

重電機의 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

(下)

任 達 鎬

漢陽大學校 工科學 教授



6-2 非線型 收斂方法^{21), 6), 19)~22)}

5-1節에서 구한 식(5·17)의 修正된 系方程式을 5-2節에 의해 그 解를 구하기 위해서는 行列[S']에 포함되어 있는 磁氣抵抗率에 初期值를 假定, 代入하여야 하며 이렇게 하여 구해진 解는 線型解析을 한 것으로 취급된다.

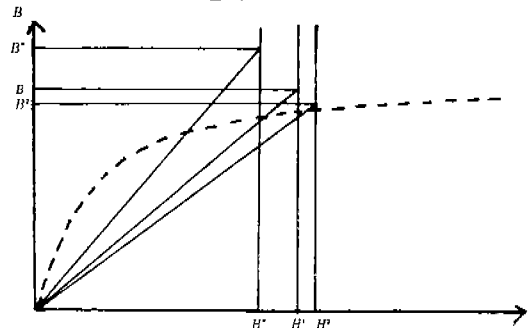
그러나 식(3·15)에 주어진 것과 같은 非線型 偏微分方程式의 正確한 解를 구하기 위해서는 線型解析만으로는 不充分하며 非線型 解析方法의 適用이 不可避하게 된다.

一般的으로 非線型 解析方法에는 直接反復法(Direct Iteration Method), Newton-Raphson法, Modified Newton-Raphson法, 微小増分法(Increment Method)³⁾ 등이 많이 使用되고 있는데, 磁氣의 非線型을 解析하는 경우에는 磁化曲線의 樣相이 特殊한 關係로 正確한 初期值를 選定하지 않으면 收斂이 되지 않고 發散하는 경우가 많기³⁾ 때문에 이 方法들을 바로 磁氣의 非線型解析에 適用하기는 困難한 點이 많다.

따라서 本 研究에서는 比較적 收斂이 빨리되고 發散하는 경우가 생기지 않는 直接收斂法(Direct Convergence Method)^{21)~22)}을 使用하여 非線型解析을 하였으며, 直接收斂法의 非線型 收斂過程은 다음과 같다.

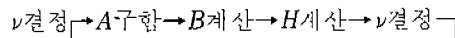
- i) 初期磁氣抵抗率(혹은 透磁率)을 決定하여 要素方程式에 代入하고 이 要素方程式들을 組合하여 系方程式을 構成한다.
- ii) 이 系方程式을 풀어서 各 節點의 벡터퍼

텐셜值를 구한다.



〈그림 6·2〉 비선형수렴과정
Fig 6·2 process of convergence

- iii) 5-3節에서와 같이 하여 벡터퍼텐셜 值로부터 各 要素에서의 磁束密度를 구한다.
 - iv) 위에서 계산된 磁束密度와 주어진 透磁率로부터 磁界強度를 計算한다.
 - v) 6-1節의 數值近似法을 使用하여 위에서 계산된 磁界強度에 相當하는 各 要素에서의 透磁率값을 다시 決定한다.
 - vi) 이 過程을 收斂限界까지 反復한다.
- 위의 過程을 順序의으로 나타내면 다음과 같다(그림6·2참조).



7. 計算處理過程

各解析 모델을 有限要素法으로 解析하기 위한 Flow Chart 및 Program List는 다음과 같다.

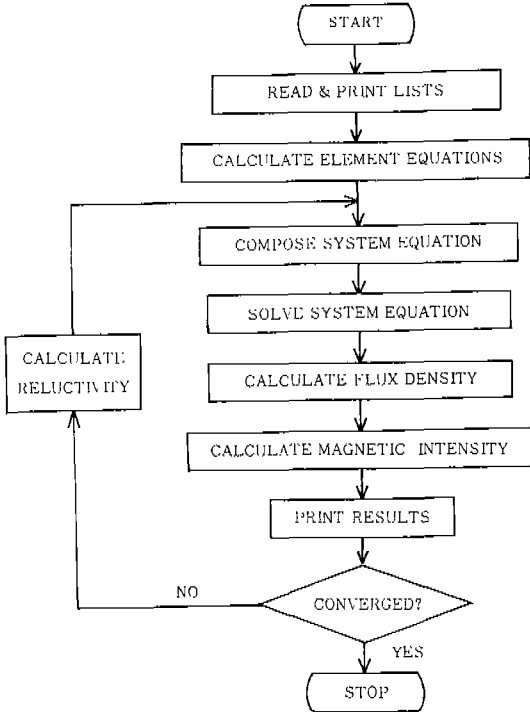
7-1 變壓器

(1) Flow Chart (그림 7-1)

