

철도교량의 동적거동 특성을 고려한 자갈도상궤도의 상태추정에 관한 연구

An Estimate of Ballast Track Condition on Dynamic Behavior of Railway Bridge

권오순* 최정열** 강명석*** 이희업**** 박용걸*****
Kweon, Oh Soon Choi, Jung Youl Kang, Myoung Seok Lee, Hee Up Park, Yong Gul

ABSTRACT

Many railway-advanced countries are using the various types of track to reduce the track maintenance and repair cost according to the improvement of velocity. It spends on much maintenance and repair cost for ballast track due to abrasion of ballast, track irregularity and unisotropic ballast-support stiffness. The ballast track on railway bridge is accelerating the deterioration of ballast according to interaction of railway bridge and track. As continuing the deterioration, it is caused dynamic loads. Due to these effects, it increases negative loads of track and bridge. However, when designing the railway bridge, the effect of ballast track was applicable only dead load, so elastic behavior effect of ballast track is not influenced.

Therefore, this paper presumes the stiffness of ballast track on railway bridge considering dynamic behavior of railway bridge, it was evaluated that effect on dynamic behaviors of railway bridge according to ballast track stiffness.

key words : field test, interaction, dynamic behavior, ballast track stiffness

요 지

기존 노선의 속도향상에 따른 궤도 유지보수비의 절감을 위하여 여러 철도 선진국에서는 다양한 형태의 궤도를 고안하여 사용하고 있지만 현재까지 우리나라의 경우 대부분의 선로는 자갈도상이다. 그러나 현재 국철 및 지하철의 경우 장기사용에 따라 자갈도상기능이 급격히 저하되고 연간 증가되고 있는 열차운행 통과횟수로 인하여 장·단기적인 궤도유지관리에 문제점이 발생하고 있다. 또한 자갈도상 궤도는 자갈마모, 궤도틀림 및 균일하지 않은 궤도지지 강성 등의 문제점으로 인하여 막대한 유지보수 비용이 사용되고 있다. 철도교량상 자갈도상 궤도는 교량과 궤도의 상호작용으로 인하여 자갈도상의 노후화 진전속도가 일반 토노반 및 지하, 터널구간보다 빠르며 이러한 궤도의 노후화는 열차하중의 동적 충격하중을 증폭시켜 궤도 및 교량의 부담력을 증가시키게 된다. 또한 교량상 자갈도상 궤도가 노후되어 하중분산 및 진동감쇠 등과 같은 정상적인 자갈도상 궤도로서의 역할을 수행하지 못하게 된다면 교량이 부담하는 정, 동적하중의 영향이 더욱 가중되고 이는 교량의 거동특성에 영향을 미치게 된다. 따라서 적정 수준의 궤도상태를 유지함으로써 궤도의 적정탄성력을 확보하고 이를 통해 교량의 동적하중부담을 저감시키는 것이 중요하다. 그러나 현행 철도교량 설계 시 적용하는 궤도의 영향은 고정하중으로만 고려되어, 이러한 자갈도상 궤도의 탄성거동 영향이 반영되지 못하는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 철도교량의 동적거동 특성을 감안한 교량상 자갈도상 궤도의 탄성력을 추정하고자 공용중인 철도교량 및 자갈도상궤도에 대한 현장측정 및 해석을 통하여 실교량의 동적응답특성을 유발하는 운행선 자갈도상 궤도의 탄성력을 추정하고, 자갈도상궤도의 탄성력변화가 철도교량의 동적거동에 미치는 영향을 검토하였다.

주 요 어 : 현장측정, 상호작용, 동적거동, 자갈도상 궤도강성

1. 서 론

기존 노선의 속도향상에 따른 궤도 유지보수비의 절감을 위하여 여러 철도기술 선진국에서는 다양한 형태의 궤도를 고안하여 사용하고 있다. 하지만, 현재까지 우리나라의 경우 대부분의 선로가 자갈도상이고 자갈도상궤도는 자갈마모, 궤도틀림 및 균일하지 않은 궤도지지 강성 등의 문제점으로 인해 유지보수비용이 상승하고 있는 실정이다. 따라서 자갈도상을 갖는 궤도 하부구조의 거동특성 분석 및 이를 통한 효율성의 증진은 필수적이라고 할 수 있다.

* 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 석사과정, (주)고려개발 토목사업본부 상무, 일반회원
E-mail : oskweon@kdc.co.kr

** (주)대한콘설탄트 철도부 궤도팀 사원, 공학석사, 정회원

*** (주)삼보기술단 철도부 대리, 공학석사, 비회원

**** 한국철도기술연구원 철도구조물연구팀 팀장, 정회원

***** 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 교수, 공학박사, 정회원

궤도구조는 열차하중의 지지와 열차주행의 안내라고 하는 중요한 역할을 수행하는 것이며, 열차의 주행 안전성이나 폐적성이 충분히 확보될 수 있어야 한다. 이를 위하여 궤도 설계에 있어서 일반의 토목 구조물과 같은 모양으로 궤도부재의 강도 및 내구성에 관한 검토가 필요하다. 더욱이, 유도상 궤도의 경우는 열차의 반복 통과에 의한 자갈도상이나 노반의 점진적인 침하, 변형의 발생, 궤도틀림에 따른 궤도형상의 복원, 보수 작업이 일상적으로 필요하기 때문에 유지하여야 할 궤도상태나 보수능력 등을 고려하면서 궤도상태 변화 진행에 관한 검토를 행하는 것이 필요하게 된다.

또한 철도교량은 교량과 궤도의 상호작용으로 인하여 자갈도상의 노후화를 촉진시키고 동적 하중 변동을 유발하여, 노반압력 증가나 궤도의 하중부담력을 증가시킨다. 현행 철도교량 설계 시 적용하는 궤도의 영향은 고정하중으로만 고려되어, 자갈도상 궤도의 탄성 거동 영향이 거의 반영되지 못하고 있는 실정이다. 이를 보완하기 위해서 자갈도상 궤도의 탄성 거동 및 상태변화를 고려한 철도교량의 동적 거동 특성을 현장측정 및 해석을 통해 입증하고자 한다.

2. 교량상 자갈도상 궤도의 탄성개요

교량설계 시 자갈도상 궤도의 자갈을 비롯한 탄성재료의 탄성력은 설계 및 해석에 적용되지 않고 궤도사하중으로만 고려되는 것이 일반적이다. 일반적인 교량상 자갈도상 궤도의 탄성개요도는 Fig. 1과 같다. 다만 자갈도상 궤도의 설계 시에만 Fig. 2와 같이 레일패드와 도상자갈의 탄성력을 각각 k_1 과 k_2 로 고려하여 궤도의 정, 동적 설계에 활용하고 있는 실정이다. 교량상 자갈도상궤도의 교량-궤도 해석 및 설계에서 교량은 강화노반으로 고려되며 움직이지 않는 것으로 감안된다.

