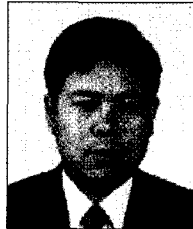


전산해석을 통한 도시형 자기부상열차 강구조 교량 설계

Steel Structure Bridge Design for Urban Maglev System by Computerized Analysis



박 정 배*



박 성 국**



신 경 철***



정 지 승****

*(주)삼보기술단 기획실 이사
**(주)한국철도기술공사 구조부 전무
*** (주)울트라건설 해외사업본부 상무
****동양대학교 철도토목학과 조교수

1. 개 요

우리나라에 본격적으로 자기부상열차가 소개된 것은 1991년 대전에서 열린 세계 엑스포박람회에 한국형 자기부상열차 HML-03호가 시범운행 560m 노선에 설치되고, 1994년에 한국기계연구원에 시험선이 구축되어, UTM-01호가 설치된 이후이다. HML-03호가 국내 자기부상열차의 시범운행 시작을 알린지 15여년 만에 대전 엑스포박람회장 바로 그 자리에 본격적인 상업운행의 문이 2007년에 열릴 예정이다. 그동안 자기부상열차 차량에 대해 한국기계연구원과 한국철도기술연구원의 부단한 노력으로 상용가능한 단계에 이르렀고 궤도, 가이드웨이 등에 대한 연구는 한국건설기술연구원 등에서 일부 이루어지긴 했으나 선로 구축물에 대한 연구·개발은 미진한 실정이다. 자기부상열차가 비록 일정한 궤도 위를 차량이 주행하는 점은 일반 철도와 맥락을 같이 하지만 철도차량과는 달리 전자기력에 의한 부상력 및 추진력으로 운행이 되며 하중, 각종 설계계수 및 시스템이 일반 철도와는 상이하여 일반 철도에 적용되는 설계계수나 설계방법을 그대로 적용하기는 무리가 있는 것으로 판단된다. 현재 여러 기관에서 자기부상열차 실용화에 대한 연구가 이루어지고 있으며 여러 지자체에서 도심내 교통시스템으로 자기부상열차 시스템을

적용하기 위해 검토하고 있는 이 시점에서 한국형 자기부상열차의 실용화를 위해 차량뿐만 아니라, 그 구축 시설물의 설계 및 시공방안에 대해서도 연구·개발이 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

본고에서는 2007년에 운행 예정인 대전 국립중앙과학관 상용노선(UTM-02호)의 기본설계시 계획된 구축물의 설계 및 시공에 대해서 그동안 설치된 시험선과 일본 동부구릉선 Linimo시스템과 비교하여 기술하고자 한다.

2. 자기부상열차 구축물 설계기준 검토

자기부상열차는 전자석 원리에 의해 차량 하중이 하부 구축물에 전달되는 구조이며, 자기부상열차의 구축물은 이러한 구조시스템에 맞도록 설계되어야 하는 것이 당연하다. 하지만 현재까지 우리나라의 자기부상열차에 적합한 구축물을 위한 각종 기준들이 정립되지 못하여 시험선이 설치되기 시작할 때부터 현재까지 주로 도로 및 철도 설계기준을 준용하여 구축물을 설계한 것이 사실이다. 자기부상열차 차량은 철도차량의 하중에 비해 경량이고 구축물에 활하중이 재하되는 방식이 다르지만 일정한 궤도를 따라 주행하고, 그 거동이 철도차량과 흡사하므로 도로교 설계기준 보다는 철도교 설계기준을 준용하되 자기부상열차의 특성에 부합되는 설계기준의 정립

이 필요하다고 판단된다. 하지만, 그동안 자기부상열차의 시험선 및 엑스포 박람회장에 설치된 노선은 철도교 설계기준이 정립된 1998년 이전에 설치된 건축물로 도로교 설계기준을 적용하여 설계된 것이다. 그동안 적용된 자기부상열차의 선로 설계기준에 대해 검토하고 자기부상열차의 특성을 표현하는 활하중 및 충격하중과 사용성 제한 기준에 대해 시험선 모델인 UTM-01호와 최근 상용화 모델로 개발된 UTM-02호 및 일본 Linimo 시스템을 비교하면서 고찰하고자 한다.

