

地中電力케이블에 近接한 支持物の 鐵損에 관한 研究

(A Study Iron Losses On the Cable Racks adjacent to Under Ground Power Cable)

全勝九* · 金玟鴻**

(Sung-Koo Cheon · Ki-Hong Kim)

요 약

本 研究는 地中電力케이블 주변의 磁性體로 이루어지는 構造物의 鐵損에 대해서 研究하였다. 케이블 支持臺의 材質을 Fe, FRP, SUS로 바꾸어 Epstein法에 의해서 鐵損을 測定하여 渦流損과 Hysteresis損을 각각 比較計算하였다. 이 結果는 供給電壓이 一定하면 Hysteresis損은 周波數의 0.6乘에 反比例 하였고, 最大磁束密度를 一定하게하고, 周波數를 60[Hz]에서 50[Hz]로 變경하던 鐵損은 약 0.806倍가 되었다.

Fe의 경우, Hysteresis損은 全體損失의 約 70[%]이상 되었으며 “Loss program”을 利用하여 計算한 結果 SUS가 Fe보다 약 90[%]이상 鐵損이 減少하였고 計算結果도 SUS, FRP는 “0”에 가까웠다.

Abstract

This paper is described on the eddy current for a peripheral magnetic objects of under ground power cable.

The materials of cable rack is used FRP and SUS in the place of iron. Each specimen were measured for eddy current loss and Hysteresis loss by Epstein's method. The results is compared each other. Hysteresis loss is inversely proportional to $f^{0.6}$ of frequency as supply voltage is constant. Also, iron loss is increased to 0.86 times for varinace of frequency from 60[Hz] to 50[Hz] as a maxium flux density is constant.

In the case of Fe, Hysteresis loss is above 70[%] of total iron loss. In the other hand, SUS is decreased to 90[%] of Fe. by the simmulation results using Loss Program Package. The iron loss of materials SUS, FRP is near zeor by Epstein's method.

1. 序 論

地中電力케이블 周邊의 行거(rack), 앵글서포트(angle support)등 磁性體로 이루어지는 構造

*正會員：大田産業大學校 電氣工學科 教授

**正會員：韓國電力公社 課長

接受日字：1996年 4月 24日

物에 있어서 渦電流(eddy current)에 의한 損失이 發生하여 電力損失의 增加, 溫度上昇, 冷却 등의 問題가 發生하는 경우, 케이블 支持臺의 鐵損增加에 의한 發熱로 케이블에 나쁜 영향을 줄 뿐만 아니라, 電力損失의 發生에 의한 送電費用上昇을 초래하게 된다.

鐵損이 發生될 수 있는 부분에는 맨홀(man hole), 電力溝, 橋梁添加部分, 터널 등 여러가지 경우가 있다.

鐵損을 줄이는 方法에는 케이블配列(float, triangular, trefoil)에 의한 方法, 케이블 支持臺의 材質을 非磁性體로 바꾸는 方法 등이 있다.

本 研究에서는 非磁性體인 SUS(stainless steel), FRP(fibre grass reinforced plastics)의 鐵損을 엡스타인裝置를 이용하여 測定해 보았고, 또 Fe의 鐵損을 測定하여 渦流損과 히스테리시스損을 각각 比較하여 보았다.

특히 橋梁添加部分에서 發生될 수 있는 鐵損研究에 많은 도움이 되리라 본다.

2. 鐵損計算

2.1 基本理論

研究에 適用되는 理論은 케이블 導體電流에 의한 渦電流로 인하여 支持臺에서 發生하는 鐵損을 計算하기 위한 理論과 鐵損을 測定하기 위한 理論으로서, 實際 鐵損이 發生되는 部分은, "Skin depth"理論에 의하면 導體表面에서 發生되는 損失로 볼 수 있으며 이 效果는 고주파 일수록 導體의 導電率 및 透磁率에 클수록 심하다. 表皮效果에 의한 導體內의 電流 또는 磁束分布는 表面에서의 깊이에 대해 指數函數의 形式으로 減少되므로, 導體의 導電率 및 透磁率을 각각 $\sigma[\Omega/m]$, $\mu[H/m]$, 周波數를 f 라 하고, 表面 電流值의 $e^{-1}=0.368$ 배로 減少되는 깊이를 $\delta[m]$ 라 하면