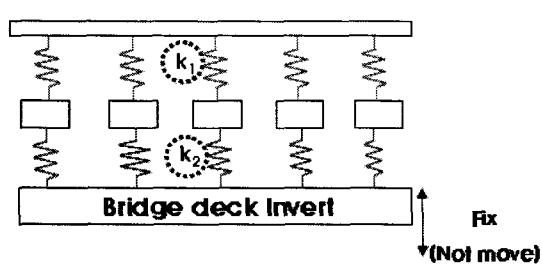


Fig. 1 자갈도상 궤도의 탄성개요도

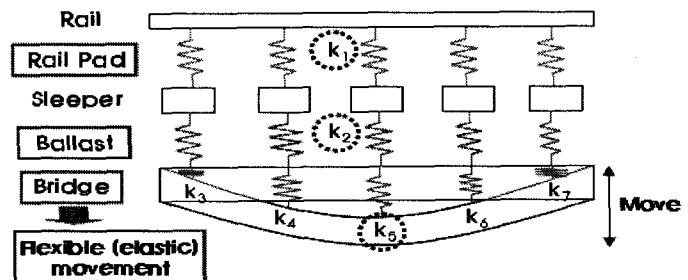


Fig. 2 실제 자갈도상 궤도의 탄성개요도

하지만 실제적으로는 Fig. 2와 같이 교량의 경우 열차주행에 따라 일정한 탄성범위 내에서 탄성거동 ($k_3 \sim k_7$)을 하게 되며 교량의 종방향 강성 차이 및 경간장에 따라 교량변위에 차이를 나타내며 거동하게 된다. 따라서 교량의 종방향 거리차이에 따라 하부 노반의 변위차가 발생하게 되고 이러한 변위차 이가 상부 궤도의 동적거동에 따른 변위발생과 함께 궤도의 탄성거동에 영향을 미치게 될 것으로 판단된다. 실제로 교량의 경우 일반 토노반이나 터널구간보다 도상자갈의 열화진전 속도가 비교적 빠르게 진전되는 것으로 기존의 연구결과 나타난바 있으며 현장궤도의 상태 또한 이를 뒷받침하고 있는 것으로 나타났다. 교량의 경간중앙부(최대변위발생지점)에서의 도상자갈의 수축, 이완은 교량상 다른 지점에 비해 과다하며 이에 따라 도상자갈의 파쇄가 가중되어 세립화 진전이 가속화되고 고결화가 진전되어 도상자갈의 탄성력이 소실되는 현상이 진행될 것이다. 따라서 교량상 자갈도상 궤도의 경우 교량의 동적거동의 특성을 감안하여 도상자갈의 다짐 및 보충을 비롯한 일상적인 유지관리가 이루어짐이 바람직할 것으로 판단된다. 1997년 3월 일본에서 출간된 “철도구조물 등 설계기준·동해설, 궤도구조[유도상 궤도](안)“에 따르면 궤도구조해석 시 도상의 탄성계수를 도상 두께에 관계없이 일률적으로 200MN/m 으로 정하고 있다. 따라서 건전한 자갈도상의 목표 도상탄성계수는 대략 200MN/m 정도로 추정할 수 있을 것으로 판단된다. 기존의 연구결과, 일반적으로 교량상 자갈도상 궤도구간에서 측정한 궤도의 동적응답에 따른 도상탄성계수는 $250\sim 300\text{MN/m}$ 의 범위로 산출되었으며, 아와 같은 도상 탄성계수만으로 도

상의 건전성을 판단하기는 어려우나, 토노반 및 터널구간에 비해 교량상 자갈도상 궤도에서의 궤도 탄성소실 정도가 다소 높은 경향을 보이는 것으로 나타났다.



Fig. 3 교량상 자갈도상 궤도의 노후된 상태(세립화 및 고결화)

또한 궤도설계 시 EVA 레일패드는 설계 탄성계수를 일반적으로 400kN/mm 로 가정하고 설계에 반영한다. 이것은 전술한 바와 같이 EVA 레일패드의 경우 탄성력의 범위가 비교적 커서 탄성재료로서 사용되기보다는 자갈도상 궤도에서는 절연 및 침목보호차원에서 적용되는 것이 일반적이기 때문이다.

이러한 레일패드의 경우 레일교체 시 레일과 함께 교체되는 것이 일반적이며 레일의 경우나 레일패드의 경우 교체수명을 통상 15년 내외로 보고 있다. EVA 레일패드의 경우 피로경화에 의한 패드의 허용한도를 연간 10%수준으로 증가하는 것으로 가정하여 레일패드의 15년 공용후의 탄성계수를 다음 그림과 같이 고려하였다.

또한 도상자갈의 경우 자갈갱환 시기 도래시의 도상자갈의 고결화에 따른 고탄성화 수준을 20%로 가정하여 해석에 적용하였다. 이와 같은 레일패드 및 도상자갈의 탄성력을 다음 식 (1)을 이용하여 자갈도상 궤도의 종합 탄성계수를 추정하였으며 이를 해석에 적용하였다.

$$k_T = \frac{1}{\frac{1}{k_R} + \frac{1}{k_B}} \quad \text{식 (1)}$$

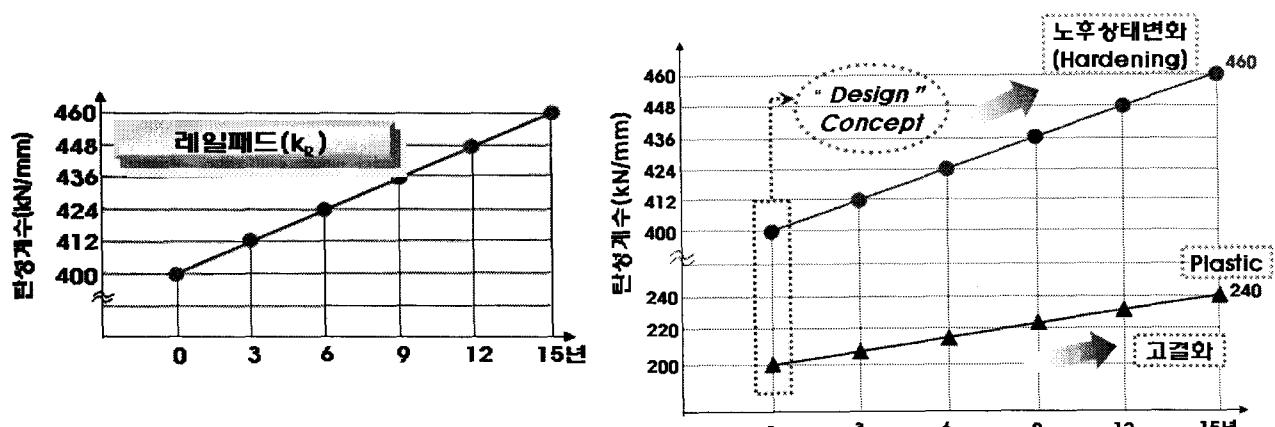


Fig. 4 레일패드 및 도상자갈의 탄성계수 변화 추정

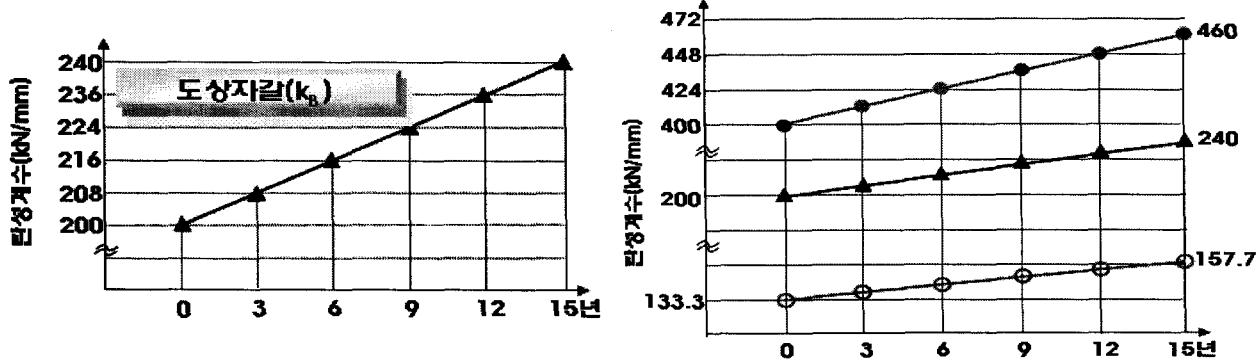


Fig. 5 자갈도상 궤도의 종합탄성계수 추정

자갈도상 궤도는 설계당시 레일패드의 탄성수준을 비교적 높게 가정하고 도상자갈의 탄성수준은 일반적인 양호한 자갈의 목표 탄성계수 수준인 200kN/mm로 고려하여 종합탄성계수가 약 133kN/mm 정도로 감안하고 있으나 공용중인 자갈도상 궤도는 끊임없이 열화 및 노후화가 진전되고 있으며 특히 도상자갈의 경우 일반적인 탄성재료와는 상이한 소성거동을 하게 된다. 이에 따라 당초 고려하였던 자갈도상 궤도의 일반적인 탄성수준보다 비교적 큰 궤도탄성의 수준으로 변화되며 이와 같은 궤도의 고탄성화가 궤도 및 교량의 동적응답에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 따라서 본 장에서 수행한 궤도구조해석의 결과를 이용하여 유한요소해석모델에 적용하여 궤도의 탄성계수변화(노후화)가 교량의 동적응답에 미치는 영향에 대하여 고찰해 보고자 한다.

