

가속 열노화시험을 통한 레일패드 사용수명예측

Useful lifetime prediction of rail-pad by using the accelerated heat aging test

우창수†, 박현성*, 최병익*, 양신추**, 장승엽***, 김은***
Woo, Chang-Su Park, Hyun-Sung Choi, Byung-IK Yang, Sin-Chu Jang Sung-Yep Kim, Eun

ABSTRACT

Rail-pad is an important and readily replaceable component of a railway track, as it is the elastic layer between the rail and the sleeper. Characteristics and useful lifetime prediction of rail-pad was very important in design procedure to assure the safety and reliability. In order to investigate the useful lifetime, the accelerate test were carried out. Accelerated test results changes as the threshold are used for assessment of the useful life and time to threshold value were plotted against reciprocal of absolute temperature to give the Arrhenius plot. By using the acceleration test, several useful lifetime prediction for rail-pads were proposed.

1. 서 론

육지 교통수단으로 안정성과 경제성에서 이점이 있는 철도는 대표적인 대중 교통수단으로서 자리 매김을 하고 있다. 최근에는 좀 더 빠른 운송수단을 지향하는 현대사회의 요구조건에 맞춰 점점 더 고속화 되어가고 있으며, 그와 더불어 조용하고 안락한 승차감과 안전성을 원하는 승객의 요구를 만족시키기 위해 여러 가지 편의시설 및 궤도공학의 발전을 필요로 하게 되었다(1,2).

철도의 고속화에 따라 차량과 궤도에서 발생하는 진동과 소음을 줄일 수 있는 방안으로 궤도 전체의 탄성확보 뿐만 아니라 열차하중에 의해 침묵으로 전달되는 충격을 완화시켜 침묵과 도상의 파손을 방지하는 역할을 하고 있는 레일패드에 대한 많은 관심과 연구를 기울이고 있다(3,4,5,6).

레일패드의 강성변화가 궤도에 미치는 영향을 분석하기 위해 일본과 유럽 등지에서 레일패드의 열화에 따른 강성변화에 대한 실험적·해석적 연구를 수행하고 있으나, 국내 관련기술은 설계·해석기술을 비롯한 성능 및 수명평가의 모든 면에서 매우 취약한 상태로 외국 업체의 부품을 전량 수입하는 실정으로 기술 보유국으로부터의 기술종속 탈피와 독자기술의 확보를 위해서는 관련기술 확보가 필요하다하겠다. 현재까지 국내외적으로 통과톤수나 기후요인 등을 고려한 레일패드의 교체주기에 대한 기준이나 레일패드의 경화도가 궤도의 거동에 미치는 정량적·정성적 분석에 대한 연구는 미비한 실정이다.

특히, 고속철도용 레일패드는 신뢰성 데이터가 전무한 상태로 철도산업 전체의 신뢰성 보증에 큰 장애요인으로 작용하고 있어 레일패드의 특성시험을 통한 노후화의 정량화가 필요하다하겠다. 따라서, 본 연구에서는 고속철도에 적용되는 레일패드에 대해 운행 및 제반 환경조건을 고려하여 레일패드의 특성 및 가속 열 노화시험을 수행하여 아레니우스 선도를 통해 경도 및 두께변화에 따른 사용수명 식을 도출하였다. 본 연구를 통해 얻어진 고속철도용 레일패드의 사용수명예측을 위한 연구결과는 레일패드의 유지 및 교체기간 결정에 활용될 수 있으며, 수명평가기술 향상으로 레일패드의 신뢰성을 평가하는데 크게 기여할 것으로 기대된다.

