

## 전자기-열-구조의 멀티피직스 시스템 해석 및 설계

심 호 경 | 광주과학기술원 기전공학과, 박사후연구원 | e-mail : hksim@gist.ac.kr  
 왕 세 명 | 광주과학기술원 기전공학과, 교수 | e-mail : smwang@gist.ac.kr

이 글에서는 전자기-열-구조 연성의 멀티피직스 해석을 통한 시스템 설계에 대한 과정과 방법들을 설명하고자 한다.

멀티피직스(multiphysics) 시스템이란 두 개 이상의 물리 현상으로 이루어진 체계를 말하며, 이에 대한 해석은 각 현상을 나타내는 편미분 방정식(partial differential equation)을 조합하여 다중 물리식으로 구현할 수 있다.

기존의 연구는 각 단일 현상을 해석하고 이를 반영한 설계가 주로 행해져 왔다. 구조가 단순하고 단일 현상에 한정된 시스템의 경우에는 큰 문제점이 드러나지 않았다. 하지만 최근 들어 신소재 특성의 발견 및 개발과 더불어 미소 체적의 구동기에 관심이 높아져 다물리 현상의 해석 및 설계의 필요성이 대두되었다.

순차적 연성(sequentially coupling)으로 풀 수 있다. 임의의 K 시스템과 S 시스템을 그림 1(a)와 (b)로 정의할 때 외력과 응답을  $F, u$ 로 표현하자. 이때 완전 연성은 그림 1(c)와 같이 복합된 단일 해석으로 각 응답을 구하는 반면, 순차적 연성은 그림 1(d)처럼 연성 인자( $g, h$ )를 추출하거나 계산하여 단일 물리 해석을 각각 수행한다. 피드백 연성 인자  $h$ 의 영향을 무시할 수 있는 현상이 많은데 이럴 경우  $g$ 만 고려한 순차적 약 연성(Sequentially weak coupling) 해석을 수행한다.

