

탄성 지반위에 놓인 궤도형 구조물의 유한요소해석

A Finite Element Analysis of Track-Type Structures Resting on Elastic Soil Medium

박 원 규¹⁾, Park, Won-Kyu,

김 성 득²⁾, Kim, Sung-Deuk

¹⁾ 울산대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Ulsan

²⁾ 정회원, 울산대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Ulsan

SYNOPSIS : A long beam of two parallel lines on elastic soil to make simplification Railway Track System is called Track-Type Structures, I analysis a third dimensional solid model by a established programs which need a huge computer capacity and so long time to calculate and when especially the effected load on Track-Type Structures affect a certain range. I will put to the numerical test that It is possible to adapt a simplicated 2-dimension Plane Strain Finite Element Model. To analysis of mutual relation between a Talbot's theory and 3-dimension finite element analysis to compare Kansas Test Track Result. To know effective solution of Track-Type Structures on elastic soil and I will clarify to effect Plane Strain Model on new analysis model of railway track system.

Key words : Elastic Soil, Track-Type Structures, Plane Strain, Talbot Theory, Kansas Test Track, Finite Element Analysis

1. 서 언

철도궤도는 달리는 열차가 운행하는 두 평행선의 기다란 레일(Rail)을 말하며, 레일은 그 아래 침목(Tie), 기층(Ballast), 보조기층(Subballast), 지반(Subgrade)과 같이 다양한 재료로 구성되어 있어서 철도궤도시스템(Railway Track System)이란 표현을 쓰고 있다.

철도궤도시스템을 역학적으로 해석하기 위해서는 레일-침목-기층-지반의 상호작용(Interaction)이론이 적용되기 전까지는 철도궤도를 탄성지반위의 보(Beam)로 보고 해석한 Talbot연구가 주로 사용되었으며 지반특성의 수치화 등의 어려움 때문에 복잡한 새로운 궤도해석을 적용해도 간단한 Talbot 이론이 아직 까지 많이 적용되고 있는 실정이다.

이제 철도궤도시스템을 단순화시킨 탄성 지반위에 놓인 평행선의 기다란 빔을 궤도형 구조물(Track-Type Structures)이라 부르고, 실제구조물을 많은 컴퓨터 용량과 상당한 계산시간을 소요하는 3차원의 입체모델로 기존 프로그램을 이용하여 해석해보고 특히 궤도형구조물에 작용하는 하중이 어떤 범위에 까지 미칠때 이를 보다 단순화시킨 2차원 Plane Strain 유한요소 모델로 적용시킬 수 있는가를 수치실험하였다. 그리고 Talbot 이론, 3차원 및 2차원의 유한요소 해석의 상관관계를 분석하고 또 기발표된 Kansas Test Track 결과와 비교하여 탄성지반위에 놓인 궤도형구조물의 효과적 해법을 알아보았고 나아가서 철도궤도시스템의 새로운 해석 모델에도 Plane Strain 모델이 유용하게 적용함을 밝혔다.

2. 궤도형 구조물과 기본 모델

2.1 3차원 유한요소 모델

철도궤도는 그림 1에서 보는 바와 같이 레일-침목-기층-보조기층-지반과 같이 다양한 재료로 구성되며 그 레일위를 LS하중 등이 작용하고 있는 것으로 보고, 그림 1과 같은 철도궤도시스템을 궤도와 지반만으로 3차원 유한요소 모델로 단순화시킨 그림 2와 같은 모델을 궤도형 구조물이라 부르기로 한다.

궤도형 구조물의 궤도길이는 12m, 궤도간 떨어진 거리는 1.52m, 지반의 폭은 3.04m, 깊이는 1.58m 범위이며 지반은 11개의 층으로 한정된 모델을 취하였다.

