

## 탄성 지반위에 놓인 궤도형 구조물의 유한요소해석\*

김성득 · 박원규  
토목환경공학부

### <요 약>

철도궤도시스템을 단순화시킨 평행선의 길다란 빔을 궤도형 구조물(Track-type structures)이라 정의하고, 본 논문에서는 궤도형 구조물 아래의 지반 거동을 3차원의 입체 모델, 2차원의 plane strain 유한요소 모델로 수치실험을 하고 기발표된 Talbot 이론과 Kansas Test Track 현장실험과 비교 분석하였다. 수치해석 및 실험분석 결과 궤도형 구조물 해석에서 plane strain 모델이 유용하며 나아가서 철도궤도 해석에도 적용됨을 확인하였다.

---

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

Sung-Duk Kim · Won-Kyu Park  
Department of Civil & Environmental Engineering

### <Abstract>

Track-type structures are defined long beams of two parallel lines on elastic soil medium. In this study, the soil behavior under Track-type structures was analysed by 3-dimensional solid model and 2-dimensional plane strain finite model. The analysis was compared with the results of Talbot's theory and Kansas Test Track.

Results of numerical analysis and model tests showed that the plane strain model

---

\* 이 논문은 1997학년도 울산대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

was effective in solving Track-type structures. It was also confirmed that the plane strain model was applicable to the analysis of Railway track system.

## 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.<sup>1)</sup>

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 아직까지 많이 적용되고 있는 실정이다.<sup>2)</sup>

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 수치실험한다. 그리고 Talbot 이론, 3차원 및 2차원의 유한요소 해석의 상관관계를 분석하고 또 기 발표된 Kansas Test Track 결과와 비교하여 탄성지반위에 놓인 궤도형구조물의 효과적 해법을 알아보았고 나아가서 본 논문에서 보이는 철도궤도시스템의 새로운 해석 모델에도 Plane Strain 모델이 유용하게 적용될 수 있음을 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 철도교의 국제적인 표준열차하중인 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, 길이는 1.58m 범위이며 지반은 11개의 층으로 한정된 모델을 취하였다.

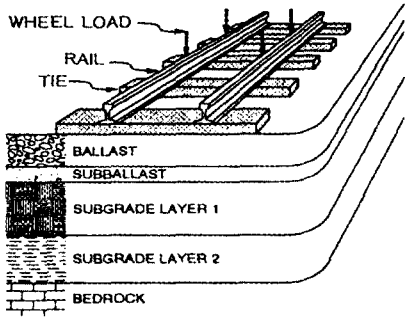


그림 1. 철도궤도시스템의 구성

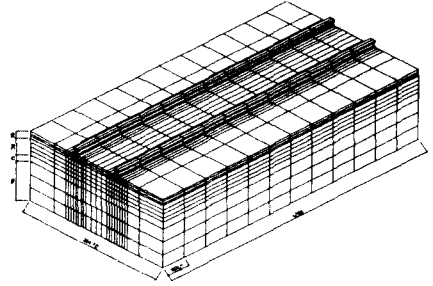


그림 2. 3차원 유한요소 모델

위 그림 2와 같은 3차원의 궤도형 구조물을 빠른 처리능력과 발전된 전·후처리(pre·post processor) 그래픽 기능을 용이하게 수행할 수 있는 범용 유한요소 해석 프로그램인 SAP 90을 이용하여 해석하고자 한다.<sup>3)</sup> 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 포아슨 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.<sup>4)</sup> 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.

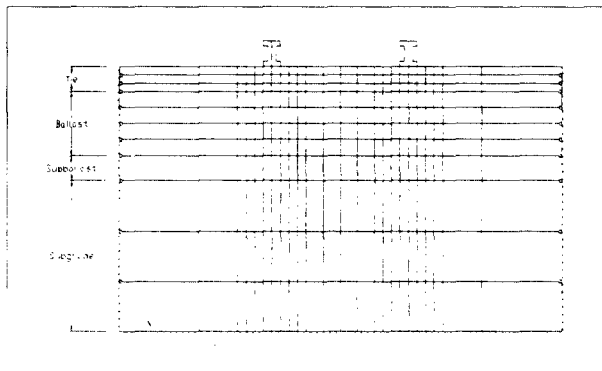


그림 3. Plane Strain 유한요소 모델

Plane Strain 유한요소 모델은 SAP 90의 4절점 ASOLID 요소로 모델링 되었고, 총 294개의 절점과 257개의 요소로 구성되어 있어서 3차원 모델에 비해 요소수 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) 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.

