

http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2019.5.4.387

JCCT 2019-11-48

도시철도 침목플로팅궤도 궤도구성품의 손상평가

Damage Evaluation of Track Components for Sleeper Floating Track System in Urban Transit

최정열*, 김학선**, 한경성***, 장철주****, 정지승*

Jung-Youl Choi*, Hak-Seon Kim**, Kyung-Sung Han***, Cheol-Ju Jang****,
Jee-Seung Chung*

요약 본 연구에서는 도시철도 침목플로팅궤도(STEDEF) 궤도구성품의 손상영향을 분석하기 위하여 20년 이상 공용 중인 현장에서 시료를 채취하여 궤도재료에 대한 육안검사와 실내시험 및 유한요소해석을 통해 궤도구성품의 손상취약부를 분석하였다. 육안검사결과 레일패드와 체결구는 특이사항이 없었으나 침목방진상자는 모서리부분의 마모 및 찢어지는 현상이 발생하였다. 침목방진패드는 두께감소 및 피로경화층이 뚜렷하게 조사되었다. 레일패드와 침목방진 패드에 대한 스프링강성 시험결과, 레일패드의 노후는 뚜렷하지 않았으나 침목방진패드는 설계기준치를 크게 상회하는 것으로 나타나 침목방진패드는 통과톤수에 직접적인 영향을 받는 것으로 분석되었다. 현장시료의 열화상태와 수치 해석 결과와의 비교결과, 수치해석모델의 응력 및 변위 집중위치와 현장시료의 손상위치가 일치하는 것으로 나타나 공용 중인 침목플로팅궤도 궤도구성품의 손상취약부를 실험 및 해석적으로 입증하였다.

주요어 : 궤도구성품, 손상, 열화, 침목방진패드, 유한요소해석

Abstract In this study, in order to evaluate the damage and deterioration of the track components of sleeper floating track (STEDEF), the field samples(specimens) were taken from the serviced line over 20 years old, and the track components were visually inspected, and investigated by laboratory tests and finite element analysis. As a result of visual inspection, the damage of the rail pad and fastener was slight, but the rubber boot was worn and torn at the edges of bottom. The resilience pads were clearly examined for thickness reduction and fatigue hardening layer. As a result of spring stiffness test of rail pad and resilience pad, the deterioration of rail pad was insignificant, but the deterioration of resilience pad exceeded design standard value. Therefore resilience pad was directly affected by train passing tonnage. As a result of comparing the deterioration state of the field sample and the numerical analysis result, the stress and displacement concentration position of the finite element model and the damage position of the field sample were coincident.

Key words : Track component, Damage, Deterioration, Resilience pad, Finite element analysis

*정회원, 동양대학교 철도건설안전공학과 교수
**정회원, 서울교통공사 토목2사업소 차장
***정회원, 서울교통공사 궤도2사업소 팀장
****정회원, 롯데건설 토목사업본부 부장
접수일: 2019년 9월 24일, 수정완료일자: 2019년 10월 8일
게재확정일자: 2019년 10월 11일

Received: September 24, 2019 / Revised: October 8, 2019
Accepted: October 11, 2019
**Corresponding Author: kimhs1969@naver.com
Dept. of Civil Engineering office 2, Seoul Metro, Korea

1. 서 론

도시철도 침목플로팅 궤도(STEDEF)는 현재 국내 도시철도에 도입된 지 약 25년이 경과되었다. 콘크리트 궤도는 자갈궤도에 비해 궤도틀림 발생 및 주기적인 도상자갈 관리가 불필요하여 유지보수비용을 절감시킬 수 있는 궤도구조로 알려져 있으나[1], 사용년수의 증가에 따른 열차 통과톤수의 증가로 인해 궤도재료의 열화에 따른 손상이 유발되어 궤도구성품의 교체 및 보수물량이 증가하는 추세이다.