(2) Program List(附錄A 参照)

變壓器의 磁束分布特性을 非線型으로 解析하기 위한 Program List는 附錄 A와 같으며 여기에 使用된 Subroutine 및 變數들을 설명하면 다음과 같다.

i) ASSEMB; 要素方程式을 계산하는 Sub-



(그림 7-1) 계산처리과정(변압기의 경우)

Fig 7-1 Flow chart (in case of transformer)

routine ELEMEQ으로부터 계산된 값들을 系方程式으로 構成하고 境界條件을 適用하는 Subroutine.

- ii) RDLIST; 주어진 入力 및 境界條件을 읽고 Print하는 Subroutine.
- iii) CALRLT; 6-1節의 數值近似法을 利用하여 磁氣抵抗率을 計算하는 Subroutine.
- iv) MATINV; 系方程式의 係數行列에 대한 逆行列을 구하는 Subroutine.
- v) RESSYM; 식(5·24)에 의하여 逆行列과 入力項으로부터 벡터퍼텐셜值를 계산하는

Subroutine.

- vi) FLXDST; 계산된 벡터퍼텐셜值로 부터 磁束密度를 구하는 Subroutine.
- vii) NPT; 解析領域내의 全 節點數를 나타내는 變數.
- viii) NPB; 幾何的 境界條件이 주어지는 節點을 除外한 節點數를 나타내는 變數.
- ix) NEL; 解析領域내의 全 要素數를 나타내는 變數.
- x) NSTG; 6-1節에서 설명한 數值近似法으로 磁化曲線을 近似하는 過程에서 磁界強度를 ΔH 로 等分割한 分割數를 나타내는 變數.

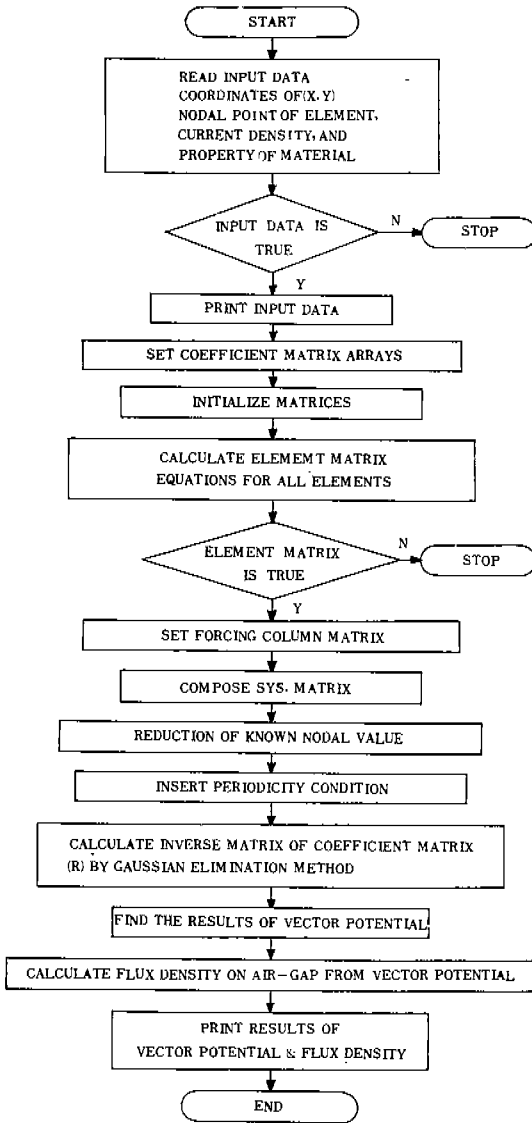
7-2 直流機, 同期機 및 誘導機

(1) Flow Chart (그림 7-2)

(2) Program List(附錄B, C, D, 参照)

回轉機에 대한 磁束分布特性을 解析하기 위한 Program List는 直流機가 附錄B에, 同期機가 附錄C에, 誘導機가 附錄D에 각각 실려 있으며 여기에 使用된 Subroutine 및 變數들은 다음과 같다.

