

복합가속열화시험을 통한 레일체결장치 폴리우레탄 탄성패드의 열화 경향 분석

Evaluation of the Degradation Trend of the Polyurethane Resilient Pad in the Rail Fastening System by Multi-stress Accelerated Degradation Test

성덕룡* · 박광화

Deok-Yong Sung · Kwang-Hwa Park

Abstract The use of a concrete track is gradually growing in urban and high-speed railways in many part of the world. The resilient pad, which is essentially when concrete tracks are used, plays the important role of relieving the impact caused by train loads. The simple fatigue test[1] to estimate the variable stiffness of resilient pads is usually performed, but it differs depending on the practical conditions of different railways. In this study, the static stiffness levels of used resilient pads according to passing tonnages levels were measured in laboratory tests. Also, the simple fatigue test and the multi-stress accelerated degradation test for new resilient pads were performed in a laboratory. The static stiffness of the used pad was compared with the results of tests of usage times and cycles. The results of the comparison showed that the variable static stiffness levels of the used pad were similar to results of the multi-stress accelerated degradation test considering the fatigue and heat load. With a T-NT equation related to the degree of the multi-stress accelerated degradation, a model of multi-stress accelerated degradation for a resilient pad was devised. It was found through this effort that the total acceleration factor was approximately 2.62. Finally, this study proposes an equation for a multi-stress accelerated degradation model for polyurethane resilient pads.

Keywords : Polyurethane Resilient Pad, Static Stiffness, Fatigue Test, Multi-stress Accelerated Degradation Test, Equation of Multi-stress Accelerated Degradation Model

초 록 국내외적으로 도시철도 및 고속철도에서 콘크리트궤도 부설이 증가하고 있는 추세에 있다. 콘크리트궤도에서 필수적으로 사용되고 있는 레일체결장치의 탄성패드는 열차하중에 대한 충격을 완화시켜주는 중요한 역할을 담당하고 있다. 일반적으로 탄성패드의 강성변화를 평가하기 위해서는 단순피로시험[1]이 시행되고 있으나 이는 실제 철도환경조건과는 상이할 수 있다. 본 연구에서는 실제 철도현장에서 통과톤수를 받은 탄성패드에 대한 정적스프링계수를 측정하였다. 또한, 신품 탄성패드에 대해서 단순피로시험과 복합가속열화시험을 수행하였다. 사용한 탄성패드의 강성값은 사용시간과 반복횟수에 따른 시험결과값과 비교되었다. 시험결과와 비교를 통해 사용한 탄성패드의 정적스프링계수 변화경향이 반복하중과 열이 함께 고려된 복합가속열화시험결과와 동일한 경향을 보이는 것을 확인하였다. 또한, 복합가속열화와 관련된 T-NT식을 이용하여 탄성패드의 복합가속열화 모델을 도출하였으며, 약 2.62의 가속계수를 가지는 것을 확인하였다. 최종적으로 본 연구를 통해 폴리우레탄 탄성패드에 대한 복합가속열화 모델을 제안하였다.

주요어 : 폴리우레탄 탄성패드, 정적스프링계수, 단순피로시험, 복합가속열화시험, 복합가속열화 모델식

1. 서 론

국내외적으로 도시 및 고속철도에서 콘크리트궤도 부설이 점차 증가하고 있는 추세에 있다. 콘크리트궤도에서 필수적으로 사용되고 있는 레일체결장치의 탄성패드는 열차하중에 대한 충격을 완화시켜주는 매우 중요한 역할을 담당하고 있으며, 사용시간에 따른 탄성패드의 강성변화를 예측하기 위

한 방법은 국내외 연구진들의 주요 관심사가 되고 있다. 열차 주행으로 인한 진동을 저감시키고, 레일과 콘크리트슬래브 사이에서 탄성역할을 수행하는 탄성패드의 경우 사용시간이 증가할수록 강성이 증가하게 되어 콘크리트궤도에 전달되는 하중의 크기를 증가시켜 승차감 저하, 콘크리트궤도의 파손을 유발할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 유럽 및 국내 철도선진국들에서는 반복하중의 크기(누적통과톤수)에 의한 평가를 통해 탄성패드의 강성 변화를 예측[1]하고 있으나, 온도하중과 열차하중을 동시에 받는 철도환경 조건에서 고분자 화합물(폴리우레탄)인 탄성패드는 열에 의한 물리적 변화가 예상되기 때문에 실제 사용조건을 고려한

*Corresponding author.