침목플로팅궤도용 침목방진패드의 피로영향평가와 관련하여 LVT(Low vibration track) 궤도용 침목방진패드의 정적 스프링강성에 영향을 미치는 주요 요인이 피로 및 온도에 따른 영향이었으며, 침목방진패드의 비선형거동특성을 반영한 내구성평가를 위해서는 1,000만회 시험데이터를 분석하는 것이 적정함을 제시하였다[2]. 또한 공용중인 침목플로팅궤도에서 침목방진패드 노후화는 스프링강성 증가와 두께감소를 유발하며, 두께측정결과와 선형회귀분석으로 스프링강성을 개략적으로 평가하는 방법이 유효함을 입증하였다[3]. 최근 침목플로팅궤도에 대한 다양한 연구가 진행되어 왔으나, 대부분 침목플로팅궤도를 구성하는 개별 탄성재료의 스프링강성 변화 및 열화에 미치는 영향을 실험적으로 분석했던 연구로써 복잡한 궤도구성품이 조합된 침목플로팅궤도의 손상취약부를 파악하기 위한 연구는 부족한 실정이다[1,2,3,5,6,7,8]. 또한 실험적으로 파악이 어려운 콘크리트 도상에 매립된 RC침목과 침목방진상자를 비롯하여 침목하부의 침목방진패드의 응력 및 변위발생 수준을 분석한 연구는 전무한 실정이다.

이에 본 연구에서는 침목플로팅 궤도구조에서 궤도재료별로 육안검사와 기초물성시험을 통해 손상수준을 분석하고, 수치해석을 통해 실험적으로 규명하기 어려운 도상에 매립된 침목주변 탄성재료의 응력 및 변위발생 경향을 분석하여 궤도구성품의 손상취약부를 도출하고 이를 현장시료의 손상패턴과 비교함으로써 침목플로팅 궤도구성품의 손상원인을 분석하였다.

II. 도시철도 침목플로팅궤도 현황

국내 도시철도에 부설된 콘크리트 궤도형식은 서울 및 부산, 대구도시철도의 STEDEF 궤도형식과 인천 및

서울메트로 9호선에 부설된 LVT(Low Vibration Track) 궤도, 분당선의 KNR 직결식 궤도구조 등이 있으며, 그 중 가장 많이 부설된 궤도구조 형식은 STEDEF 궤도구조형식이다[2,3,4]. 침목플로팅(STEDEF) 궤도구조는 타이바(Tie-bar)로 연결 고정된 RC Twin block과 침목방진패드를 침목방진상자로 감싸 콘크리트 도상과 분리, 매립함으로써 궤도진동이 구조물로 전달되는 것을 최소화하기 위해 고안된 침목플로팅궤도 중 하나이다[2,3,4].

침목플로팅 궤도구조는 그림 1과 같이 레일, 체결구(e-clip), RC침목, 레일패드, 침목방진패드, 침목방진상자 등 복잡한 궤도구성품으로 구성되어 있다.



그림 1. 침목플로팅궤도(STEDEF) 개요도
Figure 1. Schematic of sleeper floating track(STEDEF)

궤도재료 중 방진기능을 갖는 침목방진패드의 성능 및 상태는 궤도구조 전반의 성능 및 승차감 등에 직접적인 영향을 미칠 수 있으며, 레일 및 침목, 도상콘크리트 등과 같은 상대적으로 강성이 큰 궤도구성품의 영구적인 손상을 가중시키고 이에 따른 유지관리 물량에 직접적인 영향을 미치게 된다[1,2,7,9]. 침목플로팅궤도(STEDEF)의 궤도구성품별 제원은 표 1과 같다[3,4].

표 1. 침목플로팅궤도(STEDEF) 궤도구성품 제원
Table 1. Properties of STEDEF track components

Component	Material	Mechanical properties
Rail pad	E.V.A (Etylene Vinyl Acetate)	Spring stiffness: 400kN/mm Size: 190×193mm Thickness: 5mm
RC Block	Concrete	$f_{ck} = 35\text{MPa}$ Size: 257×684mm Thickness: 250mm
Resilience pad	EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer)	Spring stiffness: 12.5kN/mm Size: 230×660mm Thickness: 12mm
Rubber boot	S B R (Styrene Butadiene Rubber)	Spring stiffness: 650kN/mm Size: 260×690mm Thickness: 5mm

III. 궤도재료 상태평가

1. 개요

본 연구에서는 궤도재료의 상태평가를 위해 약 20여 년 이상 경과된 현장에서 궤도재료의 시료를 채취하였다. 현장 시료채취 구간의 제원 및 시료현황은 표 2와 같다.