- i) EFLIRE; 變壓器 Program에서의 RDLIST Subroutine과 같은 機能을 갖는 Subroutine.
- ii) ASSEMB; Subroutine TRIANG 으로부터 計算된 各要素方程式을 組合하여 系方程式을 構成하고 境界條件과 週期條件을 適用하여 系方程式을 修正하는 Subroutine.
- iii) CMINV; 複素數 行列의 逆行列을 구하는 Subroutine.
- iv) EFLIST; 計算된 結果值들을 Print 하는 Subroutine.
- v) NPTTOT; 變壓器 Program에서의 NPT와 같은 意味를 갖는 變數.
- vi) NPTLIB; 變壓器 Program에서의 NPB와 같은 意味를 갖는 變數.
- vii) NPTBPC; NPTLIB에서 週期條件이 成立되는 한 쪽 對稱軸上의 節點數를 배낸 變數.



(그림 7-2) 계산처리과정(회전기의 경우)
Fig 7-2 Flow chart (in case of rotating machine)

8. 計算例

8-1 變壓器

2-1節의 解析모델에서 取한 解析領域을 사용하여 그림8.1과 같은 要素分割圖를 作成하였으며, 境界條件은 $x=0$ 인 y 軸上에서는 左右가 對稱이고 入力電流密度的 方向이 反對이므로 벡터퍼텐셜값이 0이 되어 $A=0$ 로 두었으며, 外部境界에는 外部空間과 맞닿은 點으로 보아서

$A=0$ 로 놓았다. 또한 $y=0$ 인 x 軸上에서는 磁束線이 垂直이 될 것이 豫想되므로 自然境界條件인 $\partial A/\partial n=0$ 로 두었다.

入力電流密度는 $J=-1 \times 10^6$ [A/m²]로 하였고, 鉄心에서의 初期透磁率은 全 要素에 대해 $\mu=0.018$ [H/m] (比透磁率 $\mu_r=14330$; 磁界強度 100 [A/m]에서의 값)을 주었다.

以上の 入力 Data로 變壓器의 非線型 磁束分布特性을 解析한 結果, 收斂限界를 0.5[%]로 주었을 경우에서 9개의 計算으로 全 要素에서의 磁束密度값이 모두 收斂하였다.

또 非線型解析時와 線型解析時를 比較하기 위해 각각의 경우에 대한 磁束分布圖를 그렸으며 이것을 解析한 結果, 非線型解析이 線型解析의 경우 보다 훨씬 더 正確하고 合理的인 磁束分布特性이 求해진다는 것을 알 수 있었다.

線型解析時와 非線型解析時에 대한 磁束分布圖는 각각 그림8-2 및 그림8-3과 같다.

8-2 直流機

2-2節에서 選擇한 解析모델에 대한 解析領域으로부터 그림8-4와 같은 要素分割圖를 作成하였고, 境界條件으로서는 外部境界에는 幾何學的 境界條件 $A=0$ 를 주었고, x 軸과 y 軸에는 自然境界條件을 주었으며 또한 x 軸과 y 軸上的 節點들은 週期條件이 成立하는 點이 되므로 이 節點들에 대하여 週期條件을 適用하였다.

또한 入力로서는 電機子捲線에 0.875×10^6 [A/m²]을, 界子捲線에는 0.928×10^6 [A/m²]을, 補償捲線에는 0.106×10^7 [A/m²]을, 그리고 補極捲線에는 0.707×10^6 [A/m²]의 入力電流密度를 각각 주었으며 鉄心倍分에서의 透磁率은 $\mu=0.008792$ [H/m] (比透磁率 7,000)으로 하였다.

以上の 解析結果에서 그림8-5와 같은 磁束分布圖를 얻었으며 이것을 解析한 結果, 複雜한 磁氣回路 構成된 直流機의 내부에서 發生되는 磁氣的인 諸 特性을 精度 높게 解析할 수 있었으며 週期條件의 適用 結果가 正確하게 될 수 있었다.

8-3 同期機

그림2·3에 주어진 解析모델의 上部 1/2을 取하여 解析領域으로 하였으며 이것을 그림8·6과 같이 要素分割하였다.

境界條件은 外部境界에 幾何學的 境界條件을, x 軸에는 自然境界條件을 주었고, 또한 x 軸의 (-)區間과 (+)區間에 있는 節點에는 週期條件을 適用하였다.

