大韓環境工學會誌・特輯 - Special Feature - 581～586. 2008.

철도역사의 진동저감을 위한 플로팅 슬래브궤도에 대한 고찰

김진호・한석윤
한국철도기술연구원 도시철도표준화연구단

The Review of Floating Slab Tracks for Vibration Reduction of Railway Station

Jin Ho Kim・Seok Han Youn
Urban Transit Stanardization Research Corps, Korea Railroad Research Instisute

1. 서 론

열차 운행 시 발생하는 진동은 지진 및 바람 등에 의한 진동에 비하여 상대적으로 그 크기가 작아서 건축물의 안전성보다는 사용성에 영향을 미친다. 최근 도심밀집지역에 상시진동이 과다 유발될 수 있는 시설물이 증가함에 따라 철도환경에 대한 우려와 민원도 증가하고 있다. 따라서 현재까지 철도의 설계 및 시공 시 주요 요소로 취급되지 않았던 열차의 동적하중에 대한 진동의 예측과 대책 마련이 절실히 요구되고 있다.

진동 발생의 일차적 원인은 차량-궤도시스템의 상호작용 때문이며, 궤도시스템의 초기 설계 단계부터 진동문제를 고려하는 것이 효율적이다. 궤도 부설 후에 진동을 저감시키기 위해서는 수진점 진동대책, 전파경로 진동대책을 고려해야 하는데 이는 시간과 비용이 많이 소요되고 열차의 운행 특성상 대책이 불가능한 경우도 있기 때문이다. 그러므로 궤도 시스템의 초기 설계 시부터 저진동 설계개념을 도입하여 도심지내의 철도 인접 건물에 대한 민원을 최소화시키고 열차주행안전성과 승차감향상, 쾌적성 상을 하는 것이 진동저감 효율성과 경제성 측면에서 유리하다 할 수 있다. 진동을 효율적으로 저감시키는 방법으로서 플로팅궤도를 부설하는 방안이 철도 선진국을 중심으로 폭 넓게 채택되고 있다. 국내의 경우 지하철 1호선의 부천민자역사에 플로팅 슬래브 궤도가 도입되어 궤도하부 역사의 진동을 저감시키는 방안으로 사용되고 있으며, 경부고속선 2단계 등에 플로팅궤도의 부설이 예정되어 있다. 이와 같이 수요증가가 예상되는 상황에서 국내현장에 부설된 플로팅 궤도는 외국의 설계기술을 도입하였고 방진재 역시 수입에 의존하고 있다. 이는 플로팅궤도를 위한 궤도, 토목, 철도차량, 소음, 진동, 화공, 제작기술 등의 다양한 방진기술 축적이 부족하기 때문이다. 향후 설계에서 제작, 시공, 유지관리를 국내 독자적인 기술로 이루기 위해서는 플로팅 궤도의 원천기술 확보가 시급하다.

본고에서는 외국의 플로팅궤도 기술을 살펴보고 국내 최초로 플로팅 슬래브궤도가 부설된 부천민자역사의 진동저감 성능을 분석함으로써 저진동 궤도기술의 동향을 알아보고자 한다.

E-mail: ziminpa@krri.re.kr
Tel: 031-460-5774 Fax: 031-460-5749

2. 플로팅 슬래브궤도의 현황 및 기술요건 분석

궤도를 하부구조물과 분리한 궤도를 플로팅궤도라 하며, 열차 주행 시 궤도에서 발생하는 고주파수 대역의 진동은 레일패드로 억제시키고 궤도의 하부구조에 낮은 강성의 고무, 폴리우레탄, 스프링 등으로 된 방진재를 설치하여 궤도 하부구조에 미치는 진동을 분리시키도록 하고 있다. 현재 철도선진국에서 개발되어 부설실적이 있는 플로팅궤도는 크게 Precast-Slab 타입(홍콩, 프랑스 등), Mass-Spring System 타입(독일, 오스트리아 등), Floating Ladder System (일본) 타입으로 분류될 수 있으며, 궤도구조의 형식적 특성상 슬래브궤도에 주로 적용되고 있다. 본 절에서는 3가지 주요 플로팅궤도의 특성과 기술요건에 대하여 살펴보기로 한다.