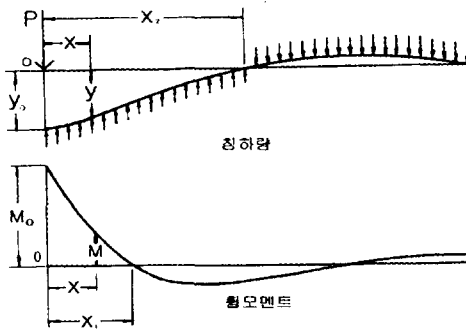


그림 4. 집중하중 작용시의 레일의 휨모멘트와 침하

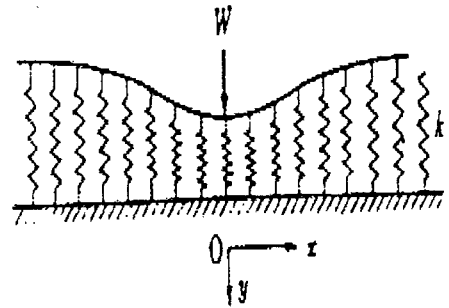


그림 5. 연속탄성지지 모델

그림 4와 같이 탄성기초상의 탄성계수 E와 단면 2차모멘트 I가 일정한 보, 즉 Rail에 집중하중 P가 작용하면 처짐 y가 생기고 하중에 비례하여 기초로부터 반력 q가 생기면 반력은 처짐 y에 비례하므로 식(1)이 같은 탄성곡선식으로 유도될 수 있는데, 이 식에 경계조건을 대입하여 미분방정식을 풀면 처짐 y, 모멘트 M 및 전단력 V는 식 (2) ~ 식 (4)와 같음을 알 수 있다.

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = q = -Ky \quad (1)$$

$$y = \frac{P\lambda}{2K} e^{-\lambda x} (\cos \lambda x + \sin \lambda x) \quad (2)$$

$$M = EI \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{P}{4\lambda} e^{-\lambda x} (\cos \lambda x + \sin \lambda x) \quad (3)$$

$$V = \frac{dM}{dx} = -\frac{P}{2} e^{-\lambda x} \cos \lambda x \quad \text{여기서, } \lambda = \sqrt[4]{\frac{K}{4EI}} \quad (4)$$

여기서 K는 레일 밑에 완전탄성체가 받치고 있다고 가정하여 침하량 y가 그 점의 압력

P 에 비례하며 단위길이의 궤도를 단위량만큼 침하시키는 데 필요한 힘, 즉, 궤도계수 (Track Foundation Modulus)라 한다. 한편 Talbot 이론보다 한단계 더 나아가서 탄성 지반위의 보를 그림 5에서 보는 바와 같이 보를 여러개의 요소로 분할하고 그 분할점마다 탄성 지반을 스프링으로 지지된 연속탄성지지 모델로 보고 SAP 90의 ASOLID 요소로 해석할 수 있을 것이다.

## 2.4 Kansas Test Track

3차원 유한요소해석과 Plane Strain 해석 및 Talbot 이론에 의해 구한 레일의 거동과 휨 모멘트를 현장실험의 결과와 비교하기 위해서 Kansas Test Track에서의 실측결과를 인용하기로 하였다.<sup>5)</sup>

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

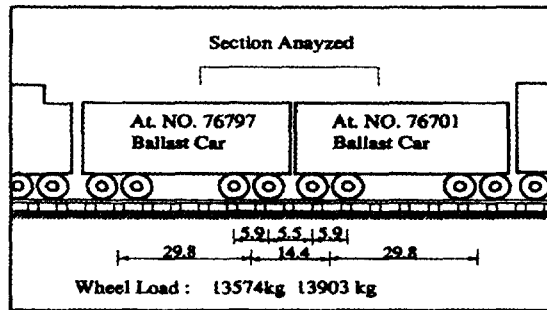


그림 6. 실험용 차량 (Kansas Test Track)

현장실험동안 사용된 작업열차에 대한 항목은 그림 6에 주어져 있으며 작업열차는 한 대의 기관차와 2개의 화물차, 그리고 한 대의 전용차로 연결되어 있으며 화물차의 운하중은 13,600kg이며, 이때 작업열차의 속도는 48km/h 이다. 여기서 Kansas Test Track의 실험용 차량에 대한 도상의 탄성계수와 궤도계수와의 관계, 도상두께와 궤도계수와의 관계, 지반 깊이별 주응력을 구하였다.