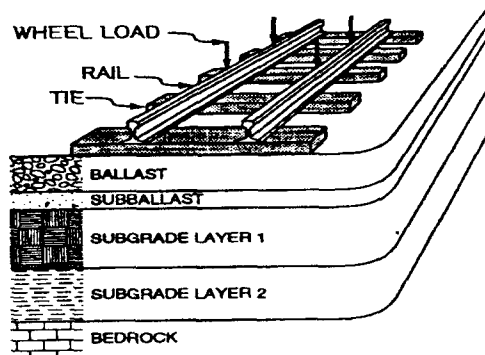


그림 1. 철도궤도시스템의 구성

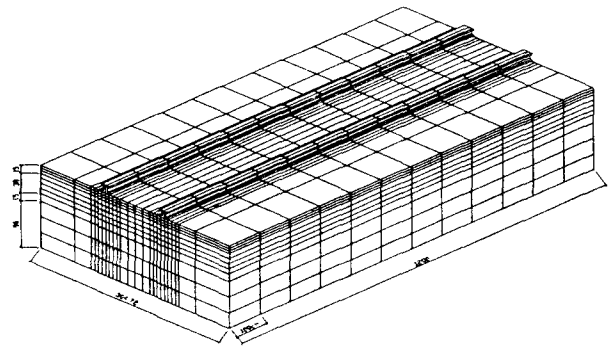


그림 2. 3차원 유한요소 모델

위 그림 2와 같은 3차원의 궤도형 구조물을 재료 및 기하학적 해석을 빠른 처리능력과 발전된 전·후 처리(pre·post processor) 그래픽 기능을 용이하게 수행할 수 있는 범용 유한요소 해석 프로그램인 SAP 90을 이용하여 해석하고자 한다. 궤도형 구조물의 궤도에 가해지는 하중에 의한 지반의 지층별 응력 및 그 거동을 살펴보기 위해서 4절점 SOLID요소로 된 3차원 유한요소 모델로 다루었으며 궤도주변의 요소를 가능한 한 조밀하게 처리하여 전체 절점수 3822개, 전체 요소수 3809개로 구성하였다. 탄성계수와 포아송 비를 달리했을 때의 궤도형 구조물의 지반의 요소절점별 변위와 응력을 알도록 유한요소 해석을 실시하였으며 전체구조의 측면은 횡방향 변위만 구속하였다.

2.2 Plane Strain 유한요소 모델

3차원의 궤도형 구조물에 작용하는 하중이 어느 일정구간 이상의 범위에 걸쳐서 작용했을 때 그 구간에 대해서는 길이 방향에 대해 모든 횡단면의 형상, 재질 및 작용하중이 항상 같으므로 2차원의 Plane Strain 모델로 단순화 시킬 수 있다. 따라서 3차원 해석의 컴퓨터 용량 과다로 인한 비효율성과 계산시간의 비경제성을 대체할 수 있는 궤도형 구조물의 횡단면에 대한 2차원의 그림 3과 같은 Plane Strain 모델로 해석할 수 있을 것이다.

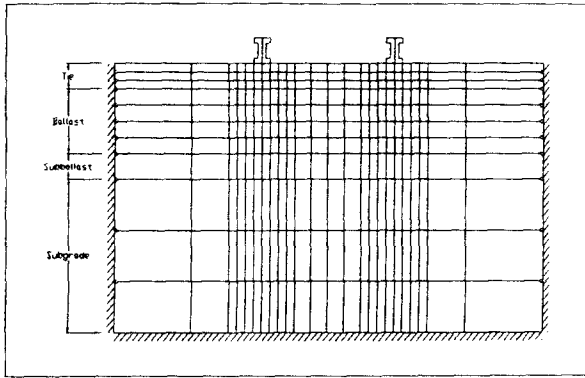


그림 3. Plane Strain 유한요소 모델

Plane Strain 유한요소 모델은 4절점 ASOLID 요소로 모델링 되었고, 총 294개의 절점과 257개의 요소로 구성되어 있어서 3차원 모델에 비해 요소 수 및 절점수가 약 1/13 ~ 1/15로 절감되었다. 이때 궤도 아래 지반의 요소는 특히 촘촘하게 처리하여 궤도하중에 의한 지반의 변형 및 응력을 정확하게 표현할 수 있도록 하였다.