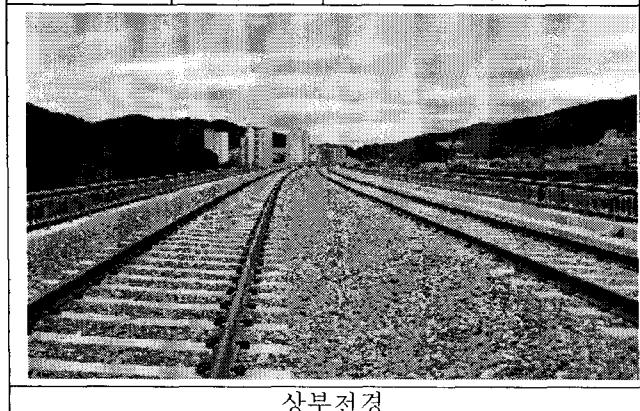
3. 현장측정

3.1 대상선로 개요

본 연구의 대상선로는 교량 및 궤도 부설 후 약 1년가량의 공용기간을 거친 선로로써 상부구조의 경우 P.S.C-Beam 구간과 Steel Box Girder 강합성 구간으로 구분할 수 있으며 하부구조는 II형과 다주라멘식 교각으로 구성되어 있다. 그중 P.S.C-Beam 구간을 측정대상 구간으로 선정하였으며 대상구조물의 개요는 Table. 1과 같다.

Table. 1 대상선로 개요

| 구 분 | 내 용 | | 구 분 | 내 용 |
|------|-----|--------|------|---------|
| 연 장 | | 25m | 교 폭 | 10.9m |
| 상부구조 | 형식 | P.S.C | 곡선반경 | R=1,300 |
| | 받침 | 스페리칼받침 | 설계하중 | LS-22 |
| 궤도구조 | 레일 | 60kg K | 도상 | 자갈도상 |
| | 침목 | PC 침목 | 레일패드 | EVA 패드 |



상부전경



측면전경

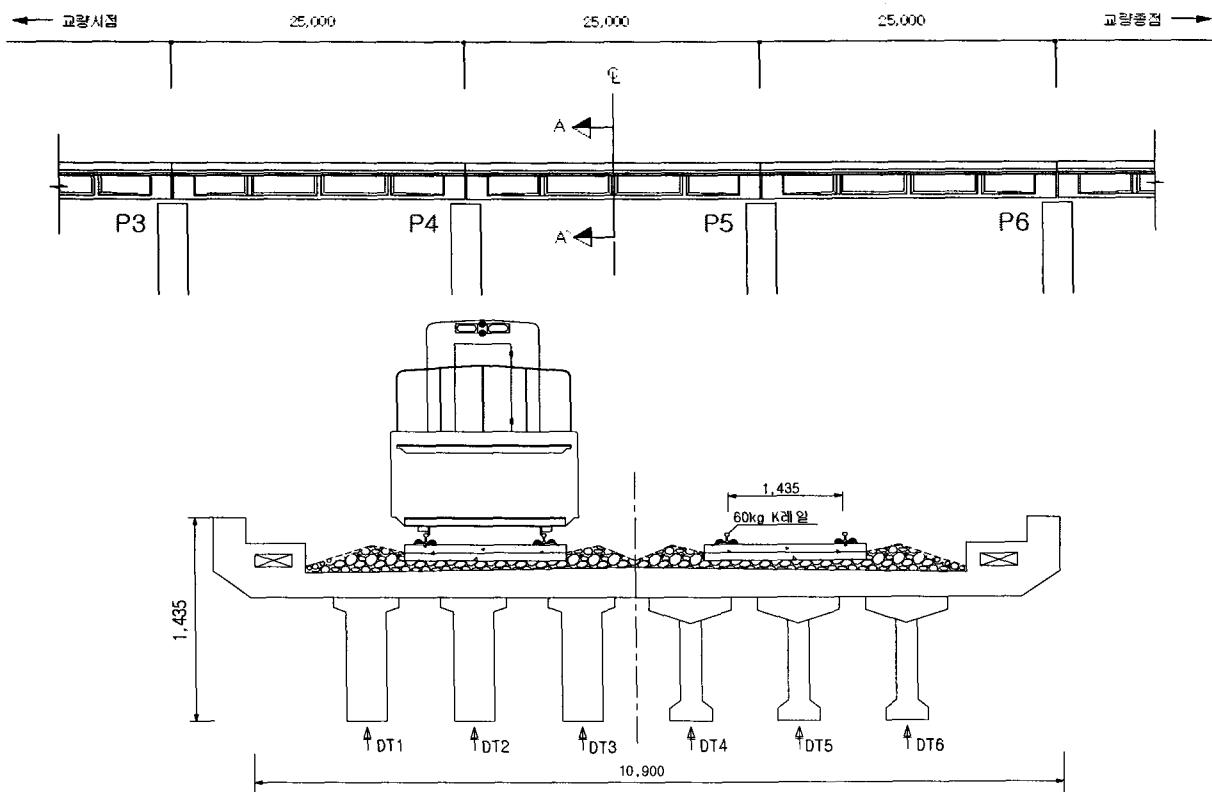


Fig. 6 측정경간 위치 및 센서설치 위치도

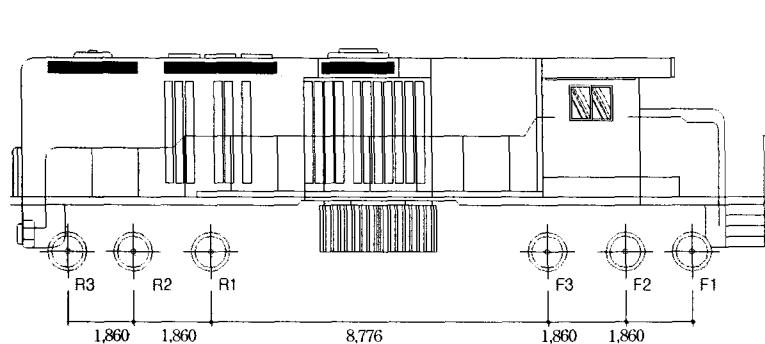
동적재하시험은 구조물의 동적 거동을 조사, 측정하기 위한 것으로 교량의 실 충격계수 및 가속도 등의 동적 특성을 측정하여 대상교량의 동적거동 특성을 검토하기 위한 기본 자료를 구하고자 실시하였다.

동적재하시험은 주행하중에 의한 동적응답을 구하는 시험으로서 주행속도는 시속 10km/h 1회 실시 후 10km/h씩 증가, 현장의 여건을 고려하여 시험차량의 최대속도까지 주행하도록 하여 동적시험을 실시한다.

3.2 동적재하 시험방법

재하하중은 디젤기관차 7200호 1대를 사용하였으며 시험경간 내 재하차량 이외에 일반차량 등이 통제된 상태에서 실시하였다. 또한 차량 주행 방향은 양방향으로 주행하였다.

대상교량의 정·동적재하시험에는 7200호 기관차를 사용하였으며, 재하차량의 제원 및 중량은 Fig.7과 같다.



| 구분 | 디젤기관차 |
|-----|----------|
| 차축수 | 6 |
| 총중량 | 1,320 kN |
| 축중량 | 220 kN |
| 폭 | 3.27 m |
| 높이 | 4.25 m |

Fig. 7 재하차량의 제원 및 축하중

3.3. 충격계수 평가

충격계수의 산정시 5~10km정도의 서행에 의한 응답을 정적 응답치로 간주하고 이 값을 기준으로 속도별 응답치를 이용하여 충격계수를 산정하는 방법이 일반적으로 사용되나, 최초 서행시와 매 속도마다의 응답은 운전자의 숙달, 습관 등으로 달라질 수 있다. 따라서 각 속도별 동적응답을 0.6Hz~1.0Hz 사이의 Low Pass Filter로 필터링하여 의사정적 응답곡선을 구하고 필터링 전후의 값을 이용하여 각 속도별 충격계수를 구하는 방법을 사용하였다.

