

## 열차하중에 대한 지반-궤도의 상호작용 Soil and Track Interaction under Railway Loads

강보순<sup>1</sup>  
Bo-Soon Kang

### Abstract

In this report, numerical investigations have demonstrated, that the displacement underneath a moving loading reach a maximum value, if the speed of the load is equal to propagation velocity of the maximum wave. The load speed for which the maximum displacement occurs is called critical speed. The critical speed divides the velocities in a subcritical and a super-critical region. By means of calculations the dynamic behaviour of the slab track-soil is investigated. For concrete slab track dynamic wheel load are given in dependence of relevant excitation mechanism and speed of the train. These loads can be used for the dimensioning of the track as well as for the prognosis of the vibrations at the track and the surrounding soil.

**Keywords :** 슬래브궤도, 열차하중, 지반동역학, SSI

### 1. 서론

앞으로는 외국은 물론 국내의 교통 시스템은 200km/h를 넘는 고속철도가 수송에 큰 역할을 하게 될 것이다. 이와 같은 고속철도시스템은 구성된 궤도구조물에 요구가 점차 증대된다. 고속열차의 주행 시 안정성, 내구성 및 부설에 따른 경제성 그리고 향후 유지관리 등의 측면에서 효과적이고 경쟁력 있는 슬래브 궤도를 한계성을 갖고 있는 자갈 궤도의 대안으로 제시할 수 있다. 독일철도청과 지금 우리나라를 포함한 다른 나라 철도사업도 마찬가지로 고속철도를 위한 선로망을 건설하고 있다. 독일에서는 ICE 3가 쾰른-프랑크푸르트 180km이상의 연장거리를 슬래브궤도로 건설되어 350km/h속력으로 차량이 운행되고 있다. 점차 고속으로 갈수록 기존자갈궤도는 더 이상 적합하지 않다. 침묵 밑에 자갈의 반복되는 위치밀도는 궤도체의 상이한 지점탄성을 가져오고, 주기적으로 반복되는 동적하중은 자갈마모와 골재의 위치변경을 발생시킨다. 그것은 궤도위치의 악화와 함께 승차감을 감소시키므로 유지관리비용의 증대뿐만 아니라 운행에 방해되어 철도교통의 신뢰성과

정확성을 떨어뜨리는 결과를 가져온다. 따라서 내구적이고 가능한 유지관리가 효율적인 궤도를 건설하기 위한 합리적인 대책이 필요하다.

중량의 열차가 슬래브궤도를 주행하면 궤도구조물과 지반의 상호작용에 의해 궤도에 무시할 수 없는 진동특성이 나타난다. 따라서 궤도의 구조적 안전성, 주행안전성 및 편안한 승차감을 주기위해 궤도와 지반의 상호작용 해석을 통하여 궤도의 정확한 동적특성을 파악하는 것이 철도궤도설계에 반드시 필요하다. 열차주행 시 열차의 이동축중 궤도구조물의 동적특성과 지반응력은 열차의 동특성, 속도, 궤도의 형태 및 물성치 및 지반의 동적물성치에 따라 변하게 된다. 특히 연약지반 위를 열차가 주행할 때 설치된 궤도구조물을 통해 전달되는 진동크기는 얼마나 되며 구조물의 안전성뿐 만아니라 선로 인근주민에게 영향을 주지 않기 위해 규정된 진동한계범위에 도달하는가를 지반과 궤도구조물의 상호작용해석을 통해 정확한 예측을 하는 한편 또한 지반주변에 진동저감을 가져오는 경제적인 슬래브궤도의 형태를 결정하는 방법에도 이결과가 중요한 역할을 하게 된다.

## 2. 자갈궤도 및 슬래브궤도 구조시스템

슬래브궤도를 선택할 경우에는 다양한 선로의 장단점을 파악하고 지역의 특성과 현장조건들을 고려하여 비교·분석하여 선별하여야 한다. 따라서 독일고속철도의 기존 고정선로와 지금 개발되고 있는 궤도를 살펴보고자 한다.