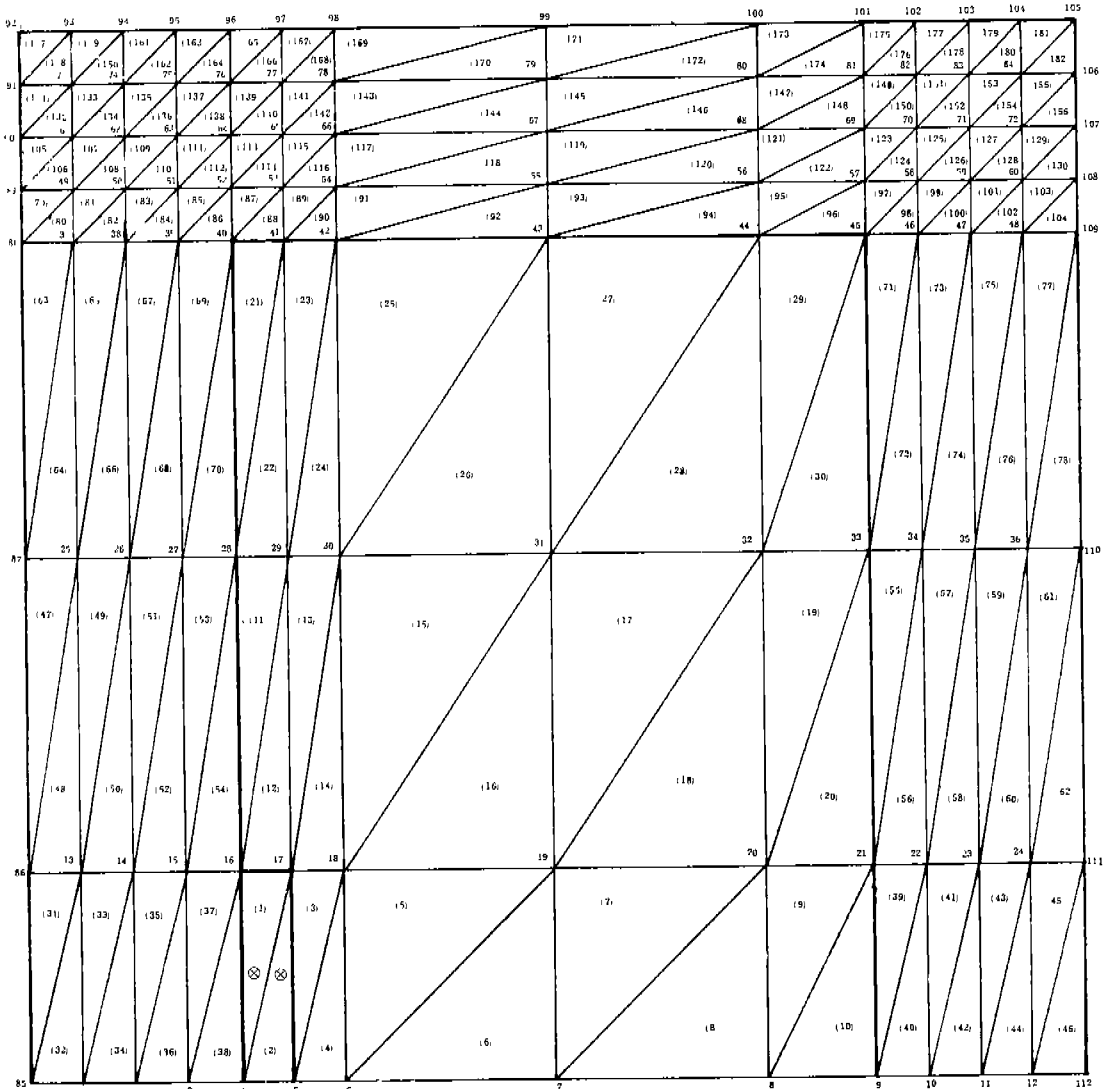
그리고 界磁의 直流 勵磁電流는 0.348×10^6 [A/m]를 주었고 電機子에는 最大値 0.161×10^6

[A/m]의 電流密度가 存在하는 것으로 보았으며 鐵心에서의 比透磁率은 $\mu_r = 7,000$ 을 주었다.

