

자기부상열차구조물에 있어서 콘크리트선로거더의 거동

Behavior of Concrete Track Girder for Magnetic Levitation Train

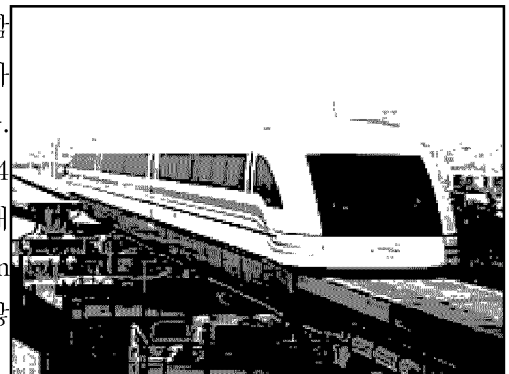
강 보 순¹⁾
Kang Bo-Soon

ABSTRACT

State of the art and current issues related with the RC and PSC structure system for the magnetic levitation train were investigated. The German and China magnetic levitation train adopted a new kind of a structure to enable high-speed transportation, which allows the use of the space over a ground. The loading from magnetic levitation trains is light-weight compared with a regular train due to load distribution to a supporting structure. Therefore, the magnetic levitation train is considered an economical and efficient transportation system, and is also an environmentally-sustainable structure. In this paper, the structural design and construction technology specific to a magnetic levitation train were discussed, and structural considerations related with an actual operation of the train were pointed out. In addition, the future research area of a magnetic levitation train was proposed

1. 서론

중국 상하이에서는 자기 부상 열차가 최고 시속 430km의 속도로 운행해서 택시로 보통 40분 걸리던 공항과 도심 사이 30km를 8분 만에 연결할 수 있다. 매 10분마다 출발하는 열차는 한꺼번에 최대 승객 574명을 나른다. 1조 4천억원을 들여 만든 이 상하이 마그레브 시스템은 한 해에 천만명의 승객을 나를 것이다. 이 시스템은 지멘스를 포함한 독일의 세 회사가 기술을 제공하고 중국 정부가 출자하여 세운 회사가 합작하여 1998년에 시작해서 완성했다. 상하이 자기 부상 열차의 모델이 된 실증 시스템은 1984년부터 독일에서 운행되고 있었다. 한국에서도 1993년 대전엑스포에서 현대정공에서 만든 자기부상열차가 560m 구간을 운행했고 한국기계연구원에서도 속도는 크지는 않지만 자기부상열차를 연구했다.



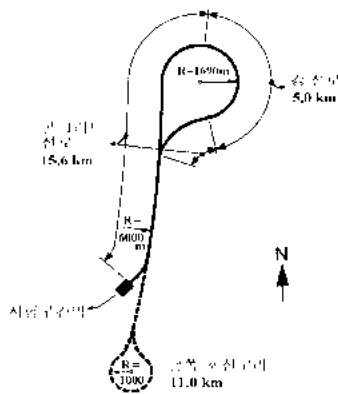
70년 초부터 독일 및 몇 선진국에서는 최고속도 시속 <그림.1> 중국 상하이 자기 부상 열차

1) 경주대학교 건설환경공학부 조교수

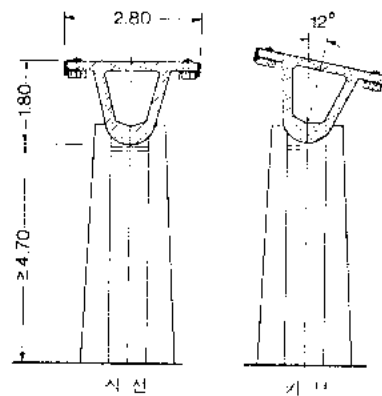
300 km에서 400 km까지 즉 열차와 항공기속도 사이에 놓일 수 있는 차세대를 위한 장거리교통 시스템의 연구개발을 착수해 벌써 실용화에 노력 해다. 이러한 새로운 교통시스템은 경제적인 에너지 이용, 환경보호 및 승객을 위한 좀 더 안락한 여행의 우수성 등을 제시해 주어야 한다. 독일은 끊임없는 자동차 및 고속철도 연구개발과 함께 차시대의 장거리교통수단으로서 자기부상열차를 Emsland 구역에 있는 31.5 km의 시험구간을 통하여 실용화에 박차를 가하고 있다. 독일 자기부상열차는 지난 20년 동안 시험구간에 있어서 운행경험을 통하여 근본적인 성능을 입증했다. 1979에 벌써 이 교통기술은 Hamburg에서 열렸던 국제교통전시회에서 900m시위구간을 공공수단의 형태로 소개하였다. 현재는 자기부상열차 “Transrapid”가 Emsland에 있는 31.5 km의 시험구간에서 운행되고 있다. 이 시험구간은 연구 및 기술을 위한 독일 건설부의 지원 하에 민간 컨소시엄의 공동건설형태로 AEG-Telefunken, BBC,,