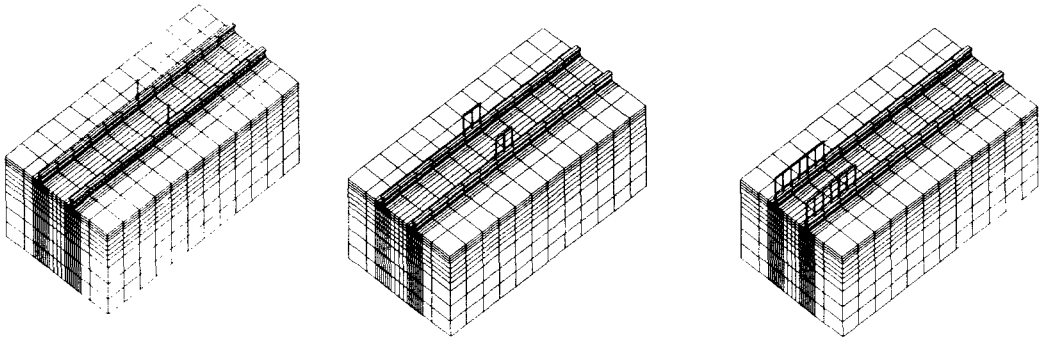
## 3. 3차원 유한요소 해석

### 3.1 하중분포 범위에 따른 해석

궤도형 구조물은 궤도에 작용하는 하중을 제외했을때 지반의 지층이 길이 방향에 따른 같은 재료로 되었을때는 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 궤도하중이 전구간이 아닌 일정 범위에 균등하게 분포될 때에도 사실상 3차원 해석을 하지않고 2차원 해석을 할 수 있는가를 수치실험을 통하여 조사해 보았다.

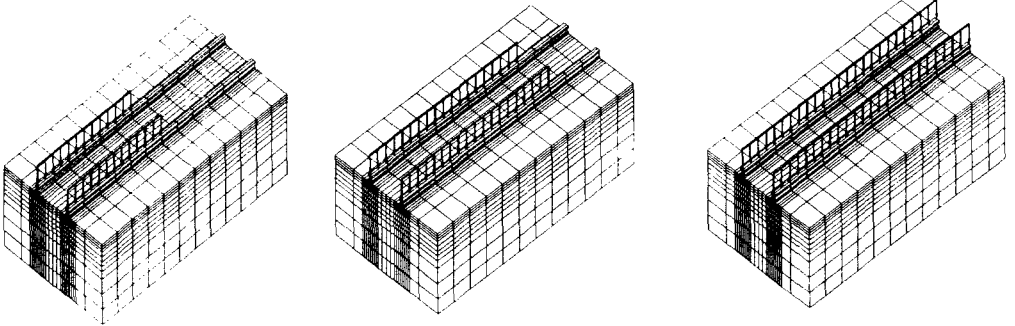
궤도형 구조물에 그림 7에서 보는 바와 같이 집중하중(그림 7-a), 궤도방향 1m 길이(그림 7-b), 3m 길이(그림 7-c), 6m 길이(그림 7-d), 9m 길이(그림 7-e), 12m 길이(전체 길이 ; 그림 7-f)에 등분포하중이 작용했을 때의 지반 깊이에 따른 최대처짐이 생기는 점의 지반의 수직변위값을 계산하여 그림 8에 나타내었다.



(a) 수직 집중 하중

(b) 등분포하중(1m 길이)

(c) 등분포하중(1m 길이)



(d) 등분포하중(6m 길이)

(e) 등분포하중(9m 길이)

(f) 등분포하중(12m 길이)