以上の 解析結果에서 그림8·7과 같은 磁束分布圖을 얻을 수 있었는데, 이것은 週期條件에 의하여 한 極分の 磁束分布가 對稱的으로 잘 分布되고 있음을 보여준다.

8-4 誘導機

그림2·4로 選擇된 解析모델에서 對稱性을 考慮한 1/4部分만을 解析領域으로 取하여 그림



〈그림 8 - 1〉 변압기의 요소분할도

Fig 8·1 Element subdivision of transformer

8·8과 같이 要素分割을 하였으며 境界條件 및 週期條件은 直流機의 경우와 같이 주었다.

또한 何定子の 入力電流密度는 2×10^4 [A/m²] 을 주었으며 鉄心에서의 比透磁率은 $\mu_r = 2,000$ 으로 하였다.

以上の 解析結果에서 그림8·9와 같은 磁分布圖를 얻었는데, 實際로 이것은 식(4·65)에서 說明한 바와 같이 時間에 따라 回轉磁界로 나타남을 알 수 있었다.

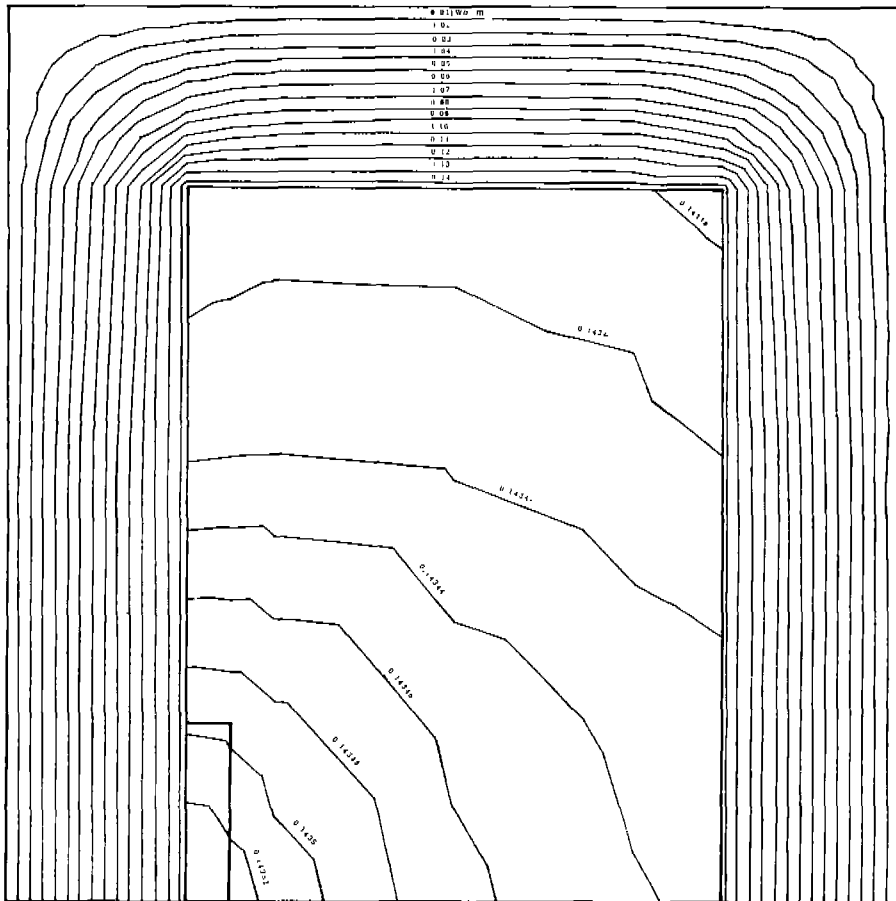
9. 結 論

本研究는 電氣機器의 電界, 磁界分布 特性을 解析하기 위하여 數値解析法의 한 方法인 有限要素法을 適用한 것으로서 電氣機器를 變壓器,

直流機, 同期機 및 誘導機로 大別하고 각각의 解析모델을 設定하여 모델方程式을 誘導하였고 이것을 근거로 하여 變分理論 및 加重殘差法을 適用하여 要素方程式을 세우고 또 이 要素方程式들을 組合하여 系方程式을 構成시켰으며 이 系方程式을 數値解析적으로 풀어서 구하고자 하는 點에서의 벡터퍼텐셜值를 계산하였다.