일반적으로 슬래브궤도일 경우 시공기면 보호층과 고정적인 자갈궤도의 자갈층은 강화노반으로 연결된 지지층 그리고 그 위에 아스팔트 또는 콘크리트지지층에 의해 대체할 수 있다. 일반적으로 슬래브궤도의 건설기술은 2가지 구조원리로 분류할 수 있다.

### 2.1 슬래브궤도시스템

Fig. 2에서는 Rheda 시스템을 보여주고 있다. PC 침목 파트로프가 함께 되는 이와 같은 일체형 시공법에는 놓이는 궤도격자의 높이 및 방향이 정확하게 시공되고 조절되어진다. 이런 건설공법들의 주요차이점은 침목형태와 설치방법의 기술적인 완성에 있다.

다른 해체형 공법은 수평적 직각변위 및 길이변위 그리고 운행과 법선응력에 의한 상승에 대하여 고정시키므로 비교

적 용이하게 -기존 자갈궤도와 같이 유사한 예상할 수 없는 변형이 발생했을 때 바로 각 침목을 교환할 수 있다.

새로운 시스템인 System Grötz BSO/MK은 선로의 이용변수를 고려하여 각 위치적 상황에서 맞춘 철도궤도에서 진동저감대책으로 질량-용수철-감쇠 시스템을 형성하게 된다. 진동저감은 선로에서 탄성적인 용수철요소와 함께 적절한 질량의 조화와 선별을 통하여 진동시스템이 만들어지고 고체유에 대한 표준 진동수를 계속해 감소시키며 철도운행에서 방사되는 지역에 요구되는 방어효과 있어 특히 진동저감을 기존선로에서 보수·보강 내지는 새로운 고속선로에도 사용될 수 있다. 이 공법은 PC제작 뿐 만 아니라 현장 타설도 가능하다. 또 하나는 새로운 공법인 FF Bögl 조립식공법은 7m되는 프리스트레스트 PC슬래브를 제작하여 현장에서 바로 체결하여 수평 및 수직조정이 가능하게 하여 PC이음부를 충전재로 타설 한 후 5시간 후 바로 철도운행이 가능한 공법이며 특히 교통차단이 제한된 지역에 더욱 효과적이고 20동안의 시험구간을 통해 품질의 우수성이 입증되었다.

### 2.2. 탄성체궤도모델

동적 궤도모델에서는 시스템구성과 함께 다루기 힘든 전체인접에서의 질량 또는 용수철의 구성은 서로 어디에 위치하는 가를 정확하게 해야 할 것이다. 자갈선로와 슬래브궤도 사이에는 아래와 같은 특별한 의미에서 차이점이 있다. 자갈선로경우에는 동적 축하중이 레일을 통해 체결장치 및 패드에 전달된다. 레일과 궤도기저의 중간층은 침목밑에 놓이는 자갈도상과 노반을 차별된 용수철로 도입할 수 있게 한다. 따라서 자갈궤도에는 3가지 아래와 같은 용수철 내지 감쇠요소로 나누어진다(Fig. 3).

- 레일 체결장치와 패드
- 자갈도상
- 노상

고속철도의 높은 하중에도 불구하고 좋지 않은 지반상태일 경우는 자갈궤도의 파괴확률이 큰 것에 비하면 슬래브선로에서 지반의 구조물의 내하력에 대한 요구는 자갈선로와 근본적인 차이가 없다. 자갈도상과 슬래브궤도 구조체의 노반상에 작용하는 지반응력비교(Fig. 4)와 동적지반응답(Fig. 5)비교는 확실한 차이를 나타내고 있다. 차량속도 200km/h 일 경우에 슬래브궤도의 노반응력 및 진동속도가 각각 60% 정도로 자갈궤도보다 작게 나타난다. 속도가 증가될수록 더욱더 효과적이다.

