

피로효과를 고려한 레일패드의 정적스프링계수 변화에 따른 콘크리트 슬래브 궤도의 거동분석

A Behavior Analysis of HSR Concrete Slab Track under Variety of Rail Pad Static Stiffness on Fatigue Effect

박용걸[†] · 강기동* · 최정열**

Yong-Gul Park · Kee-Dong Kang · Jung-Youl Choi

Abstract The major objective of this study is to investigate the fatigue effects of rail pad on High Speed Railway with concrete slab track system. It analyzed the mechanical behaviors of HSR concrete slab track with applying rail pad stiffness based on fatigue effect (hardening and increasing stiffness) on the 3-dimensional FE analysis and laboratory test for static & dynamic characteristics. As a result, the hardening of rail pad due to fatigue loading condition are negative effect for the static & dynamic response of concrete slab track which is before act on fatigue effect. The analytical and experimental study are carried out to investigate rail pad on fatigue effected increase vertical acceleration and stress and decrease suitable deflection on slab track. And rail pad based on fatigue effect induced dynamic maximum stresses, the increase of damage of slab track is predicted by adopting fatigue effected rail pad. after due consideration The servicing HSR concrete slab track with resilient track system has need of the reasonable determination after due consideration fatigue effect of rail pad stiffness which could be reducing the effect of static and dynamic behavior that degradation phenomenon of structure by an unusual response characteristic and a drop durability.

Keywords : fatigue effect, hardening, dynamics behavior

요 지 본 연구의 주목적은 고속선 콘크리트 슬래브 궤도시스템에서 레일패드의 피로효과에 따른 영향을 분석하는 데에 있다. 이에 3차원 해석모델 및 실내시험을 통해 도출된 레일패드의 피로효과(경화, 스프링계수 증가)가 고속선 궤도의 역학적 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구에서는 콘크리트 슬래브 궤도의 적정 탄성력 확보여부를 의미하는 레일패드의 적정스프링계수 산정에 관한 연구의 일환으로 고속철도 콘크리트 슬래브 궤도에 적용된 레일체결시스템에 대한 실내시험을 통한 레일패드의 정적스프링계수를 산정하고 체결시스템에 대한 피로시험을 통해 도출된 피로효과가 고려된 레일패드의 스프링계수 변화를 해석모델에 적용함으로써 향후 고속선 콘크리트 슬래브 궤도운영에서의 열차주행안정성 확보 및 합리적인 궤도유지관리를 위한 기초데이터를 확보하고자 한다.

주요어 : 피로효과, 경화, 동적거동

1. 서론

현대의 철도는 안전한 철도수송과 고속화 방향으로 나아가

고 있다. 이에 고속화, 승차감 향상, 유지보수비용 절감을 위해 주행열차에 의한 궤도의 동적응답 및 선로변 환경에 미치는 영향에 많은 관심을 가지게 되었으며, 특히 소음과 진동을 저감시키기 위한 노력이 불가피 해졌다. 국내·외에서는 열차 운행의 고속화와 궤도틀림 및 유지보수의 저감을 위해 자갈도상을 생략화하는 연구가 진행되어 왔으며, 경부고속철도 2단계(대구~부산)에서는 자체강성 및 저항력을 크게 한 콘크리트 슬래브 궤도를 부설할 계획에 있다.

† 책임저자 : 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 교수, 공학박사

E-mail : ygpark@snut.ac.kr

TEL : (02)970-6575 FAX : (02)971-6575

* 정회원, 삼성건설 토목사업본부 고문, 공학박사

** 정회원, (주)대한콘설탄트 철도부 궤도팀 사원, 공학석사

그러나 국내에서는 고속선 콘크리트 슬래브 궤도에 대한 경험이 없으며 콘크리트 궤도와 자갈도상 궤도는 기본적인 궤도 탄성력의 차이가 있어 설계 및 유지관리에 별도의 개념이 필요하다.

기존의 자갈궤도에서는 주행열차에 의한 동적응답을 자갈도상에서 분산시켜주었으나 콘크리트궤도에서는 이러한 동적응답을 레일체결시스템에서 부담해야하는 문제점이 있다. 콘크리트 슬래브 궤도는 자갈도상 궤도보다 초기 부설비용에 대한 부담은 크지만 적정 궤도탄성을 유지할 수만 있다면 기존의 자갈도상 궤도보다 반영구적으로 사용가능한 궤도구조로써 장기적인 측면에서 경제적인 궤도시스템이라 할 수 있다. 따라서 자갈도상 궤도에서 일정한 주기로 자갈도상을 갱환하고 자갈채움작업을 시행하는 등의 유지관리를 수행하듯이 콘크리트 슬래브 궤도에서도 궤도의 탄성을 전적으로 부담하고 있는 레일패드의 효과적인 관리가 매우 중요하다 할 수 있다. 특히 콘크리트 슬래브 궤도에서 레일패드의 탄성관리가 적절히 이루어 지지 않는다면 콘크리트 슬래브 궤도의 초기 부설 목적중 하나인 반영구적인 선로사용은 불가능하며 슬래브 궤도의 열화손상 때문에 향후 유지관리비용은 자갈도상보다 더욱 크게 된다[1].