Dyckerhoff & Widmann, Krauss-Maffei, Siemens 및 Thyssen-Henschel회사들이 참여하고 있다. 시험구간의 차체, 선로, 전동장치 및 운행기술등은 최고속도 시속 400 km를 고려한 설계를 하였다[1].

노선완공 후, 즉 길이 10km 직선구간 및 커브구간을 위한 북쪽에 놓인 전환고리구간으로 이루어진 첫 건설구간을 보완한 후 남쪽에도 전환고리를 통하여 시험목표인 지속적인 운행시험이 추가되었다(그림2 참조). 이 시험구간은 북부독일에 있는 Emsland 구역 Lathen 과 Dörpen 에 위치



<그림.2> 시험구간의 교통선로및위치



<그림.3> 직선과 커브시 교각 및 선로구조물의 단면

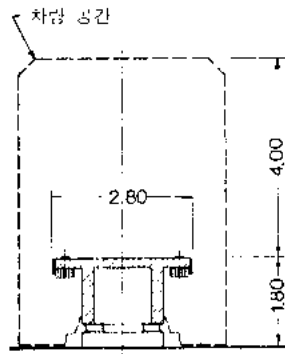
하고 있다.

본 논문에서는 시험구간의 선로구조에서 설계상의 특수성을 분석한 후 우리나라에서 자기부상의 설계와 시공계획을 수립함에 있어 필요한 사항 및 유의해야 할 사항을 도출하였다.

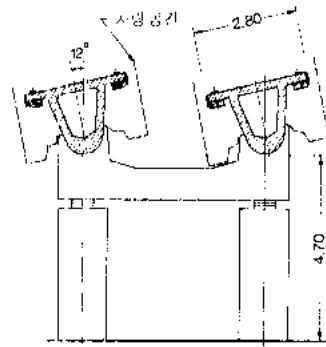
2. 선로구조의 설계

2.1 선로구조분석

자기부상열차의 투자비용에서 선로건설은 중요한 부분이다. 따라서 효율적이고 경제적인 선로를 건설하기 위하여 자기부상기술의 개발을 착수 할 때부터 부단한 노력을 경주하였다. 자기부상열차의 선로구조물을 위한 표본으로서는 지간이 25m인 단순보 선로가 선정되었고 선로단면은 <그림.3>에 나타난 것 같이 직선 및 커브구간에서 대표단면을 사용하였다. 또 교각사이의 이용공간의 높이를 최소한 4.7m로 설정하였다. 교각선로와 더불어 교차도로사이의 거리가 충분히 긴 경우



〈그림.4〉 낮은 선로의 단면



〈그림.5〉 커브에서 더블선로의 단면

선로를 낮게 놓을 수 있는데 이 경우 선로는 기본적으로 기둥을 제거하고 교각의 지간을 작게 하여 본 교각선로와는 다른 형태를 선택하게 된다<그림.4>.

교각선로에 대한 구조시스템으로서 모든 시험구간과 Transrapid 시험구간에서 단순보 및 2경간 내지는 3 경간 연속시스템이 사용되었다. Transrapid 04구간의 2경간 라멘구조는 작은 처짐으로, 특히 온도차가 발생할 때 우수성을 보여주는 반면에 TVE의 콘크리트선로와 같은 단순보 구조는 경제적인 설치를 할 수 있고, 공기가 제한된 시험구간을 건설할 경우 비교적 설치 및 철거가 용이하여 채택하였다.

완전 상용화된 후에는 <그림.5>에 나타난 2경간 라멘구조와 같은 더블선로단면을 갖는 구간이 많이 건설될 것이다. 중국 상하이 운행구간도 이와 같은 교각선로를 취했다. 선로구조물 지지대는 양 선로구조물사이에 횡구조물로 연결되어 구조적인 안정을 취하고 있으며 온도차에 대한 변형이 작다. 교각사이로 교차할 수 있는 차량공간의 활용 때문에 횡구조물은 선로아래 단순보시스템과 거의 같은 높이에 설치하고 있다. <그림.5>는 더블선로의 회전 시 커브단면의 사례를 보여주고 있다.