표 2. 시료채취 구간 제원

Table 2. Properties of sampling section

Section	Radius(m)	Cant (mm)	Accumulated tonnage (MGT)	Period of use (year)
Section A	600	82	4.1	20
Section B	400	145	5.74	21
Section C	Straight	0	5.74	21

시료 채취는 곡선과 직선 선형별로 총 3개소의 현장에서 채취하였으며, 시료 수량은 개소별로 레일패드와 침목방진패드, 침목방진상자를 내, 외측에서 각각 2개씩 총 4개씩을 채취하였으며, 체결구는 개소별로 내, 외측에서 4개씩 총 24개를 채취하였다. 궤도재료의 시료전경은 그림 2와 같다.



(a) Section A



(b) Section B



(c) Section C

그림 2. 궤도재료시료 전경

Figure 2. Photographs of specimens track components

2. 궤도구성품 육안검사

공용년수는 약 20년 이상 경과된 현장에서 궤도재료 시료를 채취하였으며, 시료별 주요 손상부의 전경은 그림 3과 같다.



(a) Section A



(b) Section B



(c) Section C

그림 3. 궤도재료 손상 전경

Figure 3. Photographs of damaged specimens

구간별 채취한 시료의 육안검사 결과 레일패드와 체결구(e-clip)는 외관상 특이사항이 없었으나, 대부분의 침목방진상자와 침목방진패드는 그림 3과 같이 외관상 변형 및 손상수준이 상당히 진전된 것으로 조사되었다. 침목방진상자의 경우 측면요철이 대부분 마멸된 상태이고 바닥과 측면 경계부는 찢어지거나 바닥면의 두께가 감소된 상태로 조사되었다. 침목방진패드의 경우 열차의 반복하중 작용에 의한 변형으로 인해 변상이 발생한 층이 구분되었으며 패드표면의 고무조직이 부서지는 형태의 손상이 관찰되었다. 이는 반복적인 탄성변위 발생에 의해 침목방진패드의 열화가 진행되어 재료적인 손상이 초래된 것으로 분석되었다.

3. 실내시험

본 연구에서는 레일패드와 침목방진패드의 정, 동적 스프링강성시험 및 두께측정을 수행하였다. 레일패드의 정, 동적 스프링강성 결과는 표 3과 같이 정적 스프링강성은 설계기준치를 만족하였으나 동적 스프링강성은 설계기준치를 초과하는 것으로 나타났다. 그러나 정적

대비 동적 스프링강성의 비가 약 1.21~1.87 수준으로 나타나 설계 시 고려하는 동적 강성 증가수준의 범위 내에 있는 것으로 분석되었다.

표 3. 레일패드 스프링강성 시험결과
Table 3. Test result of spring stiffness of rail pad

Section	Radius (m)	Sample Number	Test result(kN/mm)		Design value (kN/mm)
			static	dynamic	
Section A	600	A-In 1	309	532	300 ~ 450
		A-In 2	304	static/ dynamic	
		A-Out1	440		
		A-Out2	381	1.21~1.75	
Section B	400	B-In 1	302	538	
		B-In 2	310	static/ dynamic	
		B-Out1	317		
		B-Out2	355	1.52~1.78	
Section C	straight	C-In 1	260	487	
		C-In 2	286	static/ dynamic	
		C-Out1	302		
		C-Out2	361	1.35~1.87	

레일패드는 절연기능과 충격완화기능을 하는 재료로서 정적 스프링강성이 약 300kN/mm 이상이므로 도시 철도 열차의 운중에 의한 탄성변위가 매우 미소할 정도로 단단하여 20년이 경과되어도 스프링강성의 변화는 뚜렷하게 나타나지 않는 것으로 분석되었다. 따라서 레일패드는 열차하중에 의한 피로효과(통과톤수)에 직접적인 영향을 받지 않는 것으로 분석되었다. 레일패드 두께측정은 시료별로 각각 총 5포인트(모서리부 4, 중앙부 1)씩 측정하여 그 평균값을 기준치(5mm)와 비교하였으며 그림 4에 나타내었다.

