

독일자기부상열차의 콘크리트 구조물 시스템

Concrete Structure System for the German Magnetic Letic Levitation Train

장 보 순*
Kang Bo-Soon

ABSTRACT

State of the art and current issues related with the RC and PSC structure system for the German magnetic levitation train were investigated. The German 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 Transrapid is light-weight compared with a regular train due to load distribution to a supporting structure. Therefore, Transrapid 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

70년 초부터 독일 및 몇 선진국에서는 최고속도 시속 300 km에서 400 km까지 즉 열차와 항공기 속도 사이에 놓일 수 있는 차세대를 위한 장거리교통시스템의 연구개발을 착수해 벌써 실용화에 노력하고 있다. 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 민간컨소시엄의 공동건설형태로 AEG-Telefunken,

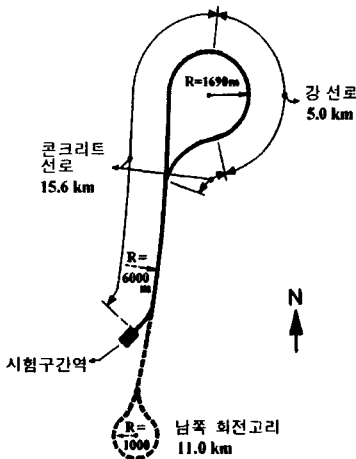
* 경주대학교 건설환경시스템공학부 전임강사

BBC,-기술을 위한 독일 건설부의 지원 하에 민간컨소시엄의 공동건설형태로 AEG-Telefunken, BBC, Dyckerhoff & Widmann, Krauss-Maffei, Siemens 및 Thyssen-Henschel 회사들이 참여하고 있다. 시험구간의 차체, 선로, 전동장치 및 운행기술등은 최고속도 시속 400 km를 고려한 설계를 하였다[1].

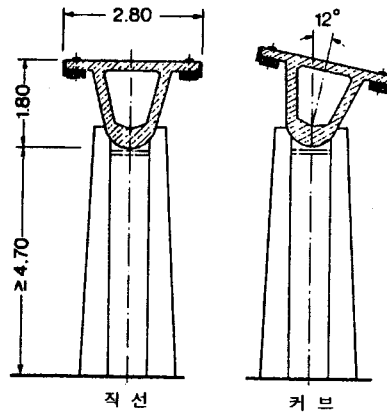
Emsland에 있는 Transrapid의 시험구간(TVE)의 목적은 다음과 같다.

- 자기부상열차의 일상효용성 및 모든구성요소의 작동시험
- 안전 및 유효성입증
- 사용자 쾌적함의 시위(외부손님동승)
- 환경보호신뢰성
- 부분적인 운행비용 예고
- 차후 자기부상열차의 승인을 위한 방법습득

노선완공후, 즉 길이 10km 직선구간 및 커브구간을 위한 북쪽에 놓인 전환고리구간으로 이루어진 첫건설구간을 보완한후 남쪽에도 전환고리를 통하여 시험목표인 지속적인 운행시험이 추가되었다(그림1 참조). 이시험구간은 북부독일에 있는 Emsland 구역 Lathen 과 Dörpen 에 위치하고 있다.



<그림.1> 시험구간의 교통선로및위치



<그림.2> 직선과 커브시 교각 및 선로구조물의 단면

본 연구에서는 본시험구간의 선로구조의 설계상의 특수성을 분석하고 시공법에 대하여 검토한후 우리나라에서 자기부상의 설계와 시공계획을 수립함에 있어 유의해야할 사항을 도출하였다.

2. 선로구조의 설계

2.1 선로구조분석

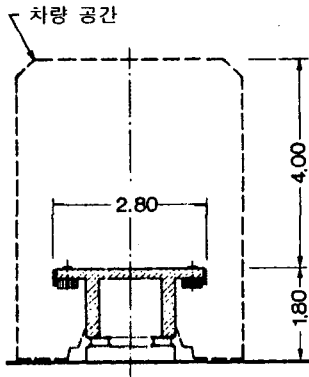
자기부상열차의 투자비용에서 선로건설은 중요한 부분이다. 따라서 효율적이고 경제적인 선로를

건설하기 위하여 자기부상기술의 개발을 착수 할 때부터 부단한 노력을 경주하였다. Dyckerhoff & Widmann AG가 시험구간 Transrapid 02(길이 900m) 와 München에 Krauss-Maffei 회사의 교각구간 Transrapid 04 (길이 2.4 km) 및 Erlangen에 있는 시험운행비용부담회사 AEG - Telefunken, BBC, Siemens 등의 이동구간을 설계 및 시공한 세 건설회사 Strabag Bau-AG, Dyckerhoff & Widmann 와 Polenszk & Zöllner가 자기부상열차의 특수하중 에 대한 선로구조의 거동을 이론적 및 실험적으로 연구하여 효율적이고 경제적인 건설방법을 찾아내기 위해 콘크리트를 이용한 선로구조개발에 대한 협력연구에 합의하고 이를 위해 공동 출자를 하였다[2], [3].