이에 본 연구에서는 콘크리트 슬래브 궤도의 적정 탄성력 확보 여부를 의미하는 레일패드의 적정 스프링계수 산정에 관한 연구의 일환으로 고속철도 콘크리트 슬래브 궤도에 적용된 레일체결시스템에 대한 실내시험을 통해 레일패드의 정적스프링계수를 산정하고 체결시스템에 대한 피로시험을 통해 도출된 피로효과가 고려된 레일패드의 스프링계수 변화를 해석모델에 적용함으로써 향후 고속선 콘크리트 슬래브 궤도 운영에서의 열차 주행안정성 확보 및 합리적인 궤도유지관리를 위한 기초데이터를 확보하고자 한다.

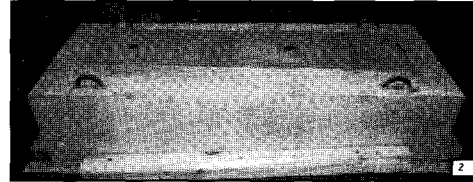
2. 실내시험

본 연구에서는 고속철도 콘크리트 슬래브 궤도에 사용되는 체결시스템에 대한 적정 탄성력을 산정하고 안정성을 평가하고자 다음과 같은 시험 궤도구성품을 선정하여 레일패드의 스프링계수와 체결시스템의 피로시험을 실시하였다. 실내시험을 위한 시험 궤도구성품과 시험방법은 국내 고속철도 2단 계구간에서 적용된 시스템을 기본으로 유럽 CEN과 한국고속철도공단(KHRC)에서 제시하는 체결시스템의 성능검증을 위한 기준을 근거로 시행하였다[1].

2.1 레일패드 스프링계수의 측정

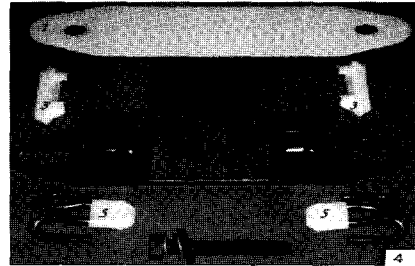
1) 시험 궤도구성품

(1) 단침목



- 길이(레일 축과 수직) : 940mm
- 폭(레일 축과 수평) : 450mm
- 높이 : 240mm

(2) 베이스플레이트의 구성 요소



- Conforming pad 1개(두께 : 3mm, 길이 : 556mm)
- 레일패드 1개(Studded Rubber패드)
- 8mm Side post insulator 2개·베이스플레이트 1개
- 체결 클립 2개·볼트 1개, 와셔 2개, 톱니 와셔 1개

2) 시험순서 및 방법

피로시험 전, 후의 레일패드 수직스프링계수 산정을 위해 실제 궤도와 동일한 완전한 방진 레일체결시스템을 구성하여 피로시험 후의 레일패드 스프링계수를 측정하고자 하였다.

(1) 실내시험 시행 순서

- ① 레일패드의 수직 정적 스프링계수(피로시험 전)
- ② 레일체결시스템의 피로시험
- ③ 레일패드의 수직 정적 스프링계수(피로시험 후)

(2) 레일패드의 스프링계수 결정

레일패드의 수직 스프링계수 시험은 체결장치 성능시방서 규정에 의거하여 실행하였다. Schenck PL 250 K 유압 시험장치는 Fig. 2와 같이 시험패드 샘플과 함께 설치되었다. 하중 분산 철판은 폭 150mm로 하였으며 이는 UIC 60 레일의 플랜지 폭과 동일한 폭을 의미하고 시험대상 레일패드의 길이보다 길게 제작하였다. 또한 무접촉 변위 센서(LVDT : 5mm) 4개를 사용하여 하중재하단계별 레일패드의 정적 변위를 측