2.3 Talbot 이론

미국의 A.N. Talbot 연구팀은(1918 ~ 1929)은 궤도를 구성하는 모든 요소는 탄성체이며, 궤도는 연속적인 집중하중이 작용하는 탄성체상의 보라는 연구결과를 미국철도기술협회(AREA) 등에 발표하였으며, 이 연구는 간단하면서도 비교적 정확하여 오랫동안 궤도 해석에 쓰여져 왔으며 본 궤도형 구조물의 해석방법과 비교될 수 있을 것이다.

2.4 Kansas Test Track

3차원 유한요소해석과 Plane Strain 해석 및 Talbot 이론에 의해 구한 레일의 거동과 휨모멘트를 현장시험의 결과를 비교하기 위해서 Kansas Test Track에서의 실측결과를 인용하기로 하였다.

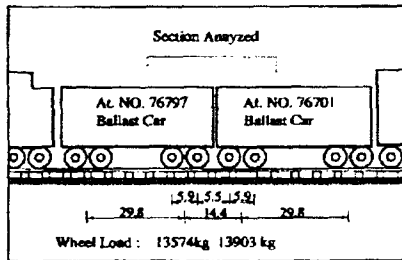


그림 4. Kansas Test Track

Kansas Test Track은 Kansas주의 Aikman과 Chelsea사이에 위치하고 있으며, Santa Fe Railway Company(ATSF) Line과 연결되어 있으며, 이곳에는 9개의 각각 다른 다른 목적의 시험장비가 설치된 Test Track이 있다. 이 중에서 Section 9(보선구간)가 일반적인 철도에 기본적으로 사용하기 위한 Control Section으로 설계되었다.

3. 유한요소 해석

3.1 하중분포 범위에 따른 해석

궤도형 구조물은 궤도에 작용하는 하중을 제외했을 때 지반의 지층이 길이 방향에 따른 같은 재료로 되었을 때는 모든 횡단면에 대해서 같은 재질과 형상을 가지며 특히 궤도에 작용하는 하중까지 전구간에 같이 작용하면 3차원 해석을 할 필요없이 2차원의 Plane Strain 해석으로 대체될 수 있다. 그런데 궤도 하중이 전구간이 아닌 일정 범위에 균등하게 분포될 때에도 사실상 3차원 해석을 하지않고 2차원 해석을 할 수 있는가를 수치실험을 통하여 조사해 보았다.

궤도형 구조물에 집중하중, 궤도방향 1m 길이, 3m 길이, 6m 길이, 9m 길이, 12m 길이(전체 길이)에 등분포하중이 작용했을 때의 지반 깊이에 따른 최대처짐이 생기는 점의 지반의 수직변위값을 계산하였다.

3.2 3차원 유한요소 해석

범용 유한요소 구조해석 프로그램인 SAP 90을 이용하여 궤도형 구조물에 작용하는 수직 집중하중에 대한 침목들의 수직변위와 도상과 보조도상 및 노반에서의 수직응력과 각각의 수직변위를 알아보았다.

3.3 Plane Strain 유한요소 해석

앞의 3.1절에서 보았듯이 3차원 유한요소 모델에 9m의 등분포 하중에 재하하였을 때의 최대 처짐이 0.07216cm로 Plane Strain 유한요소 모델에 단위길이당의 하중을 주었을 때의 최대 처짐 0.0654cm와 약 0.0067cm의 차이로 근접하게 접근하고 있다. 일반적인 Plane Strain 해석을 실시할 경우 단지 2방향에 대한 하중분포와 깊이에 따른 응력감소가 실제 3차원 보다 적게 나타나므로 충분히 무시할 수 있다.

따라서 궤도형구조물에 횡단면의 약 3배 범위의 궤도에 하중이 걸릴 때 시간과 컴퓨터 용량의 과다로 인한 비효율성을 가지는 3차원 해석을 대신해 Plane Strain 해석을 적용할 수 있을 것이며 하중의 변화, 지반 탄성계수 변화, 지층별 탄성계수의 차등화 등에 따른 궤도형 구조물 아래 지반의 거동을 알기위해 수치실험을 실시하였다.