Tel.: +82-43-649-3268, E-mail : dysung@mail.daewon.ac.kr

©The Korean Society for Railway 2013

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2013.16.6.466>

내구성 평가가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 실제 철도환경에서 일정시간 사용된 탄성패드를 현장에서 수거하여 정적스프링계수 측정시험을 수행하였고, 신품 탄성패드에 대해서는 단순피로시험과 열과 피로가 함께 고려된 복합가속열화시험을 수행하였으며, 그 결과를 비교함으로써 실제 철도환경을 고려한 레일체결장치 탄성패드의 강성변화 분석기법을 제시하고자 하였다.

2. 신뢰성평가를 위한 가속열화 모델식 (T-NT 관계식)

통계학적으로 고분자 재료의 가속열화를 예측하기 위한 모델식은 온도와 비열(Non-Thermal)이 존재할 경우 아레리우스 모델(Arrhenius Model)[3]과 역승법 모델(IPL, Inverse Power Law Model)[3]을 조합한 관계식이 적용되고 있다. 특히, 가속열화 요인으로 열과 피로가 함께 작용할 경우에 대한 복합가속열화 모델식은 T-NT 관계식(Temperature-Non Thermal Relationship Equation)[4]이 사용되고 있다. T-NT 관계식은 가속인자로 온도와 비열을 고려하고 있으며, 비열에 관한 인자는 전압, 피로, 진동 등을 사용하고 있고, 관계식은 식 (1)과 같다.

$$L(V, T) = \frac{1}{K \cdot V^n} \cdot C \exp\left(-\frac{E_A}{k \cdot T}\right) \quad (1)$$

여기서,

$L(V, T)$: 정량적 수명(life-time of quantitative),

V : 피로 스트레스 수준(non-thermal),

T : 온도 스트레스 수준(temperature),

C : 상수(constant variable),

K, n : 결정해야 할 관계식의 모수(parameter),

E_A : 활성화에너지(eV),

k : 볼츠만 상수($8.6171 \times 10^{-5} eVK^{-1}$),

T : 절대온도(Kelvin)

T-NT 관계식은 고장 메커니즘이 피로일 경우 설명할 수 있는 역승법 모델(Inverse Power Law Model)과 고장 메커니즘이 온도일 경우 설명할 수 있는 아레리우스 모델(Arrhenius Model)을 하나의 관계식으로 나타낸 것이다. 본 연구에서는 사용조건 수명과 가속조건 수명이 직선비례한다고 가정하였으며, 식 (1)에 의한 가속계수를 구하는 식은 식 (2)와 같다.

$$AF = \frac{L_{use}}{L_{accelerated}} = \frac{\frac{1}{K \cdot V_u^n} C \exp\left(\frac{E_A}{k \cdot T_u}\right)}{\frac{1}{K \cdot V_a^n} C \exp\left(\frac{E_A}{k \cdot T_a}\right)} = \left(\frac{V_a}{V_u}\right)^n \exp\left[\frac{E_A}{k} \left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_a}\right)\right] \quad (2)$$

여기서,

AF : 가속계수(acceleration factor),

L_{use} : 사용수준의 수명(characteristic life of use),

$L_{accelerated}$: 가속수준의 수명(characteristic life of acceleration),

V_u : 사용조건의 비열성 수준(the use non-thermal level),

V_a : 가속조건의 비열성 수준(the accelerated non-thermal level),

T_u : 사용조건의 온도(the use temperature level),

T_a : 가속조건의 온도(the accelerated temperature level),

C, n : 변수(parameter),

k : 볼츠만 상수(boltzmann constant),

E_A : 활성화 에너지(activation energy)

3. 실내시험

3.1 시험편제작 및 시험방법

열차운행에 따른 레일체결장치 탄성패드의 사용수명을 예측하기 위해서는 실제 운행선상에서 환경적요인(온도)과 물리적인(열차하중)을 복합적으로 받아온 탄성패드에 대한 강성값이 필요하다. 이를 위해 실제 도시철도 콘크리트케도 현장에서 반복적인 열차하중과 일정시간 동안 온도변화에 의한 영향을 받아온 레일체결장치(Vossloh system300) 탄성패드를 지상의 운행선상(한양대역구내)에서 발채하였다.

본 연구에서는 현장에서 수거한 사용 탄성패드에 대하여 정적스프링계수 시험을 수행하였으며, 사용하지 않은 신품 탄성패드에 대해서는 단순피로시험[1,2]과 열과 피로가 함께 작용하는 복합가속열화시험을 수행하였다. 본 연구에서 수행한 시험편 현황 및 실내시험 종류는 Table 1과 같다.