2.1 선로설계기준

그동안 국내에서 구축된 시험선과 현재 건설중인 UTM-01호와 UTM-02호에 대한 선로설계기준을 비교하면 다음 표 1과 같다.

표 1 선로설계기준

구 분	기 준		비 고
	UTM-01호 (시험선)	UTM-02호 (상용화모델)	
설 계 속 도	70km/h	110km/h	
평균운행속도	20km/h	40km/h	
Guide Rail 간격(G)	2,000mm	2,000mm	
최소곡선반경 (R)	60m	60m	
최 급 구 배	6 %	6 %	
설 계 하 중	2.00tonf/m	2.50tonf/m	등분포하중
차 량 한 계	2,850mm× 3,950mm	2,850mm× 3,950mm	
건 축 한 계	3,250mm× 4,350mm	3,250mm× 4,350mm	

2.2 자기부상열차의 하중

2.2.1 활하중

활하중은 실제 자기부상차량의 크기 및 중량을 고려하여 산정한다. 대상 차량은 가장 최근에 개발된 UTM-02호를 고려하였고 그 차량 제원은 그림 1 및 표 2와 같다. 자기력으로 부상·주행하는 자기부상열차의 특성상 차량 활하중은 등분포 연행하중으로 부재에 가장 불리한 응력이 발생되도록 제한한다. 현재 UTM-02호는 2량 1편성을 기본으로 한다.

자기부상열차의 활하중은 차량하중과 승객하중으로 구분하여 산정할 수 있다. 차량 및 승객하중을 공차시, 평상시, 만차시 및 피크시로 구분하여 표 3에 나타내었다. UTM-02호 자기부상열차 건축물 설계시 적용된 열차 활하중은 운행시 승객인원이 8인/m²으로 피크시인 경우 차량하중 2.22tonf/m

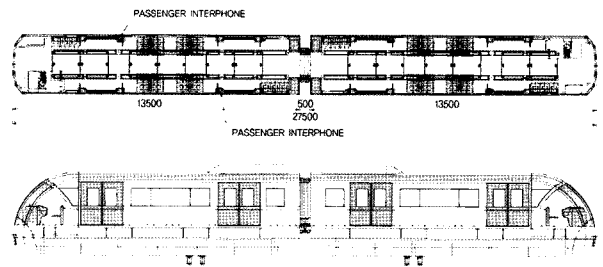


그림 1 UTM-02호 제원

표 2 UTM-02호 제원표

구 분	제원(m)
1편성 차량 총길이	27.5
1차량 길이	13.5
차량폭	2.85
보기(Bogie)길이	3.50
보기간 중심길이	3.62

표 3 차량 및 승객하중

구 분	UTM-02호				비 고
	밀도	수송인원 (인/차량)	1차량중량 (tonf/차량)	차량하중 (tonf/m)	
공차하중	-	-	20.00	1.45	
평상하중	4인/m ²	100	26.25	1.91	
만차하중	6인/m ²	135	28.50	2.11	
피크하중	8인/m ²	170	30.60	2.22	2.50

표 4 차량종류에 따른 활하중 비교

구 분	UTM-01호	UTM-02호	Linimo
설계하중	2.00tonf/m	2.50tonf/m	22.2kN/m

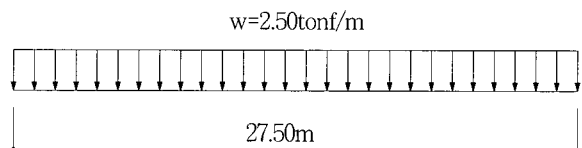


그림 2 활하중 재하방법

와 부가하중 0.28tonf/m를 고려하여 2.50tonf/m를 적용하였다. UTM-01호, UTM-02호 및 일본의 Linimo 설계 활하중을 비교하면 표 4와 같다. 표에서 알 수 있듯이 활하중은 차량 종류 및 특성에 따라 구별지만 최근 개발된 UTM-02호의 경우 건축물의 안전을 위해 활하중을 약간 크게 적용한 것을 알 수 있다. 엑스포 박람회장 운영노선을 일부 재활용하도록 계획된 대전 국립중앙과학관에 설치되는 상용화 노선 설계시에 UTM-01호와 UTM-02호의 설계 활하중 차이로 인하여 기존 건축물인 교량 거더를 보강하여 사용토록 계획되었다. 자기부상열차 활하중의 재하는 그림 2와 같이 등분포 연

행하중으로 거더에 불리한 응력이 발생되도록 재하한다.

