



철도차량 능동 현가장치용 액추에이터

박노철*, 백윤수, 양현석, 최종현, 박경수

(연세대학교 기계공학부)

1. 머리말

철도차량은 가장 보편적인 대용량의 대중 교통 수단으로 그 수요가 꾸준히 증가하고 있으며, 승객에게 제공되는 서비스의 질적 향상에 대한 필요성도 함께 높아지고 있다. 철도차량의 고성능화, 고속화가 이루어짐에 따라서 안전하게 운행할 수 있는 기술뿐만 아니라 승객의 승차감 향상의 요구를 만족시키기 위한 기술 개발도 활발하게 이루어지고 있다. 승차감은 승객이 느끼는 정도로써 이를 정량적으로 표현하기는 어렵지만 객차에서 발생하는 진동에 의해서 야기되는 현상이므로 진동의 저감을 통해 손쉽게 설명할 수 있다.

그림 1은 철도차량의 대차와 객차에 영향을 미치는 진동 요인들과 이를 제어하기 위한 1차, 2차 현가 시스템에 대한 개념도를 보여준다. 승객에게 전달되는 진동은 레일과 차륜에서 발생하는 마찰 및 외부 공기저항 등에 의해 발생하며 크게 수직 방향으로 발생하는 진동과 횡 방향으로 발생하는 진동으로 나눌 수 있다. 수직 방향 진동은 직접적으로는 선로의 유지보수를 통해 발생을 억제시키는 방법이 있고 간접적으로는 대차의 1차 현가시스템과 공기 스프링을 이용한 2차 현가시스템으로 효과적으로 저감시킬 수 있다. 이에 반해 횡 방향으로 발생하는 진동은 실제로 고속

주행 시 승객의 승차감에 영향을 미치는 주요인임에도 불구하고 진동을 억제하기 위한 현가 시스템의 구축이 미비한 실정이다.

기존의 철도차량에서는 속도향상에 따른 횡 방향 진동을 억제하기 위해 준고속 및 고속열차에 틸팅기술을 적용하였지만, 이는 원심력에 의한 준정적 가속도 성분만 제어하기 때문에 완전한 횡 방향의 진동 제어가 불가능하며 따라서 부족한 승차감을 보완하기 위해서는 별도의 액추에이터를 적용한 능동 현가장치가 요구된다. 과거에는 주로 이러한 진동을 억제하기 위해 유공압

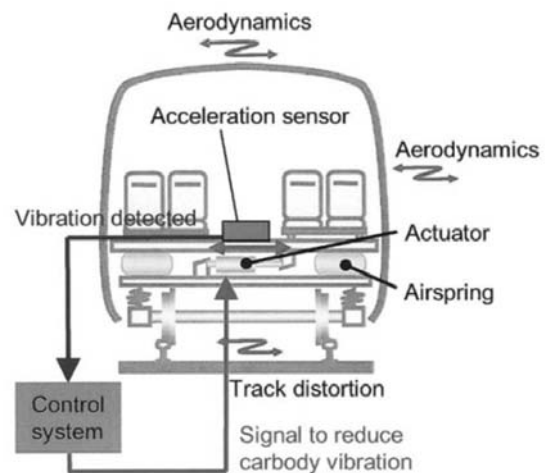


그림 1 횡 방향 승차감 능동제어 개념도

* E-mail : pnch@yonsei.ac.kr / (02) 2123-4677

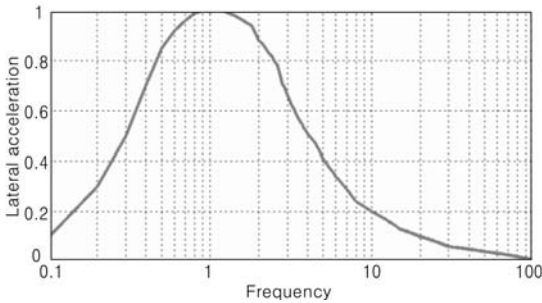
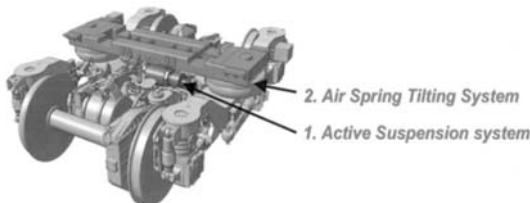
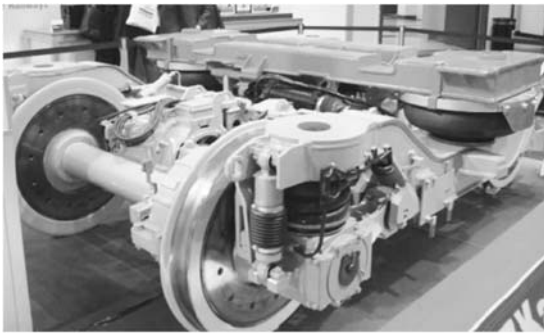


