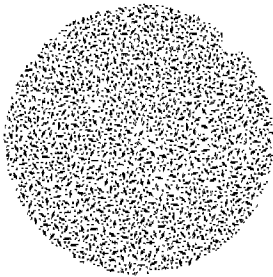


低損失CORE의 開發現況과 展望

Status and Prospect of Low-loss Core Development



安定濬

浦項綜合製鐵(株) 浦項製鐵所 副所長

金鍾九

電氣鋼板 技術課長

1. 머리말

電氣機器의 鐵心材料는 現在 Si-Steel이 主宗을 이루고 있으며 우리나라에서도 熱延板 Si-Steel 이 仁川製鐵에서 生産되어오다 1979년부터 冷間圧延板 Si-Steel 이 方向性 및 無方向性 電氣鋼板이란 이름으로 浦項製鐵에서 生産되어 왔다.

電氣鋼板은 1882년 英國의 Hadfield가 鐵鋼의 機械的性質을 研究하던中 Si添加鋼이 磁氣的性質이 改善된다는 것을 發見한 이래 研究와 開發이 활발히 進行되어 初期의 단순한 成分調整에 의한 方法에서 이제는 金屬學的인 組織 및 磁區制御의 水準까지 研究되고 있으며 한편으로는 新素材 Amorphous Metal을 利用하는 方案이 研究되고 部分的으로 是 實用化단계에 있다.

電氣鋼板의 使用은 크게 發電機 變壓器 Motor 등으로 使用되며 向後에도 MHD發電(高溫에서의 Plasma 現象利用發電) 및 直流送電(變壓器不必要) 등의 使用制限 要素가 있기는 하지만 繼續的으로 사용될 것으로 豫想되므로 鐵心材料의 現況과 어떻게 發展될 것인가를 展望해 보는 것도 意味있는 일이라 하겠다.

2. Si Steel의 開發

가. Si Steel의 歷史(要約)

鐵心材料로서 처음에는 低炭素鋼이 使用되어 오다가 앞에서 言及한 바와같이 Hadfield가 1.5% Si을 鐵鋼에 添加하여 硬度試驗을 實施하는 過程에서 磁性이 向上된다는 것을 發見하고 硅素鋼板의 本格的 研究를 시작하여 1903年 Hadfield는 美國에서 特許를 獲得하고 工業的 生産을 始作하여 熱間圧延硅素鋼板의 製造方法이 發達되었고 日本에는 1952年 技術이 提供되었다. 그러나 現在는 全世界의 으로 品質上 冷延製品에 比하여 劣勢이므로 使用이 極히 制限되어 있다.

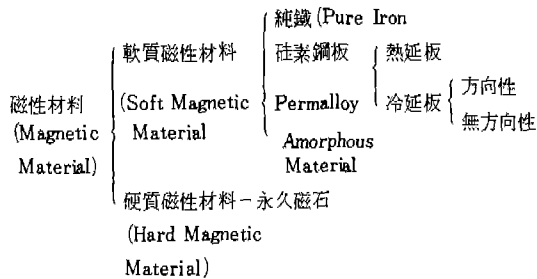
한편 1934年 美國의 Cold Metal Process Co. 의 N. P. Goss는 冷延硅素鋼板의 製造方法을 發明하여 現在 方向性 Si Steel 生産法인 Goss Process의 基礎를 確立하고 美國 Armco社를 中心으로 開發되어 왔다.

Amrco社は電氣鋼板製造技術을 1951年 美國 ALSCO社에, 1953年 美國 U.S Steel社에, 1958年 日本 八幡에 技術을 提供하였다.

그러나 日本의 NSC(新日本製鐵)는 導入한 技術을 基礎로 1968年 自體의 技術로 既存의 Si Steel 製造法을 補完하여 磁氣의 性質이 優秀한 Hi-B 製造法을 開發 美國의 Armco에 1970年 製造技術을 逆輸出하였다.

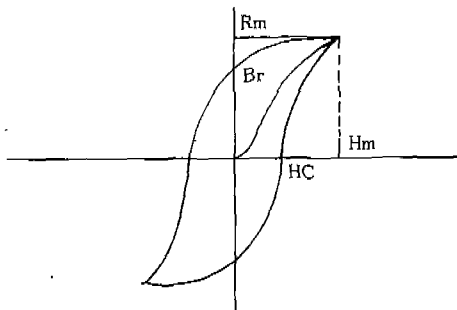
또한 1973年 KSC도 NSC와 다른 成分系를 利用 RG-H 名의 Hi-B級을 開發하였다. 現在 全世界 方向性 生産國 10個國, 生産會社 16個社는 이들 會社로 부터 技術을 導入 或은 類似方法으로 開發된 것이다.

나. 磁性 材料의 分類



위의 圖表에서 보인바와 같이 磁性材料는 永久磁石인 硬質磁性材料和 軟質磁性材料로 크게 區分되며 그림 1에서와 같이 保磁力(HC) 및 殘留磁速密度(Br)가 클수록 優秀 硬質磁性材料가 되며 反對로 Hc 및 Br이 작을수록 優秀한 軟質磁性材料가 된다.

現在 電氣鐵心 材料로서 冷延電氣鋼板이 主要 使用된다. Perm alloy는 特殊機器에 少量使用되고 있으며 우리나라에서는 10Ton/年 以內의 所要가 있는 것으로 推定된다.



