

電氣機器의 解析技術

任 達 鎬
(漢陽大 工大 教授)

■ 차 례 ■

- 1. 序 言
- 2. 各種 數值解析法의 概要
 - 2.1 解析法의 最近의 進歩
 - 2.2 電氣機器 解析에의 應用
- 3. 各種 電氣機器의 解析
- 3.1 基本方程式
- 3.2 變分原理, Galerkin 理論과 要素Matrix式
- 3.3 各種機器 모델의 解析例
- 4. 맺음말
參考文獻

① 序 言

電氣機器의 解析法에는 첫째로 電氣的 等價回로를 構成하여 이를 푸는 回路解析法과, 둘째로 현상을 支配하는 偏微分方程式 또는 積分方程式을 適當한 假定下에서 푸는 數值解析法의 두가지가 있다. 그러나 回路解析法의 경우에는 回路網의 構成과 回路定數의 결정이 경험이나 직관에 따르게 되는등 여러가지 이유로 인해 앞으로의 발전을 기대하기가 곤란하다. 한편, 數值解析法의 경우에는 數值計算過程에서 반드시 誤차가 수반되므로, 하나의 解析法만으로는 완전한 解析이 곤란하게 된다. 따라서 이 경우에는 問題의 特性에 따라 最適의 結果를 얻을 수 있는 복합적인 解析法이 선택사용되며, 近年의 電子計算機의 發達에 힘입어 電氣機器의 解析에 광범위하게 이용되고 있다.^{1), 2)}

이러한 觀點에서 本稿에서는 電氣機器의 解析에 사용되는 여러가지 數值解析法을 간단히 소개하고, 그중 最善의 方法으로서 가장 널리 研究活用되고 있는 有限要素法에 의한 各種 電氣機器의 解析法에 대해 記述하기로 한다.^{3), 4)}

② 各種 數值解析法의 概要

數值解析法에는 크게 나누어 領域分割法과 境界分割法의 두가지가 있다. 前者는 微分形 解析法이라고도 불리며, 差分法과 有限要素法이 이에 속한다.^{25)~33)} 또 境界分割法은 積分方程式法이라고도 불리며, 電荷重疊法과 境界要素法이 이에 속한다.³⁴⁾ 그리고 表面電荷法은 境界要素法의 일종이라고 생각할 수 있으며, 또한 磁界計算의 경우에는 積分方程式法에 속하는 磁氣Moment法과 表面電流法도 사용된다.³⁾ 표 1에 이들의 原理, 分割法, 특징등을 나타내었으며, 이들을 電磁界問題에 適用할 때의 특징을 표 2에 나타내었다.

2.1 解析法의 最近의 進歩

(1) 電界計算에는 表面電荷法이 導入되어, 三次元問題의 二次元的 解析이 가능하게 되어 二次元電界의 解析을 좀더 간편한 方法으로 실행할 수 있게 되었다.⁴⁾

(2) 電磁界는 일반적으로 無限의 領域을 갖는 開領域問題가 보통인데, 이 경우에는 解析對象 領域의 境界에 固定境界條件 또는 自然境界條件

표 1. 각종 數值解析法의 특징

分類	領域分割法		境界分割法	
原 理	領域내에서 支配方程式을 만족하는 近似方程式을 세운다(境界條件을 만족해야 함)		境界에서 境界條件을 만족하는 近似方程式을 세운다(支配方程式을 만족해야 함)	
離散化方法	領域전체를 分割		境界를 分割	
解析方法	差分法	有限要素法	電荷重疊法	境界要素法
基礎原理式	Taylor展開의差分式	變分原理, 加重殘差法	重疊의 定理	Green의 定理
分割法	四角格子	有限要素	輪廓點 및 假想電荷	境界要素
未知數	格子點의 Potential	節點의 Potential	假想電荷	境界上의 Potential 및 그 微分値
電界의세기	格子點의 Potential의 數值微分	Potential의 近似函數의 微分	電荷量으로 부터 解析的으로 計算	境界上의 未知量으로 부터 數值積分
電界,磁界의 計算精度	나쁘다	보통	좋다	좋다
計算時間	格子點數의 函數	節點數의 函數	電荷數의 函數	要素數의 函數
Programm-ing	容 易	復 雜	容 易	復 雜
人力Data 作成	容 易	상당한 정도까지 自動化가 可能	電荷配置에 經驗이 필요	비교적 容易
系方程式의 係數Matrix의 성질	Sparse나 Band Matrix	Sparse나 Band Matrix 또는 언저리가 있는 Band Matrix	非對稱 Full Matrix	