이 계산된 벡터퍼텐셜值를 이용하여 각 要素에서의 磁束密度를 구하였고 磁束分布樣相을 알아 보기 위해 磁束分布圖를 그려 보았다.

이러한 解析結果를 檢討해 보면, 變壓器의 경우에 適用한 非線型 解析方法은 線型으로만 解析하여 磁束分布의 樣相만을 考慮하여 오던 從來의 線型 解析方法에서보다 훨씬 더 正確한 磁束分布樣相과 磁束密度 값을 얻을 수 있었고 回



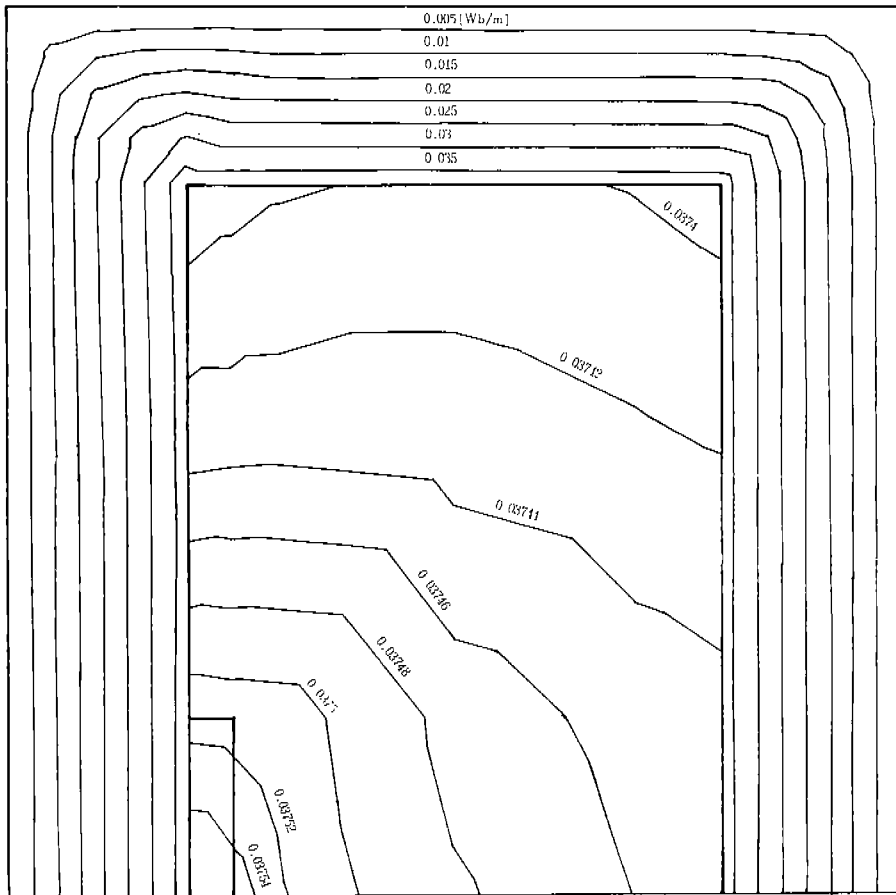
〈그림 8 - 2〉 자속분포도 (선형해석시)
Fig 8·2 Magnetic flux distribution
(in case of linear analysis)

轉機 解析의 경우에는 週期條件을 適用시켜서 全 極分을 解析하던 不合理的 點을 改善하여 對稱性이 存在하는 한 極分만을 解析함으로써 計算容量 및 時間을 節約할 수 있었다.

또한 앞으로 有限要素法의 適用方法이 水準 높게 開發되면 電動機의 發生 回轉力에 대한 計

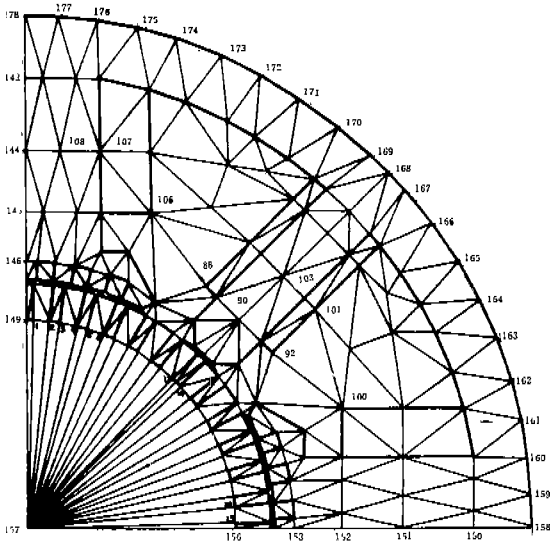
算도 可能하게 될 것이 예상되므로 電氣機器의 設計를 위한 特性解析에 있어서 有限要素法의 利用이 必須的인 것으로 생각된다.