† 책임저자 : 정회원, 한국기계연구원, 나노융합기계, 책임연구원
E-mail : cswoo@kimm.re.kr
TEL : (042)868-7882 FAX : (042)868-7884

* 정회원, 한국기계연구원, 나노융합기계, 선임연구원

** 정회원, 한국철도기술연구원, 차륜궤도, 수석연구원

*** 정회원, 한국철도기술연구원, 차륜궤도, 선임연구원

2. 레일패드 특성 및 열 노화시험

2.1 레일패드 특성시험

레일체결장치 구성품 중 하나인 레일패드는 레일로부터 전달되는 충격하중을 완화시켜 침목을 보호하고 열차주행에 따라 레일에 발생하는 고주파 진동을 저감시켜 궤도파괴를 유발하는 침목 및 도상 가속도를 낮추고, 진동 및 소음을 줄이는 중요한 역할을 담당하고 있다. 이러한 레일패드는 열차의 통과횟수와 사용기간이 증가함에 따라 경화가 진행되고 이에 따라 탄성이 감소됨으로 인해 궤도에 악 영향을 미치게 된다. 따라서, 본 연구에서는 고속철도에 사용되는 레일패드의 특성 및 사용수명을 예측하기 위해 고무소재 레일패드에 대한 특성 및 가속 열 노화시험을 수행하였다(7).

그림 1(a)는 본 연구에 사용된 레일패드이며 그림 1(b)와 같이 돌출된 10개의 위치를 선정하여 경도 및 두께를 측정하였다. 그림 2는 사용되기 전 레일패드에 대한 상온에서의 경도 및 두께를 나타낸 것으로 경도는 72 HD, 두께는 dir 10.18mm로 측정되었다.

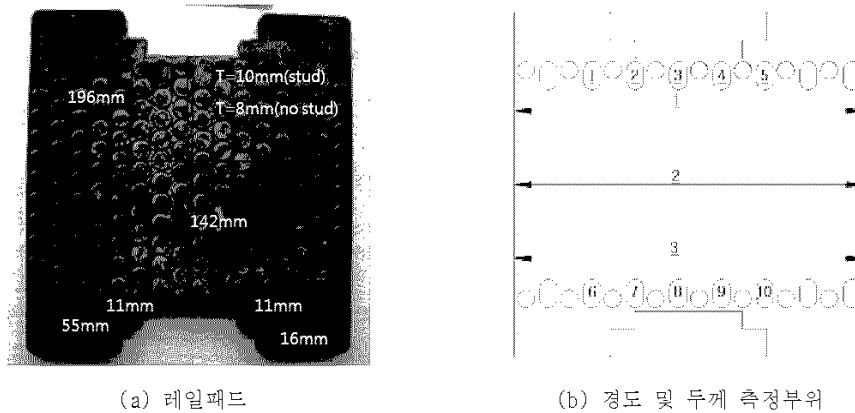
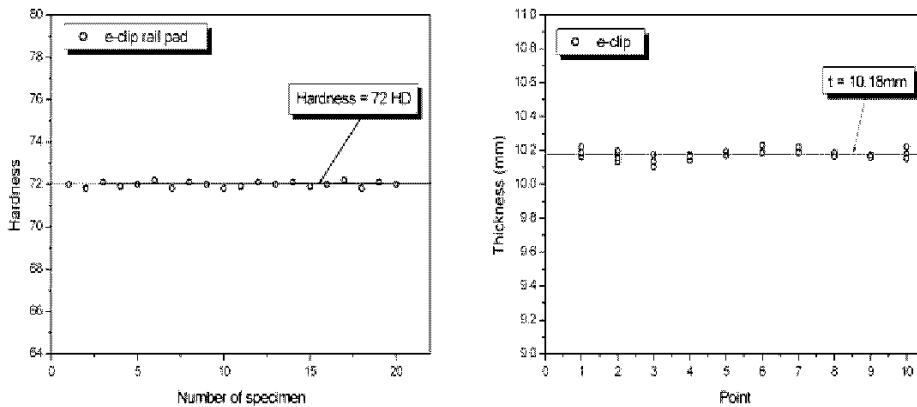