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} [m]$$

로 주어지며, 이를 表皮두께 또는 浸透깊이(skin depth)라 한다.⁵⁾

그러므로 渦電流損을 解析하는데는 磁束을 表皮深度의 깊이까지 均一하게 分布한다고 가정하

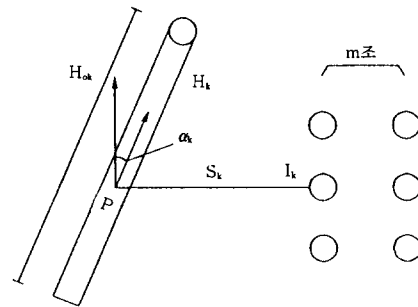
고 計算한다.

2.2 鐵損의 理論展開

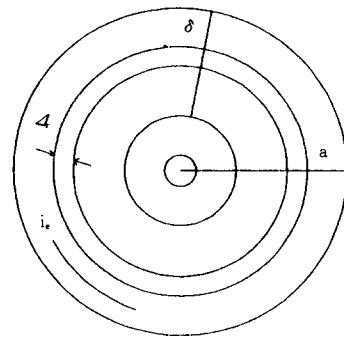
2.2.1 電力케이블과 直交하는 支持臺의 渦電流損失

1) 케이블과 直交하는 圓形鐵筋의 渦電流損失
케이블 支持臺에서 發生하는 渦電流에 의한 損失은 케이블과 直交하는 支持臺 부분이 가장크며 대부분을 차지한다. 本 理論에서는 圓形鐵筋의 예를 들어 說明하고자 한다. 電力케이블과 直交하는 圓形鐵筋의 渦電流損失解析은, 그림 1(a)에서 m 條의 電力 케이블중 K 번째의 電流 $I_k[A]$ 에 의한 P 점 內部的 磁界는 鐵筋이 그 直徑에 비해서 충분히 긴 경우에는 그 점의 外部磁界와 같다고 보던 된다.

따라서 P 점의 鐵筋 길이 方向成分 磁界의 세기 H_k 는



(a) 鐵筋의 配置



(b) 鐵筋의 斷面

그림 1. 鐵筋의 配置와 斷面
Fig. 1. Configuration and cross-section of iron rod near power cables

$$H_k = H_{\alpha k} \cos \alpha_k = \frac{I_k}{2\pi S_k} \cos \alpha_k \quad (1)$$

또, m條의 電力케이블에 의한 内部磁界의 鐵筋길이 方向成分 H는 다음 式(2)와 같이 된다.

$$H = \sum_{k=1}^m H_k = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^m \frac{I_k}{S_k} \cos \alpha_k \quad (2)$$

여기서, α_k : H_k 와 $H_{\alpha k}$ 의 각도

S_k : P점과 케이블과의 이격거리

I_k : 임의의 케이블에 흐르는 電流

따라서 鐵筋의 길이를 l이라 할 때 鐵筋의 渦流損 W_e 는 다음 式(3)과 같이 된다. ^{1)~7)}

$$W_e = G \int_0^l H^2 dx \quad (3)$$

2) 電力케이블과 直交하는 鋼材중의 渦電流損失

위 式(3)에서 G를 鋼材의 形狀係數(space factor)라 하며 이를 다른 形狀(float bar, angle)에 適用하는 경우, 즉 길이가 짧은 鋼材에 적용하는 경우 一般의 磁界속의 鋼材斷面에 發生하는 磁性的 作用에 의해 内部磁界가 減少한다.

예를 들면 外部磁界를 H_0 라 할 때, 鋼材内部의 磁界 H_i 는 반드시 外部磁界보다 작아져서 H_0 와 H_i 사이에는 다음 關係가 成立한다.

$$H_i = \eta H_0 \quad (4)$$

여기서 η 는 減磁係數로서, $0 < \eta < 1$ 이고 길이가 짧을수록 작아진다.