산정방법은 동적주행 시험의 각 속도별의 동적응답 곡선을 Low Pass Filter에 의해서 필터링한 최대 정적응답(Dsta) 곡선을 기준으로 계측 최대 동적응답치(Ddyn)와 비교하여 실측 충격계수를 산정한다.

$$\text{■ 동적 증폭율(D.L.F)} = \frac{D_{dyn}}{D_{sta}} \quad \text{■ 실측 충격계수} = D.L.F - 1$$

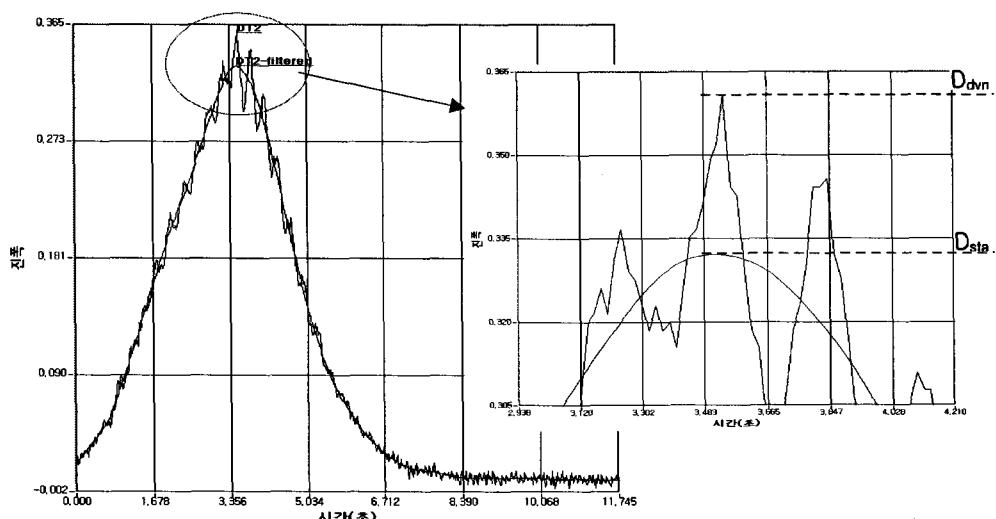


Fig. 8 동적거동(처짐) 산정 예

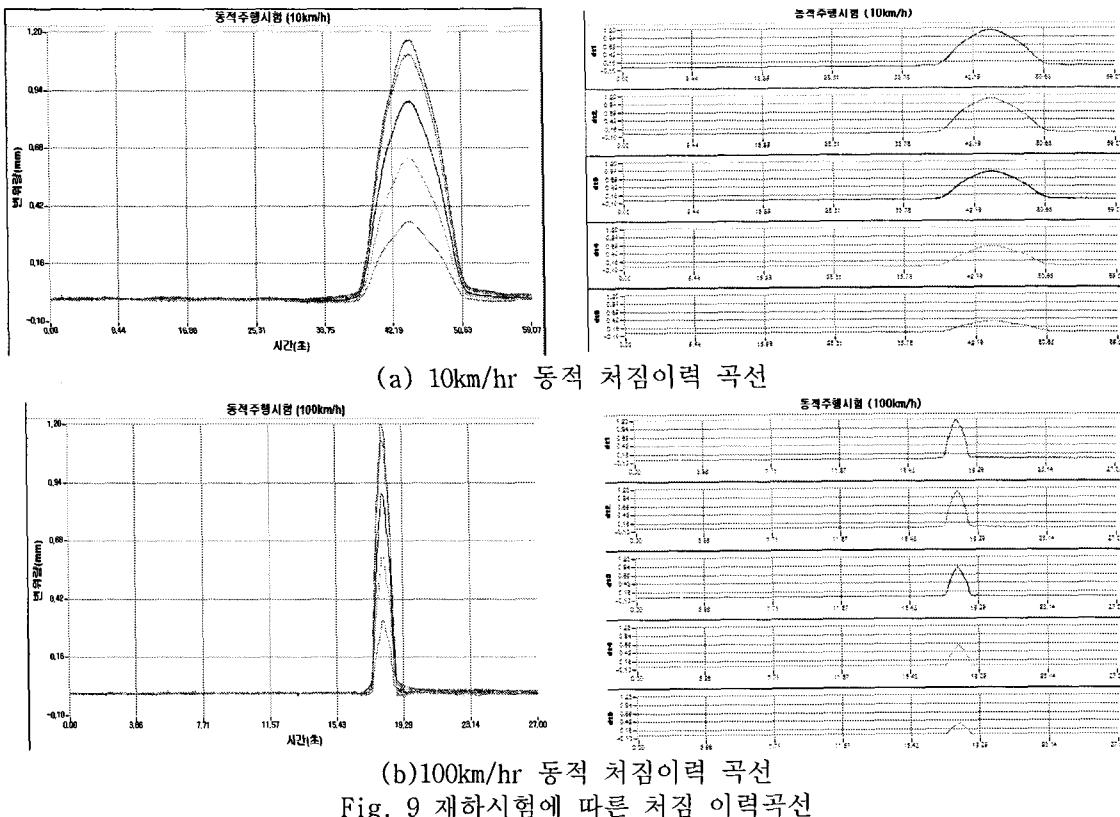
3.4. 현장측정 결과 및 평가

1) 처짐 측정결과

Table. 2 처짐 측정 결과(filtering 전)

| Gauge ID Load Case \ | DT 1 (mm) | DT 2 (mm) | DT 3 (mm) | DT 4 (mm) | DT 5 (mm) | DT 6 (mm) |
|-------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 10km/hr | 1.170 | 1.104 | 0.894 | 0.636 | 0.351 | 0.204 |
| 20km/hr | 1.168 | 1.099 | 0.891 | 0.641 | 0.355 | 0.203 |
| 30km/hr | 1.158 | 1.097 | 0.885 | 0.633 | 0.345 | 0.201 |
| 40km/hr | 1.159 | 1.098 | 0.887 | 0.625 | 0.350 | 0.196 |
| 50km/hr | 1.163 | 1.095 | 0.885 | 0.637 | 0.360 | 0.205 |
| 60km/hr | 1.163 | 1.092 | 0.885 | 0.625 | 0.335 | 0.195 |
| 70km/hr | 1.160 | 1.096 | 0.867 | 0.614 | 0.329 | 0.184 |
| 80km/hr | 1.186 | 1.128 | 0.906 | 0.645 | 0.339 | 0.163 |
| 90km/hr | 1.174 | 1.095 | 0.873 | 0.612 | 0.320 | 0.165 |
| 100km/hr | 1.207 | 1.128 | 0.889 | 0.616 | 0.329 | 0.165 |

이동하중에 의한 교량의 부재들이 정상적인 탄성거동을 하는지 파악하기 위하여 처짐에 대한 이력곡선을 분석하였다. 그 결과 처짐 이력곡선은 Fig. 9와 같이 연속성을 유지하고 있으며, 시험차량의 통과 후 부재의 처짐 복원이 정상적으로 나타나고 있다.



2) 충격계수 산정

교량의 노면상태, 차량의 주행속도, 지간장, 사하중과 활하중의 비, 구조적 특성 등의 다양한 인자들에 의하여 정적하중보다 교량에 더 큰 영향을 줄 수 있는 활하중에 의한 충격영향 정도를 파악하기 위해 동적주행시험시 측정된 처짐값을 이용하여 충격계수를 구하였다. 동적재하시험을 통하여 산정된 실측 최대 충격계수는 100km/h일때 DT6에서, 이론적 충격계수인 0.338보다 작은 0.146으로 측정되어 차량의 주행에 의해 교량에 가해지는 충격은 설계시의 예상 값보다 작은 것으로 나타났다.

