계수는 철도교설계기준(철도교편)의 강합성형교 충격계수를 적용하였다.

2.4 교량설계

2.4.1 상부구조

교량상부구조의 형식결정은 경제성과 지장물 횡단시 경간변화에 대한 적용성이 우수하고, 시공성 및 공기단축이 가능한 교량형식을 검토하였다. 연약지반 여건상 하부 기초 공사비를 최소화하기 위하여 상부와 하부공사를 합한 총공사비 관점에서 최적경간을 도출하였고, 상부하중의 경량화를 위하여 강합성 St. Box교량을 계획하였다.

교량경간의 구성은 장대레일 안정성을 고려하여 고정점간 신축거리 130m 이내를 기준으로 경간분할하여 표준경간 2@50=100m로 계획하였다. 낙동강 통과구간은 하천폭 약 1,400m로 4x(4@80)=16,000m의 경간구성으로 이루어진 변단면 St. Box로 계획하여 장경간의 미관을 갖도록 하였으며, 가설공법은 수심이 깊고 유량이 많아 Barge+Crane 가설공법을 적용하여 작업공정의 단순화와 빠른 시공속도를 확보하도록 하였다. St. Box계산시 허용응력 대비 90%이상의 응력수준을 갖도록 하여 최적의 설계를 수행하였으며, 교량받침에 발생하는 부반력의 영향을 제어하기 위하여 박스당 한 개의 슈를 적용하였다.

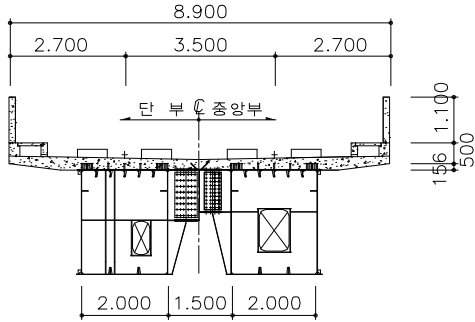


그림 2. 상부 표준 횡단면도

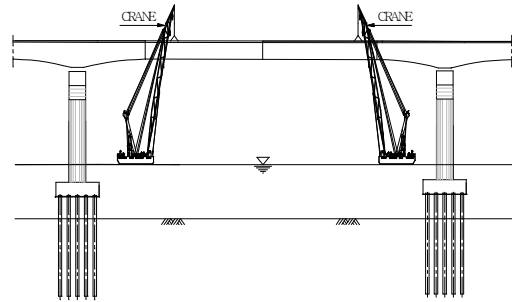


그림 3. 낙동강 통과구간 가설공법

2.4.2 하부구조

육상구간의 하부구조는 도심부 도로의 중앙분리대 및 도로측면에 위치하여 도심지 미관과 도시분할을 최소화할 수 있는 단순형식의 역T형 교각을 계획하였고, 도로 및 해반천이 간섭되는 구간에는 캔틸레버형식의 강매립합성(SRC) 교각을 적용하였다.

낙동강 통과구간의 하부구조형식은 상부구조와 연계성 및 시공성과 구조물의 효율성을 최대화하고, 장기적인 측면에서 사용성 및 유지관리성이 상대적으로 유리한 트랙형 T형 교각을 계획하였다.

말뚝기초의 설계에서 현장타설 말뚝과 강관말뚝의 지지층을 기반암층인 풍화암으로 계획할 경우 두께 10m이상의 자갈, 전석층을 통과하는 지역이 발생하며, 말뚝길이가 60m이상으로 길어져 시공 및 품질관리에 어려움이 있을 것으로 판단되었다. 따라서 말뚝의 근입깊이를 자갈, 전석층에 최소 3.0m이상 근입하도록하여 자갈, 전석층을 지지층으로 활용함으로써 경제성 및 시공성을 확보하였다. 말뚝기초 지지층의 설계개선을 통해 총 말뚝길이 36,831m를 줄이는 효과를 가져왔고, 기초공사비 143억원을 절감할 수 있었다. 지지층의 안정검토를 위해 현장타설말뚝의 현장재하시험을 실시하였고, 말뚝분당 허용지지력은 재하시험결과 800tf 이상이 나왔으며, 설계반력은 750tf으로 안정한 것으로 판단되었다. 또한 침하량 및 수평변위의 시험치도 허용치인 25mm와 15mm 이내인 10mm와 3mm의 시험값을 나타내므로써 구조물의 안정성에는 이상이 없는 것으로 판단되었다. 재하시험 결과를 다음에 나타내었다.

