

# 무여자 마이크로 전자 브레이크의 열-기계적 공극 안정성 평가를 위한 분석 기법

## An Evaluation Method for Thermo-Mechanical Air Gap Stability of a Micro Electromagnetic Spring-Applied Brake

지상원\* · 공경주\* †

Sang-Won Ji\* and Kyeong-Ju Kong\* †

(Received 27 January 2026, Revision received 06 February 2026, Accepted 11 February 2026)

**초록 :** 무여자 마이크로 전자 브레이크는 반복 구동 과정에서 코일 발열로 인한 열팽창과 구성 부품 간 접촉에 따른 변형이 발생할 수 있으며, 이러한 열-기계적 영향은 공극 변화를 유발하여 제동 성능에 영향을 미칠 수 있다. 이 연구에서는 전기차 전장용 0.7 N·m급 무여자 마이크로 전자 브레이크를 대상으로 반복 On/Off 구동 조건에서 공극 변화를 평가하기 위해 열-기계적 연성 유한요소해석을 수행하였다. 온도 상승 한도 조건인 105°C에서 3,300 cycle 반복 구동 시에는 공극 변화로 이어질 수 있는 변형은 나타나지 않아 공극 안정성이 유지됨을 확인하였다. 반면, 허용 최고 온도 조건인 155°C에서는 코어-아마추어 간 반복 접촉이 누적되면서 공극이 19.02  $\mu$  m 증가하여 설계 공극 대비 약 2.72% 증가하는 결과가 나타났다. 이와 같은 열-기계적 연성해석 결과를 이용하여 공극 안정성을 평가하였으며, 반복 구동 조건에서 온도 상승에 따른 공극 안정성을 정량적으로 평가할 수 있는 분석 기법을 제안하였다.

**키워드 :** 무여자 마이크로 전자 브레이크, 열-기계적 연성해석, 공극 안정성, 유한요소해석

**Abstract :** Micro electromagnetic spring-applied brakes may experience thermal expansion caused by coil heating and mechanical deformation induced by contact between components during repetitive operation, and such thermo-mechanical effects can lead to variations in the air gap, thereby affecting braking performance. In this study, a thermo-mechanically coupled finite element analysis was conducted to evaluate air gap variations under repetitive On/Off operating conditions for a 0.7 N·m-class micro electromagnetic spring-applied brake intended for electric vehicle electronic components. Under the temperature rise limit condition of 105°C, no deformation leading to air gap variation was observed after 3,300 operating cycles, confirming that air gap stability was maintained. In contrast, under the maximum allowable temperature condition of 155°C, repeated contact between the core and the armature accumulated, resulting in an air gap increase of 19.02  $\mu$  m, which corresponds to an increase of approximately 2.72% relative to the designed air gap. Based on the results of the thermo-mechanically coupled analysis, air gap stability was evaluated, and an analytical method was proposed to quantitatively assess air gap stability under repetitive operating conditions with temperature rise.

**Key Words :** Micro Electromagnetic Spring-Applied Brake, Thermo-Mechanical, Air Gap Stability, Finite Element Analysis

\* † 공경주(<https://orcid.org/0000-0002-7659-9035>) : 조교수, 국립부경대학교 기계시스템공학전공  
E-mail : [kjkong@pknu.ac.kr](mailto:kjkong@pknu.ac.kr), Tel : 051-629-6195

\* 지상원(<https://orcid.org/0000-0002-9827-4717>) : 부교수, 국립부경대학교 기계시스템공학전공

\* † Kyeong-Ju Kong(<https://orcid.org/0000-0002-7659-9035>) : Assistant Professor, Major of Mechanical System Engineering, Pukyong National University.

E-mail : [kjkong@pknu.ac.kr](mailto:kjkong@pknu.ac.kr), Tel : 051-629-6195

\* Sang-Won Ji(<https://orcid.org/0000-0002-9827-4717>) : Associate Professor, Major of Mechanical System Engineering, Pukyong National University.