Table 1 The type of test according to the type of specimens

| | Service life | The types of test | No. of specimen |
|----------|-----------------------------|--|-----------------|
| Used pad | 33 months (23,760 hours) | Static stiffness test | 4 ea |
| | 38 months (25,200 hours) | Static stiffness test | 4 ea |
| | 57 months (41,040 hours) | Static stiffness test | 5 ea |
| New pad | 0 months (0 hours) | Static stiffness test | 3 ea |
| | | Fatigue test | 1 ea |
| | | Multi-stress acceleration degradation test | 3 ea |

3.1.1 정적스프링계수 시험방법

정적스프링계수 시험[1]은 현장에서 수거한 탄성패드와 신품 피로시험 전·후 탄성패드의 정적스프링계수를 산정하기 위하여 신품에 대하여 실내 환경을 $23 \pm 3^\circ C$ 의 실온에서 시험하였다. 시험하중은 2회차까지 0kN에서부터 50kN까지 점차 증가하도록 연속하중으로 재하하면서 0kN과 50kN에서 각각 30초간 유지한 다음, 3회차에서 상한값(60kN)까지 하중을 재하하였다. 시험 3회차 때 재하하중 15kN과 50kN에

서 발생한 탄성패드의 수직 변위값을 이용하여 정적스프링 계수를 계산하였다. 이때 하중 재하속도는 100kN/min로 하였다.

3.1.2 단순피로 및 복합가속열화 시험방법

단순피로시험은 한국철도표준규격(KRS TR 0014-13R)[1]을 준용하여 시험하였다. 실제 철도환경에서는 대기온도가 상승하면 레일의 온도도 함께 상승하게 되며, 실제 외부 온도가 30°C 이상이 되면 레일의 온도는 50°C까지 상승한다[5]. 또한, 폴리우레탄의 사용온도는 -20~80°C이며, 실험실에 실험한 결과 100°C에서 탄성패드는 녹는 현상이 나타났다[6]. 따라서 본 연구에서는 복합가속열화시험을 위한 실내온도를 탄성패드의 열적인 특성변화가 이루어지지 않도록 최대 70°C로 설정하였다. Table 2는 단순피로시험과 복합가속열화시험 방법을 비교하여 나타내었으며, Fig. 1은 단순피로시험 전경을 나타내고, Fig. 2는 복합가속열화시험 전경을 보여준다.

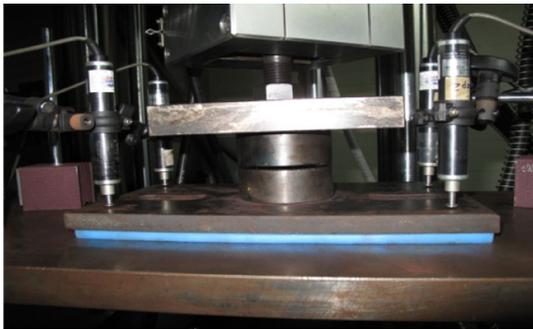


Fig. 1 The figure of the fatigue test

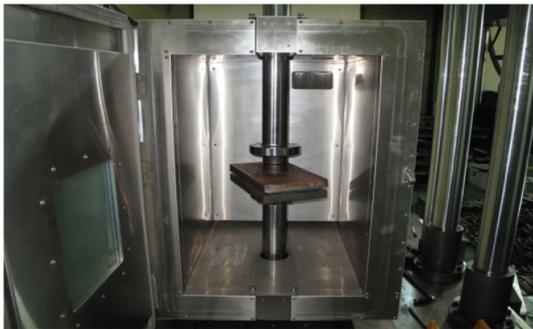


Fig. 2 The multi-stress acceleration degradation test

Table 2 The conditions of the fatigue test and the multi-stress acceleration degradation test

| | unit | Fatigue test | Multi-stress acceleration degradation test |
|--------------|--------|--------------|--|
| Min. load | kN | 5 | 5 |
| Max. load | kN | 60 | 60 |
| Frequency | Hz | 4 | 4 |
| Temperature | °C | 23 | 70 |
| Repeat count | cycles | 5E6 | 5E6 |

4. 실내시험 결과 및 분석

4.1 정적스프링계수 시험결과 및 분석

현장에서 수거한 고품 탄성패드와 신품 탄성패드에 대한 정적스프링계수 시험결과는 Table 3과 Fig. 3과 같다. Table 3의 고품 탄성패드에 대한 시험결과는 4~5회씩 시험한 결과를 평균한 값이다. 정적스프링계수 시험결과, Fig. 3에서와 같이 실제 철도환경조건을 받은 탄성패드의 경우 사용시간에 따라 정적스프링계수값이 선형적으로 증가하는 경향이 있는 것으로 분석되었다.