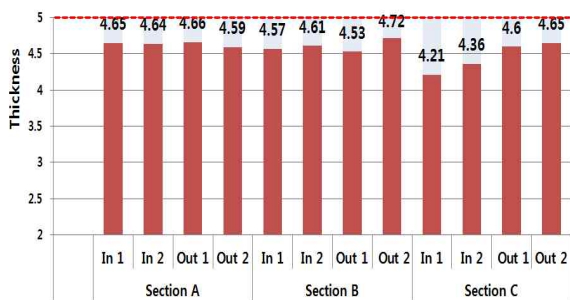


그림 4. 레일패드 두께측정 시험결과(평균)
Figure 4. Test result of rail pad thickness(average)

그림 4와 같이 레일패드의 평균적인 두께 감소율은

최대 16%(최소 6%)로 나타나 상대적으로 레일패드의 경우 피로효과에 의한 주요 손상유형은 두께 감소가 지배적인 것으로 분석되었다.

침목방진패드의 정, 동적 스프링강성 시험결과는 표 4에 나타내었다. 20년 이상 사용한 침목방진패드 시료의 정, 동적 스프링강성의 시험결과는 표 4와 같이 대부분 설계기준치를 상회하는 것으로 분석되었으며, 정적대비 동적 스프링강성의 비가 레일패드보다 상대적으로 높은 수준(최대 2.48, 평균 1.75)으로 나타나 침목방진패드는 레일패드보다 통과톤수 증가에 따른 피로 영향을 직접적으로 받는 것으로 분석되었다.

표 4. 침목방진패드 스프링강성 시험결과
Table 4. Test result of spring stiffness of resilience pad

Section	Sample Number	Test result (kN/mm)		Dynamic ratio (D/S)	Design value (kN/mm)
		static (S)	dynamic (D)		
Section A	A-In 1	19.69	35.64	1.81	· K_{sta} : 14.97 · K_{dyn} : 22.46
	A-In 2	24.59	44.51	1.81	
	A-Out1	21.19	38.35	1.81	
	A-Out2	18.37	33.25	1.81	
Section B	B-In 1	18.96	32.67	1.72	
	B-In 2	14.00	24.12	1.72	
	B-Out1	28.89	49.78	1.72	
	B-Out2	15.17	26.14	1.72	
Section C	C-In 1	13.65	33.89	2.48	
	C-In 2	17.41	25.77	1.48	
	C-Out1	15.22	22.53	1.48	
	C-Out2	16.42	24.30	1.48	

침목방진패드의 두께측정은 레일패드와 마찬가지로 시료별로 각각 총 5포인트(모서리부 4, 중앙부 1)씩 측정하여 그 평균값을 기준치(12mm)와 비교하였으며 시험결과는 그림 5에 나타내었다.

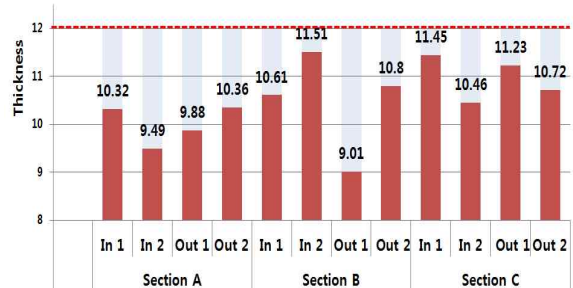


그림 5. 침목방진패드 두께측정 시험결과(평균)
Figure 5. Test result of resilience pad thickness(average)

그림 5와 같이 노후 침목방진패드 두께가 대부분 9mm 이상으로 나타났으며, 초기두께 대비 평균 두께 감소율은 약 14%(최대 25%, 최소 4%)로 나타나 침목방진패드의 스프링강성 증가와 두께 감소가 동시에 발생하는 것으로 분석되었다.

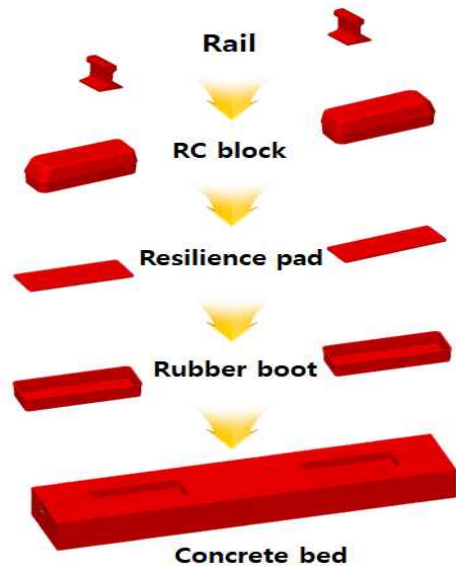
체결구(e-clip)의 체결력 시험결과는 표 5와 같다. 대부분의 시료가 교환기준치를 만족하였으며, 통과톤수 및 선형조건에 따른 뚜렷한 경향을 파악하기는 어려운 것으로 분석되어 체결구의 체결력은 통과톤수에 지배적인 영향을 받는 인자는 아닌 것으로 분석되었다[4].