## 1. 서 론

무여자 전자 브레이크(Electromagnetic Spring-Applied Brake)는 전원이 차단되었을 때 스프링 힘에 의해 자동으로 제동되는 구조이며, 전원 상실 상황에서도 제동 상태를 안전하게 유지할 수 있는 특성으로 인해 전기차, 로봇, 자동화 설비 등 다양한 산업 분야에서 핵심적인 안전 부품으로 활용되고 있다. 전원이 인가될 때 제동이 해제되고, 전원이 차단되면 제동이 작동하는 구조적 특성으로 인해 과거에는 Fail-safe 브레이크로도 불려 왔다. 이러한 무여자 전자 브레이크는 일반적으로 전동 모터 인근에 장착되어 구동축의 회전을 제어하며, 로봇 시스템, 서보 모터용 유지 브레이크, Z축 볼스크류 구동계 등 정밀한 위치 제어와 하중 유지가 요구되는 분야에서 널리 사용되고 있다.

무여자 전자 브레이크와 관련하여 자동차, 전기, 생산 및 제조 등 다양한 분야에서 연구가 진행되었으며, 성능 예측 및 설계에 적용하기 위해 수치해석이 활용되고 있다. 제동 토크 성능을 예측하기 위해 다물체 동역학 해석을 활용하여 설계 사양을 산출하는 연구,<sup>1)</sup> 유한요소해석(FEA, Finite Element Analysis)을 이용해 성능을 분석하여 기존 브레이크 대비 성능 개선 효과를 확인한 연구,<sup>2,3)</sup> FEA를 이용한 설계 결과를 시제품 시험으로 검증하고 성능 저하 문제 등을 해소한 연구<sup>4)</sup> 등 수치해석을 활용하여 타당한 결과를 얻은 사례가 있다.

최근에는 시스템의 소형화 및 고집적화 요구가 증가함에 따라, 무여자 전자 브레이크 역시 마이크로화가 요구되고 있다. 소형화된 무여자 마이크로 전자 브레이크는 협소한 공간 내에 적용할 수 있으며, 정밀한 위치 제어를 위해서 백래시(backlash)를 제거하고 허브 구조를 적용하기도 한다. 그리고 빠른 응답 특성을 위해서 다수의 스프링을 적용하고 있으며, 다양한 전압 조건에 대응할 수 있도록 유연한 설계가 적용되고 있다. 이러한 특성으로 인해 무여자 마이크로 전자 브레이크는 전기차 전장 부품과 같이 고응답과 고신뢰

성이 동시에 요구되는 분야에서 적용이 확대되고 있다.

소형화, 고집적화된 무여자 마이크로 전자 브레이크는 열적 관점에서 새로운 문제가 발생할 수 있다. 제동 해제를 위해 여자 코일에 전류가 인가되면 열이 발생하는데, 이는 소형화된 구성 요소들의 열적 변형을 유발할 수 있다. 특히 자기력에 의해 이동하여 스프링 힘을 전달하는 아마추어(armature)와 자기력을 전달하는 코어(core) 사이의 공극(air gap) 변화로 이어질 수 있으며, 소형화된 구조에서는 미세한 열변형만으로도 공극 변화가 상대적으로 크게 나타난다.

공극을 측정하기 위해서 변위 센서를 설치하기에는 공간적인 제약이 있으므로, 공극은 계산적으로 추정하는 방식을 사용하고 있다. 전기-기계 모델을 활용하여 전류 크기에 따라 공극이 변화하는 것을 확인하였고,<sup>5)</sup> 이러한 공극 변화는 제동력, 응답 특성 및 성능 불안정으로 연결될 수 있다. 특히 반복적인 On/Off 구동 환경에서는 열변형이 누적되면서 공극 변화가 시간에 따라 비선형적으로 증가할 가능성도 존재하는데, 공극 변화가 어느 수준에서 성능 저하로 이어지는지에 대한 명확한 평가 기준이나 분석한 사례, 지표 등은 정립되지 않은 상황이다.

이 연구에서는 무여자 마이크로 전자 브레이크의 반복 구동 환경에서 발생하는 열-기계적 특성을 수치해석하고 공극 안정성을 정량적으로 평가할 수 있는 새로운 분석 기법을 제안하고자 한다. 열-기계적 연성 FEA를 통해 열변형에 따른 공극 변화를 분석하였으며, 해당 수치해석 결과를 기반으로 공극 안정성을 평가할 수 있는 분석 기법을 정립하였다. 제안된 분석 기법은 소형화로 인해 공극 측정이 제한적인 기존 문제를 보완하고, 공극 안정성 확보 및 주요 설계 사양을 결정하기 위해 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 열-기계적 수치해석

### 2.1 열-기계적 모델링

Fig. 1은 이 연구의 수치해석 대상인 무여자 마

이크로 전자 브레이크의 개략도이며, 전기자 전장 용으로 고응답 성능을 가진 0.7 N·m급 모듈이다.

