

# 궤도침하 특성 : State of the Arts

## The Characteristic of Track Settlement : State of the Arts

장선재\*                      임남형\*\*                      최진유\*\*\*                      이우철\*\*\*\*  
Jang, Sun-Jae              Lim, Nam-Hyoung              Choi, Jin-Yu              Lee, Woo-Chul

---

### ABSTRACT

The track is an important component of rail structures. The characteristic of the track settlement must be confirmed in order to evaluate the stability of the track. It is effected by action load and the characteristic of the track material. This study investigates the mechanism of the track settlement and the effect of initial settlement and long-term settlement on the characteristic of the track settlement through literature survey. It tries to observe the future research direction of track settlement.

Keyword : Track, Track settlement, Initial settlement, Long-term settlement

---

### 1. 서 론

1900년대 초반부터 현재까지 100년의 세월이 흐르는 동안 많은 철도 시설물이 건설되어졌다. 국내 철도 시설물 현황을 살펴보면, 노후화된 시설물과 신규 건설된 시설물이 서로 공존하고 있는 실정이다. 철도 관련 시설물은 안전성 및 사용성 측면에서, 이를 사용하는 국민에게 국가기반 시설물로서의 신뢰성을 주어야 할 의무를 갖는다. 최근 고속철도 건설 및 개통으로 열차 최고속도가 300km/h까지 지속적으로 향상되고 있는 등 비약적인 기술 발전을 이루고 있지만, 국내에서 건설되는 철도시설물에 대해서는 일본이나 미국, UIC설계기준 등 국외의 기준들을 준용하거나 차용하여 사용하고 있는 실정이다. 국외의 기준을 준용할 경우, 열차운행환경 및 관리여건 등이 국내의 환경과는 다른 경우가 많으므로 효율적인 열차운행 및 관리 등에서 비합리적이다 판단된다. 또한, 국내 기술수준의 발전을 위하여 국내에서 건설되는 철도시설물에 대하여 건설환경에 적합한 기술을 개발하고 안전한 열차운행환경 및 관리조건들을 충족시킬 수 있도록 기초기술개발의 필요성을 갖는다.

본 연구에서는 국내에서 건설된 기존 철도 시설물의 종합적인 특성 파악을 위하여 궤도침하 특성을 연구하고자 한다. 이를 위해 기존의 궤도침하 특성에 대한 연구분석을 통하여 현재까지 어떤 연구가 진행되었는지를 선행연구로 살펴보고자 한다. 궤도의 침하특성을 파악하기 위하여 침하특성에 영향을 미치는 매개변수에는 어떤 요인들이 있는지 살펴보고, 궤도의 침하 거동을 파악하여 합리적인 유지관리가 이루어질 수 있도록 기초자료로 사용하고자 한다.

---

\* 장선재 충남대학교 토목공학과 박사과정  
E-mail : sjjang@cnu.ac.kr  
TEL : (042)821-7749 FAX : (042)821-8867  
\*\* 임남형 충남대학교 토목공학과 교수  
\*\*\* 최진유 한국철도기술연구원 선임연구원  
\*\*\*\* 이우철 충남대학교 토목공학과 박사과정

## 2. 본 문

### 2.1 연구내용

궤도는 철도구조물에서 중요한 구성요소이다. 궤도의 안정성 평가를 위해서 궤도침하의 특성을 파악해야 한다. 궤도침하의 특성은 작용하중과 재료의 특성에 의해 영향을 받는다. 본 연구에서는 문헌분석을 통해 궤도침하의 메카니즘과 각각의 영향인자가 초기침하와 장기침하 등에 미치는 영향을 분석하여 궤도의 침하특성을 파악하고자 한다. 이를 바탕으로 궤도침하의 추후 연구방향을 확인하고자 하였다.

궤도침하 특성을 파악하기 위해서는 기본적으로 궤도의 침하를 발생시키는 원인들을 살펴보고, 각각의 인자가 어떻게 작용을 하여 궤도침하가 발생되는지 거동을 확인해야 한다. 이를 위해 각 연구자들에 의해 발표된 연구를 통해 대표적인 궤도침하 예측모델을 살펴보고자 한다.