2.3 鐵損測定 理論

鐵心內의 磁束이 變化하는 경우, 鐵心에는 히스테리시스손과 渦流損 즉 鐵損이 생기고, 그림

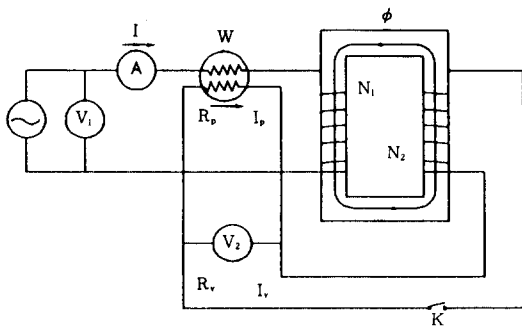


그림 2. 鐵損測定回路
Fig. 2. Measure iron loss

2에서 電力計의 指示 P는

$$P = \frac{V_2}{E_1} \{ P_i + \frac{V_2^2}{R_p} + \frac{V_2^2}{R_v} + (\frac{V_2}{R_p} + \frac{V_2}{R_v})^2 R_2 \}$$

가 된다.

여기서, R_p : 電力計의 電壓코일 抵抗

R_v : 電壓計 V_2 의 抵抗

R_2 : 2차 코일 N_2 의 抵抗

2차 코일의 電流는 적으므로, 2차 코일 중의 임피던스降下를 E_2 에 비하여 무시하면, $V_2 \approx E_2$ 로 되고, $V_2/E_1 = E_2/E_1 = N_2/N_1$ 이므로 鐵損 P_i 는

$$P_i = \frac{N_1}{N_2} P - \{ \frac{V_2^2}{R_p} + \frac{V_2^2}{R_v} + (\frac{V_2}{R_p} + \frac{V_2}{R_v})^2 R_2 \}$$

實際로 2차 코일중의 銅損 $\{ (V_2/R_p) + (V_2/R_v) \}^2 R_2$ 는 적으므로 이것을 무시하면

$$P_i = \frac{N_1}{N_2} P - V_2^2 \left(\frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_v} \right)$$

$N_1 = N_2$ 로 감으면 鐵損 P_i 는 다음式과 같이된다.

^{8)~12)}

$$P_i = P - \left(\frac{V_2^2}{R_p} + \frac{V_2^2}{R_v} \right)$$

2.4 鐵損計算

2.4.1 鐵損計算

1) 鐵損計算을 위하여 “Loss program”을 開發하였으며 既存值와 比較計算한 結果는 表1, 表2와 같다.

2) Fe 및 非磁性體인 SUS, Al, FRP에 대한 鐵損의 電流變化, 距離變化는 그림 3, 그림 4와 같다.

表 1. 鐵損計算 (f : 50)

Table 1. Calculated iron losses (f : 50)



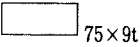
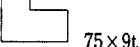
形狀 \ 鐵損(w) \ 距離	0.1(m)	0.2(m)	0.3(m)	0.4(m)	0.5(m)
i=1500(A)					
 75×9t	43.38	16.72	8.21	4.53	2.69
$\rho=20.04(\text{Fe})$					
i=1470(A)					
 75×9t	72.84	28.08	13.79	7.61	4.53
$\rho=17.71(\text{Fe})$					

表 2. 鐵損計算 (f : 60)

Table 2. Calculated iron losses (f : 60)

形狀 \ 鐵損(w) \ 距離	0.1(m)	0.2(m)	0.3(m)	0.4(m)	0.5(m)
i=1500(A)					
 75×9t	2.01	1.11	0.77	0.59	0.46
$\rho=20.04(\text{Fe})$					
i=1470(A)					
 75×9t	5.42	3.02	2.10	1.59	1.26
$\rho=17.71(\text{Fe})$					

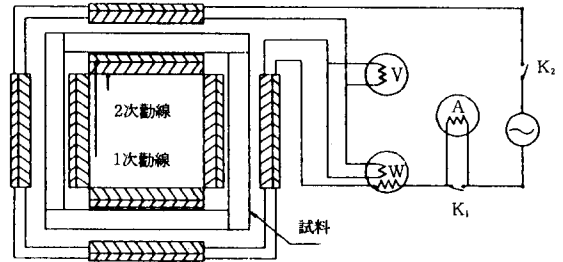


그림 5. 엡스타인 장치

Fig. 5. Measure of Epstein apparatus

3. 鐵損測定

鐵損測定實驗에는 電氣的方法과 熱的方法이 있으며, 電氣的方法으로는 實負荷線路에서 測定하는 方法과 別途의 試料를 만들어서 測定하는 電力計法, 엡스타인(Epstein)法, 交流부리지法 電位差計法, 등이 있으나 本 論文에서는 엡스타인裝置法에 의해서 鐵損을 比較測定하였다.