그림 7. 궤도형 구조물에 작용하는 하중의 종류

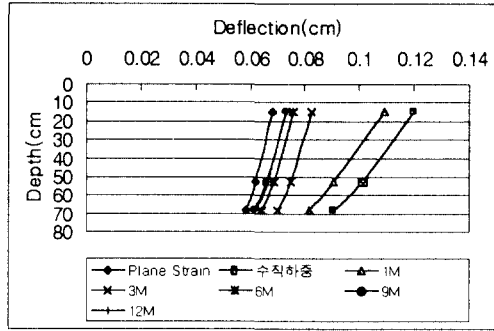


그림 8. 깊이에 따른 지반 각각의 처짐

폭 3m, 길이 12m의 궤도형 구조물에서 지반의 최대 수직변위값이 폭의 약 2배되는 길이방향 6m이상의 등분포하중이 작용했을 때 전구간에 등분포하중이 작용했을 때의 변위값에 근접하였으며, 폭의 약 3배되는 길이방향 9m이상의 등분포하중이 작용했을 때 그 변위값이 일치함을 알 수 있으며 그러한 하중 조건하에서는 3차원 입체해석 대신에 2차원 평면해석으로 궤도형 구조물의 지반의 변위 및 응력을 구할수 있을 것이다.

### 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.

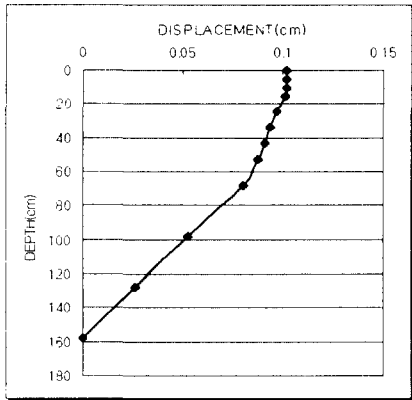


그림 9. 깊이에 따른 수직 변위

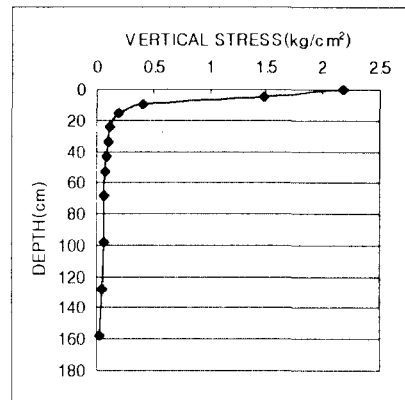


그림 10. 깊이에 따른 수직 응력

궤도형 구조물을 3차원 유한요소 모델로 해석하여 궤도중앙부에 14800kg의 수직 집중하중이 주어졌을 때의 지반깊이에 따른 수직변위 및 수직응력을 그림 9 및 그림 10에 나타내었다. 이때 지반의 조건은 도상, 보조도상, 노반의 탄성계수가 각각 1500kg/cm<sup>2</sup>, 538kg/cm<sup>2</sup>, 317kg/cm<sup>2</sup>이고 포아송 비는 각각 0.3, 0.4, 0.4인 토질상태이다.

지반의 수직 변위는 깊이가 증가함에 따라 감소하여, 지반 깊이 98cm 되는 지점에서 총 지반표면 변위의 50%가 일어나고 지반의 수직응력은 깊이 15 ~ 20cm 범위에서 거의 93%이상 일어남을 볼 수 있다. 하중이 재하된 궤도의 횡방향에 대한 궤도 바로 밑의 지반과 노반층에서 수직응력의 수평변동은 그림 11과 같으며 이는 Talbot의 실험에 의한 침묵에 전달된 도상압력 분포양상과 일치하였다.