그림 1 고속철도용 레일패드 형상



(a) 경도

(b) 두께

그림 2 레일패드 경도 및 두께

정적상태에서 레일패드의 하중변화와 그에 대응하는 변위량과의 관계를 측정하기 위한 정적시험은 레일패드 저부 공칭폭과 동일한 폭의 하중 재하판을 통하여 패드에 하중재하 하였으며, 하중 재하판은 종방향 패드의 양쪽으로 패드 길이보다 최소 1cm 더 길게 제작하여 레일패드가 완전히 덮히도록 설치하였다. 하중재하 범위는 0 ~ 95kN 까지이며 4회 시험하여 첫 번째 결과를 제외한 나머지 시험으로 변위, 하중을 평균하여 식(1)과 같은 방법으로 정적 스프링계수를 산정하였다.

$$K_{st} = \frac{F2 - F1}{D2 - D1} \quad (1)$$

여기서, F1: 20kN, D1: 20kN에서의 변위(mm), F2: 95kN, D2: 95kN에서의 변위(mm)

동적시험은 정적시험과 동일한 세팅으로 4Hz로 20kN ~ 95kN의 하중범위에서 900 cycle 동안 시험하고

이후 1,000 cycle 까지 하중, 변위를 측정하여 동적 스프링계수를 구하였다. 그림 3은 정적 및 동적시험 결과를 나타낸 것으로 정적 스프링계수는 약 83 kN/mm, 동적 스프링계수는 약 130 kN/mm으로 정적 스프링계수의 1.5배 정도로 측정되었다.

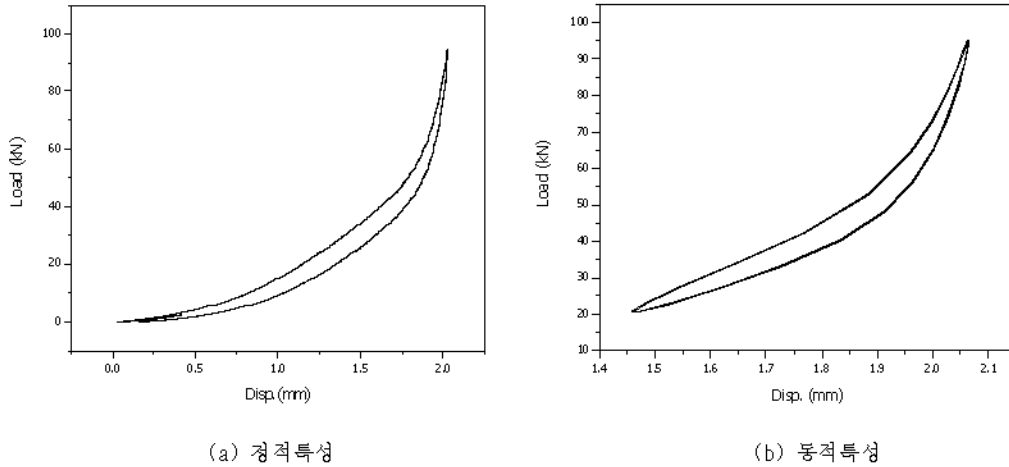


그림 3 고속철도용 레일패드 특성선도

2.2 레일패드 열 노화시험

레일패드의 노화특성을 파악하기 위해 여러 가지 특성저하 인자 중 가장 중요한 온도를 고려하여 그림 4(a)와 같이 환경챔버를 이용하여 70°C, 85°C, 100°C에서 일정기간 동안 영구압축줄음을 장치에서 열 노화시킨 후 일정기간에서의 레일패드 경도 및 두께와 스프링상수의 변화를 측정하였다.

레일패드의 두께측정은 주어진 시간이 경과한 뒤 레일패드를 노화시험기에서 꺼내어 영구압축줄음을 장치로부터 분리 한 후 상온에서 4시간 정도 방치하였다. 이 시간동안 레일패드의 두께는 압축상태보다 일정량 회복하여 두께가 변하게 되는데 이때의 두께를 측정하였다. 그림 4(b)~4(c)는 각 온도에서 경도 및 두께변화를 나타낸 것으로 온도가 높고 노화일수가 길수록 경도 및 두께변화가 크게 나타남을 알 수 있었다.