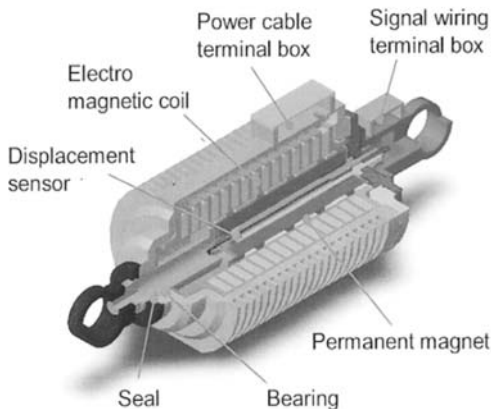
그림 2 횡 방향 안정감 평가지수(ISO 2631)



(a) 능동 현가장치용 대차 시제



(b) 능동 현가장치용 대차 시제 적용 예



(c) 능동 현가장치용 액추에이터

그림 3 능동 현가장치용 대차 시제 및 전자기 액추에이터 (일본,가와사키 중공업)

액추에이터를 이용한 수동형 현가 시스템을 적용시켜 왔으나, 최근에는 보다 적극적으로 진동을 억제하기 위해 반 능동 및 능동 현가시스템을 적용하려는 시도가 이루어 지고 있다. 앞서 언급한 능동 현가시스템은 선형 액추에이터를 대차와 객차 사이에 설치하는 2차 현가 장치로써 능동적으로 횡 방향 진동을 빠르게 억제하여 고속 주행 시 안정성과 승차감을 향상시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.

ISO 2631의 규격에 명시된 차량에서의 횡 방향 진동에 따라 승객이 느끼는 안정감은 그림 2와 같이 1 Hz 주변에서 발생하는 저주파 진동 특성을 갖는데 철도차량에 적용될 액추에이터는 객차의 질량이 탑승인원에 따라 유동적으로 변하는 점을 고려하면 저주파 영역에서 10 kN급 이상의 높은 추력을 발생시키면서도 높은 제어 안정성을 가져야 한다. 현재 국제적 동향은 선형 액추에이터 개발 전문기업이나 연구기관 및 학교 등에서 고속주행의 철도차량 등 특수한 환경에서 구동할 수 있는 고추력 대용량 액추에이터에 대한 연구를 진행하고 있으며 주로 미국, 일본, 유럽 등 해외 선진국에서 이루어지고 있는 실정이다. 일본에서는 이미 전자기 기술을 적용한 능동현가장치를 2001년 8월부터 신간선에 적용하여 세계 최초로 운전을 시작하였고, 2008년에는 그림 3과 같은 일본의 가와사키(Kawasaki) 중공업에서 개발한 능동 현가장치와 틸팅시스템이 적용된 시제 대차를 INNOTRANS에 출품하였다. 독일, 스웨덴, 프랑스 등의 유럽 선진국들 역시 횡 방향 능동 현가장치를 개발하여 시험운행 중에 있으며 일부는 실제 운행에 적용 가능한 수준까지 개발하였다. 국내에서는 하드웨어 설계, 전용 드라이버 및 컨트롤러의 자체 개발조차 이루어지지 않는 걸음마 단계에 머물고 있는 실정으로 관련 기술 개발을 위한 적극적인 참여가 필요하다.