Table 3 The variation of the static stiffness for the polyurethane resilient pad

| Service life (hours) | Ave. static stiffness (kN/mm) | Remark |
|----------------------|-------------------------------|----------|
| 0 | 16.5 | New pad |
| 23,760 | 21.9 | Used pad |
| 25,200 | 22.9 | |
| 41,040 | 25.4 | |

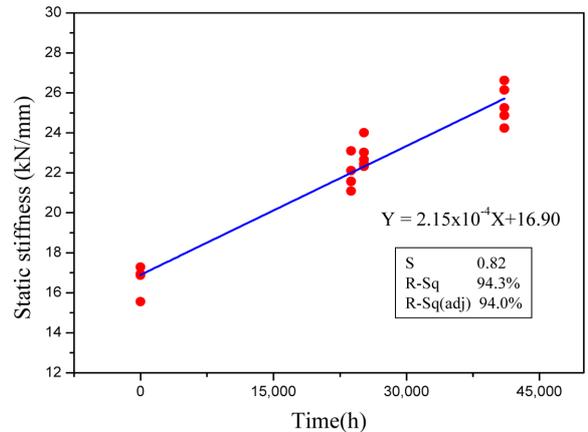


Fig. 3 The static stiffness of the used polyurethane resilient pad according to service life

4.2 단순피로 및 복합가속열화 시험결과 및 분석

Fig. 4는 신품 탄성패드에 대하여 반복회수에 따른 단순피로시험과 복합가속열화시험을 수행한 결과를 나타낸다. Fig. 4에서와 같이 단순피로시험 결과, 200만회까지는 정적스프링계수값이 선형적으로 증가하는 경향을 보였으나, 반복회수 200만회 이상에서는 점차 수렴하는 것으로 나타났다. 즉, 단순피로시험에 의한 정적스프링계수값의 회귀분석 결과 1차함수에 의한 선형회귀식의 결정계수가 0.579, 지수함수에 의한 회귀분석시의 결정계수가 0.953으로 단순피로시험에 의한 탄성패드의 강성변화 분석은 지수함수로 나타낼 수 있으며, 실제 철도환경에서 발생하는 탄성패드의 강성변화 경향을 나타내기에는 어려움이 있는 것으로 분석되었다.

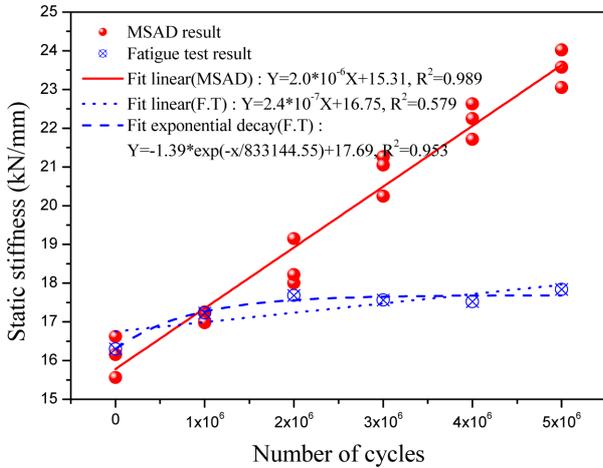


Fig. 4 The variation of the stiffness by the fatigue test and the multi-stress acceleration degradation test(new pad)

하지만 신품 탄성패드에 대한 복합가속열화시험결과에서는 반복회수가 증가할수록 정적스프링계수값이 선형적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 Fig. 3에서와 같이 사용한 탄성패드에 대한 정적스프링계수 시험결과와 동일한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 즉, Fig. 3, Fig. 4를 통해 실제 철도현장에서 사용한 탄성패드에 대한 강성변화값이 단순피로시험결과값과 상이하고, 온도와 피로하중이 함께 고

려된 복합가속열화시험결과값과 동일한 경향을 보이는 것으로 분석되었다. 따라서 실제 철도현장에서 발생할 수 있는 탄성패드에 대한 강성변화를 유추하기 위해서는 단순피로시험이 아닌 복합가속열화시험을 실시해야 할 것으로 판단된다.