표 2. 각종 電磁界 解析시의 특징

解析方法	差分法	有限要素法	電荷重疊法	境界要素法
復雜한 境界形狀의 취급	나쁘다	容 易	나쁘다	次元이 一次元일때는 간단
材料特性의 적용	復 雜	容 易	限界가 있다.	쉽지 않다
非線型 問題의 취급	좋 다	좋 다	不 可 能	나 쁘 다
開領域 問題의 취급	나 쁘 다	對象에 따라서	좋 다	좋 다
三次元解析	나 쁘 다	나 쁘 다	좋 다	좋 다
기 타	電磁界가 局部的으로 급변하는 問題에서는 誤差가 많다.	• 渦電流등을 포 함한 復雜한 問題에 적합하다. • 汎用性이 있다.	• 적용대상에 한계가 있어 정래의 발전을 바라기가 곤란하다. • 領域전체의 電位分布를 구하기가 곤란하다.	• 領域전체의 電位分布나 磁束分布를 구하기가 곤란하다. • 電界解析이나 磁界解析에 좋다.

을 주어 푸는 통상적인 方法에서 발생하는 誤差를 없애기 위하여, 解析領域의 境界에 線要素를 導入하고 여기에 無限遠點까지의 Energy를 부가하여 푸는 半無限要素에 의한 解法이 開發되었다.⁵⁾

(3) 통상의 電氣機器의 磁界解析에서는 다음의 基本方程式에서 출발하여 定式化가 進行된다.^{6)~8), 32), 33)}

$$\text{rot}(\nu \text{rot } \mathbf{A}) = \mathbf{J}_0 - \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \text{grad } \phi \right) \quad (1)$$

여기서, ν 는 磁氣抵抗率, \mathbf{A} 는 磁氣Vector Potential, \mathbf{J}_0 는 磁化電流密度, σ 는 導電率, ϕ 는 電位를 나타낸다.

電氣機器는 통상 電壓의 波形이 既知인 電壓源에 접속되며, 式(1)의 \mathbf{J}_0 는 일반적으로 未知인 경우가 많다. 종래에는 \mathbf{J}_0 를 假定하여 Potential \mathbf{A} 를 計算해 왔지만, 電壓·電流 사이에는 Kirchhoff의 法則이 成立한다는 點에 착안하여 \mathbf{J}_0 도 未知數로 하여 解析하는 方法이 開發되었다. 이 方法에 따르면 Condenser形 單相誘導電動機의 解析, 二次負荷를 고려한 變壓器의 解析, 磁石의 着磁器의 解析등도 가능하게 된다.^{9)~11)}

(4) 時間從屬場의 解析에서는 式(1)의 時間微分 $\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$ 를 보통 差分近似에 의해 풀고 있지만, 非線型 周期현상일 경우에 대해서는 時間周期有限要素法이 開發되어 計算時間이 대폭 단축되었다.¹²⁾

(5) Macro要素등 여러가지 特殊要素에 의한 解法이 開發되어 可動部分을 포함한 領域의 解析에 매우 精密度를 높일 수 있게 되었다.¹³⁾

(6) Hysteresis效果를 고려한 非線型解析이 가능하게 되어 磁氣Head의 磁界解析, 變壓器鐵心の 解析등에 응용되게 되었다.¹⁴⁾

(7) 渦電流를 고려한 三次元磁界解析의 경우에 磁氣Vector Potential을 사용하면 1節點당 未知數가 4개나 되므로 非線型 解析이 용이하지 않다. 그러나 積層鐵心 등에서의 渦電流의 흐름은 二次元的이므로 式(2)와 같은 電流Vector Potential Ψ 를 사용하면 未知數의 數를 減少시킬 수 있다.¹⁵⁾

$$\mathbf{J}_e = \text{rot } \Psi \quad (2)$$

여기서 \mathbf{J}_e 는 渦電流密度이다. 渦電流가 흐르는 범위가 적지않은 解析對象에서는 이 解析方法이 매우 有效하다.