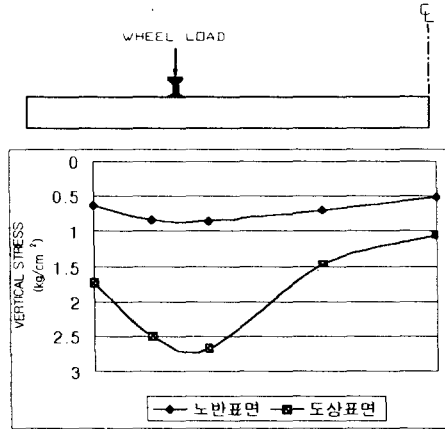


그림 11 수직응력의 수평 변동

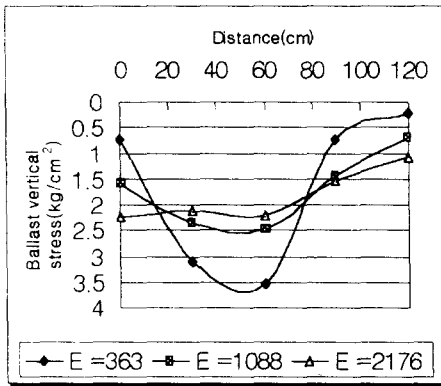


그림 12. 탄성계수의 변화에 따른 도상의 수직응력

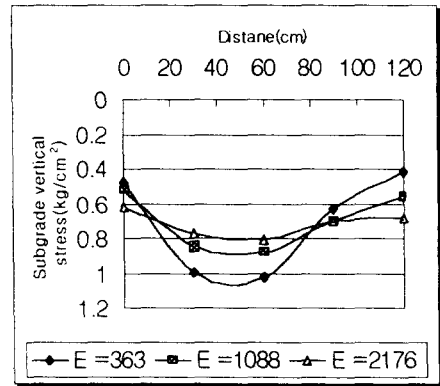


그림 13. 탄성계수의 변화에 따른 노반 수직응력

탄성계수의 변화에 따른 도상과 노반의 전 궤도길이에 대한 수직응력의 분포를 그림 12와 그림 13에서 보여주고 있다. 일반적으로 탄성계수의 값이 클 때 즉, 지반의 강성이 클수록 수직응력값이 작고 균등하게 나타나고 있으며 또한 하중 중심에서 멀어질수록 수직응력이 감소함을 알 수 있다.

이와같이 3차원 해석을 보다 간단한 해석법인 2차원 해석, Talbot 이론, Kansas Test Track 결과와 비교하기 위해서 비교되는 해법에 맞는 수치실험 모델을 직접 적용시킬수 있을 것이다.



### 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 궤도형 구조물에 횡단면의 약 3배 범위의 궤도에 하중이 걸릴 때 소요되는 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 알기 위해 수치실험을 실시하였다.

표 1은 수치해석에 사용된 궤도형 구조물의 지반특성별 깊이, 포아송 비, 탄성계수 등을 나타내었으며 편이상 지반 깊이에 따라 도상, 보조도상, 노반과 같이 철도궤도의 하부시스템 명칭을 사용하였다.

표 1 궤도형 구조물에 사용된 다양한 계수들

Soil Layer	Subdivided Layer Depth (cm)	Poisson's ratio, $\nu$	Wheel Load (kg)	Soil Modulus, $E_r$ (kg/cm <sup>2</sup> )
Ballast	38	0.3	2250	1822
			4500	2000
			9000	2340
			14500	2800
Subballast	15	0.4	2250	538
			4500	672
			9000	932
			14500	1255
Subgrade	90	0.4	2250	317
			4500	429
			9000	693
			14500	1080

그림 14는 하중의 변화에 따른 도상, 보조도상, 노반 각각의 탄성계수 1822 kg/cm<sup>2</sup>, 672kg/cm<sup>2</sup>, 419 kg/cm<sup>2</sup>와 포아송 비 0.3, 04, 0.4에 대한 처짐을 나타내고 있는데 지반의 최대처짐은 도상표면에서 0.28cm가 발생하였다.

