

水中電動機設計上の 問題點

一차 례一

- 1. 序 論
- 2. 耐水絶緣
- 3. 水中電動機에서의 特有的 損失
- 4. 潤滑베어링
- 5. 軸封機構
- 6. 結論

1. 序 論

近年 工業, 土木, 農業用水 및 上水道用 등 水中프렌트用으로 사용하는 水中電動機는, 이것의 利點과 經濟性이 일반적으로 各界에 인식되고 있다. 過去에는 200~400[V]級의 低壓用이 주로 製作되었으나 單機容量의 增大와 더불어 3000[V] 또는 6000[V]級의 高壓用의 需要가 날로 높아지고 있는 것이 現在の 傾向이다.

水中電動機는 말할 것도 없이 펌프驅動用이며 地上用과 비교하여 (1) 水中에서 사용하므로 建物 등 地上設備를 最少限으로 줄일 수 있으며, (2) 水中運轉이어서 騒音이 地上에 傳達되지 않으므로 騒音公害를 염려하지 않아도 되며, (3) 水中回轉으로 말미암아 摩擦損失이 地上電動機보다 增加하여 若干 效率이 떨어지나 펌프效率이 向上하므로 綜合效率은 地上펌프를 사용하는 경우보다 높다. (4) 거의 保守가 필요없다는 등의 利點이 있다.

水中電動機는 電動機內部에 封入되는 流體의 종류에 따라 水封式, 油封式, 乾式의 3종류에 분류되며, 水封式은 內部構造가 耐水性을 가지므로 外部의 물이 侵入하여도 直接 機能에 영향을 주지 않는다. 따라서 水

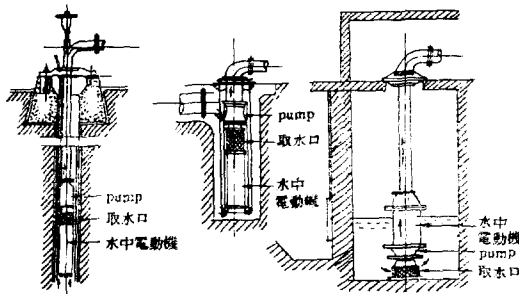
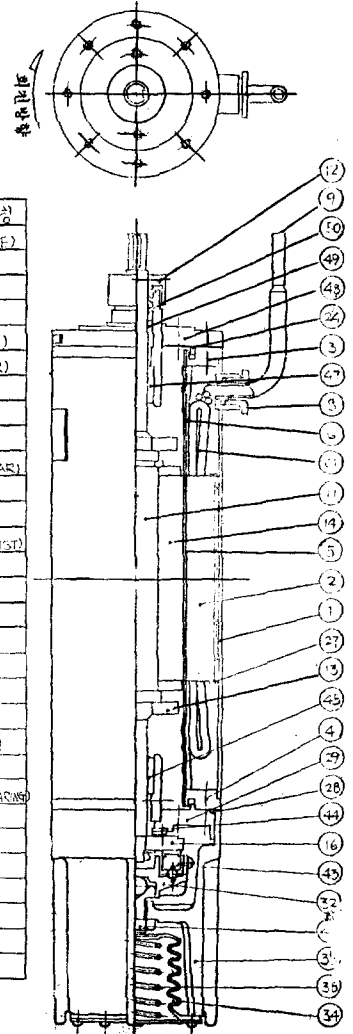


그림 1. 水中電動機의 應用例



번호	명	칭
1	프레임 파이프(FRAME PIPE)	
2	스테이터 철심	
3	상부 스테이터 플렌지	
4	하부 스테이터 플렌지	
5	외 캔 (INSIDE CAN)	
6	캐 라이너 (CAN LINER)	
8	구동부임관 누르개	
9	구동기	
11	축 (SHAFT)	
12	샌드 칼라 (SAND COLLAR)	
13	벨런스 링	
14	오일의 철심	
16	스루스트 디스크(THRUST DISK)	
24	오링 (O-RING)	
27	스테이터 지지판	
28	하부 오링	
29	하부 브러켓	
32	하부 베어링 브러켓	
33	스피드트 베어링 케이스	
34	평상 스텝 철심 오링	
36	회전 보호 전압 스프링	
42	복합 서프코트	
43	스루스트 베어링 THRUST BEARING	
44	상부 스텝트 베어링	
47	하부 리미팅 베어링	
47	상부 리미팅 베어링	
48	상부 브러켓	
49	상부 브러켓 부싱	
50	오일 씰(OIL SEAL)	
61	스테이터 코일	