무여자 마이크로 전자 브레이크의 작동은 코일(coil)에 전원이 인가되지 않은 상태에서 다수의 스프링이 아마추어를 밀어내고 마찰 디스크(friction disc)에 마찰력이 발생하면서 로터 허브(rotor hub)를 통해 제동 상태가 유지되며, 이때 아마추어와 코어 사이에 공극이 형성된다. 반대로 제동을 해제하기 위해서 코일에 전원이 인가되면서 자기장이 형성되고 이 자기력에 의해 아마추어가 스프링 반대 방향으로 이동하면서 마찰 디스크의 마찰력이 제거되어 제동 상태가 해제된다. 이러한 작동 방식으로 인해 무여자 마이크로 전자 브레이크는 전원 Off 상태에서 제동되는 Power-off 방식의 안전 장치로 활용된다.

전기차 전장에 적용되는 무여자 마이크로 전자 브레이크는 On/Off가 반복적으로 구동되기 때문

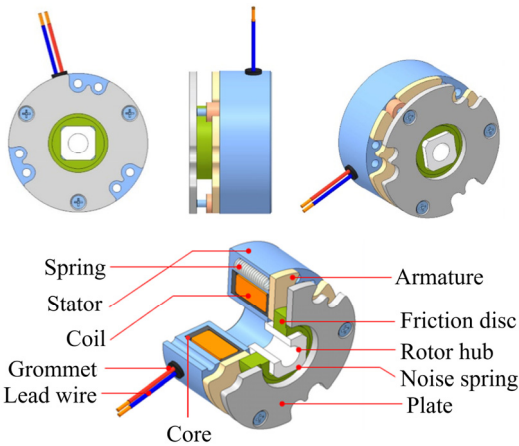


Fig. 1 Schematic diagram of a micro electromagnetic spring-applied brake

Table 1 Duty cycle conditions for transient thermo-mechanical analysis

Case	Cycle time (min)	On-duration (min)	Off-duration (min)	On-duration ratio (%)
A	10	1	9	10
B		9	1	90

에 정상상태(steady-state)로 열-기계적 모델링을 하는 것은 적합하지 않다. 따라서 10분을 기준으로 일정 시간은 On 상태로 제동 해제되고 나머지 시간은 Off 상태로 제동 유지되는 Duty cycle로 모델링하여 과도상태(transient)로 수치해석하였다. 무여자 마이크로 전자 브레이크의 정격 및 성능에 관한 표준은 정해져 있지 않으므로 유사 관련 표준인 국제전기기술위원회(IEC, International Electrotechnical Commission) 60034-1의 Duty cycle 정의 및 독일 표준화 협회(DIN, Deutsches Institut für Normung) 15435의 스프링 작동형 브레이크 주요 설계 기준을 참고하여 Duty cycle 조건을 결정하여 Table 1에 나타냈다.

10분의 Cycle time 중에 On-duration은 코일에 전원이 인가되어 제동이 해제되는 구간, Off-duration은 코일에 전원이 인가되지 않아 스프링 작동에 의해 제동이 유지되는 구간으로 정하였다. 동일한 Cycle time에서 On-duration과 Off-duration을 두 가지 조합으로 설정하였으며, 각 Case의 On-duration ratio(%)는 Cycle time에 대한 On-duration의 비율을 백분율로 나타냈다. 이후 수치해석은 Table 1의 Duty cycle 조건을 적용하여 FEA를 이용한 열-기계적 연성해석으로 반복 구동에 따른 열변형과 그로 인한 공극 변화를 평가하였다.

## 2.2 수치해석 결과

공극은 스프링 힘으로 아마추어가 밀어내져서 형성되며, 스프링의 작용으로 인해 아마추어에 변형이 발생할 수 있는지 평가하였다. Fig. 2는 스프링과 아마추어 사이에 작용하는 힘을 고려한 모델링과 공극 위치를 나타낸 것이며, Duty cycle 중에서 스프링의 작용력이 오래 작용하는 Case A를 기준으로 과도해석하였다.