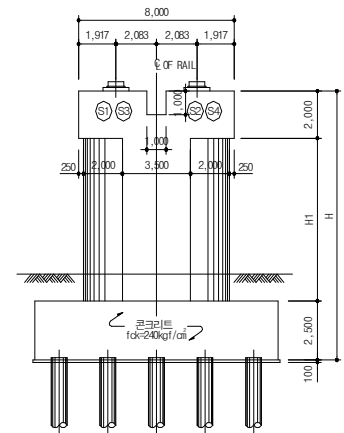


그림 4. 낙동강통과구간 하부 표준단면

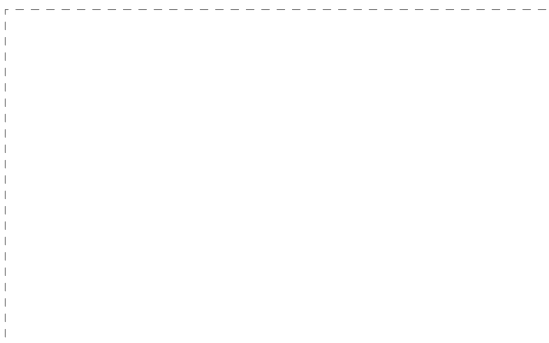


그림 5. 연직재하시험결과

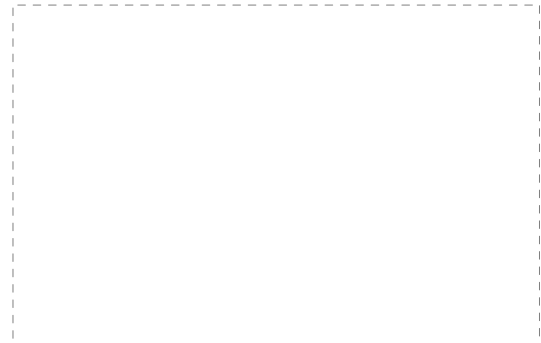


그림 6. 수평재하시험결과

2.5 정거장설계

정거장은 지역사회 상호간의 연결역할을 하는 대표적인 대중교통 시설물로서 적절한 배치여하에 따라 계획노선의 교통 분담 및 주변개발효과, 운행개시 후 승객의 흡수율 및 운전효율 등 운영전반에 걸쳐 지대한 영향을 미치기 때문에 그 중요성을 감안하여, 역세권, 연계수송 효율, 선형계획, 제반조건 및 운전효율을 검토하여 선정하였다. 정거장은 총 18개소이며, 역간평균거리는 1.296km로 계획하였으며, 타 노선과의 환승정거장은 지하철 3호선과 환승하는 서연정 정거장을 계획하였다. 또한 국철 사상역과 지하철2호선과의 환승방안을 고려하여 사상역의 위치를 배치하였다.

정거장의 선형은 직선구간 12개소, 곡선구간 6개소로, 최소곡선반경은 540m로 불암정거장에 계획하였으며, 승강장형식은 상대식으로 정거장 전체에 계획하였다. 정거장 구조는 도로의 중앙분리대와 하천 이용구간을 통과시 도로기능유지와 우수저해 및 수위상승을 고려하여 1-Column의 강재일주식 라멘형식을 적용하였으며, 정거장의 안정성과 유지관리를 고려하여 코핑부 변단면과 주거더는 I-거더로 계획하였다. 사상정거장과 공항정거장은 기능실의 배치공간 확보를 위해 일반적으로 설계에 적용되는 다주식 라멘형식을 적용하였다.

정거장 디자인은 경관설계를 도입하여 일반정거장, 수요가 많은 특급정거장 그리고 문화재에 인접한 상징정거장의 3가지 유형으로 분류 정거장별 특성을 갖도록 디자인하였다. 특히 가야문화유적 존치지구로 김해시의 김해 박물관, 도서관, 봉황대 유적이 인접한 봉황, 도서관 및 구봉 정거장은 고도시로서의 기원성 부여와 인접역사와의 조화성을 고려하여 디자인하였다.



그림 7. 도서관 정거장(문화재 인접 정거장)

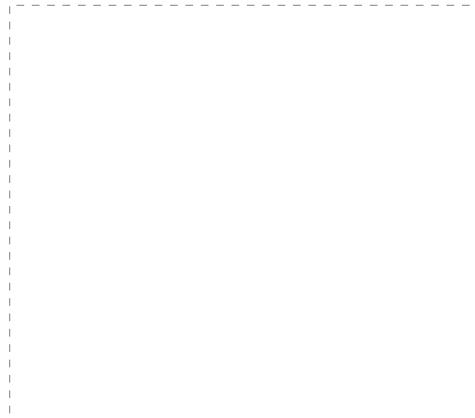


그림 8. 강재일주식 라멘정거장

2.6 차량기지

차량기지 위치 선정시, 운영적 측면과 입지적 측면을 고려하여 입·출고 거리 축소로 공차운행에 의한 운영경비 손실 최소화 및 소요면적 만큼 광활한 평지를 조성할 수 있는 지역, 양호한 접근도로에 접한 지역, 운영시 근무자의 출퇴근이 용이한 지역, 토공사 비용을 절감할 수 있는 지역을 선정하였다.