끝으로 本研究를 위해 많은 支援을 해 주신 大韓電氣協會 會長님을 비롯한 여러 任職員들께 感謝의 말씀을 드리는 바입니다.

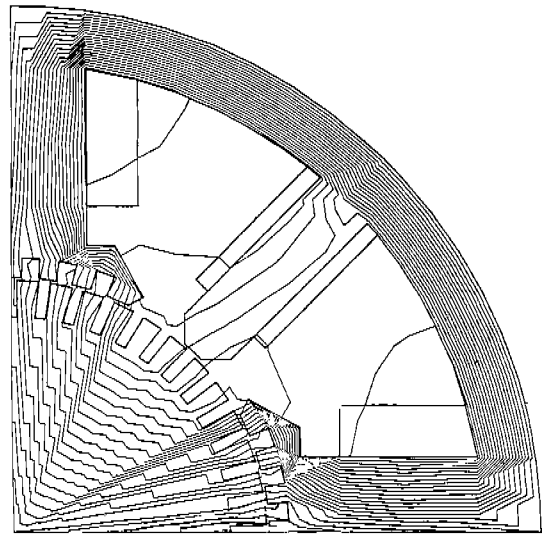


〈그림 8 - 3〉 자속분포도 (수렴시)

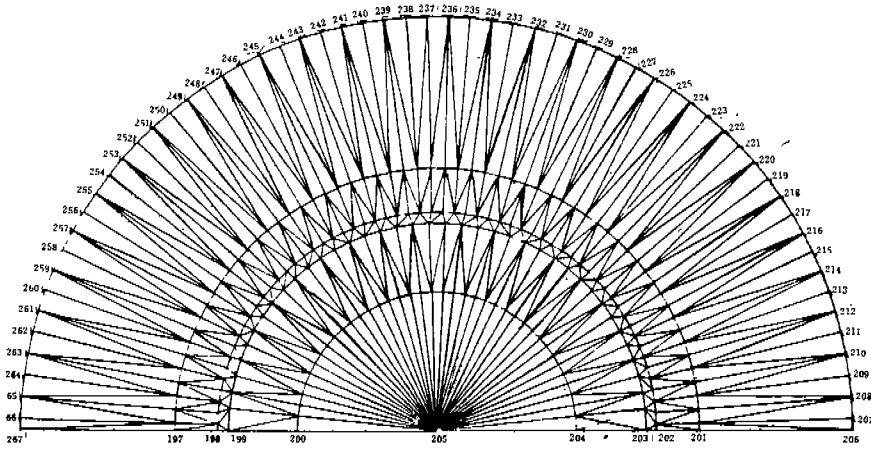
Fig 8-3 Magnetic flux distribution
(in case of convergence)



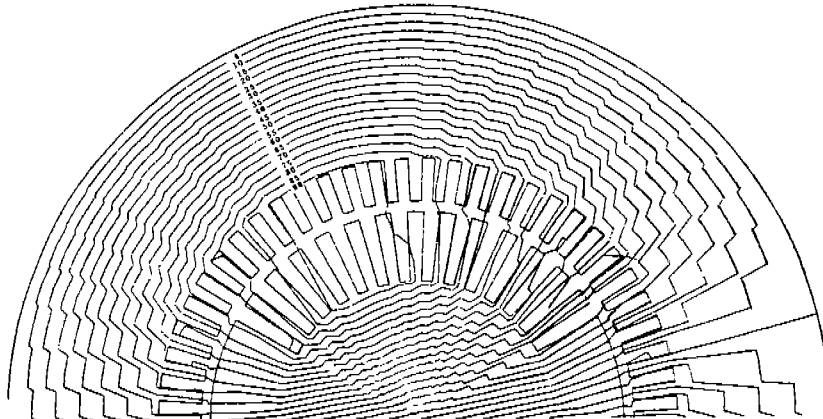
〈그림 8 - 4〉 직류기의 요소분할도
 Fig 8 - 4 Element subdivision of D.C machine