3.1 모델選定 및 鐵損測定

3.1.1 모델選定

鐵損을 測定하기 위하여 그림과 같은 엡스타인裝置를 만들었다. 코일은 1次, 2次 捲線數를 各 各 150回로 하여 4개를 만들어 600回로 하였다. 試料는 7t×50×250(mm)를 基準으로 하여, Fe, FRP, SUS 등 3種類를 測定하였으며 渦電流를 分類하기 위하여 60[Hz]와 50[Hz]의 交流電壓을 인가하여 鐵損을 測定하였다.

3.1.2 渦流損과 히스테리시스損의 分離計算

엡스타인裝置로 測定한 鐵損을 渦流損과 히스테리시스損으로 分類하는 式은 다음과 같다.⁸⁾

周波數 f_1 일 때의 鐵損을 P_1 , f_2 일 때의 鐵損을 P_2 라 하면

$$P_1 = P_{e1} - P_{h1}$$

$$P_2 = P_{e2} - P_{h2}$$

이다 여기서, P_{e1} , P_{e2} , P_{h1} , P_{h2} 는 周波數 f_1 , f_2 에서의 渦流損과 히스테리시스損이다.

그런데,

$$\frac{P_{e1}}{P_{e2}} = \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2 \quad \therefore P_{e2} = P_{e1} \left(\frac{f_2}{f_1}\right)^2$$

Variation of current and iron losses

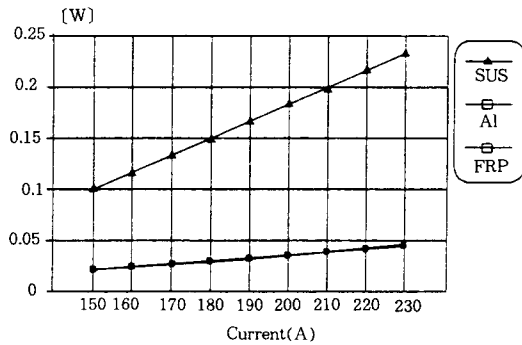


그림 3. 電流對 鐵損變化

Fig. 3. Variation of current and iron losses

Variation of distance and iron losses

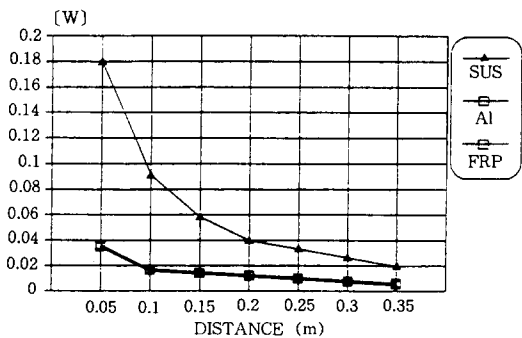


그림 4. 捲線距離對 鐵損變化

Fig. 4. Variation of distance and iron losses

2.4.2 鐵損變化率

電流變化和 距離變化에 대한 鐵損變化를 그래프로 나타내면 그림 3 그림 4와 같다.

$$\frac{P_{h1}}{P_{h2}} = \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2 \quad \therefore P_{h2} = P_{h1} \left(\frac{f_2}{f_1}\right)^2$$

$$P_{a1} = \frac{f_1(P_2 - f_2 P_1)}{f_2(f_2 - f_1)}, \quad P_{h1} = \frac{f_2^2 P_1 - f_1^2 P_2}{f_2(f_2 - f_1)}$$

$$\therefore P_1 = P_{a1} + P_{h1} \quad P_2 = P_{a2} \left(\frac{f_2}{f_1}\right)^2 + P_{h1} \left(\frac{f_2}{f_1}\right)$$

이 된다.