Table. 3 대표 충격계수 산정

| 구 분 | 범 위 | 속 도(km/h) | 거 더 | 충격계수 |
|---------|---------------|-----------|-----|-------|
| 설계치 | - | - | - | 0.338 |
| 측정치 | 0.004 ~ 0.015 | 10 | G6 | 0.015 |
| | 0.006 ~ 0.005 | 20 | . | 0.005 |
| | 0.001 ~ 0.015 | 30 | . | 0.015 |
| | 0.006 ~ 0.043 | 40 | . | 0.043 |
| | 0.016 ~ 0.057 | 50 | . | 0.057 |
| | 0.012 ~ 0.071 | 60 | . | 0.071 |
| | 0.010 ~ 0.057 | 70 | . | 0.057 |
| | 0.022 ~ 0.124 | 80 | . | 0.124 |
| | 0.021 ~ 0.107 | 90 | . | 0.107 |
| | 0.041 ~ 0.146 | 100 | . | 0.146 |
| 대표 충격계수 | - | 100 | G6 | 0.146 |

* 이론 충격계수($L > 18.0\text{m}$)

$$i = 24 + \frac{240}{L - 0.6} = 24 + \frac{240}{25.1 - 0.6} = 33.8 \% = 0.338 \therefore i = 0.338$$

대상교량에 대한 동적재하시험 결과, 이동하중에 대한 처짐곡선이 주행의 연속성을 유지하고 있으며 재하차량 통과 후 부재의 처짐 복원이 정상적으로 나타나고 있어 교량의 기초 및 상부부재가 모두 정상적인 탄성작용을 하고 있는 것으로 판단된다.

3.5 궤도 측정 및 결과

교량상 자갈도상 궤도구조의 동적거동에 대한 분석 및 평가를 수행하고자 대상 구간에서 차량의 통과에 대한 현장 계측을 수행하였으며 측정항목은 궤도의 동적 변위 및 윤중을 측정하였다. 교량의 동적거동 특성 파악을 위한 응답측정은 주행속도별 재하차량에 의한 응답을 사용하였으나, 본 절에서의 궤도 측정은 실운행차량에 의해 발생한 동적 궤도 응답을 이용하고자 하였다.

궤도의 윤중, 변위 등을 측정하기 위하여 교량구간의 경간 중앙 내외측 궤도에 대하여 궤도의 동적 응답(Dynamic Response)을 측정하여 그 결과를 비교, 분석하였으며 대상선로 및 측정구간의 제원은 교량 측정개소와 동일하다. 궤도에 대한 동적 윤중 및 레일, 침목의 수직 변위는 스트레인게이지 및 변위계를 이용하여 측정하고 증폭기를 통해 증폭된 신호들을 DRA-101(Data Acquisition System)에 저장한 후, 오리진™ 프로그램을 이용하여 분석하였다.

3.6 윤중

윤중게이지 설치위치는 측정구간의 레일에 Fig. 10과 같이 침목간 중심에서 각각 100mm 떨어진 위치에 레일복부의 중립축에 45° 의 각도를 가지고 8방향으로 결선된 윤중게이지를 부착하여 측정한다. 계측시 열차는 고속으로 주행하므로 실제 발생한 윤중을 왜곡하거나 데이터의 손실이 발생되지 않도록 충분한 수집율(Sampling Rate)을 설정하였다. 그리고 발생한 윤중 이외의 노이즈 성분들은 주파수 분석을 통해 디지털 필터로 로파스 필터링과 하이파스 필터링 처리를 함으로써 데이터의 신뢰성을 높였다.

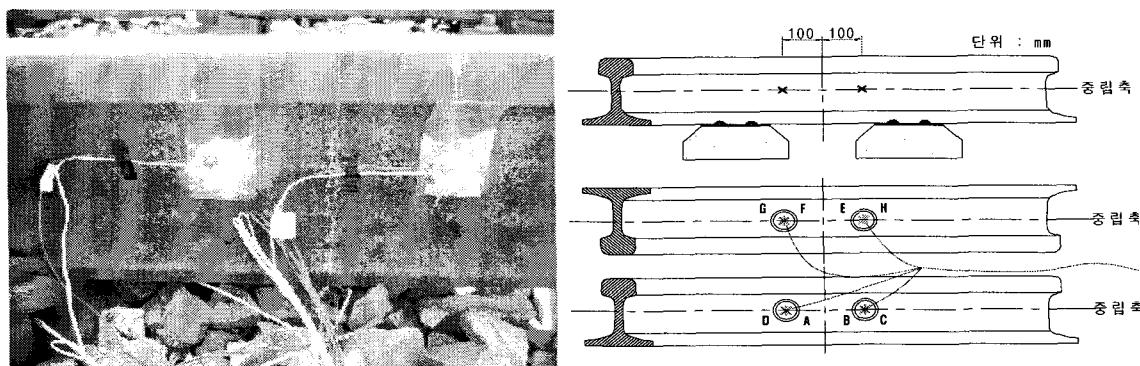


Fig. 10 윤중게이지 설치전경 및 부착도

레일에 부착한 변형률 게이지를 통하여 직접 측정한 값은 윤중에 비례하여 발생하는 변형률 데이터로 써 데이터 수집장비(Data Acquisition System)를 통하여 얻은 변형률을 실제 작용하는 윤중의 절대량으로 환산하기 위하여 윤중 검정(Calibration)을 수행하고 이때 얻어진 정적 윤중 데이터를 이용하여 선형회귀분석(Linear Regression)을 통해 환산윤중을 도출함으로써 하중단위의 동적 윤중값을 구한다.

유압잭을 이용하여 Fig. 11과 같이 0kN에서 40~50kN까지 정적하중을 단계적으로 가압하여 이때 발생한 계측값을 기록한다. 이때 오차발생과 선형회귀식의 신뢰성을 고려하여 3회 이상 동일한 실험을 반

복하였다.

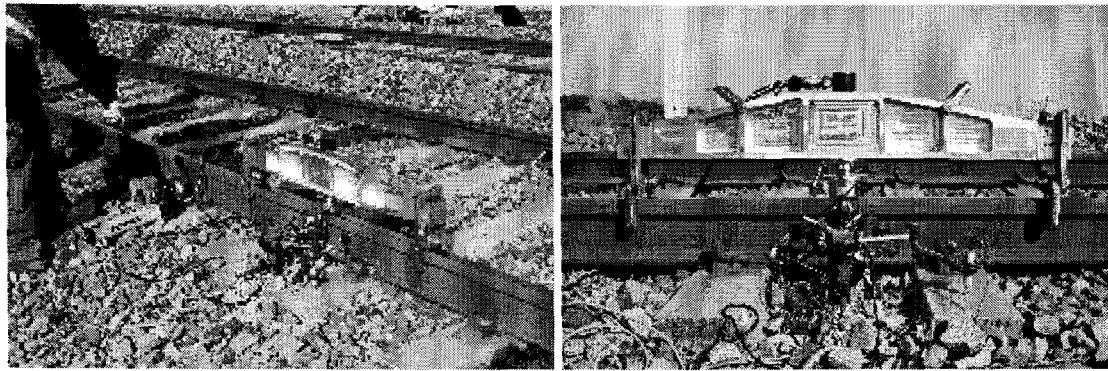


Fig. 11 윤중 검정기로 레일을 가압하는 모습

Fig. 12는 재하시간 변화에 따른 레일에 재하한 정적 작용하중(데이터 수집장치에 저장된 변형률 테이터)을 도시한 그림과 측정 변형률을 레일에 작용한 윤중으로 환산하고자 수행한 선형회귀분석의 결과를 나타낸다.