### 연성 해석

멀티피직스 현상의 해석은 완전 연성(fully coupling)과

### 전자기-열-구조 연성계

그림 2는 전자기-열-구조 연성계(coupled field)에 대한 개념도이다. 오른나사의 법칙에 따라 전기장 주변에 자

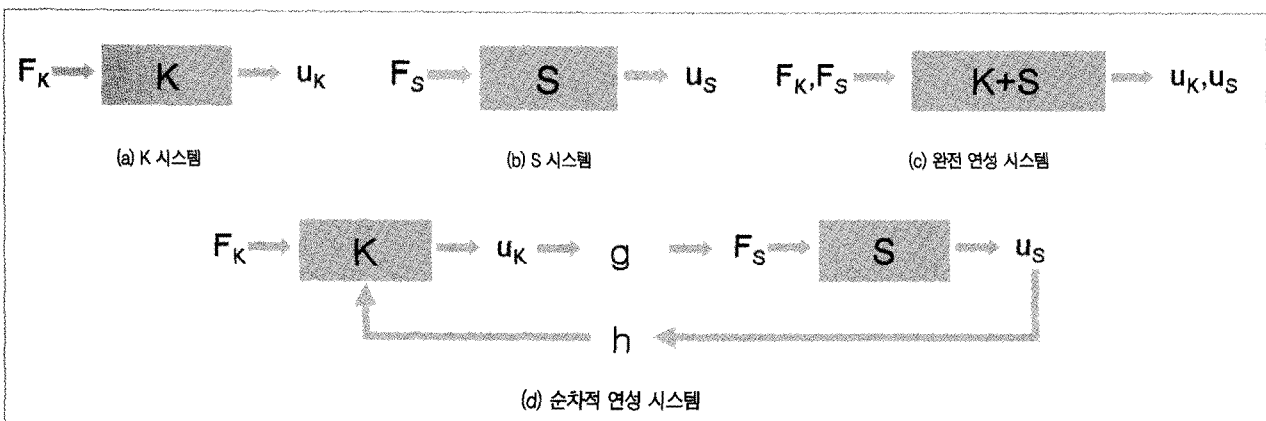


그림 1 연성 시스템의 해석

기장이 항상 형성되고(Ampere's Law), 전기장은 자기장 변화에 따라 전위차 발생(Faraday's Law)으로 인해 전압이 유기된다. 이와 같이 전류와 자기현상을 별개로 분류하기 어려워 전기-자기를 통칭하여 전자기라 일컫는다. 전기장과 자기장이 공존할 때 전자기력이 발생하고 이로 인해 전기 에너지를 기계 에너지로 변환할 수 있다. 또한 압전 세라믹을 사용하면 전기적 분극과 고체 결정체의 변형으로 인해 전기-기계 에너지의 변환이 가능하다. 자성체 내부에 변형력으로 인해 발생하는 자기 변형은 자계-기계 에너지의 변환이 가능하다. 하지만 무엇보다 전자기력을 통한 에너지 변환 시스템의 효율이 가장 높다.

도선에 흐르는 전류나 자성체에 유도되는 와전류(eddy current)는 저항에 의해 손실을 발생시키고 이는 열 에너지로 변환된다. 온도 상승으로 인해 전도체의 저항률도 상승한다. 발생된 열은 전도, 대류, 그리고 복사를 통해 대기로 전달되는데 물체 내에 온도 변화에 따라 조직 변형이 일어나 구조 조직의 팽창 및 수축이 일어난다.

그림 2에 나타난 각 물리 현상에 대해 연성 인자를 살펴보면 다음과 같다.

### 전자기력

도선에 전류가 흐르면 도선 주위에 자기장이 발생한다. 전류가 흐르는 도선 주위에 자침이나 가벼운 자성체를 놓으면 힘을 받게 된다. 전자기력(electromagnetic force)은 두 자성의 사이에 서로 끌어당기거나 밀어내는 자기력과 같은 현상<sup>(1)</sup>으로 로렌츠 힘(Lorentz force)도 이에 해당된다. 전동기의 회전 운동이나 직선 왕복 운동에서 찾아 볼 수 있다.<sup>(2)</sup>

### 압전효과

물질의 결정체가 장력, 압력, 또는 응력을 받아 왜형(strain)이 생기면 결정체 내의 유기 분극(polarization)을 발생하거나 아니면 압력을 발생한

다. 역으로 전계를 가해 분극을 일으키면 결정체는 왜형이 발생되거나 응력을 일으킨다. 그림 3과 같이 압전 세라믹을 사용하는 경우 전기 에너지가 기계 에너지로, 또는 그 반대인 기계 에너지가 전기 에너지로 변환하는 특성을 갖고 있으며 이를 압전효과(Piezoelectric effect)라 부른다.