그림 5는 70°C, 85°C, 100°C에서 30일간 노화시킨 각 온도에서 레일패드의 정적 스프링계수의 변화를 나타낸 것으로 온도가 높고 노화시간이 길수록 강성변화가 심하게 나타나 70°C에서는 약 68%, 85°C에서는 260%, 100°C에서는 306%의 정적 스프링계수의 변화가 발생하였다

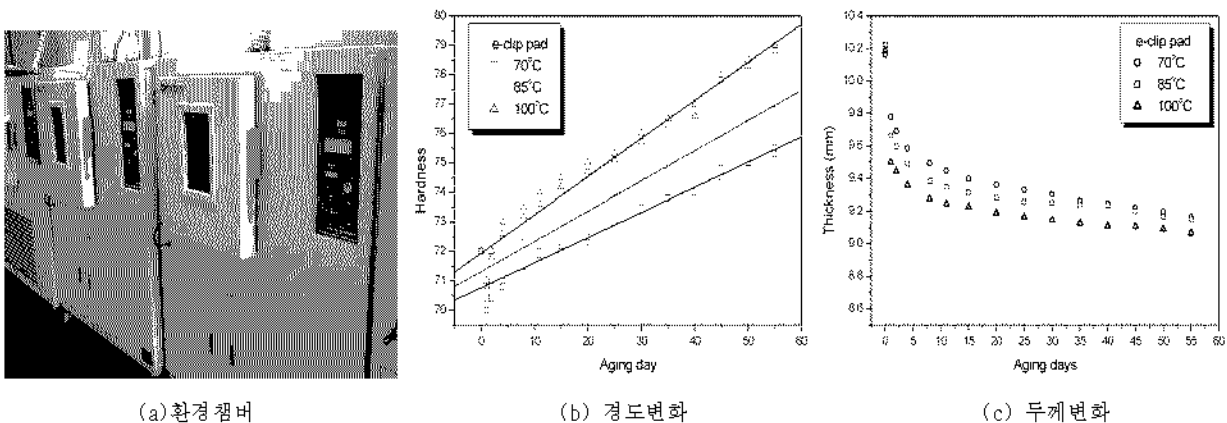


그림 4 열 노화시험을 통한 경도 및 두께변화

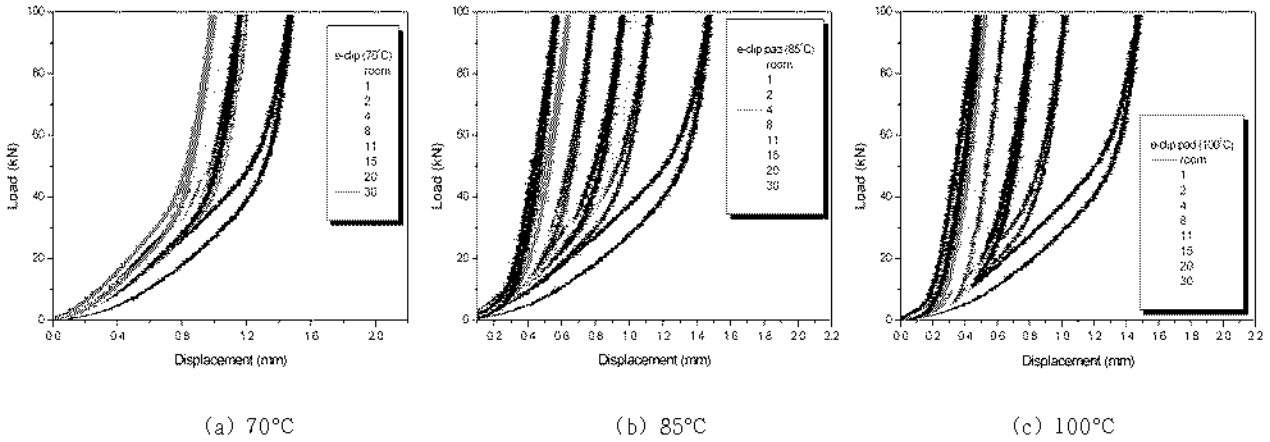


그림 5 열 노화시험을 의한 특성변화

3. 레일패드 사용수명 예측

3.1 아레니우스 모델

고무제품은 사용 환경이나 조건이 복잡하고 수명예측에 필요한 데이터가 절대적으로 부족하며 온도, 습도, 오존, 빛, 유체, 기계 및 전기적 응력 등의 특성저하 인자 및 사용조건과 배합조건 등이 다양하기 때문에 사용수명을 예측하는 것은 쉬운 일이 아니다. 특히, 실제 사용될 때와 동일한 조건에서의 시험을 설계하여 수명을 예측하기란 매우 어려운 문제이다[7]. 본 연구에서는 레일패드에 대한 사용수명예측을 위해 열 노화시키는 가속방법을 선택하여 가속시험을 통해 얻어진 데이터로 아레니우스(Arrhenius) 모델을 이용하여 사용수명을 예측하였다.

아레니우스 모델은 여러 온도에서 초기 특성 값의 일정 변화가 발생하는 시점을 수명으로 판단하여 시간-온도의 마스터 커브 및 관계식으로 표현된다. 이러한 관계로부터 특정 온도에서 사용수명을 예측할 수 있으며 상온에서의 자연노화에 의한 수명을 가속시험 결과로 얻어진 데이터를 이용하여 예측할 수 있다. 아레니우스 관계식은 노화 상태에서의 특성 값을 P 라고 하면 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$-\frac{dP}{dt} = kP, \ln\left[\frac{P}{P_0}\right] = -kt \quad (2)$$