그림 2. 캔식水中電動機의 構造圖

* 正會員·漢陽大教授(工博)·當學會編修理事

中에서의 여러가지 用途에 적합하다. 油封式 및 乾式은 軸封機構를 포함한 電動機의 水密構造에 缺陷이 생겼을 때 電動機의 機能이 停止하므로 軸封機構의 壽命을 결정한다. 따라서 油封式이나 乾式의 用途는 水封式에 비하여 限定될 수 밖에 없으며 熱傳導의 觀點에서 油封式은 大形에, 乾式은 比較的 溫度上昇이 문제 가 되지 않는 小形의 것에 적합하다.

水中電動機에 있어서의 가장 큰 問題點은 水中에서 운전되는 것이므로 完全한 耐水性을 갖어야 하며, 水封式에서는 潤滑베어링을 사용하여야 하는 點, 油封式에서는 完全한 軸封機構가 要求되며 清水가 아닌 河川用의 것은 水封式이라 하여도 어느 정도 嚴重한 軸封機構가 필요하게 된다는 點들이다.

그림 1은 水中電動機의 應用例이며 그림 2는 乾式水中電動機의 構造圖이다.

2. 耐水絶緣

低壓水封式 小容量機에는 乾方式(can type)에 의한 耐水絶緣이 採用되고 있으며 卷線에도 特殊耐水電線을 사용하는 경우도 있다. 乾式水中電動機는 固定子코일 안쪽에 圓筒形의 耐蝕性薄板熔接構造體를 끼우고 乾과 固定子플랜지를 熔接하여 氣密狀態로 한 구조의 電動機이다. 乾式에 있어서는 乾 製作時 熔接部의 耐水性이 完全할 것. 熔接으로 말미암아 薄板에 殘留應力이 남지 말 것, 運轉中 乾에 발생하는 損失이 最少가 될 것 등이 要求된다.

乾材質로는 18-8 stainless steel을 擇하고 熔接方式으로는 plasma arc welder를 쓰는 것이 좋으며, argon gas에 의한 TIG(inert gas tungsten arc welding)를 사용하는 方法도 고려할 수 있으나 乾損失을 줄이기 위함과 동시에 空隙의 維持上 數(mm)정도의 薄板熔接이 되므로 熔接에는 高度의 技能이 따라야 할 것이다. 그리고 코일端의 空間과 固定子홈의 餘白에 合成樹脂를 充填하여야 하는데, 이렇게 하는 目的은 코일端의 放熱效果를 높이고 乾에 작용하는 內外壓力에 대하여 機械的補强材料로서의 역할을 고려한 것으로 高溫에서 가스발생이 없고, pot life가 길며, 粘度가 適當하여 浸透性이 좋고, 熱 및 機械的충격에서도 龜裂이 생기지 않으며, 絶緣性이 우수하고 熱傳導가 좋은 材質의 것을 써야 한다. 例로 epoxy resin을 適當한 hardner, catalyst, plasticizer, filler와 함께 配合한 充填性的 용도 適切할 것이다.