2.3 선로구조물의 Control

완전히 공장에서 제작된 실지의 거더는 Transrapid 시험구간(TVE)에 설치되었고 작업지시에 의해서 운전으로 들어간다.

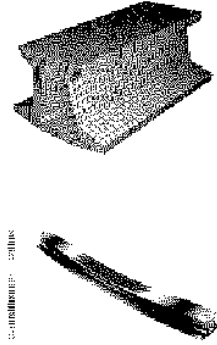
2년 동안의 시험과정은 안정성 요구에 대하여 정적계산을 통해 이론적으로 결정된 실제하중을 측정하고 기초가 되는 하중가정을 입증하는데 목적을 두고 있다.

수행되는 시험들은 수송 및 환경에 기인한 거더위에 작용하는 하중의 정적 내지는 동적하중과 변위를 측정하는 것이다. 적절한 센서는 아래와 같은 것들을 측정한다.

- 주지지 뼈대구조물의 신장 및 변위
- 강 부착물에서 가속도, 신장 및 변위
- 받침이동
- 거더의 장기간 온도 및 변형측정

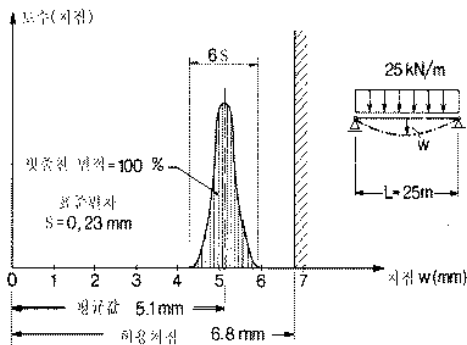
이외에도 선로에 요구되는 필요한 사항은 공사기간동안과 완공 후에 검토되었고 차후에도 계속하여 진동특성과 에너지감쇠는 물론 구조물제작과 조립의 정확성 및 제작된 선로의 지점에서 정확성 그리고 운행 시 측정을 통하여 하중수용성 검토와 조정을 해야만 한다.

2.4 선로구조물의 정적 및 동적거동

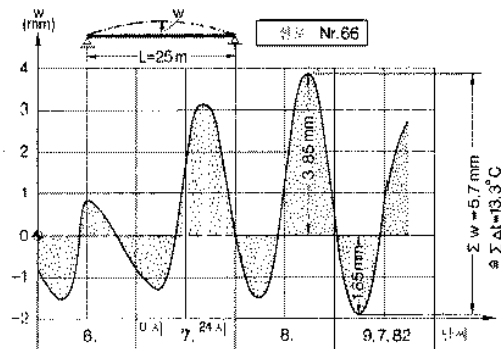


〈그림.6〉 선로구조물의 수치해석결과 및 실험장면

자기부상열차선로는 하중받침구조물과 관련된 요구가 우리가 알고 있는 교량받침표준을 훨씬 더 초과하므로 자체 spec.이 기초가 된다. 성능입증은 여기서 결정적으로 중요하다. 예를 들면 단면결정은 수송능력입증보다는 먼저 평가를 위해 요구되는 산로거더의 첫 적절한 형상의 임계주파수 그리고 온도 및 교통조건에 하에서 허용변형의 한계로부터 결정되어야 한다. 복합적인 유한요소 모델로 된 바 모델은 궤도거더를 계산하기 위해 사용된다. 정적 및 동적계산을 첨부시켜 선로거더의 적절한 형상이 결정되어져만 하며 수치해석으로 자기부상열차가 위로 주행될 때 동적하중의 계수는 증가한다.