2. 능동 현가장치용 액추에이터

철도차량의 횡 방향 진동을 억제하기 위한 고

추력 액추에이터는 크게 세 가지 방식으로 분류할 수 있다. 첫째는 회전 모터에 기어/스크류 등의 기계 메커니즘을 이용한 간접구동 방식으로 회전운동을 직선운동으로 변환하기 때문에 시스템이 복잡해지며 정밀도가 저하되고 소음 및 진동 발생에 취약한 단점을 가지고 있다. 또 다른 방식은, 유공압 방식으로 안정성 측면에서 뛰어나 철도 차량뿐만 아니라 다양한 분야에서 진동을 억제하기 위한 수동 현가장치로 사용되고 있다. 최근에는 자기유변(magnetorheological)유체를 이용한 댐퍼(damper)의 반능동 요소를 사용하는 시도가 이루어지고 있지만 능동 현가장치 기술에 비해 응답이 느려 제어성능 측면에서 불리하다. 이에 반해 전자기 방식은 비용과 공간활용 측면에서는 불리하지만 코일과 자석 상호간에 발생하는 힘을 직접적으로 사용하기 때문에 별도의 동력 변환장치가 필요 없어 구조가 간단하고 응답 속도가 빠르고 대역폭이 넓어 제어성능이 우수하며 에너지 소모 및 소음이 적은 장점을 가지고 있다.

3. 전자기식 선형 액추에이터

3.1 구동 원리 및 분류

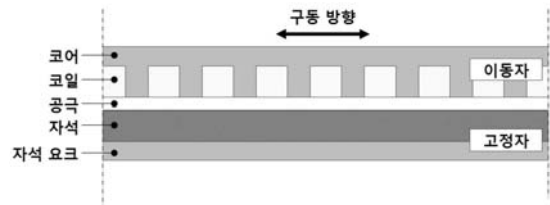
전자기식 액추에이터는 코일과 강자성체 요크(Yoke)로 형성되는 전자석과 영구자석 사이의 인력 및 척력에 의해 발생하는 로렌츠 힘(Lorentz force)을 이용한다. 로렌츠 힘은 자기장 속에 있는 도선에 전류가 흐를 때 도선이 받는 힘을 뜻하며 그 힘의 방향은 플레밍의 왼손 법칙을 생각하면 쉽게 이해할 수 있다.

전자기식 선형 액추에이터는 일반적으로 코일, 강자성체 요크, 영구자석으로 구성되며 코일과 자석의 상대적인 힘을 이용하기 때문에 고정자와 이동자로 나뉘어 구동된다. 크게 전체 형상에 따라 평판형(flat-plate type)과 원통형(tubular type)으로 구분될 수 있으며 이동자의 구성 방식에 따라 가동코일형과 가동자석형으로 분류된다.

가동코일형은 코일을 이동자로 구성하는 것으



(a) 평판형 선형 액추에이터



(b) 단면 형상

그림 4 평판형 선형 액추에이터(가동코일형)

로 가동자석형에 비해 이동자의 질량이 적어 질량 대비 구동 힘이 탁월하며 외부 자기장이 이동자에 미치는 영향이 미비하다. 가동자석형은 자석을 이동자로 구성하기 때문에 이동자의 강성이 상대적으로 높으며 코일이 고정자에 구성되어 와이어의 배선이 용이하고 발열특성이 우수하다. 두 가지 구동방식 모두 장단점을 가지고 있으며 사용 분야와 목적에 따라 적합한 방식을 적용하게 된다.

3.2 평판형 및 원통형 선형 액추에이터

그림 4는 일반적인 평판형으로 구성된 가동코일형 선형 액추에이터를 보여준다. 단면 형상에서 보듯이 코어와 코일로 구성된 이동자와 자석 및 자석 요크로 구성된 고정자는 일정한 공극을 가지고 선형적으로 구동하게 된다.

평판형은 공작기계 및 정밀 스테이지 등에 사용하기 적합하며 구조가 간단하여 조립이 수월하며 양산성이 뛰어나다. 하지만 고정자와 이동자간의 수직 방향 자기흡인력으로 인한 가이드에서의 마찰과 영구변형에 대한 문제점을 가지고 있다.