2.1. MSS(Mass-Spring-System) 시스템

MSS(Mass-Spring-System)라고 불리는 상부구조물의 진동저감은 고유 주파수와 감쇠 비율에 좌우된다. MSS의 원리는 동적인 시스템에서 반응하는 증폭 요소로 구성되며 선형 SDOF(Single-Degree-Of-Freedom System)에 의해 간단한 방법으로 설명된다. 동적 시스템의 기본적인 원리들은 구조물의 진동전달 구현을 위해 진동하는 매개물의 질량을 m, 강성을 k, 감쇠를 c로 구성하는 SDOF시스템으로 축약하여 다양한 변수들로 변환시킬 수 있다. 이들 요소들은 MSS에 연결되는 방진재의 삽입손실에 큰 영향을 미친다. 진동저감에 대한 삽입손실은 기존 도상 궤도시스템과 MSS에서 열차에 의해 발생되는 진동 정도의 차로 정의된다. MSS의 동적 거동은 전적으로 방진재에 의해 영향을

받으며 적절한 이용을 위해서는 탄성 요소들에 대해 여러 그룹들의 요구사항들이 정의되어져야 한다. 최근 방진재는 스프링형 타입과 우레탄 또는 고무와 같은 매트를 주로 사용하고 있다.

2.1.1. 스프링형 방진재의 플로팅 슬래브궤도

스프링형 방진재를 사용하는 플로팅궤도는 콘크리트 슬래브에 매립된 스프링요소와 도상을 가진 트로프 형상(trough type)을 구성한다(Fig. 1 참조). 이와 같은 시스템에서 가장 중요한 요소는 슬래브궤도와 방진재의 주파수 조정(tuning frequency)이며, 4~8 Hz의 저주파 대역에서 진동저감 효과가 큰 것으로 알려져 있다. Fig. 2는 국내 고속철도 천안-안산역에 설치된 플로팅 슬래브궤도를 나타내고 있으며, 사용된 스프링 방진재의 고유주파수는 약 6 Hz인 것으로 알려져 있다.

Fig. 1. 스프링형 방진재가 설치된 플로팅 슬래브궤도.

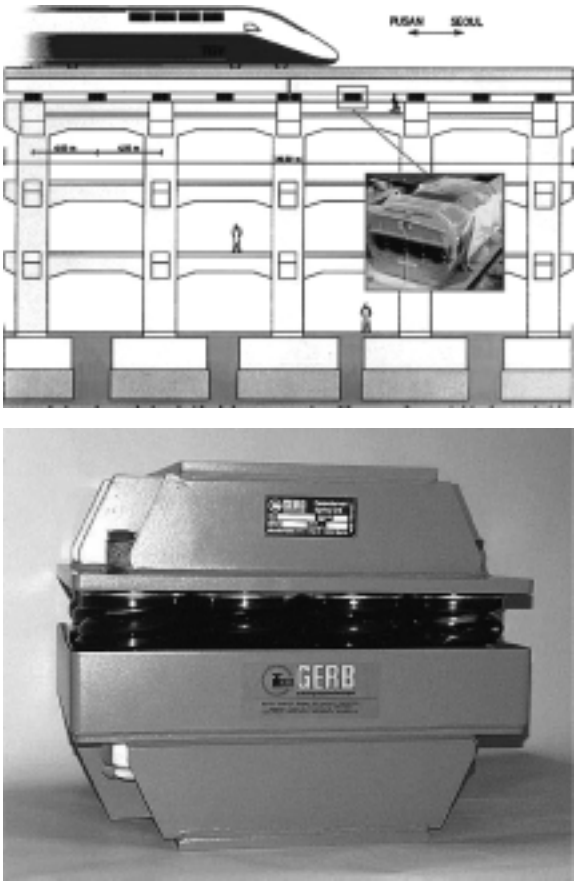


Fig. 2. 고속철도 천안-아산역의 플로팅 슬래브궤도 개념도와 방진재.