(8) 근래에 이르러 電子計算機의 記憶容量이나 演算速度가 매우 진보하였다고는 하지만, 三次元時間從屬非線型問題의 解析에는 보다 高速의 計算機와 效率的인 解法의 出現이 要求되고 있다.¹⁶⁾

2.2 電氣機器解析에의 應用

電氣機器의 設計에 있어서 絶緣耐力의 向上, 損失의 輕減, 溫度上昇의 抑制, 機械的 強度의 增加, 小形高效率, 高信賴度 등을 얻기 위하여 有限要素法 등의 數值解析技術이 이용되게 되었는데, 현재 各分野에서 행해지고 있는 研究動向을 소개하면 다음과 같다.

(1) 電界解析

電氣機器의 絶緣構造設計에 있어서 가장 重要한 것은 電界의 數值解析이며, 電界解析을 수반하지 않은 絶緣設計는 있을 수 없다고 해도 과언이 아니다. 特히 電界分布가 最適이 되는 電極 및 絶緣物의 形狀과 그 配置를 數值解析에 의해 구하는 方法의 開發은 주목할 만 하다. 靜電界 뿐만 아니라 汚損桿子등에서는 漏洩電流를 고려한 解析도 행해지고 있다. 또 Ion電流場의 解析도 이루어지고 있으며, 絶緣抵抗值가 電界 및 溫度의 函數가 되는 直流Cable에 대해서는 非線型解析이 행해지고 있다.^{17)~19)}

(2) 磁界解析

鐵心내의 磁束分布의 空間的 및 時間的 變化를 구하여, 이로부터 鐵心構造의 良否를 判定하고, 鐵損 및 勵磁電流를 計算하기 위하여, 대개의 경우 有限要素法이 사용된다. 이 때 磁束은 일반적으로 歪形波가 되고, 局部回轉磁界도 발생하므로, 이들을 고려한 Hysteresis 損 및 渦電流損의 算定이 필요하다.¹⁴⁾

大容量機에서는 漏洩磁束에 의한 局部過熱과 電磁力의 발생이 문제가 되며, 이의 解析에 각종의 數值解析法이 이용된다.

波形的 歪形, 鐵損등을 最少로 하는 磁氣回路의 設計法과 永久磁石을 포함하는 磁氣回路에

있어서 필요한 磁界를 발생시키는 永久磁石의 形狀 및 位置를 결정하는 방법등도 개발되고 있다.²⁰⁾

(3) 應力등의 解析

熱, 電磁力, 遠心力등에 의한 應力分布의 解析, 軸振動輕減을 위한 振動解析, 熱傳導, 溫度上昇, 通風, 冷却計算등이 행해지고 있으며, 油入機器用 絕緣物의 含浸過程, 濕氣의 擴散過程 등의 Simulation도 가능하다.^{21), 22), 35)}

〔3〕 各種 電氣機器의 解析

電氣機器중 가장 널리 사용되는 것은 鐵心의 磁性을 이용한 磁界形 Energy變換機器이며, 이의 이해를 위해서는 機器의 電磁界解析이 무엇보다도 선행되어야 한다. 또한 磁界解析을 위한 數值解析法으로는 有限要素法이 가장 널리 이용된다.

이에 따라 本稿에서는 有限要素法의 應用에 중점을 두고 電氣機器중에서 가장 대표적인 發電機, 電動機, 變壓器등의 電磁界解析方法에 대해 약술한다.

3.1 基本方程式^{23), 24), 32), 33), 36), 37)}

(1) 電界計算의 基本方程式

空間電荷密度 ρ 가 주어졌을 때 임의의 點에서 發散하는 電束密度 \mathbf{D} 는 電界에 대한 Gauss法則의 微分形으로 부터

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \tag{3}$$

로 주어진다. 또한 電界의 세기 \mathbf{E} 와 電束密度 \mathbf{D} 사이에는

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \tag{4}$$

의 관계가 있다. 여기서 ϵ 은 誘電率이다. 그리고 電界에 대한 Scalar Potential을 V 라 하면

$$\mathbf{E} = -\nabla V \tag{5}$$

가 성립한다.

