

# AC Solenoid 電磁石과 DC Solenoid 電磁石의 吸引力比較에 關한 研究

李 成 稷 · 盧 彰 注

## A Study on the Comparison of Attracting Force of AC Solenoid Coil with that of DC Solenoid Coil

Sung-Bok Lee, Chang-Joo Noh

目 次	
Abstract	3.1 實驗裝置
1. 序 論	3.2 實驗方法
2. 理 論	4. 實驗結果 및 檢討
2.1 電磁石의 吸引力	5. 結 論
2.2 直流電磁石과 交流電磁石의 吸引力比較	參考 文献
3. 實 驗	

### Abstract

Nowadays, various types of electromagnets are used for diverse purposes in industrial factories and even in residences. There are two methods of exciting the electromagnets: one is the method by DC currents and the other by AC currents. Generally, AC currents are used for small size magnets and DC currents for large size.

In this paper, the authors examined theoretically the magnitudes of currents and wattage to yield some attracting forces on small size electromagnet without shading coil when excited by AC and DC currents.

The electromagnet used in the experiments is that for electric lock used for gate of residence. The results of the experiments are as follows: the required amount of AC amperage and wattage are larger than those of DC amperage and wattage for the same attracting forces and the deviation of the amount of amperage and wattage between AC and DC excitation is considerably increased according to the increase of attracting force.

### 1. 序 論

電磁石을 利用한 各種機器는 小形에서 大形에 이르기까지 그 種類도 多樣하거나 應用範圍도 넓다. 이들은 AC 또는 DC 電流를 利用하는데 大型電磁石은 主로 DC 電流를 利用하지만 小型電磁石은 AC 電流를 많이 利用하고 있다. 大型에 AC 電流를 利用하면 振動問題도 있고 損失과 力率問題가 있기 때문이라고 알려져 있다. 一般的으로 電源은 AC를 얻기 容易하지만 DC는 AC에서 整流해야하거나 아니면 特別히 DC電源이 있어야 한다는 不便이 있어 AC電磁石은 多少의 결함을 갖고 있지만 小形에서는 AC電磁石을 利用하고 있다. AC電磁石은 振動을 同伴하므로 이를 억제 하기 위하여 磁極端에 shading coil을 設置하는 것이다. 그런데 小形인 境遇 특히 家庭用인 경우는 shading coil도 없는 電磁石이 大門의 빗장用으로 製作되어 市販되고 있는데 이것들의 構造를 보면 電磁力를 利用한 製品으로서는 粗雜스럽게 만들어져 있지만 널리 사용되고 있으므로 AC와 DC電流에 對한 吸引力의 크기를 比較하고 同一 吸引力을 發生 하는데 電流의 比, 消耗電力의 比等을 檢討하고자 하는 바이다.

研究方法으로는 電磁石의 一般吸引力에서 本 實驗對象에 對한 吸引力式을 推定하고 여기에 AC 또는 DC電流가 흐를 때, 吸引力의 크기와 理論的消耗電力을 檢討하고 實驗에서 얻어진 값과 比較하여 理論의 타당성과 어느 程度 DC電流가 有利한가를 檢討 해 보았다.

### 2. 理 論

#### 2.1 電磁石의 吸引力

그림 1(a)와 같은 電磁石은 R과 L의 直列回路로서 그 等價回路는 (b)와 같다. 이 回路에 電壓 v를 加하고 t 秒後에 있어서의 電流를 i로 하면 다음과 같은 energy關係式이 成立한다.

