

## 적용요소분할법에 의한 자기클러치 전자력의 유한요소해석

김 한<sup>0</sup> 안 창희  
영남대학교 전기공학과

### Finite element analysis of magnetic clutch using adaptive mesh refinement technique

Han Kim<sup>0</sup>, Chang-Hoi Ahn  
Department of Electrical Engineering Yeungnam University

#### Abstract

In this paper a simple mesh refinement technique for finite element method is proposed using error estimation only on the material boundaries. The boundary errors are estimated by the continuity conditions of normal  $B$  field and tangential  $H$  field.

From the error estimation fine meshes are accomplished on the boundary and propagate to the near region by Delanunay mesh tessellation.

This adaptive mesh refinement technique is applied to the force calculation of magnetic clutch composed by several material regions and makes good convergence.

#### 1. 서론

각종 전기기기들의 전자계 해석을 위하여 유한 요소법이 도입된 이래, 정밀한 해석을 위하여 해석기법에 있어서 커다란 발전이 있어왔다. 특히 효율적인 해석을 위해 필수적으로 행하여야하는 적용요소분할법에 대한 많은 연구가 있었다. [1][2]

본 논문에서는 간단하고 쉬운 오차추정법을 제한함으로서 실제 전기기기의 복잡한 모델에서도 쉽게 적용할 수 있는 적용요소분할법을 제안하였다.

그 방법으로는 먼저 계산오차를 추정하기 위해 매질 경계면에서 경계조건을 이용하여 경계면에서의 오차만을 추정하였다. 그리고 추정된 오차를 기준으로 요소를 전 영역에서 자동적으로 세분화함으로서 해석영역 전체의 오차를 줄여가는 기법을 사용하였다.

본 논문에서 제안한 적용요소분할법이 복잡한 경계면이 존재하는 모델에서의 자계해석에 적용이 가능한지를 검토하기 위하여 실제로 사용중인 자동차 에어컨 컴프레셔용 자기 클러치에서의 전자력해석에 적용하여 보았다.

#### 2. 오차추정 원리

본 논문에서는 축대칭 3차원 정자계문제만을 원통과 표면에서 2차원화하여 다루고 있으며 유한요소해석을 위한 지배방정식은 맥스웰 방정식으로부터 유도한다.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A = J \quad (1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2)$$

식 (1)은 자계해석을 위한 자기벡터포텐셜을 도입한 지배방정식이며 매질경계면에서 자계세기의 접선성분이 연속이라는 조건을 포함하고 있다. 그리고 식 (2)는 자계문제에 있어서 매질 경계면에서의 자속밀도의 법선성분이 연속이라는 조건을 의미하며 해석에 있어서 고려되지는 않았지만 반드시 만족하여야 한다. 그리고 두 경계조건은 자계해석에 있어서 항상 만족되어야 하지만 계산에 의해 구한 자속밀도와 자계세기는 이 조건들을 만족하지 못한다.

본 논문에서는 위의 두 경계조건을 적용하여 오차추정을 행하며 식 (2)를 직접 적용하여 추정된 오차와 비교하여 검토한다.

일반적으로 오차추정은 해석영역안의 모든 요소에서의 계산오차를 추정하여야 한다. 그러나 본 연구에서는 동일 매질의 두 요소사이의 경계면에서의 오차보다 서로 다른 매질의 두 요소사이의 경계면에서의 오차가 더 많다는 전제하에 서로 다른 두 매질 경계면에서만 오차를 추정하며 식 (2)를 직접 적용하여 오차를 추정하는 경우에만 전 해석영역에서 행한다.

그림 1은 경계면상의 삼각요소를 나타내며 매질 1과 매질 2는 서로 다른 매질이며  $B_n$ 과  $H_l$ 는 각각 경계에서의 자속밀도의 법선성분과 자기세기의 접선성분을 의미한다. 매질경계면에서의 추정오차는 식(3)에 의해 계산된다.

$$Estimated\ Error = \begin{cases} \Delta l^2 \cdot (B_{n1} - B_{n2})^2 \\ \Delta l^2 \cdot (H_{l1} - H_{l2})^2 \end{cases} \quad (3)$$

여기서  $\Delta l$ 은 매질경계면의 길이이다.