(그림 - 1) Hysteresis Curve

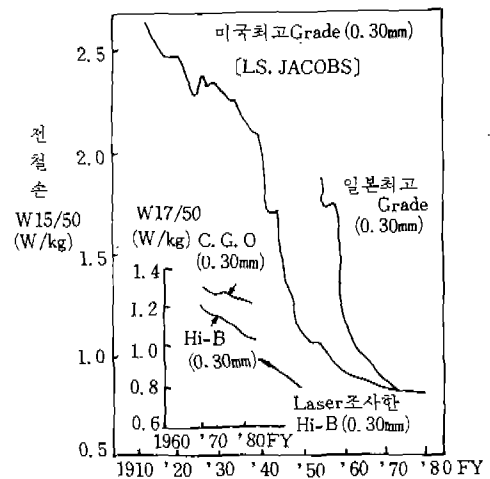
Amorphous Metal은 1950年代에 液体金屬을 10^4 °C/sec의 冷去速度로 急冷하여 非晶質 固體를 만든 것으로 鐵損이 既存方向性 對比 1/3-1/5 水準인 것으로 밝혀져 現在 Amorphous Metal을 쓴 變壓器를 試驗製作하고 있다.

다. Si Steel의 品質推移

1) 方向性的 發展

Si Steel 品質의 代表인 鐵損을 보면 그림 2에서 보는 바와같이 熱延板에서 冷延板으로 바뀌어온 1965年경까지 顯著한 減少現象이 있었으나 1960年代末 以後에는 從來 Goss製造法에 依한 方向性的 特性, 改善에는 顯著한 變革이 없었고 主로 品質安定과 實收率 向上에 努力하여 왔다.

1960年代末에서 1970年代初에는 Goss製造法 과는 別途로 NSC에서 먼저 開發한 Hi-B級 出現으로 鐵損의 變化가 있었고 1984년에는 Hi-B級에 Laser를 照射하여 한층 더 낮은 鐵損의 鐵心材料가 開發되었다.



(그림 - 2) 방향성 구조강판 철손년도별 추이

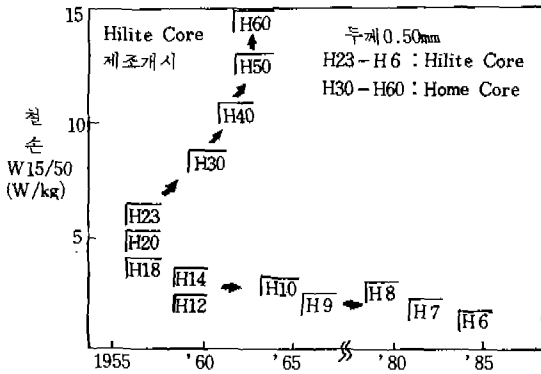
2) 無方向性的 發展

가) Grade의 擴大

無方向性 電氣鋼板은 그 利用機種도 많고 大型發電機부터 小型 Motor에 이르기까지 多種多樣하다.

日本의 NSC社를 中心으로 볼때 無方向性的 生産은 1957年の H23(S23), H20(S20), H18(S18)로 始作했지만 開發의 主要흐름은 H-6에 이르는 鐵損

低減화와 H-60에 이르는 低價格化 두 方向으로 向한 進歩로 볼 수 있으며 日本2大 業體의 하나인 KSC社도 같은 傾向이라할 수 있다. 日本에 있어서의 品質變化를 그림 3에 나타내었다.



(그림-3) NSC 무방향성 전기강판 Grade 개발추이

나) 無方向性的 開發動向

鋼板의 特定方向에 치우친 磁氣特性을 갖지 않고 어느 方向에서도 優秀한 特性이 필요한 電動機等의 回轉機鐵心 材料로서 使用되는 無方向性은 一般의 大型發電機 電動機에는 低鐵損의, 高級Grade가 使用되고 小型 Motor等에는 Torque特性等도 考慮하여 鐵損과 磁速密度의 均衡있는 Low Grade가 使用된다. 現今의 開發趨勢는 그림 3의 日本 無方向性 硅素鋼板은 品種發展歷史 같이 高級化와 低級化 즉, 陽極化가 進行中으로 大型機種에는 보다 高級의 것 小型機種에는 보다 低價의 Low Grade의 要求가 強해지고 있다.

다) 最高 Grade

大型機種用에는 보다 低鐵損의 無方向性 Si Steel의 必要性이 높아지자 NSC는 그것에 따라서 '83년 世界最高 Grade H-6 開發製造에 成功했다. 그 代表의 特性은 板두께 0.5mm로 鐵損(W15/50)=2.19W/kg 磁速密度(B50)=1.68 T이다.

3. 鐵心材料의 特徵

가. 鐵心材料에 衣한 電氣的 損失 概要

電氣는 發電所에서 發電되어 家庭 및 工場等 最

終 需要家에서 消盡될 때까지 많은 變壓器等 電氣機器를 거쳐 變換되어 使用된다. 變壓器는 대개의 경우 容量이 클수록 效率이 올라가지만 普通 98%를 上廻하며 效率의 計算은 出力量(或은 供給量 損失)을 供給量으로 나누어 計算된다.

變壓器에서의 損失은 鐵損(Iron Loss)이 全体損失의 40~50%, 銅損(Copper Loss)가 50~60%된다. 電動機도 有似하나 機械損失이 追加된다.

이 損失을 國家別로 생각하면 매우 큰 量이 되며 參考로 1982年 日本의 實績을 보면 다음과 같다.

