

스티어링 휠의 운전자 진동 피드백 성능향상을 위한 선형 공진 액추에이터의 해석기반 설계 연구

남재현·정희숙*·이현주

고등기술연구원 기계융합시스템센터 CAE응용기술그룹

Analysis-Based Design of a Linear Resonant Actuator for Enhancing Driver Vibration Feedback in Steering Wheels

Jaehyeon Nam · Heesuk Jung* · Hyunju Lee

Mechanical Convergence System Center, Institute for Advanced Engineering, 175-28 Goan-ro 51 beon-gil, Baegam-myeon, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi 17180, Korea

(Received 7 November 2025 / Revised 26 December 2025 / Accepted 9 January 2026)

Abstract : This study presents an integrated electromagnetic-structural design of a linear resonant actuator(LRA) for steering-wheel haptics, and verifies a high-acceleration target through an agreement between simulation and experimentation. A single degree of freedom model showed that peak acceleration scaled with the force-to-damping ratio, quantifying the force-damping trade-off. Parametric analysis determined the minimum required force, and magnetostatic finite-element analysis with nonlinear B-H curves predicted a thrust of 0.107 N; consequently, H and B field maps confirmed the saturation margin and current-thrust linearity. Furthermore, modal and frequency-response analyses identified the first translational mode. A component test under cushion and jig boundaries achieved 134 dB acceleration and an 8.9 % damping ratio. Using these data, the numerical response predicted 84 Hz and 134.83 dB, which were within 5 % of the measurement. Thus, the workflow is robust to assembly-induced damping, and delivered approximately 20-fold higher responsiveness than ERM motors, with faster rise time.

Key words : Linear resonant actuator(선형 공진 액추에이터), Electromagnetic-structural integrated design(전자기-구조 통합 설계), Electromagnetic force(전자기력), Response latency(응답지연), Acceleration level(가속도 크기)

1. 서론

스티어링 휠 기반 햅틱 경고 시스템은 운전자 주의 분산과 조향 보조의 한계를 줄이기 위해, 청각·시각 채널을 점유하지 않으면서도 즉각적인 촉각 정보를 제공하는 점에서 ADAS 및 HMI 분야에서 중요성이 부각되고 있다. 햅틱 경고는 차선이탈·전방위험 등 특정 임계상황에서 운전자 인지율을 높이는 효과가 다수의 인체공학 연구에서 확인되었다.^{1,2)} 스티어링 휠에 전달되는 진동 신호는 복잡한 시정각 자극 환경에서도 높은 인지 정확도를 보이며, 진동의 방향성과 가속도 응답으로 촉각에 의한 직관적 피드백을 얻을 수 있는 장점이 있다.

햅틱 진동 모듈은 최근 스마트폰 중심의 진동 소자와 자동차 인테리어의 차세대 촉각 인터페이스의 핵심 요소 기술로 부상하고 있다.^{3,4)}

선형 공진 액추에이터(LRA)는 공진 주파수에서 높은 가속도 이득과 빠른 응답을 가지며, 소형화가 용이한 구조로 햅틱 진동 모듈의 구동원으로 활용된다. 선형 공진 액추에이터는 제한된 구동 전력 조건에서도 체감 품질을 극대화할 수 있는 설계 자유도를 제공하며, 파형, 전압·전류 제한, 공진 추적 기능을 통합함으로써 전체 시스템 설계를 단순화할 수 있다.

고동신 등⁵⁾은 수평 및 수직 착자에 대한 햅틱 진동자

*Corresponding author, E-mail: hsjung@iae.re.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

의 진동 특성을 스프링 높이, 용접 위치, 코일의 위치로 선정하여 자기장 민감도 및 성능 변화를 분석하였고, 고성능 햅틱 진동자를 구현할 수 있는 설계 방안을 제시하였다.

우병철 등⁶⁾은 선형 액추에이터의 구동방식에 대해 관성에너지를 스프링 강성에 의한 탄성에너지로 변화됨을 연구하였고, 스프링 강성 변화를 통해 선형 액추에이터의 변위를 크게 증대시킬 수 있는 설계를 해석적 방법으로 제시하였다.

정진태 등⁷⁾은 기존 권선 코일을 대신하여 평편형 코일을 기반으로 수직형 공진 모터를 설계하고 전자기 해석을 통해 자기장의 특성을 분석하였다. 파라미터는 PCB와 영구자석 사이의 거리로 정의하였으며, 유도되는 힘의 크기를 기반으로 소형화를 수행하고 가진력을 확보하였다.

햅틱 모듈의 성능은 가진력에 의해 결정되며, 가진력은 전자기력 특성이 핵심 설계 요소로써 주로 시뮬레이션을 통해 연구되고 있다. Kastor 등⁸⁾은 소형 액추에이터에 대해 넓은 대역과 큰 동적 범위를 구현하기 위한 연구를 수행하였다. 소형 액추에이터의 성능 한계는 열 구속으로 인해 발생되었으며, 자속 분포와 변위 및 가속도 사이의 설계 파라미터를 체계화하여 구동 효율을 최적화하는 방안에 대해 논의하였다.

Pyo 등⁹⁾은 모바일 햅틱에 적합한 선형 임팩트 공진 액추에이터(LIRA)의 설계 플로우를 제안하였다. 초기 설계 단계는 자기회로 근사와 시뮬레이션을 결합하여 목표 응답과 전자기력의 상관성을 분석하였으며, 제한된 체적 및 전력 조건에서 공진 이득을 활용하면서 광대역 임팩트 진동을 발생하기 위한 파라미터를 도출하였다.