표 5. 체결구(e-clip) 체결력 시험결과
 Table 5. Test result of toe Load

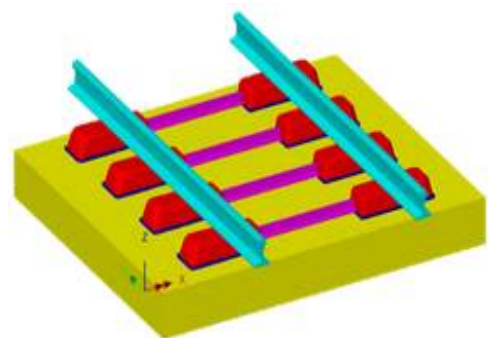
Section	Curve Radius (m)	Sample Number				Remarks
		Track In	Test result (kg)	Track Out	Test result (kg)	
Section A	600	A-1(In)	700	A-1(In)	618	·Design criteria: 1,100~1,400kgf ·Replacement criteria: 500kgf below
		A-1(Out)	911	A-1(Out)	751	
		A-2(In)	863	A-2(In)	695	
		A-2(Out)	892	A-2(Out)	829	
Section B	400	B-1(In)	963	B-1(In)	800	
		B-1(Out)	876	B-1(Out)	823	
		B-2(In)	877	B-2(In)	882	
		B-2(Out)	849	B-2(Out)	922	
Section C	straight	C-1(In)	1,011	C-1(In)	487	
		C-1(Out)	791	C-1(Out)	898	
		C-2(In)	905	C-2(In)	781	
		C-2(Out)	634	C-2(Out)	910	

침목, 침목방진패드, 침목방진상자, 콘크리트도상까지를 모두 모델링하였고, 각각의 구성품별 발생응력과 변위를 검토하기 위해서 솔리드 요소(Solid element)로 모델을 구성하였다[10].

해석에 적용한 하중조건은 프로그램에서 자동으로 적용되는 고정하중에 정적 윤중 80kN에 궤도충격계수 (i=1.2104)를 고려한 동적 윤중을 적용하고 정적 윤중의 60%에 해당하는 횡압을 함께 고려하여 해석을 수행하였다.



(a) Track components model



(b) Full model (3D view)

그림 6. 침목플로팅 궤도의 FE model
 Figure 6. FE model of sleepers floating track

IV. 수치해석

1. 수치해석 모델링

침목플로팅궤도는 침목방진패드와 침목방진상자가 도상 속에 매립되어 있기 때문에 내부의 궤도재료에 발생하는 응력 및 변위수준을 파악하기 어려우며, 열차 하중 작용 시 열화 및 손상측면에서 취약한 위치를 파악하기 어려운 구조이다[2]. 이에 본 연구에서는 실제 형상과 동일한 모델링을 통해 운행하중 조건에서 발생하는 침목방진패드와 침목방진상자의 거동을 파악하고자 하였다 [10].

본 연구에서는 범용구조해석 프로그램인 LUSAS (Ver.15.2)를 사용하였으며, 해석은 탄성범위내로 한정하였다. 수치해석 모델링은 그림 6과 같이 레일과 RC

2. 해석 결과 및 분석

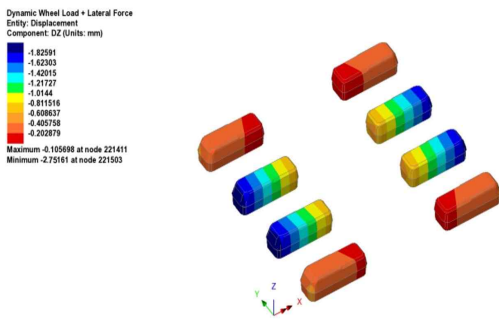
수치해석 결과는 표 6 및 그림 7과 같이 상대적으로 큰 스프링강성을 갖는 침목방진상자의 탄성변위는 하중증가에 따라 변화가 없는 것으로 분석되었으나, 침목방진패드와 침목변위는 해석하중의 증가에 선형 비례하여 증가하는 것으로 분석되었다.