2.1.2. 매트형 방진재의 플로팅 슬래브궤도

MSS에서 탄성지지를 위하여 패드를 사용한 구조로 Fig. 3과 같이 폭 넓은 여러층이 구조물 진동을 줄이는데 이용된다. 이러한 층들은 체결구, 도상매트, 슬래브궤도와 트러프를 위한 탄성지지시스템을 포함하고 있다. 또한 궤도하부의 지지방식은 전면지지, 선형지지, 분산지지 시스템으로 설계될 수 있다(Fig. 4. 참조).

2.2. Precast Floating Slab 타입의 플로팅궤도 시스템

PFS(Precast Floating Slab)궤도는 진동을 줄이기 위한 방편으로 궤도의 중량을 늘림과 동시에 궤도의 탄성을 증대시키는 방법을 이용한다. 자갈궤도와 비교해 보았을 때, 슬래브 자체의 중량이 추가되며 슬래브 하부면에 방진재로서 탄성 패드를 삽입하기 때문에 고유진동수를 낮추고 진동의 세기를 줄이는 효과를 얻을 수 있게 된다. PFS궤도의 기본 구조는 Fig. 5와 같다. 구조적으로 특이한 사항은

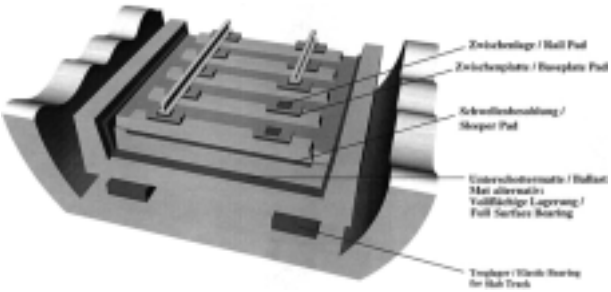


Fig. 3. 매트형 플로팅 슬래브궤도.

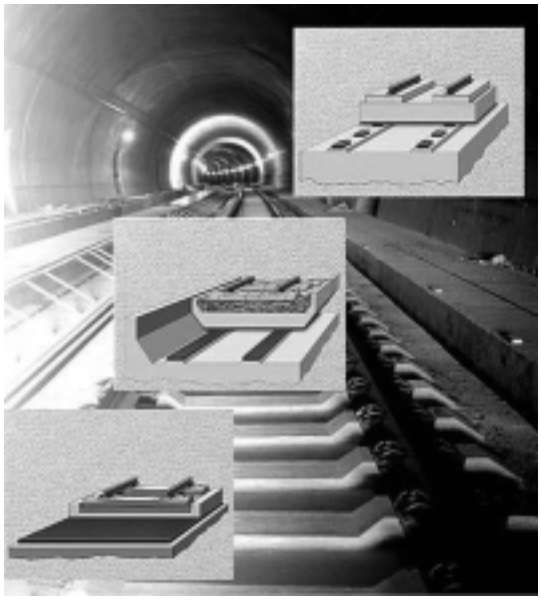


Fig. 4. 매트지지 방식에 따른 분류.

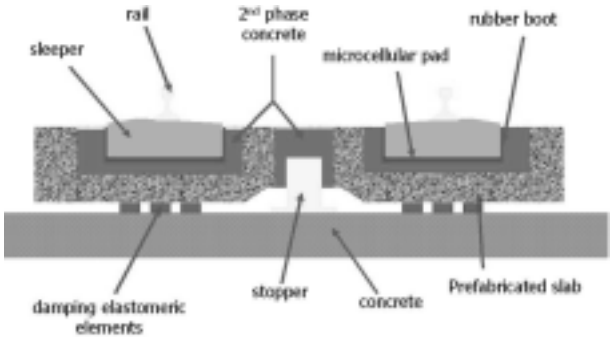


Fig. 5. PFS궤도의 기본 구조.