2.2.2 충격하중

자기부상열차는 주행특성상 철도차량과는 달리 궤도와 밀착하여 주행하지 않고 일정한 높이로 부상하여 주행하므로 일반적인 철도차량의 충격특성과는 다르게 된다. 차량의 무게 또한 상당한 차이가 있으므로 자기부상열차의 충격하중이 보다 작게 될 것으로 판단된다. 특히, 자기부상열차가 부상하여 주행하다가 동력을 상실했을 경우 부상 높이에서 낙하하여 떨어질 때 발생하는 구축물과의 충돌하중 또한 무시할 수 없을 것이다. 따라서, 자기부상열차의 충격하중은 일반적인 동특성 충격하중과 낙하시 충돌하중으로 구분될 수 있을 것이다. 표 5에 충격하중을 결정 짓는 충격계수에 대해 지간 25m의 콘크리트 교량에 대한 철도설계기준 충격계수와 자기부상열차에 제안하는 충격계수의 값을 비교하여 보았다. 물론 차량 부상방법인 초전도 방식과 상전도 방식에 따라 충격계수의 값은 달라지고 교량의 재료에 따라 충격계수의 값이 달라지는 것으로 알려져 있으나 우리나라에 적용된 상전도 방식의 콘크리트 교량에 대해 표현한다.

【표 5】 콘크리트 표준 단면 비교

구 분	도로설계기준 (UTM-01호)	철도설계기준 (UTM-02호)	일본동부구룡선 (Linimo)
충격계수	0.25	0.30	콘크리트 0.10 강재 0.15
충돌계수	-	-	콘크리트 0.10 강재 0.15
계	0.25	0.30	콘크리트 0.20 강재 0.30

위의 표에서 보는 바와 같이 충격계수의 합은 각 설계기준에 따라 서로 상이 하지만 충격하중과는 달리 충돌하중은 상시하중이 아니라 특수하중의 경우로 분류되므로 철도설계기준의 충격계수를 적용할 경우 구축물이 과다하게 될 수 있다. 도로설계기준을 적용할 경우 값은 조금 작지만 마찬가지로 경우가 된다. UTM-01호 구축물의 경우는 철도설계기준이 정립되기 전에 설치되어 도로설계기준에 따라 설계 및 설치되었으며, UTM-01호 구축물은 철도설계기준을 근간으로 설계되고 시공중에 있다.

하지만, 일본 Linimo의 경우와 같이 충격계수와 충돌계수는 서로 분리되어 각각 상황에 맞는 하중조합을 이루어 구축물 설계에 적용되어야 할 것으로 보인다. 이러한 충격 및 충돌계수의 적용방법에 따라 구축물이 불필요하게 과다하게 설계될 소지가 있으며 이러한 것은 공사비 증대의

직접적인 원인으로 되며 도심 미관에도 영향을 주게 된다.

따라서, 이와 같이 충격과 충돌의 의미가 구분되어야 하며 시험적인 측면에서 검토되고 검증되어야 할 것으로 판단된다.

2.3 사용성 제한기준

자기부상열차의 부상 높이는 약 8~10mm정도이며, 차량 자체가 강체이므로 교량 거더의 처짐과 부상 높이 여유와의 상관관계는 상당히 중요하다. 상대처짐이 과다하게 발생될 경우 강체 차량이 교량거더와 마찰이 발생 될 가능성도 있다. 따라서, 자기부상열차의 처짐제어는 중요한 부분이다.

현재 자기부상열차의 허용처짐량은 교량 거더의 지간 대비로 표현되며 정확한 규정은 검토되어 있지 않다. 표 6에 지금까지 적용된 허용처짐 제한을 나타낸다.