이다. 이 두 式에서

3.2 測定 結果

表 3. 鐵損測定結果(1)

Table 3. Measure iron loss results in racks(1) (B_m : 一定)

電 壓 60Hz	分離計算(60Hz)			分離計算(50Hz)		
	鐵損[W]	渦流損[W]	히스테리損	鐵損[W]	渦流損[W]	히스테리損
7.20	3.770	1.15	2.62	2.980	0.81	2.17
11.25	9.063	0.70	8.36	7.452	0.50	6.95
15.20	15.737	5.01	10.72	12.412	3.51	8.90
18.94	24.443	7.19	17.26	19.362	5.04	14.33
22.94	34.710	1.77	32.94	28.667	1.29	27.38
26.27	48.420	10.34	38.08	38.987	7.27	31.63
29.65	63.020	18.90	44.12	49.867	13.24	36.63

表 4. 鐵損測定結果(2)

Table 4. Measure iron loss results in racks(2) (E_1 : 一定)

電 壓 E_1	測定鐵損(60Hz)[W]				測定鐵損(50Hz)[W]		
	1回	2回	3回	平均	1回	2回	平均
10	3.00	3.00	2.50	2.83	3.00	3.00	3.00
15	7.00	7.50	7.53	7.33	7.50	7.50	7.50
20	11.50	12.00	12.50	12.00	12.50	12.50	12.50
25	19.00	19.10	17.50	18.53	20.00	19.00	19.50
30	26.50	27.50	27.50	27.17	30.00	27.50	28.75
35	37.50	37.50	37.50	37.50	39.50	38.50	39.00
40	47.50	50.00	47.50	47.50	50.00	50.00	50.00
45	60.00	62.50	60.00	60.83	62.50	62.50	62.50
50	72.50	74.50	72.50	73.17	75.00	74.50	74.75

4. 測定結果 考察

4.1 鐵損測定 結果의 比較(1)

{(電壓一定, 周波數 60[Hz], 50[Hz])}

1) 히스테리시스損은 單位體積마다 ^{12~13)}

$$P_h = \eta f B_m^{1.6} = \eta \cdot f \left(\frac{E_1}{4.44 f N A} \right)^{1.6} = k_1 E_1^{1.6} f^{-0.6}$$

$$\text{여기서, } k_1 = \eta \left(\frac{1}{4.44 f N A} \right)^{1.6}$$

즉, 1次供給電壓이 一定하면 周波數의 0.6乘에 反比例(-0.6乘에 比例)한다.

2) 渦流損은 單位 體積마다 ^{12~13)}

$$P_e = \frac{\pi^2}{6\rho} (t f B_m)^2 = \frac{(\pi t f)^2}{6\rho} \left(\frac{E_1}{4.44 f N A} \right) = k_2 E_1$$

$$\text{여기서 } k_2 = \frac{\pi^2}{6\rho} t^2 \left(\frac{E_1}{4.44 f N A} \right)^2$$

그러므로, 渦流損은 周波數 變動에 관계 없이 一定하다.

3) 周波數를 60[Hz]에서, 50[Hz]로 變更하면 스테리시스損은 f의 0.6승에 反比例하므로 $\left(\frac{60}{50}\right)^{0.6} = 1.115$ 배로 된다.

一般的으로 히스테리시스損은 全鐵損의 70[%]水準이므로, $30 + 70 \times 1.115 = 108$ [%] 즉 鐵損은 1.08배가 된다.

4) 測定結果도 表 4 및 그림 6에서 1.04배가 됨을 알 수 있다.

表 5. 鐵損測定結果(3)

Table 5. Measure iron loss results in racks(3)
(I₂: 一定)

電流(I ₂)	測定電壓(2次)		測定鐵損	
	(f: 60) [V]	(f: 50) [V]	(f: 60)[W]	(f: 50)[W]
0.66	6.2	6.00	3.90	3.00
0.90	10.7	9.40	8.30	7.50
1.29	16.1	12.75	17.30	12.50
1.42	17.7	15.85	21.10	19.50
1.76	21.8	19.10	32.30	28.75
2.13	25.7	21.95	45.80	39.00
2.37	27.1	24.75	51.10	50.00
2.70	31.2	27.50	70.50	62.50

表 6. 鐵損測定結果(4)

Table 6. Measure iron loss results in racks(4)
(E₂: 一定)