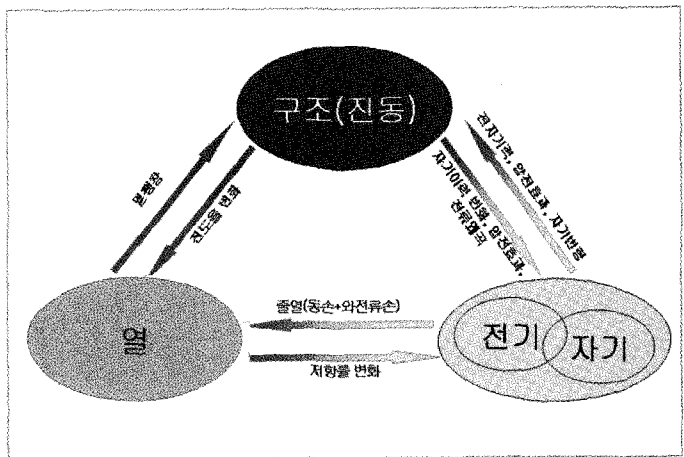


그림 2 전기-자기-열-구조 연성계의 도식

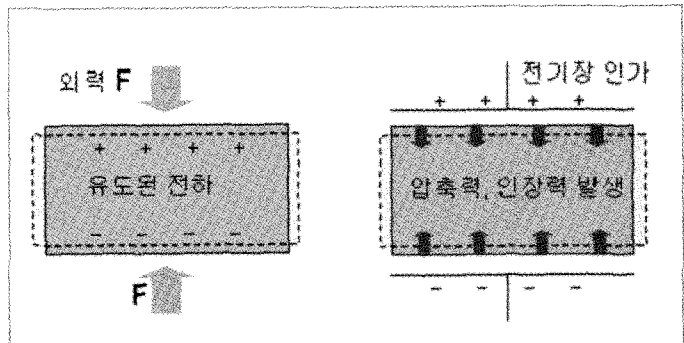


그림 3 압전효과

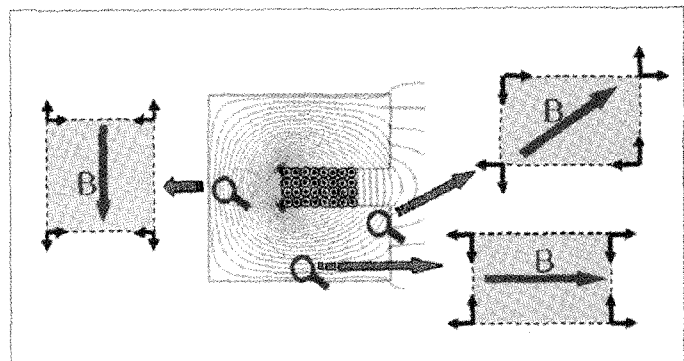


그림 4 자기변형 현상

**자기변형**

압전효과가 전기-구조변위의 관계를 나타낸다고 볼 때, 자기변형(magnetostriction)은 자기-구조변위의 효과를 나타낸다. 강자성체(ferromagnetic material)가 자화(magnetization)하였을 때 자성체의 외형이 변하는 현상이다. 물체에 강자성(ferromagnetism)이 발생할 때 결정 격자가 탄성에너지와의 합이 최소가 되도록 변하기 때문이며 자기 구역(magnetic domain)이 자화되는 방향으로 뒤틀어져 국소 외형 변형이 발생한다. 그림 4와 같이, 자기장(B) 유입은 흐르는 방향으로 미소 체적의 구조 팽창을 일으키고 수직 방향으로 수축하게 된다.<sup>(3, 4)</sup>

**줄열**

도선에 전류가 흐르면 저항과 전류와의 관계로부터 저

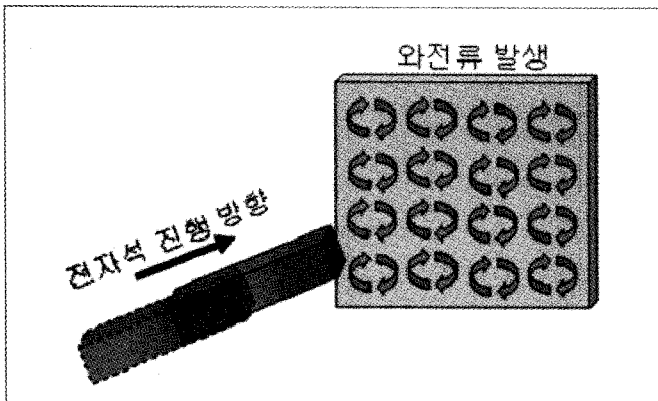


그림 5 와전류 현상

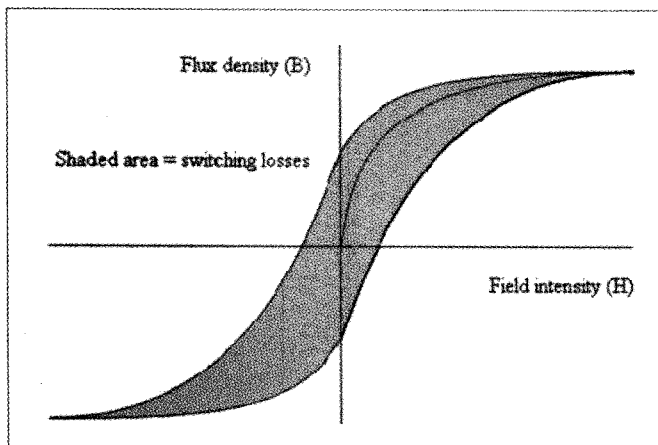


그림 6 자기이력 곡선

항열이 발생하게 되며 통상 동손(copper loss)이라 부른다. 이는 유효전력으로서 열원이 되며 온도를 상승시킨다. 또한 그림 5와 같이 금속판에 흐르는 자기장의 변화가 급격할 때 전자기 유도효과에 의해 소용돌이 형태의 전류가 발생하는데 이를 와전류(Eddy current)라 부르며 철손(iron loss)에 해당된다. 도체에 직접적으로 전류를 흘리지 않고 자계의 변화에 따라 전류가 유도 되는데 이 또한 줄열(Joule heat)로서 물질의 온도를 상승시킨다.