표 6. 해석치와 측정치 비교결과

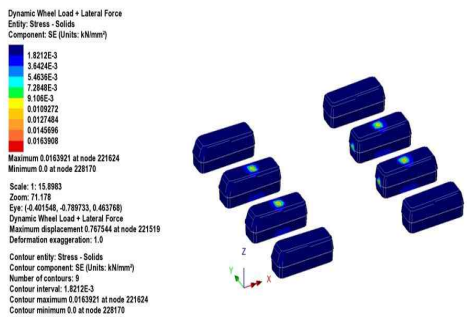
Table 6. Comparison between measured and analysed results

Sleeper displacement(mm)		Resilience pad		Rubber boot	
Analysed	Measured	Displ. (mm)	Stress (MPa)	Displ. (mm)	Stress (MPa)
-2.75	-2.81	-2.71	1.77	-0.04	6.47

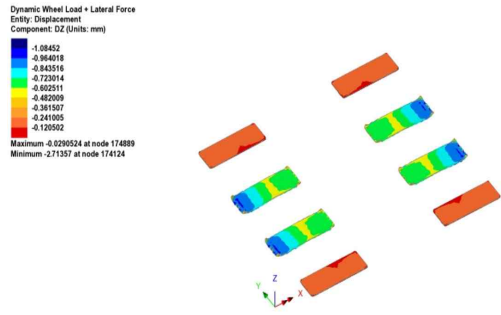
현장측정을 통해 침목의 변위는 측정할 수 있으나 침목방진패드와 침목방진상자의 응력과 변위를 실험적으로 산출하는 것은 기술적인 제약이 따르므로 수치모델을 이용하여 침목방진패드와 침목방진상자의 국부적인 응력 및 변위를 분석하였다. 침목변위에 대한 해석결과와 현장측정결과가 매우 잘 일치하는 것으로 나타나 수치모델의 적정성을 입증하였다.



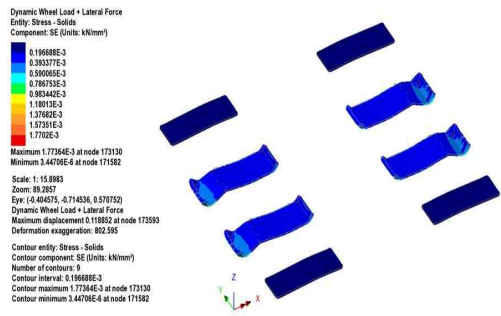
(a) RC block(displacement)



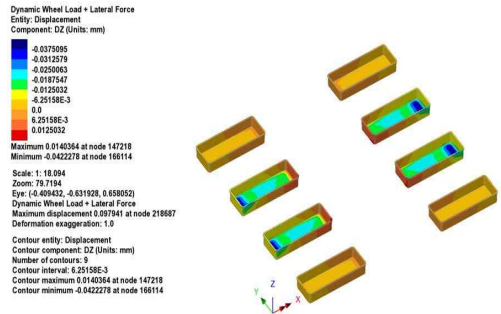
(b) RC block(stress)



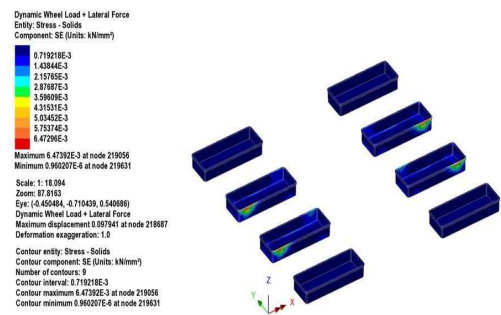
(c) Resilience pad(displacement)



(d) Resilience pad(stress)



(e) Rubber boot(displacement)