2次 電壓(60[Hz] SUS)				測定鐵損(60[Hz] SUS)			
1回	2回	3回	平均	1回	2回	3回	平均
1.0	0.9	1.0	0.97	0.01	0.02	0.03	0.02
1.2	1.2	1.2	1.2	0.02	0.03	0.05	0.03
1.4	1.4	1.4	1.4	0.04	0.05	0.06	0.05
1.6	1.6	1.7	1.63	0.06	0.05	0.07	0.06

表 7. 鐵損測定結果(5)

Table 7. Measure iron loss results in racks(5)
(E₂: 一定)

2次 電壓(60[Hz] FRP)				測定鐵損(60[Hz] FRP)			
1回	2回	3回	平均	1回	2回	3回	平均
0.97	0.91	0.90	0.93	0.00	0.00	0.00	0.00
1.17	1.10	1.14	1.14	0.00	0.00	0.00	0.00
1.41	1.35	1.36	1.37	0.00	0.00	0.00	0.00
1.5	1.47	1.50	1.49	0.00	0.00	0.00	0.00

4.2 鐵損測定 結果의 比較(2)

{最大磁束密度를 一定值로 하기 위해 (電壓→1.2배, 周波數 60[Hz]→50[Hz])}

1) 計算結果^{14)~15)}

$B_m = \frac{E_1}{4.44fNA}$ 에서 $B_m = B_m'$ 라고하면 히스테리시스損은

$$P_h = \eta f B_m^{1.6} = \eta f \left(\frac{E_1}{4.44fNA} \right)^{1.6}$$

$$= k E_1^{1.6} f^{-0.6} = k \frac{(0.633)^{1.6}}{(0.833)^{0.6}} = k(0.833)$$

철손은 0.833배가 되고

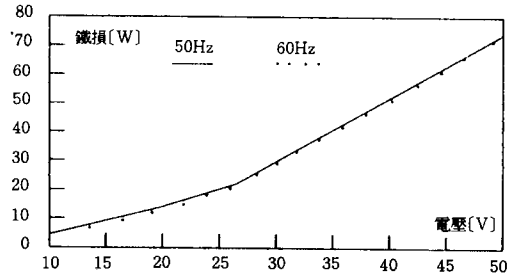


그림 6. 周波數對 鐵損
Fig. 6. Frequency and iron loss

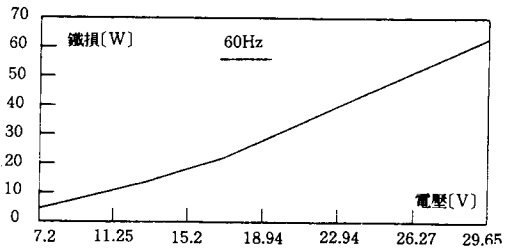


그림 7. 2次 電壓對 鐵損(60Hz)
Fig. 7. 2th voltage and iron loss

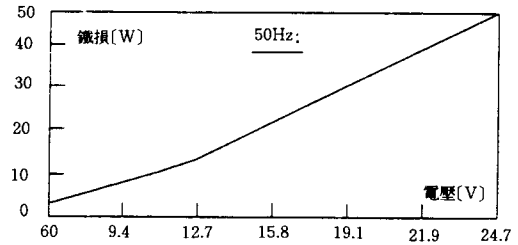


그림 8. 2次 電壓對 鐵損(50Hz)
Fig. 8. 2th voltage and iron loss

2) 測定結果도 表 3 및 그림 7, 그림 8에서 0.806배가 됨을 알 수 있다.

4.3 非磁性體의 損失測定

表 3, 表 4에서 SUS와 FRP의 損失은 測定結果 거의 "0"에 가까웠다.

5. 結論

本 研究에서는 地中電力 케이블의 支持臺에서

發生하는 鐵損을 計算한 結果值와 엠프스타인 裝置로 測定한 結果를 比較 考察하였다.

“Loss program”을 이용하여 計算한 結果도 SUS가 Fe 보다 90[%]이상 鐵損이 減少하였고 測定結果도 SUS, FRP는 “0”에 가까웠으며¹⁶⁾, 供給電壓이 一定한 경우 히스테리시스損은 周波數의 0.6乘에 反比例(渦流損은 一定)하므로 철손은 60[Hz]가 50[Hz]에 비해 1.08배 였으나 測定結果는 약 1.04배가 되었다.(表 4).