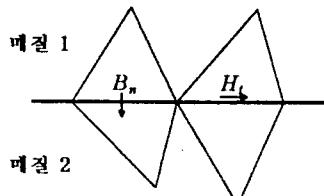


그림 1 경계면의 삼각요소

### 3. 요소세분

추정된 오차는 매질경계면에서의 오차이므로 경계면에서의 절점의 추가가 선행되어진다. 또한 해석영역 전체에서의 요소세분은 요소결의 개선에 의해 행하여진다. 해석영역 전체에서의 요소세분은 매질경계면에서의 절점수의 증가와 비례하여 이루어지며 매질경계면으로부터 전 해석영역으로의 점차적인 요소세분이 이루어져서 전체 오차의 감소에 기여하게 된다.

### 4. 시뮬레이션 및 검토

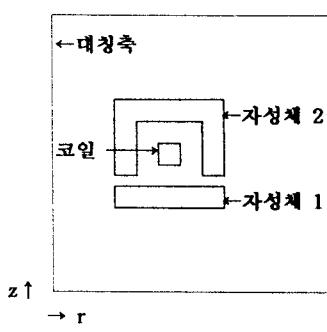


그림 2 해석 모델

그림 2은 축대칭 3차원 물체를 원통좌표계에 적용하여 2차원으로 나타낸 축방향의 단면이며 외부경계의

원쪽면이 축대칭 축이 되며 자성체 1과 자성체 2의 비 투자율은 4000으로 하고 코일에는 직류 12[V]가 인가된다.

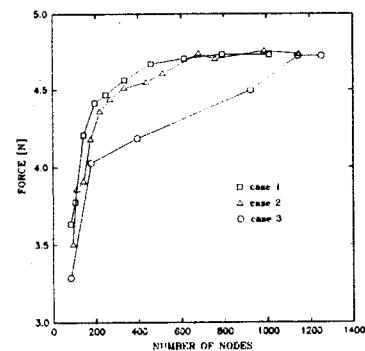


그림 3 절점수에 따른 전자력

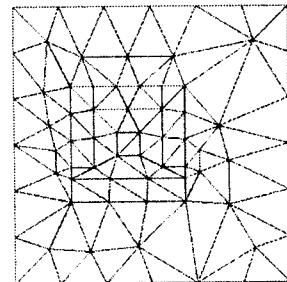


그림 4 초기 요소분할도

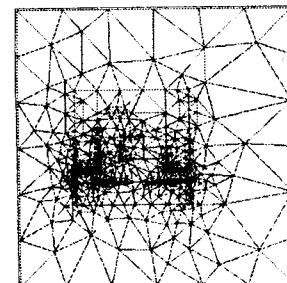


그림 5 최종 요소분할도(case 1)

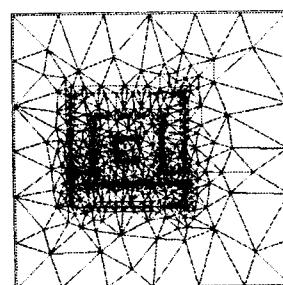


그림 6 최종 요소분할도(case 2)

그림 3은 본 논문에서 제안한 적용요소분할법에 의한 반복계산으로 자성체 2에서의 전자력의 수렴을 나타낸 것이며 전자력의 계산방법은 맥스웰 응력텐서(Max well stress tensor)를 사용한다. 그림 3에서 case 1과 case 2는 각각 자속밀도의 범선성분과 자계세기의 접선 성분에 의한 오차예측으로부터의 전자력 수렴을 나타내는 것이며 case 3는 자속밀도의 발산이 영(zero)임을 이용한 오차예측으로부터의 결과이다.

