

모노레일 교량의 계획 및 설계

Planning and Design of Monorail Bridges

한녹희*
Han, Nock-Hee

유제남**
Yoo, Je-Nam

이성민***
Lee, Sumg-Min

ABSTRACT

Monorail System has many advantages compared with other Urban Lightweight Transit Systems, such as the friendliness of the vehicle's appearance, slenderness of the bridge structures, it's low construction cost and short construction period. So, lots of city governments have reviewed or proposed the Monorail System as the attractive alternative system. And recently, Daegu Metropolitan City Government have chosen the Monorail System for the Urban Railroad Line 3. According to these trends on Urban Lightweight Transit Systems, this paper has introduced the outline of the planning and design of Monorail Bridges. At first, trends of overseas Monorail Bridges have been reviewed and the principal design criteria adopted in the basic design of the Urban Railroad Line 3 for Daegu have been introduced. And next, the methods of planning, design, fabrication of the guideway beams which are made of PSC Beam or Steel Beam have been explained. We hope this paper be helpful for the Engineers who are interested in the Monorail Bridges.

Keyword : Monorail bridge, Guideway beam

국문요약

모노레일시스템은 차량외관의 친밀성, 교량 상하부의 슬림한 구조, 저렴한 공사비, 짧은 시공기간 등 미관, 경제성, 시공성에서 다양한 장점이 인정되어 시가지 경량전철의 유력한 대안으로서 여러도시에서 검토 및 제안되고 있다. 또한, 최근에 대구시에서는 도시철도3호선의 시스템으로 모노레일을 채택하여 기본설계를 진행하고 있다. 이러한 국내의 추세에 맞추어 본 고에서는, 해외사례와 현재 수행중인 대구 도시철도 기본설계를 중심으로 하여, 모노레일교량의 계획 및 설계에 관한 주요사항을 소개하였다. 먼저, 해외의 모노레일 교량 사례를 분석하였으며, 대구도시철도3호선 기본설계에서 적용하고 있는 주요설계기준을 소개하였다. 또한, 과좌형 모노레일의 대표적인 구조형식인 PSC레도빔과 강케도빔에 대하여 계획, 설계 및 제작 방법을 개괄적으로 설명하였다. 본 고의 내용이 모노레일 교량의 계획 및 설계에 관심이 있는 기술자들에게 도움이 되기를 기대한다.

* (주)효명이씨에스, 대표이사, 정회원

E-mail : hnh_hm@hanmail.net

TEL : (02)573-3244 FAX : (02)573-3248

** (주)삼안, 철도구조부 전무이사, 정회원

*** (주)삼안, 철도사업본부 사장, 정회원

1. 머리말

시가지 대중교통수단으로서 경량전철시스템을 도입하는 방안은 국내에서 1990년대부터 검토되어 왔으며, 현재는 부산지하철 3호선 반송선을 비롯하여 용인경전철, 김해경전철 노선이 한창 건설중에 있고, 의정부경전철도 지난 7월에 기공식을 가졌다. 또한, 대구, 광주, 대전, 울산, 인천 등 광역시를 비롯하여 여러 도시의 지자체에서 민간투자사업 또는 재정사업으로 경전철 건설을 계획하고 있어 바야흐로 경전철시대가 도래하고 있다.

지금까지 국내에서 검토 또는 채택되고 있는 경전철시스템은 AGT, LIM, BRT 등이 있으며, 최근에는 안전성, 경제성, 환경친화성, 도시미관 등 여러측면에서 유리한 모노레일시스템에 대해 관심이 커지고 있을 뿐 아니라 이미 여러 도시에서 도입을 적극 검토하고 있다. 특히, 대구광역시는 연장 23.6km의 도시철도3호선을 모노레일로 건설기로 하고 현재 기본 및 실시설계를 수행 중에 있다. 모노레일은 일본, 미국, 유럽, 호주, 동남아의 여러 도시에서 운행실적을 쌓아 안정성이 입증되었으며, 근래에 들어와 더욱 보급이 확대되는 추세이다. 본 고에서는 시가지 대중교통수단으로는 국내최초로 모노레일을 채택한 대구도시철도3호선을 중심으로 하여 모노레일교량의 계획 및 설계에 관해 설명하였다. 먼저, 해외의 모노레일 노선현황 및 모노레일교량 구조물의 사례를 분석, 정리하였으며 나아가 대구도시철도3호선에 적용한 주요기준 및 구조형식, 계획 및 설계시 고려사항등을 정리, 소개하였다.

2. 해외모노레일 사례 조사

2.1 노선현황 조사 및 분석

모노레일은 전세계적으로 약 50여개 노선이 운행중에 있으며, 테마파크나 동물원 등의 내부순환 및 관광을 위한 경우를 제외하면 순수 시가지 교통수단으로 운영중인 노선은 약 30여개소에 이른다. 이들 모노레일 노선의 개요 및 현황을 정리하면 도표1 과 같으며, 지역별, 개통연도 및 노선연장별로 구분하여 나타내면 그림1 ~ 그림3과 같다. 이들로부터 보면, 모노레일은 독일에서 1901년에 세계 최초로 정거장 20개소 연장 13.3 km의 노선에 도입되었으며, 2차대전을 거쳐 1959년에 과좌형 모노레일의 대표적형식인 ALWEG 시스템이 개발되고 캐나다의 Bombardier사와 일본의 Hitachi사에서 ALWEG 모델을 발전시켜 보급을 확대함으로써 1960년대 이후에 보급이 크게 확산되고 있음을 알 수 있다. 특히 2000년대에 들어와서는 이미 7개 도시에서 새로이 운영을 시작하였고, 3개 노선은 현재 건설중에 있어 모노레일시스템에 대한 선호도가 세계 전지역에서 증가하고 있다. 또한 노선연장으로 보면 10km이하의 노선이 큰 비중을 차지하고 있고 20km이상의 노선은 3개소(건설중 1개소 포함)에 불과하다.

도표 1. 해외모노레일 사례(시가지 교통수단 중심)

국	가	도시	개통연도	영업연장(km)	정거장개소	차량시스템	지지형식	
독	일	루르, 우페르탈	1901	13.3	20	현수식	복선	
독	일	뒤셀도르프 공항	2002	2.5	3	현수식	복선	
러	시	아	모스크바	2005	4.7	6	과좌식	복선
일	본	동경 하네다	1964	17.8	10	과좌식	복선	
일	본	쇼난	1970	6.6	8	현수식	단선	
일	본	기타큐슈	1985	8.8	13	과좌식	복선	
일	본	차바	1988	15.5	18	현수식	복선	
일	본	오사카	1990	23.8	16	과좌식	복선	
일	본	다마	1998	16.0	19	과좌식	복선	

(뒷면에 계속)

(앞면에서 계속)