여기서, P : 고무특성값, P_0 : 노화 전 고무특성값, t : 시간, k : 반응속도정수(reaction rate)

식(2)에서 반응속도정수 k 는 특성 값 P 의 노화반응을 나타내는 정수로 1889년 S. Arrhenius는 식(3) 및 (4)와 같은 실험식을 구하였다.

$$k = A \cdot e^{-E/RT} \quad (3)$$

$$\ln k(T) = -\frac{E}{RT} + C \quad (4)$$

여기서, A, C : 상수, E : 활성화 에너지(J/mol), R : 기체상수(8.314J/mol·K), T : 절대온도(K)

식(4)에서 $\ln k(T)$ 는 $1/T$ 와 기울기가 E/R 인 선형적인 관계를 보인다. 식(2)에서 노화시킨 특성값 P 가 있는 시점을 수명이라고 하면 그 시점의 수명 t 는 식(5)를 통하여 얻을 수 있다.

$$t = -\ln(P/P_0)/k \quad (5)$$

식(5)에서 수명 t 는 반응속도정수 관계식 (3)으로부터 온도의 관계로 표현되어 수명의 온도 환산이 가

능해 진다. 특성 값 P 로 온도 T_1 에서의 수명 t_1 은 온도 T_2 에서의 수명 t_2 와 같은 것이 되어 이것을 식으로 표현하면 식(6)과 같다.

$$\ln\left[\frac{t_1}{t_2}\right] = \frac{E}{R}\left[\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right] \quad (6)$$

다시 말하면 저온-장시간의 변화는 고온-단시간의 변화와 같게 되어 상온에서 수년의 변화를 고온 가속노화로 단 시간에 평가하는 것이 가능하다.

3.2 특성변화에 의한 레일패드 사용수명 예측

가속 열 노화시험결과를 이용하여 레일패드의 경도 및 두께와 정적 스프링계수의 변화에 따른 사용수명을 예측하였다.