이상은 低壓水封式水中電動機에 대한 耐水絶緣方式이 있으나 高壓水封式水中電動機에 있어서는 低壓과는 그 方式을 달리하여 우수한 耐水絶緣特性, 耐熱特性,

및 機械的特性을 갖게한 例가 있다.^{1),2)}

일반적으로 地上에서 운전되는 高壓電動機의 絶緣은

(1) 코로나가 발생하여도 實用的으로 充分히 이에 견디는 耐코로나 絶緣材料인 마이카材를 베이스로 한 絶緣組織

(2) 根本的으로 絶緣材料에 有害한 코로나를 발생시키지 않는 有機絶緣材料에 의한 voidless 絶緣組織을 사용함으로써 絶緣性의 長期安定과 信賴性을 확보하여 많은 成果를 냈으나 水中에 있어서는 이들 (1), (2)의 어느 것이 쉽게 耐水特性을 가지는 가를 檢討한 결과 有機絶緣材料에 의한 voidless 絶緣組織을 開發하는 것이 좋다는 結論하에 그림 3과 같이 3000[V]級 高壓水中電動機絶緣組織의 基本的인 코일斷面構造를 고안한 例를 소개한다.¹⁾

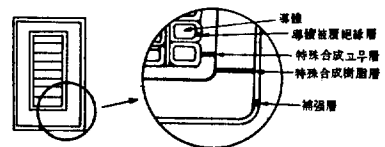


그림 3. 高壓水中電動機 코일의 絶緣組織의 例

油封式에서는 耐油性絶緣方式이, 乾式에서는 一般적으로 E種絶緣方式이 採用된다. 그러나 油封式이나 乾式 어느 것에 있어서는 電動機內部에 얼마만큼의 水分浸入을 豫想하여 耐水絶緣바아니쉬 處理를 실시하여 補完하여야 한다.

3. 水中電動機에서의 特有的 損失

水中電動機는 水中에서 回轉하므로 空隙面에서 매우 큰 流體損失이 생긴다.

또 乾式에 있어서는 乾表面 또는 乾內部에서 渦電流損이 발생한다. 그리고 이들 損失은 大形機, 高速機일 수록 크며 出力의 10~15[%]가 되는 것도 있으므로 水中電動機는 地上電動機에 비하여 效率이 약 10[%] 정도 低下한다.

표 1은 JIS 8324³⁾의 부속서 “水中 3相誘導電動機(깊은 우물 清水用)”의 特性表이다.

표 1. 2極, 60[Hz] 200[V] 3相水中誘導電動機의 特性

定格出力 [KW]	全負荷特性				起動電流 [A](各 相平均 值)	起動토크 크[%]
	效率 [%]	力率 [%]	電流 [A]	슬립 [%]		
0.75	58	68.0	5.5	9.0	47	100
1.563	63	69.5	9.9	9.0	84	''
3.768	68	72.0	22	8.0	190	''
7.572	72	73.5	41	8.0	350	''
15	74.5	75.5	77	7.0	800	''
37	78	78.0	176	6.0	1500	''
75	80	80.5	337	5.0	2900	''

캔에서 발생하는 損失 W_1 은 다음의 略式으로 구할 수 있다.⁴⁾

$$W_1 = \frac{\pi}{8} D^3 L t B \omega^2 \delta [W] \dots\dots\dots(1)$$

여기서

- D : 캔의 直徑[m], L : 固定子鐵心길이 [m]
- t : 캔의 두께 [m], ω : 回轉磁束角速度[rad/s]
- B : 空隙磁束密度 [Wb/m^2] δ : 캔의 導電率 [σ/m]

위 式에서 W_1 은 캔의 두께에 比例하여 增減하므로 일반적으로 耐腐蝕性, 強度의 見地에서 두꺼울 수록 좋으나 效率面에서는 반대이므로 兩見地에서 적절한 두께로 하여야 한다.

또 δ 의 값이 적을 것이 必要하므로 캔材質로서는 非磁性, 高腐蝕抵抗性의 것이 좋다. 參考로 캔材質이 20 [HP] 캔식水中電動機에 미치는 影響을 표시한 것이 표 2이다.