표 6 허용처짐 제한

구 분	엑스포박람회 (HML-03호)	기계연시험선 (UTM-02호)	대전상용모델 (UTM-03호)	일본동부구룡선 (Linimo)
처짐제한	L/3,000	L/2,000	L/3,000 (L ≤ 25) L/4,000 (L > 25)	L/1,500 (20 < L ≤ 25) L√L/25 / 1,500 (L > 25)




교량거더의 허용처짐 제한 역시 거더 단면의 크기에 직접적인 영향을 주는 인자로 검토가 필요한 부분이다. 교량의 지간 길이가 상이한 노선의 경우 일정한 처짐제한을 둘 경우 지간장이 긴 경우는 지간장이 짧은 거더에 비해 큰 처짐이 발생하여도 문제가 없는 것으로 검토될 수 있다. 예를 들어 차량의 처짐한계가 10mm인데 허용처짐한계를 L/3,000로 규정할 경우 25m 지간인 경우, $\delta_a=8.33\text{mm}$ 로 만족되지만 지간이 40m인 경우 $\delta_a=13.33\text{mm}$ 로 규정을 초과하게 된다. 따라서, 허용처짐량은 차량의 특성을 고려하여 절대 허용처짐한계 값으로 제시되거나 한계지간을 규정하여 지간에 따른 처짐기준량을 달리 규정하여야 할 것으로 판단된다.

3. 자기부상열차 구축물 설계

3.1 자기부상열차 구축물 설치 현황

지난 15여년 동안 자기부상열차의 실용화 연구를 위해 엑스포 박람회장과 한국기계연구원에 시험선이 건설되었

표 7 콘크리트 표준 단면 비교

구 분	엑스포박람회장 (HML-03호)	한국기계연구원 (UTM-01호)	국립중앙과학관(시공중) (UTM-02호)
단면형상			
구축시기	1991년	1994년	2007년
연 장	560m	1,300m	970m
구조물	콘크리트	560m	920m
	강구조	-	200m

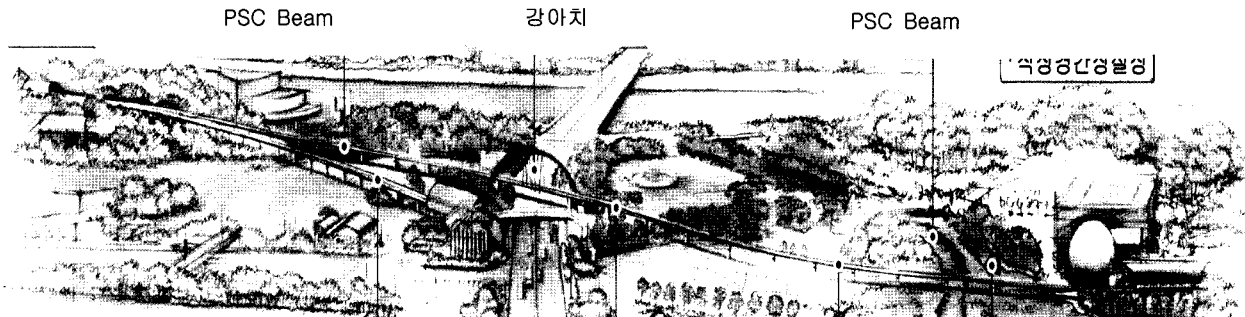


그림 3 UTM-02호 구조물 설치 현황 조감도

고 2007년에 완공예정으로서 상용화 노선이 건설되고 있다. 지금까지의 자기부상열차 구축물의 시공에 대해 비교하고 발전 방향에 대해 언급한다. 표 7은 그동안 국내에 설치되었거나 설치중인 자기부상열차 구축물 현황을 보여준다. HML-03호와 UTM-01호의 경우 주로 PSC Beam교량거더로 설계, 시공되었고, UTM-01호의 경우 곡선 반경 R=60m의 곡선구간 200m에 대해 강합성 거더로 설계, 시공되었다. HML-03호의 경우 곡선구간이 설치되어 있으나 R=600m로 비교적 곡선반경이 커 직선 PSC Beam 거더위에 곡선궤도를 편기하여 설치하였다.