〈그림.7〉 궤도거더의 침짐 도수분포도



〈그림.8〉 불규칙한 온도차로 인한 궤도거더의 침짐변화

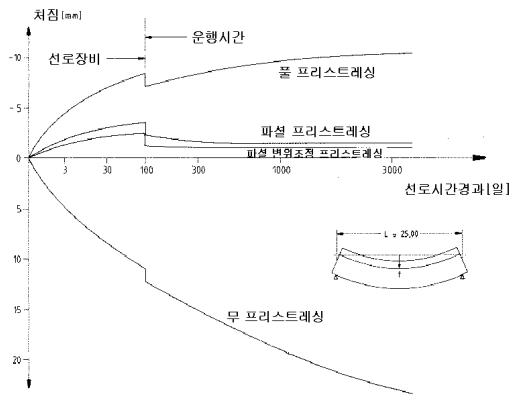
하중 및 온도변화에 대한 자기부상열차의 선로거더의 침짐은 가장 중요한 부분 중에 하나로 다룬다. 이 구조물의 허용변형은 아주 작은 범위이고 기초와 선로면에 대한 위치 정확도는 지금까지 시방서에 제시된 값보다 훨씬 더 정확해야만 한다. 정적 재하 된 교통하중 하에 침짐의 검토는 5개 25m 및 3개 31m 선로구조물에 시험하중을 재하 하여 수행되었다. 선로구조물마다 중앙에 270KN 무게하중을 재하 시켰으며 그로 발생하는 침짐은 수준측량에 의하여 측정되었다. 이와 같은 시험하중의 경우를 25kN/m 정적교통하중으로 바꾸어 계산하면 25m 선로거더의 경우 허용침짐은 6.8mm이고 실제 발생하는 침짐의 평균값은 5.1mm로 약 25% 여유 있는 만족한 결과를 얻

었다.<그림7>. 표준편차는 평균값의 4.5%를 나타내었다. 이것은 99.8% 확률과 함께 모든 처짐이 허용처짐보다 최소한 14% 아래에 놓였다는 것을 의미한다(한쪽으로 3 σ 치).

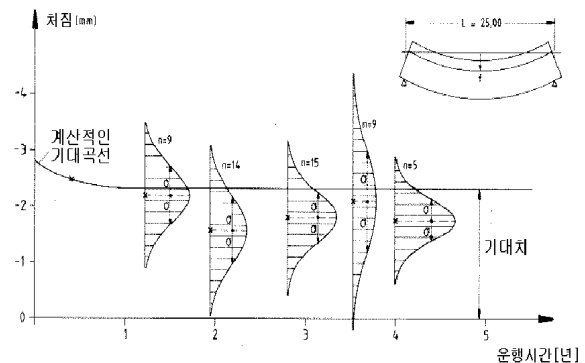
탄성처짐은 기존 프리스트레스 콘크리트 구조물의 허용처짐의 범위 내에 충분히 존재하였다. 즉 선택된 지간길이(25m)에서 이 처짐상태는 더 이상 추가적인 재료를 필요로 하지 않았다.

케도거더의 온도변형에 대해서는 30일 동안 햇볕으로 인한 선로구조물상하면의 불규칙한 온도차를 측정하였고 또한 구조물의 여러 단면에 온도계를 부착하여 온도변화를 측정하여 얻었다. 25m선로구조물에 발생하는 온도변화의 정도는 1992년 7월 6일부터 9일까지 측정하였다. 7월 8일에는 강한 햇볕이 내리쬐었고 그날 밤에는 구름이 없었다. <그림8>에서는 그 측정결과를 한눈에 볼 수 있다. 주야에 최대처짐의 차이는 5.7mm를 나타내었고 선로구조물상하면의 온도차는 13.3. C이었다. 선로의 전체허용범위경향을 분석해 볼 때 측정된 온도변형이 허용범위 안에 충분히 놓이게 되었다. 얻어진 허용범위곡선을 가능한 균등하게 활용하기 위해 선정위치는 등가온도가 아니라 구조물상면의 최고가열과 하면의 최저냉각사이에서 평균치를 얻도록 장비가 설치되었다.

시간에 따른 처짐에 대한 검토를 또한 수행하였다. 선로장비하중(약 5kN)을 재하한 후 그리고 건조수축 및 크리이프가 부분적으로 끝난 후 선로구조물의 파설 변위조정 프리스트레싱이 최초로 가해졌다. 설비장비의 설치 전에 프리스트레싱이 완화된 현상이 발생 할 수 있는데 이것은 자중영향이 아직도 지배적이기 때문이다. 이런 상태에서 예를 들면 최종 프리스트레싱과 설비장비사이 에 6개월 내에 휨이 계산상 3mm만 발생하게 되면 구조물은 상방향으로 휘게 된다. 20개 선로를 선정하여 이와 같은 휨에 대한 시간적인 검토를 충분히 하였다. 또한 수준측량으로 선로상하면의 불규칙한 온도차는 상쇄되었음을 입증하였다. 이와 같은 측정치의 평균값은 직접 계산적인 건조수축값 및 크리이프값을 검정하는데 이용 할 수 있었다.