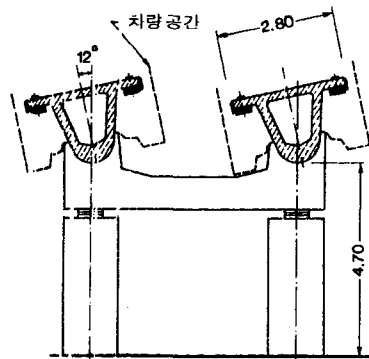
자기부상열차의 선로구조물을 위한 표본으로서의 지간이 25m인 단순보 선로가 선정되었고 선로 단면은 <그림.2>에 나타난 것 같이 직선 및 커브구간에서 대표단면을 사용하였다. 또 교각사이의 이용공간높이를 최소한 4.7m로 설정하였는데 그 이유는 다음과 같다:

- 외부에 싸여있는 전자기식 지지 및 운반시스템은 연속적인 선로로서 보형태의 구조물을 필요로 한다.
- 시도로 및 국도처럼 모든 교차되는 작은 도로가 특수한 구조물이 없이 통과 될 수 있다.
- 선로아래 토지이용이 가능하도록 하여 최소한의 용지만 필요하다.
- 선로는 경관이 확보되고 야생동물을 위하여 통과할 수 있는 공간을 제공하여 친 환경 구조물이다.
- 교각은 선로 및 전선장비의 일차적인 훼손으로부터 보호해 준다.

교각선로와 더불어 교차도로사이의 거리가 충분히 긴 경우 선로를 낮게 놓을 수 있는데 이 경우 선로는 기본적으로 기둥을 제거하고 교각의 지간을 작게 하여 본 교각 선로와는 다른 형태를 선택하게 된다<그림.3>.



<그림.3> 낮은 선로의 단면



<그림.4> 커브에서 더블선로의 단면

고속교통시스템인 경우 상부선로에 큰 회전반경($R=1.5\text{km}$ 에서 2.5km 까지)이 요구되므로 직선위치에서부터 교차도로를 넘어가기 위하여 필요한 높이까지, 전철의 경우에는 더 높게, 선로를 올리고 다시 내리기 위하여 필요한 인도거리는 최소한 1.2 km를 유지하도록 요구하고 있으므로 교차도로 간의 거리가 이보다 짧은 경우 선로를 계속 올려진 교각 위치에 그대로 두는 것이 바람직하다. 밀집한 주거공간 및 토지가 빈번히 이용되는 지역에 속하는 중앙유럽에서는 교차거리가 약 1km 내지는 그 이하이므로 처음에 세워진 교각 위치에서 평면으로 이어지는 직선선로는 드물게 사용될

것이다.

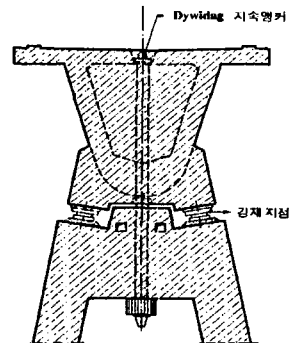
교각선로에 대한 구조시스템으로서는 모든 시험구간과 Transrapid 시험구간에서 단순보 및 2경간 내지는 3 경간 연속시스템이 사용되었다. Transrapid 04구간의 2경간 라멘구조는 작은 처짐으로, 특히 온도차가 발생할 때 우수성을 보여주는 반면에 TVE의 콘크리트선로와 같은 단순보구조는 경제적인 설치를 할 수 있고, 공기가 제한된 시험구간을 건설할 경우 비교적 설치 및 철거가 용이하여 채택하였다..

완전 상용화된 후에는 <그림.4>에 나타난 2경간 라멘구조와 같은 더블선로단면을 갖는 구간이 많이 건설될 것이다. 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 설치하고있다. <그림.4>는 더블선로의 회전 시 커브단면의 사례를 보여주고 있다.