式(4), (5)를 式(3)에 代人, 整理하면

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla V) = -\rho \tag{6}$$

와 같은 電界에 관한 非線型 Poisson方程式이 얻어지는데, 이 式(6)이 電氣機器에 있어서의 電界를 解析하기 위한 基本方程式이 된다. 그리고, 二次元解析의 경우 式(6)은

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon \frac{\partial V}{\partial y} \right) = -\rho \tag{7}$$

과 같이 整理된다.

(2) 磁界計算의 基本方程式

變位電流가 무시되는 準定常狀態에서 電流密度 \mathbf{J} 에 의해 발생되는 磁界의 세기 \mathbf{H} 는 Ampère의 法則으로 부터

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \tag{8}$$

가 된다. 그리고 磁界의 세기 \mathbf{H} 와 磁束密度 \mathbf{B} 사이에는

$$\mathbf{H} = \nu \mathbf{B} \tag{9}$$

의 관계가 있다. 여기서 ν 는 磁氣振抗率이다.

또한 Gauss의 法則으로 부터

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \tag{10}$$

이므로

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \tag{11}$$

가 되는 새로운 Vector \mathbf{A} 를 定義할 수 있다. 이를 Vector Potential이라 한다. 그런데 微小電流素로 부터 거리 R 만큼 떨어진 點의 Vector Potential \mathbf{A} 는 Biot-Savart의 法則으로 부터

$$\mathbf{A} = \frac{\mu}{4\pi} \int_{V_0} \frac{\mathbf{J}}{R} dv \tag{12}$$

가 되므로 Vector Potential \mathbf{A} 의 방향은 電流密度 \mathbf{J} 의 방향과 같음을 알 수 있다. 여기서 $\mathbf{J} dv$ 는 각각 微小體積素의 電流密度 및 體積이다. 따라서 式(8)은

$$\nabla \times \mathbf{H} = \nabla \times \nu \mathbf{B} = \nabla \times (\nu \nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J} \tag{13}$$

가 되며, 여기에 Vector公式을 적용하면

$$\nabla \times (\nu \nabla \times \mathbf{A}) = \nabla (\nu \nabla \cdot \mathbf{A}) - (\nabla \cdot \nu \nabla) \mathbf{A} = \mathbf{J} \tag{14}$$

가 된다. 또한 式(14)에 Lorentz Condition

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$$

를 적용하면

$$\nabla \cdot (\nu \nabla) \mathbf{A} = -\mathbf{J} \quad (15)$$

와 같은 磁界에 관한 非線型 Poisson 方程式이 얻어지며, 이 式이 電氣機器의 磁界解析을 위한 基本方程式이 된다. 또한 二次元解析의 경우 電流密度의 방향을 z軸방향으로 가정하고 式(15)를 整理하면

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -J \quad (16)$$

가 된다.

式(7)과 (16)을 비교해 보면 V와 A, ϵ 과 ν , ρ 와 J가 서로 대응되므로 式(16)에 의한 磁界計算過程을 式(7)에 의한 電界計算過程에 그대로 확장 적용할 수 있음을 알 수 있다.

그리고 誘導機의 경우에는 回轉子捲線에

$$\mathbf{J}_1 = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (17)$$

와 같은 誘導電流가 발생된다. 여기서 σ 는 導電率, \mathbf{v} 는 回轉子の 速度이다. 또한 電界의 세기와 磁束密度 사이에는

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (18)$$

의 관계가 있으므로

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla \times \left(-\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right)$$

즉,

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$$

가 된다. 따라서 式(17)은

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_1 &= \sigma \left(-\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} \right) \\ &= \sigma \left\{ -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) \right\} \end{aligned} \quad (19)$$

가 된다. 그런데 同期速度를 \mathbf{v}_s , slip을 s라 하면,

$$\mathbf{J}_1 = \sigma \left\{ -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + (1-s) \mathbf{v}_s \times (\nabla \times \mathbf{A}) \right\}$$

$$= \sigma \left\{ -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \mathbf{v}_s \times (\nabla \times \mathbf{A}) - s \mathbf{v}_s \times (\nabla \times \mathbf{A}) \right\} \quad (20)$$