**비자기이력 자화(Anhysteretic magnetization)**

자기이력(hysteresis)은 물질에 자계가 얼마나 흐를 수 있는지를 나타내는 물질 특성이다. 일정 자기장 이상에서 자성체에 생기는 자화는 비선형성(nonlinearity)을 지니며 포화한다. 일반적으로 자화는 약한 자기장에 비례하지만 강자성 물질에서는 자기장을 가한 후 제거해도 자화가 사라지지 않고 남아 있는데 이를 잔류자화(remnant magnetization)라고 하며 이러한 비선형 효과를 그림 6과 같은 자기이력 곡선을 통해 알 수 있다. 구조 변형이 발생하면 자기이력 곡선이 왜곡되거나 비자기화(anhysteresis)된다.<sup>(3)</sup>

**전류왜곡(Current distortion)**

물체의 구조 변형이 생기면 자기 흐름의 변화가 일어나 인가한 전류의 왜곡이 발생한다. 미세구조물에서는 영향이 있으나 산업체 기기에서는 일반적으로 무시할 정도이며 실제로 해석한 사례는 찾기 힘들다.

**열팽창(Thermal expansion)**

온도가 상승함에 따라 물체의 길이가 팽창하는 것을 선팽창, 부피가 팽창하는 것을 부피 팽창이라 하고 이들을 통칭하여 열팽창이라고 한다. 온도가 올라가면 결정체의 분자 또는 원자들의 운동이 활발해져 분자 또는 원자들의 평균 거리가 커지기 때문이다.

## 해석 및 설계

### 1) 미소 액추에이터 : 전기-열-구조 연성 문제

다음 예는 위상 최적 설계 기법을 이용하여 MEMS 액추에이터(actuator)의 설계하는 방법을 보여준다. 이 디바이스는 전류를 인가하면 구조 자체의 저항으로 인한 줄열이 발생하고, 발생된 열에 의하여 구조적 변위를 일으키는 과정을 응용하는 것이다. 이에 따른 해석은 1차적으로는 전기 해석, 2단계 열해석, 그리고 3단계 구조 해석 등 3단계로 나누어진다. 좀더 정확한 계산을 하기 위해서는, 열에 의한 전기저항 변화 등을 고려한 완전 연성 해석(fully coupled analysis)을 수행하기도 하나, 그 변화율이 크지 않을 때는 순차적 연성 해석(sequential coupled analysis)도 계산 시간을 고려하면 적절한 대안이 될 수도 있다. 전 해석 과정을 통해 필요한 물성치는 전기전도도, 열전도도, 강성률, 포아송비 등이며, 경계조건으로 전압(또는 전류), 온도 조건, 구조 DOF 조건 등이 필요하다. 그림 7은 열탄성 미소 액추에이터이며 구동부를 설계하기 위해 그림 8(a)와 같이 설계 영역을 설정하였다. P 위치의 변위를 최대화하도록 목적 함수를 정의하고 최적화하면 그림 (b)와 같은 패턴을 얻을 수 있으며 제작을 위해 그림 (c)와 같은 형상을 도출하였다.<sup>(5)</sup>

