

# 철도차량 능동현가장치용 전자기식 액추에이터의 열 해석

## Thermal analysis of an electromagnetic actuator for an active suspension system of a railway vehicle

김동욱\* · 우정현\* · 유다영\* · 박영필\* · 박노철† · 박경수\* · 유원희\*\*

Dongwook Kim, Jung-Hyun Woo, Dayoung Yoo, Young-Pil Park, No-Cheol Park, Kyoung-Su Park and Won Hee You

### 1. 서 론

전자기식 액추에이터는 빠른 응답 속도, 넓은 대역폭과 높은 추력 밀도 등의 장점으로 인해 철도차량의 능동현가장치로 적용하기 적합하다. 하지만 큰 추력을 얻기 위해 코일에 전류를 인가하면 코일과 코어에 열이 발생한다. 이에 따라 온도가 상승하게 되며 임계 온도를 초과하면, 감자 현상이 일어나거나 코일의 합선이 발생할 수 있다. 따라서 제한된 크기에서 높은 추력을 얻기 위해서는 냉각 성능이 우수하여야 하고 냉각 성능을 높이기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다.<sup>(1),(2)</sup>

본 연구에서는 기존 연구에서 설계한 수냉 시스템이 고려된 액추에이터의<sup>(2)</sup> 열특성을 분석하기 위하여 해석 시간이 짧고 간단한 열등가회로 모델을 설계하였고 실험을 통해 해석 모델을 검증하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 열 손실

액추에이터에서의 열 손실으로는 크게 코일 손실과 코어 손실이 있다. 코일 손실의 양은 식 (1)과 같다.

$$P_{cu} = R_r \cdot i^2 \cdot [1 + \alpha(T - T_r)] \quad (1)$$

$P_{cu}$ ,  $R_r$ ,  $i$ ,  $T$ ,  $T_r$ ,  $\alpha$ 는 각각 코일 손실에너지, 기준

온도에서의 코일의 저항, 전류, 실제 온도, 기준 온도, 온도계수이다.

코어 손실은 히스테리시스 손실과 와전류 손실이 있고 그 양은 식 (2)와 같다.

$$P_v = K_h f (B_m)^2 + K_c (f B_m)^2 \quad (2)$$

$P_v$ ,  $K_h$ ,  $f$ ,  $B_m$ ,  $K_c$ 는 각각 코어 손실에너지, 히스테리시스 상수, 주파수, 최대자속밀도, 비례 상수이다.

#### 2.2 열등가회로 설계

##### (1) 대류 열전달계수

수냉 시스템을 고려한 액추에이터의 열특성은 액추에이터 표면에서 일어나는 자연 대류와 냉각수에 의해서 일어나는 강제 대류와 연관이 있다. 이 두 경우의 대류 열전달계수를 구하는 방법은 몇 가지 무차원수를 이용하여 구할 수 있다.<sup>(1)</sup>

##### (2) 열등가회로 설계

열등가회로에서 열 저항은 물체의 형상, 특성을 고려하여 선정이 된다. 열 저항을 선정하기 위한 식은 식 (3) ~ (5)와 같다.

$$R_{axial} = \frac{L}{2\pi k_a (r_{out}^2 - r_{in}^2)} \quad (3)$$

$$R_{radial} = \frac{\ln(r_{out}/r_{in})}{2\pi L k} \quad (4)$$

$$R_{conv} = \frac{1}{2\pi r L h} \quad (5)$$

식 (3)과 식 (4)는 각각 액추에이터의 축 방향과 원주 방향 열 저항을 설정하기 위한 식으로 액추에이터의 길이  $L$ 과 내경  $R_{in}$ , 외경  $R_{out}$ 과 축방향 열전도도  $k_a$ 와 원주 방향 열전도도  $k$ 에 따라 결정이 된다. 식 (5)는 수냉 시스템과 공랭 시스템의 대류에

† 교신저자; 정회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : pnch@yonsei.ac.kr

Tel : (02) 2123-4530

\* 연세대학교 기계공학과

\*\* 한국철도기술연구원

의한 열 저항을 선정하기 위한 식으로 대류가 일어나는 곳의 길이  $L$ , 반경  $r$ , 대류 열전달계수  $h$ 에 의해 결정된다.