$$\int_0^t v i dt = \int_0^t i^2 R dt + \int_0^t L i di \dots\dots\dots(1)$$

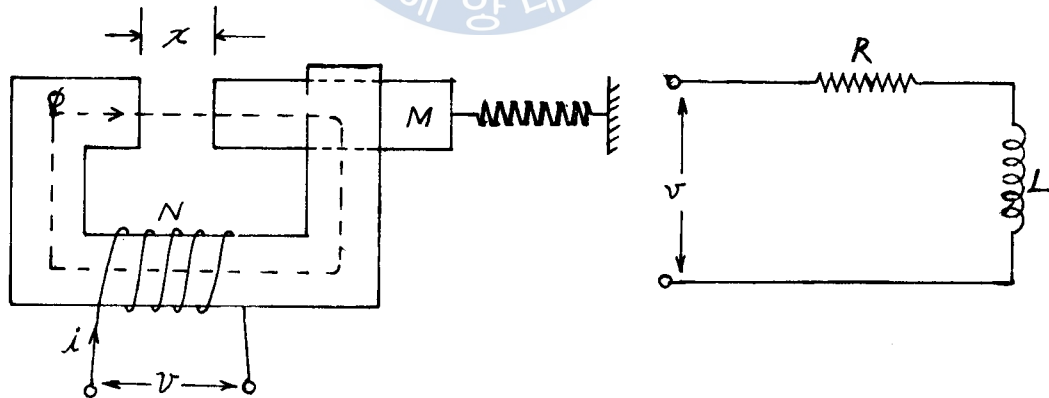


Fig1. Typical Electromagnet and its Equivalent Circuit

式(1)에 있어서 左邊은 供給에너지이고 右邊의 第1項은 熱로 消費되는 에너지, 右邊의 第2項은 周圍磁界中에 蓄積된 電磁에너지이다. 이 電磁에너지를  $W_m$ 으로 表示하면 다음과 같이 된다.

$$W_m = \int_0^i L i di = \frac{1}{2} L i^2$$

一般的으로 電流  $i$  일 때의 電磁에너지  $W_m$ 은 다음과 같이 表示할 수 있다.

$$W_m = \frac{1}{2} Li^2 = \frac{1}{2} (Ni)^2 P = \frac{1}{2} \phi^2 R \quad \dots\dots\dots(2)$$

但  $\phi$ 는 磁束이고  $P$  및  $R$ 은 電磁石 空隙의 Permeance 및 磁氣抵抗으로서,  $P = \frac{\mu_0 A}{x}$ ,  $R = \frac{x}{\mu_0 A}$ 로 되며 空隙의 길이  $x$ 의 函數이다. 但  $A$ 는 空隙磁路의 斷面積이고  $\mu_0$ 는 眞空透磁率이다. 그런데 直流電磁石에 있어서는

$W_m = \frac{1}{2} (Ni)^2 P$ 를 取하면  $W_m$ 은  $i$ ,  $x$ 의 函數로 되고 吸引力은 다음과 같이 된다.

$$F = \frac{d}{dx} W_m(i, x) = \frac{1}{2} (Ni)^2 \frac{dP(x)}{dx} \quad \dots\dots\dots(3)$$

交流電磁石에 있어서는  $W_m = \frac{1}{2} \phi^2 R$ 를 取하면  $W_m$ 이  $\phi$ ,  $x$ 의 函數로 되고 吸引力은 다음과 같이 된다.

$$F = -\frac{d}{dx} W_m(\phi, x) = -\frac{1}{2} \phi^2 \frac{dR(x)}{dx} \quad \dots\dots\dots(4)$$

그런데 (3)式과 (4)式은 結果가 같은 값으로 되므로 交流電磁石의 境遇라도 (3)式의 結果를 利用할 수 있다. 因此로 電磁石의 吸引力은 交流, 直流 共히 다음 式을 利用할 수 있다.

$$F = \frac{1}{2} (Ni)^2 \frac{dP(x)}{dx} = -\frac{1}{2} (Ni)^2 \frac{\mu_0 A}{x^2} \quad \dots\dots\dots(5)$$

힘이 負로 表示되는 것은 Fig.1에서  $x$ 를 取하는 方向과 反對方向으로 힘이 作用함을 意味한다. 以上은 空隙을 除外하고는 磁路는 全部 鐵部로 된 境遇인데 이 論文에서 吸引力試驗에 使用한 電磁石은 그림 3과 같이 풀런저 以外에는 磁路에 鐵部가 없으며 이 境遇에는 電磁石外部磁路의 磁氣抵抗을  $R_0$ 로 하면 全磁氣抵抗  $R(x)$ 는 다음과 같이 된다.