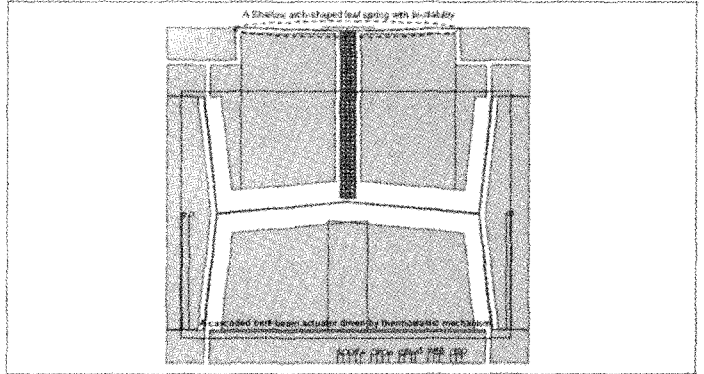


그림 7 열탄성 미소 액추에이터를 이용한 래치업(latch-up)타입 구동용 마스크 설계

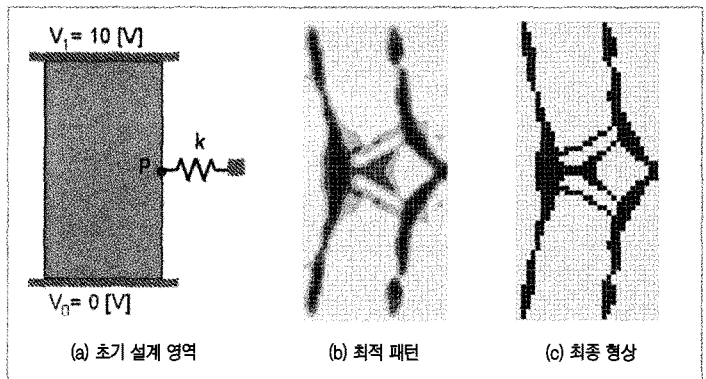


그림 8 열탄성 미소 액추에이터의 최적설계

### 2) 자기 부상 시스템 : 전자기-구조 연성 문제

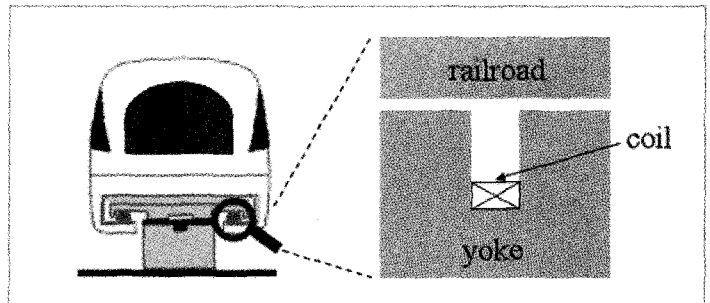


그림 9 자기 부상 시스템

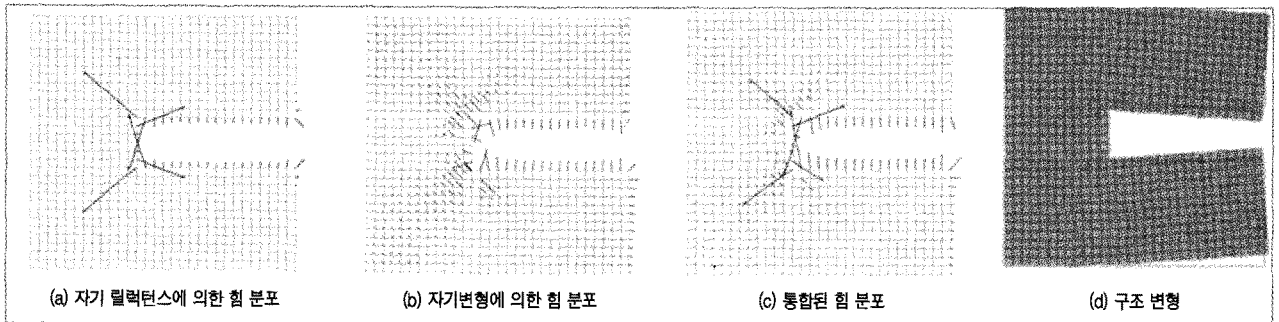


그림 10 전자기-구조 해석

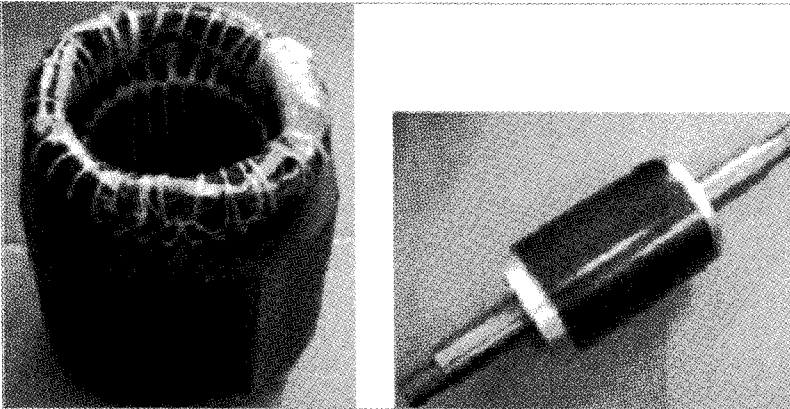


그림 11 유도기 (좌)고정자, (우)회전자

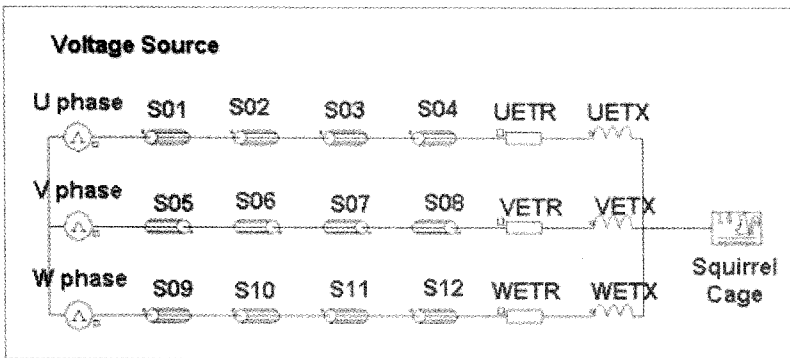


그림 12 외부 전기 회로

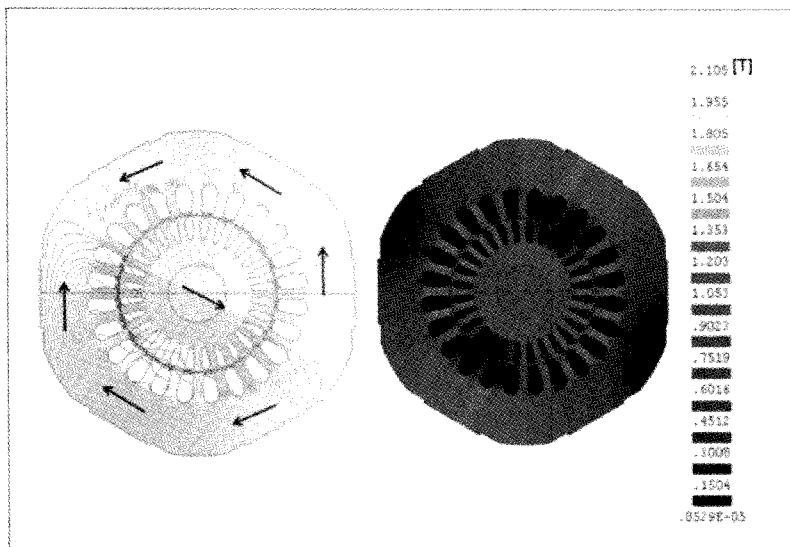


그림 13 비선형 시변 해석 (좌)자속선 분포, (우)자속밀도 분포

그림 9는 기존의 휠 차량의 문제점을 해결할 수 있는 자기 부상차량 시스템을 나타내고 있다. 휠을 자기 부상기