슬래브궤도의 도입시는 노반층의 하중이 아주 적절하고 확실히 효율적이고 균등하게 분배된다. 이 효과는 특히 고속 주행시 더 돋보인다. 고정선로일 경우 준비에 기술적인

슬래브궤도와 자갈궤도의 구조형태

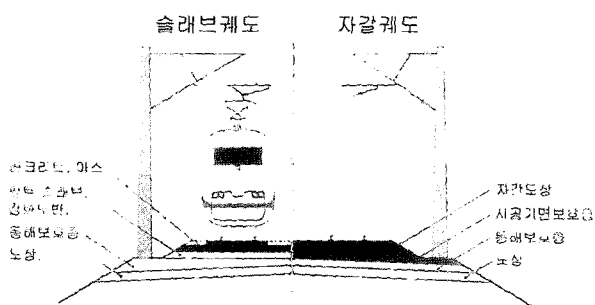


Fig. 1. 슬래브궤도와 자갈궤도의 단순도식

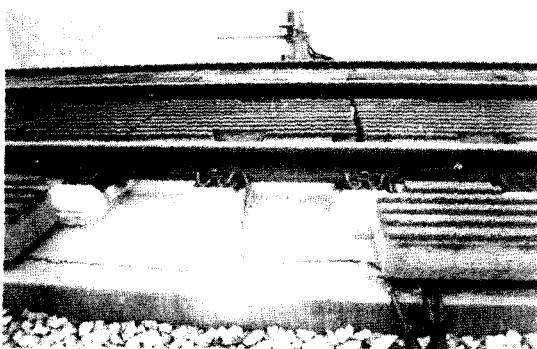


Fig. 2. Rheda클래식궤도

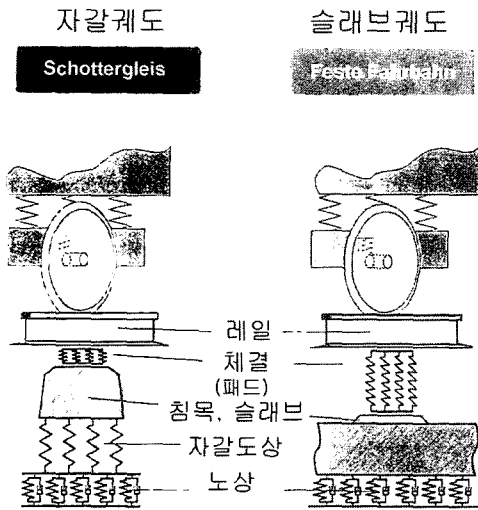


Fig. 3. 자갈궤도 및 슬래브궤도의 시스템구성

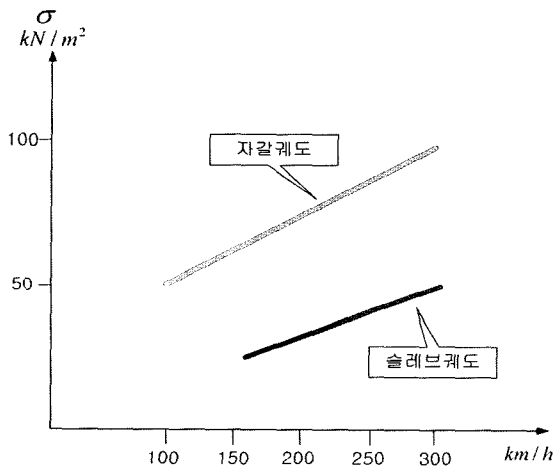


Fig. 4. 열차속도에 따른 지반응력

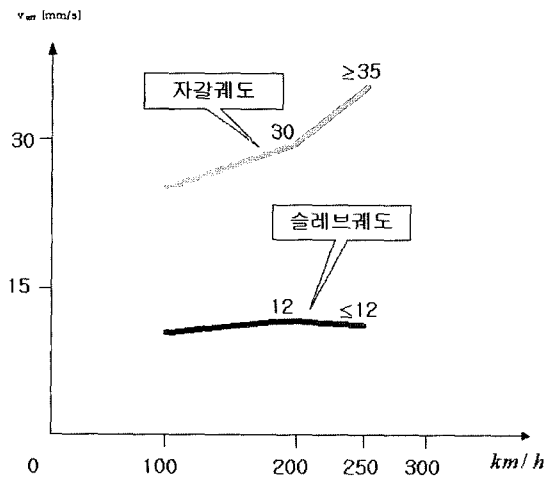


Fig. 5. 열차속도에 따른 동적지반응답

복잡함과 노반의 상부구조물이 요구되지 않는다.