$$R(x) = R_0 + \frac{x}{\mu_0 A} = \frac{\mu_0 R_0 A + x}{\mu_0 A}$$

$$\therefore P(x) = \frac{\mu_0 A}{\mu_0 R_0 A + x} \quad \therefore \frac{dP(x)}{dx} = -\frac{\mu_0 A}{(\mu_0 R_0 A + x)^2}$$

$$\therefore F = -\frac{1}{2} (Ni)^2 \frac{\mu_0 A}{(\mu_0 R_0 A + x)^2} \quad \dots\dots\dots(6)$$

따라서 그림과 같은 供試電磁石에 있어서는

$$F = -\frac{1}{2} (Ni)^2 \frac{\mu_0 A}{(\mu_0 R_0 A + l - s)^2} \quad \dots\dots\dots(7)$$

但,  $l$ 은 솔레노이드코일의 길이이고  $s$ 는 솔레노이드코일内部空隙에 있어서 풀런저의 進入距離 即 變位이다.

## 2.2 直流電磁石과 交流電磁石의 吸引力比較

交流  $i = \sqrt{2} I \sin \omega t$ 가 通하고 있을 때 鐵損을 無視하면 電磁石周圍磁界에 蓄積된 電磁에너지는

$$W_m = \frac{1}{2} Li^2 = \frac{1}{2} LI^2 (1 - \cos 2\omega t)$$

로 되고 그 平均值는  $\frac{1}{2} LI^2$ 으로 되어 直流  $I$ 가 通하고 있을 때와 같고 또 直流일 때의 吸引力  $F_d$  및 交流일 때의 吸引力  $F_a$ 는 各各

$$F_a = -\frac{1}{2}(NI)^2 \frac{\mu_0 A}{(\mu_0 R_0 A + l - s)^2}$$

$$F_a = -\frac{1}{2}(NI)^2 \frac{\mu_0 A}{(\mu_0 R_0 A + l - s)^2} (1 - \cos 2\omega t)$$

로 되고  $F_a$ 는 供給電壓周波數의 2倍 周波數로 零에서 最大值까지의 넓은 振幅으로 振動을 하나 그 平均值는  $F_a$ 와 같다. 그러므로 交流電磁石에 있어서는 可動鐵片이 吸着時에 振動을 하여 騒音을 發生하므로 이것을 防止하기 爲하여 極片에 Shading Coil를 끼우는데 이 때에는 이 코일의 電流로 因한 에너지의 損失이 생긴다.

鐵損을 考慮할 때에는 그림 2와 같이 電流가  $O$ 에서  $i$ 까지 增加할 때의 磁化曲線은  $OP$ 로 되고 電流가  $i$ 에서  $O$ 까지 減少할 때의 磁化曲線은  $PQ$ 와 같이 된다.

이 때  $\triangle OPQ$ 의 面積에 相當하는 熱損失이 鐵部에서 생기게 되므로 蓄積된 電磁에너지는  $\triangle PQR$ 의 面積에 相當하며 鐵損이 없을 때의 電磁에너지  $\triangle OPR$ 의 面積보다 작다. 이 事實을 (2)式  $W_m = \frac{1}{2} Li^2$ 에 依하여 說明하면 磁化曲線이  $PQ$ 일 때의  $L$ 의 값은 磁化曲線이  $PO$ 일 때의  $L$ 의 값보다 작기 때문에 蓄積된 電磁에너지  $W_m$ 은 鐵損이 있을 때가 작다.

그러므로 鐵損이 없는 直流電磁石의 境遇가 鐵損이 있는 交流電磁石의 境遇보다 같은 電流에 對해서 蓄積된 電磁에너지가 크다는 것 을 알 수 있고 따라서 이 에너지의, 空際의 길이  $x$ 에 對한 變化率로 表示되는 吸引力에 있어서도 같은 크기의 電流에 對해서 直流의 境遇가 交流의 境遇보다 若干 크다는 것을 알 수 있다.

앞에서 考察한 바와 같이 같은 크기의 電流에 對해서 直流電磁石이 交流電磁石보다 吸引力이 若干 크게 되므로 같은 吸引力을 發生하기 爲한 電流와 消費電力은 交流電磁石이 直流電磁石보다 若干 크게 된다는 것을 알 수 있다.