제일 먼저 Shenton(1985)에 의해 제안된 궤도침하 모델을 살펴보면, 동적하중, 레일형상, 침목간격, 침목지지특성, 자갈층의 침하, 노반공에 대한 광범위한 조사를 통해 로그함수를 근간으로 하는 침하모델의 타당성을 검토하였다. 이를 바탕으로 실내시험과 현장측정 등의 실측결과를 근거로 다음과 같은 침하모델을 제안하였다.

$$y = K_1 N^{1/5} + K_2 N \text{ ————— (식 2-1)}$$

여기서,  $y$ 는 침하량,  $N$ 은 하중횟수이며  $K_1$ 과  $K_2$ 는 축중(동적하중), 레일단면, 침목간격, 궤도 및 노반 지지계수 등 여러 요인에 의해 결정되는 상수값이다. 식2-1에서, 하중횟수  $N$ 의 1/5제곱근으로 표현되는 첫 번째 항은  $10^6$ 까지의 하중사이클의 실측결과와 잘 일치하는 것으로 나타났고,  $10^6$ 보다 더 많은 하중사이클에서는 선형항  $K_2 N$ 을 추가할 때 일치하는 것으로 나타났다. 따라서, 위식에서  $K_2$ 는  $N < 10^6$ 에서는 0이고,  $N > 10^6$ 에서만 유효한 값을 갖는다.

Shenton의 연구결과에 따르면 로그법칙은 단기간의 궤도침하를 예측하는 데는 적합하지만 장기침하는 과소평가할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 열차의 축중이 궤도침하에 가장 중요한 요인 중의 하나이며, 열차 속도가 낮은 경우에는 축중과 궤도침하는 거의 선형적으로 비례하는 것으로 나타났다. 하지만 이것은 낮은 열차 축중에 대해서만 유효하였다.

실내 삼축실험 결과에서는, 더 높은 하중이 궤도 침하를 결정하고 최대하중 이하의 하중은 침하에 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다. 낮은 하중이 궤도 침하에 거의 영향을 미치지 않는다는 연구결과는 궤도침하를 유발하지 않는 임계 하중이 존재한다는 사실을 뒷받침한다.

두 번째로 Sato(1997)가 제안한 궤도침하 모델을 살펴보면 다음의 식으로 표현을 하고 있다.

$$y = \gamma(1 - e^{-\alpha x}) + \beta x \text{ ————— (식 2-2)}$$

여기서,  $y$ 는 침하량,  $x$ 는 하중반복회수 또는 통과톤수,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ 는 경험적 상수를 나타낸다. 식2-2에서 초기의 항은 도상입자간의 간격이 좁아지면서 압밀이 발생하는 초기침하 과정에 해당된다. 두 번째 항은 직선적인 침하를 나타내는 단계로 주로 침목 하부의 도상입자가 측면으로 이동하는 것이 주된 원인이 된다. 계수  $\gamma$ 는 초기 침하의 크기를 나타내고,  $\alpha$ 는 초기 침하 종료 시까지의 하중반복회수를 의미하며, 계수  $\beta$ 는 열차하중주기에 따른 궤도침하속도를 나타내는 것으로 열차하중에 의한 궤도침하의 장기적인 진전과 관련이 있다.

Sato는 실험결과로부터 계수  $\beta$ 와 관련하여 다음과 같은 사실을 확인하였다. 쇄석의 경우 입도조정자갈에 비해  $\beta$ 값이 6~7배 더 크다. 하중반복속도의 제곱에 비례하여  $\beta$ 값이 증가한다. 토사가 혼입된 도상자갈은 건조상태일 경우 일반 자갈에 비해  $\beta$ 값이 작지만, 수분을 함유한 경우에는  $\beta$ 값이 현저히 증가한다.  $\beta$ 는 도상압력과 도상가속도 계수에 비례한다.