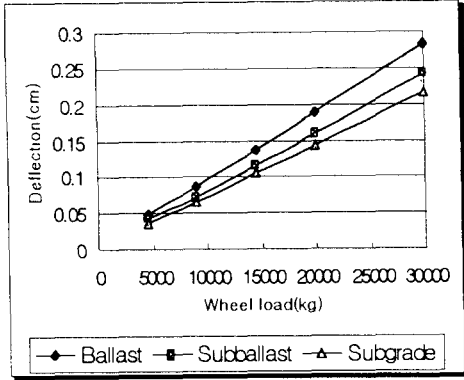


그림 14. 하중 증가에 따른 도상, 보조도상, 노반의 처짐

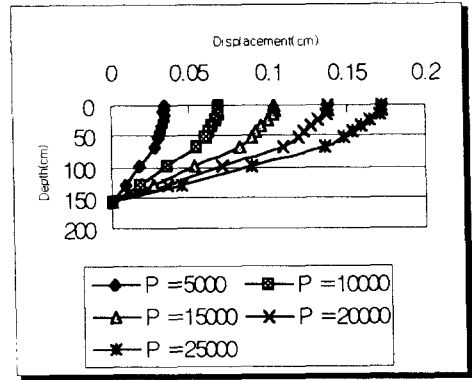


그림 15. 하중 변화에 따른 지반의 변위

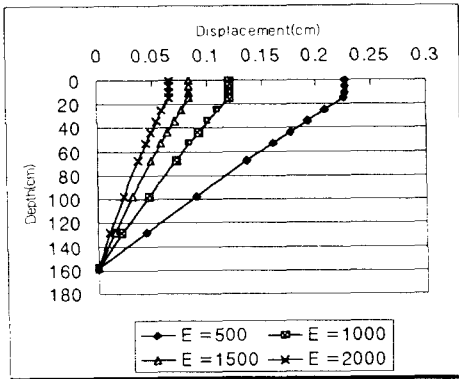


그림 16. 탄성계수 변화에 따른 지반의 변위

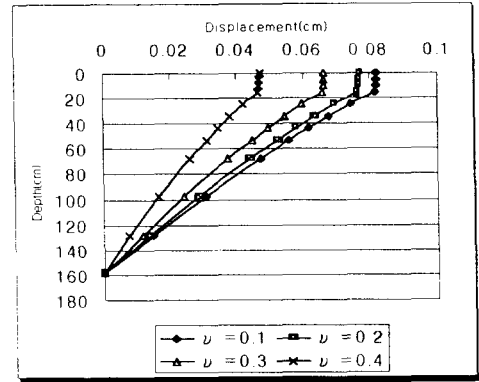


그림 17. 포아송 비 변화에 따른 지반의 변위

그림 15는 탄성계수 1500 kg/cm<sup>2</sup>, 포아송 비 0.3인 궤도형 구조물에 하중의 변화에 따른 지반의 깊이별 최대변위를 나타내고 있으며, 그림 16 및 그림 17은 지반의 탄성계수와 포아송 비를 달리했을 때의 14800kg의 하중에 대한 지반의 깊이별 최대변위를 표시하고 있다.

## 4. 비교 검토 및 고찰

### 4.1 탄성지지된 보 해석과 비교

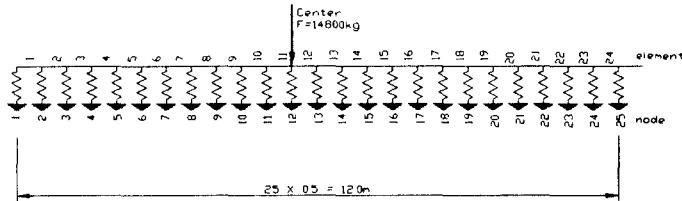


그림 18. 탄성지지보 해석예

그림 18에서 보는 바와 같은 연속탄성지지된(궤도지반계수  $320 \text{ kg/cm/cm}$ ) 12m 길이 궤도의(궤도탄성계수  $2,020,000 \text{ kg/cm}^2$ , 단면 2차모멘트  $1790 \text{ cm}^4$ , 침목간격  $56 \text{ cm}$ )의 중앙에  $14,800 \text{ kg}$ 의 집중하중이 작용했을 때의 하중 작용점에서 떨어진 거리에 따른 궤도 아래의 변위와 휨모멘트를 계산한 결과와 3차원 유한요소 모델해석 결과를 그림 19와 그림 20에 보이고 있다.