	電力(KWH)	比率(%)
總 電 力	4,800億	100.0
送 配 電 損 失	280億	5.8
送配電銅線損失	160億	3.3
變 壓 器	120億	2.6
銅 線	60億	1.3
鐵 損	60億	1.3
工場機器鐵損	70億	1.5
家庭用機器鐵損	30億	0.6

(日本 鐵鋼新聞 '84年 資料)

나. 鐵損(Core Loss, Iron Loss)

電氣Energy가 電氣機器를 통하여 Energy 變換을 일으키는 過程에서 鐵心에 의하여 發生되는 損失로서 通常 Hysteresis Loss와 Eddy Current Loss 로 區分되며 Watt/kg으로 表示된다.

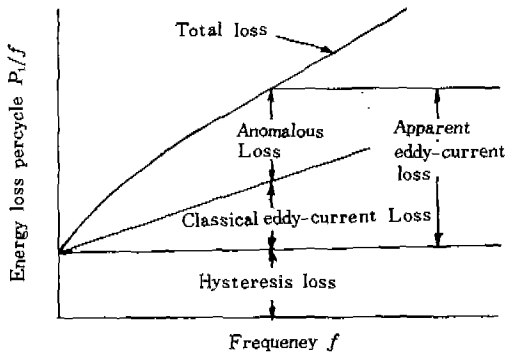
Hysteresis Loss(Wh)는 $\eta f B_m$ (η : 定數 f : 周波數 B_m : 最大 磁速密度) 或은 $\eta f A_h$ (A_h : hysteresis Loop의 넓이)로 表示되며 周波數, 磁速密度, Hysteresis Loop의 넓이와 比例하는 것으로 나타내고 있다.

Eddy Current Loss(We)는 $\frac{\pi^2 t^2 f^2 B_m^2}{6 PD}$ (t : 材料의 두께 P : 固有抵抗 D : 試料의 密度)으로 表示되어 試料의 두께와 密接한 關係가 있다.

그러나 그림 4에서와 같이 實測과 計算 사이에서 는 差異가 있으며

$$\text{Anomaly factor} = \frac{\text{實測 eddy Current Loss}}{\text{計算 eddy Current Loss}}$$

라할 때 Brailford는 1.5~3.5라고 보고 있으며 이 差異를 變則損失(Anomalous Loss)라 한다. 이러한



〈그림-4〉 철손의 개념도(변압기)

差異原因은 Hysteresis Loos와 eddy Current Loss를 人爲的으로 나누어 생각하고 또한 다음과 같은 理由에서 온것으로 알려져 있다.

1. Hysteresis Loop는 그림에서와 같은 停滯(S tatic) 狀態가 아니며 條件에 따라 變化된다.

(磁化力, 磁速密度, 時間等)

2. Hysteresis Loop는 Frequency에 依하여 一定한 것이 아니고 Frequency의 增加에 依하여 增加되는 傾向이 있다.

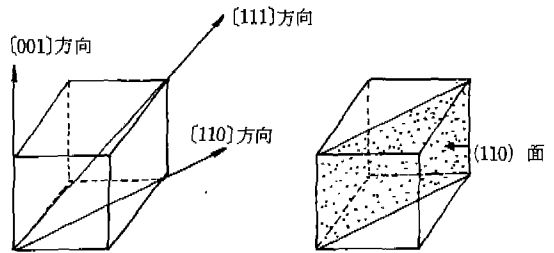
따라서 鐵損에 對한 最近의 意見은 모든 磁化에서 일어나는 損失은 Domain Wall 移動과 Magnetization Rotation과 關聯된 微小한 Eddy Current 들에 基因된 것으로 보고 있다.

다. 鐵의 磁氣 異方性

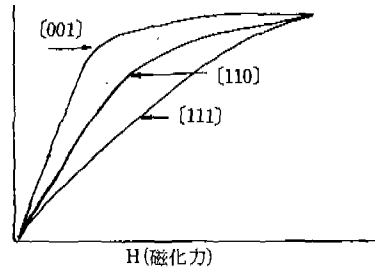
鐵과 硅素의 合金鋼은 常溫에서 鐵과 같이 體心立方格子(Bcc)이다. 鐵의 結晶은 結晶方位에 따라 磁化의 容易度가 다른 性質이 있으며 이를 磁氣異方性(Magnetic Anisotropy)이라고 부른다.

鐵의 結晶格子構造는 그림 5와 같이 되어 있으며 磁化容易順序는 {001}, {110}, {111} 順이다.

普通 硅素鋼은 Goss Texture라고 하는 (110)面에 나란하고 {001}과 같은 方向으로 一致하여 製造되고 있으며 나란한 程度를 角度로 나타내고 있다. 그러나 無方向性은 方向性과 달리 結晶格子가 一定하게 規則的으로 되어 있지 않고 Random하게 되어 있어 磁氣異方性이 없다. 따라서 使用用途가 다르며 대개의 경우 方向性은 變壓器 같은 靜止器, 無方向性은 Motor 같은 回轉機에 利用되나 設計와 Cost, 제조工程에 따라 變更使用도 하고 있다.



〈그림-5〉 鐵의 結晶格子構造



〈그림-6〉 結晶方位와 磁氣異方性

4. 現在의 鐵心材料의 開發水準

現在 鐵心材料는 Si Steel이 主宗을 이루고 있으나 Si Steel은 熱延板에서 冷延板으로 開發되면서 品質上에 현저한 發展이 있었다.

가. 方向性

變壓器에 主로 利用되고 있는 方向性은 既存方向性의 高級品 및 薄物製品이 開發되어 0.30mm에서는 G-8, 薄物로서 0.23mm까지 量產되고 있다.

또한 新鋼種인 低鐵損 高磁速密度(Hi-B級) 이 開發되어 既存方向性보다 15% 이상의 鐵損을 減少시키고 磁速密度를 向上시켰으며, 最近에는 NSC에서 Laser를 Hi-B의 表面에 注射하여 Domain를 미세하게 하여 磁氣의 特性을 改善시켜 ZDKH란 商品으로 生産하고 있다.