Alva-Hurtado와 Selig 등(1981)은 도상입자의 재배열과 비탄성 회복거동에 의한 도상의 압밀에 대한 케도침하 모델을 다음과 같이 제안하였다.

$$e = \varepsilon_1(1 + c \log N) \quad \text{---(식 2-3)}$$

여기서,  $\varepsilon$ 은 동일한 하중의  $N$ 회 재하 후 총 영구 변형율을 나타내며,  $\varepsilon_1$ 은 첫 번째 하중 재하 후의 영구 변형율을 나타낸다.  $c$ 는 경험상수를 나타낸다. 위의 식2-3은 도상변형이 비압축 상태에서 시작하는 것으로 가정하고 있다. 따라서, 초기침하와 장기침하를 모두 포함하고 있다고 볼 수 있다. 그럼에도 불구하고 Sato가 제안한 식과 비교해보면, 침하거동을 다르게 표현하고 있음을 알 수 있다. 이러한 차이는 측정 자료의 하중 사이클 수 및 범위, 하중범위 등의 차이에 의한 것으로 예상된다.

ORE(Office for Research and Experiments of the International Union of Railway, UIC)에서는 Hecke(1998)의 연구를 바탕으로 침하 모델식을 다음과 같이 제안하였다.

$$e = e_0 + cT_v^\alpha(2Q)^\beta V^\gamma \quad \text{---(식 2-4)}$$

여기서  $e$ 는 케도침하,  $e_0$ 는 탬핑 직후의 침하,  $c$ 는 비례상수,  $\alpha, \beta, \gamma$ 는 실험데이터로 결정되는 경험상수,  $T_v$ 는 교통량,  $2Q$ 는 동적축중,  $V$ 는 열차속도이다. ORE에 따르면,  $\alpha$ 는 1,  $\beta$ 는 3으로 가정하고 있으며 경우에 따라서는 속도의 영향을 무시할 수 있다고 제안하고 있다. 초기침하와 장기침하를 따로 구분하고 있다는 점에서 Sato의 케도 침하모델식과 유사한 점이 있다. 위 침하모델의 식 2-4에서는 전체 선로에 대한 실측결과를 토대로 만들어진 통계적 모델이기 때문에 선로 전체의 교통량( $T_v$ )이 주요 변수로 설정되어 있어서 비례상수를 결정하기 위해서는 특정 위치에서의 케도침하가 아니라 여러 종류의 선로에서의 케도침하를 전체적으로 분석해야만 한다. 또한, 케도구조에 관한 변수가 없기 때문에 특정케도구조의 특성을 반영하기 어렵다는 단점을 안고 있다.

Dahlberg(2001)에 의하면 케도 침하는 열차 반복하중에 노출될 때 도상자갈과 자갈 하부 지반의 영구변형에 의해 발생한다. 따라서 케도의 침하는 도상자갈과 보조도상, 지반 등 재료의 성질에 크게 좌우된다. 이러한 케도 침하의 메카니즘은 두 가지 단계로 나누어 설명할 수 있다.

첫 번째 단계는 도상자갈 입자의 재배열로 인해 입자 간의 간극이 좁아지면서 자갈층의 압밀이 발생하는 단계이다. 이 단계는 주로 탬핑 직후에 발생하며 비교적 빠르게 침하가 발생하게 된다. 두 번째 단계는 첫 번째 단계의 침하 이후에 비교적 느린 침하 진행이 발생하는 단계이다. 이 단계에서는 침하와 하중의 관계가 선형에 가깝게 나타난다. 이 단계에서의 침하의 원인은 다양하지만 다음과 같이 몇 가지로 요약해 볼 수 있다. 첫 번째 단계 압밀의 계속된 진전, 보조도상 또는 지반의 자갈입자 사이로의 침투, 열차하중 또는 환경적 요인에 의한 자갈입자의 파괴에 따른 부피감소, 자갈입자의 마모에 따른 부피감소, 하중제거 시 자갈층의 비탄성회복, 도상자갈과 지반 흙입자의 이동으로 인한 침목의 침하, 횡방향 또는 종방향의 침목의 움직임으로 인한 도상자갈의 이동 등이다.