(magnetic levitating actuator)로 대체함으로써 기계적인 비접촉, 저중량, 차체의 저진동/저소음 그리고 유지보수 비용의 절약을 기대할 수 있다. 하지만 차량을 부상하기 위한 강한 자기장이 필수적이다. 이로 인해 전자기력이 발생하고 요크(yoke) 내부에서는 자기변형이 발생한다. 이를 모사하기 위해 전자기-구조 해석을 수행한다. 전자기 해석을 통해 자기 벡터 포텐셜(magnetic vector potential)과 자속 밀도(magnetic flux density)를 구한 후 그림 10(a)~(c)와 같이 각 성분의 힘을 유한요소법을 기반으로 계산한다. 요크에 작용하는 모든 전자기적인 힘을 부여하고 구조 해석을 진행하였을 때 그림 10(d)와 같은 변형이 발생함을 알 수 있다.<sup>(4)</sup>

### 3) 가전용 유도모터 : 전자기-열 연성 문제

그림 11의 유도모터(induction motor)는 고정자에 전원을 연결하고 고정자 코일(stator coil)에 전류를 흘리면 회전자계(revolving magnetic field)가 발생하게 되며, 회전자 동바(rotor bar)에 유기된 전압차에 의해 전류가 흘러 이 전류와 고정자에서 발생된 회전 자계의 상호작용으로 회전하는 전동기이다. 만들기가 쉽고 특별한 모터 구동회로가 필요 없으며, 또한 단가가 저렴하기 때문에 일반 가전기에 들어가는 모터로서 많이 사용되어 왔다.