원통형은 평판형을 그대로 원형으로 감은 형태로 축 방향으로 선형 운동을 하게 된다(그림 5참

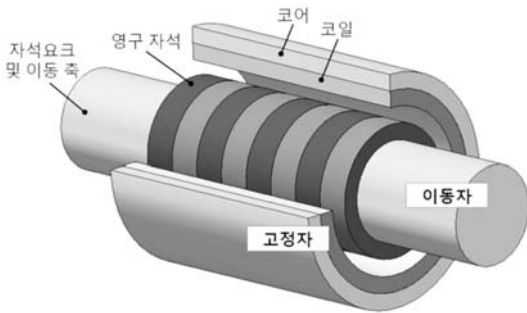


그림 5 원통형 선형 액추에이터(가동자석형)

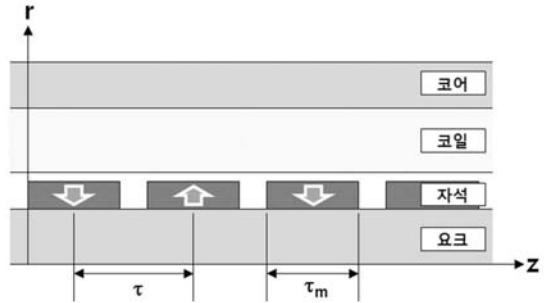


그림 6 수직방향으로 자화된 모델의 단면도

조). 원통형은 구동하는 축 방향을 제외한 수직 방향 혹은 반지름 방향으로 발생하는 자기 흡인력이 상쇄되는 구조를 갖기 때문에 평판형에 비해 마찰에 의한 손실이 이동자의 질량에만 국한된다. 원통형의 단면은 평판형의 단면 형상과 동일하지만 자석, 자석요크, 코어로 형성되는 전자기 회로가 축 방향 양 끝 단을 제외하고 완벽한 폐 회로를 이루기 때문에 보다 큰 추력을 발생시킬 수 있다.

철도 차량을 위한 능동현가시스템에는 저주파 영역에서 10 kN 이상의 높은 추력이 요구되므로 마찰 손실이 적고 보다 높은 추력을 발생시킬 수 있는 원통형 구조와 와이어 배선이 용이하고 발열 특성이 우수한 가동자석형이 가장 적합하며 효율적이다.

4. 원통형 전자기 액추에이터의 설계

원통형 전자기 액추에이터는 자석 배열, 코일 구성, 코어 형상 등의 하드웨어 구성에 따라 특성이 달라지기 때문에 디텐트 힘(detent force)과 구동 추력에 대한 평가가 정밀히 이루어져야 한다. 성능을 평가하기 위한 다양한 이론적인 접근들이 있어 왔고, 최근에는 유한요소해석을 통해 보다 쉽게 추력 특성을 산출할 수 있게 되었으며 발열 성능의 중요성이 부각되면서 이를 고려한 설계 방법들이 추가적으로 진행되고 있다. 그림 6은 이론적인 지배방정식을 유도하기 위한 수직

방향으로 자화된 원통형 액추에이터의 단면도를 보여준다.

4.1 지배방정식

이론적인 지배방정식을 유도하기 위해서는 몇 가지 가정이 필요하다. 먼저, 코일의 투자율은 공기중의 투자율과 같고, 영구자석의 상대 투자율은 1이라 가정한다. 그리고 코어와 요크의 투자율과 축 방향(그림 7의 z방향) 길이는 무한이라 가정한다. 정해진 가정으로부터 맥스웰방정식(Maxwell equation) 식 (1)과 자기벡터포텐셜(magnetic vector potential) 식 (2)를 식 (3)의 쿨롱게이지(Coulomb gauge)에 적용하면 식 (4)의 지배방정식을 유도할 수 있다.

$$\nabla \times H = J \quad (1)$$

$$\nabla \times A = B \quad (2)$$

$$\nabla \cdot A = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \nabla^2 A &= \frac{d^2 A_{\theta n}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dA_{\theta n}}{dr} - \left(k_n^2 + \frac{1}{r^2} \right) A_{\theta n} \\ &= -\mu_0 k_n \left(\frac{c_1}{r} + c_2 r \right) M_m \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $A_{\theta n}$ 은 자기벡터포텐셜 A 의 θ 성분이며, 원통형 구조에 의해 $A_{\theta n}$ 만 존재한다. M_m 은 수직방향으로 자화된 영구자석의 자화 M 의 r 방향 푸리에 계수이며, $k_n = n\pi/\tau$ 로 주어지는 n 차 공간고조파이고, μ_0 는 진공의 투자율이다.