위에서 여러 가지 침하모델의 특징을 살펴보았다. 이와 같은 케도 침하모델식을 바탕으로 추후 연구 방향을 살펴볼 필요성이 있다. 추후 연구방향을 확인하고 관련된 연구를 진행하여 케도 침하에 대한 연구를 발전시켜야 할 것이다.

## 2.2 연구방향

국내 자갈도상케도의 재료적인 특성을 파악하여 케도침하 특성을 파악하고 데이터를 축적할 필요성이 있다. 또한 케도침하에서 각기 다른 매개변수에 의해 침하되는 거동을 확인하여 초기침하와 장기침하 등에 영향을 미치는 변수들을 확인하고 어떤식으로 케도침하에 영향을 주는지에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다. 추후 이런 연구를 통해 케도 침하로 인한 케도 유지보수 시기 및 빈도를 합리적으로 산정할 수 있을 뿐만 아니라 합리적인 케

도침하의 특성을 파악함으로써 각 영향인자들에 의한 영향을 확인하여 궤도침하를 최소화 시킬 수 있는 방안이 수립될 수 있을 것이다. 궤도침하에 대한 특성을 파악하여 효율적인 관리방안이 수립되면 외적으로는 열차의 승차감을 향상시키고 주행안정성을 확보하는 등 열차의 효율적인 운행과도 연결될 수 있다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 궤도침하 특성에 대해서 살펴보았다. 궤도 침하 모델의 연구에서 대부분의 고전적인 침하모델들은 모두 경험적 또는 통계적 모델로 특정한 궤도구조 조건과 통과톤수, 열차 속도에 대해 궤도침하를 예측하였다. 또한, 대부분의 궤도 침하 모델들은 초기침하와 장기침하로 구분하여 모델식을 제안한 것을 확인할 수 있었다. 궤도 침하를 예측하기 위해서는 재료의 조건에 따른 영향이 크기 때문에 각각의 궤도구조에 따른 재료 및 초기침하와 장기침하의 거동을 확인하는 것이 실제 궤도침하를 예측하는데 매우 중요하다. 추후 궤도침하의 연구방향은 위에서 언급한 바와 같이 각기 다른 매개변수에 의해 침하되는 거동을 확인하여 초기침하와 장기침하 등에 영향을 미치는 변수들을 확인하고 어떤식으로 궤도침하에 영향을 주는지에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다. 한편으로는 동일 선로에서도 선로방향으로 궤도 지지조건이 변화할 때, 국부적인 부등침하를 예측할 수 있어야 한다. 최근의 몇몇 연구는 이러한 궤도침하 예측을 위한 모델을 제안하고 있으며, 향후 연구방향도 이러한 방향으로 나가는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. Shenton(1985), "Ballast deformation and track deterioration", Proceedings of a Conference on Track Technology, University of Nottingham, pp. 253-265, Thomas Telford, London.
2. Sato, Y.(1995), "Japanese studies on deterioration of ballasted track", Vehicle System Dynamics, Vol.24, pp. 197-208.
3. Sato, Y.(1997), 신궤도역학.
4. Alva-Hurtado, J. E. and Selig, E. T.(1981), "Permanent strain behavior of railroad ballast", Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Sweden, Vol.1, pp.543-546.
5. Hecke, A.(1998), "Effects of future mixed traffic on track deterioration", Report TRITA-KFT 1998:30. Railway Technology, Department of Vehicle Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm.
6. Dahlberg, T.(2001), "Some railroad settlement models-a critical review", Proceedings of Institute of Mechanical Engineering, Part F-Journal of rail and rapid transit, pp. 289-300
7. 최진유(2005), "선로구축물 시스템 핵심기술 연구" 한국철도기술연구원