現在의 方向性 開發現況을 日本의 NSC 및 KSC를 中心으로 보면 표 1과 같다.

한편 變壓器用 Si Steel開發 趨勢를 보면 薄物化에 依한 鐵損減少로서 두께 0.20mm 및 0.18mm가 試驗生産中이나 아직 뚜렷한 效果는 없으며 또한 加工上의 어려움이 있다.

또한 方案으로 高 Si에 依한 損失減少는 加能하나 Si이 높을 때 現 Process로는 生産이 不可하므로

〈丑-1〉

區分	두께	NSC			KSC		
		最高規格	W17/50	B 10	最高規格	W17/50	B 10
方向性	0.23	(1.06)			R-10	1.16	1.80
	0.27	(1.18)			RGW 3		
	0.30	Z-8	1.22	1.79	RG 8	1.22	1.79
		Z-9	1.33	1.79	RG 9	1.33	1.79
Hi-B	0.20				RGH020	0.99	(1.88)
	0.23		1.00	1.89	RGH023	1.00	1.89
	0.27	Z6H	1.03	1.89	RG 6H	1.03	1.89
		Z7H	1.11	1.89	RG 7H	1.11	1.89
	0.30	Z6H	1.05	1.89	RG 6H	1.05	1.89
		Z7H	1.13	1.89	RG 7H	1.13	1.89
ZDKH	0.23	(0.85)					
	0.27	(0.93)					
	0.30	(0.97)					

() : 매표치 (기타보증치)

새로운 방법인 Strip Casting을 利用 生産하는 方法으로 試製品까지 生産되어 損失이 20~50%까지 減少되었다는 報告가 있으나 使用結果를 檢討하여 보아야할 事項이다.

磁區理論에 依한 磁區制御를 實施한 ZDKH는 熱處理가 不可하므로 大型變壓器에는 使用이 可能할 것으로 보이나 柱上變壓器에는 制限이 있으므로 改善研究가 進行되는 것으로 알려져 있다.

그러나 이 方法은 Process에 따라 效果에 差異가 있어 美國 ALSCO의 Sileperm은 Grain이 매우 크므로 效果가 있을 것으로 보며 ALSCO社에서도 研究가 進行中인 것으로 알려져 있다.

新素材로서 관심을 모으고 있는 Amorphous Magnetic Material은 各國에서 研究가 進行되고 있으며 美國 Allied Chemical社에서 600mm巾까지 開發하여 市販되고 있으나 變壓器에는 普遍化되어 있지 않으며 特殊用途에만 少量使用中인 것으로 알려져 있다.

浦項鐵製에서는 方向性은 두께 0.27mm까지 JIS規格으로는 G-9까지 世界水準의 量質의 製品을 量産하고 있으며 0.23mm는 '86年中 開發예정이다. 各工程의 電算化를 통한 統計的 分析과 工程 改善으로 品質이 繼續적으로 向上되고 있으며 특히 1987년부터는 커다란 向上이 있을 것으로 보이며 한편 Loss Evaluation에 따른 Hi-B級의 國內需要가 增加되고

있어 生産時期와 方法을 檢討中이다.

나. 無方向性

回轉機에 主로 使用되는 無方向性은 全世界의 으로 S-12부터 S-60級까지 量産되고 있으나 低級の 需要가 많고 大型回轉機는 方向性을 轉換 使用하므로 需要가 적어 高級化研究가 다소 늦어지고 있으며 需要家들은 生産Cost에 많은 관심을 가지고 있어 最近에는 美國을 中心으로 低價의 Lamination Steel에 觀心을 가지고 있다. 鐵損面에서 無方向性의 最高級으로 NSC에서 S-6까지 試驗 生産하여 成功했다는 報告가 있었으나 需要는 미비할 것으로 본다. 浦項鐵製에서는 S-9까지 開發하여 量産이 可能하며 높은 技術水準을 보이고 있다.

現在 S-10以上の 高級品을 量産하는 Maker는 世界的으로 많지 않은 것으로 알려져 있다.

無方向性은 全般的으로 低級の 需要가 많고 또한 大量 Punching하여 使用하므로 Punching性이 매우 强調되는 素材로서 適當한 Coating劑의 開發이 重要하며 Coating劑에 따른 需要의 性格이 다르다.

歐美地域에서는 Coating劑가 無機質과 有機質로 區分하여 用途別로 區分使用하고 있으나 Asia地域에서는 Punching性과 耐熱性等 用途別 區分없이 全般的으로 良好한 Coating劑를 要求하고 있다. 浦項鐵製에서도 이러한 要求에 따라 固有의 Coating劑를 開發하여 需要家에게 供給하고 있어 磁性 및 Coating 品質에서 世界的 水準을 보이고 있다.

5. 今後의 開發展望

電力用 變壓器에서는 電氣損失의 減少와 騒音의 抑制가 鐵心材料의 2大 重要課題로서 앞으로 鐵心材料가 어떻게 發展되어 갈 것인가는 素材를 生産하는 關聯者나 使用者가 公司 關心을 기지는 事項으로서 素材固有의 限界, 技術의 開發水準, Energy價格等에 依하여 關係되므로 간단히 言及할 수 없으나 現今의 趨勢에 따라 方向性 Si Steel의 薄物化와 Amorphous Material을 中心으로 發展 方向을 檢討해 본다.