국 가	도시	개통연도	영업연장(km)	정거장개소	차량시스템	지지형식
일 본	오끼나와	2003	12.8	15	과좌식	복선
말 레 이 시 아	썬웨이시티	2000	3.2	3	과좌식	단선
말 레 이 시 아	쿠알라룸푸르	2003	8.6	11	과좌식	복선
중 국	중경	2005	13.5	14	과좌식	복선
싱 가 포 르	센토사	2006	2.1	4	과좌식	복선
아랍에미리트	두바이	건설중	5.4	5	과좌식	복선
인 도 네 시 아	자카르타	건설중	27.0	29	과좌식	복선
말 레 이 시 아	푸트라자야	건설중	18.0	23	과좌식	복선
호 주	골드코스트	1988	2.0	3	과좌식	단선
호 주	시드니	1988	3.6	7	과좌식	단선
호 주	오아시스-쥬피터	1989	1.3	3	과좌식	복선
미 국	캘리포니아 디즈니랜드	1959	3.7	2	과좌식	단선
미 국	워싱턴, 시애틀	1962	1.5	2	과좌식	복선
미 국	플로리다, 디즈니월드	1971	23.6	6	과좌식	단선
미 국	하와이, 펠리지	1991	0.5	2	과좌식	단선
미 국	뉴저지, 뉴워크국제공항	1995	4.8	8	과좌식	복선
미 국	플로리다, 잭슨빌	1997	7.0	8	과좌식	복선
미 국	네바다, 라스베가스	2004	6.3	7	과좌식	복선

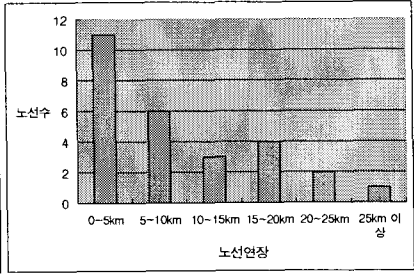
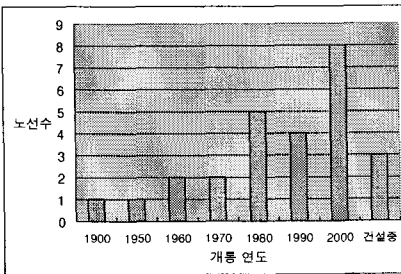
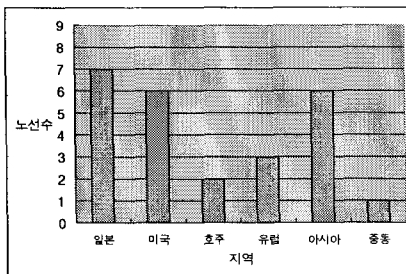


그림1. 지역별 분류

그림2. 개통연도별 분류

그림3. 노선연장에 따른 분류

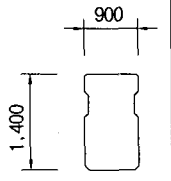
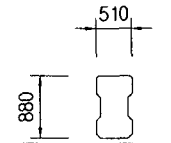
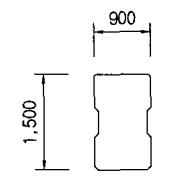
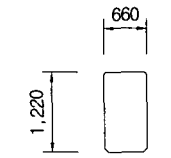
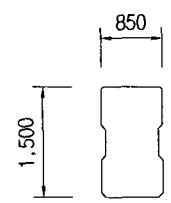
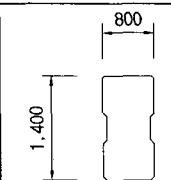
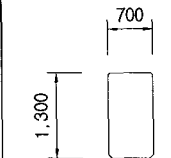
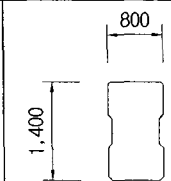
2.2 모노레일교량 구조형식 분석

대구도시철도 3호선은 과좌식 모노레일(Straddle-Type)의 도입을 전제로 설계를 진행하고 있다. 해외사례에서 보면 현수식모노레일(Suspended-Type)의 적용사례는 소수에 불과하고, 대부분의 모노레일이 과좌식을 채택하고 있으며, 그 중에서도 ALWEG Type이 주종을 이루고 있다. ALWEG Type의 모노레일은 중공단면의 PSC빔을 표준레도빔으로 사용하며, 사거리 횡단구간이나 장지간을 요구하는 구간에서는 강레도빔 또는 특수형식의 교량을 적용한다. 이하에서는 ALWEG Type 모노레일 교량의 주요 구조형식을 해외사례를 토대로 분석 정리하였다.

2.2.1 궤도빔 표준단면

모노레일을 지지하는 궤도빔의 단면제원은 차량시스템의 사양에 의해 정해진다. 도표2는 과좌식 모노레일의 차량시스템에 따른 궤도빔의 표준단면제원을 나타낸 것이다. 이 표로부터 알 수 있듯이 표준궤도빔의 폭은 차량시스템에 따라 0.51~0.90m 범위에 분포하며, 빔의 높이는 지간장에 의해 변화하지만, 대략 0.88~2.10m의 범위에 분포한다.

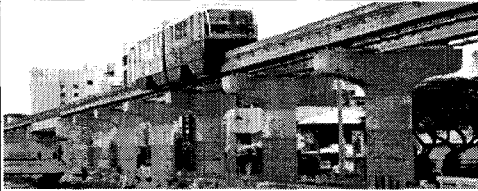
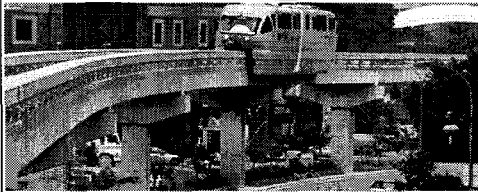

도표 2. 과좌형 모노레일의 표준궤도빔 단면제원

차량 시스템	궤도빔 단면도	빔 폭	빔 높이	적용노선
ALWEG		0.80m	1.40~1.60m	독일, Föhlingen(1957) 이탈리아, Turlin (1961)
Disneyland-ALWEG		0.51m	0.88~1.02m	미국, Anaheim (1959)
ALWEG Large		0.90m	1.5m	미국, Seattle (1962)
Disney-Bombardier		0.66m	1.22~2.03m	미국, Walt Disney World (1971) 미국, Las Vegas (1995)
Hitachi Type-1 Large		0.85m	1.50m	일본, Kitakyushu (1985) 일본, Osaka (1990) 일본, Tampa (1997) 일본, Tama (1998) 중국, Chongqing (2005)
Hitachi Type-2 Standard		0.80m	1.40~1.60m	일본, Inuyama (1962) 일본, Haneda (1964) 일본, Tokyo Disney(2001) 일본, Naha, Okinawa (2003)
Hitachi Type-3 Small		0.70m	1.30m	싱가포르, Sentosa (2006)
Monorail Malaysia		0.80m	1.40~2.20m	말레이시아, 쿠알라룸푸르 (2003)

2.2.2 적용지간장 및 구조형식

PSC 궤도빔의 지지형식은 단순보구조, 연속보구조, 연속강결구조의 세가지 형식으로 구분된다. 이는 시공성, 공기, 미관, 빔 제작의 정밀도, 연속화에 의한 주행성의 영향, 침하에 대한 안전성, 내진성능 등을 고려하여 결정하여야 한다. 또한, 궤도빔의 표준지간장은 본당중량, 운송방법, 운송경로, 가설방법, 관련법규 등을 검토하여 정하여야 한다. 해외사례에서 본 PSC 궤도빔의 지지형식 및 표준지간장은 도표3과 같다.