슬래브의 중앙에 원형의 Stopper를 사용하고 있다는 점이다. 이 Stopper는 기본적인 궤도의 선형을 잡아주는데 이용되고, 선형을 조정한 후에는 Stopper와 슬래브 사이의 공간을 모르타르 주입을 통해 메워서 고정하게 된다. 이렇게 고정된 Stopper는 열차의 가속 및 감속 또는 곡선부에서 하중을 받을 때 방진재의 탄성으로 인하여 슬래브가 종 또는 횡방향으로 움직이는 거동을 제어하는 역할을 한다.

PFS궤도의 진동저감 메커니즘은 세 단계로 이루어진다(Fig. 6). 이는 레일 패드에 의한 1단계 감소와 Independent Blocks의 Rubber Envelope과 Microcellular Pad에 의한 2단계 감소, 그리고 슬래브 저면의 탄성 패드에 의한 3단계 감소이다.

2.3. Floating Ladder System

일본에서 개발된 ladder 슬래브궤도의 특성을 고려한 FLS (Floating ladder system)궤도의 종류에는 방진스프링식과 방진고무식이 있다(Fig. 7). FLS는 복합적인 레일체결시스템을 방진장치에 따라 콘크리트노반에서 적은 지지스프링 계수로 부상시킨 구조이다. FLS궤도의 방진효과로서는 열차주행시 콘크리트선로의 연직방향 가속도파형에 대해서 스펙트럼 분석된 결과를 Fig. 8에 보이고 있다. 플로팅에 의해 50 Hz 이상의 영역에 대해서 큰 진동저감효과를 얻기 때문에 구조물 소음의 저감도 기대할 수 있다.

3. 플로팅 슬래브궤도의 설계기법

2절에서 소개된 플로팅시스템에서 국내에 부설된 오스트리아의 MSS 시스템에 대한 기술 분석을 통하여 설계절차를 파악하고 설계의 흐름도를 Fig. 9에 나타냈다. 설계

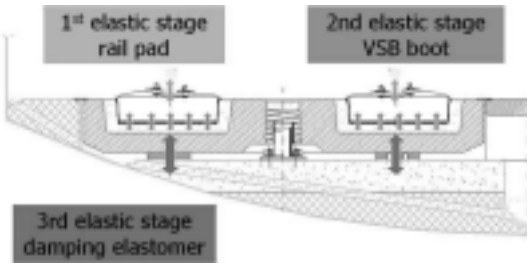


Fig. 6. PFS의 진동 저감 메커니즘.

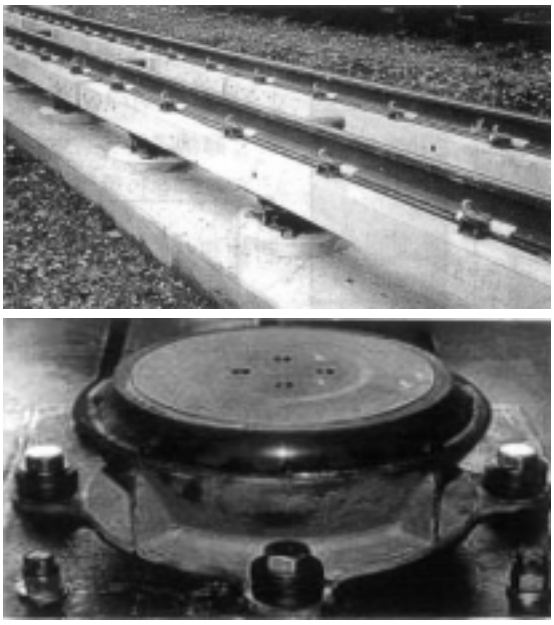


Fig. 7. Floating Ladder System(일본).