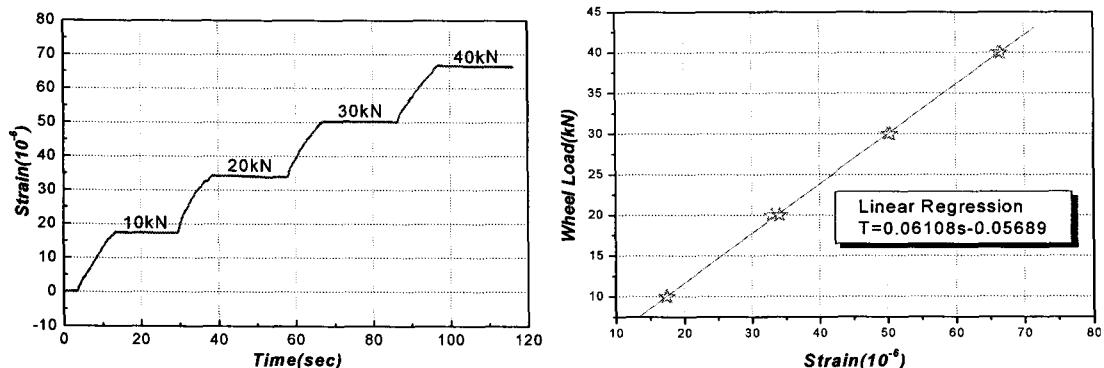


Fig. 12 측정변형률과 윤중의 선형회귀분석 결과(예)

3.7 변위

열차주행시 발생하는 레일과 침목의 동적변위를 측정함으로써 측정대상구간을 통과하는 동적하중의 영향을 평가할 수 있다. Fig. 13은 곡선구간에서의 레일변위계, 침목변위계 설치전경과 측정위치도를 나타낸 것이다.

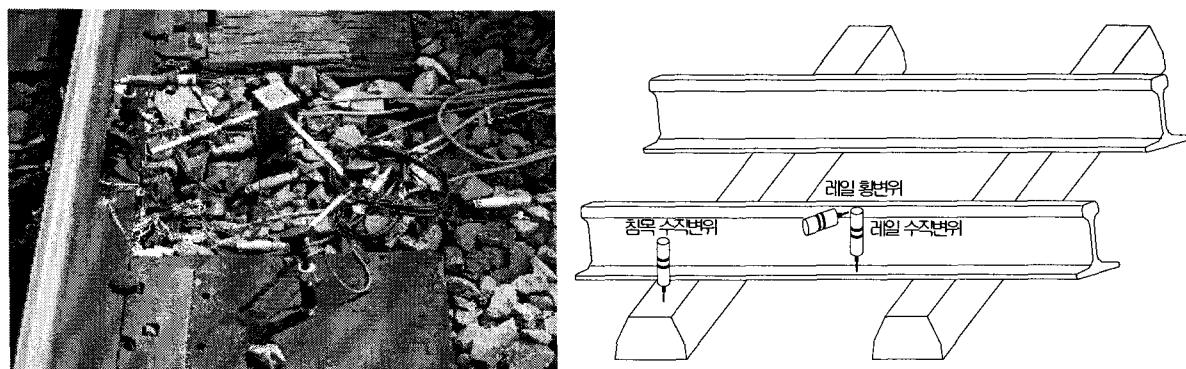


Fig. 13 변위계 설치전경 및 위치도

3.8 궤도의 동적응답 측정 결과 및 분석

운행중인 교량상 자갈도상 궤도에서 측정한 궤도의 동적윤중 및 변위응답을 이용하여 대상 궤도의 동적 궤도탄성계수를 추정하여 Fig. 14와 같이 나타내었다. 자갈도상 궤도의 설계 당시 고려하고 있는 궤도 탄성계수는 약 133kN/mm 정도이나 현재 대상 궤도의 동적응답을 이용한 궤도의 탄성계수는 거의 모두 이 값을 상회하는 것으로 나타났다.

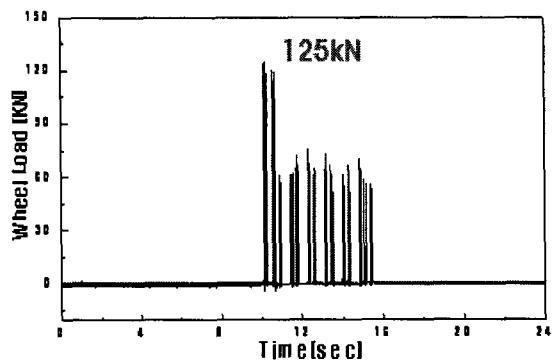
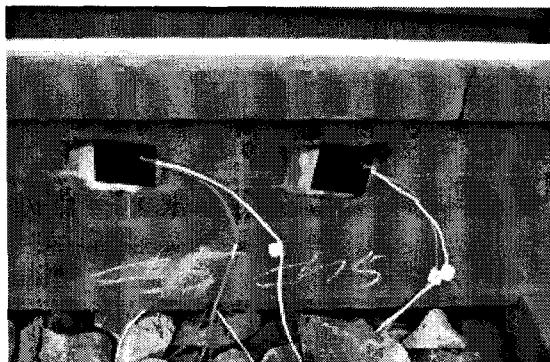


Fig. 14 동적윤중 측정 전경 및 측정응답파형의 예

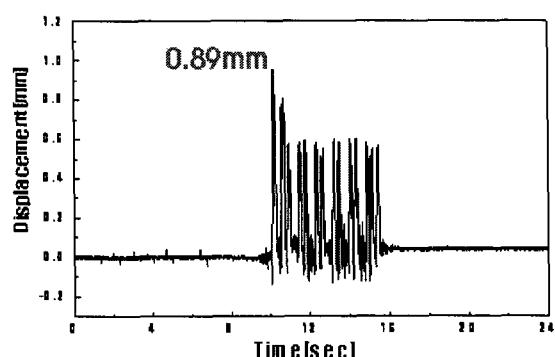
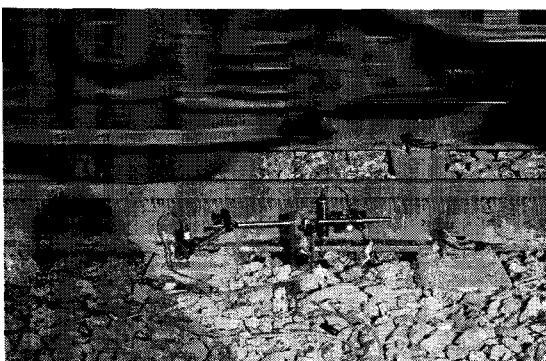


Fig. 15 동적 침목변위 측정 전경 및 측정응답파형의 예

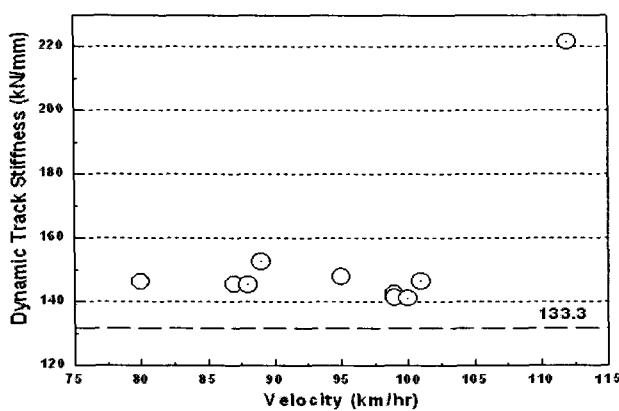


Fig. 16 측정 궤도탄성계수

또한 속도증가에 따른 궤도탄성계수의 증가는 뚜렷한 경향이 나타나지 않았으며 비교적 선로의 상태가 양호하며 궤도부설 후 공용기간이 얼마 되지 않은 신설선로인 점을 감안할 때 궤도탄성력의 수준은 양호한 상태인 것으로 판단된다. 현장측정 결과, 설계 및 이론 탄성력(133.33kN/mm)은 실제 운영상태의 궤도 탄성력과 일치하지 않았다. 동적 윤중 및 궤도 변위측정결과를 이용한 측정 궤도 탄성력을 검토한 결과, 부설 후 1년 경과된 궤도임에도 불구하고, 앞서 검토한 공용기간별 궤도 탄성변화 검토결과를 미루어 볼 때, 현 상태는 3 ~ 5년 경과된 궤도의 탄성력을 나타내는 것으로 분석되었다.

4. 유한요소해석

4.1 유한요소해석 모델

본 연구의 수치해석을 위한 유한요소해석 모델은 LS-22하중에 대한 철도교 표준단면을 사용하여 25.0m의 경간길이를 갖는 PSC 거더교를 유한요소로 모델링하였다. Fig. 17은 대상 교량에 대한 유한요소모델을 나타낸다. 해석모델은 Fig. 17과 같이 PSC 거더, 가로보 및 교량상판 등의 부재는 Solid요소를 사용하고 레일은 Frame요소를 사용하여 모델링 하였다. 레일과 교량상판 각각의 절점을 연결시켜 역학적으로 합성된 거동을 하도록 하였다.