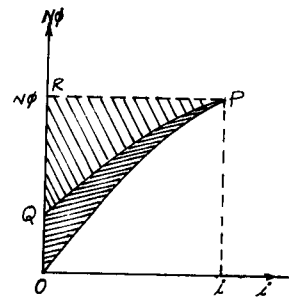


Fig. 2. Magnetization Curve

### 3. 實 驗

#### 3.1 實驗裝置

吸引力試驗에 使用한 電磁石은 大門의 록(lock) 裝置 開閉에 使用하는 電磁石으로서 그림 3과 같이 풀런저 以外에는 磁路에 鐵部가 없으며 이 電磁石의 諸元은 다음 表 1과 같다.

Table 1. Dimensions of Solenoid Coil.

$D$	$d$	$\delta$	$l$	$M$	$k$
11.7[mm]	10[mm]	0.85[mm]	20.1[mm]	200[gr]	20[kg/m]

記號는 그림 3을 參照할 것.

이 電磁石의 풀런저에는 그림 3과 같이 용수철저울 및 指針을 달아 吸引力 및 풀런저의 進入距離 即 變位를 測定할 수 있게 하였으며 이 때 풀런저의 變位를 調整할 수 있는 나사 N을 上部에 裝置하고 또 코일 周圍에는 冷却水를 通하여 코일을 冷却시키도록 하였다.

3.2 實驗方法

(1) 플런저變位에 對한 吸引力實驗

電磁石線輪에 直流 1[A]를 通하고 이 電流를 一定하게 維持하면서 플런저의 變位調整用 나사 N에 依해서 플런저의 變位  $s$ 를 2[mm]에서 20[mm]까지 變化시킬 때 各 變位에 對한 吸引力을 용수절저술에 依해서 測定하여 플런저의 變位에 對한 吸引力曲線( $F-s$ 曲線)을 求한다. 以上과 같은 要領으로 直流 1.3[A], 1.6[A], 交流 1[A], 1.3[A], 1.6[A] 時의  $F-s$  曲線을 求한다.

(2) 吸引力에 對한 電流 및 消費電力實驗

플런저를 最下位點( $s=20$ mm)에 두고 直流와 交流의 兩 境遇에 있어서 電流를 0.5[A]에서 2[A]까지 增加시킬 時 各 電流에 對한 吸引力을 測定하여 各 吸引力에 對한 電流曲線( $I-F$ 曲線)을 求한다. 이 時 電壓, 力率(交流의 境遇)도 同時에 測定하여 各 境遇에 있어서의 電力을 計算하여 各 吸引力에 對한 消費電力曲線( $W-F$ 曲線)도 아울러 求한다.

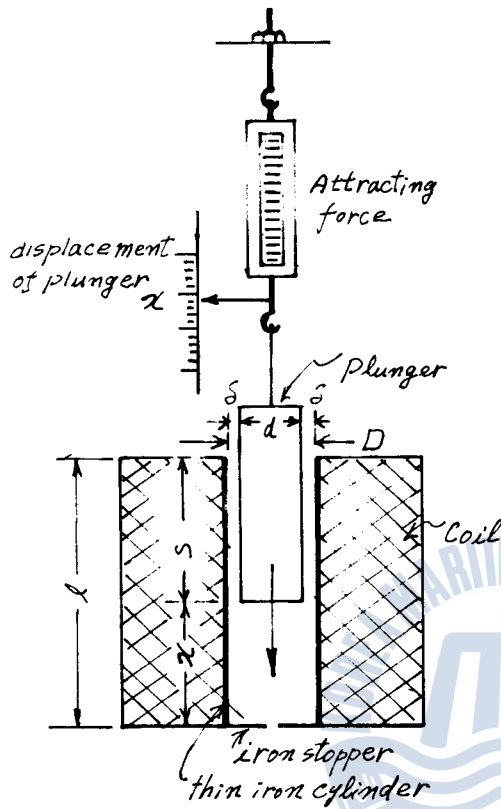


Fig. 3. Principal Structure of Solenoid Coil Used for Experiments.