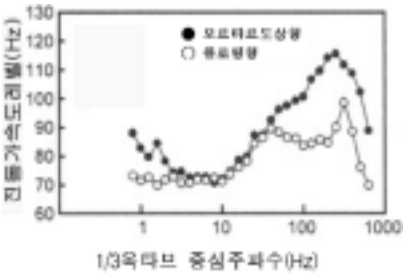


Fig. 8. 열차주행시의 연직가속도(콘크리트노반).

단계별 세부사항을 살펴보면 다음과 같다. 슬래브궤도의 하중조합(Table 1)을 적용하여 정적 유한요소해석을 통해 상부슬래브의 휨모멘트 및 처짐을 1차적으로 산정하고 이를 토대로 방진용 스프링의 하중-변위 곡선을 산정한다. 처짐량을 기준으로 산정된 스프링의 하중-변위 곡선을 이용하여 상부 슬래브와 하부슬래브 전체에 대한 구조해석을 수행하고, 수치해석 모형을 구성하는 데 있어서는 Fig. 9의 우측에서 보는 바와 같이 두 개의 질량체인 상부 슬래브와 하부슬래브를 방진스프링과 지반스프링으로 연결시킴으로써 전체 구조계를 표현한다. 수치해석 모형의 구성 후, 최종적으로는 철도에서 사용하는 입력진동을 기준으로 하부 슬래브에서 발생하는 속도 및 진동응답을 산출함으로써 일차적으로 설계된 제원 및 단면과 방진스프링 각각의 유효성을 평가한다.

한국철도기술연구원에서 플로팅 슬래브궤도의 진동저감 성능평가 및 설계를 위한 프로그램을 개발하였으며, 프로그램은 5개의 클래스로 구성되어 개발되고 있다(Fig. 10). 먼저 그래픽 사용자 인터페이스 클래스(GUI Classes)를 기반으로 입력 클래스(Input Data Classes), 해석 클래스(Analysis Classes), 자동 검토 클래스(Optimal Design Check Classes), 시방규준 클래스(Code Classes)로 구성되어있다.

Table 1. 부천역사 Floating 슬래브 해석 시 사용된 하중조합

구 분	내 용
활하중	2 Locomotive Axle Load Locomotive Model #7100,7200,7300 - P = 22.0 ton Locomotive Model #2000 - P = 23.5 ton
하중조합 1	콘크리트 슬래브의 사하중
하중조합 2	슬래브, 자갈, 침목, 레일 각각의 사하중
하중조합 3	각 장소에서의 활하중
하중조합 4	단면간 접속부(조인트)에서의 이산하중

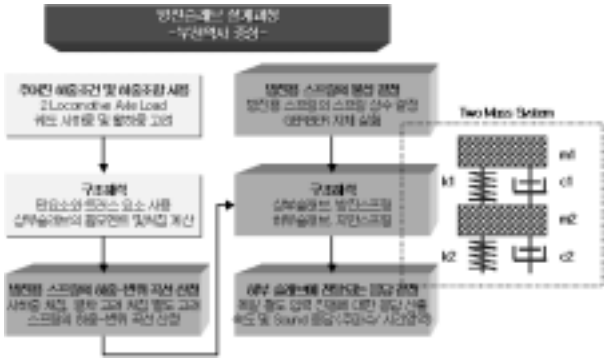


Fig. 9. 저진동궤도 시스템 설계 절차.

Fig. 10. 프로그램의 클래스 구조도.