3.2 UTM-02호 구축물 설치

현재 대전 국립중앙과학관에 설치중인 UTM-02호 구축물 설치에 대해 기본설계 개념에 대해 간략히 소개하고자 한다.

총연장 970m 중 엑스포 과학공원 주차장과 국립중앙과학관 주차장 구간 920m는 콘크리트 교량 거더를 적용하였고 왕복 6차로인 대덕대로를 횡단하는 50m 구간에 대해서는 강아치교를 적용하였다. 다음에 콘크리트 교량거더 구

축구간과 강아치 교량거더 적용구간에 대해 설명한다.

3.2.1 콘크리트 교량거더 구축 구간

자기부상열차 구축물은 장애물이 없고 연속 시공이 가능한 구간은 일반적으로 콘크리트 교량거더를 채용하여 설치한다. 현재까지 설치된 자기부상열차 구축물 콘크리트 교량 거더 단면을 비교하면 표 8과 같다. 자기부상열차의 실용화를 위해서는 기타 경전철과의 경쟁력 확보가 필요할 것으로 판단된다. 국내 자기부상열차 콘크리트 단면과 경전철 모노레일 단면을 비교하여 표 8에 나타내었다.

표 8에서 알 수 있듯이 자기부상열차 교량거더의 단면이 모노레일 교량거더 단면에 비해 큰 것을 알 수 있다. 이와 같이 거더 단면의 크기는 경제성뿐만 아니라 도심지 미관에도 영향을 주기 때문에 자기부상열차가 현재 경전철 분야에서 상용화되어 기타 경전철과 경쟁하기 위해서는 반드시 해결하여야 할 문제이다. 이렇듯 자기부상열차 교량거더의 단면을 줄이기 위해서는 설계기준의 정립, 거더 상부의 궤도 시스템의 슬림화가 이루어져야 한다고 판단된다.

표 8 콘크리트 표준 단면 비교

구분	UTM-01호	UTM-02호	모노레일
단면형상			
단면높이/폭(mm)	2,050/1,350	1,900/1,350	1,600/1,000(800)

3.2.2 강아치 교량거더 구축 구간

(표 9 참조).

(1) 계획

UTM-02호가 설치되는 상용화 노선은 국립중앙과학관과 엑스포 과학공원을 연결하고 대전광역시로 진입하는 폭 35m 왕복 6차로인 대덕대로를 횡단하도록 계획되었다

대덕대로를 횡단하는 구축물 형식은 역대칭 아치교, 비대칭 사장교 및 강박스 거더교를 각각 비교 검토하여 주변 경관과의 조화, 최첨단 과학기술의 상징인 자기부상열차의 상징성, 구조적 안정성, 경제성 및 시공성을 종합적으로

표 9 강아치 횡단구간(대덕대로) 현황

구분	평면도	조감도	정면도
현황			

표 10 대덕대로 횡단 강구조 형식 비교

구분	제 1 안(선정안) 역대칭 아치교	제 2 안 비대칭 사장교	제 3 안 강박스 거더교
평면도			
종단면도			
검토	<ul style="list-style-type: none"> • 미관이 수려함 • 최첨단 과학을 상징하는 자기부상열차에 부합되는 이미지 • 처짐제어가 용이 	<ul style="list-style-type: none"> • 케이블이 많아 처짐제어가 어려움 • 교각 높이가 높아서 도로 주행자 위압감 발생 	<ul style="list-style-type: none"> • 시간이 길어 단면높이가 높아져 종단구배가 높아짐 • 강합성단면이 커 경제성 불리 • 미관불량

표 11 강아치 거더 형식

구분	일반부	케이블 설치부 (거더 중앙부)
단면형상		

로 검토, 판단하여 최적안인 역대칭 아치교를 선정하여 적용하였다(표 10 참조).

(2) 단면형식

비대칭 아치교의 거더형식은 강합성 거더 형식을 채용하여 교량 거더 전체의 강성을 확보하고 거더 중앙부에 아치부와 거더를 케이블로 연결하여 차량 주행에 따른 활하중에 의한 처짐을 최소화하고, 처짐제어가 용이하도록 하였다. 거더 중앙부는 캔틸레버를 연결하여 케이블이 정착할 수 있도록 계획하였다(표 11 참조).