무여자 마이크로 전자 브레이크에서 발생하는 열은 전원이 인가되며, 코일에서 발생하는 열, 제동 마찰로 인해 발생하는 열, 주변 하우징으로부터의 열 등이 있다. 정상적인 작동 상태를 가정하여 코일의 절연 등급 Class F 기준의 온도 상승 한도인 105℃를 온도 조건으로 하여 Duty cycle을

반복하였다. Duty cycle 반복 횟수는 평균 상용 전 기차의 1년간 운전 시간 550시간을 기준으로<sup>6)</sup> 계산하여 3,300 cycle 반복 조건으로 수치해석하여 1년 동안 연속 운전 조건을 모사하였다.

Fig. 3은 3,300 cycle 작동 후 스프링에 의해 아마추어에 국부 변형량 및 발생 지점을 나타낸 것이다. 상승 온도 온도 105℃로 유지되는 정상적인 작동 조건에서는 스프링에 의한 아마추어의 국부적인 탄성 변형만 발생하였다. 요소 부품의 전체 영역으로 확산되지 않고 국부적인 영향만 있었으며, 제동 성능이 저해되거나 공극 변화가 발생할 가능성이 있는 소성 변형은 발생하지 않으므로 기계적 안정성은 확보된 것으로 생각한다.

정상적인 작동 조건에서는 구성 부품에 유의미한 문제가 발생하지 않으므로, 구성 부품에 결함이 발생한 경우를 가정하여 수치해석을 하였다. 특히 제동 성능에 핵심적인 역할을 하는 스프링에 이상이 발생했을 때 나타날 수 있는 문제점을

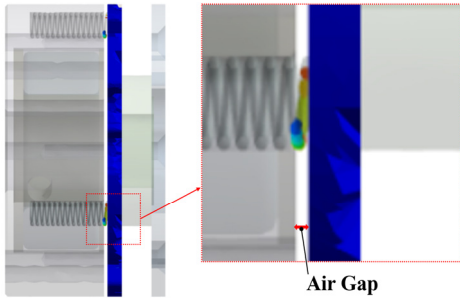


Fig. 2 Modeling of the spring-armature contact force and the air gap location

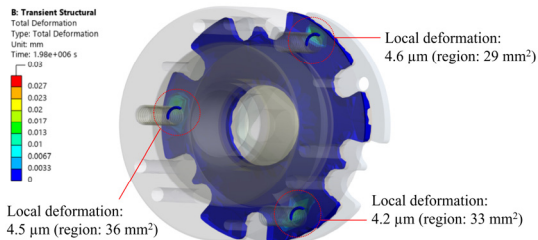


Fig. 3 Local deformation of the armature caused by spring loading after 3,300 cycles

분석하였다. 이 연구의 수치해석 대상인 무여자 마이크로 전자 브레이크는 총 세 개의 스프링이 장착되어 있으며, 각 스프링의 자유장은 15 mm이다. 이 중 하나의 스프링이 노후화, 진동, 충격 등의 영향으로 자유장이 소성 변형되어 감소한 상태에서 작동하는 경우를 가정하고,<sup>7)</sup> 이로 인해 공극 안정성에 영향이 발생할 수 있는지 분석하였다. 수치해석은 자유장이 0.02 mm 감소한 조건을 적용하였으며, 수치해석 결과를 Fig. 4에 나타냈다.

하나의 스프링 자유장 감소로 인해 코어에 편측 하중이 전달되었고, 이로 인한 코어 끝단의 국부적 응력 집중으로 인해 국부 변형이 발생하였다. 코어 끝단의 국부 변형량은 10.6 μm로 나타났으며, 변형이 다른 영역으로 확산되지 않아 공극 변화나 제동 성능에 영향을 미치기에는 충분하지 않은 수준의 변형으로 생각한다.

이러한 이유로 스프링에 의한 공극 변화나 변형은 고려하지 않고, 코일과 아마추어 간 접촉으로 인해 발생하는 변형을 주 분석 대상으로 하였으며, 코일-아마추어 간 접촉면을 Fig. 5에 나타냈다. 또한 정상적인 작동 상태에서는 문제가 발생하지 않으므로, 코일의 비정상적인 온도 상승 상황을 가정하여 수치해석을 수행하였으며, 이때 온도 조건은 코일 절연 등급 Class F의 허용 최고 온도인 155℃를 적용하였다. 이러한 운전 조건은 냉각 시스템의 이상, 단주기 반복 제동, 전원 이상 등으로 열이 축적된 조건을 가정한 것이며, 이와 같은 조건에서 제동 성능에 영향을 미칠 수 있는 공극 변화를 평가하고자 한다.