2.2 선로구조물의 Control

선로에 요구되는 필요한 사항은 공사기간동안 과 완공 후에 검토되었고 차후에도 계속하여 다음과 같은 사항에 대한 측정과 control를 해야만 한다..

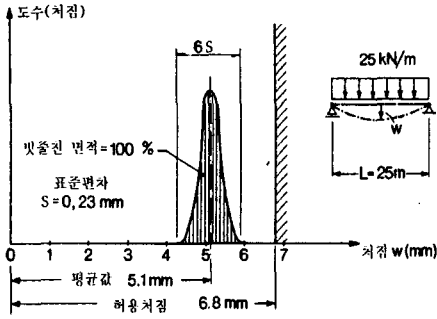
- 정적변위특성
- 온도변형과 시간에 대한 변위
- 진동특성과 에너지감쇠
- 구조물제작 및 조립의 정확성
- 제작된 선로의 지점에서 정확성
- 운행시 측정을 통하여 하중수용 검토



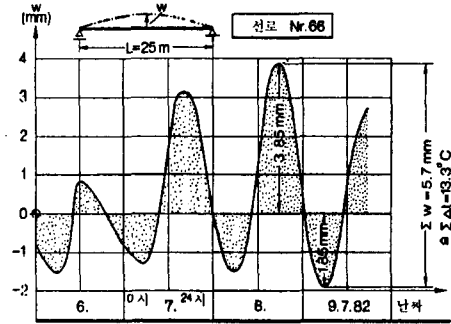
<그림.5> 지점부에서 선로와 기둥머리의 고정을 위한 Dywidag 지속앵커

2.3 선로구조물의 거동

자기부상열차의 선로구조물의 처짐은 가장 중요한 부분으로 다룬다. 이 구조물의 허용변형은 아주 작은 범위이고 기초와 선로면에 대한 위치 정확도는 지금까지 시방서에 제시된 값보다 훨씬 높게 요구되어야 하기 때문이다. 정적 재하된 교통하중 하에 처짐의 검토는 5개 25m 및 3개 31m 선로구조물에 시험하중을 재하하여 수행되었다. 선로구조물마다 중앙에 270KKN 무게하중을 재하시켰으며 그로 발생하는 처짐은 수준측량에 의하여 측정되었다. 이와 같은 시험하중의 경우를 25kN/m 정적교통하중으로 바꾸어 계산하면 25m 선로구조물 경우 선로구조물의 허용처짐은 6.8mm이고 실제 발생하는 처짐의 평균값은 5.1mm로 약 25% 여유있는 만족한 결과를 얻었다.<그림6>. 표준편차는 평균값의 4.5%를 나타내었다. 이것은 99.8% 확률과 함께 모든 처짐이 허용처짐보다 최소한 14% 아래에 놓였다는 것을 의미한다(한쪽으로 3σ 치).



<그림.6> 선로구조물의 처짐 도수분포도



<그림.7> 불규칙한 온도차로 인한 선로구조물처짐변화

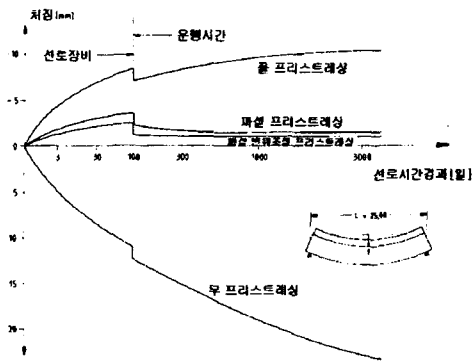
탄성처짐은 기존 프리스트레스 콘크리트 구조물의 허용처짐의 범위 내에 충분히 존재하였다. 즉 선택된 지간길이(25m)에서 이 처짐상태는 더 이상 추가적인 재료를 필요로 하지 않았다.