(3) 구조검토

1) 모델링

시간길이 50m의 거더중앙부 처짐을 자기부상열차 설계 기준 및 처짐제한을 만족하기 위해서는 강합성교의 단면높이가 3.5m가 되어야 하는 것으로 검토되었다. 대략대로

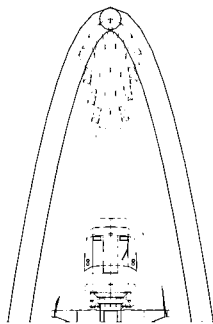
의 다리밑 공간 5.0m를 확보하기 위해서는 최소 단면높이가 필요하므로 강아치에 케이블을 5줄 설치하여 단면높이 및 처짐을 제어토록 계획하였다. 그림 4에 강아치 및 케이블에 대한 구조모델링을 나타내었다.

2) 단면검토

자기부상열차의 지배조건은 단면강성 보다는 처짐제한이다. 활하중이 상대적으로 작아 단면 응력보다는 처짐량에 의해서 단면의 크기와 강성이 결정된다. 강합성거더의 응력수준은 허용응력의 50%이하로 제한되므로 여기서는 케이블에 대한 검토결과를 요약한다.

① 케이블 장력검토

케이블은 차량 주행시와 반복하중에 의한 케이블 피로에 대해 검토하고 유지관리를 위한 케이블 교체와 순간적인 케이블 절단시 인접 케이블에 미치는 장력 변화에 대해 검토하였다.



(a) 구조형상



(b) 모델링

그림 4 강아치교 구조형상 및 모델링

표 12 케이블 장력 검토 결과

단면 설계시		피로 검토시		교체시		절단시	
최대장력 (tonf)	허용장력 (tonf)	최대응력 (kgf/cm ²)	허용응력 (kgf/cm ²)	최대장력 (tonf)	허용장력 (tonf)	최대장력 (tonf)	허용장력 (tonf)
200번 케이블		200번 케이블		207번 교체시	209번 케이블	200번 절단시	209번 케이블
17.7	27.04	2144.4	3448.3	14.24	27.04	14.55	27.04

표 13 케이블 정착부 검토

구분	응력 Vector		응력 Contour				
	아치리브연결부	보강형 연결부	아치리브연결부	보강형 연결부	아치리브연결부	보강형 연결부	
아치리브 연결부							
구분	최대인장응력	허용인장응력	최대압축응력	허용압축응력	최대전단응력	허용전단응력	판정
아치리브 연결부	1,346	1,900	543	1,900	182	1,100	O.K
보강형 연결부	1,515	1,900	680	1,900	300	1,100	O.K

② 케이블 정착부 검토

케이블이 정착되는 아치리브와 보강형(캔틸레버부)에 대해 FEM 해석을 통해 응력 집중부를 최대 인장, 최대압축, 최대전단에 대해 검토한 결과 허용응력 이하로 검토되었다.

4. 자기부상열차 구축물 시공계획

UTM-02호 구축물은 2007년 완공 예정으로 현재 시공중이므로 기본설계 시공계획에 대해 언급하고자 한다. UTM-02호 구축물은 시점인 엑스포 과학공원에서 대덕대로를 횡단하여 종점인 국립 중앙과학관까지 970m 노선에 대해 시공중이다. 여기서는 기본설계에서 제시된 전체 공사관리 계획과 대덕대로 횡단 강아치교 가설계획에 대해 간략히 소개하고자 한다.

4.1 공사관리계획

전체 노선 연장 970m를 엑스포 과학공원구간, 대덕대로 횡단구간, 국립중앙과학관 구간 및 하천횡단구간 등 4구간으로 구분하여 공사관리 계획을 수립하였다. 각 구간에서 중점적으로 고려한 공사관리 계획은 표 14와 같다.