最大磁束密度를 一定하게 하고, 周波數를 60 [Hz]에서 50[Hz]로 變更하면 鐵損은 0.833배 였으나 測定結果는 0.806배가 되었다.(表 3).

60[Hz]에서의 鐵損을 渦流損과 히스테리시스損으로 分離한 結果 (表 4) 히스테리시스損은 全體損失의 약 70[%] 이상을 차지하였다.

따라서, 맨홀, 電力溝 등에서는, 渦流損에 의한 損失을, 橋梁添加 部分에서는 渦流損보다는 히스테리시스損에 대한 減少對策을 講究해야만 電力損失을 줄 일수 있다. SUS, FRP 등은 損失電力의 輕減, 맨홀, 電力溝內的 冷却效果面에서 經濟的이지만 Fe에 比하여 價格이 높아 不利한 點이 있다.

그러나 送電電壓의 上昇, 地中線路의 大容量化, 長距離化 등으로 長期間에 따른 經濟性을 綜合的으로 考慮한다면 Fe에 비해 損失을 輕減시킬 수 있는 效果가 있어 持續的인 研究로 實用化할 必要가 있을 것으로 생각한다.

* 本 論文은 大田産業大學校 期成會學術研究造 成費 支援 研究論文임

參 考 文 獻

- 1) T. Ueno, H.Takagi,外, “Iron Losses in Cable Supports and members of Tunnels adjacent to large Power Transmission Cables”, IEEE Transactions on Power Delivery, July 1987, pp. 577~583.
- 2) “A study on the calculation method of and allowable current for underground cables”韓國電力公社 技術研究院(研究報告) 1991. 1, pp.396~412.
- 3) “Electromagnetic Induced Iron Loss in Articles adjacent to Power Cables in Tunnels”, H. Nakagawa, S.Miyazaki, H.Ohno, 大日 日本電線時報 第69號, pp. 29~31, 1983. 7
- 4) 中川秀之, “洞道內電力 케이블周邊金物の電磁誘導損失について”·日本電氣學會全國大會, 1983.7, pp.29~30
- 5) 禹亨曠, “應用電磁氣學”, 清文閣, 1982. pp.145~148.
- 6) 石田 雪夫, “洞道鐵筋의 鐵損測定 とその理論解析”, 日本 電氣學會全國大會, 1976. pp. 1409~1410.
- 7) 宮崎 進 外, “케이블受材로스의 計算法 について”日本 電氣學會全國大會, 1980, pp.1446.
- 8) 李載仁, 黃熙隆 共著, 電氣計測, 東逸出版社. pp.286 ~293.
- 9) 李柱根 著, 電氣計測, 東明社, 1989. pp.295~298.
- 10) 尹基邦東, 趙康錫, 電氣電子計測, 普文堂, 1993. pp. 154~156.
- 11) 金相眞, 尹錫武, 電氣電子計測, 研學社, 1993. pp.187 ~190.
- 12) 電氣磁氣, 東逸出版社 檢定研究會, 1992. pp.375
- 13) 李允鍾, 新編電氣機械 東明社, 1981. pp.130~131
- 14) 權喜榮編著, 標準電氣機械 1993. pp.14~28
- 15) 全勝九, 鄭然澤 共著, 最新電氣機器, 東逸出版社, 1982. pp.258~259
- 16) 全勝九, 金玗鴻, 154kW 地中電力케이블 RACKS의 鐵損에 대한 考察, 大田産業大學校 論文集 第11卷 第2輯 A篇, 1994. pp.77~90.

◇ 著 者 紹 介 ◇



전 승 구(全勝九)

1931年 9月 5日生. 1954年 漢陽工 科大學 電氣工學科 卒業. 1977年 明 知大學 大學院 電氣工學科 卒業(碩 士). 1963年 大田工業高等專門學校 電氣科 教授. 1978年 大田工業專門大學 電氣科 教授. 1984~現在 大田産業大學校 電氣工學科 教授.



김 기 홍(金玗鴻)

1952年 1月 20日生. 1992年 放送通 信大學 電子計算學科 卒業. 1994年 大田産業大學校 産業大學院 電氣工 學科 卒業(碩士). 現在 韓國 電力公 社 南大田 電力所 變電課長.