표 2. 캔材料的 20[HP] 캔式電動機에 미치는 影響

材 料	電 氣 抵 抗 [$\mu\Omega/cm^2$]	効 率 [%]
18-8 Stainless steel	76	76.0
Nickel	10~20	41~56
Aluminium	3	18

空隙面에서의 流體摩擦損失 L_d 의 計算式⁴⁾은

$$L_d = K \cdot SG \cdot \nu^{1/2} N^{2.8} D_r^{3.6} (D + 5b) \times 10^{-4} [W] \dots(2)$$

여기서

- SG : 比重, ν : 動粘度 (C·S),
- D_r : 回轉子外徑 [m], b : 回轉子幅 [m],
- K : 帶數 N : 回轉數 (rpm)

(1), (2)式的 D 와 D_r 은 거의 같은 값이므로 W_1 과 L_d 의 값을 적게 하려면 (1)式的 L 과 (2)式的 b 의 값이 크게 되어도 D 와 D_r 의 값을 적게 하는 것이 效率向上을 위하여는 바람직하다. 그런데 電動機設計의 立場에서 보면 D_r/b 의 값은 極數가 적을 수록 작게 할 수 있으므로 效率面에서는 대개 2極으로 하여 D_r/b 를 작게 設計한다.

水中電動機의 極數가 거의 2極이 되어 있는 한 가지 理由는 바로 이 點이다.

4. 물潤滑베어링

水封式 水中電動機의 特色은 물潤滑베어링을 가지고 있으며, 또한 高速, 重荷重에 견디는 드러스트 베어링을 備置하여야 하는 點이다. 그리고 이 電動機는 대개 堅軸形이므로 電動機回轉中에 있어서의 軸振動 및 固定子和 回轉子사이의 空隙不平衡에 의한 電磁力을 받는

래디얼 베어링도 갖추어야 한다.

(1) 래디얼베어링

水中電動機의 경우 래디얼베어링의 荷重은 일반적으로 적으므로 合成樹脂系 또는 合金 혹은 黑鉛系 圓筒 베어링을 쓴다.

(2) 드러스트 베어링

물潤滑의 경우 물의 粘度가 使用溫度에 있어서 기름의 $\frac{1}{20} \sim \frac{1}{30}$ 이므로 潤滑狀態는 境界 또는 接觸潤滑로 귀급하는 것이 실제적이고, 기름潤滑에 비하여 $\frac{1}{10}$ 정도 의 荷重이 아니면 安定運轉이 될 수 없으며 드러스트 베어링의 材質로는 다음의 條件을 만족하여야 한다.

- (i) 베어링損失이 적을 것. (ii) 耐摩耗性 일 것.
- (iii) 모래, 먼지등의 異物質이 混入하여도 影響이 적을 것. (iv) 耐腐蝕性일 것.

이들 條件을 고려하여 從來에는 水中베어링材料로는 熱可塑性樹脂, 燒結카본 및 硬質고무등의 非金屬系 또는 銅鉛合金등의 金屬系의 各種材料가 사용되었으나 基材가 갖는 潤滑性, 耐蝕性 및 耐摩耗性등을 종합하면 燒結카본이 우수하므로 現在에 있어서는 金屬浸透處理를 한 燒結카본이 많이 사용된다.

特殊處理를 한 여러가지 硬度的 黑鉛系베어링과 合成樹脂系 베어링을, 摺動板에도 硬도가 틀리며 加工方法이 다른 各種 stainless steel을 선정하여 混砂水中에서 운전한 경우의 特性의 一部를 試驗하여 比較한 것이 표 3²⁾이다.

實際 운전에 있어서는 潤滑水가 완전한 清水가 아니고 多少나마 모래, 먼지가 混入되고 있다. 그림 4²⁾는 混砂水中에서 운전한 경우 2가지 종류의 베어링에 대한 베어링損失을 比較한 것이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 混砂水中에 있어서는 合成樹脂系가 不安定하나 黑鉛系는 매우 安定된 特性을 나타내고 있다