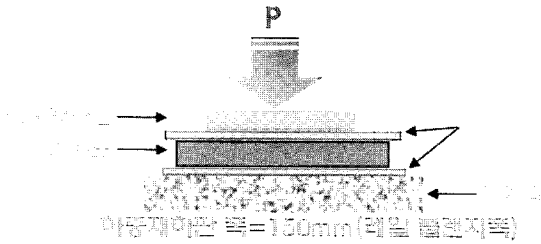


Fig. 1. Condition of static test for vertical stiffness of rail pad

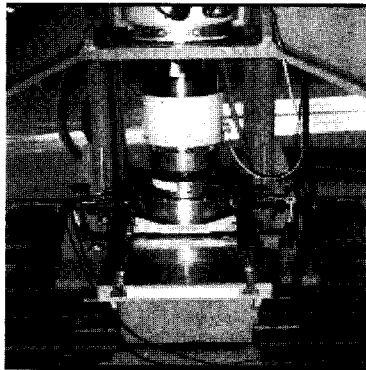


Fig. 2. View of static test for vertical stiffness of rail pad

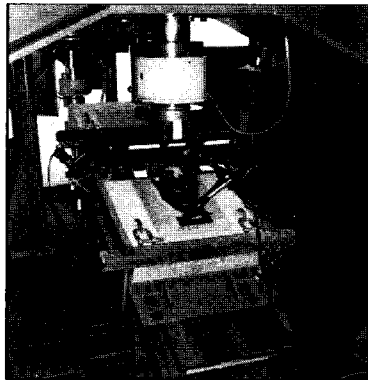
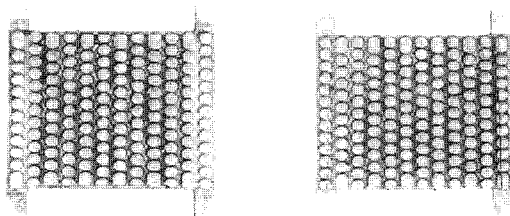


Fig. 3. View of fatigue test for fastening system



(a) Rail pad(before fatigue test) (b) Rail pad(after fatigue test)



(c) Conforming pad (after fatigue test) (d) Sleeper (after fatigue test)

Fig. 4. Deformed shape of track component due to fatigue test

정하였다. 레일패드 수직스프링계수 산정을 위한 시험조건과 시험전경은 각각 Fig. 1과 Fig. 2와 같다.

또한 지지대 위에 시험패드의 마찰을 고려하지 않기 위한 연마용 천을 깔고 하중 재하판 위에서 0.5~95kN의 연속하중에서의 정적스프링계수를 측정(속도 50kN/min)하였으며 5초간 최고하중을 적용한 후, 50kN/min의 속도로 하중을 제거하는 과정을 4회 반복함으로써 20~95kN상에서 발생하는 시험패드의 수직변위를 이용하여 레일패드의 정적스프링계수를 측정하였다.

2.2 레일체결시스템의 피로시험

레일체결시스템의 피로시험은 반복 피로하중이 레일패드 수직스프링계수 변화에 미치는 영향을 분석하고자 4±1Hz의 Sine파장을 적용하여 5~60kN의 하중범위 내에서 300만회의 사이클로 피로시험을 수행하였다. 성능시험 기준에서 제시하고 있는 레일체결시스템의 피로시험 방법을 근거로 Fig. 3과 같이 Schenck PL 250 K 유압 시험 장치를 이용하여 체결시스템이 조립된 상태로 26°의 각도로 경사진 테이블 상에서 무접촉 변위 센서 7개를 설치하여 경사 피로시험에 따른 체결시스템 각부의 변위응답을 측정하였다.

그러나 본 연구에서는 전체적인 체결시스템의 성능검증이 아닌 체결시스템 내에서 피로하중의 영향을 받은 레일패드의 피로영향을 고려하기 위한 시험이었기 때문에 체결시스템의 피로거동에 대한 언급은 제외하였다.

피로시험 후의 레일패드 및 레일 직하부 Conforming pad 와 단침목 상면의 모습은 Fig. 4와 같다.

2.3 피로시험 후 레일패드 스프링계수의 측정

피로시험 전, 후에 따른 레일패드의 정적스프링계수의 변화를 파악하고자 앞서 수행한 레일체결시스템의 피로시험에 적용한 것과 동일한 레일패드에 대하여 피로시험 후의 레일패드 수직스프링계수 시험을 수행하였다.