가 된다. 式(20)의 右邊 제 1항 $\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$ 는 回轉子 靜止時 磁束密度 \mathbf{B} 의 時間的 變化에 의해 발생되는 變壓器 起電力에 의한 誘導電流이고, 제 2항 $\mathbf{v}_s \times (\nabla \times \mathbf{A})$ 는 磁束密度 \mathbf{B} 가 同期速度 \mathbf{v}_s 로 回轉할 때 回轉子捲線에 발생되는 速度起電力에 의한 誘導電流이므로 결국 이 두 電流는 같은 量이 되어

$$\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \sigma \mathbf{v}_s \times (\nabla \times \mathbf{A}) \quad (21)$$

가 된다. 따라서 式(20)은

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_1 &= -\sigma_s \mathbf{v}_s \times (\nabla \times \mathbf{A}) \\ &= -\sigma_s \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \end{aligned} \quad (22)$$

가 된다.

그러므로 誘導機解析의 경우에 있어서의 基本方程式은 固定子측에서는 式(15), 回轉子측에서는 式(22)에 의해

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial y} \right) = \sigma_s \frac{\partial A}{\partial t} \quad (23)$$

가 된다.

3.2 變分原理, Galerkin 理論과 要素 Matrix

式^{(23) - (31), (36), (37)}

(1) 變分原理

입의의 汎函數

$$\chi = \iint_R f(x, y, A, A_x, A_y) dx dy \quad (24)$$

를 고려하자. 여기서 $A = A(x, y)$, $A_x = \frac{\partial A}{\partial x}$,

$A_y = \frac{\partial A}{\partial y}$ 이다.

汎函數 χ 의 停留條件을 구하기 위해 變分을 취해 零으로 두면

$$\begin{aligned} \delta \chi &= \iint \left(\frac{\partial f}{\partial A} \delta A + \frac{\partial f}{\partial A_x} \delta A_x + \frac{\partial f}{\partial A_y} \delta A_y \right) dx dy \\ &= \iint \left[\frac{\partial f}{\partial A} \delta A - \delta A \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial f}{\partial A_x} \right) - \delta A \frac{\partial}{\partial y} \right. \end{aligned}$$

$$\left(\frac{\partial f}{\partial A_y}\right) dx dy + \iint_R \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\delta A \frac{\partial f}{\partial A_x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\delta A \frac{\partial f}{\partial A_y} \right) \right] dx dy = 0 \tag{25}$$

가 되며, 여기에 Green의 定理를 적용하면

$$\delta \chi = - \iint_R \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial f}{\partial A_x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial f}{\partial A_y} \right) - \frac{\partial f}{\partial A} \right] \delta A dx dy + \int_r \left(\frac{\partial f}{\partial A_x} \frac{\partial x}{\partial n} + \frac{\partial f}{\partial A_y} \frac{\partial y}{\partial n} \right) \delta A d\Gamma = 0 \tag{26}$$

가 된다. 여기서 P는 領域 Γ 을 둘러 싸고 있는 境界이며, n 은 境界 Γ 에서 외부로 향하는 單位法線Vector이다. 그러므로 式(26)이 성립하기 위해서는 領域 R내에서

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial f}{\partial A_x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial f}{\partial A_y} \right) - \frac{\partial f}{\partial A} = 0 \tag{27}$$

또 境界 Γ 上에서

$$\frac{\partial f}{\partial A_x} \cdot \frac{\partial x}{\partial n} + \frac{\partial f}{\partial A_y} \cdot \frac{\partial y}{\partial n} = 0 \tag{28}$$

혹은

$$\delta A = 0 \quad \text{즉 } A = \text{常數} \tag{29}$$

가 만족되어야 한다. 式(27)을 Euler-Lagrange 方程式, 式(28)을 自然境界條件, 式(29)를 固定境界條件이라 한다.

有限要素法에서는 式(15) 또는 (23)을 직접 풀지 않고 이 式을 Euler-Lagrange 方程式으로 하는 汎函數 χ 를 구하여 이를 주어진 境界條件下에서 最小化하는 A를 구한다.