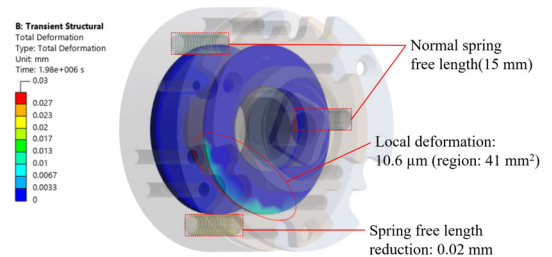


Fig. 4 Core deformation under a single spring with reduced free length

Fig. 6은 코어와 아마추어의 접촉 시간이 상대적으로 긴 Case B를 기준으로, 코일 온도가 155°C로 상승한 과열 조건에서 3,300 cycle 작동 후 코어와 아마추어 접촉면에 발생한 변형량 결과를 나타낸 것이다. 무여자 마이크로 전자 브레이크에 전원이 인가되면 아마추어가 코어와 접촉하게 되며, 이 가정에서 발생하는 접촉 하중은 단일 작동 시에는 미소한 수준이다. 그러나 비정상적인 과열 조건에서 이러한 접촉이 3,300 cycle 동안 반복되면서 아마추어와 코어의 접촉면에 소성 변형이 발생하였다. 수치해석 결과, 코어 측의 최대 변형량은 5.1 μm, 아마추어 측의 최대 변형량은 14.9 μm로 나타났으며, 접촉 면적 기준 평균 공극은 19.02 μm 증가한 것으로 나타났다. 이로 인해 공극이 설계치 대비 약 2.72% 증가하여 공극 안정성이 저해되는 결과가 나타났다.

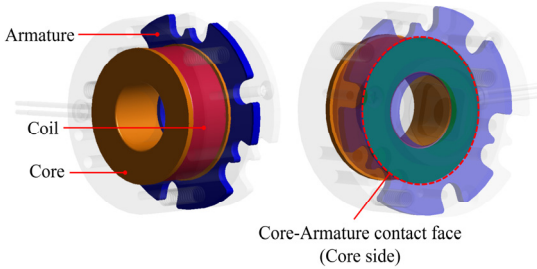


Fig. 5 Configuration of the main components and the contact face between the core and the armature

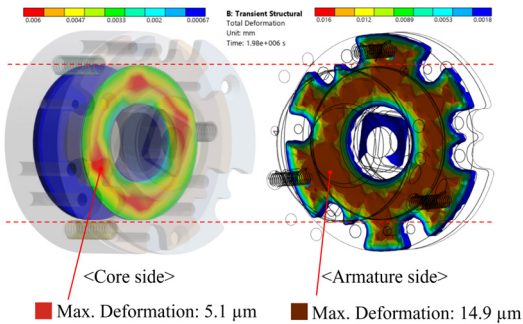


Fig. 6 Deformation of the core and armature under coil overheating conditions

### 3. 공극 안정성 평가

무여자 마이크로 전자 브레이크에서 공극 안정성은 코어와 아마추어의 변형으로 인한 공극 변화를 이용하여 평가하며, 공극 변형에 영향을 미치는 주요 요인을 과열에 따른 열적 영향과 반복적인 접촉에 따른 기계적 영향으로 구분하였다. 이를 바탕으로 공극 안정성을 평가하기 위한 관계식을 식 (1)과 같이 제안하였다.

$$g(N, T) = g_0 + \Delta g_{th}(T) + \Delta g_{imp}(N, T) \quad (1)$$

식 (1)에서,  $g(N, T)$ 는 반복 횟수  $N$ , 온도  $T$ 에서의 공극이며,  $g_0$ 는 초기 공극이다.  $\Delta g_{th}(T)$ 는 열적 영향에 의한 공극 변화이며, 온도 변화에 따라 코어 및 아마추어의 길이가 선형적으로 변하는 것으로 하여 코어-아마추어 간 축방향 열팽창 차이에 의한 공극 변화를 식 (2)로 나타냈다.