4. 비교 검토 및 고찰

4.1 탄성지지된 보 해석과 비교

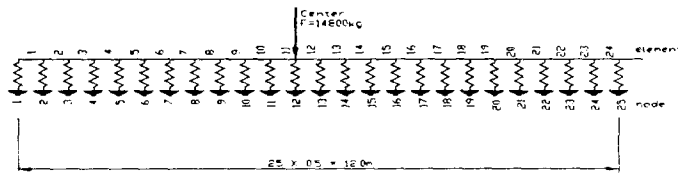


그림 5. 탄성지지보 해석예

그림 5에서 보는 바와 같은 연속탄성지지된(궤도지반계수 320 kg/cm/cm) 12m 길이 궤도의(궤도탄성계수 2,020,000 kg/cm², 단면 2차모멘트 1790cm⁴, 침목간격 56cm)의 중앙에 14,800kg의 집중하중이 작용했을 때의 하중 작용점에서 떨어진 거리에 따른 궤도 아래의 변위와 휨모멘트를 계산한 결과와 3차원 유한요소 모델해석 결과를 그림 6과 그림 7에 보이고 있다.

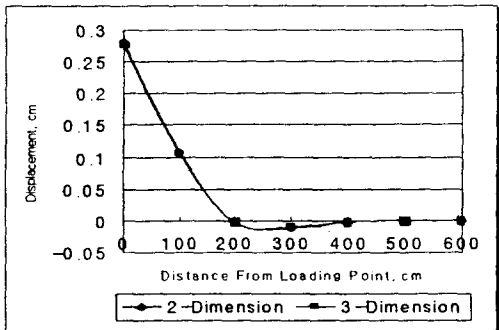


그림 6. 연속 탄성지지보의 변위

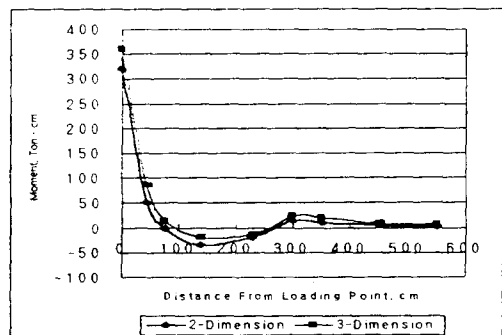


그림 7. 연속 탄성지지보의 휨모멘트

그림에서 보는 바와 같이 율하중이 재하된 중앙부분에서 연속탄성지지 모델에서 0.281075cm, 3차원

유한요소 모델에서 0.274841cm로 각각 최대 변위를 나타내었고, 중앙에서 멀어질수록 변위가 점점 줄어들어서 2m 가까이서 거의 변위가 0이었고 짧은 구간 미량의 부(-)변위가 발생했다. 특히 연속탄성지지 모델과 3차원 유한요소 모델의 최대변위차는 0.006244cm로 충분히 무시할 수 있음을 알 수 있다. 이는 Talbot가 제시한 식 (2)를 이용해서 구한 처짐값 0.282035cm와 비교해서 거의 일치함을 알았다.

휨모멘트 또한 작용하중점에서 연속탄성지지 모델보다는 3차원 모델해석이 약 15% 컸으나 Talbot가 제시한 식 (3)가 비교할 때 전체적으로 큰 차이가 나지 않았다.

그림에서 알 수 있듯이 종방향의 지반스프링요소를 추가한 보요소가 3차원 유한요소 모델과 유사한 결과를 나타내므로 충분히 지반위 궤도의 해석등에 많은 소요시간이 필요한 3차원 유한요소 모델보다 이러한 보요소와 조합한 모델을 적용할 가치가 있다고 판단된다.

4.2 Plane Strain 해석과 비교

서로다른 탄성계수와 포아송 비를 가진 궤도형 구조물에 14800kg의 수직 집중하중이 작용했을 때 3차원 유한요소 모델과 Plane Strain 해석에 대한 지반의 최대변위를 그림 8과 그림 9에서 보이고 있다.