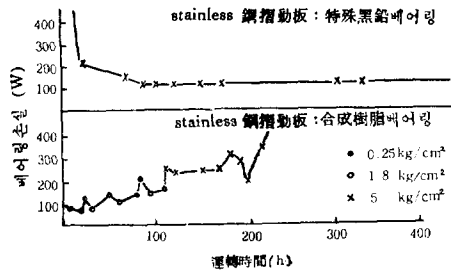


그림 4. 混砂水中에서의 드러스트 베어링의 摩擦特性

표 3. 清水中에서의 드리스트 베어링 特性比較

베 어 링	摺 動 板	베 어 링 損 失	運 轉 狀 態	運轉後의 狀態
合成樹脂 A	스테인레스鋼 A	小	安 定	摺動面に 얇은 글킨 傷痕이 있다
" A	" B	小	"	摺動면에 녹이 보인다.
" B	" A	大	"	兩面に 幅넓은 글킨 傷痕
黑 鉛 A	" A	大	若干 不安定	摺動面良好
" B	" A	大	高荷重에서 不安定	"
" C	" A	小	適合性 우수, 安定	摺動면에 글킨 傷痕 적고, 兩面 모두 깨끗하다
" D	" A	小	"	"
" C	" D	小	"	"
" E	" C	小	"	"

標準形의 水中電動機에 있어서는 그림 5와 같이 베우 구조가 간단한 圓板構造의 베어링을 쓰고 있다. 이 방식에서는 베어링材料의 自記潤滑性에 依支하여야 하

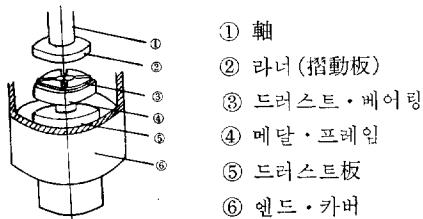


그림 5. 圓板形드리스트 베어링構造

므로 높은 面壓으로 할 수 없어 小形大容量드리스트 베어링의 製作이 힘들며 이것이 問題點이 되고 있다.

이와 같은 圓板形 水中베어링의 特性改良의 具體的 方法의 하나로 靜止側의 베어링면의 形狀을 단순한 圓板으로 하고, 回轉側의 라너(runner) 摺動면에 放射 홈을 파고 이들의 組合에 의하여 流過水量的 增加를 圖謀한 放流形드리스트 베어링方式⁵⁾을 採用한 것도 있다.

그림 6, 7은 각각 圓板形과 放流形베어링에 대하여 試驗條件을 同一하게 하고 드리스트荷重에 대한 摩擦 토오크의 特性을 測定한 것이다.

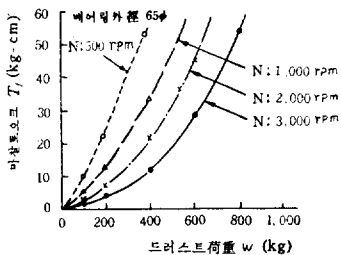


그림 6. 圓板形베어링의 摩擦特性

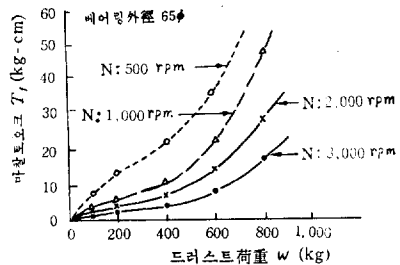


그림 7. 放流形베어링의 摩擦特性

그림 6, 7에서 圓板形베어링의 摩擦토오크는 荷重에 대하여 거의 比例的으로 增大한 特性이 되었으나 放流形에서는 전반적으로 摩擦토오크가 圓板形에 비하여 적게 되었음을 볼 수 있다.

5. 軸封機構

軸封裝置는 水中電動機의 形式, 用途등으로도 선택 결정하여야 한다.

水封式의 경우 水中電動機를 반드시 水中에서 사용 하는 것에 있어서는 封水가 漏洩한 우려가 없으므로 단지 外水에 包含되어 있는 異物質의 浸入을 防止하기 만 하면 되고, 若干의 外水과 內部封水 사이에 물의 流通이 있어도 관계없다는 생각하에서 檢討하면 되므로 이러한 종류의 水中電動機에서는 軸封裝置가 比較 적 簡單하다.