장기적인 사용성으로 인해 고속철도를 위한 지반구조물이 형성되어서 지반구조물의 작은 자체침하와 노반의 작은 고정침하만 나타난다. 나머지 침하는 고정선로일 경우 선로체결구 내지는 침목받침에 있어서 조정될 수 있다.

자갈선로의 전체탄성은 노반에서 선로까지 전체구조물의 수직탄성거동과 각 구성요소들이 함께 작용함으로 발생된다. 반면에 고정선로일 경우 요구되는 선로탄성은 선로체결시스템에서 탄성받침 내지는 보완한 탄성받침 침목으로 거의 종결한다. 따라서 고정선로는 시스템조건으로 자갈선로에 비해 간결하게 정의되고 작은 폭으로 분포된 수직강성치와 함께 탄성체의 높은 균등성을 갖고 있다

### 3. 자갈궤도의 해석

궤도는 일반적으로 레일, 침목, 자갈도상 및 노상으로 구성되고 단면치수관계로 인하여 계산모델은 간편하게 2차원으로 하였다. 레일 및 침목은 유연하고 질량을 갖고 있는 자갈에 묻혀있는 띠기초로 나타내었다. 선로 밑으로는 자갈도상과 지반위에 노상은 유한요소로 지반은 경계요소로 나타내었다. 통과하는 열차하중은 두개의 같은 10kN 하모닉 선형하중과 4-100Hz의 진동수로 나타내었다.

Fig. 7은 Frequency에 따른 두 수직하모닉 하중에 대한 슬래브궤도 중간의 수직변위의 변화가 지반강성에 따라 다른 결과를 보여준다.

낮은 Frequency영역에서 연약지반의 변위는 단단한 지반보다 훨씬 더 크고 특히 연약지반의 낮은 Frequency가진은 궤도에 강한 진동을 초래할 수 있고 높은 Frequency영역에서 지반강성에 따른 수직변위는 거의 변화가 없는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 열차가 4Hz로 가진을 주었을 때 지반특성에 의한 가진거리(궤도)진동폭의 변화를 보여주고 있다. 연약지반위에 놓인 기초(궤도)의 경우는 기초(궤도)뿐만 아니라 가진거리에서 떨어진 곳의 진동폭도 크게 나타났. 이런 거동은 연약한 지반일수록 더 뚜렷하다. 기존의 자