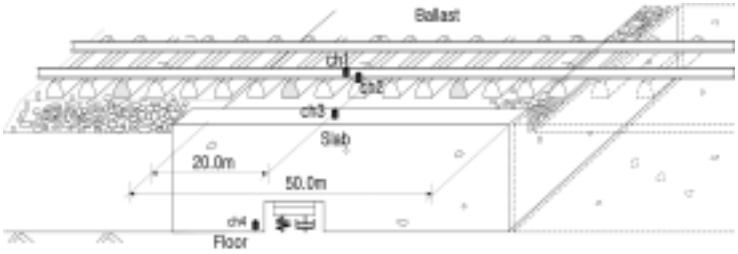


Fig. 11. 부천역사의 방진슬래브궤도 진동계측망.

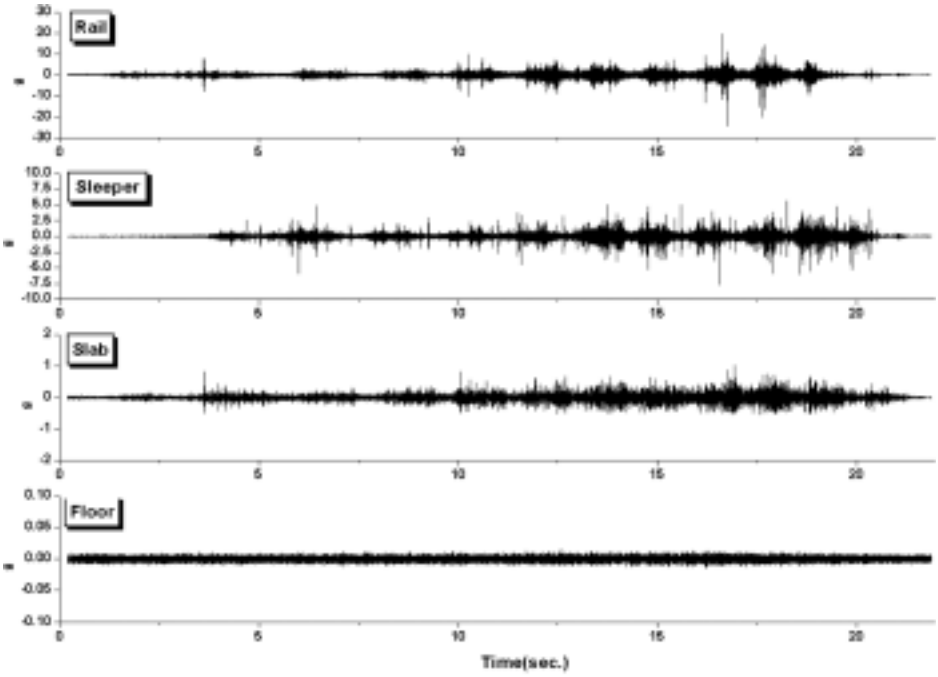


FIg. 12. 측정위치별 가속도 시간이력(41 km/h)-슬래브 중앙.

4. 국내 플로팅 슬래브궤도의 성능측정 결과 및 분석

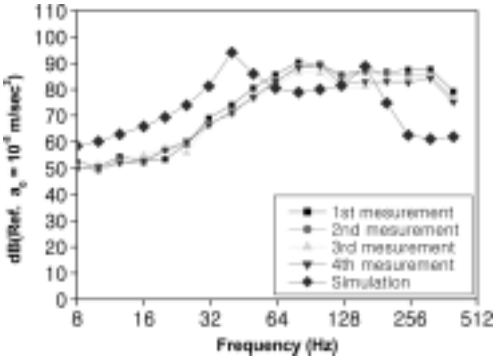
본 절에서는 MSS 타입의 플로팅 슬래브궤도가 부설된 부천역사 현장에서 진동을 계측하고 차량의 주행속도의 변화에 따른 궤도의 방진효율성을 검토하였다. Fig. 11은 진동을 측정한 계측망도를 나타낸다.