가. 製品의 薄物化

方向性 Si Steel의 두께는 0.27, 0.30, 0.35mm가

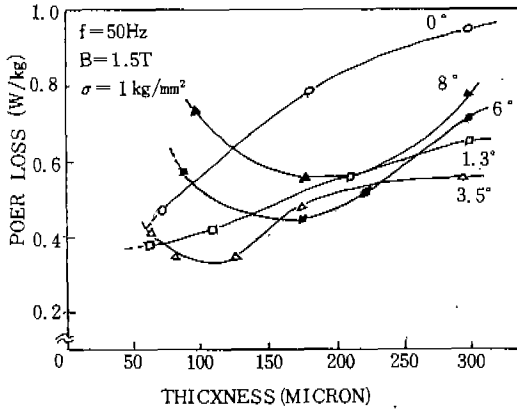
規格製品으로 生産되고 있으나 0.23mm 製品이 보편화 추세이며 日本KSC에서는 0.2mm까지 製品化되고 0.18mm 開發이 試圖되고 있다.

그러나 앞 표의 KSC 0.2mm 素材의 鐵損과 磁速密度에서 보는바와 같이 板두께의 低減에 따른 效果에 疑問이 提起되고 있기도 하다.

그러나 다른 한편에서는 高集積의 方向性 開發을 위한 結晶 方向制御技術 및 磁區制御技術로서 새로운 高性能의 硅素鋼板 生産이 可能한 것으로 研究되어 報告되고 있다.

특히 板厚를 調整하여 鐵損을 0.3mm 硅素鋼板의 1/2~1/4까지 減少시켜 Amorphous에 匹敵 할만한 素材生産이 可能함을 보여 注히을 끌고 있다.

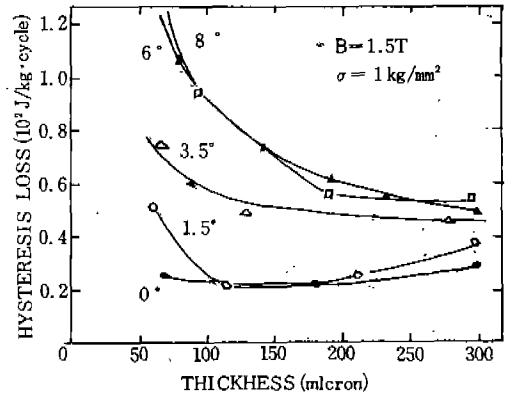
여기에 福岡工業大學의 T. Yamaguchi의 研究資料를 소개한다. 다음의 Data는 單結晶의 試料를 使用한 基礎的 研究結果로서 磁氣特性에 관련된 磁區構造와 板두께의 關聯性에 對하여 鐵損과 磁氣歪에 對하여 論했다. 그림 7에서 β 각 ($[001]$ 軸 傾斜角)이 3.5°일때 100 μ m에서 全体鐵損이 最小임을 보이고 있으며 β 角이 적을수록 板두께와 鐵損減少시킬 수 있으며 β 角 0°에서는 板두께와 比例하여 鐵損減少시킬 수 있음을 提示하고 있다.



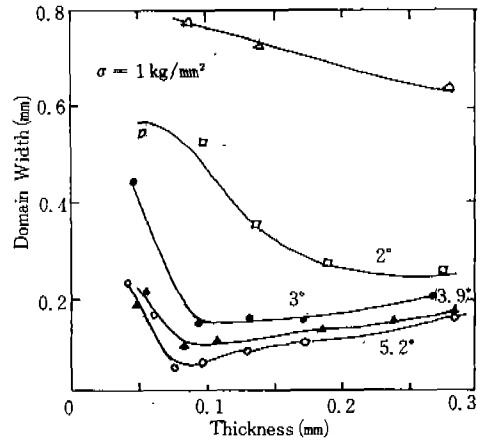
〈그림-7〉 傾斜角 β 와 損失과 板두께의 관계

그림 8에서 β 角이 클때 板두께를 줄이면 Hysteresis Loss가 커지나 β 角이 0°에 가까워지면 Hysteresis가 板두께 影響을 받지 않음을 보이고 있다.

그러나 그림 9에서 β 角 減少에 依하여 Domain幅이 커지고 β 角이 3.9° 및 5.2°에서 Domain 幅이



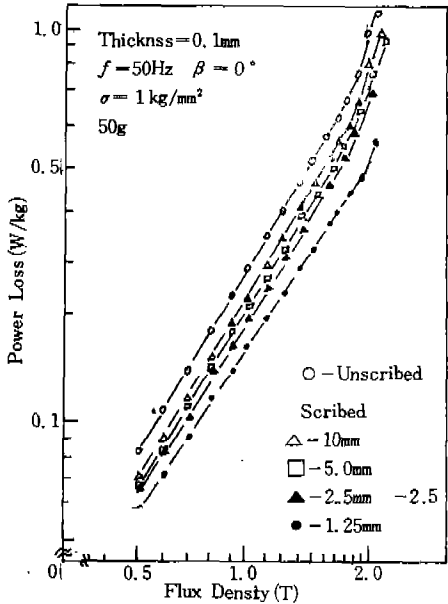
〈그림-8〉 傾斜角 β 및 Hysteresis 損失의 板두께의 관계



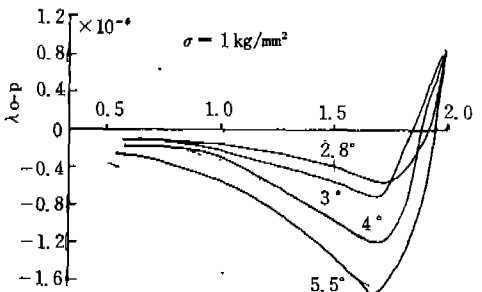
〈그림-9〉 磁區幅의 板두께

最小임을 보이고 있어 β 角이 적을 때 磁區幅이 커져서 Eddy Current Loss 增加要素가 있으므로 이의 減少方案이 考慮되어야 한다.