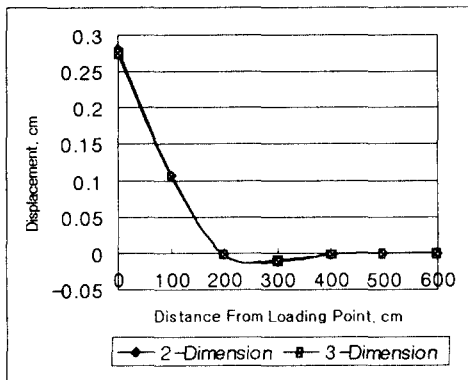


그림 19. 연속 탄성지지보의 변위

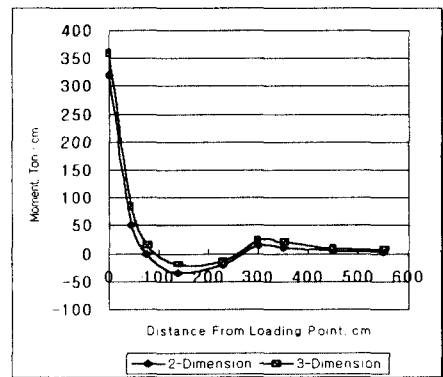


그림 20. 연속 탄성지지보의 휨모멘트

그림에서 보는 바와 같이 운하중이 재하된 중앙부분에서 연속탄성지지 모델에서  $0.281075 \text{ cm}$ , 3차원 유한요소 모델에서  $0.274841 \text{ cm}$ 로 각각 최대 변위를 나타내었고, 중앙에서 멀어질수록 변위가 점점 줄어 들어서  $2 \text{ m}$  가까이서 거의 변위가 0이었고 짧은 구간 미량의 부(-)변위가 발생했다. 특히 연속탄성지지모델과 3차원 유한요소 모델의 최대변위차는  $0.006244 \text{ cm}$ 로 충분히 무시할 수 있음을 알 수 있다. 이는 Talbot가 제시한 식 (2)를 이용해서 구한 처짐값  $0.282035 \text{ cm}$ 와 비교해서 거의 일치함을 알았다.

휨모멘트 또한 작용하중점에서 연속탄성지지 모델보다는 3차원 모델해석이 약 15% 컷으나 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 지반위를 달리는 궤도의 해석등에 많은 소요시간이 필요한 3차원 유한요소 모델보다 이러한 보요소와 조합한 모델을 적용할 가치가 있다고 판단된다.

### 4.2 Plane Strain 해석과 비교

표 1에서 나타낸 탄성계수와 포아송 비를 가진 궤도형 구조물에 14800kg의 수직 집중하중이 작용했을 때 3차원 유한요소 모델과 Plane Strain 해석에 대한 지반의 최대변위를 그림 21과 그림 22에서 보이고 있다.

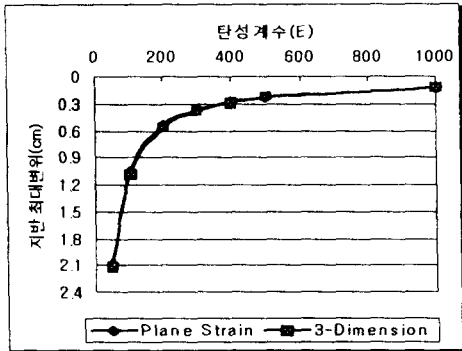


그림 21. 탄성계수 변화에 따른 지반의 최대 변위

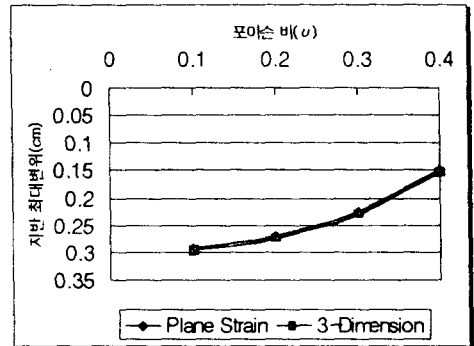


그림 22. 포아송 비 변화에 따른 지반의 최대 변위

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 요소수 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 처짐결과가 그림 23에 나타나 있다.

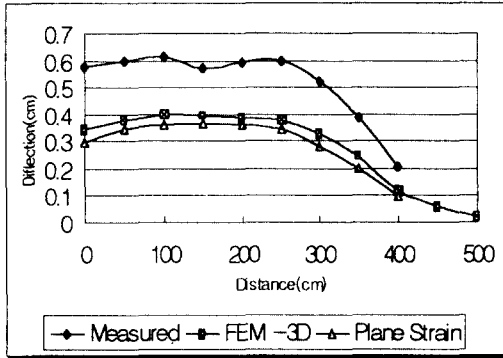


그림 23. 각 해석방법에 따른 비교

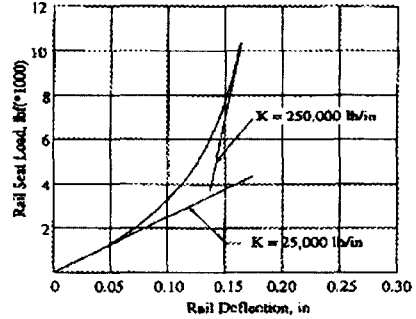


그림 24. 운하중에 따른 레일의 처짐

그림 23에서 볼 수 있듯이 3차원 유한요소 해석결과 와 Plane Strain 횡단해석 결과는 각각 최대변위 0.40cm, 0.36cm의 처짐으로 근소한 차이를 보이고 있으나 Kansas Test Track의 실측치와는 상당한 큰 차이를 보이고 있는데 그 원인은 기층과 침목의 불안정적인 안착과 Rail Base와 Tie Plate간의 유격에 기인되는 것으로 판단된다.