4.1. MSS 플로팅궤도의 측정결과

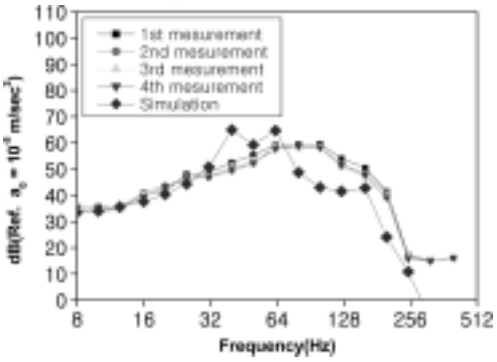
Fig. 12는 플로팅 슬래브궤도의 중앙에서 궤도 각부의 가속도 시간이력을 나타낸 그림이다. 41 km/h 주행시 레일은 최대 17 g, 침목 5.1 g, 슬래브에서 0.9 g, 플로팅 슬래브 바닥면에서 0.02 g의 가속도 값을 보이고 있다. 측정결과 플로팅 슬래브궤도 하부면의 가속도는 레일가속도의 0.12%까지 저감시키고 있으며 이는 슬래브 가속도의 2.2%에 해당한다. 그러므로 플로팅 방진 슬래브궤도의 수직방향 가속도는 상당히 많은 양이 저감되는 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 플로팅 슬래브궤도의 슬래브와 하부구조물에서 측정한 진동레벨을 보여주며, 이들 결과로부터 구조물 상판에서의 진동레벨이 궤도슬래브에서의 진동에 비해 15% 이상 저감되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 14(a)는 열차통과 속도에 따른 방진슬래브궤도 구조물의 1/3 옥타브 속도레벨을 나타낸 것이다. Fig. 14(a)로부터 진동저감 효과는 속도에 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다. Fig. 14(b)는 방진슬래브궤도에 대한 구조물의 Overall Level비로 정의된 자갈도상궤도의 방진효율을 나타낸 것

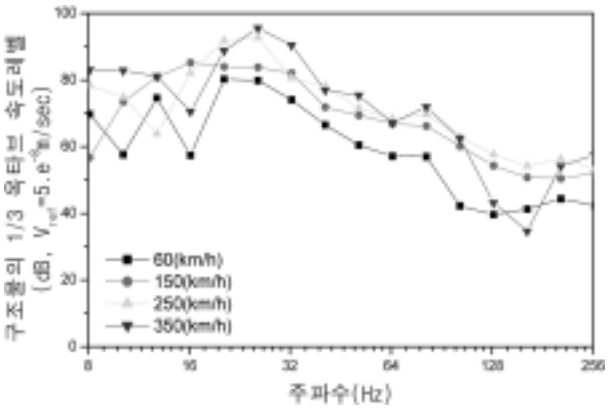


(a) Slab of track

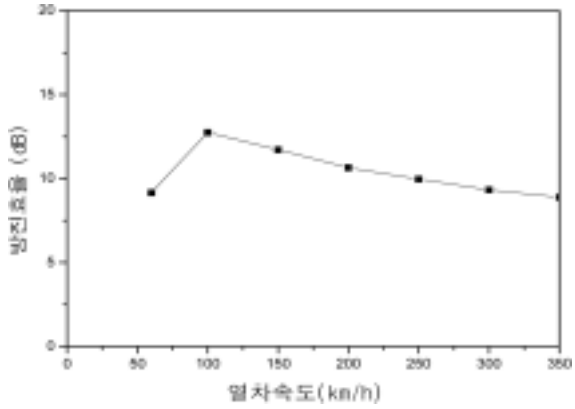


(b) Floor of structure

Fig. 13. 계측결과와 해석결과와의 비교.



(a) 진동레벨



(b) 진동저감효과

Fig. 14. 열차통과속도에 따른 하부구조물의 방진효율성 분석.

으로, 특정속도에서 최대방진효과가 있음을 알 수 있다. 이러한 사실로부터 열차통과속도가 일정하게 주어지는 노선에 부설할 플로팅 슬래브궤도를 설계하는 경우, 주어진 속도에 맞게 슬래브패드 강성 및 감쇠계수를 최적화할 필요가 있음을 알 수 있다.