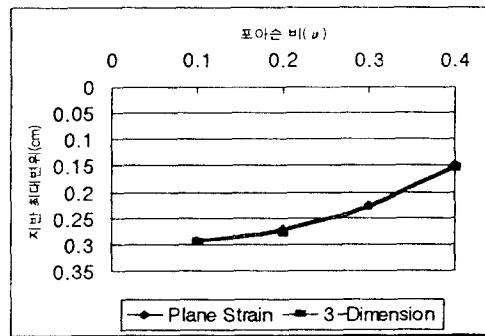
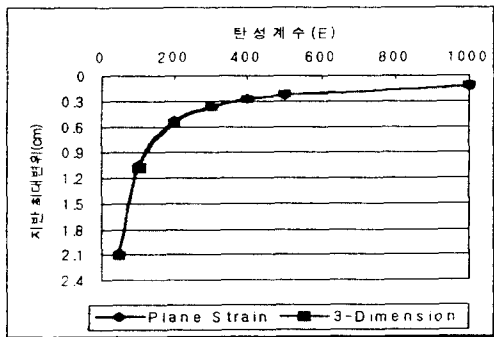


그림 8. 탄성계수 변화에 따른 지반의 최대 변위 그림 9. 포아송 비 변화에 따른 지반의 최대 변위

그림에서 탄성계수와 포아송 비의 변화에 따른 3차원 유한요소 모델과 Plane Strain 횡단해석 모델 지반 최대처짐량이 각각 2.110236cm 와 2.087033cm로 비교적 적은 값의 차이로 일치하므로 모델의 요소 수 및 절점수가 약 13 ~ 15배인 3차원 유한요소모델 해석으로 인한 많은 컴퓨터 용량과 상당한 시간을 차지하는 비효율성을 2차원인 Plane Strain 해석으로 대체할 수 있음을 알 수 있다.

4.3 현장 실측치 등과의 종합 비교

지반상의 궤도 또는 궤도형 구조물을 Kansas Test의 실측치, 3차원 유한요소 해석 그리고 Plane Strain 횡단해석에 의한 집중하중 작용점 거리별 처짐 결과가 그림 10에 나타나있다.

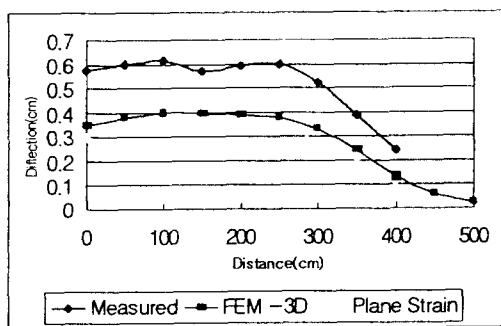


그림 10. 각 해석방법에 따른 비교

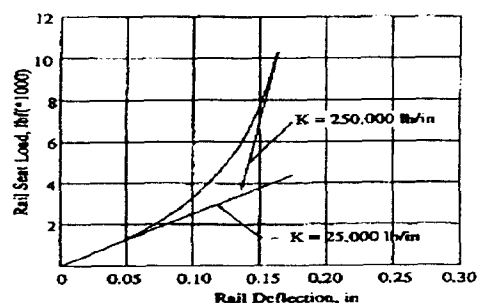


그림 11. 윤하중에 따른 레일의 처짐

그림에서 볼 수 있듯이 3차원 유한요소 해석결과와 Plane Strain 횡단해석 결과는 각각 최대변위 0.40cm, 0.36cm의 차이로 근소한 차이를 보이고 있으나 Kansas Test Track의 실측치와는 상당한 큰 차이를 보이고 있다. 그 원인은 기층과 침목의 불안정적인 안착과 Rail Base와 Tie Plate간의 유격에 기인되는 것으로 판단되는데, 그림 11에서와 같이 1970년 Batelle Memorial Institute에서 행해진 연구결과에서도 알 수 있듯이 하중의 증가에 따른 레일의 변위를 두개의 구간으로 구분해 볼 때, 초기의 하중에서는 Rail과 Tie Plate의 간격을 닫고 도상과 침목의 안정된 안착까지 진행되는 구간으로 판단되어 졌으며, 그 후 지속적으로 작용되는 하중으로는 침목과 도상재료의 압축변형의 단계로 판단되어 이 두개의 거동양상은 서로 독립적인 변위의 증가율을 보이고 있다.