그림 24에서 볼 수 있는 1970년 Batelle Memorial Institute에서 현장실험으로 행해진 운하중에 따른 레일의 처짐 연구결과에서도 알 수 있듯이 하중의 증가에 따른 레일의 변위를 두개의 하중 구간으로 구분해 볼 수 있었다.

초기의 하중에서는 후기의 하중보다 변위의 비가 더 큰 양상을 보이는 데 이는 초기하중이 Rail과 Tie Plate의 간격을 좁히고 도상과 침목을 확고하게 결합시키기 때문이다. 그 후 지속적으로 작용되는 후기하중에 의해 침목과 도상재료의 압축변형이 초기에 비해 적게 발생한다.

이와같이 두개의 거동양상은 서로 독립적인 변위의 증가율을 보이고 있으며, 본 연구에서 사용된 해석모델들은 모두가 후기하중에 의한 재료의 압축거동만 계산하게 되므로 실측결과와는 상당한 차이를 보이는 것으로 판단되어진다. 그럼에도 불구하고 Kansas Test Track의 노반표면 실측 변위가 0.207 cm로 순수한 지반의 침하치가 상대적으로 작은 부분을 차지하고 있음을 볼 때 해석모델들의 후기하중에 의한 재료의 변형해석에서의 효용성은 인정된다 하겠다.

한편 지반을 탄소성으로 한 해석결과의 비교도 있어야 하겠지만 역시 많은 계산시간이 소요될 것인바 지반을 탄성으로 본 처짐값의 약 1.7 ~ 2배값인 현장실측치가 근사함을 그림 23에 근거하여 원용할 수 있을 것이다.

## 5. 결 론

1) 철도궤도시스템을 단순화시킨 탄성 지반위에 놓인 궤도형 구조물을 Talbot 이론 및 연속탄성지지 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 계산시간을 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 수직윤하중에 의한 변형의 큰 차이는 압축력에 의한 궤도구성 재료의 변형보다는 궤도형 구조물과 그 구성재료의 부적절한 체결이나 도상과 침목의 불안정한 결합 때문인 것으로 판단된다.
- 5) 새로운 모델의 개발에 앞서 우선적으로 해결해야 할 과제로 궤도밑의 탄성특성을 나타내는 각종 지반스프링계수의 값을 어떻게 정하는냐가 궤도해석에 있어 중요한 과제임을 확인했다. 또한 궤도 밑에 놓인 지반을 탄성적이라기 보다는 탄소성으로 해석함이 옳겠으나 그에 대한 연구는 차후로 미루기로 하겠다.

## 참고문헌

- 1) 이 종득, 철도공학, 노해출판사, pp 81 ~ 146, 1989
- 2) William W. Hay, Railroad Engineering, pp 247 ~ 275, 1982
- 3) Berkeley, California, USA, Computer and Structures, Inc, 1995
- 4) William Weaver, Jr., Finite Elements for Structure Analysis, pp 51 ~ 61, 1984
- 5) Fritz Fastenrath, Railroad Track, Frederick Ungar Publishing co., pp 12 ~ 30, 1977
- 6) Raymond, G. P. & Lake, R. W. & Boon, C. J., "Stresses and Deformation in Railway Track", CIGGT NO. 76-11, Queen's University, 1976
- 7) Talbot, A. N., ASCE-AREA Special Committee on stress in Railroad Track, 1st, 2nd, 3rd, 4th, 5th, Progress Report, 1918 ~ 1929
- 8) 김성득, "철도궤도시스템의 신해석 모델연구", 대한교통학회지 제9권 2호, 1991
- 9) 황진형, 철도궤도시스템 해석방법의 비교연구, 대한토목학회 가을 학술발표 논문집, 1995
- 10) Ernest T. SELIG & John M. Waters., Track Geotechnology and Substructure Management, 1994
- 11) Raymond, G. P., "Analysis of Rail Track Structure(ARTS) User's Manual", Canadian Institute of Guided Ground Transport, No 88-3, Queen's University, 1988
- 12) Hay, W. W.(1982). Railroad Engineering, John Wiley & Sons, pp 244 ~ 259
- 13) Heytenyi, M., Beams on elastic foundation, University of Michigan Press, 1946

- 14) Kerr, A. D., A method for determining the track modulus using a locomotive or car on multiaxle trucks, AREA Bulletin 692, pp 269 ~ 286, 1983