(2) Galerkin 理論

Galerkin理論은 加重殘差法의 한가지로서, 有限要素法에 이를 적용하면 變分原理로 부터 구한 結果와 같은 형태의 聯立方程式을 얻을 수 있으며, 특히 汎函數가 존재하지 않거나 구하기가 까다로운 경우에 매우 有效하게 사용할 수 있다.

Galerkin理論의 概念的 原理를 살펴보자.

$$L(\phi) - f = 0 \tag{30}$$

로 표현되는 偏微分方程式의 界變數 ϕ 를

$$\bar{\phi} = \sum_{p=1}^k N_p \phi_p \tag{31}$$

로 近似化하면

$$L(\bar{\phi}) - f = R \neq 0 \tag{32}$$

가 된다. 여기서 L 은 微分演算子이며, R 은 殘差이다. 이 殘差 R 을 全解析領域 Ω 에서 零 또는 最小가 되게 하는 加重函數 W_q 를 가정하면

$$\int_{\Omega} [L(\bar{\phi}) - f] W_q d\Omega = \int_{\Omega} R \cdot W_q d\Omega = 0 \quad \text{또는 最小} \tag{33}$$

를 얻을 수 있다. Galerkin理論은 式(31)에서의 補間函數 N_q 를 加重函數 W_q 로 사용하는 方法으로서

$$\int_{\Omega} [L(\bar{\phi}) - f] N_q d\Omega = 0 \tag{34}$$

로 부터 ϕ_p 를 未知數로 하는 多元聯立方程式을 구하여 이를 푸는 方法이다.

(3) 要素Matrix式과 系方程式

解析하고자 하는 電氣機器를 모델化하여 解析領域을 要素分割한 후, 각 要素에 대해 變分原理 또는 Galerkin理論을 적용하여 要素Matrix式을 구하고 이를 全解析領域에 대해 組合하면 大次元Matrix方程式인 系方程式을 구할 수 있다.

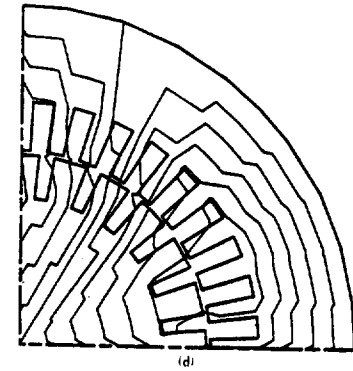
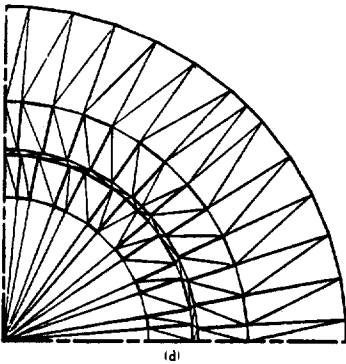
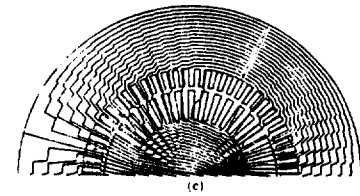
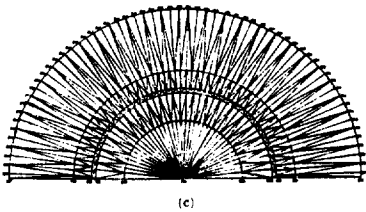
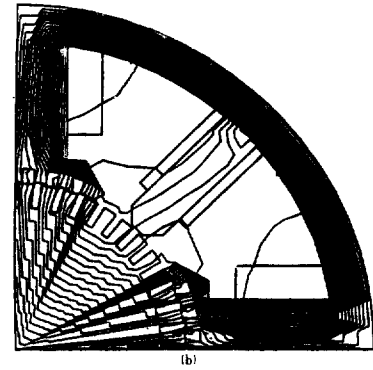
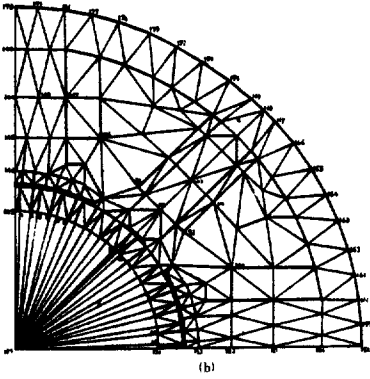
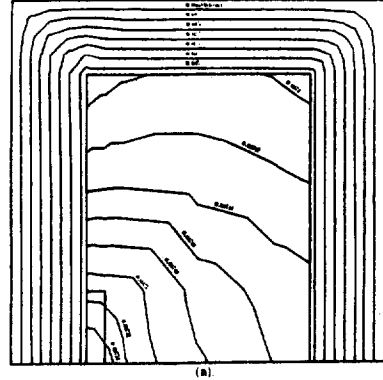
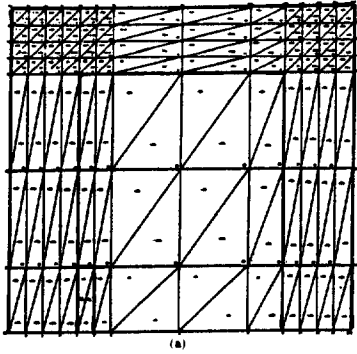
이를 電子計算機에 의해 풀어 각 節點의 Potential을 구하면 磁束分布圖등 얻고자 하는 結果를 얻어낼 수 있다.