차량기지 위치는 김해시 삼계동 일대로 대상부지 대부분이 전답으로 이루어져 있으며, 시설규모는 부지면적 76,450m²(27,942평), 건축면적 14개동 10,941m²(약 3,316평)으로 차량유치규모는 사상역 주박 4편성을 제외한 41편성 유치 및 45편성 경·중정비를 할 수 있는 검수규모를 갖추고 있다. 설계시 차량의 편마모 방지를 위한 Loop형 배선과 모든 차도의 평면횡단 배제를 기본으로 설계하였다.

2.7 기타 중점검토사항

2.7.1 소음·진동 검토

철도열차 운행으로 인한 소음·진동은 전동차 및 정거장내 소음·진동과 지반 진동 및 소음으로 나눌 수 있다. 소음·진동의 평가를 위해서 본 과업 차량시스템과 가장 유사한 덴마크 코펜하겐 경전철을 실측하였으며, TWINS 프로그램에 의한 소음도와 I.S.I 프로그램에 의한 진동도를 예측하였다.

지역별 소음도 예측 결과 주간 41.3~53.9dB(A), 야간 34.3~46.9dB(A)로 철도소음규제기준(주간 70 dB(A), 야간 60dB(A))을 크게 하회하고, 현재소음도 주간 48.4~66.1dB(A), 야간 44.4~60.4dB(A)로 부산지하철 3호선, 경전선 운행시 경전철의 소음도는 암소음으로 작용할 것으로 판단된다. 한편 낙동강 철새도래지의 경우, 이격거리 10m지점 주간 51.6~53.3dB(A), 야간 44.6~46.3dB(A)로 조류에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 보인다.

그림 9. 진동해석 모델링

경전철 운행시 진동피해의 검토가 필요한 정온지역은 소음영향 평가시 선정된 정온지역 중에서 노선과의 수평 이격거리가 50m 이내인 건물을 대상으로 하였으며, 예상되는 진동레벨은 다음표와 같다.

이격거리(m)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	비고
진동레벨(dB(V))	66.8	62.1	56.8	55.9	53.9	50.1	48.6	48.5	45.6	45.1	-

표 3. 이격거리별 진동도 예측결과

2.7.2 장대레일 축력 및 좌굴 검토

총 교량길이 23.9km를 정거장 기준으로 18개구간으로 나누어 교량상 장대레일의 축력에 대한 안정성을 검토하였으며, 유럽의 UIC 기준을 준용하였다. 검토결과 최대레일응력은 허용인장응력인 92N/mm²를 초과하지 않아 축력에 따른 궤도의 안정성은 확보되었으나, 낙동강 통과구간 교각의 경우 종방향 지점반력이 2957.89kN으로 허용치인 1,300kN을 초과하여 교각설계시 종방향 하중으로 설계에 고려하였다. 장대레일의 좌굴 검토결과 레일이 설정온도에서 40℃ 상승하였을 때, 체결구에 작용하는 최대 횡력은 8.864kN으로 국내에서 사용하는 탄성체결구들을 사용하면 충분히 저항할 수 있을 것으로 판단되었다.

3. 맺음말

향후 경전철에 대한 수요에 대비하기 위해서는 국내 경전철 시스템에 대한 표준화와 국내기반 기술 확보 및 실용화가 이루어져야 할 것으로 보이며, 경전철에 부합하는 교량형식의 개발과 설계기준의 정립이 우선적으로 선행되어야 할 것으로 판단된다. 부산~김해간 경량전철건설 민간투자사업에 따른 경전철의 도입은 신교통 시스템에 대한 국내 기술력 향상 및 국제 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 예상된다.

또한 부산~김해간 경전철의 도입은 지역사회에 큰 효과를 줄 수 있을 것으로 보인다. 서부산권 일대 도심 교통혼잡해소와 지역간 균형발전이 예상되며, 부산의 고질적인 문제인 낮은 공항 접근성도 완전 해소될 전망이다. 이런 점과 더불어 부산권의 광역철도망이 새로운 전기를 맞이하게 될 것이다. 현재 호포역과 양산 북정역 간 지하철 2호선 3단계 공사가 진행 중이며, 부산~울산간 교통의 획기적인 개선이 기대되는 동해남부선 복선 전철화 사업이 공사 중이다. 여기에 국내 최초의 경전철이 개통되면 부산은 울산, 김해, 양산지역과 모두 전철로 연결되는 중심도시로 성장하게 된다. 서울과 주변도시 간 수도권형성이 광역 전철교통망 때문에 가속화된 것처럼 부산을 주축으로 한 새로운 거대 광역권이 생기게 되는 것으로 부산~김해간 경전철 도입의 의미는 크다고 할 수 있겠다.

참고문헌

1. 철도청(2000), “국유철도건설규칙”
2. 철도청(1999), “철도설계기준(철도교편)”
3. (주)삼보기술단(2005), “세계의 경전철 시스템”
4. 이종득(2002), “철도공학”
5. 정경렬(2006), “경전철 산업 활성화 및 발전 방안에 관한 연구”, 한국철도학회논문집, 제9권 제1호