또한, 자갈도상 궤도의 모델링에는 자갈도상의 영향을 반영하기 위해 철도교량 및 궤도 설계 시 고려하는 건전한 자갈도상 궤도의 일반적인 궤도 스프링계수 및 공용기간별 궤도탄성계수의 노후가 궤도 탄성계수의 증가를 유발하는 것으로 고려하여 총 8개의 궤도탄성계수를 스프링요소로 고려하여 레일과 교량상판의 각각의 절점을 연결시켰으며 자갈도상 및 침목의 중량은 교량상판에 사하중으로 적용하고 해석모델에서는 제외하였다. 레일의 궤간은 표준궤간인 1.435m를 적용하였고, 레일은 60kg K를 사용하였으며 침목은 PC침목을 10m당 25개로 배치한 것으로 가정하여 사하중으로 적용하였다. Table. 4는 해석모델에 적용한 물성치를 나타낸 것이다.

Table. 4 해석모델 적용 물성치

| 분류 | 레일 | 교량 상판 및 거더 |
|--------------------------|-------------------|-------------------|
| 탄성계수(MPa) | 2.1×10^5 | 3.0×10^4 |
| 단위중량(kN/m ³) | 7.85 | 2.5 |
| 포화송비 | 0.3 | 0.2 |
| f _y (MPa) | 400 | - |
| f _{ck} (MPa) | - | 40 |

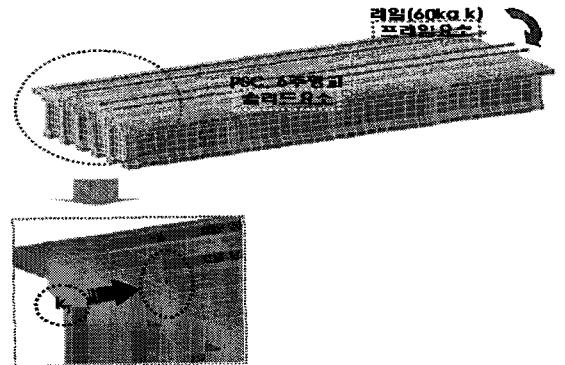


Fig. 17 유한요소해석 모델(교량 및 궤도 모델)

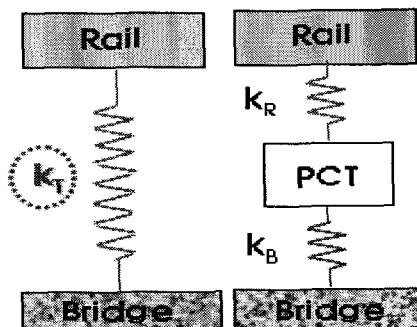


Fig. 18 유한요소해석 시 적용한 궤도스프링 모델

4.2 궤도탄성계수 변화에 따른 시간이력해석 결과

본 연구에서는 자갈도상 궤도의 노후화 진전에 따른 탄성계수 변화가 대상교량의 상관 수직가속도 및 충격계수에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 해석모델에 대한 시간이력해석을 위해 지간 25.0m의 PSC 거더교에 실운행 열차하중으로서 디젤 1량 + 객차 8량의 열차하중을 적용하여 20~200km/h의 주행 속도를 가지는 열차하중의 영향이 모델링의 각 절점에 짧은 시간동안 가해지고 사라지는 충격하중으로 작용하도록 시간이력함수를 정의하였다. 또한 하중의 지속시간은 요소의 분할길이와 속도의 관계에 있으므로 본 논문의 모델링은 차량진행방향으로 요소(레일[frame 요소])길이를 0.4m의 등간격으로 분할하여 각각의 속도에 따라 요소길이를 지나는 열차하중의 이동시간에 따른 충격하중을 적용하였다. 100km/h의 속도로 주행하는 열차의 윤하중을 모델링한 시간이력함수의 예와 디젤열차의 축중배치는

Fig. 19와 같다.

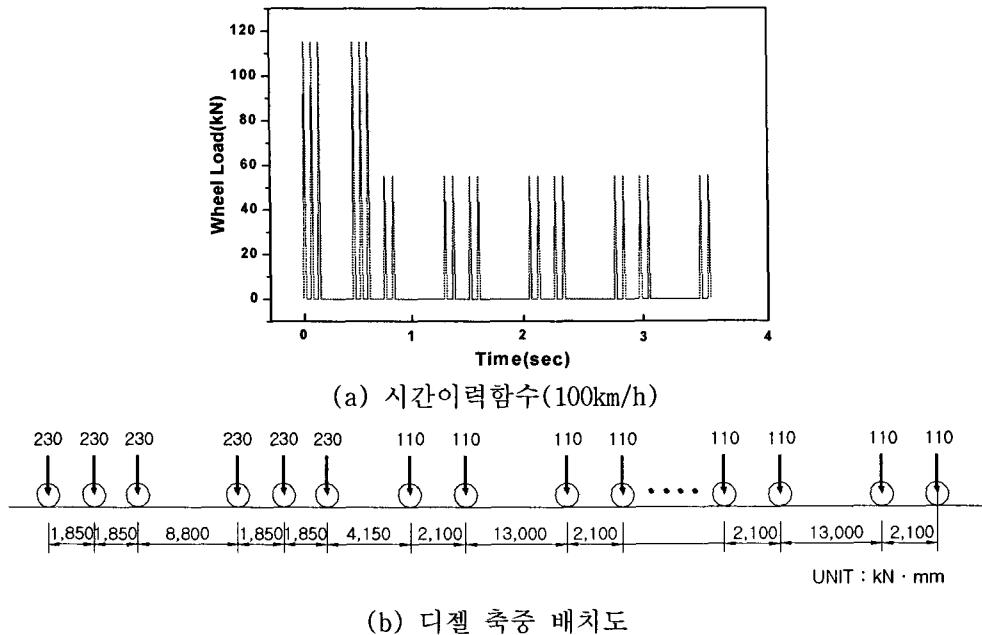


Fig. 19 시간이력함수(100km/h) 및 디젤 축중 배치도

본 연구교량 및 궤도 해석모델에 대한 시간이력해석 결과, 궤도 탄성계수 적용 및 변화에 따라 교량 모델의 시간-변위 및 시간-가속도 응답이 다소 차이를 나타내었으며, 그 결과를 Fig. 20에 정리하였다. Fig. 20은 건전한 자갈도상 궤도의 초기 궤도 탄성계수와 15년 사용시점의 추정 궤도 탄성계수 적용시의 해석 결과를 나타낸다.

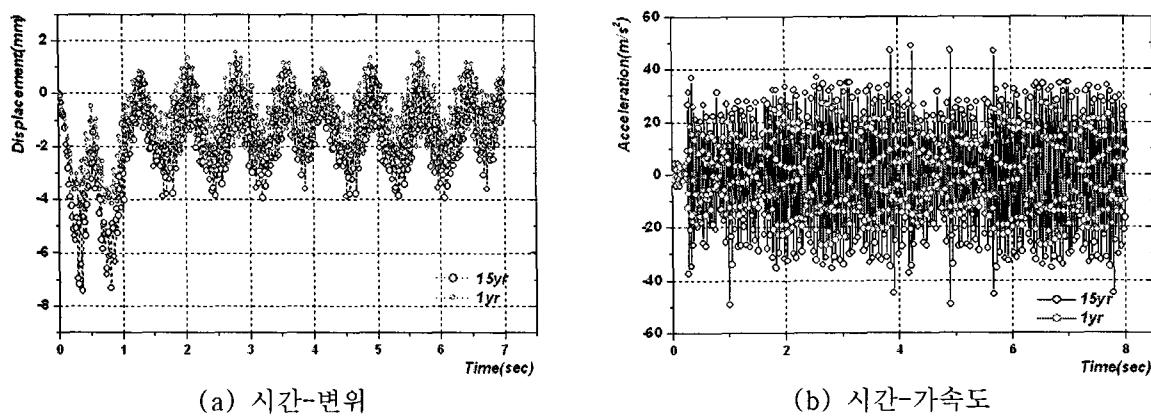


Fig. 20 시간이력해석결과 : 100km/h

5. 분석 결과 및 고찰

자갈도상 궤도의 노후화 진전에 따른 궤도의 고탄성화가 교량구조의 동적응답에 미치는 영향을 파악하고자 궤도의 탄성계수를 변수로 하여 수행한 유한요소해석의 시간이력해석을 비교, 분석함으로써 궤도탄성계수 변화에 의한 교량의 시간-변위 및 가속도 변화 가능성을 타진하였고, 궤도의 고탄성화에 따른 교량의 동적거동 변화에 대한 안정성 확보 여부를 확인하였다.