선로의 온도변형에 대해서는 30일 동안 햇볕으로 인한 선로구조물상하면의 불규칙한 온도차를 측정하였고 또한 구조물의 여러단면에 온도계를 부착하여 온도변화를 측정하여 얻었다. 25m선로 구조물에 발생하는 온도변화의 정도는 1992년 7월 6일부터 9일까지 측정하였다. 7월 8일에는 강한 햇볕이 내리쬐었고 그날 밤에는 구름이 없었다. <그림7>에서는 그 측정결과를 한눈에 볼 수 있다. 낮과 밤사이에 최대처짐차는 5.7mm를 나타내었고 선로구조물상하면의 온도차는 13.3 °C이었다. 선로의 전체허용범위경향을 분석해 볼 때 측정된 온도변형이 허용범위안에 충분히 놓이게 되었다. 얻어진 허용범위곡선을 가능한 균등하게 활용하기 위해 선정위치는 등가온도가 아니라 구조물상면의 최고가열과 하면의 최저냉각사이에서 평균치를 얻도록 장비가 설치되었다.

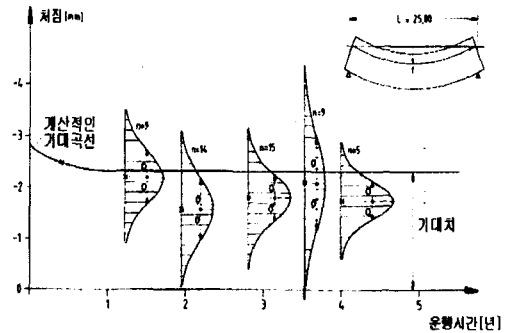
시간에 따른 처짐에 대한 검토를 또한 수행하였다. 선로장비하중(약 5kN)을 재하한후 그리고 건조수축 및 크리이프가 부분적으로 끝난후 선로구조물의 파설 변위조정 프리스트레싱이 최초로 가해졌다. 설비장비설치전에 프리스트레싱이 완화된 현상이 발생 할 수 있는데 이것은 자중영향이 아직도 지배적이기 때문이다. 이런 상태에서 예를 들면 최종프리스트레싱과 설비장비사이에 6개월내에 휨이 계산상 3mm만 발생하게되면 구조물은 상방향으로 휘게된다. 20개선로를 선정하여 이와같은 휨에 대한 시간적인 검토를 충분히 하였다. 또한 수축측량으로 선로상하면의 불규칙한 온도차는 상쇄되었음을 입증하였다. 이와 같은 측정치의 평균값은 직접 계산적인 건조수축값 및 크리이프값을 검토하는데 이용 할수 있었다.

프리스트레스 콘크리트의 장시간 지속하중 하에서 구조물의 소성처짐은 거의 발생하지 않는 "0"인 상태를 요구한다. 철근콘크리트는 비교적 큰소성변형으로 선로구조물로서는 적합하지 않다. 계산상으로 선로단면에서 강선으로부터 우력팔길이이용과 함께 풀 프리스트레싱을 주었을때 선로는 허용처짐범위를 넘어 위로 상승되거나 파설 프리스트레싱을 주었을때는 벌써 선로의 소성처짐 조건을 아주 잘 충족시켜 주었다. 자기부상열차 선로구조물을 위한 프리스트레싱 방법은 운행기간 동안 프리스트레스 강선의 처짐상태를 정확히 조정시킬 수 있는 파설 변위조정 프리스트레싱 시스템을 채택하였다<그림8>.

시험구간에서 4년간의 처짐측정치와 처짐계산치를 비교한 결과 그 오차가 상당히 작은 것으로 나타났다. 즉, 수행된 높이(고저)와 온도 측정치가 허용된 정확도 안에 놓였다<그림8>. 뿐만 아니라



<그림.8> 선로구조물의 장시간침침변화(계산치)



<그림.9> 선로구조물의 장시간침침에 대한 계산치와 추정치의 비교

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 부상 열차의 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 구조물의 인장강도와 변형특성, 철근과(또는 프리스트레스트 강선) 콘크리트 사이의 부착특성이 실제적인 현장에서 작용하는 사용-또는 운행 조건에서 변화상태에 관한 연구가 더욱 더 시급하다.

3.1 실제 사용-또는 운행 조건

실제 사용되는 하중은 크게 두 부분으로 나눌 수 있다. 첫 번째는 사용되는 동적인 하중 과 두 번째는 하중과 무관한 작용. 예를 들면, 습기, 온도차, 주변환경의 공기상태 등으로 나눌 수 있다. 철근콘크리트와 부분적인 긴장방법의 프리스트레스트 콘크리트 벌써 사용하중 하에서 균열이 생기므로 대부분의 경우 하중을 크게, 안전율은 더 높게 설계하므로 균열이 없는 구조물을 추구해 왔다. 수년간 철근 콘크리트와 프리스트레스트 구조물의 측정치와 경험을 축적함에도 불구하고 많은 경우에 손실은 사용하중과 운행하중 하에서 발생하였다. 이런 현상의 분석은 특별히 손실된 조 직부분에서 행해지는데 즉, 실제운행조건하에서 콘크리트의 균열이 문제가 될 수 있다. 반복되는 동적인 하중, 억제되는 변형 그리고 환경이 나쁜 조건하에서 동시에 작용할 때는 명쾌한 해결책을 주지 못하고 있다.