또한 그림 10은 0.1mm 두께의 $\beta=0$ 에 가까운 試料를 Ball Point로 Scribing을 實施한 경우 全損失과 磁速密度의 變化를 보인 것으로 Scribing 間隔이 1.25mm일 때 最低의 損失을 보이고 Scribing 荷重이 클 때는 間隔이 클 때 效果를 얻을 수 있다. Scribing시 0.1mm 두께의 β 角이 작은 試料에서 測定한 鐵損은 W15/50에서 0.28~0.30W/kg 程度로 從來의 G6H의 1/2水準으로 Amorphous Metal과 比較하여도 크게 손색이 없으며 Amorphous Metal은 1.7~1.8T의 높은 磁速密度에서 損失이 급격히 커지는 弱點이 있으나 β 角 0°의 0.1mm 試料는 高磁速



〈그림-10〉 極薄試料의 Scribe 効果

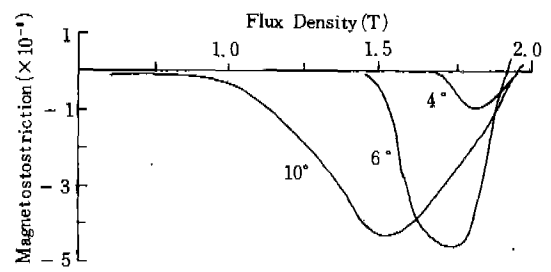


〈그림-11〉 beta角과 磁氣歪 特性

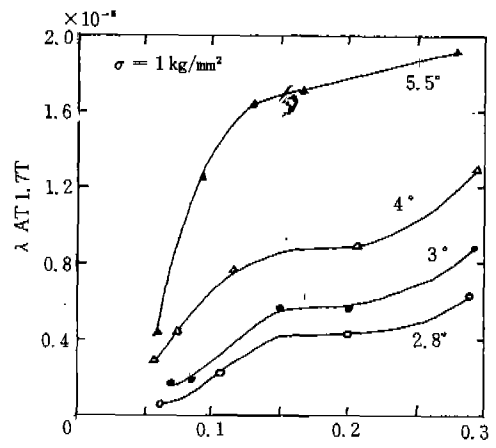
密度에서도 같은 比率의 鐵損增加를 보이고 있어 良好함을 보이고 있다. 磁氣歪와 板두께와의 關係는 (110) [001] 方向의 硅素鋼板에서 負磁歪를 나타내며 이는 磁區(Domain)의 移動에 依한 Energy 變化에 依하여 發生된 表面還流磁區의 再構成에 따른 것으로 알려져 있다. 그림11은 0.3mm 두께의 試料의 beta角과 磁歪變化率이 磁速密度에 따른 變化를 보인 것으로 beta角 即, 磁化容易側과의 角度가 작을수록 變化率이 저음을 보이고 있다.

그림12는 0.3mm試料의 alpha角([001]軸의 面回轉角)의 變化에 따른 磁歪 常數率을 보인 것으로 alpha角이 작아질수록 적어짐을 알 수 있다.

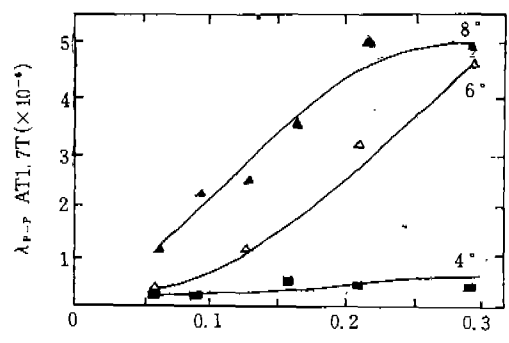
그림13은 beta角과 板두께와 磁歪의 關係를 보이고 그림14는 alpha角과 板두께와 磁歪의 關係를 보인 것으로 共히 편이각이 작을수록 磁歪가 작고 두께가 0.1mm



〈그림-12〉 alpha角과 磁歪特性



〈그림-13〉 1.7T에서 lambda와 板두께



〈그림-14〉 alpha角과 磁歪의 板두께

일 때 急激히 떨어짐을 보이고 있다.

지금까지 提示 Data로서 集積度가 높은 0.1mm 程度두께의 硅素鋼板은 Fe系 Amorphous Metal에 比較할 수 있는 低損失을 나타내고 騒音 또한 大幅改善 可能함을 보이고 있으나 과연 工業적으로 傾斜角이 극히 적고 極薄의 製品을 經濟性있게 生産할 수 있는 方法이 開發될 수 있느냐, 또한 언제 開發

될 수 있느냐가 문제가 되었고 使用方法에서 極薄의 加工方案도 開發되어야 하며 그림에서 보인바와 같이 試驗條件이 $\sigma = 1\text{kg/mm}^2$ 으로 이는 Tension Coating 인장력 0.3kg/mm^2 水準 以上으로 Tension의 維持方案도 考慮되어야함을 意味한다.

나. Amorphous Magnetic Material

Amorphous 素材는 Fe 및 必要成分이 混合된 合金을 熔融시켜 液体金屬을 急冷裝置에 依하여 $10^\circ\text{C}/\text{sec}$ 程度로 急冷하여 製造된 非晶質狀態의 片狀 薄板으로 1970年代 以前에는 非晶質金屬의 發見과 特性에 對한 研究가 主力을 이루었으나 1970年 以後에는 實用化로서 研究가 進行되고 있다. 1980年 1月에는 美國 Allied Chemical 社와 MIT의 링킹 研究所에서 最初의 非晶質 材料를 쓴 中型(15KW) 變壓器가 製作依賴되어 實用化 研究가 더욱 깊어가고 있다.