<그림.9> 선로거더의 장시간 처짐변화 (계산치)



<그림.10> 선로거더의 장시간 처짐에 대한 계산치와 측정치의 비교

프리스트레스 콘크리트의 장시간 지속하중 하에서 구조물의 소성처짐은 거의 발생하지 않는 “0”인 상태를 요구한다. 철근콘크리트는 비교적 큰 소성변형으로 선로구조물로서는 적합하지 않다. 계산상으로 선로단면에서 강선으로부터 우력의 팔길이 이용과 함께 풀 프리스트레싱을 주었을 때 선로는 허용처짐범위를 넘어 위로 상승되거나 파설 프리스트레싱을 주었을 때는 벌써 선로의 소성 처짐 조건을 아주 잘 충족시켜 주었다. 자기부상열차 선로구조물을 위한 프리스트레싱 방법은 운행기간 동안 프리스트레스 강선의 처짐상태를 정확히 조정시킬 수 있는 파설 변위조정 프리스트

레싱 시스템을 채택하였다<그림9>.

<그림10>에서는 시험구간에서 4년간의 처짐측정치와 처짐계산치를 비교한 결과 그 오차가 상당히 작은 것으로 나타났다. 즉, 수행된 높이(고저)와 온도 측정치가 허용된 정확도 안에 놓였다. 뿐만 아니라 그 측정 결과치는 운행 시에 아주 조용하고 소음이 없는 것으로 입증을 해주고 또한 에너지수요에 결정적인 역할을 하는 노선의 고정자 부분과 열차 자기사이의 단의 나비가 원래 예상한 값보다 작은 값을 취할 수 있는 것으로 입증해 주고 있다. 따라서 프리스트레스트 콘크리트 자기 부상열차의 노선 구조물로서 적합한 구조재료임을 명백히 나타내 주고 있다.

3. 문제점 고찰

자기부상열차의 실제적인 사용-또는 운행 조건하에서 콘크리트 구조물의 정확한 거동은 지금까지 부분적으로 연구되었다. 따라서 콘크리트 선로구조물의 균열발전, 강성 및 변형특성, 철근과 (또는 프리스트레스트 강선) 콘크리트 사이의 부착특성이 실제적인 현장에서 작용하는 사용-또는 운행 조건에서 변화상태에 관한 연구가 더욱 요구된다.

4. 결론 및 추후연구과제

독일 자기부상열차는 차세대를 위한 새로운 장거리교통시스템으로서 평지 위에 또 하나 공간을 이용하는 새로운 고속교통선로구조물을 채택하였다. 자기부상열차시스템은 교통하중이 크지 아니하므로 경제적인 에너지이용 및 경제적인 구조물을 건설할 수 있었고 자연경관 및 동물을 위한 친 환경구조물이며 선로아래 교각사이의 공간을 이용하는 효율적인 구조물로 건설 할 수 있었다.

앞으로 자기부상열차의 실용화를 위하여 시험노선에 대한 정적인 변형거동 및 온도변형과 시간에 따라 변하는 처짐, 진동특성과 에너지 감쇠, 프리스트레스트 구조물 부분의 설치정확성, 마모된 노선의 위치 정확성, 운행사용시간에 측정을 통해 하중상태의 검사와 같은 사항들의 연속적인 control이 수년간 이루어져 실무에 활용 할 수 있도록 실제적인 data base를 구축해야 하겠다.

참고문헌

- [1]. Eitlhuber E. : transrapid versuchsanlage Emsland(TVE), ZEV-Glas. Ann. 105 (1981), S. 202- 204.
- [2]. Arbeitsgemeinschaft Forderung Fahbahnen für neue Technologie : Weiterentwicklung von Fahrwegen in Betonbauweise für nerartige Schnelltransportsysteme, Schlußbericht des Bundesminister für Forschung und Technologie unter dem Kennzeichen TV 76189 geförderten Vorhabens, September 1977.
- [3]. Hilliges D. : Fahrwege für Magnetschwebefahrzeuge unter dynamischer Belastung, Bauingenieur 51 (1976), S. 337-347.
- [4]. Lönner K.H. , Stüben H.H : Bauausführung des Betonfahweges der Transrapid Versuchsanlage Emsland (TVE). Bauingenieur 58 (1983), Heft 4
- [5]. Schambeck H. : Aufgeständerte betonfahrwege für den spurgebundenen Verkehr. Beton 1/1988