Zhang 등¹⁰⁾은 보이스 코일 액추에이터 설계에 대해 해석모델을 이용하여 높은 가진력과 낮은 고유주파수를 달성하기 위한 자석, 코일, 갭 등을 파라메트릭 해석을 통해 최적화하고, 전자기력에 대한 마진을 검증하였다. 그러나 실제 조립 및 장착 환경에서 선형 공진 액추에이터의 체감성능은 구조 감쇠, 유효 질량, 강성 변화, 경계 조건 등으로 크게 변화된다.¹¹⁻¹³⁾ 공진부의 최대 가속도는 외력과 감쇠비의 상호작용에 따라 변화하므로, 요구 전자기력과 감쇠 간의 트레이드오프를 정량화하고 목표 가속도 달성을 위한 최소 구동력을 도출하는 절차가 필요하다.

본 연구에서는 스티어링의 고성능햅틱 모듈에 대해 전자기 및 진동해석기반의 설계를 수행하였다. 해석모델은 실험을 통해 해석모델의 타당성을 확보하였다. 운전자 피드백 선형 공진 액추에이터의 성능향상을 위한 설계 절차는 Fig. 1과 같다.

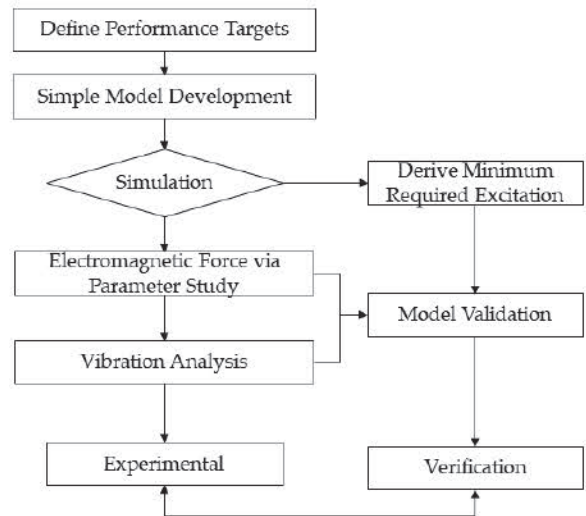


Fig. 1 Design framework

2. 본 론

2.1 다이내믹 특성 분석

선형 공진 액추에이터는 구조적으로 Table 1과 같이 설계 제약조건을 정의하여 최대 사이즈, 질량, 강성에 대한 파라미터 한계를 충족하도록 설계되었다. 설계 파라미터는 사전분석에서 총 6개의 케이스 모델에 대해 연구되었으며, 직접 제작 후 전자기 특성과 진동 특성에 실효성 있는 모델을 기반으로 개선설계 되었다. 목표 성능은 질량 시스템에서 진동 가속도 170 dB(ref. 1 $\mu\text{m/s}^2$) 수준 이상을 만족하도록 정의되었다. 여기서 성능 목표 170 dB에 대한 사전 정의는 지그 장착 상태에서 시스템 결합에 의한 댐핑과 스폰지 상태 등의 구속조건을 고려하여, 약 30%의 설계 여유를 포함한 목표 레벨로 정의하였다. 일반적인 설계 파라미터(질량, 강성, 공진주파수 등)는 제한된 설계 범위 내에서 비교적 명확히 정의가 가능하지만, 구조 댐핑은 초기 설계 단계에서 불확실성이 큰 매개변수이므로 넓은 범위를 포괄하는 파라메트릭 해석을 수행하였다. 이를 통해 요구 진동 가속도를 만족하기 위한 전자기력을 도출하였다.

따라서 선형 공진 액추에이터는 Fig. 2와 같이 1자유도 진동 모델로 구성하여 단순화된 시스템으로 모사되

Table 1 Design constraints

Parameter	Value
Resonant Frequency [Hz]	80
Peak Acceleration [dB]	120
Envelope Limit [mm]	65×30×50
Response Latency [ms]	25

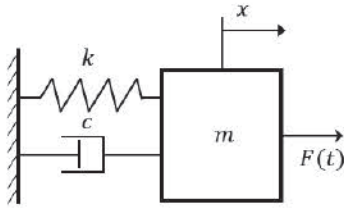


Fig. 2 1-DOF spring-mass system

었다. 모델은 자석과 무게 추를 등가 질량(m)으로 치환하였으며, U-자형 스프링은 등가 선형 스프링(k)으로 단순화하였다.

운동방정식은 기본적인 외력에 의한 1자유도 시스템으로 표현될 수 있다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \tag{1}$$

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = F(t) \tag{2}$$

$$F(t) = (f/m)Re[e^{iw_{ex}t}] \tag{3}$$

외력은 가진 주파수(w_{ex})와 전자기력에 의한 힘(f)으로 결정된다. 가진력에 의한 전달함수는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$|H(w_{ex})| = X(w_{ex})/f_0 \tag{4}$$

가진력이 주어졌을 때, 절대 진동 가속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$|\ddot{X}(w_{ex})| = \left| \frac{d^2}{dt^2} H(w_{ex}) \right| \cdot f_0 \tag{5}$$

선형 공진 액추에이터 시스템은 전자기력에 의해 진동의 크기가 결정되며, 전압의 정현파 파형의 주파수에 의해 진동이 발생된다. 햅틱 진동모듈에서 발생한 진동은 스티어링 휠 시스템에 외력으로 전달되어 특정 주파수 대역을 진동하고, 주행 중 운전자의 위험 감지 신호를 인지하는 기능으로 작용한다.