도표 3. PSC 궤도빔의 지지형식 및 표준지간장

지 지 형 식	운 영 사 진	표 준 경 간 장	적 용 사 례
단 순 보 구 조		20~22m	일본, 오사카 일본, 다마 일본, 오키나와 등
연 속 보 구 조		30m	말레이시아, 쿠알라룸푸르
연 속 강 결 구 조		30m	미국, 라스베가스

3. 대구도시철도3호선 모노레일교량의 계획과 설계

3.1 개요

대구도시철도3호선은 시가지 대중교통수단으로는 국내에서 최초로 모노레일시스템을 채택하여 현재 설계를 수행중에 있다. 대구3호선은 노선연장 23.6km의 복선 궤도구조로서 현재 운행중인 모노레일 노선중에서는 연장 23.8km의 오사카 모노레일에 이어 세계에서 두번째로 긴 모노레일 노선이다. 노선을 따라 30개소의 정거장이 설치되며 시점측에 차량기지, 종점측에 주박기지가 배치되며 차량기지내에 간이정거장 1개소가 설치된다. 이하에서는 대구도시철도3호선의 기본설계 내용을 중심으로 주요설계기준을 소개하였으며 모노레일교량 설계 및 시공과 관련하여 고려해야 할 사항들을 정리하고 설계현황을 요약하였다.

3.2 주요설계기준

3.2.1 차량시스템

모노레일차량은 과좌식(Straddle-Type) 3량 1편성으로 구성되며, 설계대상차량의 주요제원은 차량의 길이 46.2m, 차체의 폭 2.9m, 대차중심간 거리 9.6m, 설계축하중 110kN이다. 그림4에 차량의 개요도를 나타내었다.

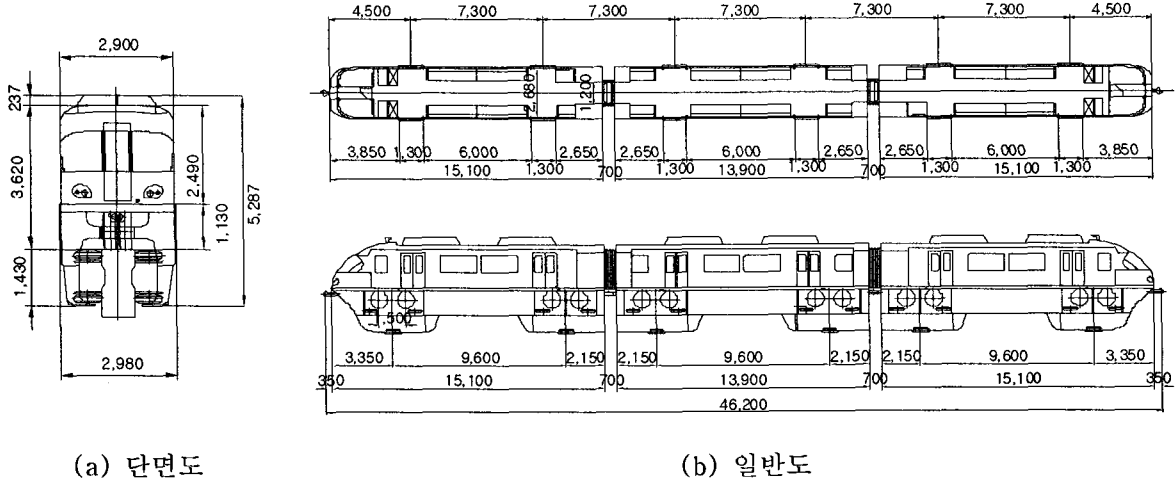
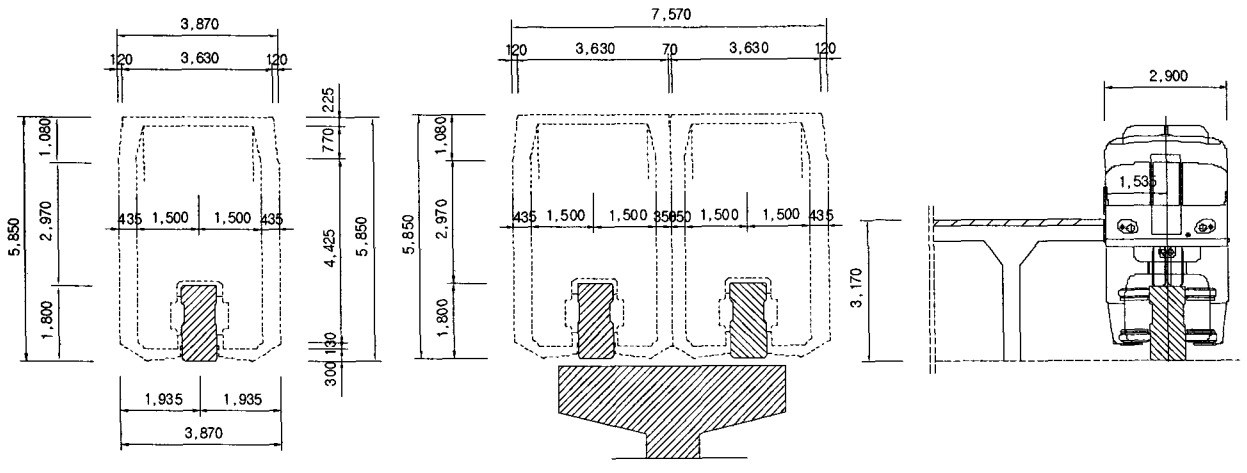


그림4. 설계 모노레일차량 개요도

3.2.2 차량한계 및 건축한계

차량한계 및 건축한계는 그림5와 같다. 복선부 본선에서의 건축한계의 폭은 모노레일차량의 동요·타이어의 핑크·바람의 영향 등의 조건을 고려하여 정하였으며, 양방향 모노레일 차량이 동시에 이들 조건에 놓일 확률은 극히 작기 때문에 공간 및 구조물의 경제성 측면에서 편측궤도의 최악의 상태(대각선상의 안내·안정륜 핑크시)의 환산최대경사(5°~31')와 반대측 궤도 주행차량의 환산상용최대경사(3°~16')와의 조합에 의해 두 궤도의 중심간격을 건축한계의 폭보다 작은 값으로 정하였다. 이 경우 이웃하는 궤도의 건축한계는 일부 겹쳐지게 된다.



(a) 차량 및 건축한계 (b) 본선건축한계 (c) 승강장 건축한계

그림5. 차량한계 및 건축한계

3.2.3 선로설계기준

모노레일 시스템의 특성을 고려하여 반영한 선로설계기준의 주요항목을 정리하면 도표 4와 같다. 본선의 곡선은 가능한 한 곡선반경을 크게 하는 것이 바람직하지만, 도시모노레일의 경우 입지여건에 맞게 대응하는 것이 필요하며, 정거장간 거리 1km에 대한 평균속도 45km/h 정도를 확보하는 것을 조건으로 하여 본선구간 최소곡선 반경을 100m로 하였다. 캔트의 최대치는 12%로 제한하였으며, 곡선반경 300m 이하에서의 캔트는 최대차인 12%가 된다.