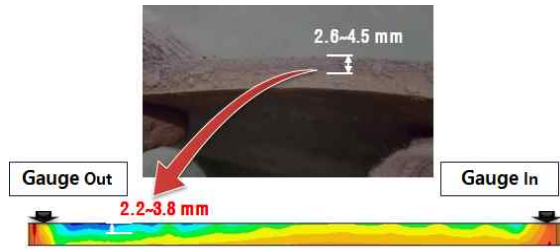


(f) Rubber boot(stress)

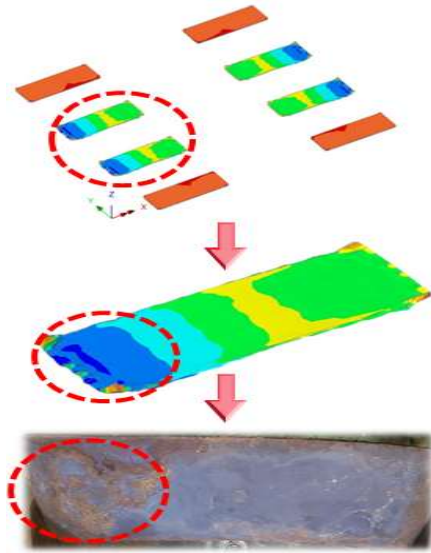
그림 7. 수치해석 결과 (변위 및 응력)
Figure 7. FEM analysis result (Displacement and stress)

침목플로팅케도의 침목의 변위는 침목직하부에 위치한 침목방진패드(탄성변위에 직접적인 영향을 받으며 침목방진상자의 탄성변위는 매우 미소한 것으로 분석되었다. 반면 침목방진상자의 응력집중부에서의 발생 응력이 허용인장응력(12MPa)의 약 50%를 초과하는 것으로 나타났으며, 현장시료에서 찢어진 위치와 해석응력집중부가 일치하여 침목방진상자의 손상은 과도한 발생응력에서 기인된 것으로 분석되었다.

본 연구에서는 그림 8과 같이 실내시험, 수치해석 및 현장측정결과를 바탕으로 침목방진패드와 침목방진상자의 변형특성을 분석하고 손상취약부를 도출하였다.



(a) Hardened layer thickness of resilience pad



(b) Damaged area of resilience pad

그림 8. 침목방진패드 열화패턴 분석결과
 Figure 8. Deterioration pattern of resilience pad

그림 8(a)와 같이 현장에서 발채한 침목방진패드의 피로 경화층은 약 2.6~4.5mm정도의 두께로 조사되었으며 해석결과(2.2~3.8mm)와 매우 유사한 수준인 것으로 분석되어 현장시료의 열화패턴을 해석적으로 입증하였다.

또한 침목방진패드에 대한 응력해석결과, 궤간외측에서 궤간내측보다 큰 응력이 발생하는 것으로 나타나 침목방진패드의 손상취약부를 파악하였으며 현장시료의 손상위치와 유사한 것으로 분석되었다. 따라서 침목방진패드는 그림 8(b)와 같이 전체면적이 고르게 하중을 분담하는 것이 아니라 궤간외측이 두께감소 및 열화가 가중될 수 있는 취약부인 것으로 분석되었다. 또한 침목방진상자의 열화패턴 분석결과는 그림 9와 같다.

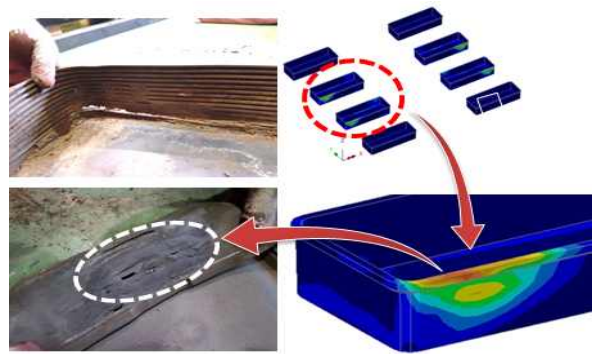


그림 9. 침목방진상자 열화패턴 분석결과
 Figure 9. Deterioration pattern of rubber boot

수치해석 결과, 침목과 침목방진상자가 접촉되는 측면상부와 바닥 경계부 모서리에서 응력 및 변위가 집중되는 것으로 분석되었으며, 침목방진상자의 바닥면도 역시 해석결과에서의 응력집중부와 현장시료의 열화패턴이 일치하는 것으로 분석되었다.