전자기력은 구조적 댐핑 한계(c)를 넘어 지그 장착상태에서 설계 130 dB의 설계사양 수준을 목표로 설정하였으며, 설계 타겟은 앞서 언급했듯이 질량 시스템에서 170 dB 수준으로 정의하였다. 전자기력의 크기는 댐핑력과 가진 주파수에 대한 절대 진동 가속도의 크기를 계산하여 목표성능을 설정하였다. 시스템은 실제 설계에

Table 2 Simulation parameters

Parameter	Value
Mass [kg]	0.0062
Stiffness [N/m]	1568.02
Natural frequency [Hz]	80

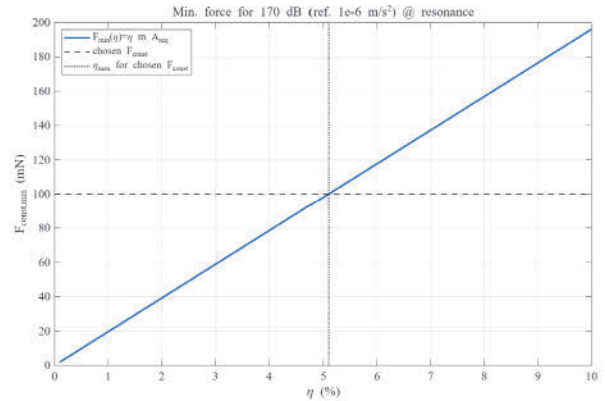


Fig. 3 Correlation of minimum electronic force and damping for achieving 170 dB

반영되는 사양을 기반으로 구성되었으며, Table 2에 나타냈다.

설계 사양 검토를 위한 계산결과는 Figs. 3, 4에 나타냈다. Fig. 3은 질량 시스템에서 진동 가속도 170 dB를 달성하기 위한 최소 전자기력과 감쇠 비의 상관관계를 나타냈다. 단일 자유도 모델은 공진점 근방의 가속도 최대치가 외력과 감쇠비에 비례하므로 요구력과 감쇠간의 선형 관계가 나타난다.

계산결과, 최소 힘이 100 mN이면 최대 구조 댐핑은 약 5% 수준까지 증가하여도 목표 진동 가속도 170 dB를 안정적으로 달성 가능함을 나타낸다. 이는 실제 시스템 장착 후 감쇠가 증가하더라도 성능 저하 없이 작동할 수 있는 힘 마진을 확보할 수 있음을 의미하며, 해당 관계를 기반으로 설계 파라미터를 정량적으로 제시할 수 있음을 보여준다.

Fig. 4는 최소 힘 100 mN 가정 시 감쇠 변화에 따른 최대 진동가속도 레벨을 나타냈다. 감쇠가 매우 작을 경우, 공진에서 최대응답은 약 190 dB 수준까지 발생되지만 감쇠가 증가할수록 최대 응답은 감소하여 10% 감쇠 수준에서는 약 160 dB 수준까지 저하된다. 이론적 모델을 기반으로 실제 장착 조건을 고려한 최대 허용 감쇠 수준을 약 5% 수준으로 정의하고, 약 100 mN의 전자기력이 발생 되도록 설정하면, 목표 진동 가속도 170 dB를 안정적으로 만족하는 설계 사양을 확보할 수 있을 것으로 예

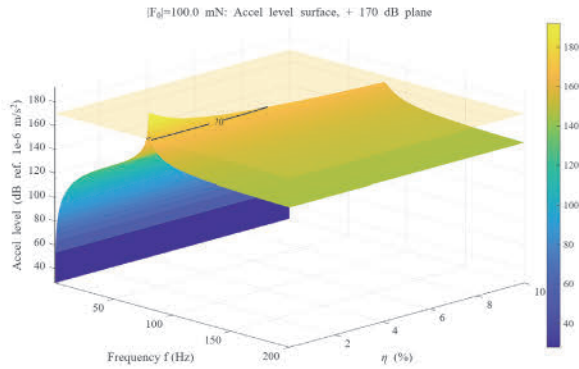


Fig. 4 Effect of damping on peak acceleration at 100 mN

측된다. 이러한 결과는 감쇠비와 구동력 간의 상호 보상 관계를 고려한 합리적 설계 기준을 제시하고 있다.

2.2 전자기력 해석

전자기력은 외력 가진의 크기에 비례하기 때문에 공진주파수 근방에서 절대 가속도 레벨을 결정하는 1차 설계변수로 작용한다. 개발 대상 선형 공진 액추에이터는 코일 구동에 의해 발생한 전자기 에너지를 기계적 운동 에너지로 변환한다. 전자기력은 시스템의 평균 자속 밀도로부터 유도될 수 있으며, 평균 자속 밀도는 정자기 (Magnetostatic) 가정 하에서 암페어 법칙으로부터 유도된다.¹⁴⁾

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \tag{6}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \tag{7}$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \tag{8}$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \tag{9}$$

$$\mathbf{J} = \nabla \times \left(\frac{1}{\mu(\mathbf{B})} \nabla \times \mathbf{A} \right) \tag{10}$$

$$\mathbf{F} = \int_V \mathbf{J} \times \mathbf{B} dV \tag{11}$$

여기서 \mathbf{H} , \mathbf{J} , \mathbf{B} , μ , \mathbf{A} , \mathbf{F} 는 각각 자기장, 전류밀도, 자속밀도, 투자율, 자기퍼텐셜, 로렌츠 힘을 의미한다. 본 해석에서는 변위전류를 무시하였으며, 투자율은 선형 등방성으로 가정하였고, 힘은 도체 체적에서의 로렌츠 힘 적분으로 계산되었다. 설계된 해석모델은 Fig. 5에 나타났다.