2.4 실내시험 결과 및 분석

4개의 변위 측정기를 이용하여 하중별 변위량의 변화를 알아보고자 하였으며 그 결과 중 하나를 Fig. 5~Fig. 6에 나타내었다. 이렇게 나타난 $P_{min}(20kN)$ 과 $P_{max}(95kN)$ 의 변위 결과를 평균하여 $d_{min, i}$ 와 $d_{max, i}$ 를 구하고 마지막 3회에 대한 하중값과 변위값을 평균하여 식(1)에 대입하면 레일패드의 정적 수직스프링계수를 산정할 수 있다.

$$k_{st} = \frac{P_{max} - P_{min}}{d_{max} - d_{min}} \quad (1)$$

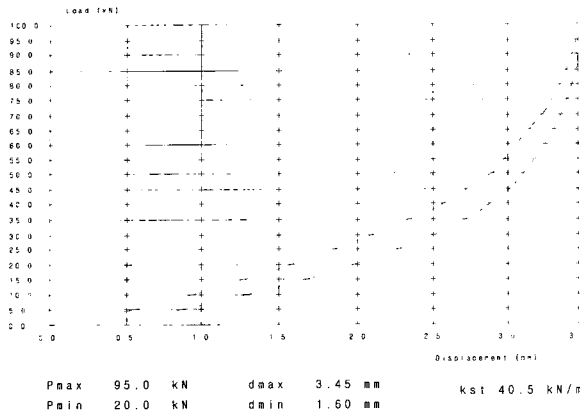


Fig. 5. Load-Displacement curve(3rd) for rail pad before fatigue test

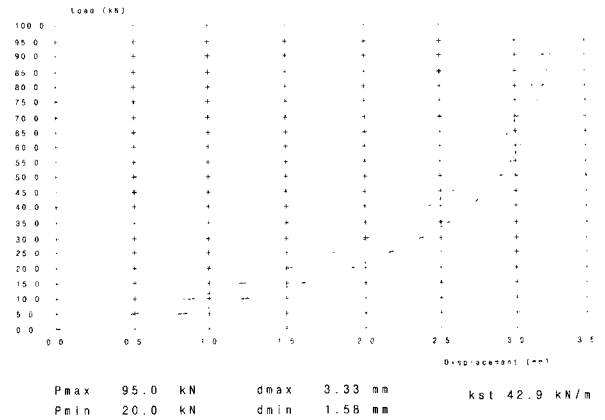


Fig. 6. Load-Displacement curve(3rd) for rail pad after fatigue test

Table 1. Test results of rail pad static stiffness due to fatigue test

구분	Cycle	1st	2nd	3rd	4th	2nd~4th
피로 시험 전	$d_{min,i}$ (mm)	1.58	1.59	1.60	1.60	1.60
	$d_{max,i}$ (mm)	3.57	3.45	3.45	3.45	3.45
	$P_{min,i}$ (kN)	20	20	20	20	20
	$P_{max,i}$ (kN)	95	95	95	95	95
	$K_{p,i}$ (kN/mm)	37.7	40.3	40.5	40.5	
	K_{st} (kN/mm)					40.5
피로 시험 후	$d_{min,i}$ (mm)	1.57	1.58	1.57	1.58	1.58
	$d_{max,i}$ (mm)	3.38	3.33	3.30	3.29	3.31
	$P_{min,i}$ (kN)	20	20	20	20	20
	$P_{max,i}$ (kN)	95	95	95	95	95
	$K_{p,i}$ (kN/mm)	41.4	42.9	43.4	43.9	
	K_{st} (kN/mm)					43.4

정적스프링계수 시험결과, 피로시험 전, 후의 레일패드 수직스프링계수는 허용기준을 만족하였으며, 피로시험에 따른 수직스프링계수는 약 7% 증가하는 것으로 나타났으나 허용기준을 만족하는 것으로 나타났다.

3. 유한요소해석

3.1 해석대상 궤도의 제원

콘크리트 슬래브 궤도구조의 특징은 레일이 탄성지지층위에 놓여 진다는 점과 일반적으로 휨응력을 받는 두개 층의 지지 플레이트를 사용한다는 점이다. 연속적으로 철근 보강된 콘크리트 지지 플레이트 또는 아스팔트 지지 플레이트(HGT 층)를 사용한다. 동해 방지층과 노반을 elastic-isotropic half space로 모델링 할 경우 3층 시스템이 되나, 본 연구에서는 노반의 영향을 고려하지 않고자 두개의 층으로 해석모델을 구성하였다[2,6,8].

본 연구의 유한요소해석을 위한 해석의 기본조건은 토노반 구간의 콘크리트 슬래브 궤도이며 토노반 구간인 점을 감안하여 본 연구의 목적에 부합하게 레일패드의 영향이외의 다른 궤도 측면의 변수를 최소화하고자 노반의 변형은 무시하여 강화노반층 이상을 해석모델에 적용하여 해석을 수행하였다. 본 해석의 분석항목은 레일패드의 정적스프링계수 변화(탄성력 변화)에 따른 궤도의 수직변위, 레일응력 및 침목응력 등이다.