4. 實驗結果 및 檢討

電磁石에 AC, DC의 一定電流(1A, 1.3A, 1.6A)를 通할 때 플런저의 各 變位에 對한 吸引力實驗結果를 曲線으로 表示하면 그림 4의 (a), (b)와 같다. 이 圖表에서 보는 바와 같이 電流 一定時에

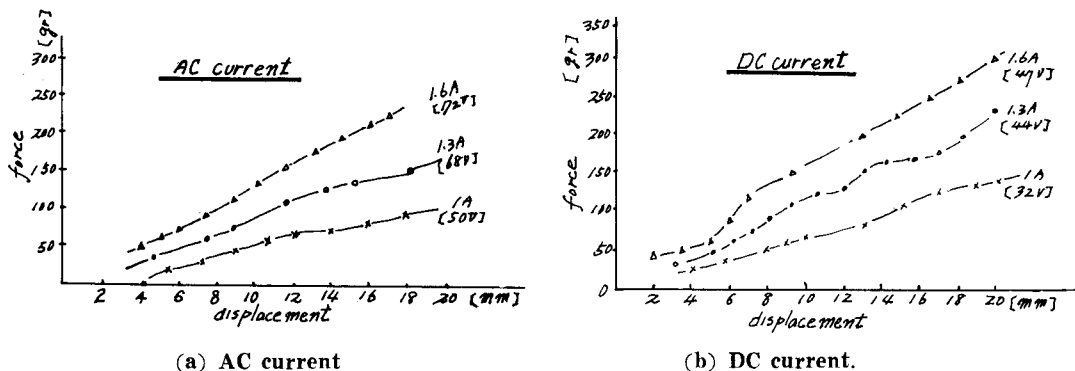


Fig. 4. Plotted Curves of Attracting Force vs. Displacement of Plunger When Exciting Currents Are Maintained in Constant.

吸引力은 플런저의 變位 增加에 따라서 大略 直線的으로 增加하고 있다. 이 吸引力의 增加는 (7)式

$$F = -\frac{1}{2} (Ni)^2 \frac{\mu_0 A}{(\mu_0 R_0 A + l - s)^2}$$

에서 플런저의 變位  $s$ 가 0에서  $l (=20\text{mm})$ 까지 增加할 때  $F$ 의 增加狀態를 나타낸 것인데  $\mu_0 R_0 A > 1.2l$  程度이면  $F$ 는  $s$ 의 增加에 따라 大略 直線的으로 增加한다는 것을 알 수 있다.

이 때 이 曲線들의 기울기를 計算해 보면 表2와 같이 된다.

Table 2. Gradients of  $F-s$  Curve.

Current	1[A]	1.3[A]	1.6[A]
AC	5.56	9.38	13.15
DC	7.5	11.67	15.5

이 表를 보면 AC, DC 共히 電流가 커질수록 기울기는 커지고 또 DC의 境遇가 AC 때보다 기울기가 크다. 即 電流가 커질수록 플런저의 單位變位에 對한 吸引力의 增加率이 커지고 또 同一電流時에 DC電磁石이 AC電磁石보다 플런저의 變位에 對한 吸引力의 增加率이 크다는 것을 알 수 있다.

플런저를 最下位點( $s=20\text{mm}$ )에 두고 電流를 0.5[A]에서 2[A]까지 增加시킬 때의 吸引力으로부 各 吸引力에 對한 電流曲線( $I-F$ 曲線)을 그리면 그림 5와 같이 되고 또 이 때의 各 吸引力에 對한 消費電力曲線( $W-F$ 曲線)은 그림 6과 같이 된다.

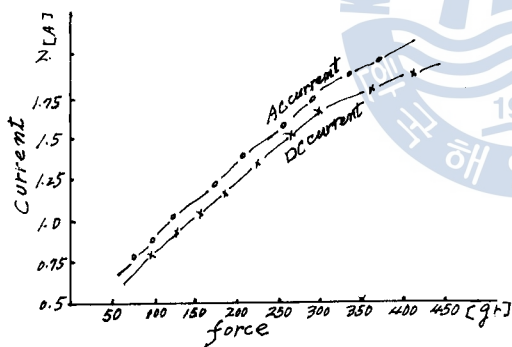


Fig. 5. Currents vs. Attracting Force Curve.