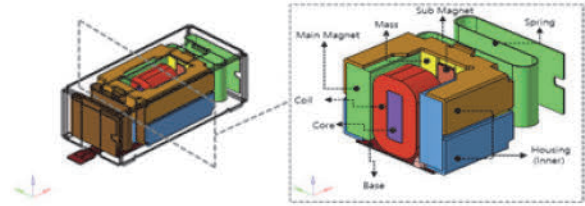


Fig. 5 Configuration of the electromagnetic analysis model

액추에이터 전자기 구조는 소형 패키지 내 집적을 전제로 설계되었으며, 핵심 요소는 영구자석-질량체, 코일-코어 어셈블리, U-shape spring으로 구성되었다. 설계는 제한된 체적에서 자속 경로 효율 최대화를 통한 전기-기계 변환 효율과 진동 전달을 극대화 하는 것으로 설정하였다. 1차 설계에서는 목표 전자기력(f)을 달성할 수 있도록 자속밀도, 전류의 설계 범위를 정의하고, 이를 기반으로 코일 턴수 관계를 수식적으로 역산하였다. 이후 3차원 전자기장 해석을 통해 최종 전자기력(f)을 도출하였으며, 해석에 사용된 주요 파라미터는 Tables 3 ~ 5에 제시하였다.

전자기 해석은 실제 부품 체적의 약 100배 이상 확장된 해석 영역인 공간장을 설정하여 경계에서 인위적 포화를 최소화하였다. 외곽 경계는 자기 스칼라 포텐셜을 기반으로 무한원 경계 조건을 적용하여 반사 없는 자속 소거를 구현하였다. 영구자석은 잔류 자속밀도, 보자력을 파라미터로 설정하였으며, 연자성체는 비선형 BH 커브를 반영하였고, 비자성체는 상대 투자율 1로 모델링하였다. 코일은 정격 전류 구동을 가정하고, 다층 권선은 등가 전류밀도 분포로 치환하여 적용하였다. 해석결과와 Fig. 6과 같다.

Table 3 Simulation parameters

Material	Relative permeability	Conductivity [S/m]
Copper	0.999	58,000,000
NdFeB 40SH	B-H Curve	-
SPCC	B-H Curve	1,100,000
SUS304	1.000	1,395,200
Air	1.000	-

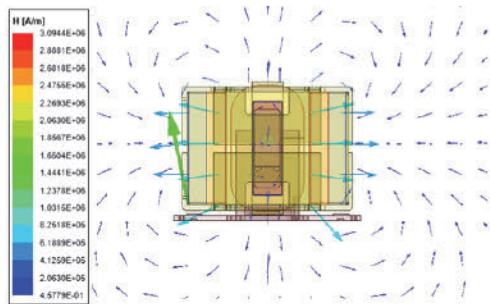
Table 4 B-H Curve of NdFeB

B	H
-991,700	0.000
-495,850	0.6315
0.000	1.263

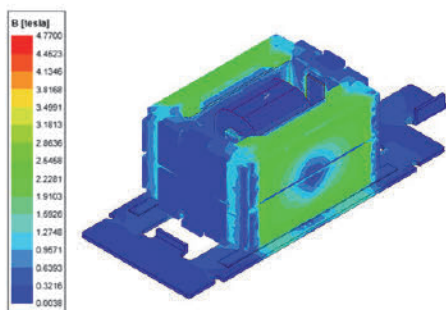
Table 5 B-H Curve of SPCC

B	H
0	0
239	0.250
796	0.925
1,592	1.250
2,387	1.390
3,979	1.525
7,958	1.710
15,916	1.870
23,873	1.955
39,789	2.020
79,578	2.110
159,155	2.225
318,310	2.430

설계 가정에 대한 전자기력은 0.107 N으로 예측되었으며, 2.1 절의 목표 가속도 170 dB를 만족시키는 충분한 수준으로 도출되었다. H-필드 벡터 플롯은 Fig. 6(a)와 같이 코일-코어-하우징을 관통하는 주요 자속 경로를 시각화 하였으며, 코일 인접부에서 자계 분포가 밀집함을 보여준다.



(a)



(b)

Fig. 6 Electromagnetic results (a) H-field vectors, (b) magnetic flux density

주요 자속경로는 Fig. 6(b)에서 가시화 하였다. 자속 밀도 분포는 코어 및 하우징에서 상대적으로 높게 형성되지만, 코어의 포화자속밀도 대비 여유가 존재함을 보여준다. 만약 포화 여유가 제한적일 경우 정격 이상의 구동에서 전류 특성이 점차 포화되어 기계 응답의 선형성 저하를 유발할 수 있다. 제안된 시스템은 현재 충분한 자속 여유가 확보되어 안정적인 추력 선형성을 유지할 수 있을 것으로 분석된다.