$$\Delta g_{th}(T) = -(\alpha_c L_c + \alpha_a L_a) \Delta T \quad (2)$$

식 (2)에서,  $\alpha$ 는 선팽창계수,  $L$ 은 공극 방향 유효 길이이며, 하첨자  $c$ 와  $a$ 는 각각 코어와 아마추어를 의미한다.  $\Delta T$ 는 기준 온도 대비 증가한 온도를 나타낸다. 온도가 상승함에 따라 열팽창이 발생하여 공극은 감소하게 되며, 이 연구에서는 기준 온도 20°C에서 코일의 온도 상승 한도인 105°C와 허용 최고 온도인 155°C의 과열 조건에서 공극 안정성을 평가하였다.  $\Delta g_{imp}(N, T)$ 는 반복적인 접촉에 따른 충격 효과로 인해 발생하는 공극 변화이며, 반복 접촉에 의한 공극 변형을 평가하기 위해 네 가지 요소를 적용하였다. 첫 번째 요소는 헤르츠(Hertz) 접촉 이론을 통해 최대 접촉 압력  $p_{max}$ 를 산정하고,<sup>8)</sup> 두 번째 요소는 식 (3)을 이용하여 산정된 최대 접촉압력이 고온에서의 항복강도를 초과하는 경우, 접촉부에 소성 변형이 발생하는 것으로 판단하였다.

$$p_{max} \geq C_y \sigma_y(T) \quad (3)$$

식 (3)에서,  $C_y$ 는 접촉 항복 계수로 1.6을 적용하였다.  $\sigma_y(T)$ 는 온도  $T$ 에서의 항복강도이며, 155°C의 과열 조건에서는 항복강도  $\sigma_y$ 가 감소하여 소성 변형이 발생할 가능성이 증가한다.

세 번째 요소는 접촉 1회당 발생하는 잔류 변형량을 추정하기 위해 Tabor의 경도-항복강도 관계<sup>9)</sup>를 적용하여 식 (4)로 나타냈다.

$$\delta_p(T) \propto \frac{F_{imp}}{H(T)} \quad (4)$$

식 (4)에서,  $\delta_p(T)$ 는 온도  $T$ 에서 접촉 1회당 발생하는 잔류 변형량,  $F_{imp}$ 는 접촉 순간에 작용하는 최대 접촉력,  $H(T)$ 는 온도  $T$ 에서의 재료 경도를 나타내며, 고온 조건에서는 재료 경도가 낮을수록 접촉 1회당 발생하는 소성 변형량이 증가한다. 네 번째 요소는 반복 접촉으로 누적되는 공극 변형이며, 반복 횟수에 비례하여  $\delta_p(T)$ 가 증가하는 것으로 하였다. 이처럼 네 가지 요소를 단계별로 종합하여 반복 접촉에 따른 공극 변형을 식 (5)로 나타냈으며, 이 관계식은 반복 접촉에 따른 공극 변형을 보수적으로 추정하고자 비례 관계식으로 수립하였다.

$$\Delta g_{imp}(N, T) \propto N \frac{F_{imp}}{H(T)} \quad (5)$$

위의 식들을 이용하여 무여자 마이크로 전자 브레이크의 공극 안정성을 평가하였다. 이때 공극 변화량은 FEA 기반 수치해석을 통해 도출된 결과 값을 적용하여 산정하였으며, 이를 통해 열적 및 기계적 요인이 공극 안정성에 미치는 영향을 분석하였다.

Table 2는 무여자 마이크로 전자 브레이크의 공극 안정성을 평가하기 위해 공극 변화 계산값과 FEA 기반 수치해석의 공극 변화량을 나타낸 것이다. 온도 조건  $T$ 는 코일 온도를 기준으로 온도 상승 한도인 105°C와 허용 최고 온도인 155°C를 적용하였으며, 반복 횟수  $N$ 은 전기차 운전 시간을 기준으로 산정한 1년 3,300 cycle 및 2년 6,600 cycle로 설정하여, 각 조건에 대해 Duty cycle의 Case A 및 Case B에 대한 결과를 나타냈다.