5. 레일체결장치 탄성패드의 강성변화 분석기법

5.1 탄성패드의 FMEA(Failure Mode and Effect Analysis) 분석

현재 레일체결장치 탄성패드의 내구성 평가를 위한 시험은 외부의 환경적 요인을 고려하지 않고 철도 차량의 운행에 의한 반복적인 피로하중만을 고려하여 평가하고 있다. 하지만 폴리우레탄 탄성패드의 경우 고분자 재료로 만들어진 제품이기 때문에 반복적 피로하중에 의한 열화와 주변의 환경적 요인(온도, 특히 열)에 의한 열화가 함께 작용하게 된다. 따라서 본 연구에서는 고장모드 및 영향을 분석하는데 있어 일반적으로 사용되고 있는 FMEA(Failure Mode and Effect Analysis) 분석기법[7]을 통하여 탄성패드에 적용되는 여러 열화요인별로 2수준 품질기능전개(Two Level Quality Function Deployment) 분석을 실시하였다. 레일체결장치 탄성패드의 FMEA분석결과를 Table 4, Table 5에 나타내었다.

레일체결장치 탄성패드에 대한 FMEA분석결과, 탄성패드의 주요 파괴모드는 피로와 열에 의한 균열(crack)과 경화(hardening)이며, 이에 대한 평가시험은 피로시험(fatigue test)

Table 4 Requirements and failure modes/mechanisms matrix

| Failure modes/Mechanisms Requirements (stresses and performance) | Crack | Hardening | Softening | Decrease of thickness | Increase of vibration | Increase of noise |
|--|-------|-----------|-----------|-----------------------|-----------------------|-------------------|
| Fatigue | ◎ | ○ | ◇ | ○ | ○ | ○ |
| Heat | ◎ | ◎ | ◇ | ◇ | ◎ | ◎ |
| Ozone | ○ | ◇ | ◇ | ◇ | ◇ | ◇ |
| Oil | ◇ | ○ | ◎ | ◇ | ◇ | ◇ |
| Compression | ◇ | ◇ | ◇ | ◎ | ◇ | ◇ |
| Total | 23 | 17 | 13 | 15 | 15 | 15 |

*The high status accorded to reliability: ◎ very important -9, ○ important-3, ◇ normal-1

Table 5 Failure modes/mechanisms and test methods matrix

| Failure modes/Mechanisms Test methods | Fatigue test | Accelerated aging test | Ozone test | Oil resistance test | Compression test |
|--|--------------|------------------------|------------|---------------------|------------------|
| Crack | ◎ | ◎ | ○ | ◇ | ◇ |
| Hardening | ○ | ◎ | ◇ | ○ | ◇ |
| Softening | ◇ | ◇ | ◇ | ◎ | ◇ |
| Decrease of thickness | ○ | ◇ | ◇ | ◇ | ◎ |
| Increase of vibration | ○ | ◎ | ◇ | ◇ | ◇ |
| Increase of noise | ○ | ◎ | ◇ | ◇ | ◇ |
| Total | 22 | 38 | 8 | 16 | 14 |

* The high status accorded to reliability: ◎ very important -9, ○ important-3, ◇ normal-1

과 촉진노화시험(accelerated aging test)인 것으로 분석되었다. 즉, 레일체결장치 탄성패드의 주요 열화요인은 피로와 열에 의한 것으로 분석되었다. 따라서 콘크리트레도에 주로 사용되는 레일체결장치 탄성패드의 내구성 평가를 위해서는 단순피로시험만이 아니라 피로와 열이 함께 작용하는 복합가속열화시험이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

5.2 최소자승법(Method of Least Square)을 이용한 가속계수 분석

선형회귀분석(Linear Regression)은 각 변수들 간의 관련성을 확인하기 위하여 수학적 모형을 가정하고, 이 모형을 측정된 변수들의 결과로부터 추정하는 통계적 분석방법이다. 본 연구에서는 선형회귀분석을 통하여 사용한 탄성패드의 정적스프링계수 시험결과와 단순피로시험 및 복합가속열화시험 결과와의 만족도를 분석하고자 하였다.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \tag{3}$$

여기서,

- Y: 반응변수(response variable),
- X: 예측변수(predictor variable)
- β_0, β_1 : 회귀분석 모수(regression parameter),
- ε : 잔차(residual)

선형회귀분석에 사용되어진 모델식은 식 (3)과 같고, Fig. 5는 사용한 탄성패드의 정적스프링계수 시험결과들에 대한 잔차(residual)를 나타내며, 이를 최소자승법을 이용하여 선형회귀식의 변수(Parameter)를 추정하였다.