도표 4. 주요 선로설계기준

항 목	기 준	항 목	기 준		
설 계 속 도	$V = 70\text{km/hr}$	곡 선 부 확 폭	•내측 : $\frac{15,400}{R} - 30.8$		
궤 도 빔 폭	$B = 850\text{mm}$		•외측 : $\frac{21,700}{R} - 43.4$		
궤 도 중 심 간 격	3,700mm	켄 트	$C = \frac{V^2}{1.27R}$ (최대켄트 12%)		
곡 선 반 경	본 선	100m 이상	선 로 기 울 기	본 선	60/1,000 이하
	정 거 장	300m 이상		정 거 장	10/1,000 이하
	측 선	50m 이상		인 입 선 등	60/1,000 이하
	분 기 부	50m 이상		분 기 기	Level

3.2.4 구조물설계기준

구조물설계는 철도설계기준 철도교편(대한토목학회 2004)과 콘크리트 구조설계기준(2003)을 기준으로 하며, 차량시스템과 관련되어 특수하게 고려하여야 할 사항들은 외국의 경험에 기초한 관련기준들을 적용하였다. 일반철도교와 차별되어 적용되는 주요 항목을 설명하면 이하와 같다.

1) 열차하중

3량 1편성의 모노레일 열차하중은 만차시 축하중 110kN, 정원시(평균적하중) 95kN, 공차시 82kN을 적용하였고, 궤도면으로부터 차량중심까지의 위치는 1.3m를 적용하였다. 그림6에 축중하중의 재하방법과 중심위치 및 축하중크기를 나타내었다.

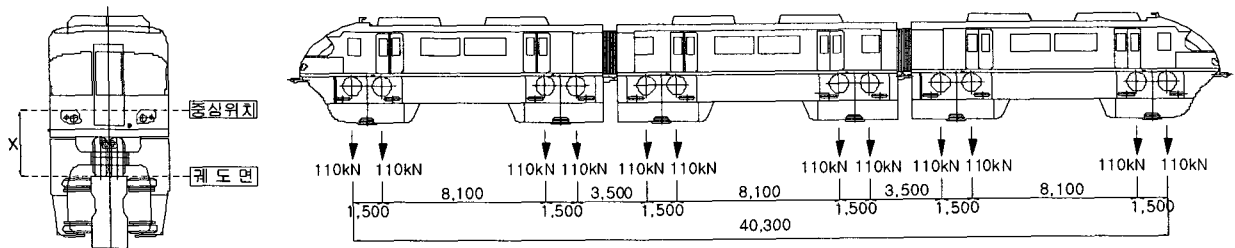


그림6. 열차하중 재하 개요도

2) 충격하중

모노레일 교량구조물에 작용하는 충격하중은 열차하중에 다음의 충격계수를 곱하여 구한다.

- 강교 : $i = 25 / (50 + L)$ (L : 충격계수를 구할 때의 지간길이(m))
- RC 및 PSC교 : $i = 20 / (50 + L)$

3) 시·제동하중

시동하중 또는 제동하중은 모노레일차량 중심(重心) 위치에서 궤도방향으로 작용하는 것으로 하며 제동하중 또는 시동하중의 크기는 설계모노레일 차량하중의 15%로 한다.

4) 차량 횡하중

차량 횡하중은 1축집중이동하중으로 주행면의 높이에서 궤도축에 직각이고 수평한 방향으로 작용하는 것으로 한다. 이 크기는 모노레일차량하중 1축하중의 25%로 한다.

3.3 표준횡단구성

모노레일 교량의 상부빔은 주행륜이 직접 재하되는 궤도역할을 하고 빔의 측면에는 안내륜과 안정륜이 접촉하며 이동하게 되므로 빔의 단면 결정은 차량시스템 사양에 의해 지배를 받는다. 또한, 강궤도빔의 경우에는 가로보가 건축한계의 간섭을 피할 수 있어야 하므로 주빔의 높이가 높아져야 한다. 한편, 궤도빔을 따라 전차선, 자동열차제어장치(ATC), 열차검지장치(TD), 자동열차운행장치(ATO), 통신 및 전력케이블을 설치 또는 부착할 수 있어야 하므로 이를 고려하여야 한다. 대구도시철도 3호선 모노레일 교량은 표준구간에 대해서는 PSC 궤도빔을 채택하고 사거리 횡단구간이나 급곡선부 또는 장지간 통과구간 등에 대해서는 강궤도빔을 채택하였는바, 이들의 표준횡단구성 및 부대시설 배치 개요도를 그림7 및 그림8에 나타내었으며 그림9 및 그림10 각각의 사진자료들이다.