3.2 유한요소해석 모델

본 연구의 수치해석을 위한 유한요소해석 모델은 고속철도 2단계 구간의 토노반 구간 궤도표준단면을 이용하여 해석에 적용하였으며 고속선 궤도시스템과 레일체결장치와의 상호작용 분석을 위해 범용구조해석 프로그램인 LUSAS 13.7-5를 이용하여 3차원 유한요소해석을 수행하였다.

해석모델은 레일을 비롯한 레일패드, 침목 및 체결시스템 구성품 모두를 3차원 Solid 요소로 적용하였으며 앞서 수행한 실내시험을 통해 산정한 레일패드의 정적스프링계수(피로시험 전, 후)를 재료적인 물성치의 변화로 적용하였다. 전체적인 궤도의 해석모델은 Fig. 7과 같으며 그중 레일, 레일패드 및 단블럭 침목의 일부를 세부적으로 표현하여 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8(b)는 경부고속철도 2단계 구간에 적용된 레일체결시스템의 모형이며 실물치수를 해석모델에 적용하여 Fig. 8(a)와 같이 나타내었다. 본 해석에서는 체결구에 의한 레일패드의 국부적인 변위발생을 고려하지 않기 위해 궤도의 각 부재는 모든 절점을 일치시켜 일체 거동하도록 하였으며 체결구는 해석모델에서 제외하였다. 지점조건은 최대 단면응력이 발생할 수 있고 강화노반상 노반 변위를 허용하지 않도록 전단면 지지형식(surface support)을 적용하였으며 현장 채움 콘

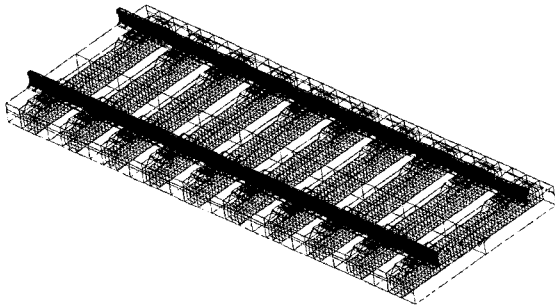


Fig. 7. FE model of the slab track

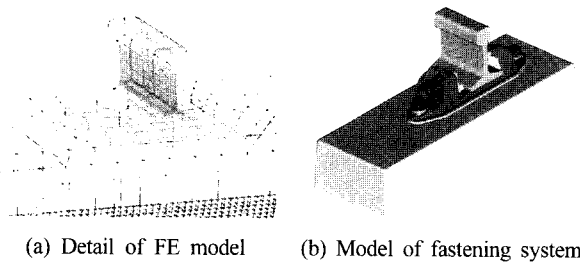
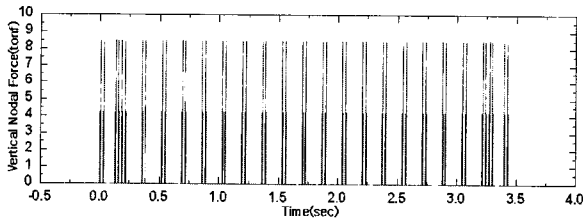
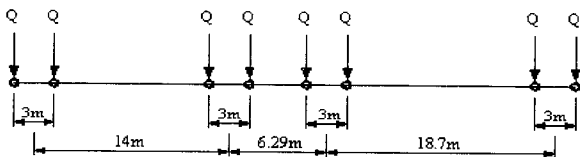


Fig. 8. Detail of FE model for slab track system



(a) Example of time history function at 350km/h



(b) Load combination of static axle loads

Fig. 9. Load composition for the dynamic analysis

크리트에 의해 매립되는 위치까지 구속하였다. 해석모델에 적용한 궤도의 제원과 재료적 물성치는 Table 2~Table 3과 같다.

본 연구에서는 피로효과가 고려된 레일패드의 스프링계수 변화에 따른 고속선 콘크리트 슬래브 궤도의 시간이력해석을 위해 궤도연장 10m의 콘크리트 슬래브 궤도(Rheda 2000 system)에 실운영 열차하중으로서 KTX 열차하중을 적용하여 20~350km/hr의 주행속도를 가지는 열차하중의 영향이 모델링의 각 절점에 짧은 시간동안 가해지고 사라지는 충격 하중으로 작용하도록 시간이력함수를 정의하였다. 또한 하중

Table 2. Layer and sleeper size (unit : mm)

구 분	콘크리트지지층 BTS		침 목			HGT폭
	높이	폭	높이	폭	BTS매입	
Rheda 2000	285	3,000	260	2,336	130	3,700