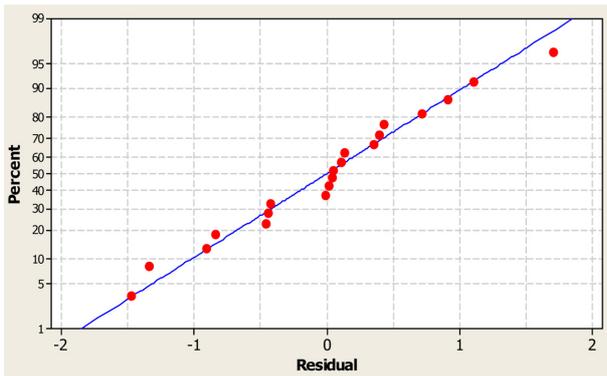


Fig. 5 A normal probability plot of the residuals for the used polyurethane resilient pad

선형회귀식으로부터 최소자승법을 이용하여 변수(β_0, β_1)를 추정하기 위한 방법은 식 (4), (5)와 같다. 단, 본 연구에서는 탄성패드의 성능이 초기에 비해 시간경과에 따라 어떻게 변하는지를 확인하기 위한 것이므로 β_0 를 동일하게 놓고 β_1 만을 추정하였다. 이때 $\beta_0 = 16.5$ 로 신폼 방진패드의 단순피로시험과 복합가속열화시험에서 평가된 초기값(0cycle 시)에 대한 평균값을 적용하였다.

$$E(Y_i) = \beta_0 + \beta_1 X_i$$

$$\beta_1 = \frac{\sum(X_i Y_i) - \beta_0 \sum(X_i)}{\sum(X_i^2)} \tag{4}$$

여기서,

- $E(Y_i)$: 반응변수의 기대값(expected value of response variable)
- X_i : 예측변수(predictor variable),
- Y_i : 반응변수(response variable)
- β_0, β_1 : 회귀분석 모수(regression parameter)

고품 탄성패드의 사용시간별 정적스프링계수 시험결과와 복합가속열화시험에서 반복회수별로 측정된 정적스프링계수 시험결과에 대하여 선형회귀분석 결과로부터 변수(β_1)를 추정한 결과는 식 (6), (7)과 같다.

- 고품 탄성패드의 변수:

$$\beta_1 = \frac{(10,701,202) - 16.5(450,000)}{(1.44 \times 10^{10})} \cong 0.000227 \tag{6}$$

- 복합가속열화시험을 통한 신폼 탄성패드의 변수:

$$\beta_1 = \frac{(969,170,000) - 16.5(45,000,000)}{(1.65 \times 10^{14})} \cong 0.000001375 \tag{7}$$

최소자승법에 의해 산출된 선형회귀식은 식 (8), (9)와 같다.

- 고품 탄성패드의 선형회귀식:

$$Y = 2.27 \times 10^{-4} X_{time} + 16.5 \tag{8}$$

- 복합가속열화시험을 통한 신폼 탄성패드의 선형회귀식:

$$Y = 1.375 \times 10^{-6} X_{cycle} + 16.5 \tag{9}$$

가속계수를 추정하기 위하여 정상(사용) 조건에 대한 반복회수는 고품 수거구간의 1일 열차운행회수인 1일당 260회[8]로 하였으며, 가속조건에 대한 반복회수는 식 (10)과 같다.

$$X_{cycle} = \frac{2.27 \times 10^{-4} \times 1h}{1.375 \times 10^{-6}} = 165cycles \tag{10}$$

산출된 고품 탄성패드의 선형회귀식과 복합가속열화시험을 통한 선형회귀식이 동일하다는 가정하에 시간과 반복수(cycles)를 비교하여 계산하면 1시간에 대하여 약 165cycles이며, 실제 현장에서 적용되는 반복수는 1시간에 약 433cycles 이므로 이에 의한 가속계수(AF)를 구하면 식 (11)과 같다.

$$AF = \frac{L_{use}}{L_{accelerated}} = \frac{433}{165} \cong 2.62 \tag{11}$$

여기서,

- AF: 가속계수(acceleration factor)
- L_{use} : 정상(사용)조건의 반복회수(cycle life of use)
- $L_{accelerated}$: 가속조건의 반복회수(cycle life of acceleration)

산출된 가속계수는 피로와 열을 함께 고려한 복합가속열화시험결과가 실제 현장조건보다 탄성패드의 열화를 가속한 것으로 분석되며, 이에 대한 가속계수는 2.62인 것으로 분석되었다.