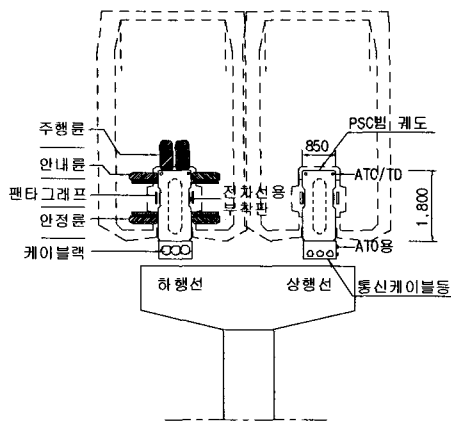


그림7. PSC 궤도빔 구조개요도

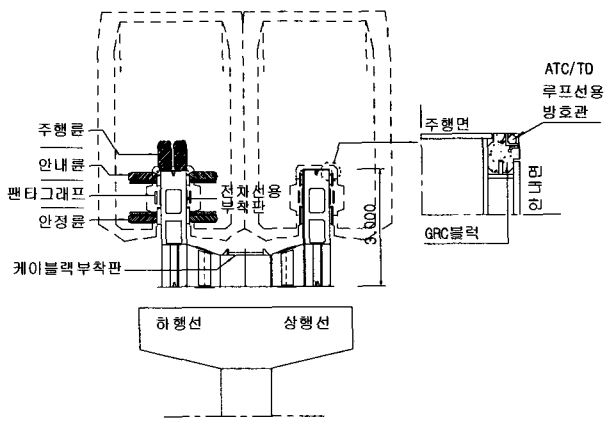


그림8. 강궤도빔 구조개요도

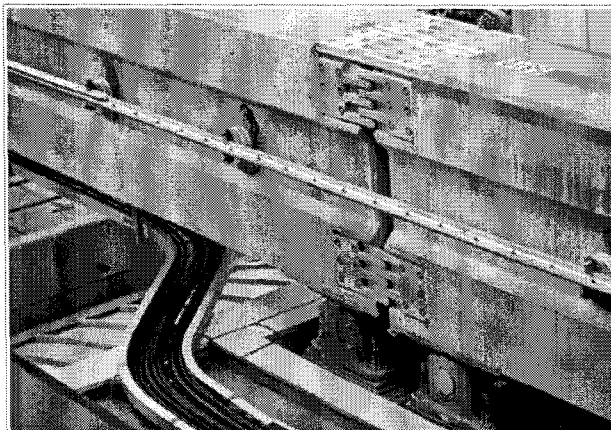


그림9. PSC 궤도빔 부대시설

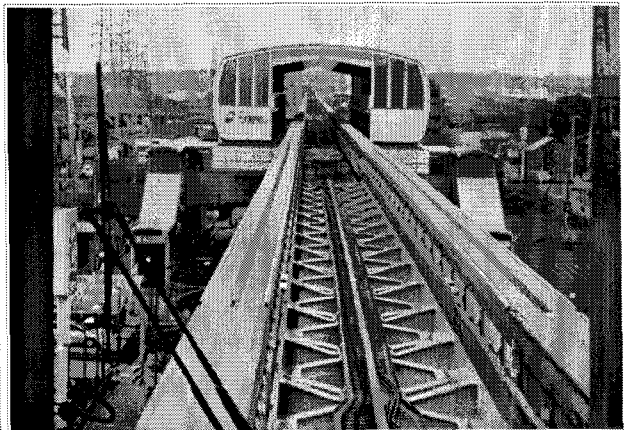


그림10. 강궤도빔 전경

3.4 PSC 궤도빔의 계획 및 설계

3.4.1 개요

시가지에 설치되는 과좌식모노레일 교량의 궤도빔은 건설비 절감이 가능한 PSC 궤도빔을 기본으로 채택하고 있으며, 사거리나 하천통과부 등 장지간을 필요로 하는 위치나 급곡선부 등에서 제한적으로 강구조를 적용한다. PSC 궤도빔의 표준지간 및 단면형상과 구조형식은 노선대 현황 및 가설여건 등을 복합적으로 고려하여야 하며, 주행성을 고려하여 PSC 궤도빔 제작에서 고도의 정밀도를 확보할 수 있어야 한다. 이하에서는 모노레일 PSC 궤도빔의 계획 및 설계에 대하여 설명하였다.

3.4.2 PSC 궤도빔의 표준형상

대구도시철도 3호선의 PSC 궤도빔은 전 노선에 대한 경간분할에 기초하여 빔의 최소길이 12.0m에서 표준경간장인 최대길이 30.0m까지 12가지 길이로 구분되며 각 구간의 평면곡선반경에 따라 Type을 구분하여 계획하였다. 그림11 ~ 그림12에 PSC 궤도빔의 표준형상을 나타내었다.

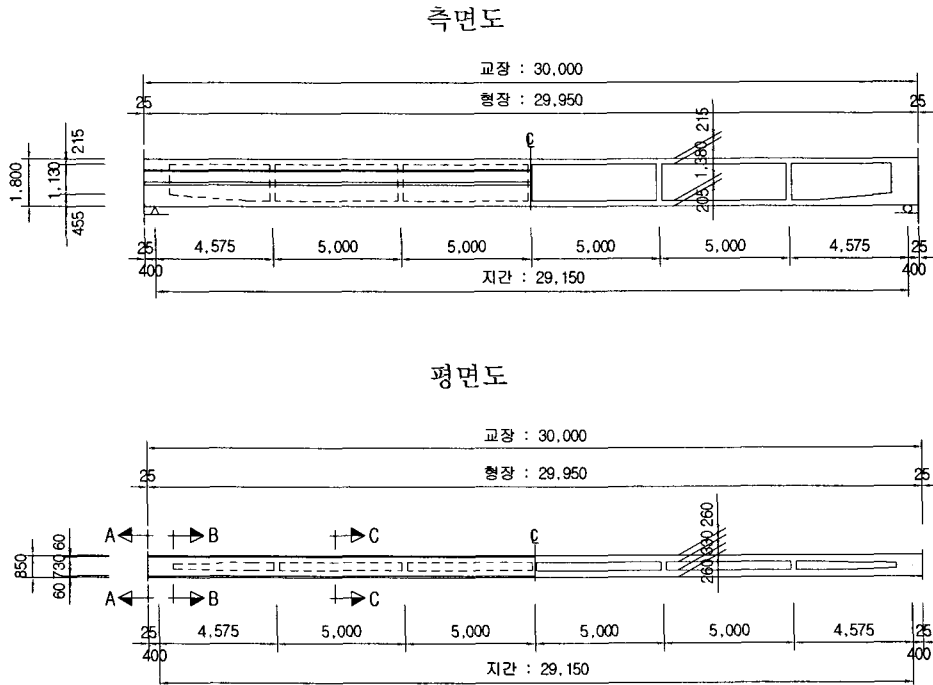


그림11. PSC 궤도빔의 표준형상도(1)

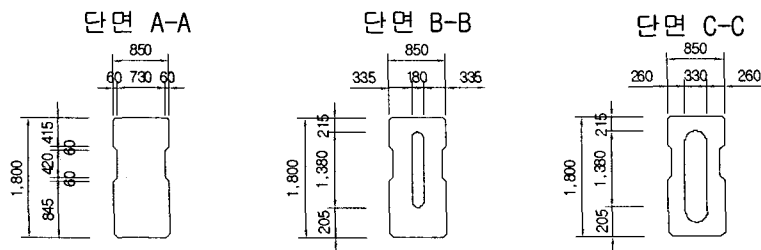


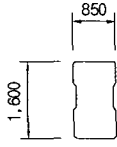
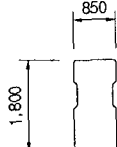
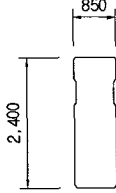
그림12. PSC 궤도빔의 표준형상도(2)

3.4.3 PSC 궤도빔 구조계획

1) 표준경간장 검토

ALWEG 형식 모노레일의 표준궤도빔 구조는 차량 모델에 관계없이 모두 PSC 궤도빔 형식을 채택하고 있다. 빔의 길이에 따라 본당 중량의 차이가 크기 때문에 PSC 궤도빔의 표준경간장은 제작 및 운반 그리고 가설방법 등에 대해 구간별 및 노선대별로 면밀한 검토를 수행하여야 하며, 복잡한 시가지에서 하부구조로 인한 개방감 저해여부 등 도시미관과의 연관성도 함께 고려하여 결정하여야 한다. 대구도시철도 3호선에서는 전구간 통과노선에 대한 운반 Simulation 등을 통해 30m 궤도빔의 운반 및 가설에 문제가 없음을 확인한 후에 도시미관상 가능한 경간장을 넓게 하는 방향으로 표준경간장을 결정하였다. 도표 5는 표준경간장 결정을 위한 각 안별 장단점을 정리한 것이다.