Table 3. Properties of FE model

구 분	물 성 치	
	탄성계수 또는 스프링계수	프아송비
Rail(UIC60), Base plate	250GPa	0.3
Rail pad	피로시험 전	40.5kN/mm(측정값)
	피로시험 후	43.4kN/mm(측정값)
	피로시험 전, 후 변화를 한계치	50.63kN/mm
RC Sleeper(fck=45MPa)	25GPa	0.15

의 지속시간은 요소의 분할길이와 속도의 관계에 있으므로 본 해석의 모델링은 차량진행방향으로 레일의 요소길이를 0.4m의 등간격으로 분할하여 각각의 속도에 따라 요소길이를 지나는 열차하중의 이동시간에 따른 하중을 적용하였다. 350km/hr의 속도로 주행하는 고속열차의 운하중을 모델링한 시간이력함수의 예와 KTX열차의 축중배치는 Fig. 9와 같다.

4. 분석 결과 및 고찰

본 연구에서는 피로효과가 고려된 레일패드의 스프링계수 변화에 따른 콘크리트 슬래브 궤도의 거동 분석 및 레일패드의 피로경화 및 노후화의 영향을 실내실험을 통해 산출하였으며 이 수치를 정교한 유한요소해석 모델에 적용함으로써 레일패드의 피로효과가 콘크리트 슬래브 궤도에 미치는 영향 및 거동 특성에 대한 수치적 분석을 실시하였다. 반복되는 피로하중 하에서 레일패드의 피로경화현상이 발생하게 되며 이에 따른 레일패드의 정적스프링계수 변화가 콘크리트 궤도의 거동에 미치는 영향을 실주행 열차와 동일한 조건하의 주행 속도별 시간이력 해석을 수행함으로써 궤도탄성 변화에 따른 동적응답의 변화 검토를 실시하였다.

4.1 레일패드 스프링계수 변화에 따른 거동분석 결과

본 연구에서는 경부고속철도 2단계 구간내의 토노반상 콘크리트 슬래브 궤도(10m)에 있어서 피로효과를 고려한 레일패드 스프링계수 변화에 따른 거동을 파악하기 위해 3차원 유

한요소해석모델을 이용한 해석결과를 비교 분석하였다. 피로 시험 후 변화된 레일패드의 정적 스프링계수적용에 따른 해석결과는 Fig. 10~Fig. 11과 같다.

Fig. 10과 Fig. 11은 피로효과가 고려된 레일패드 및 침목의 응력분포를 나타낸다. 레일패드의 피로효과를 고려한 궤도의 동적응력검토 결과, 레일패드의 강성증가로 인해 동적 하중의 영향이 체결시스템 및 침목으로 원활히 전달되어 피로효과가 고려되지 않은 경우의 해석결과를 상회하는 수준으로 나타났다. 또한 Fig. 11과 같이 침목의 증가응력 검토 결과 레일에 작용하는 열차하중의 영향이 레일직하부에서 침목 저부까지 미치는 것으로 나타나 피로효과를 고려한 레일패드의 강성증가(정적 스프링계수 증가)가 침목 및 도상 콘크리트의 열화손상에 영향을 줄 수 있음을 해석적으로 입증하였다. 이렇듯 고강성 패드는 저강성 패드보다 단단하며 레일에 작용하는 열차하중의 동적 하중분산율이 낮아 하중이 궤도에 집중하여 레일의 마모를 촉진시키며 소음, 진동을 유발시킨다. 반면 저강성 패드의 경우는 매우 탄성적으로 레일을 지지하므로 소음, 진동 및 레일마모 측면에서는 유리하나 패드의 변위가 상대적으로 커서 전체적인 슬래브 궤도의 수직변위가 과다할 수 있어 승차감 저하 및 열차주행안전성 측면에서 불리하게 작용할 수 있다. 따라서 콘크리트 슬래브 궤도의 레일 패드를 설계, 적용하기 위해서는 패드의 스프링계수를 적절한 수준으로 산정하여 적용함이 바람직하다.

Fig. 11(b)에서 나타난 침목의 증가응력은 3차원 해석모델에서 각각의 축방향으로 방향성을 가지는 주응력의 벡터 값을 하나의 양만을 나타내는 스칼라값으로 변환한 값을 의미하며, Fig. 11(a)는 차량진행방향의 침목의 주응력(S_x)을 나타낸다. 레일패드의 상면은 윤중 및 횡압을 고려한 열차하중모델에 의해 궤도 외측으로 밀리는 압축응력과 궤도 내측의 인장응력이 발생되었으며, 레일패드 하면은 레일패드의 중앙부에서 가장 큰 인장응력이 발생되어 해석모델에 레일패드의 실제거동이 잘 반영된 것으로 판단된다. 시간 이력해석을 통한 침목의 가속도 검토 결과는 Fig. 12와 같다.