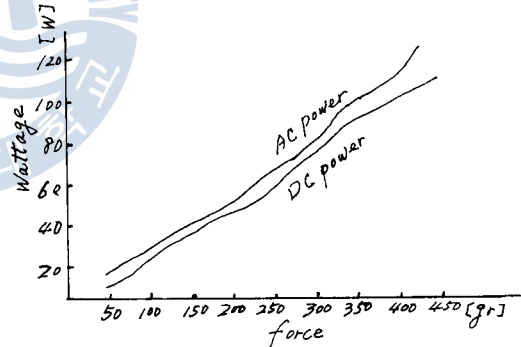


Fig. 6. Wattages vs. Attracting Force Curve.

앞의 理論에서 說明한 바와 같이 같은 값의 電流에 對해서 交流電磁石의 吸引力이 直流電磁石의 吸引力보다 若干작기 때문에 같은 吸引力을 發生하는 電流는 交流電磁石이 若干 커야하며 그림 5와 같이 된다. 그 電流의 差는 吸引力이 커질수록 커진다. 即 吸引力이 50[gr] 前後에 있어서는 電流의 差는 約 0.15[A]인데 吸引力이 350[gr] 前後에 있어서는 電流의 差가 約 0.2[A]로 된다.

消費電力에 있어서는 交流電磁石은 鐵損이 있기 때문에 同一吸引力을 發生시키는데 必要한 消費電力이 交流電磁石의 境遇가 直流電磁石의 境遇보다 크게 될 것이며 各 吸引力에 對한 消費電力이 그림 5과 같이 된다.

## 5. 結 論

理論的인 解析 및 實驗結果로부터 電磁石의 吸引力特性에 對하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 풀런저以外에는 磁路에 鐵部가 없는 電磁石에 있어서는 一定電流時 풀런저의 變位增加에 對해서 吸引力이 大略直線狀으로 增加하며 이 直線의 기울기는 電流가 클수록 크고 또 같은 電流에 對해서도 直流電磁石의 境遇가 交流電磁石의 境遇보다 크다.

(2) 電磁石의 磁路가 空隙을 除外하고는 全部 鐵部로 되어 있을 때에는 같은 電流에 對해서도 吸引力이 大端히 커질것이고 또 풀런저의 變位增加에 對한 吸引力增加率이 大端히 커질것이다.

((7)式에서  $\mu_0 R_0 A = 0$  되기 때문)

(3) 풀런저가 定位置에 있을 때 같은 電流에 依한 吸引力은 直流電磁石이 交流電磁石보다 크고 따라서 같은 吸引力을 發生하는데 要하는 電流는 交流電磁石이 直流電磁石보다 크다.

(4) 풀런저가 定位置에 있을 때 같은 吸引力을 發生하는데 所要되는 消費電力은 交流電磁石이 直流電磁石보다 크다.

(5) (7)式에서  $R_0$ 의 값만 알면 直接吸引力을 計算해낼 수 있을 것인데 아직  $R_0$ 가 어느 程度로 되는지 推定할 수 없어서 吸引力을 直接 計算하지 못한 점이 아쉬우며 이 問題에 對해서는 다음 機會에 解決해 보려고 생각한다.

## 參考 文獻

- 1) 石黑敏郎 外2名, 交直 マグネットの設計と應用, オーム社, 東京, 1969, pp. 30-40.
- 2) William Tyrrell Thomson, 機關振動入門, 丸善, 東京, 1966, pp. 56-63.
- 3) 霜田光一 外一名, 大學演習電磁氣學, 裳華房, 東京, 1960, p. 147.
- 4) 戸上信文, 電磁開閉器, 東京電機大學出版部, 東京, 1964.
- 5) 宮入壓太, 最新電氣機器學, 螢雪出版社, 서울, 1965, pp. 104-122.
- 6) Fitzgerald, Kingsley, Electric Machinery, Mc-Grawhill, New York, pp. 8-22.