도표 5. 표준경간장 검토

	1안	2안	3안
표준경간장	25m	30m	40m
단 면 도			
본 당 중 량	811kN	1101kN	1978kN
장 · 단 점	<ul style="list-style-type: none"> •중량이 작아 운반·거치 용이 •하부개방감 확보 및 주행성 불리 	<ul style="list-style-type: none"> •운반 및 거치에 비교적 유리 •하부개방감 확보 및 주행성 불리 	<ul style="list-style-type: none"> •개방감 및 경제성 확보 유리 •도심구간 운반 및 거치에 제약 •내진 및 하부구조 계획에 불리
사 례	•일본 모노레일(L=25m미만)	<ul style="list-style-type: none"> •라스베가스 모노레일 •쿠알라룸푸르 모노레일 	•사례없음
선 정 안		◎	

2) 지지형식 검토

해외사례에서 보면 PSC 궤도빔의 지지형식은 단순보구조, 연속보구조, 상부빔과 하부를 강결일체화시킨 연속강결구조의 세가지 형식으로 분류된다. 단순보구조는 상부구조의 표준화가 용이하며, 구조거동이 명확하고, 빔 거치후 2차공정이 없기 때문에 공기단축이 가능하다. 또한, 침하에 대한 대응이 용이하고 유사시 빔의 교체가 용이하다. 연속보구조는 PSC 궤도빔을 교각 위에 거치한 후에 연속강선에 대한 2차긴장력을 도입하여야 하므로 공기가 길어지고 시가지 고소에서 작업으로 인한 안전사고의 우려가 있다. 또한, 연속강선에 의한 2차효과, 크리프변형효과 등에 의해 구조거동이 복잡하며 이는 궤도빔 상면의 주행성에도 영향을 미치게 된다. 또한, 연속강결구조는 상·하부 구조의 강결에 의한 온도 및 건조수축의 영향까지 추가되어 교각의 높이, 경간구성의 변화에 따라 구조거동이 다양한 양상으로 변화하게 되며, 이로 인해 표준화설계 및 시공이 곤란할 뿐 아니라 궤도빔의 주행성의 저하가 염려된다.

대구도시철도 3호선은 총연장이 약 23.6km로서 연장 23.8km인 오사카 모노레일에 이어 세계에서 두 번째로 긴 노선이다.(도표 1 참조) 또한, 전구간 시가지를 통과하기 때문에 지간구성이 다양하고 교각의 높이가 구간마다 변화하며 곡선반경이 다른 구간이 여러 곳에 존재한다. 따라서 대구3호선의 지지형식은 단순거더 구조를 채택함으로써 설계 및 시공의 표준화를 용이하게 하도록 하였으며, 도심지에서의 공사기간을 단축하여 시공성, 안전성, 교통장애 최소화 등을 도모하도록 하였다.

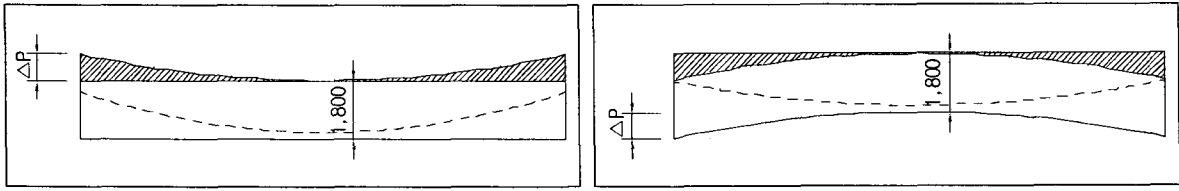
3.4.4 솟음 고려 방법

PSC 궤도빔은 프리스트레스나 건조수축, 크리프의 영향을 비롯하여 종단곡선과 캔트의 영향 등에 의해 궤도빔의 높이를 변화시켜 제작하여야 하며, 이들에 대한 검토방법은 아래와 같다.

1) 프리스트레스에 의한 캠버 (ΔP)

빔을 제작한 후에 프리스트레스를 도입하면 빔의 중앙부가 상향으로 변형을 일으킨다. 모노레일 궤도빔에서 빔상면의 최종선형이 계획종단선형과 일치하게 하기 위해서는 프리스트레스에 의한 솟음을 미리 고려하여 빔을 제작하여야 한다.(그림13) 이 경우 계산으로부터 구한 캠버량에 의해 교량받침의 최종계획고가 결정되기 때문에 신중을 기하여야 한다.

그러나, 프리스트레스에 의한 크리프변형은 프리스트레스 도입시 콘크리트의 재령, 온도, 골재, 콘크리트의 배합 등에 의해 변화하므로 정확한 값을 미리 추정하는 것은 쉽지 않은 일이며, 일본에서는 기존노선의 시공실적을 참고로 하여 캠버량을 구해서 설계에 반영하고 있다.



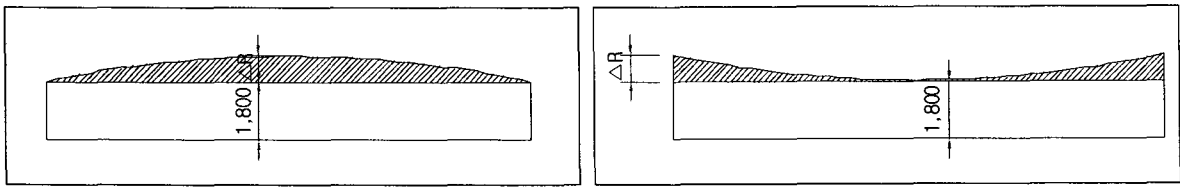
(a) 빔 타설전

(b) 프리스트레스 도입 후

그림13. 프리스트레스에 의한 캠버

2) 종단곡선에 의한 캠버 (ΔR)

종단곡선부의 PSC 궤도빔에 대해서는 빔의 하면을 직선으로 유지하고 상면을 종단선형에 맞추어 제작하는 방법으로 대응한다. 이 경우 오목곡선부의 궤도빔은 받침의 계획고가 영향을 받게 된다. (그림 14)



(a) 볼록곡선의 경우

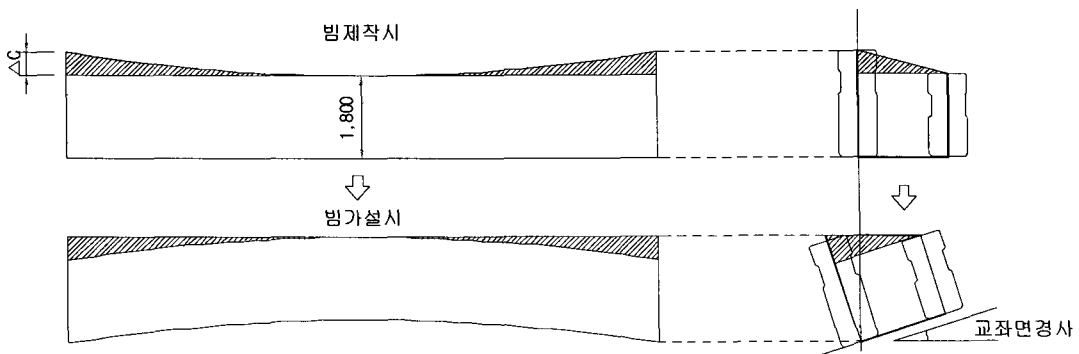
(b) 오목곡선의 경우

그림14. 종단곡선에 의한 캠버

3) 캔트에 의한 캠버 (ΔC)

거더의 주행면, 안내·안정면은 각 위치마다 일정한 캔트가 형성되는데, 거더받침면의 경사는 받침위치에서의 캔트에 의해 결정되는 것이 아니라, 거더전길이의 1/2 지점에서의 캔트에 의해 결정된다.