지배방정식은 베셀 함수(Bessel function)를 통해 풀이할 수 있으며, 자석에서 발생하는 자계특성식을 유도할 수 있다. 또한, 코일에서 발생하는 전류 분포와 자계특성식에 의한 쇠교자속(flux linkage)을 통해 추력특성식을 유도할 수 있다.

4.2 디텐트 힘

디텐트 힘은 회전형 기기에서의 코깅 토크(cogging torque)와 대응되는 것으로 영구자석과 강자성체 코어가 서로 잡아 당기는 자기 흡인력 때문에 발생하는 힘이다. 영구자석을 사용하는 모든 선형 기기에서 발생할 수 있으며 중요하게 고려되어야 할 사항이다. 디텐트 힘은 코일에 인가되는 전류가 없이도 자연적으로 발생하기 때문에 구동 추력과 혼재되어 나타나며 안정적인 추력발생의 장애물로 작용해 추력 리플(ripple)을 발생시킨다. 대부분의 선형 액추에이터는 디텐트 힘을 최소화 시킬 수 있는 방향으로 설계하며 특수한 경우 디텐트 힘을 이용하는 설계를 진행하기도 한다.

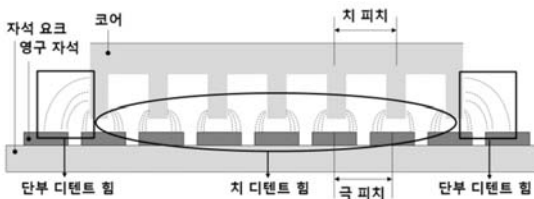


그림 7 디텐트 힘의 종류

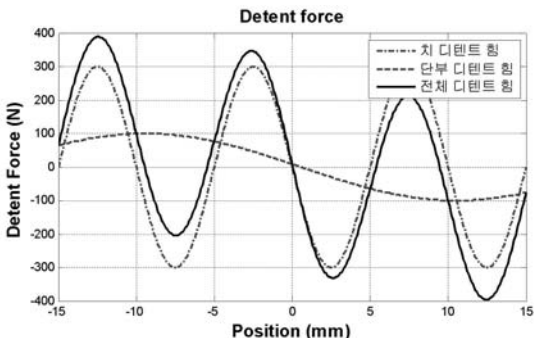


그림 8 디텐트 힘의 주기와 구성(예: 극 피치(30 mm), 치 피치(40 mm), GCD(10 mm))

그림 7은 디텐트 힘을 설명하기 위한 슬롯을 포함한 선형 액추에이터의 단면을 보여준다.

도식된 그림과 같이 자석과 코어의 상대적인 위치에 따라 구동 방향으로 서로 잡아 당기는 힘이 발생하게 되고 치(teeth) 형상에 의한 치 디텐트 힘과 유한한 이동자의 길이에 의해 발생하는 단부 디텐트 힘으로 분류된다. 치 디텐트 힘은 극 피치(pole pitch)와 치 피치(teeth pitch)의 최대공약 값(GCD)과 동일한 주기를 가지고 발생하며 단부 디텐트 힘은 극 피치와 동일한 주기를 가지고 발생한다. 그림 8은 극 피치는 30 mm, 치 피치는 40 mm, 최대공약 값은 10 mm 일 때 발생하는 디텐트 힘의 예를 보여준다. 디텐트 힘은 자석의 배열과 코어 형상에 따라 다양한 주기와 형상을 가지고 발생하므로 정밀한 해석이 요구된다.

디텐트 힘을 줄이는 방법은 다양하게 존재하지만 일반적으로 자주 사용되는 방법은 챔퍼링(chamfering), 치 형상 최적화, 자석 스큐(skew)의 적용이다(그림 9 참조). 모따기로 불리는 챔퍼링은 양 끝 단의 치를 깎아 공극에서 자기 저항의