진동가속도의 크기는 교량의 구조적 안전성에 직접적인 영향을 미치지는 않지만 가속도가 크게 발생하게 되면 장기적으로 피로손상의 문제가 발생할 수 있을 뿐만 아니라 차량의 주행안전성과 승차감에

영향을 미치게 된다. 분석결과 자갈도상 궤도의 초기 탄성계수 확보 시 발생하고 있는 진동가속도 및 동적변위량은 궤도 부설 후 15년 경과되어 궤도의 탄성계수가 18% 증가된 해석모델에서 발생하는 동적응답보다 작게 발생하고 있어 자갈도상 궤도의 노후화 진전에 따른 궤도의 고탄성화는 주행안전성과 승차감 확보에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다.

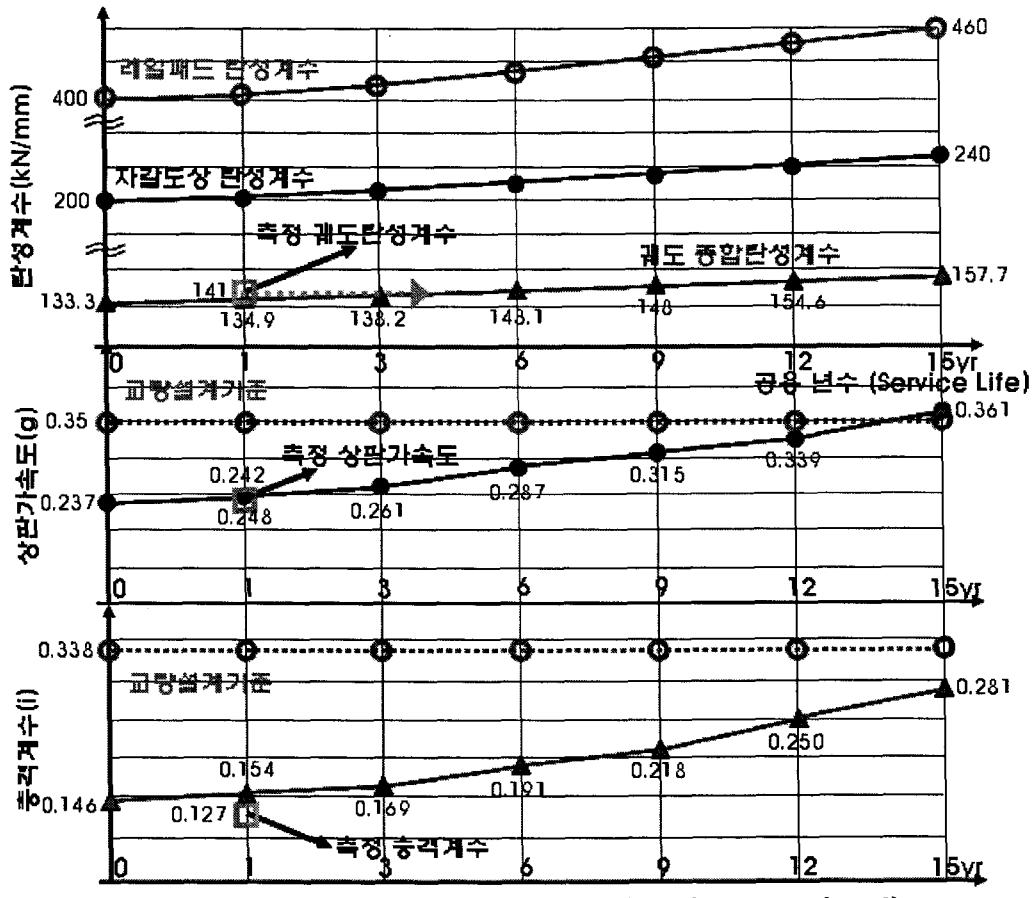


Fig. 21 궤도탄성계수 변화에 따른 교량의 영향 검토 결과 종합

궤도재료 노후화를 고려한 교량의 동적 시간이력해석을 수행한 결과, 궤도 상태변화는 교량상판 가속도 및 충격계수 증가에 각각 52%, 92%의 영향을 미치는 것으로 나타났다.

따라서, 자갈도상 궤도의 노후화에 따른 탄성력 변화는 동적 하중의 영향을 증폭시켜 교량의 충격에 영향을 미치며, 궤도 탄성계수 증가에 따라 교량충격계수가 증가하는 것으로 나타났다.

6. 결 론

철도교량의 동적 거동 특성을 감안한 교량상 자갈도상 궤도의 탄성력을 추정하여, 자갈도상의 탄성력 변화가 교량의 동적 거동에 미치는 영향을 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 교량상 자갈도상 궤도의 설계 및 검토 시 적용한 설계 및 이론 탄성계수는 실제 운영상태의 궤도 탄성계수를 다소 과소평가(8%) 하는 것으로 검토되었으며, 궤도재료의 노후를 감안할 때 운행선 궤도의 탄성계수는 설계 당시 보다 크게 평가되어야 할 것으로 판단된다.
2. 궤도재료의 노후화에 따른 자갈도상 궤도의 탄성력 변화는 교량에 작용하는 충격의 영향 및 교량 상판가속도의 증가에 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

3. 따라서, 철도교량 설계 시 자갈도상 궤도의 상태변화를 고려한 궤도/교량의 설계와 검토 및 유지관리가 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 伊東孝之, “鐵道路盤における道床のめりこみに關する研究”보고서
3. 運輸省 鐵道局, “鐵道構造物等設計標準・同解説 土構造物”, 鐵道總合技術研究所, 1992. 10.
4. 佐藤吉彦, 梅原利之, “線路工學”, 日本鐵道施設協會, 1995. 3. 20.
5. 關根悅夫, 村本勝巳, “營業線 路盤の支持力特性に關する研究”, RTRI REPORT, Vol. 9, No. 7, '95. 7, pp 19~24.
6. Cundall, P. A., (1971), "A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems", ISRM Symposium, Nancy, France, Proc., Vol.2, pp.129~136
7. Cundall, P. A., (1998), "2DEC User's Manual", Itasca consulting group.
8. Hahn, J. K. (1988) "Realistic Animation of Rigid Bodies", Computer Graphics, Vol.24, No.4, pp.299~308
9. Muhlhaus, H.-B., Sakaguchi, H. and Moresi, L.(2001), "Particle in Cell and Discrete Element Models for Granular Materials", Computer Methods and Advances in Geomechanics, Desai et al. eds., Balkema, Vol.1, pp.511~518
10. Shi, G.-H.(1988), "Discontinuous Deformation Analysis: a New Numerical Model for the Static and Dynamics of Block Systems", Ph.D thesis, Civil Eng., University of California, Berkeley
11. Williams, J. R., and Mustoe. G. G. W.(1987), "Modal Methods for the Analysis of Discrete Systems", Computers & Geomechanics, Vol.4, pp.1~19
12. 이종득, “철도공학”, 노해 출판사, 1997. 3.
13. 정근영, “철도도상 개량을 위한 기초연구”, 한국철도기술연구원, 1998.
14. Coenraad Esveld, 서사범 역, “최신 철도선로”, 열파일, 2003. 5.
15. 박용걸 외, “자갈도상 궤도의 동적거동에 관한 연구”, 한국철도학회 논문집. Vol.9 No.4, 2006