본 액추에이터에서의 열등가회로는 이전 연구에서 진행된 1/6 축소 유한요소모델인<sup>(2)</sup> Fig. 1을 기반으로 설계하였다. 액추에이터 조립 시 각 부품 간의 접촉 상태에 따라 열특성이 변화하는데 이를 반영하기 위해 사용된 열 저항 및 열 전도도는 표 1과 같다. 각각의 열 저항  $R_{coil-core}$ ,  $R_{stator-translator}$ ,  $R_{core-housing}$ 은 코일과 코어의 간극, 고정자와 이동자의 간극, 하우징 안쪽 표면과 코어 바깥쪽 표면의 접촉에 따른 열 저항이고,  $K_{core}$ 는 코어의 축방향 열 전도도이다.

수냉 시스템을 제외하고 설계한 열등가회로는 Fig. 2와 같고 이를 바탕으로 계산한 코일의 온도는 표 2에 실험결과와 비교되어 있다.

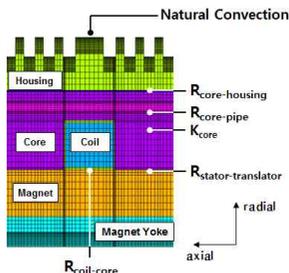
자연 대류만을 고려하여 설계한 열등가회로는 가동 전압인 9V 부근에서 최대 6.12%의 오차 내에서 만족함을 확인할 수 있다.

**Table 1** Thermal resistance and conductivity

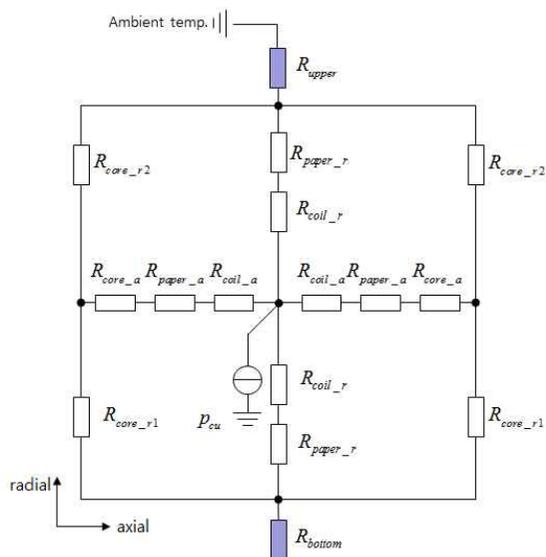
Parameter	Unit	Value
$R_{coil-core}$	K/W	0.1
$R_{stator-translator}$	K/W	0.051
$R_{core-housing}$	K/W	0.3
$K_{core}$	W/mK	5

**Table 2** Comparison between thermal equivalent circuit and simulation

Voltage	Coil Temperature(°C)		
	Exp.	Equivalent circuit	Error(%)
7V	56.5	53.04	6.12
9V	76.9	76.78	0.15
11V	106.3	108.24	-1.83



**Fig. 1** 3-D thermal FE model of tubular permanent magnet actuator(TPMA)



**Fig. 2** Thermal equivalent circuit of TPMA

### 3. 결론

본 논문에서는 자연대류 조건 및 전도 열전달 특성을 예측하기 위해 열등가회로를 설계하였고 이를 실험 결과와 비교함으로써 그 타당성을 검증하였다. 차후 수냉 시스템을 고려한 액추에이터의 열등가회로를 설계하여 그 타당성에 대해서 검증하도록 하겠다.

### 4. 참고문헌

- [1] Lezhi Ye, Desheng Li, Yuanjing Ma and Bingfeng Jiao, 2011, " Design and Performance of a Water-cooled Permanent Magnet Retarder for Heavy Vehicles", IEEE TRANS. ON ENERGY CONVERS., Vol.26, No.3, pp.953-958
- [2] 유다영, 우정현, 박영필, 박노철, 박경수, 백운수, 유원희, 2012, "수냉 시스템을 고려한 원통형 전자기식 액추에이터의 열특성 분석" 한국소음진동공학회 2012년 춘계학술대회 논문집