그림 3에서 절점수의 증가에 따른 case 1과 case 2의 전자력의 수렴이 적절함을 볼 수 있다. 또한 그림 4와 그림 5는 각각  $B_n$ 과  $H_i$ 의 연속임을 이용한 오차추정에 의한 최종요소분할도이며 예상대로 자성체사이의 공극 부분에서의 요소가 조밀하게 세분되고 있다.

## 5. 적용사례

본 논문에서 제안된 적용요소분할법이 복잡한 경계가 있는 실제 전기기기의 모델에서 잘 적용되는지를 검토하기 위해 현재 자동차에 사용중인 에어콘 컴프레서용 자기 클러치의 일종인 V5\_4Pole에 대하여 전자기력 해석을 하였다. 그림 7은 자기 클러치의 축방향의

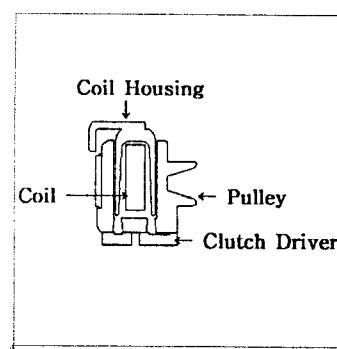


그림 7 해석 모델(V5\_4pole)

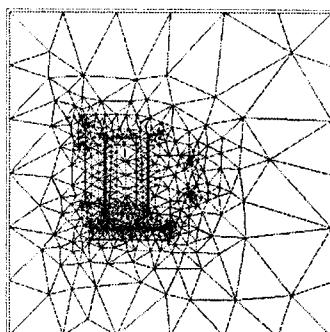


그림 8 최종 요소 분할도(V5\_4Pole)

단면이며 외부경계의 원쪽면이 축대칭 축이 되며 Pulley와 Clutch Driver 및 Coil Housing의 비투자율은 4000으로 하고 코일에는 자동차용전원인 직류 12[V]가 인가한다.

그림 8은  $H_i$ 의 연속조건에 의한 오차추정으로 적용요소분할한 요소분할도이며 조밀한 경계에서도 예상대로 잘 적용됨을 볼 수 있다.

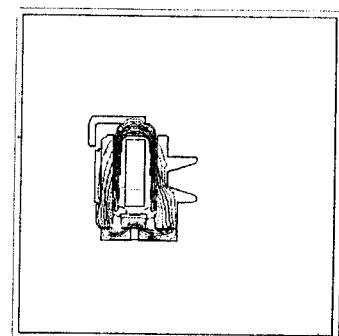


그림 9 자속 분포도(V5\_4Pole)

## 6. 결론

본 논문에서는 축대칭 3차원장을 2차원화한 정자계 문제를 유한요소법으로 해석하는 경우에 구하고자 하는 전자력의 정확도를 높이기 위한 효율적인 적용요소분할법을 제안하였다.

오차추정은 매질경계에서의 경계조건을 이용하였고 전 해석영역에서의 오차를 추정하지 않고 매질경계면에서의 오차추정만으로도 전자력의 적절한 수렴을 얻을 수 있었다. 또한 본 논문에서 제안한 방법으로 현재 자동차에 사용중인 자기 클러치의 전자력 해석에 적용하여 원하는 결과를 얻으므로서 복잡한 모델에서의 적용가능성을 검토하여 보았다.

본 적용요소분할법은 현존하는 다른 방법들에 비해 간단하며 특히 해석하고자 하는 모델이 아주 조밀한 매질경계면으로 구성되어 있는 경우에 용이한 방법이라 생각된다.

## 참고 문헌

- [1] Song-yop Hahn, C. Calmels, G. Meunier, J. L. Coulomb, " A Posteriori Error Estimate for Adaptive Finite Element Mesh Generation ", IEEE Trans on Mag, Vol. MAG-24, NO. 1, 1988.
- [2] J.Luomi, H.Rouhiainen, "Adaptive Mesh Refinement for Magnetic Field Problems Involving Saturable Ferromagnetic Parts " IEEE Trans on Mag, Vol. 24, NO. 1, 1988.