Amorphous의 特性은 新日鐵의 Takashi Sato가 쓴 Amorphous Magnetic Material을 간추려 紹介한다.

1) Amorphous의 特性

가) 磁速密度

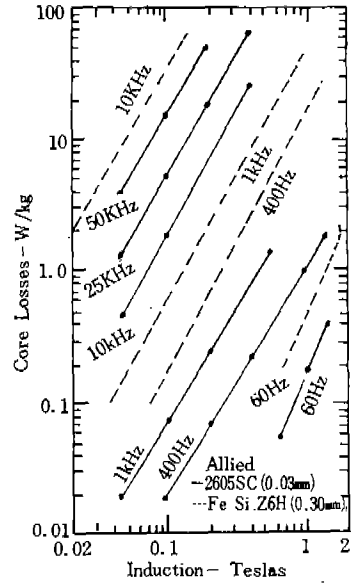
電氣機器의 小型化를 위하여 磁性材料는 높은 磁速密度가 반드시 必要하나 아래 表에서와 같이 飽和 磁速密度가 17KG 水準이며 高價의 Co가 含有되면 18.4KG 水準까지 上昇하나 經濟性 있는 成分으로 Si Steel과 같은 20KG를 얻는 것은 어려운 것으로 보인다.

구 분	BS (KG)
Fe ₈₀ B ₂₀	16.7
Fe ₈₂ Si ₄ B ₁₂	16.5
Fe ₈₄ B ₁₀ C ₆	17.0
Fe ₈₂ B ₁₃ Si _{2.5} C _{2.5}	17.0
Fe ₇₇ Co ₆ B ₈ C ₄	18.4

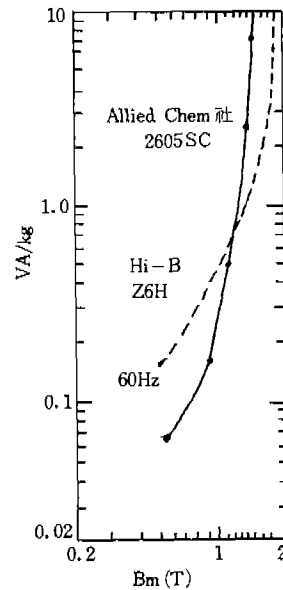
나) 鐵 損

Amorphous 材料는 Si Steel에 比하여 比抵抗이 3배나 크기 때문에 渦電流損과 Hysteresis Loss가 적다.

특히 高周波에서 현저하게 차이가 나는 것을 그



〈그림-15〉 Amorphous와 Si Steel 鋼板의 高周波 鐵損曲線



〈그림-16〉 勵磁實効 VA의 比較

림15에서 보여준다.

다) 勵磁特性

變壓器에서는 勵磁電流 낮은 것이 좋으며 全負荷 電流의 3% 以下에서 設計된다.

그림16에서 보면 Amorphous 材料는 1.4 Test 이

상에서는 基準 Si Steel보다 VA/kg값이 올라가므로 使用磁速 密度가 制限된다.

라) 磁 歪

騒音에 중요한 영향을 미치는 요인으로 飽和磁速 密度가 높은 變壓器用 材料로 期待되는 Fe系 Amorphous는 飽和磁歪整數가 높다. 製造 및 使用方法에서 研究가 필요한 分野이다.

마) 占積率

Core로서 積層했을 때 材料가 實質的으로 占하는 體積比率는 큰 것이 좋으며 0.3mm Si Steel은 0.97 이상을 保證하고 있으나 片 Roll法에 依하여 製造된 Amorphous는 0.75程度로 떨어진다. 이는 材料의 表面照度가 5 μm程度로 비교적 크기 때문이다.

앞으로 이 分野에 대한 研究가 필요하다. 表面絶緣 被膜은 큰 電氣 非抵抗으로 問題되는 것은 아니나 廣幅을 만들고 두께를 올려 높은 占積率이 되려면 飽和磁速密度를 높이는 問題와 함께 檢討되어야 할 事項이다.

바) 磁氣特性的 溫度度化

變壓器는 捲線 및 鐵心에 依하여 使用時 發熱되어 100℃까지 溫度가 上昇될 수 있다. Si Steel은 結晶質로서 Curie 溫度가 높기 때문에 이 溫度에 依하여 影響을 받지 않으나 Amorphous 材料는 急冷되어 非晶質狀態이므로 熱的으로 不安全하여 溫度가 올라가면 結晶質이 型成되어 非晶質로서의 性質을 잃게 된다. 보고된 바로는 80℃부근까지는 非抵抗이 增加되어 오히려 鐵損이 低下되나 80℃ 이상에서는 飽和磁速密度가 작아지고 鐵損이 增大 된다는 報告가 있다.

사) 加工性

Amorphous는 急冷薄板이므로 그대로는 殘留應力 때문에 充分한 磁氣特性을 얻을수 없으므로 結晶化 溫度以下에서 Anneal 하는 것이 通例이나 脆化의 危險性이 있으므로 注意하여야 하며 300℃ 이상에서 處理되는 수가 많다. 加工性은 硬度가 HV1000前後이므로 加工性에 對한 研究가 필요하다.