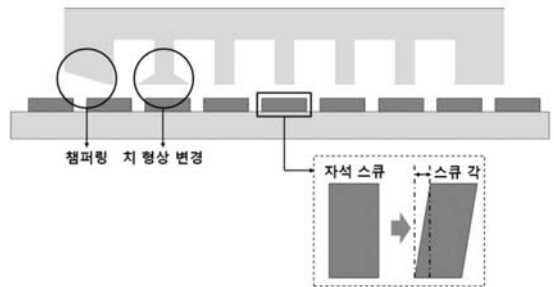


그림 9 디텐트 힘 저감을 위한 설계 방법

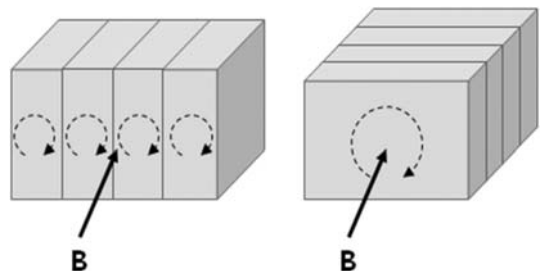


그림 10 적층된 도체에서 발생하는 와전류

변화를 줄이는 방법이고 사다리꼴 모양의 치 형상은 수평 방향(구동 방향)으로 끌어 당기는 힘을 최소화시키기 위한 방법이다. 마지막으로 스큐는 영구자석을 스큐 각만큼 뒤틀리게 배치하여 영구자석과 치 간에 작용하는 디텐트 힘이 깊이 방향으로 진행해 감에 따라 위상차를 발생시켜 상쇄시키는 방법이다. 이 외에도 액추에이터의 구성 및 종류에 따라 다양한 저감 방법들이 존재한다.

4.3 와전류 손실

전자기식 액추에이터는 코어를 비롯한 강자성체 요크가 시간에 따라 변화하는 자기장에 노출되면 와전류 손실(eddy current loss)이 발생하여 국부적으로 발열을 야기한다. 와전류에 의한 손실을 방지하기 위해 보다 적은 자속밀도를 갖는 자석을 사용하거나 상대적으로 저속으로 구동하는 방법이 있지만 이는 액추에이터 성능의 저하와 직결된다. 일반적으로, 그림 10과 같이 코어를 얇은 층으로 제작하여 와전류가 넓은 영역에서 순환하지 못하도록 적층시켜 제작하거나 전기 전도도(electrical conductivity)가 낮은 재질의 코어를 사용하여 와전류의 발생을 억제한다.

4.4 발열 성능 평가

전자기 액추에이터의 구동 추력은 입력 전류와 비례해서 증가하게 되고 이는 코일에서 발생하는 발열 특성에 의해 제한되게 되며 영구자석 역시 특정 온도 이상에 장시간 노출되면 감자(demagnetization)가 발생하여 성능이 저하된다. 이처럼 열 성능은 전자기 액추에이터의 구동 성능과 밀접히 연결되어 있다.

전자기식 액추에이터에서 발생하는 열은 코일에서 발생하는 줄 열(Joule heat)과 와전류 손실로 발생하는 열로 나누어 지는데 주요한 열원은 코일에 의한 줄 열이며 이를 분석하기 위해 열 등가 회로 설계 및 유한요소 해석을 주로 사용한다.

그림 11은 하프 슬롯(half slot) 열 등가 회로 설계의 예를 보여준다. 하프 슬롯 모델은 자석으로 발생하는 열은 제외한 코일과 코어를 통해 외부로 전달되는 전도와 대류현상을 등가 모델로 나타낸 것이다. 그에 따른 온도 예측은 식 (5)의 열전도 행렬(conductance matrix)을 통해 확인할 수 있다. T_i 는 각 위치에서의 온도이며 G_i 는 R_i 의 역행렬이고 P_{cu} 과 P_{Fe} 는 코일과 코어에서의 발열량이다.

그림 12에 보여지는 유한요소 해석은 가장 많이 사용되는 방법으로 해석의 정확성과 시간을 고려하여 사용하여야 한다. 일반적으로, 유한요소 해석은 정확성이 높아 자주 사용하기는 하지만 경우에 따라 결과예측이 빠른 열 등가 회로를 사용하기도 하며 혼용해서 적용하기도 한다.