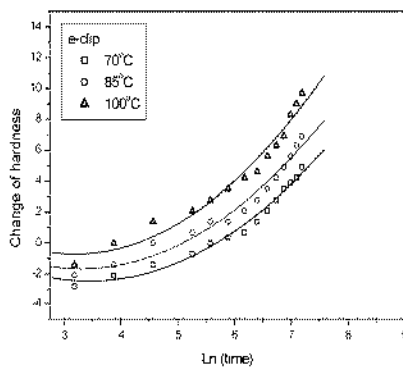
그림 6은 노화온도 및 노화일수에 따른 레일패드의 경도 및 두께와 정적 스프링계수의 변화율을 나타낸 것으로 노화온도가 높고 노화일수가 길수록 변화율이 증가함을 알 수 있었다. 레일패드에 대한 온도변화에 따른 특성변화를 나타내기 위해 x축의 시간을 대수 값으로 선형화하였으며 y축은 초기상태를 기준으로 경도 및 두께와 정적 스프링계수의 변화율을 나타내었다.

레일패드의 특성변화율에 따른 사용시간과의 관계로부터 그림 7과 같은 아레니우스 선도를 구할 수 있고 최소 자승법을 이용하여 레일패드의 사용 수명예측식을 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 구해진 수명예측식을 이용하여 상온 25°C에서 경도 및 두께변화율이 10%일 경우의 사용수명은 각각 2.5년과 1.7년으로 예측되었으며, 정적 스프링계수의 변화가 50%일 경우에는 약 6.8년으로 예측되었다.

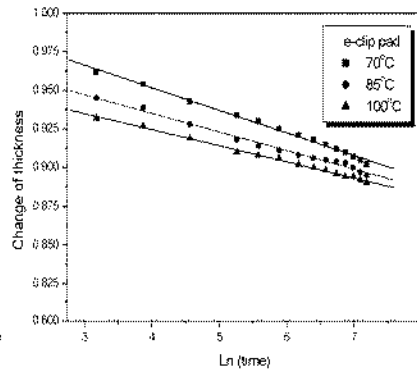
이상으로 열 노화에 의한 가속시험을 수행하여 아레니우스 선도를 통한 레일패드의 경도 및 두께와 스프링계수변화에 따른 사용수명을 예측하는 기법은 레일패드의 유지 및 교체기간 결정에 활용될 수 있으며, 사용수명평가기술 향상으로 레일패드의 신뢰성을 평가하는데 크게 기여할 것으로 기대된다.

표 1 레일패드의 특성변화에 따른 사용수명 예측

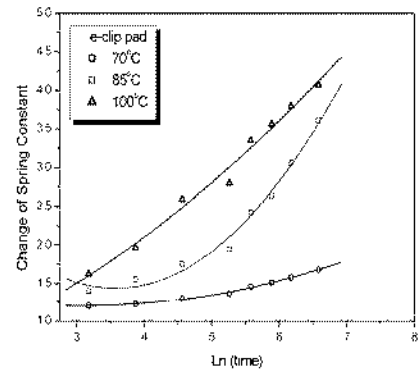
특성변화율		사용수명예측식	사용수명(년)
경도	5%	$\ln(t) = -5.67 + 4466/(T+273)$	1.2
	10%	$\ln(t) = -2.88 + 3840/(T+273)$	2.5
두께	7.5%	$\ln(t) = -17.2 + 7892/(T+273)$	1.3
	10%	$\ln(t) = -6.40 + 4770/(T+273)$	1.7
정적 스프링상수	50%	$\ln(t) = -29.72 + 12135/(T+273)$	6.8
	60%	$\ln(t) = -31.61 + 12949/(T+273)$	15.9