다만, 보다 높은 안정성이 요구되는 경우에는 코어 단면적의 확대나 고포화 특성을 갖는 연자성 재료의 적용을 통해 포화 여유를 추가로 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

2.3 진동 해석

선형 공진 액추에이터의 동적 거동은 이론적 단일 자유도 모델을 기반으로 검증하였으며, 이를 위해 모달 해석과 주파수 응답 해석을 수행하였다. 시스템에서 유효 모드는 관심 주파수 대역인 0~300 Hz 내에서 주로 나타나며 질량 어셈블리의 수평 병진 1차 모드가 전체 응답에 지배적인 영향을 미치므로 해당 모드에 대해 집중적으로 분석하였다. 모달 해석 결과와 FRF 결과는 Fig. 7에 나타냈다.

Fig. 7(a)에서 확인된 1차 모드의 고유주파수는 79.8 Hz로, 설계 목표 주파수 80 Hz와 매우 잘 일치함을 확인하였다. 해당 모드는 실제 구동 방향과 위상 정렬되어 공진 구동 시 입력 대비 가속도에 대한 지배적인 기여도를 갖는다. 따라서 설계된 시스템은 공진점 근방에서 최소 입력은 최대 가속도 이득을 확보할 수 있는 동특성 구현됨을 검증하였다.

단품 상태의 주파수 응답해석은 바닥면을 고정하는 경계 조건에서 수행되었으며, 가진력 107 mN을 질량 어

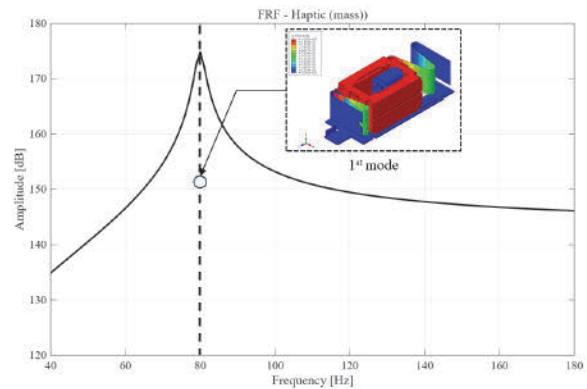


Fig. 7 Modal and frequency-response results (a) mode shape, (b) FRF

샘플리에 인가하여 0 ~ 300 Hz로 스위프하였다. 구조 감쇠는 점성 감쇠비 1.5%로 가정하였다. 결과는 Fig. 7(b)와 같이 약 80 Hz에서 174 dB 수준의 진동 가속도가 발생하여 이론 모델의 공진 증폭과 일치하는 경향을 나타냈다. 이론 모델은 약 5% 수준의 댐핑까지 견뎌 낼 수 있는 진동 가속도이지만, 해석 모델에서 구조 댐핑은 시스템이 구성되는 모든 파트에 일괄적으로 적용되기 때문에 부품, 접촉, 손실 분포 차이가 존재함을 암시한다. 이 결과는 주파수 응답의 피크 레벨 및 대역폭 편차를 유발할 수 있으며, 실험 결과를 매핑하여 모델-실험 간의 정합성을 추가로 향상시킬 수 있을 것으로 예측된다.

2.4 진동 실험 및 해석결과 비교 분석

진동 실험은 선형 공진 액추에이터의 주파수 별 가속도 응답 정량화하고, 동일 조건의 수치해석(FRF)과 비교하여 모드 정합성, 피크 주파수, 감쇠비, 피크 레벨을 비교하였다.

구동은 정현파 스위프로 수행하였고, 25 ~ 200 Hz 범위를 최소 0.5 Hz 간격으로 계측하였다. 구동 전압은 7.4 V_{pp}이며, 가속도 응답은 dB로 변환하여 해석결과와 비교하였다.

진동 실험 셋업은 Fig. 8에 나타냈다. 액추에이터는 실험 결과의 요구조건에 부합하는 두께 ≥ 35 mm 쿠션 상단에 배치하였고, 구동 신호는 신호 발생기에서 파워앰프를 통해 인가하였다. 실험 시편은 1차 테스트를 통해 약 20개 모델에서 80 Hz ± 5% 오차를 갖는 모델을 확보하였으며, 이 중 랜덤 한 1개의 모델을 통해 실험을 수행하였다. 전압 파형은 교차 검증용 위해 오실로스코프로 실시간 확인 하였으며, 데이터 취득은 전압 및 가속도 신호를 DAQ 시스템으로 취득하였다.

더미 지그는 사이즈 규제를 만족하는 45 mm × 105 mm × 15 mm 사이즈와 질량 제한 100 g을 만족하는 상태로 POM-C를 기반으로 설계 및 제작하였다.

감쇠는 공진 피크에서 하프파워 대역폭 방법을 통해 추정되었다. 1차 근방에서 감쇠 비는 피크 레벨에서 -3

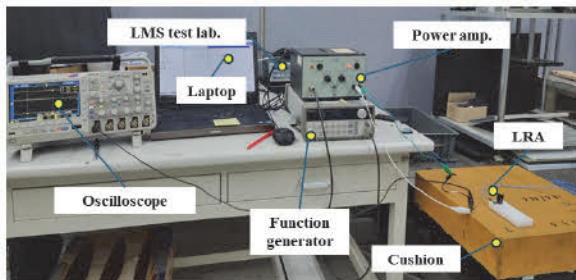


Fig. 8 Resonance test setup for sine-sweep excitation

dB 교차 주파수 f_1, f_2 를 보간으로 추정하고 다음과 같이 계산되었다.¹⁵⁾

$$\zeta \approx \frac{f_2 - f_1}{2f_n} \tag{12}$$

여기서 f_n 은 공진 주파수이다. 주파수 해상도가 0.5 Hz이므로 감쇠 편향을 줄이기 위해 선형 보간을 통해 교차 주파수를 추정하였다.