3.2 장기간 지속 또는 반복 인장하중 하에서 콘크리트의 특성(콘크리트의 피로특성)

콘크리트 구조물의 피로하중에 대한 인장강도는 압축강도와 같이 유사한 크기로 떨어 질 것으로 예상할 수 있으나 인장하중이 장기간 지속하중 또는 반복하중으로 계속 작용하면 몇 년 후에는 균열이 더 발전되거나 또 다른 균열이 형성 될 수 있기 때문에 콘크리트 구조물의 피로하중하에서 인장강도손실에 관한 체계적인 연구가 절실히 요구된다. 인장반복하중 특별히 낮은 frequency의 하중 예를 들면 현저한 온도차나 습기의 변화로 반복되는 하중작용들이 빈번히 일어나는 경우에 균열과 인장강도의 손실을 가져오므로 자기부상열차의 선로구조물에서 중요한 문제가 될 수 있다.

콘크리트 구조물의 표면에서(윗,밑,옆) 반복되는 비선형온도차이, 서로 다른 건조수축정도 및 creep 문제는 인장강도를 감소시킨다. 특별히 반복되는 동적인 하중과 동시에 하중과 무관한 억제된 변형, 온도차, 습기, 나쁜 대기환경으로 인한 변형들이 함께 발생할 때 콘크리트의 인장강도는 현저히 떨어지게 될 것이다.

3.3 장기간 지속하중과 반복하중 하에서 철근(또는 프리스트레스 강선)과 콘크리트의 부착 특성

정하중 하에서 철근과 콘크리트의 부착특성은 벌써 많은 연구결과를 통해 잘 알려진 상태이지만 장기간 지속하중과 반복하중 하에서 특히 작은 frequency를 갖고있는 하중 하에서 부착특성은 아직도 연구가 불충분하다. 앞으로 더욱 소성이론을 사용하기 위한 장기간 지속하중과 반복하중 하에서 부착특성은 철근의 이용할 수 있는 Ductility와 함께 중요한 요소 중의 하나이다. 또한 프리스트레스 구조물 단면에 강선과 함께 놓인 철근의 현저히 다른 부착작용은 아직까지 명쾌한 해답을 주지 못하고 있다.

4. 결론 및 추후연구과제

독일 자기부상열차 “Transrapid” 는 차세대를 위한 새로운 장거리교통시스템으로서 평지 위에도 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 건설할 수 있었다.

향후 보완할 문제점 :

- 실제적인 운행사용하중 조건들의 분석(동적인 하중, 습기변화, 온도차, 대기 환경상태)
- 지속-반복하중 하에서 콘크리트의 인장특성(피로인장특성)
- 지속-반복하중 하에서 철근(또는 프리스트레스 강 선)과 콘크리트의 부착특성
- 사용반복하중과 하중과 무관한 변형 하에서 균열향진과 강성의 변화

위와 같이 앞으로 보완할 문제점들은 아래에 제시한 문제들의 해결 할 수 있는 실제적인 실험과 정확한 수치해석을 통해 체계적인 연구가 이루어져야 하겠으며 자기부상열차의 실용화를 위하여 시험노선에 대한 다음과 같은 사항들의 연속적인 control이 요구된다

- 정적인 변형거동

- 온도변형과 시간에 따라 변하는 처짐
- 진동특성과 에너지 감쇠
- 프리스트레스트 구조물 부분의 설치정확성
- 마모된 노선의 위치 정확성
- 운행사용시간에 측정을 통해 하중상태의 검사

이러한 사항과 동시에 시험노선에서 위에 제시한 항목들의 연속적인 control이 수년간 이루어져 실무에 활용 할 수 있도록 실제적인 data base를 구축해야 하겠다.

참고문헌

- [1]. Eithuber 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 1/1987
- [6] Kang, B.S. : Stahlfaserbeton und stahlfaserverstärkter Stahlbeton unter Schwellbeanspruchung. Dissertataion, Ruhr-Universität Bochum, 1998.