(a) 경도



(b) 두께



(c) 정적 스프링상수

그림 6 레일패드의 특성변화율과 시간과의 관계선도

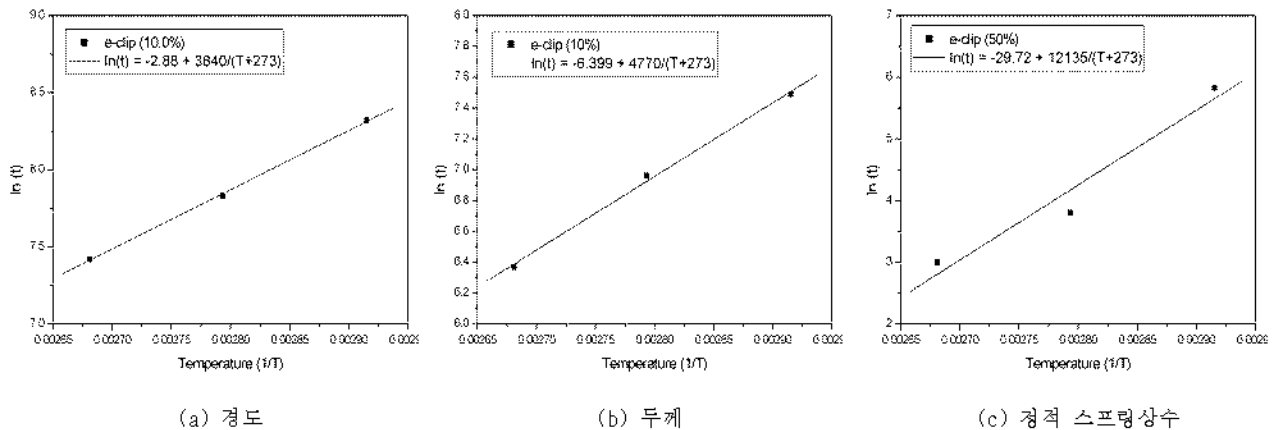


그림 7 레일패드의 특성변화에 따른 사용수명 예측 선도

4. 결 론

본 연구에서는 고속철도 레일체결장치에 적용되는 레일패드를 대상으로 운행조건 및 제반 환경조건을 고려하여 레일패드의 노후정도를 정량화할 수 있는 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 레일패드의 특성을 파악하기 위해 상온 및 다양한 온도조건에서의 열 노화시험을 통해 경도 및 두께와 정, 동적 스프링계수의 변화를 측정하였다.
- (2) 열 노화에 의한 가속시험을 수행하여 아레니우스 선도를 통해 레일패드의 특성변화에 따른 사용수명 예측식을 도출하였다.
- (3) 도출된 사용수명 예측식을 이용하면 25°C에서 레일패드의 경도 및 두께변화율이 10%일 경우의 사용수명은 각각 2.5년과 1.7년으로 예측되었으며, 정적 스프링계수의 변화가 50%일 경우에는 약 6.8년으로 예측되었다.
- (4) 본 연구를 통해 얻어진 고속철도 레일패드의 노후화 정량화를 위한 체계적인 연구결과는 관련 제품의 사용수명예측이 가능하여 레일패드의 유지 및 교체기간 결정에 활용될 수 있으며, 신뢰성 평가기술 향상으로 레일패드 기술력을 한 차원 높이는데 크게 기여할 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 한국철도기술연구원에서 시행한 "고속철도 체결장치 적정 교환주기 산정연구" 결과의 일부임을 밝히며 한국철도기술연구원 및 한국철도시설공단 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국철도기술연구원 (2007), "고속철도 선로 구축물시스템 안정화 기술개발", 고속철도기술개발사업 보고서.
2. 한국철도기술연구원 (2002), "고속전철 시스템 엔지니어링 기술개발", 고속철도기술개발사업보고서.
3. 윤태형 (2007), "레일패드의 경화에 따른 궤도의 동적응답 변화 특성 분석", 석사학위논문, 서울산업대 철도전문대학원.
4. 박용걸, 강기동, 최정열 (2007), "피로효과를 고려한 레일패드의 정적스프링계수 변화에 따른 콘크리트 슬래브 궤도의 거동분석", 한국철도학회논문집, 제10권, 제5호, pp.499-505.
5. 김인재 (2005), "레일체결장치의 성능평가 방법 및 기준", 철도시설, 통권 제95호, pp.17-29.
6. S-C. Yang, H-C. Noh, Y-S. Kang, and J-D. Lee (2000), "Development of sleeper for high speed railway", Korea society for railway, pp. 311-318
7. R-P. Brown, T. Burtler, and S-W. Hawley (2001), "Aging of rubber-accelerated heat aging test results", RAPRA Technology