Fig. 9는 선형 공진 액추에이터의 정현파 가진 실험결과와 계산된 하프파워 대역폭을 이용한 감쇠를 나타냈다. 1차 공진은 약 80 Hz에서 나타났으며, 하프파워 대역폭으로부터 감쇠는 8.9%로 계산되었다. 공진부 피크 가속도는 약 134 dB로 측정되었으며, 약 47 Hz 부근의 피크는 지그 및 쿠션 경계의 구속 비균질성에 기인한 노이즈성 모드로 판단된다.

주파수 응답해석은 실제 측정 상황을 모사하여 Fig. 10에 나타냈다. 수치해석은 실제 실험을 반영하여 액추

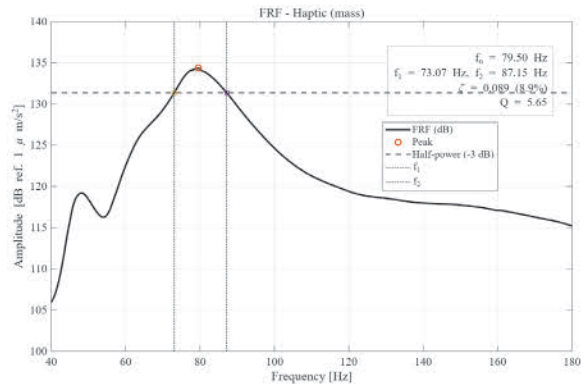


Fig. 9 Damping estimation from experimental data

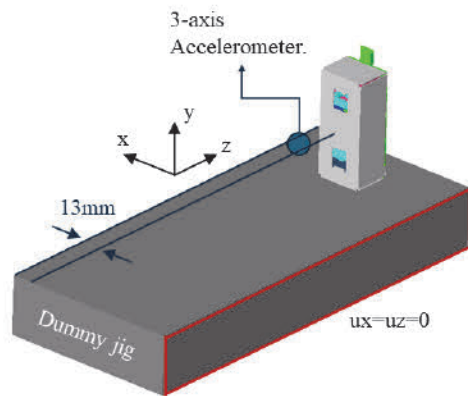


Fig. 10 Simulation model and boundary conditions

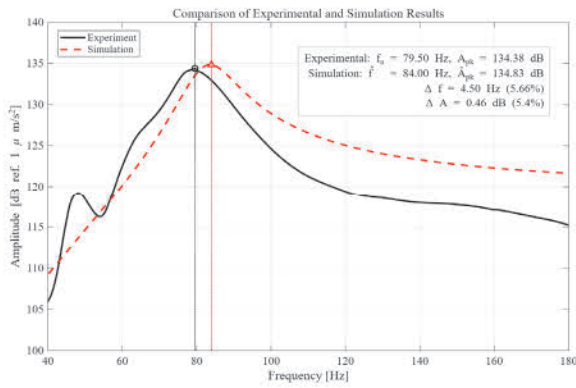


Fig. 11 Comparison of simulation and experiment

에이터를 y-방향 가진 하였으며, 응답을 지그에서 수평 거리 약 13 mm 지점에서 추출하였다.

더미 지그는 등가 질량 100 g을 적용하였으며, 측면 x, z축 자유도를 구속하여 비의도성 운동을 억제하였다. 감쇠 비는 실험에서 추정된 값 8.9 %를 모든 부품에 균일 감쇠로 가정하여 적용하였다. 해석 및 실험 결과 비교는 Fig. 11에 나타냈다.

해석의 최대 피크는 약 84 Hz, 피크 레벨은 134.83 dB로 도출되어 피크 레벨 오차 약 5 % 정도의 정합성을 가졌다. 피크 주파수의 차이는 쿠션과 지그 경계의 유효 강성 증가와 구조물 조립 오차에 의한 유효 질량-강성 변동, 실험 환경에 의한 오차로 예측할 수 있다. 실험 및 해석 결과는 피크 레벨과 공진 타겟 약 5 % 이내로 정합성이 확보되었으며, 실험 감쇠비는 요구력과 감쇠 트레이드오프 해석을 고려하여 응답 레벨을 만족하는 수준으로 확보되었다.

2.5 선형 공진 액추에이터 피드백 응답성능

선형 공진 액추에이터의 일반적인 장점은 편심 회전 질량 모터 대비 빠른 응답속도에 있다. 개발된 선형 공진 액추에이터의 상대적인 응답 성능을 분석하기 위해 전압과 가속도의 동시 기록 신호를 사용하였다. 실험을 위한 셋업은 Fig. 12에 나타냈다. 측정 신호는 총 3회