3.3 各種 機器 모델의 解析例^{(23), (24), (30), (33)}

그림 1의 (a), (b), (c), (d)는 각각 變壓器 直流機, 同期機, 誘導機 解析 모델의 要素分割圖이며, 그림 2는 解析 結果 얻어낸 磁束分布圖이다.

4 맺음말

本稿에서는 最近의 電氣機器의 數值解析技術과 그 應用현황에 대해 약술하였는데, 이 方法들에 대한 더욱 상세한 설명이나 各 機器 모델에 대한 解析例는 各種 學會誌등에서 發表된 文獻을 참고하기 바라며, 특히 최근의 기술이나 研究동향에 대해서는 IEEE의 主觀으로 近年 개최되는 "COMPUMAG"에서 발표되는 文獻을 참고하면 될 것이다.



(a) 變壓器 (b) 直流機 (c) 同期機 (d) 誘導機

(a) 變壓器 (b) 直流機 (c) 同期機 (d) 誘導機

그림 1. 要素分割圖

그림 2. 磁束分布圖

参 考 文 献

- 1) 山村, 外, “電気工学における有限要素法,” 電気学会雑誌, Vol. 98, No. 3, pp. 161-186, 1977.
- 2) 中村, 岩本, “磁界解析法の発展と将来 1 三次元問題を中心として,” 電気学会雑誌, Vol. 104, No. 6, pp. 471-478, 1984.
- 3) 中村, 野村, “磁界計算における有限要素法と積分方程式法,” 日本応用磁気学会誌, Vol. 5, No. 5, p. 261, 1981.
- 4) 美咲, 外, “表面電荷法による一般三次元電界の一解析法とその応用,” 電気学会論文誌A, Vol. 99, No. 5, p. 200, 1981.
- 5) 中田, 外, “半無限要素を用いた開領域解析法の改良,” 電気学会全大論文集, No. 662, 1983.
- 6) M. V. K. Chari, “Finite Element Analysis of Electrical Machinery and Devices,” IEEE Trans., Vol. MAG-16, No. 5, pp. 1014-1019, 1980.
- 7) P. Silvester, et al, “Efficient Techniques for Finite Element Analysis of Electric Machines,” IEEE Trans., Vol. PAS-92, No. 4, pp. 1274-1281, 1973.
- 8) P. Silvester, M. V. K. Chari, “Finite Element Solution of Saturable Magnetic Field Problems,” IEEE Trans., Vol. PAS-89, No. 7, pp. 1642-1651, 1970.
- 9) 中田, 外, “外部電源を考慮した有限要素法による単相誘導電動機の解析,” 電気学会回轉機・静止器合同研究会資料, RM-81-40, SA-81-30, 1981.
- 10) 中田, 外, “有限要素法による磁気漏れ変圧器の磁界解析,” 第6回日本応用磁気学会学術講演会, 15AC-3, 1982.
- 11) 中田, 外, “有限要素法による磁化器の解析,” 電気学会全大論文集, No. 671, 1983.
- 12) 卯本, 外, “時間周期有限要素法による回轉機・ローナ・シールド部の電界解析 I, II,” 電気学会論文誌B, Vol. 102, No. 7, pp. 423-440, 1982.
- 13) A. A. Abdel-Razek, et al, “Conception of an Air-Gap Element for the Dynamic Analysis of the Electromagnetic Field in Electric Machines,” IEEE Trans., Vol. MAG-18, No. 2, pp. 655-659, 1982.
- 14) 中田, 外, “ヒステリシス及びわず電流を考慮した新しい磁界解析法,” 電気学会情報処理研究会資料, IP-80-9, pp. 31-41, 1980.
- 15) M. V. K. Chari, et al, “Finite Element Computation of Three-Dimensional Electrostatic and Magnetostatic Field Problems,” IEEE Trans., Vol. MAG-19, No. 6, pp. 2321-2324, 1983.
- 16) 村田, “電子計算機と有限要素法,” 日本応用磁気学会誌, Vol. 5, No. 5, p. 266, 1981.