즉, 받침면에서 경사를 설치하여 이에 맞도록 거더를 기울이기 때문에 주행면에서 일정한 종단선형을 확보하고 거더높이를 보정(캠버 ; ΔC) 할 필요가 있다.(그림15)



(a) 빔 정면

(b) 빔 단면

그림15. PSC 궤도빔의 캔트에 의한 캠버 (ΔC)

3.5 PSC 궤도빔 제작

3.5.1 개요

PSC 궤도빔은 모노레일의 주행륜이 직접 접촉하는 궤도역할을 하기 때문에 직선, 평면 및 종단곡선이 조합된 선형이 되며 곡선반경과 속도에 의해 정해지는 캔트가 도입되므로 그 형상이 빔마다 다르게 된다. 또한, 궤도빔은 쾌적한 승차감을 확보하기 위해서 일반 콘크리트 구조물과는 다른 수준의 높은 정밀도가 요구된다. 특히, 세계적으로도 노선 연장이 긴 대구3호선의 경우에는 궤도빔 제작의 정밀도와 숙련성이 차량 주행성에 미치는 영향이 지대할 것으로 판단된다. 이러한 이유들로부터 PSC궤도빔의 제작을 위해서 다양한 형상에 대응할 수 있는 특수한 거푸집(몰드장치)을 도입키로 하였으며, 철저한 품질관리를 토대로 균일하고 정밀도가 높은 빔을 효율적으로 제작할 수 있게 하였다.

3.5.2 PSC 궤도빔 제작장 계획

PSC 궤도빔 제작장은 크게 나누어 빔을 제작하는 시설과 빔을 보관하는 야적장으로 구성된다. 또한, 빔제작시설은 철근가공장, 철근조립장, 몰드장, 양생실로 구성된다. 대구3호선에서는 차량기지 와 주박기지의 임시부지공간을 이용하여 궤도빔 제작장을 건설하는 것으로 계획중이며, 2곳의 제작장에서 궤도빔을 제작하여 전 공구 현장에 운반·가설토록 할 예정이다.

그림16은 차량기지쪽에 건설되는 궤도빔 제작장의 Layout 도면이다.

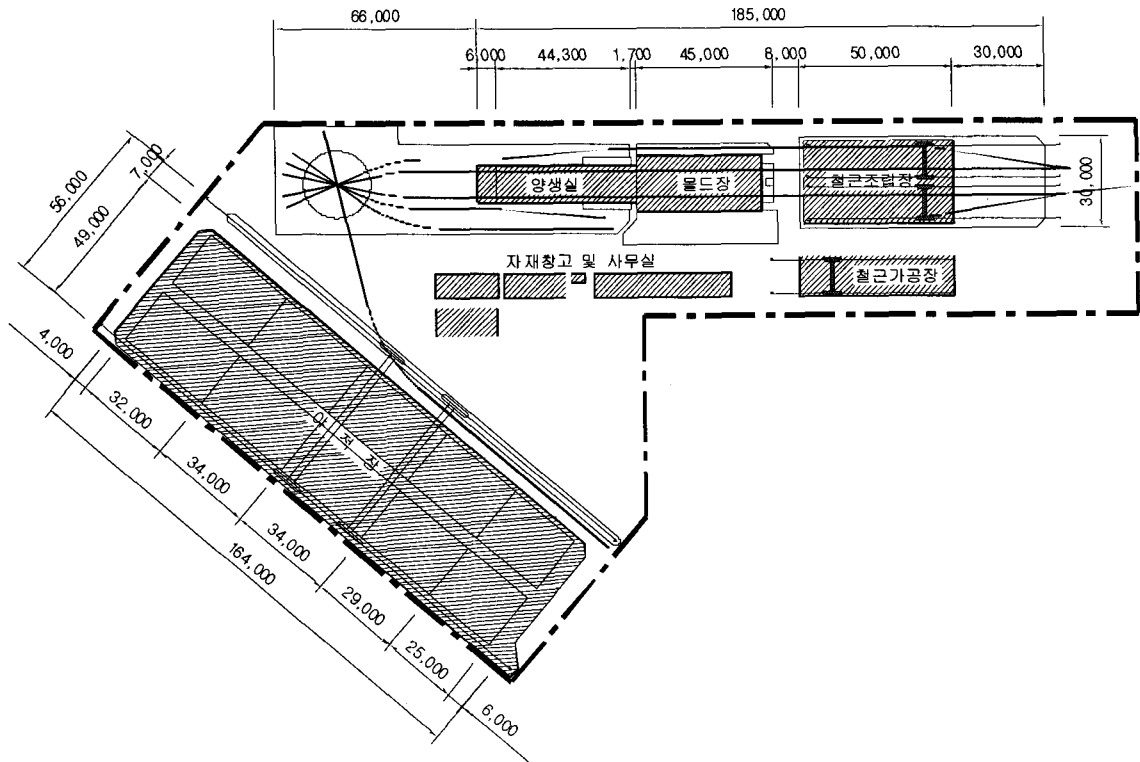


그림16. 궤도빔 제작장 Layout

3.5.3 궤도빔 제작 공정

모노레일 궤도빔은 그림17의 순서로 제작된다. 철근조립으로부터 육의양생을 거쳐 그라우팅까지 약 18일이 소요되며 이중 몰드대차상에서의 기간은 10일이 걸린다. 철근조립에서 콘크리트타설 양생, 1차간장 까지는 몰드대차 위에서 작업이 이루어진다.

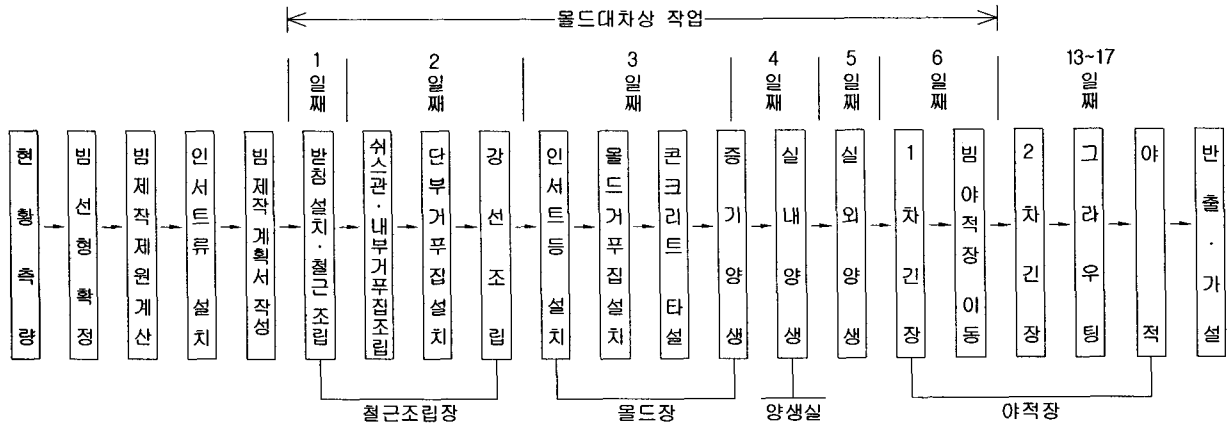


그림17. PSC 궤도빔 제작과정

3.6 강궤도빔의 설계

3.6.1 개요

모노레일 노선 중에서 지간장이 길거나, 비틀림 하중이 크게 작용하는 급곡선부 등 PSC 궤도빔의 적용이 곤란한 구간에 대해서는 강궤도빔 구조를 채택하였다. 강궤도빔이 적용되는 구간은 차량횡하중, 풍하중 등에 의한 비틀림모멘트와 곡선부의 비틀림모멘트 등이 크게 작용하므로 양방향의 주형을 가로보와 수평브레이싱으로 연결하여 격자구조를 형성하였다. 가로보와 수평브레이싱은 주형의 아래쪽에 배치하여 모노레일 차량의 건축한계를 침범하지 않도록 하였으며, 안내륜과 안정륜이 닿는 위치의 복부판에는 강판을 이용해 안내면 및 안정면을 배치하였다. 이하에 강궤도빔의 구조계획에 관해 간단히 설명하였다.