따라서 본 연구에서 사용된 해석모델들은 모두가 후기하중에 의한 재료의 압축거동만 계산하게 되므로 실측결과와는 상당한 차이를 보이는 것으로 판단되어진다. 또 지반을 탄소성으로 한 해석결과와의 비교도 있어야 하겠지만 역시 많은 계산시간이 소요될 것인바 지반을 탄성으로 본 처짐값의 약 1.7 ~ 2 배값 현장실측치가 근사함을 원용할 수 있을 것이다. 그럼에도 불구하고 Kansas Test Track의 노반표면 실측 변위가 0.207cm로 순수한 지반의 침하치가 상대적으로 작은 부분을 차지하고 있음을 볼 때 해석모델들의 후기하중에 의한 재료의 변형해석에서의 효용성은 인정된다 하겠다.

5. 결론

1) 철도궤도시스템을 단순화시킨 탄성 지반위에 놓인 궤도형 구조물을 Talbot 이론 및 연속탄성지저 모델, 2차원 Plane Strain 모델, 3차원 유한요소 입체모델 그리고 기발표된 현장실측치와 비교하여 탄성 지반위에 놓인 궤도형 구조물의 효과적인 해법과 그 연관성을 알아보았다.

2) Talbot식을 이용한 궤도의 변위 및 휨모멘트 계산치와 2차원 및 3차원 유한요소 해석으로 인한 계산치와 거의 일치함을 알 수 있고 이로인해 오랫동안 궤도해석과 설계에 사용된 Talbot 궤도해석 방법의 효용성을 다시 확인할 수 있었다.

3) 3차원 유한요소 모델과 Plane Strain 해석 모델에 탄성계수와 포아송 비를 각기 달리 주었을 때의 지반 최대처짐량이 이러한 지반의 물성변화에 상관없이 거의 일치하므로 3차원 유한요소 모델 해석으로 인한 많은 컴퓨터 용량과 상당한 시간을 요하는 비효율성을 2차원인 Plane Strain 해석으로 대체할 수 있음을 알 수 있었다.

4) Plane Strain 모델 및 3차원 유한요소 모델과 Kansas Test Track 실측결과와의 비교에서 수직운 하중에 의한 변형의 큰차이는 압축력에 의한 궤도구성재료의 변형보다는 궤도형 구조물과 그 구성재료의 부적절한 체결이나 도상과 침목의 불완전한 안착으로 기인되는 것으로 판단되며 그 상관관계를 원용할 수도 있을 것이다.

5) 새로운 모델의 개발에 앞서 우선적으로 해결해야 할 과제로 궤도밑의 탄성특성을 나타내는 각종 지반스프링계수의 값을 어떻게 정하는나가 궤도해석에 있어 중요한 과제임을 확인했다. 또한 궤도 밑에 놓인 지반의 탄성적이라기 보다는 탄소성으로 해석함을 옳겠으나 그에 대한 연구는 차후로 미루기로 하겠다.

참고문헌

1. 이 종득(1989), 철도공학, 노해출판사, pp 81 ~ 146.
2. 김성득(1991), "철도궤도시스템의 신해석 모델연구, 대한교통학회지 제9권 2호.
3. 황진형(1995), 철도궤도시스템 해석방법의 비교연구, 대한토목학회 가을 학술발표 논문집.
4. Raymond, G. P. & Lake, R. W. & Boon, C. J.(1976), "Stresses and Deformation in Railway Track", CIGGT NO. 76-11, Queen's University.
5. Heytenyi, M.(1946), Beams on elastic foundation, University of Michigan Press.