〈그림 8 - 5〉 직류기의 자속분포도
 Fig 8 - 5 Magnetic flux distribution of D.C machine

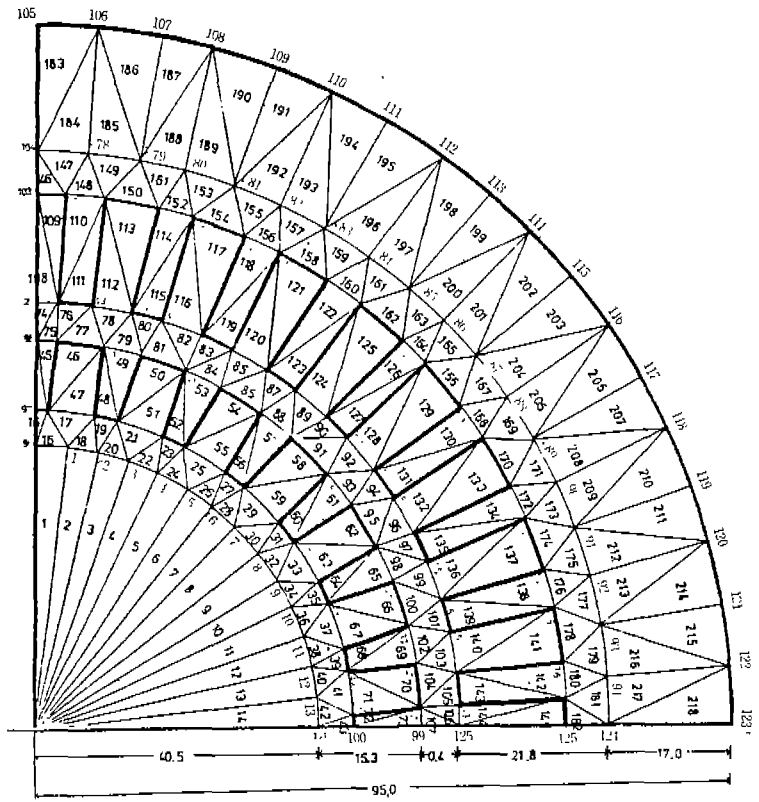


〈그림 8 - 6〉 동기기의 요소분할도
 Fig 8 - 6 Element subdivision of synchronous machine



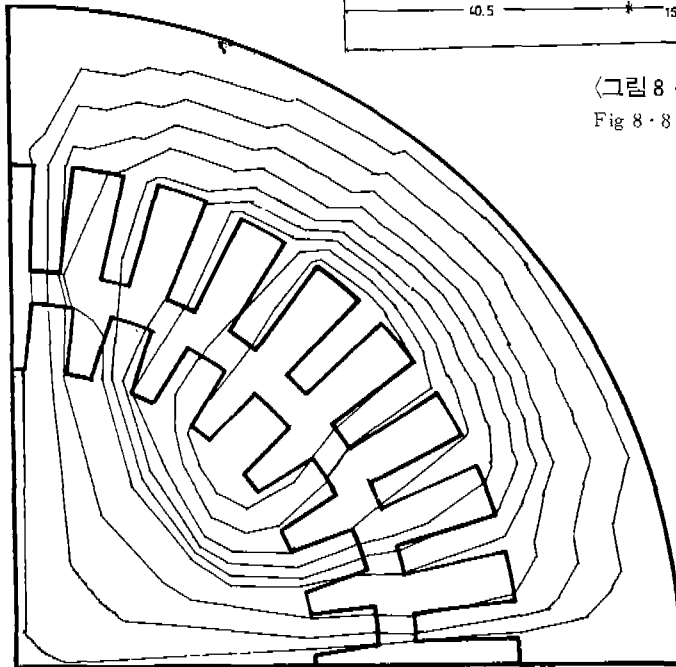
〈그림 8 - 7〉 동기기의 자속분포도

Fig 8 - 7
 Magnetic flux distribution of synchronous machine



〈그림 8 - 8〉 유도기의 요소분할도

Fig 8 · 8 Element subdivision of induction machine



〈그림 8 - 9〉 유도기의 자속분포도

Fig 8 · 9 Magnetic flux distribution of induction machine