- 17) T. Misaki, et al, “Optimization of Three-Dimensional Electrode Contour Based on Surface Charge Method and Its Application to Insulator Design,” IEEE PES Meeting, No. 82, SM462-0, 1982.
- 18) “有限要素法による電力機器の電磁界解析の現状,” 電気学会技術報告 II 部, 118号, 1981.
- 19) W. Janischewskyj, G. Gela, “Finite Element Solution for Electric Fields of Coronating DC Transmission Lines,” IEEE Trans., Vol. PAS-98, No. 3, pp. 1000-1012, 1979.
- 20) 中田, 外, “電気機器鐵心の最適設計法,” 電気学会静止器研究会資料, SA-82-41, 1982.
- 21) 電気協同研究会, “変電機器の耐震設計,” 電気協同研究, Vol. 38, No. 3, 1982.
- 22) A. F. Howe, et al, “Diffusion of Moisture through Power-Transformer Insulation,” Proc. IEE, Vol. 125, No. 10, p. 978, 1978.
- 23) 任達鎬, 金燦五, “重電機設計에 따른 電界・磁界分布 特性解析을 위한 基本理論의 適用方法,” 大韓電気協會 調査研究論文, Vol. 6, pp. 1-73, 1983.
- 24) 金燦五, “境界要素法과 有限要素法에 의한 變壓器의 磁氣的 特性解析에 관한 比較研究,” 博士学位論文, 漢陽大学校, 1985.
- 25) O. C. Zienkiewicz, “The Finite Element Method,” 3rd Edn., McGraw-Hill Book Co. (UK) Ltd., 1977.
- 26) L. J. Segerlind, “Applied Finite Element Analysis,” John Wiley & Sons, Inc., 1976.
- 27) K. H. Huebner, E. A. Thornton, “The Finite Element Method for Engineers,” 2nd Edn., John Wiley & Sons, Inc., 1982.
- 28) O. C. Zienkiewicz, K. Morgan, “Finite Elements and Approximation,” John Wiley & Sons, Inc., 1983.
- 29) J. T. Oden, “Finite Elements of Nonlinear Continua,” McGraw-Hill Book Co., Inc., 1972.

- 30) D. H. Norrie, G. deVries, "An Introduction to Finite Element Analysis," Academic Press, Inc., 1978.
- 31) B. A. Finlayson, "The Method of Weighted Residuals and Variational Principles," Academic Press, Inc., 1972.
- 32) M. V. K. Chari, P. P. Silvester, "Finite Elements in Electrical and Magnetic Field Problems," John Wiley & Sons, Inc., 1980.
- 33) 中田高義, 高橋則雄, "電気工学の有限要素法," 森北出版, 1982.
- 34) C. A. Brebbia, "The Boundary Element Method for Engineers," Pentech Press, 1978.
- 35) 戸川, "有限要素法による振動解析," サイエンス社, 1976.
- 36) M. A. Plonus, "Applied Electromagnetics," McGraw-Hill Book Co., Inc., 1978.
- 37) F. B. Hildebrand, "Advanced Calculus for Applications," 2nd Edn., Prentice-Hall, Inc., 1976.