$\Delta g$ 는 FEA 기반 수치해석을 통해 도출된 공극 변화량이며, 이를 기준으로 각 영향 항을 역산하여 열팽창에 의한 공극 변화  $\Delta g_{th}(T)$ 와 반복 접촉에 의한 공극 변화  $\Delta g_{imp}(N, T)$ 를 분리하여 산정하였다.

열팽창에 의한 공극 변화  $\Delta g_{th}(T)$ 는 온도에만 의존하는 항으로, 동일한 온도 조건에서는 반복 횟수와 무관하게 일정한 값을 나타냈다. 이에 따라 105°C 조건에서는 -3.88  $\mu\text{m}$ , 155°C 조건에서는 -6.16  $\mu\text{m}$ 로 고정된 값을 보였으며, 이는 온도 상승에 따른 코어와 아마추어의 열팽창으로 공극

Table 2 Results of air gap stability evaluation

Case	Coil temperature (°C)	Cycle	$\Delta g_{th}(T)$ ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta g_{imp}(N, T)$ ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta g$ FEA results ( $\mu\text{m}$ )
A	105	3,300	-3.88	7.06	3.18
		6,600	-3.88	14.12	10.24
	155	3,300	-6.16	20.26	14.10
		6,600	-6.16	40.52	34.36
B	105	3,300	-3.88	13.71	9.83
		6,600	-3.88	27.42	23.54
	155	3,300	-6.16	25.18	19.02
		6,600	-6.16	50.36	44.20

이 감소하는 것을 반영한 결과이다.

반복 접촉에 의한 공극 변화  $\Delta g_{imp}(N, T)$ 는 이 연구에서 반복 횟수  $N$ 에 비례하도록 모델링하였기 때문에 동일한 온도 조건에서 반복 횟수가 증가함에 따라  $\Delta g_{imp}$ 가 비례적으로 증가하는 결과가 나타났다. 즉, 반복 횟수 증가에 따른 공극 변화의 증가는 이 연구에서 설정한 반복 접촉 모델의 가정을 반영한 결과이다.

Duty cycle에 따른 비교 결과, 코일과 아마추어의 접촉 시간이 긴 Case B가 Case A에 비해 더 큰  $\Delta g_{imp}$  값을 나타냈으며, 이는 접촉 시간이 증가할수록 반복 접촉에 의한 영향이 누적되도록 설정한 모델링 조건에 따른 결과로 해석된다. 또한 동일한 반복 횟수 조건에서 온도가 105°C에서 155°C로 증가할 경우,  $\Delta g_{imp}$ 가 증가하는 경향을 보였는데, 이는 고온 조건에서 재료 물성이 저하되는 것이 반영된 결과이다.

이러한 결과를 보았을 때, 이 연구에서 수립한 공극 변화 모델이 FEA 기반 수치해석 결과와 일관되고 적용되는 것이 확인되었으며, 제안된 관계식이 온도 및 반복 접촉 조건에 다른 공극 변화의 경향을 반영할 수 있을 것으로 생각한다.

과열 조건에서 발생하는 열팽창에 의한 공극 변화는 온도 의존적이므로, 과열 상태가 해소될 경우, 원래의 상태로 회복되는 특성을 가진다. 반면 반복적인 접촉에 의해 발생하는 효과는 접촉부에 소성 변형을 유발하며, 이러한 변형은 온도 조건과 무관하게 누적되어 잔류하는 비가역적인 거동을 보인다. 따라서 반복 접촉에 따른 공극 변화는 열적 영향을 고려한 상황에서 기계적 영향을 분석해야 할 필요가 있다.

이 연구에서는 반복 접촉에 의한 공극 변형을 반복 횟수에 비례하는 선형 관계로 가정하여 모델링하였으나, 실제 소성 변형 거동은 접촉 조건, 재료 물성 및 누적 손상에 따라 비선형적인 특성이 나타날 수 있다. 그러므로 향후 반복 접촉에 따른 소성 변형 거동에 비선형 관계를 적용하여 보완한다면 공극 안정성 평가의 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 생각한다.

## 4. 결 론

이 연구는 전기차 전장용 0.7 N·m급 무여자 마이크로 전자 브레이크의 반복 구동 상황에서 코일 발열에 의한 열-기계적 영향이 코어-아마추어 공극에 미치는 영향을 분석하였다. FEA를 이용한 열-기계적 연성해석으로 공극을 분석하고, 공극 안정성을 평가할 수 있는 분석 기법을 제안하였다.