전자기적 특성은 시변 비선형 해석을 통해 파악할 수 있으며 열원을 산출하여 열-유동 해석을 통해 온도 분포를 확인할 수 있다. 그림 6과 같은 비선형

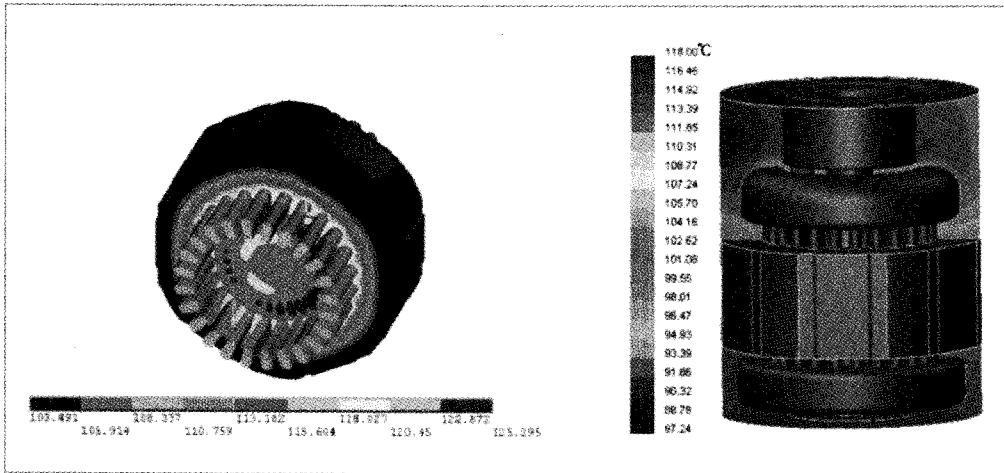


그림 14 열/유동 해석 (좌)모터의 온도분포, (우)모터 주변에 흐르는 유체의 온도 분포

물성치를 고정자와 회전자의 요크에 부여하고 그림 12와 같은 외부 전기 회로를 구성하여 유한 격자의 geometric 모델에 연결한다. 외부 전압을 걸어 전기-자기 해석을 통해 속도 변화에 따른 수렴 값을 찾고 해석을 종료한다. 회전자가 정격 속도에 도달하였을 때 자기력선과 자속 밀도의 분포는 그림 13과 같다. 이때 고정자와 회전자에 흐르는 전류를 파악하여 열원인 줄열을 계산하고 열-유동 해석을 수행한다. 전도 열전달보다 대류 열전달이 온도분포에 더욱 민감하기 때문에 대류계수의 산정이 중요하다. 열-유동 관계식을 풀어 그림 14와 같은 온도 분포와 유체의 속도를 계산하여 실험과 비교하여 검증한다. 본 예제에서는 순차적 약 연성 해석 기법을 적용하였으며 실험과의 오차는 6% 이내였다.<sup>(6)</sup>

**참고문헌**

(1) J. L. Coulomb, "A methodology for the determination of global electromechanical quantities from a finite element analysis and its application to the evaluation of magnetic forces, torques and stiffness", IEEE Trans. Magn., Vol. Mag-19, No. 6, 1983.  
 (2) H. Shim, H. Moon, S. Wang, and K. Hameyer, "Topology Optimization for Compliance

Reduction of Magneto-Mechanical Systems," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 44, No. 3, pp. 346~351, March 2008.

(3) J.P. Joule, "On the effect of magnetism upon the dimensions of iron and steel bars", Phys. Mag., 3 (1847) 30~76.  
 (4) H. Shim, and S. Wang, "Topology Optimization of Magneto-Mechanical Systems Considering Magnetic force and Magnetostriction," 49th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structure, Structural Dynamics, and Materials, AIAA 2008-1711, pp. 1~7, Schaumburg, IL, USA, April 2008.  
 (5) H. Moon, C. Kim, and S. Wang, "Reliability-Based Topology Optimization of a Thermoelastic Actuator", 6th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization, Brazil, May 2005.  
 (6) H. Shim, S. Wang, and K. Lee, "3D Optimal Design of Induction Motor Used in High Pressure Scroll Compressor," IEEE Transaction on Magnetics, In press.