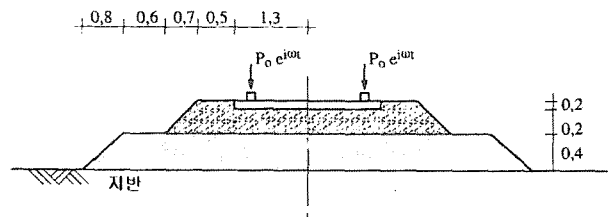


Fig. 6. 기존자갈궤도의 계산모델

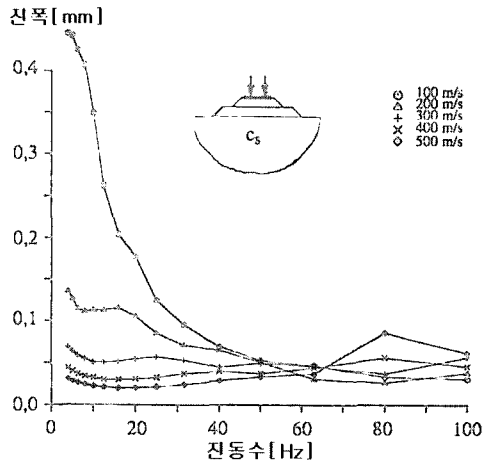


Fig. 7. 지반특성에 따른 자갈궤도의 수직변위변화

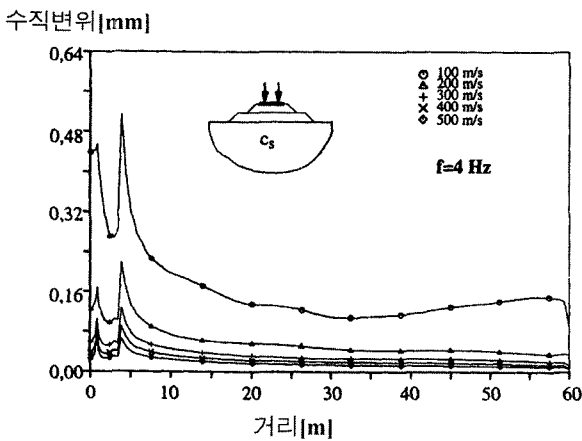


Fig. 8. 지반특성에 따른 궤도진동 및 파전달

갈궤도는 지금까지는 큰 문제가 없지만 고속철도궤도와 같은 새로운 요구에 대해서는 적절한 대안을 필요로 하므로 그것의 하나가 슬래브궤도이다. 그림에서는 지반특성에 따른 기존자갈궤도와 슬래브궤도의 중앙의 진동폭을 보여준다. 모든 지반에서 거의 모든 가진영역에서 슬래브궤도의 진동폭이 기존 자갈궤도보다 우수한 것으로 입증됐다.

#### 4. 슬래브궤도의 해석

다음은 슬래브궤도를 3차원 해석모델 및 결과이다.

Fig. 10은 수치해석을 위한 지반 및 슬래브궤도에 대한 3차원 모델이고 그림10은 열차가 x 방향으로 이동할 때 나타나는 하중분포를 수치해석을 위해 침목위에서 열차이동분포를 x-방향에 대한 하중크기로 나타내었다.

Fig. 11은 하중속도에 대한 슬래브궤도의 표면에서 최대

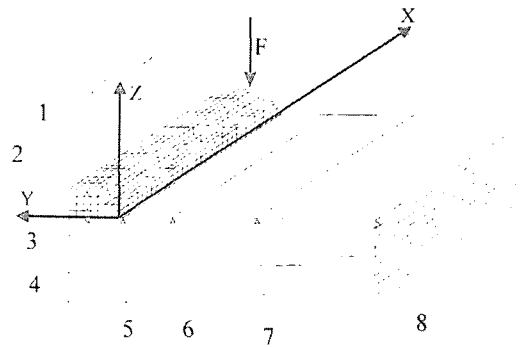


Fig. 9. 슬래브궤도 및 지반의 3차원 모델

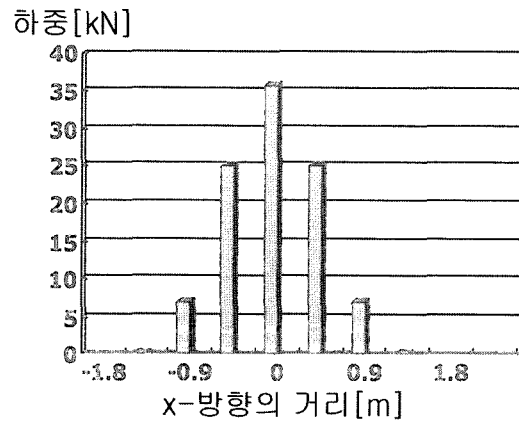


Fig. 10. 해석을 위한 거리에 대한 열차의 이동하중분포

변위 커브를 나타낼 수 있도록 속도10m/s 부터 160m/s 까지 최대수직변위가 계속해서 계산되었다. 주어진 슬래브궤도에 대한 임계속도는 약 150m/s에서 나타나고 160m/s에서는 변위가 작아지는 것을 알 수 있다. 10m/s일 때 변위는 정하중에 의해 계산된다. 10m/s와 150m/s사이의 상대적 변위증가율을 계산하면 12.26%을 나타낸다.

Fig. 12에서는 슬래브궤도와 지반시스템의 고유진동수가 6Hz임을 알 수 가 있다. 고유진동수의 크기는 지반강성 및 무엇보다도 슬래브궤도의 최상층 특성에 따라 좌우된다. 이상부층이 유연하면 할수록 고유진동수는 작아진다.