복합가속열화 모델식(T-NT)에 기초한 가속계수 산정식 (2)에 이를 대입하면 식 (12)와 같다.

$$2.62 = \frac{L_{use}}{L_{accelerated}} = \left(\frac{V_a}{V_u}\right)^n \exp\left[\frac{E}{k}\left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_a}\right)\right] \quad (12)$$

$$= 1.62 \times \exp\left[\frac{E}{k}\left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_a}\right)\right]$$

5.3 복합가속열화시험 모델식 산정

실내시험결과 분석을 통해 복합가속열화시험이 실제 철도 환경과 동일한 결과를 얻을 수 있었기 때문에 식 (8)과 식 (9)가 동일하다고 가정하면, 복합가속열화시험의 반복수(cycles)를 사용시간(hours)으로 변환하면 식 (13)이 산정된다.

$$U_{time} = 6.1 \times 10^{-3} T_{cycle} \quad (13)$$

여기서, U_{time} : 사용시간(hours), T_{cycle} : 시험횟수(cycles)

식 (13)은 실제 현장에서 사용기간과 복합가속열화시험의 반복수의 관계식을 나타낸 것으로 정적스프링계수의 변화 추이에 대하여 실제 사용기간에 대응되는 반복횟수를 산정하는 식이다. 실제 사용기간에 대응하는 복합가속열화시험 반복횟수를 Table 6에 나타내었다.

Table 6 Estimations of the number of cycles using the multi-stress acceleration degradation model

| Terms of use in the field | Number of cycles by multi-stress accel. degradation test |
|---------------------------|--|
| 5 years | 7.18×10^6 cycles |
| 10 years | 1.43×10^7 cycles |
| 20 years | 2.87×10^7 cycles |

식 (13)에 의하여 복합가속열화시험 모델식(Multi-Stress Accel. Degradation model)에 의한 계산값과 실제 현장에서 수거한 폴리우레탄 탄성패드의 정적스프링계수값 및 신품 탄성패드에 대한 복합가속열화시험결과를 비교하면 Fig. 6과 같다. 사용시간 및 반복횟수에 따른 사용한 탄성패드의 정적스프링계수 변화율과 신품 탄성패드의 단순피로시험 및 복합가속열화시험에 의한 정적스프링계수 변화율을 본 연구를 통해 도출된 복합가속열화 모델식(MSAD model)과 비교하여 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6으로부터 본 연구에서 도출된 복합가속열화 모델식에 의하여 구한 변화율과 실제 철도환경에서 사용된 고품 탄성패드와 복합가속열화시험의 정적스프링계수 변화율과 동일한 선상에 있는 것을 확인할 수 있었다. 단순피로에 의한

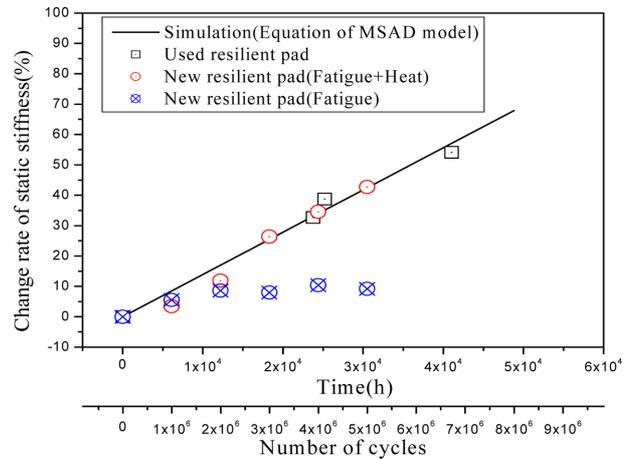


Fig. 6 A comparison of change rates of the static stiffness in a simulation with the results from the test

변화율은 복합가속열화 모델식과 상이한 결과를 나타내고 있어 실제 철도현장과 복합가속열화시험이 모델식에 의하여 잘 반영하고 있는 것으로 분석되었다.