아) 經時變化

變壓器는 普常壽命 30年이나 現在로서 Amorphous의 特性變化를 確實히 豫測할 수 없다. 일반적으로

結晶化溫度가 높은 材料가 經時變化가 적을 것으로 생각되나 高透磁率을 나타내는 組成의 材料가 100℃ 부근에서 透磁率이 크게 低下하는 것도 있으므로 結晶化溫度만으로 評價는 곤란하고 Si添加가 좋은 影響을 주고 Carbon은 좋지않은 것으로 보고 되었다.

자) Amorphous의 經濟性

Amorphous 材料를 利用하여 變壓器를 製造時的 考慮事項은 다음과 같다.

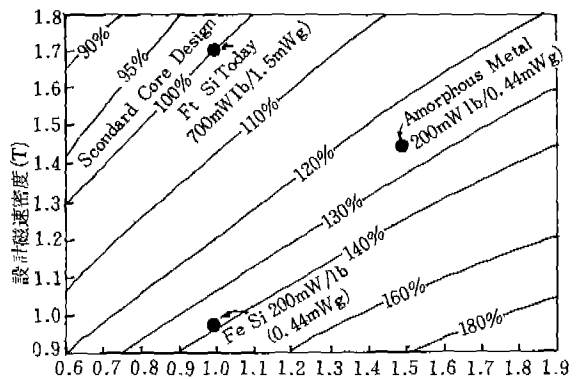
첫째, Amorphous는 飽和磁速密度가 낮기 때문에 低磁速密度에서 設計되어야 하며 이에 따라 큰 電氣機器가 되고 所要材料量도 많아진다.

둘째, Amorphous는 鐵損 낮으므로 Loss Evaluation이 適用되어야 한다.

셋째, 素材의 單價가 다르므로 이의 價格이 考慮되어야 하며 加工費 및 製作費의 差異가 고려되어야 한다.

그림17은 美國 GE의 Luborsky가 計算한 變壓器의 材料를 Amorphous와 Si Steel의 單價費의 變化에 따른 Cost를 比較한 것으로 加工費 및 製作費는 考慮되지 않았으며 Si Steel 設計 磁速密度는 1.7T를 基準으로 했다. 그림에서 두素材 價格이 같고 Amorphosu의 設計磁速密度를 1.7T로 하면 變壓器의 生産 Cost가 같음을 보이고 있으며 그러나 같은 條件에서 設計磁速密度를 0.95T로하면 Amorphous 變壓器 生産 Cost가 140%가 된다.

또한 Amorphous의 素材비가 Si Steel의 1.5배이고 設計 磁速密度가 1.4T이면 Amorphous變壓器生



(그림-17) Amorphous와 Sisteel의 Cost

產 Cost는 127%가 된다.

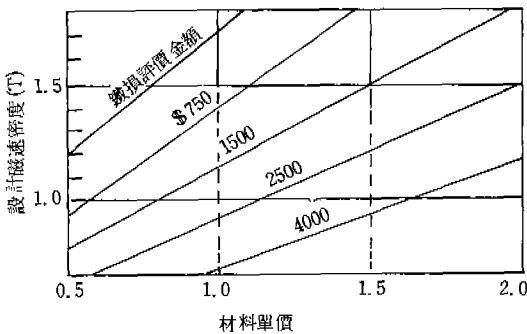
이 그림은 Loss Evaluation 개념이 없는 것으로 電力損失을 金額으로 補正한 表가 그림18으로 表示되어 있다(鐵損比는 1/3일때) 例를 들면 Loss Evaluation이 \$1500/kw 일때 Amorphous 單價가 1.5倍 設計磁速密度가 1.5T 이면 競爭力이 있는 것을 나타낸다.

참고로 各國의 Loss Evaluation을 보면 아래와 같다.

損失評價金額表 (USD/kw)

需要家	Loss Evaluation			備考
	No Load Loss	Load Loss	Aux Loss	
Malaysia	3580	1420	1860	'84年實積
Thailand	4220	2230	2230	
Chile	3200	2560	-	
Bangladesh	2250	1010	1010	
Philippine	2100	1600	650	
South Africa	2040	1350	-	
Pakistan	1200	720	720	

(需要家 詳細名은 省略)



〈그림-18〉 Loss Evaluation을 감안한 Amorphous와 Sisteel의 Cost比較

Amorphous 材料가 大型變壓器에의 實用化 問題에는 技術的 經濟的 問題外에 위에서 言及한 Amorphous 自體的 原理的 限界가 있으므로 簡單히 말할 수 없으나 問題들이 하나씩 解決되고 있으므로 상당한 部分이 Amorphous로 使用될 것으로 생각된다.

다. 向後展望

低鐵損 鐵心材料 改善 및 發展方向은 지금까지 檢討한 바와같이 3가지 主要흐름으로 나누어 볼 수 있다.

○既存 Si Steel의 極薄物化, 集積度의 向上, 磁區의 制御等에 依한 高級化

○Amorphous Magnetic Material (非晶質 磁性材料)의 實用化

○Strip Casting 技術을 利用 冷間壓延 不可能한 High Silicon 添加 Si Steel 開發等으로 要約될 수 있으며 이 外에도 그 方向性 Si Steel의 開發도 部分的으로 研究되고 있다.

그러나 지금까지 言及된 事項은 모두 現在 研究 進行되고 있는 것으로서 아직은 開發段階이며 어느 것이 主要 材料가 될지는 판단하기 어려우나 構造的인 各製造法에 對한 品質과 Cost의 限界, Energy의 價格 技術開發速度等 여러 變數가 作用될 것이며 各材料의 長短點이 있으므로 서로 用途에 따라 相互補完的으로 使用될 것으로 생각된다. *