Fig. 12에서는 열차가 x방향으로 속도v=180km/h로 진행할 때 시간에 따른 y방향 및 z방향의 변위를 잘 보여주고 있다.

x방향의 변위는 0.6초에서 최대값(Ux=0.68mm)을 갖고 y 방향의 변위는 0.69초에서 최대값(Uy=0.31mm)을 갖으며 z 방향의 변위는 0.715초에서 최대값(Uz=1.338mm,)가었으므로 다른 방향의 최대값 보다 월등히 큰 값을 나타낸다. 따라서 z 변위의 진행은 슬래브궤도의 재료특성 및 단면치수의 변화의 영향을 가장 잘 보여줄 수 있으므로 설계에 큰 의미가 있다.

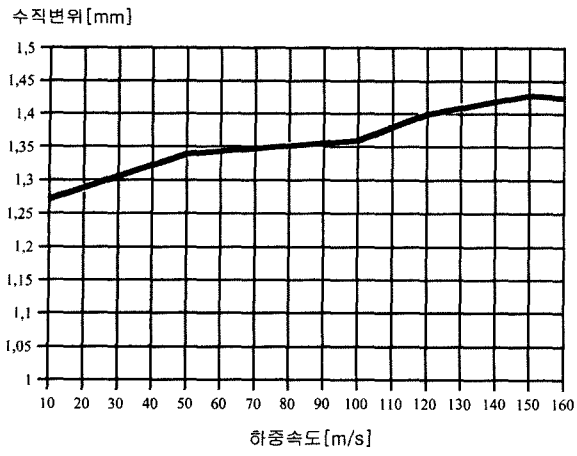


Fig. 11. 하중속도에 대한 수직변위의 변화

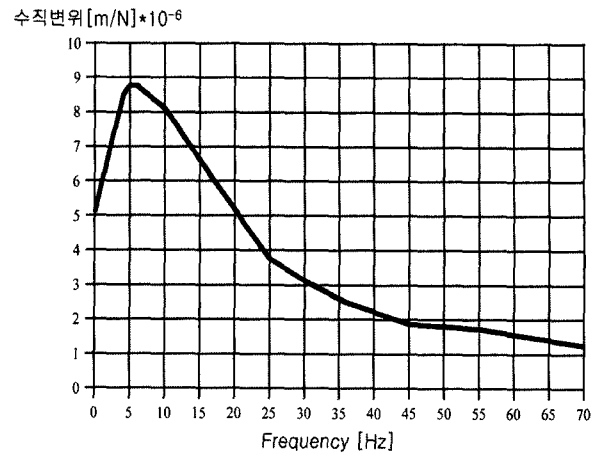


Fig. 12. Frequency에 대한 수직변위

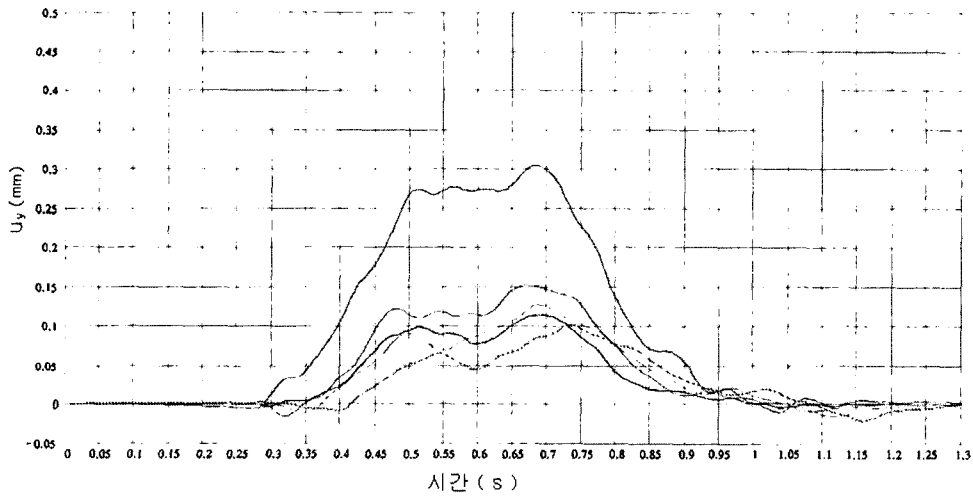


Fig. 13. 시간에 대한 x방향 변위(궤도의 횡방향)