피로효과가 고려된 레일패드 스프링계수를 적용한 모델의 경우가 그렇지 않은 경우 보다 시간-가속도응답에서 각각 약 5배 크게 나타나는 것으로 분석되어 레일패드의 피로경화에 따른 강성증가(스프링계수 증가)가 궤도 각부에 동적 충격의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 피로효과를 고려한 레일패드의 스프링계수 변화에 따른 궤도의 응력 및 변위검토결과, 피로하중에 따른 레일패드 스프링계수의 증가는 레일응력을 최대 30%까지 감소시켰으며, 침목의 부담력은 최대 36%까지 증가시켰다.

이와 같은 해석결과를 바탕으로 볼 때 반복피로하중에 따

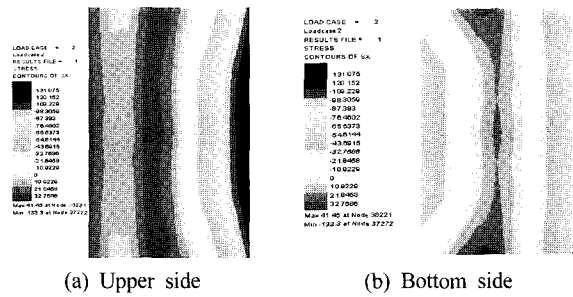


Fig. 10. Stress contour in rail pad(43.4kN/mm)

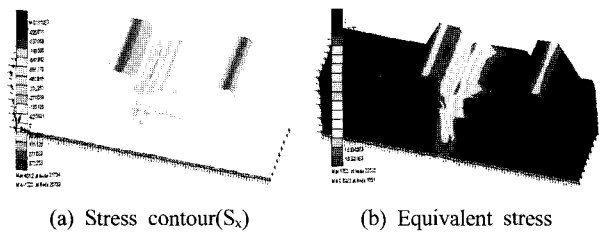


Fig. 11. Stress contour in sleeper(43.4kN/mm)

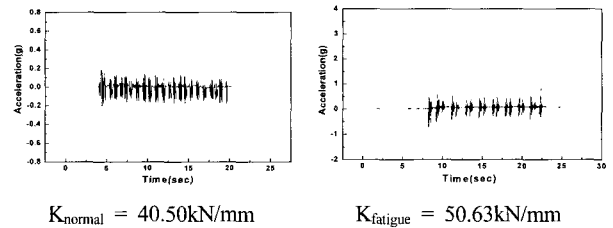


Fig. 12. Acceleration of sleeper

른 레일패드의 탄성소실에 의해 침목의 부담력이 증가되어 콘크리트 궤도구조의 장기 내구성 저하를 유발할 것으로 예상되었다. 또한 침목 직상부 레일변위는 레일패드의 변위를 의미하는 것으로서 피로효과가 고려된 레일패드의 경우 최대 42%까지 감소되는 것으로 나타나 피로하중이 패드의 탄성력소실 및 패드 경화에 따른 변위감소를 유발하는 것으로 나타났다.

4.2 분석결과 고찰

피로효과를 고려한 레일패드 스프링계수(+7.16%=43.4 kN/mm) 적용 시 레일의 응력은 12% 감소되었으며 침목 직상부 레일 변위는 15% 감소되었다. 또한 침목의 부담력(지압응력)은 19% 증가되었다.

국내의 레일체결시스템 성능검증기준에서 제시하고 있는 레일패드 스프링계수의 피로 전, 후 변화율 한계치인 25% (50.63kN/mm)를 고려하였을 경우 레일의 응력은 30% 감소되었고 침목 직상부 레일 변위는 42% 감소되었다.