5. 맺음말

최근 환경에 대한 관심과 요구수준이 높아지고 있으며 철도운행 시 발생하는 진동에 대한 문제도 결코 예외가 될 수 없다. 궤도를 역사의 상부에 부설한 선하역사, 또는 철도 인접건물에서 철도진동으로 인한 민원이 지속적으로 제기되고 있다. 이에 외국의 저진동 궤도기술 및 제품을 도입하여 성공적으로 부설한 예가 있으며, 향후 지속적으로 그 수요가 증가될 것으로 예상된다. 따라서 국내에서도 저진동 궤도기술에 대한 관심이 높아지고 있으나, 설계와 제작, 시공에 관련된 핵심기술의 부족으로 여전히 외국기술과 제품을 사용하고 있으며, 고비용으로 인하여 기술의 확산에 걸림돌이 되고 있다. 본고에서 살펴본 외국의 플로팅 궤도 기술을 확보하기 위하여 국내 슬래브궤도의 동적해석, 방진재 개발, 플로팅궤도의 방진 효율성 평가기술, 시공기술 등이 시급히 연구되어야 할 것이며, 아울러 진동저감에 따른 소음저감에 대한 분석 및 검토가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Clough, R. W. and Penzien, J., "Dynamics of Structures," Mcgraw-Hill(1993).
2. Fletcher, D. Q., Herrmann, L. R., and Leonard, R., "Elastic Foundation Representation of Continuum," *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, **97**(EM1), 95～107(1972).
3. FRA, "High-Speed Ground Transportation Noise and Vibration Impact Assesment," Final Draft, pp. 6-8～6-9 (1998).
4. Grassie, S. L., Gregory, R. W., Harrison, D., and Johnson, K. L., "The dynamic response of railway track to high frequency vertical/lateral/longitudinal excitation," *J. Mech. Engng. Sc.*, **24**, 77～102(1982).
5. Gucunski, N. and Woods, R. D., "Numerical simulation of the SASW Test," *Soil Dymanics and Earthquake Engineering*, **11**, 213～227(1992).
6. Esveld, C., "Modern Railway Track," Head of quality Control and Rail Technology NS Permanent Way Department(1989).
7. Grag, V. K. and Dukkipati, R. V., "Dynamic of railway vehicle systems," Academic Press(1984).
8. Sato, Y., "Railway Technical Research Report-Study on High Frequency Vibrations in Track," The Railway Technical Research Institute, Japanese National Railways, No. 1013(1976).
9. Esveld, C., Modern Railway Track, Head of quality Control and Rail Technology NS Permanent Way Department(1989).
10. Achenbach, J. D. and Sun, C. T., Moving Load on A Flexibly Supported Timoshenko Beam(1965).
11. Steele, C. R., The Timoshenko Beam With a Moving Load(1968).
12. Garg, V. K. and Rao V. Dukkipati, Dynamics of Railway Vehicle Systems(1984).
13. FEA Ltd. LUSAS Modeller user Manual.
14. Cook, R. D., Malkus, D. S., and Michael E. Plesha, Concepts and Applications of Finite Element Analysis, third edition, WILEY(1989).
15. Chopra, A. K., Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering, PRENTICE HALL (1995).
16. Grassie, S. L., "Resilient railpads, Their dynamic behavior in the laboratory and on track," *Proc. Instn. of Mech. Engrs.*, **203F**, 25～32(1989).
17. Thompson, D. J. and Nijman, E. J. M., "Railway rolling noise. Measurements of the dynamic properties of five rail fastner systems," TNO-report for the C163 ORE Committee(1991).
18. Saurenman, H. J., Nelson, J. T., and Wilson, G. P., "Handbook of Urban Rail Noise and Vibration Control," Report No. USTM-MA-06-0099-82-1, Wilson, Ihlrig & Associates(1982).