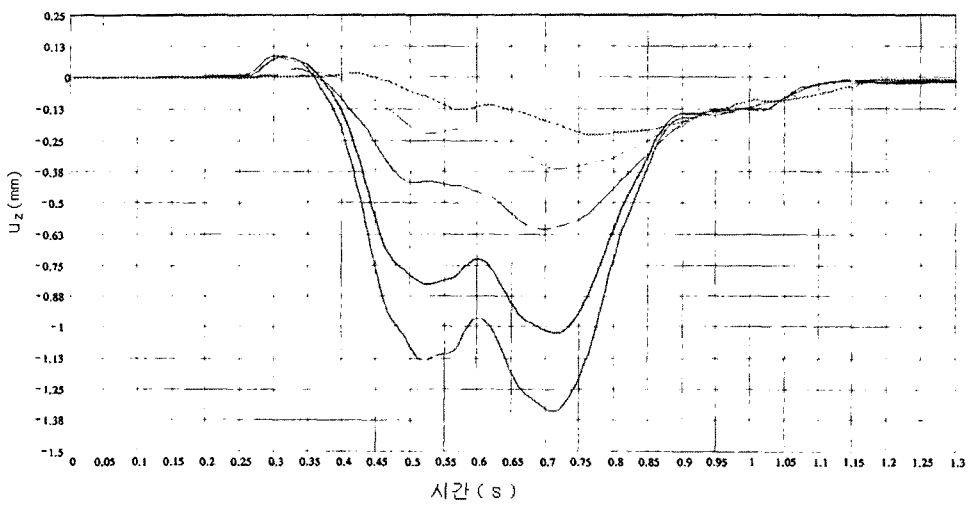


Fig. 14. 시간에 대한 y방향 변위(궤도의 수직변위)

## 5. 결론

- (1) 자갈도상와 슬래브궤도 구조체의 노반상에 작용하는 응력비교와 동적지반응답 비교는 확실한 차이를 나타내고 있다. 차량속도 200km/h 일 경우에 슬래브궤도의 노반 응력 및 진동속도가 각각 60% 정도로 자갈궤도보다 작게 나타난다. 속도가 증가할수록 더 큰폭으로 작아진다.
- (2) 열차속도 $v=180\text{km/h}$  일때 시간에 따른 z방향 변위를 잘 보여주고 있음. x-, z방향의 변위( $U_z=-1.338\text{mm}$ ) 는 x-, y방향의 변위보다 더 크며 z방향 변위의 진행은 슬래브궤도의 재료특성의 변화의 영향을 가장 잘 보여줄 수 있으므로 큰 의미가 있다.
- (3) 모든 지반에서 거의 모든 가진영역에서 슬래브궤도의 진동폭이 기존 자갈궤도보다 우수한 것으로 입증됐다.
- (4) 주어진 슬래브궤도에 대한 임계속도는 약 150m/s에서 나타나고 10m/s와 150m/s사이의 상대적 변위증가율을 계산하면 12.26%을 나타낸다.
- (5) 슬래브궤도와 지반시스템의 고유진동수가 6Hz임을 알 수 가 있다.

## 참고 문헌

1. Lee, R, Schmid G. : Einfluss von Unterbau u. Untergrund 떨. Erschetterungen u. deren Ausbreitung an Schienenwegente Tagungsband igi, Westheim, Sep. 1995
2. Kang, B.S. : Stahlfaserbeton undstahlfas -erverstärkter Stahlbeton unter Schwellbea -nspruchung.Dissertataion, Ruhr-Universität Bochum, 1998.
3. J.Ackv und U. Decker : Vergleich von Scotteroberbau und Fester Fahrbahn in emissionstechnischer Hinsicht; Tagungsband igi, Westheim, Sep. 1995.
4. G. Hoelzl : Vergleich von Fester Fahrbahn und Scotteroberbau hinsichtlich Farzeugschwingungen und Zuginnengerrauschen; Tagungsband igi, Westheim, Sep. 1995.
5. G.Pfanz, J. Caracia, G. Schmid: Vibration due to loads moving sub-critical and super-critical velocities on rigid track, wave 2000
6. Lysmer, J., Ostadan, F., M., Vahdani, S.& Tajirian,. F 1988a. SASSI-A System for analysys of soil-structure interaction. Theoretical manual.