또한 침목의 부담력은 36% 증가되는 것으로 나타나 콘크리트 침목 허용지압응력(113kgf/cm²)의 약 32%수준 인 것으

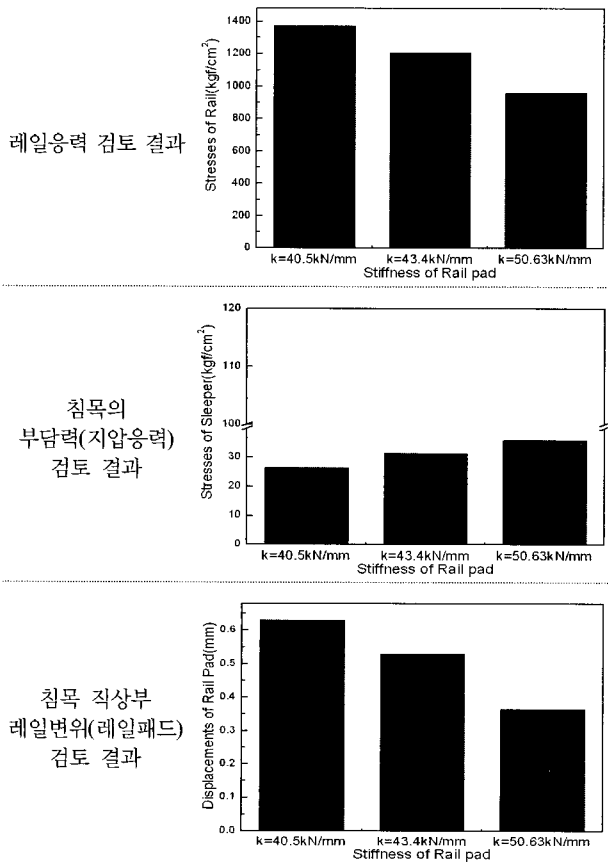


Fig. 13. Results of FE analysis

로 분석되었다. 보다 구체적인 침목 및 콘크리트 도상의 부담력을 정량적으로 파악하기에는 무리가 있겠으나 패드의 피로 효과에 의한 강성증가가 콘크리트 궤도의 침목 부담력을 일부 증가시킬 수 있음을 해석적으로 입증하였다. 따라서 반복 피로하중에 따른 레일패드의 탄성소실에 의해 침목의 부담력이 증가되어 콘크리트 궤도구조의 장기 내구성 저하를 유발할 것으로 예상된다.

레일패드의 정적스프링계수 변화에 따른 궤도부담력을 검토한 해석결과를 Fig. 13에 정리하였다.

5. 결론

본 연구에서 수행한 실내시험 및 해석을 통해 피로효과를 고려한 레일패드의 정적스프링계수 변화에 따른 고속선 콘크리트 슬래브 궤도의 거동특성을 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 실내시험결과, 적용된 체결시스템의 레일패드 정적 스프링계수는 피로시험 후(반복횟수 300만회) 다소 증가된 것

으로 나타나 피로하중이 레일패드의 강성증가(탄성력 저하)에 영향을 주는 것으로 나타났다.

- (2) 유한요소해석결과, 피로효과를 고려한 레일패드의 스프링계수 적용에 따라 레일의 응력과, 침목 직상부 레일 처짐은 다소 감소되었으나 침목의 부담력은 증가되는 것으로 나타났다. 반면 국내의 레일체결시스템 성능검증 기준에서 제시하는 레일패드 스프링계수의 피로 전, 후 변화율 한계치인 25%를 고려하였을 경우에는 레일의 응력과 침목 직상부 레일 처짐은 감소되는 것으로 나타났다.
- (3) 고속철도의 실제 운영하중을 고려한 피로시험 조건에서 나타나는 레일패드의 강성 증가(레일패드의 탄성력 저하)가 콘크리트 궤도의 거동에 미치는 영향에 대한 실내시험 및 해석결과를 바탕으로 볼 때 레일패드 스프링계수의 피로 효과는 고속선 콘크리트 궤도구조의 열화손상에 다소 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단되므로 레일 패드의 피로효과를 고려한 패드강성의 균질성 확보를 통하여 레일패드의 유지보수 효율화 방안 수립이 필요할 것으로 판단된다.

6. 향후연구과제

다양한 종류의 레일패드 및 방진패드에 관한 피로시험을 통해 정, 동적 스프링계수를 산출할 예정이며, 이를 바탕으로 레일패드의 스프링계수 변화에 따른 궤도의 거동특성을 파악함으로써 고속선 궤도재료의 열화손상 및 상태를 정량적으로 파악하고 궤도의 거동한계기준을 수립하게 위한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 韓國高速鐵道建設公團 : 슬래브 軌道構造 設計報告書, 1994. 12.
2. 강기동, 콘크리트 軌道 슬래브의 構造 解析에 關한 研究, 1980.
3. Edgar Darr "Feste Fahrbahn", Tetzlaff Verlag.
4. Dr-Ing. Dieter Hilliges und Walter Bittner "Feste Fahrbahn" Sonderdruck aus Edition ETR, 1990.
5. 이상진, "새로운 콘크리트도상 궤도의 유지관리(1)" 鐵道施設 No.66, 1997.
6. 양신주, 강윤석 "궤도하부강성 변화에 따른 방진슬래브궤도의 동적 특성 연구", 한국철도학회 춘계학술발표회, 1998, 5., pp.307~314.
7. 이종득, 「철도공학」, 노해출판사, pp.13~23, 1996.
8. C. Esveld, "Modern Railway Track", MRT-Production.
9. 日本國有鐵道鐵道技術研究所, "高速鐵道の研究", 日本國有鐵道鐵道技術研究所, 1967.