6. 결 론

본 연구에서는 실제 철도 운행선상에서 반복적인 열차하중과 온도변화를 받아온 레일체결장치 탄성패드를 발체하여 정적스프링계수 시험을 수행하였으며, 신품 탄성패드에 대한 단순피로시험과 복합가속열화시험을 수행하여 시험결과를 비교·분석하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 콘크리트궤도용 레일체결장치에 사용되는 폴리우레탄 탄성패드 제품은 사용기간에 따라 정적스프링계수값이 선형적으로 증가되는 것으로 분석되었다. 신품 탄성패드에 대한 기존 단순피로에 의한 내구성 평가결과는 선형적으로 증가하다가 일정 반복회수 이상에서는 증가 추세가 뚜렷이 감소되는 것으로 분석되었으며, 이는 사용시간에 따른 탄성패드의 정적스프링계수 시험결과와 차이가 있는 것으로 분석되어 기존 단순피로에 의한 내구성 평가는 실제 철도현장조건을 적절히 반영하지 못하는 것으로 나타났다.
- 2) 사용시간에 따른 폴리우레탄 탄성패드의 내구성 평가결과와 복합가속열화시험(피로+온도)을 통한 시험결과가 동일한 경향을 보이는 것으로 분석되었으며, 폴리우레탄 탄성패드의 내구성 평가는 복합가속열화시험을 통해 구현이 가능 할 것으로 판단된다.
- 3) 또한, 실제 철도현장에 발체한 탄성패드의 정적스프링계수 시험과 신품에 대한 복합가속열화(피로+온도)에 대한 이론적 분석을 통하여 사용기간과 복합가속열화에 대한 관계를 모델식으로 제안하였고, 제안식과 실험결과와의 비교를 통해 적절성을 입증하였다.
- 4) 따라서 본 연구를 통해 콘크리트궤도 레일체결장치에 사용되는 폴리우레탄 탄성패드 내구성 평가는 단순피로에 의

한 방법보다는 피로와 온도가 함께 고려된 복합가속열화시험을 통해 이루어져야 할 것으로 판단된다.

References

- [1] MLTM (2009) KRS TR 0014-13R.
- [2] Seoulmetro (2009) KRT-ET000-RF001, pp.318.
- [3] Wayne B. Nelson (2004) *Accelerated Testing : Statistical Models, Test Plans and Data Analysis*, John Wiley&Sons Inc, New York, pp. 167-229.
- [4] www.weibull.com, “Accelerated Life Testing Analysis(E-Text-book)”, *ReliaSoft*.
- [5] J.Y. Choi, G.S. Yi, H.U. Bae, *et al.* (2010) Investigation on the temperature characteristics of CWR for the climate change, *Journal of the Korean Society for Railway*, 13(2), pp.179-185.
- [6] J.E. Mark (2005) *Science and technology of rubber*, Academic Press, New York, pp.614-618.
- [7] D.H. Stamic (1995) *Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from theory to execution*, ASQC Quality Press, Milwaukee, pp.125-151, 1995.
- [8] Seoulmetro (2010) Train Statistics of Seoulmetro.
- [9] Y.G. Park, K.D. Kang, J.Y. Choi (2007) A Behavior Analysis of HSR Concrete Slab Track under Variety of Rail Pad Static Stiffness on Fatigue Effect, *Journal of the Korean Society for Railway*, 10(5), pp.499-505.
- [10] S.Y. Kong, S.J. Kim (2007) A Study on the Optimum Stiffness of Concrete Slab Track, *2007 Spring Conference of the Korean Society for Railway*, Jeju, pp.1-6.
- [11] C.S. Woo, H.S. Park, B.I. Choi (2009) Useful Lifetime Prediction of Rail-pad by using the accelerated Heat aging Test, *2009 Spring Conference of the Korean Society for Railway*, Gyeongju, pp.1010-1015.
- [12] K.H. Park, D.Y. Sung, *et al.* (2010) A Study on the Analysis Method for the Variation of Stiffness of Polyurethane Resilient Pad in the Fastening System, *2010 Autumn Conference of the Korean Society for Railway*, Jeju, pp. 1884-1893.
- [13] Nagafuji, Takaharu (1994) Durability Design of Rail Fastening System, *Railway Technical Research Inst.*, 35(4), pp. 229-234.
- [14] Rhodes. D (2000) The Rail Fastening System, *JRIA railway infrastructure engineering & management course*, pp.E05.

접수일(2013년 9월 3일), 수정일(2013년 9월 30일),
게재확정일(2013년 10월 14일)

Deok-Yong Sung: dysung@ mail.daewon.ac.kr
Department of Civil & Railroad Engineering, Daewon University
College, 316, Daehak-ro, Jecheon, Chungbuk 390-702, Korea

Kwang-Hwa Park: bable@ktr.or.kr
Korea Testing & Research Institute, 155, Beodeanaru-ro, Yeongdeungpo-gu, Seoul 150-038, Korea