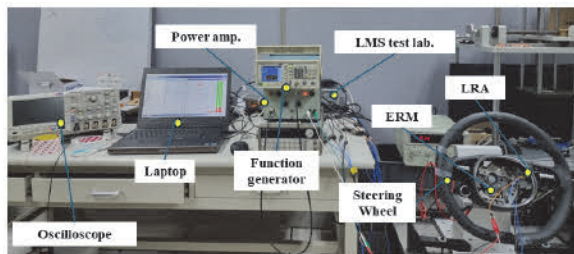
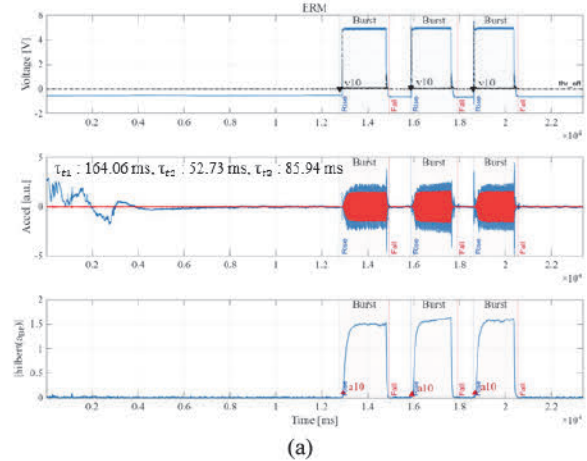


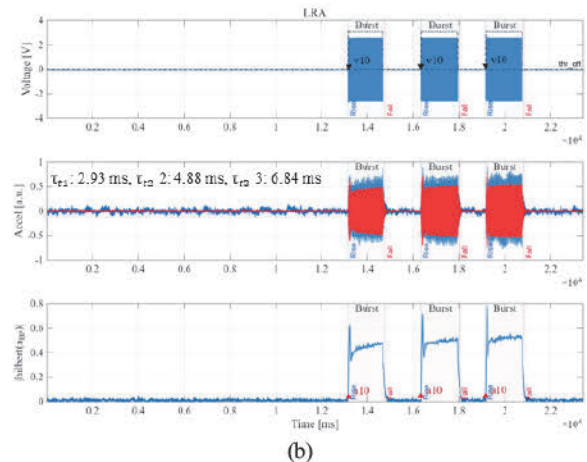
Fig. 12 Experimental setup for haptic response evaluation.

반복 시험을 통해 각 액추에이터의 특성을 일관적으로 도출하였으며, 평균값을 기반으로 성능 비교를 수행하였다.

실험 셋업은 편심 회전 질량 모터와 선형 공진 액추에이터 모두 실제 작동 조건과 유사한 상태로 구성하였다. 두 시스템은 전원 온/오프 제어를 통해 동일한 구동 환경에서 응답 특성을 비교하였다. 응답특성에 대한 정량화는 입력-출력 시계열 데이터로부터 전압과 가속도의 동시 신호를 측정하였다. 두 신호는 동시 시간축과 샘플링 비를 가진다. 응답의 지배적인 주파수는 가속도 신호에 대한 파워 스펙트럼 밀도를 이용하여 추정하였다. 시간 영역 과도 성분의 추출은 Butterworth 대역통과 필터를 사용하였으며, 힐버트 변환을 통해 엔벨로프를 산출하였다. 전압 신호는 저주파 오프셋 제거 후 동일하게 힐버트 엔벨로프를 이용하였으며, 두 엔벨로프는 버스트 구간 검출과 지연 및 상승시간 계산을 계산하였다.¹⁶⁾ 총 지연 시간의 정의는 다음과 같다.



(a)



(b)

Fig. 13 Comparison of response latency (a) ERM, (b) LRA

$$\tau_t = t_{a,10} - t_{v,10} \quad (13)$$

여기서 $t_{a,10}$ 는 전압이 최초 10% 상승에 도달하는 시간을 의미하며, $t_{v,10}$ 은 가속도가 최초 10%에 도달하는 시간을 의미한다. 결과는 Fig. 13에 나타났다.

실험은 총 세차례 반복 수행되었으며, 동일한 분석 절차를 적용하여 응답특성을 비교·분석하였다. 편심 회전 질량 모터의 평균 응답 지연은 약 100.9 ms로 측정되었으며(Fig. 13(a)), 선형 공진 액추에이터의 평균 응답 지연은 약 4.9 ms로 나타났다(Fig. 13(b)). 편심 회전 질량 모터의 응답지연은 선형 공진 액추에이터 대비 약 20배 이상 크고 버스트 간 변동성도 상대적으로 크다. 이러한 차이는 편심 질량 모터는 회전체의 관성, 정지마찰, 구동전류 램프 등의 요인으로 인해 목표 회전속도까지 도달하는 스핀업 시간이 필요하기 때문으로 해석된다. 반면 선형 공진 액추에이터는 공진 모드에서 힘과 변위가 즉시 발생하기 때문에 구동 직후 가속도 엔벨로프가 몇 ms 이내로 작동하게 된다. 따라서 사용자 체감 관점에서 볼 때, 응답 지연 및 진폭 도달 시간 모두 선형 공진 액추에이터가 편심 회전 질량 모터 대비 상대적으로 우수한 성능을 보임을 확인하였다.

3. 결 론

본 연구에서는 선형 공진 액추에이터의 전자기-구조 통합 설계를 통해 목표 가속도 130 dB 이상 달성을 위한 요구 전자기력-감쇠 트레이드 오프를 정량화하고 해석과 실험 정합성으로 설계 타당성을 검증하였다. 사전 정의된 형상 질량 강성 제약하에 단일 자유도 등가 모델을 수립하여 설계 여유를 포함한 목표 성능을 명료화하였으며, 요구력과 감쇠 간 선형 상관성이 1차 이내 인자임을 분석하였다. 정자기 가정 및 비선형 물성을 반영한 3D 해석에서 목표 성능을 달성하기 위한 전자기력 107 mN을 도출하였으며, 제안된 설계에서 H 및 B 필드 내 정격 범위 내에서 전자기력 및 전류 선형성 유지가 가능함을 나타냈다. 동특성 검증과 실험 및 해석 정합성 검증을 통해 피크 레벨과 주파수 오차 약 5% 이내의 정합성을 도출하였으며, 제안된 방법을 통해 실제 장착 조건에서도 유효한 예측력을 보였다. 응답성능은 기존의 편심 회전 질량 모터 대비 약 20배 높은 수준으로 검증되었으며, 상대적으로 빠른 응답과 진폭 도달 시간으로 사용자 체감 관점에서 유리할 것으로 분석되었다.