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_1 + G_2 & -G_1 & -G_2 \\ -G_1 & G_1 + G_3 & -G_3 \\ -G_2 & -G_3 & G_2 + G_3 + G_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_{cu} \\ P_{Fe} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

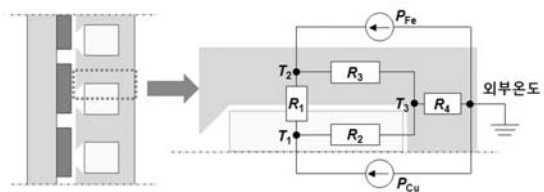


그림 11 하프 슬롯 열 등가 모델의 예

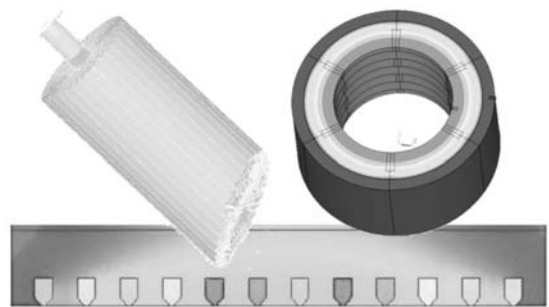


그림 12 열 유한요소 해석의 예

5. 맺음말

미래의 철도에 있어서 고속화는 철도의 성능을 평가하는 지표들 중에서도 가장 중요시되는 항목임에 틀림 없으며 세계의 철도 선진국들은 현재에도 막대한 비용을 들여 꾸준한 연구 개발을 진행하면서 자신의 기술 수준을 앞다투어 발표하고 있다. 철도차량의 고속화와 더불어 발생하는 진동의 증가와 이에 따른 승차감 저하를 극복하고 승객들에게 보다 안락하고 편안한 승차감을 제공하기 위해서는 기존의 진동 저감 기술을 뛰어넘는 새로운 수준의 개술 개발이 반드시 필요하다. 능동 현가장치는 이러한 요구를 만족시킬 수 있는 시스템으로써 이를 개발하는 것은 이제 걸음마를 시작한 고성능 미래형 철도 차량 개발에 있어서 매우 중요한 부분을 차지한다고 할 수 있다.

고추력 선형 액추에이터는 능동 현가시스템을 구성하는 핵심 요소로써 이와 같은 전자기 방식

의 액추에이터는 빠른 응답성과 간단한 구조로 인해 능동 현가장치에 적용하기 가장 적합하다. 하지만, 아직 국내에서는 고추력 선형 액추에이터에 대한 하드웨어 및 컨트롤러 설계에 대한 기술력 확보가 미비한 것이 현실이다. 선진 기술과의 격차를 줄이고 세계 어디에 내놔도 손색없을 만큼 우수한 성능을 갖는 철도차량용 능동 현가장치를 개발하기 위해서는 하드웨어 최적 설계 및 해석, 철도차량의 동적 특성에 대한 이해를 바탕으로 한 제어방법 개발 등 관련 기술에 대한 기초 연구와 선진 기술 확보가 요구되며 이를 위해서는 무엇보다도 지속적인 정책적 지원과 관심이 필요할 것이다. 비록 일본, 독일 등의 선진국에 비하여 늦게 출발선을 벗어났지만 관련 연구에 대한 체계적이고 효과적인 업무협조 및 인프라 구축이 이루어진다면 경쟁력 있는 철도 선진국 도약의 기반을 마련할 수 있을 것으로 사료된다. **KSNVE**

소음·진동 용어해설

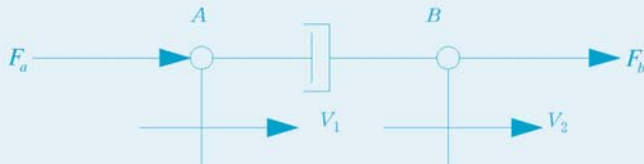
(출처 : “소음·진동 용어해설집”, (사)한국소음진동공학회 발행)

Actuator 액추에이터

원하는 동작(변위, 속도, 가속도)을 얻기 위한 구동원으로서 모터, 전자석, 유압 및 공압 장치 등을 이용할 수 있다. 정밀한 실험을 위한 액추에이터의 경우에는 보다 구체적인 요구 사항이 첨가되는 것이 일반적이다. 즉 액추에이터의 선형성, 최대 변위, 속도, 가속도, 동적 범위(dynamic range) 또는 주파수별 구동할 수 있는 최대 및 최소 변위, 속도, 가속도 등으로 구체적인 특성이 표현된다.

Resistance 저항

기계적인 저항은 댐퍼(damper)라고 불리며, 가해지는 힘이 그 결과로 나타나는 속도에 비례하게 나타나는 요소를 말한다. 대표적인 예로 대쉬팟(dashpot)을 들 수 있다.



$$v = (v_1 - v_2) = \frac{F_b - F_a}{c}$$

c는 실수