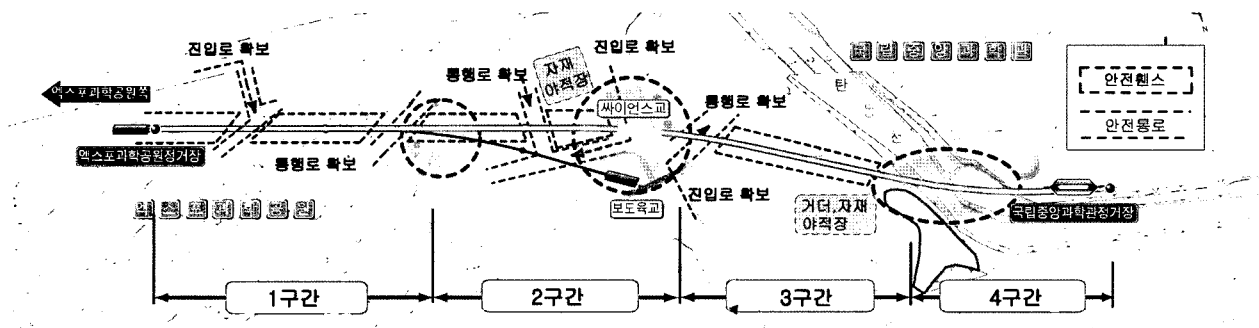
4.2 강아치교 가설계획

강아치교가 횡단하는 대덕대로는 대전광역시 진입 주도로 차량 통행이 빈번한 왕복 6차로 광폭 도로이다. 구조물 설치 공종은 주교각 2기, 강아치 기초 2기를 비롯하여 주거터와 케이블 설치이다. 먼저 도로 양측에서 교각기초를 설치하고 크레인 2대를 이용하여 주거터를 설치하고 통행량이 적은 야간에 케이블을 설치하도록 계획되었다. 표 15에 단계별 가설계획을 나타내었다.

5. 맺음말

이상과 같이 국립중앙과학관과 엑스포 과학공원 간에 설치되는 UTM-02호의 구축물에 대한 기본설계 내용을 중심으로 개략적으로 서술하였다. 그동안 자기부상열차 차량에 대해서는 집중적인 연구와 투자로 인하여 상용화 수준까지 이르렀으나 그에 비해 구축물에 대한 연구나 투자는 미미했던 것이 사실이다. 자기부상열차가 앞으로 경전철 분야에서 경쟁력을 확보하고 우위를 점하기 위해서는 구축물 분야에 대한 연구·개발이 이루어져야 할 것으로 판단된다. 이와 같은 사항에 대해서 이론과 실체가 어우러진 점진적 개선이 기대된다.

표 14 구간별 공사관리계획



구분	1구간	2구간	3구간	4구간
공사계획	<ul style="list-style-type: none"> 관람 안전대책수립 진입로,통행로확보 	<ul style="list-style-type: none"> 강아치교 일괄가설 단계별 교통처리계획 	<ul style="list-style-type: none"> 주차동선 확보 자재야적장 확보 	<ul style="list-style-type: none"> 하천횡단 가설계획 가도설치

표 15 강아치교 단계별 가설계획

1단계	2단계	3단계	4단계
터파기 및 교각시공	상부거더 크레인을 이용하여 일괄거치	아치리브 크레인을 이용하여 일괄거치	상부콘크리트 타설 및 행어 설치

참 고 문 헌

1. 자기부상열차 설치사업 기본설계보고서, 2005, 동원시스템즈(주)
2. 자기부상열차 시험선로 프리캐스트 교량설계, 1993, 과학기술처, 한국건설기술연구원
3. 도시형 자기부상열차 시험선로 실시설계보고서, 1994, 한국기계연구원
4. 도시형 자기부상열차 표준화제도 실시설계 보고서, 2001, 한국기계연구원
5. RUTM (R o tem Urban Transit Maglev System), 2004, (주)로템
6. Linimo ホームページ, 2005, 愛知高束交通株式會社
7. 아이치만국박람회 동부구룡선 Linimo를 지지하는 강구조물, 2005,10, B+F(橋梁と基礎)
8. 세계의 경전철 시스템, 일본편, (주)삼보기술단
9. Proposed Criteria for Design of Urbanaut® Continuous Elevated Guide-Way structures for Medium to High Speed Transit, Detroit, The Urbanaut Company Inc. 