제안된 설계 절차 및 검증 방법은 소형 패키지 선형 공진 액추에이터의 정량적인 설계 프레임워크를 제공하며, 스티어링 휠의 햅틱 시스템과 같은 안전 경고용 인터

페이스에서 필요한 진동대역·응답레벨의 신뢰성 확보에 직접적으로 기여할 것으로 기대된다.

추후 선형 공진 액추에이터 설계 변경을 통해 전자기력을 증대시킬 수 있는 주요 설계 인자를 도출하고, 스티어링 휠 결합 수준에서 최적화에 대한 연구를 수행할 예정이다.

후 기

이 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 산업기술평가기관리원(KEIT) 연구비지원에 의한 연구임(‘RS-2024-00444866’).

References

- 1) K. H. Chang, H. W. Kim, J. H. Ma, M. K. Kim, J. S. Nam and W. K. Kyung, “Development of a Tactile Vibration System for Steering Wheel Using a Soft Actuator,” Transactions of KSAE, Vol.31, No.8, pp.607-612, 2023.
- 2) S. H. Kim, Y. J. Hae, J. G. Shin and K. I. Choi, “Design and Evaluation of Haptic Warning Signals to Arouse Drowsy Drivers,” Journal of the Ergonomics Society of Korea, Vol.37, No.3, pp.243-257, 2018.
- 3) H. W. Lee, E. Y. Jeong, K. Y. Park, Y. J. Lim and E. S. Jung, “Detection of Haptic Feedback on Vehicle Seat During Conditional Autonomous Driving,” Journal of the Ergonomics Society of Korea, Vol.40, No.6, pp.443-452, 2021.
- 4) D. B. Pyo, S. M. Ryu, B. G. Han and D. S. Kwon, “Development of a Novel Miniature Actuator for Haptic Interfaces Providing Kinesthetic and Vibrotactile Feedback,” Journal of Korea Robotics Society, Vol.8, No.3, pp.143-149, 2013.
- 5) D. S. Ko, D. J. Hur, T. W. Park, J. H. Lee and S. S. Lee, “A Study of the Vibration Characteristics of a Haptic Vibrator for Horizontal and Vertical Magnetization,” Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol.39, No.4, pp.415-421, 2015.
- 6) B. C. Woo, D. H. Kan and D. K. Hong, “Transient Response Characteristic of a Linear Actuator in a Spring Stiffness Variations,” The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers B, Vol.54, No.3, pp.134-138, 2005.
- 7) J. T. Jeong, S. G. Kim and J. G. Hong, “Design and Analysis of a Linear Resonant Motor Based on a PCB Flat Coil,” Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Autumn

- Conference, p.219, 2018.
- 8) K. N. Kastor, B. Dandu, V. Bassari, G. Reardon and Y. Visell, "Ferrofluid Electromagnetic Actuators for High-Fidelity Haptic Feedback," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.355, Paper No.114252, 2023.
 - 9) D. B. Pyo, T. H. Yang, S. M. Ryu and D. S. Kwon, "Novel Linear Impact-Resonant Actuator for Mobile Applications," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.233, pp.460-471, 2015.
 - 10) Q. Zhang, B. Li, G. Zhao, H. Miao, C. Wang, N. Liu and J. Liu, "Design and Optimization of Self-Sensing Voice Coil Actuator for Spacecraft Micro-Vibration Isolation," *Acta Astronautica*, Vol.229, pp.901-917, 2025.
 - 11) J. S. Won, K. N. Ko, H. S. Eom, C. S. Kim, J. H. Cho and H. W. Kim, "A Numerical Study of the Vibration Characteristics of a Haptic Actuator for a Dial Gear Shifter," *Applied Sciences*, Vol.14, No.20, Paper No.9242, 2024.
 - 12) T. Mason, J. H. Koo, J. I. Kim, Y. M. Kim and T. H. Yang, "A Feasibility Study of a Vibrotactile System Based on Electrostatic Actuators for Touch Bar Interfaces: Experimental Evaluations," *Applied Sciences*, Vol.11, No.15, Paper No.7084, 2021.
 - 13) J. B. Park, B. H. Ko, Y. P. Park, N. C. Park, K. S. Park and H. W. Seo, "Vibration Characteristics Improvement of Smart Phone Using Linear Resonant Actuator," *Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Spring Conference*, pp.147-148, 2013.
 - 14) M. Forbes, J. Hooper and D. Azarpeyvand, "A Generalised Maxwell Stress Tensor for Semi-Analytic Force Calculation in Magnetostatics," *Applied Mathematical Modelling*, Vol.125, pp.389-410, 2025.
 - 15) D. J. Ewins, *Modal Testing: Theory, Practice and Application*, 2nd ed., Research Studies Press, Baldock, pp.306-309, 2000.
 - 16) M. Feldman, "Hilbert Transform in Vibration Analysis," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.25, No.3, pp.735-802, 2011.