3.6.2 강궤도빔의 구조계획

1) 강궤도빔의 단면형상

강궤도빔은 복선구조를 기본으로 하고, 곡선구간에서는 설정칸트의 양에 따라 빔의 복부판을 경사시켜 대응하였다. 제작의 용이성 측면에서 볼 때 복부판은 수직으로 하는 것이 바람직하지만 칸트가 커지게 되면 안내면과 안정면을 확보하기 위하여 복부판 간격이 좁아지게 되어 제작이 곤란해지기 때문에 복부판을 경사시켜서 대응하였으며, 경사의 정도에 따라서 직립형, 준경사형, 경사형의 3-Type로 구분하였다. Type별 단면형상은 그림18 ~ 그림20과 같다.

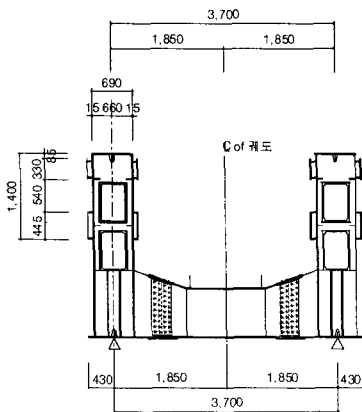


그림18. 직립형 ($0 \leq i \leq 4\%$)

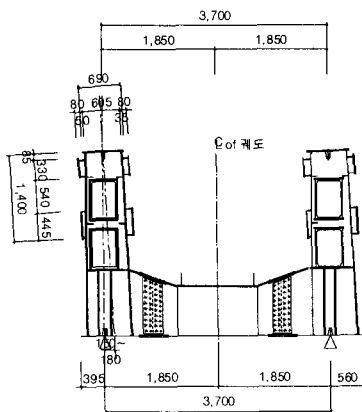


그림19. 준경사형 ($4 < i < 6\%$)

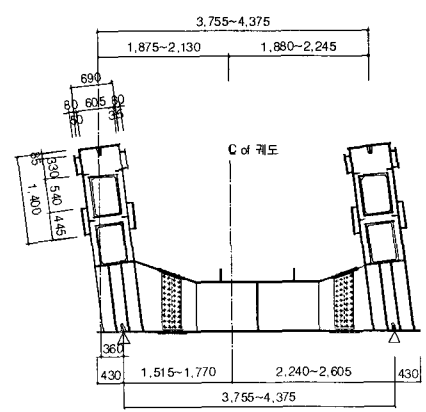


그림20. 경사형 ($i \geq 6\%$)

2) 가로보형상

가로보와 주형의 연결부는 차량의 주행에 의한 반복하중에 의해 피로파괴를 일으키기 쉬운 구조이므로 주의하여야 한다. 또한, 가로보위에 설치되는 케이블선의 한계가 모노레일의 건축한계와 간섭이 생기지 않도록 하여야 한다.

캔트에 의한 경사, 곡선부에서의 확폭량, 케이블 건축한계를 고려한 경사식 단면의 단면계획 예를 그림21에 나타내었다.

3) 가로보와 수평브레이싱의 배치

가로보는 그 간격이 4~5m가 되도록 계획하였다. 또한, 지점부에는 반드시 지점부 가로보를 설치하도록 하였으며, 일본에서의 사례를 참조하여 지점부에는 수평브레이싱과 지점부 가로보를 연결하는 제동트러스를 계획하였다. 가로보 및 수평브레이싱 배치 예를 그림22에 나타내었다.

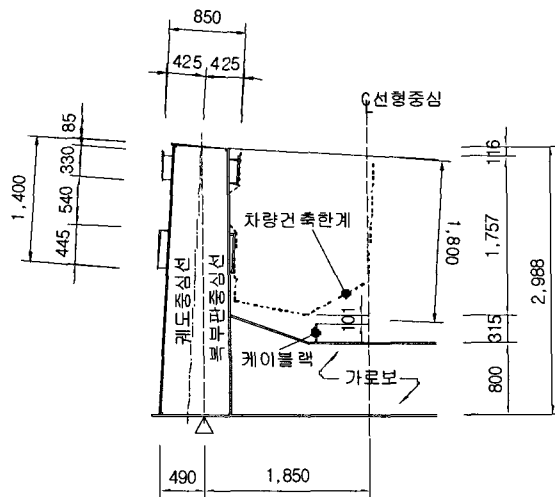


그림21. 건축한계를 고려한 가로보 배치

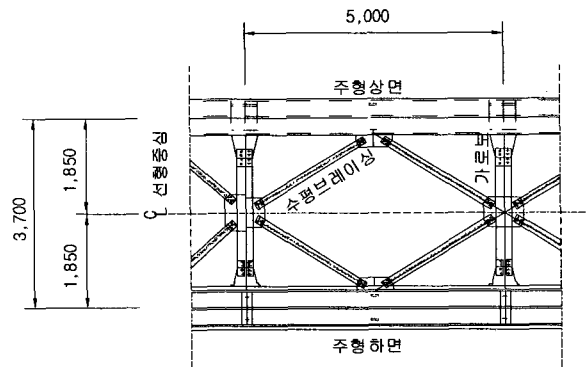


그림22. 가로보 및 수평브레이싱 배치 예

4) 주행면의 처리

주행면에 사용하는 강판의 두께는 마모를 고려하여 구조상 필요한 두께에 $t = 1\text{mm}$ 의 여유두께를 더하였다.

5) 안내면, 안정면의 처리

안내면과 안정면의 강판두께는 일본의 사례를 참조하여 $t = 16\text{mm}$ 로 하였으며 일본의 여러 실적을 토대로 SM520재를 사용하였다. 또한, 안내면과 안정면을 지지하는 판재는 두께를 $t = 12\text{mm}$ 로 하고 복부판과 동일한 강종으로 하였다.

4. 맺음말

모노레일시스템은 안전성, 경제성, 환경친화성, 도시미관 등 여러 측면에서 장점이 많아 시가지 대중교통수단으로서 보급이 크게 확산되고 있다. 한편, 국내에서는 대구도시철도 3호선 건설사업에서 처음으로 모노레일시스템이 선정되어 설계가 진행중에 있다.

본 고에서는 진행중인 대구도시철도 3호선의 기본설계를 중심으로 모노레일 교량의 계획 및 설계에 대하여 개괄적으로 소개하였다. 이 글이 모노레일 교량의 계획 및 설계에 관심있는 기술자들에게 미력하나마 도움이 되기를 기대한다.