3,300 cycle 연속 운전 및 상승 한도 온도 조건(105°C)에서 하나의 스프링에 문제가 발생하였을 경우, 국부 변형량은 10.6  $\mu\text{m}$ 로 제한적인 영역에서 나타났으며, 이 조건에서는 스프링과 공극 안정성의 연관성은 나타나지 않았다.

공극 변화를 열적 요인과 반복 접촉 요인으로 구분하여 공극 변화 예측 모델을 제안하였으며, 이를 통해 비정상적인 과열 조건에서 공극 변화를 평가할 수 있었다. FEA 기반 수치해석 결과를 바탕으로, 허용 최고 온도 조건(155°C) 이상의 열적 요인과 1년 동안 연속 운전 조건의 반복 접촉 요인이 동시에 작용하는 경우, 공극 안정성에 부정적인 영향을 미치는 것을 확인하였다.

이 연구에서 제안한 공극 안정성 평가 기법을 활용하여 반복 구동 조건 및 온도 상승에 따른 공극 변화를 예측할 수 있으며, 이를 통해 무여자 마이크로 전자 브레이크의 허용 온도 범위, 수명 예측 및 설계 단계에서 공극 안정성을 검토하는데 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 중소벤처기업부의 기술개발사업 [S3456800]과 2025년도 교육부 및 부산시의 재원으로 부산RISE혁신원의 지원을 받아 수행된 지역 혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다. (2025-RISE-02-001-022)

## Author contributions

S. W. Ji; Conceptualization, Methodology, Resources, Software and Validation and Writing-original

draft. K. J. Kong; Data curation, Formal analysis, Funding acquisition, Project administration, Supervision, Visualization and Writing-review & editing.

## References

1. J. H. Kang, D. Y. Kim, J. S. Lee, C. M. Seo and C. H. Nam, 2025, "Predicting Braking Torque Performance of a Spring-Actuated Electronic Brake for Large-Scale Mobile Robots Using Multibody Dynamics Analysis", Proceedings of the KSAE Spring Conference, Korean Society of Automotive Engineers, 1676.
2. D. H. Kim, H. J. Kim, S. Y. Kim and H. J. Lee, 2025, "Study on Performance Improvement of Hybrid-Type Fail-Safe Brake", Proceedings of the KIEE Summer Conference, The Korean Institute of Electrical Engineers, 16-19.
3. D. H. Kim, J. H. Lee, H. W. Kim, B. S. Kim and H. J. Lee, 2024, "A Study on the Performance Enhancement of Non-Excitation Electromagnetic Brake", Proceedings of the KSME Manufacturing Conference, Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 333.
4. K. H. Kim, S. H. Lee, I. H. Kang and T. H. Kang, 2025, "Electromagnetic Design of a Spring-Actuated Brake, Proceedings of the KIEE Summer Conference", The Korean Institute of Electrical Engineers, 16-19.
5. D. J. Lee, S. Y. Cho, Y. J. Shin and W. H. Kim, 2025, "A Study on Electro-Mechanical Modeling and Simulation for Air-Gap Estimation in a Non-Excitation Spring-Applied Electromagnetic Brake, Proceedings of the KIEE Summer Conference", The Korean Institute of Electrical Engineers, 16-19
6. J. Y. Park, B. I. Kim, D. H. Lee and C. S. Kim, 2024, "Analysis of Vehicle Mileage and Influencing Factor of Electric Car Drivers in Korea", Journal of Transport Research, 31(2), 77-87.  
(<https://doi.org/10.34143/jtr.2024.31.2.77>)
7. M. Petrich and U. Kletzin, 2024, "Practical fatigue strength diagrams for compression springs based on the FKM-Guideline "Analytic Strength Assessment for Springs" ", International Journal of Fatigue, 183.  
(<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2024.108273>)
8. D. S. Ko and H. J. Kim, 2008, "Finite Element Analysis of Hertzian Contact Problem", Journal of industrial technology, 28(A), 81-88.
9. N. Gane and J. M. Cox, 1970, "The micro-hardness of metals at very low loads", The Philosophical Magazine: A Journal of Theoretical Experimental and Applied Physics, 22(179), 881-891.  
(<https://doi.org/10.1080/14786437008221059>)