V. 결론

본 연구에서는 도시철도 침목플로팅케도(STEDEF) 케도구성품의 손상특성을 분석하고자 사용연수가 20년 이상 경과된 공용중인 도시철도 현장에서 케도재료(시료)를 채취하여 육안검사, 실내시험 및 유한요소해석을 수행함으로써 케도구성품의 손상특성 및 취약부를 분석하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1) 체결구(e-clip)의 체결력은 통과톤수에 직접적인 영향을 받지 않으며, 레일패드의 경우 스프링강성의 수준이 실 주행열차하중에 의한 동적 운중에 반응하지 못할 정도로 단단한 스프링강성을 가지므로 열차하중에 의해 탄성변위가 발생되지 않아 통과톤수에 직접적인 영향을 받지 않는 케도재료인 것으로 분석되었다. 따라

서 체결구와 레일패드의 경우 누적통과톤수에 의한 주기적인 교체는 큰 의미가 없음을 실험적으로 입증하였다.

2) 침목방진상자의 경우, 침목과 접촉되는 측면상부와 침목방진상자 바닥경계부 모서리에 응력 및 변위가 집중되어 침목방진상자의 변형 및 열화손상 측면에서의 취약부임을 수치해석 및 육안조사결과를 바탕으로 입증하였다.

4) 침목방진패드는 전체면적이 하중을 고르게 분담하는 것이 아니라 궤간내측보다는 궤간외측에 하중이 집중되어 두께감소 및 열화가 가중될 수 있는 취약부인 것으로 분석되었다. 따라서 현장시료를 이용한 노후 침목방진패드의 스프링강성 평가 시 궤간 외측부 단면에서 시료를 채취하여 실험을 시행함이 적절할 것으로 판단되었다.

References

- [1] J.Y. Choi, H.S. Gong, J.H. Kim, H.S. Kim, J.S. Chung, "An Experimental Study on Causes Evaluation of Rail Corrugation for Concrete track(STEDEF) in Urban Transit", The Journal of the Convergence on Culture Technology(JCCT), Vol. 4, No. 4, p.413-418, November 30, 2018 <http://doi.org/10.17703/JCCT.2018.4.4.413>
- [2] D.U. Lee, "Fatigue Effect Evaluation Method of Resilience Pad for Sleeper Floating Track", Ph.D. thesis, Seoul National University of Science and Technology, 2015
- [3] S.E. Lim, "A Study of correlation between spring constant of anti-vibration sleeper pad and thickness variation on floating track", Master's thesis, Seoul National University of Science and Technology, 2017
- [4] H.S. Kim, "An Influence of the Fastening Force on the Rail Force of the Curved Track in Urban Railway", Master's thesis, Seoul National University of Science and Technology, 2016
- [5] G.H. Park, "The Temperature Effect for Fatigue Life of Polyurethane Resilient Pad in the Fastening System", Master's thesis, Seoul National University of Science and Technology, 2011
- [6] C.S. Woo, B.I. Choi, H.S. Park, S.C. Yang, S.Y. Jang, E. Kim, "Lifetime Prediction of Rubber Pad for High Speed Railway Vehicle", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A

- Vol. 33, No. 8, pp. 739-744, 2009 <http://doi.org/10.3795/KSME-A.2009.33.8.739>
- [7] I.C. Jeong, "An Experimental Study on the Evaluation of Dynamic Behavior for Floating Track System", Ph.D. thesis, Seoul National University of Science and Technology, 2015
- [8] J.I. Kim, "Analysis on the mechanical damage behavior of resilient sleeper on concrete ballast", Master's thesis, Dongguk University, 2003
- [9] J.Y. Choi, "Qualitative Analysis for Dynamic Behavior of Railway Ballasted Track", Ph.D. thesis, Technical University of Berlin, 2014 <http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-3921KSME-A.2009.33.8.739>
- [10] J.Y. Choi, P.S. Kim, J.S. Chung, "A Study on Optimum Spacing of Rail Joint for Personal Rapid Transit(PRT) Track System," The Journal of the Convergence on Culture Technology(JCCT), Vol. 4, No. 3, p.213-220, August 31, 2018 <http://doi.org/10.17703/JCCT.2018.4.3.213>