그러나 水中電動機가 露出運轉되어 封水의 漏洩이 우려되는 경우 즉 河川形水中電動機에서는 水封式, 油封式을 不問하고 어느 정도 嚴重한 軸封을 고려하여야 한다. 특히 油封式에 있어서는 완전한 軸封이 要求된다. 이 경우 일반적으로 메케니컬·씨일(mechanical seal)의 組合方式이 採用되며 要求壽命을 고려하여 그 材質이 결정된다. 組合方式은 電動機內외의 壓力關係, 全體構造를 고려하여 결정하여야 한다. 예를 들면 河

$$\text{고로 } H_x = \left(C_1 \sin h \frac{K\pi}{\tau} y + C_2 \cos h \frac{K\pi}{\tau} y \right) \cos \frac{K\pi}{\tau} x$$

또한 $\text{div} \mathbf{H} = 0$ 이므로

$$H_y = - \int \frac{\partial H_x}{\partial x} dy = \left(C_1 \sin h \frac{K\pi}{\tau} y + C_2 \cos h \frac{K\pi}{\tau} y \right) \sin \frac{K\pi}{\tau} x + C_3(x)$$

$$\text{그런데 } H_y(x=0) = -H_y\left(x = \frac{\pi}{K}\right)$$

이므로 $C_3(x) = 0$

의 결과를 얻는다. 지금 鐵心の 透磁率을 無限大라 보면

$$\text{면 } y=0 \text{에서 } H_x = \frac{\partial a_K}{\partial x} \text{ 이므로}$$

$$C_2 \cos \frac{K\pi}{\tau} x = \frac{K\pi}{\tau} A_K \cos \frac{K\pi}{\tau} x$$

$$\text{즉 } C_2 = \frac{K\pi}{\tau} A_K \text{ 이다.}$$

또한 $y=g$ 에서 $H_x=0$ 이므로

$$C_1 \sin h \frac{K\pi}{\tau} g + C_2 \cos h \frac{K\pi}{\tau} g = 0$$

여기에 C_2 의 값을 대입하고 C_1 을 구하면

$$C_1 = - \frac{K\pi}{\tau} A_K \coth \frac{K\pi}{\tau} g \text{ 이다.}$$

$$\text{고로 } H_x = \frac{K\pi}{\tau} A_K \frac{\sin h \frac{K\pi}{\tau} (g-y)}{\sin h \frac{K\pi}{\tau} g} \cos \frac{K\pi}{\tau} x \quad (2)$$

$$H_y = - \frac{K\pi}{\tau} A_K \frac{\cosh \frac{K\pi}{\tau} (g-y)}{\sin h \frac{K\pi}{\tau} g} \sin \frac{K\pi}{\tau} x \quad (3)$$

그런데 $B_y = \mu H_y$, a_K , Permeance P 와의 관계로부터

$$B_y = g = \mu H_y = a_K P = A_K \sin \frac{K\pi}{\tau} x \cdot P = \mu \frac{K\pi}{\tau} A_K \frac{\sin \frac{K\pi}{\tau} x}{\sin h \frac{K\pi}{\tau} g}$$

$$\therefore P = \frac{\mu}{g} \frac{\frac{K\pi}{\tau} g}{\sin h \frac{K\pi}{\tau} g} \quad (4)$$

式 (4)에서 $\frac{Kg}{\tau}$ 가 零에 가까운 경우는 $P = \frac{\mu}{g}$ 라는

결과를 얻는다. 그림 1의 (b)는 空隙 g 와 permeance P 와의 관계곡선이고 이로부터 우리는 誘導機, 혹은 turboalternator와 같은 一定한 空隙을 갖는 기계에서 armature reaction의 각 harmonics에 대한 空隙 permeance의 성질을 알 수 있다.

3. 變壓器卷線電流에 의한 Field

그림 2와 같이 交互配置卷線の 變壓器에서는 高壓

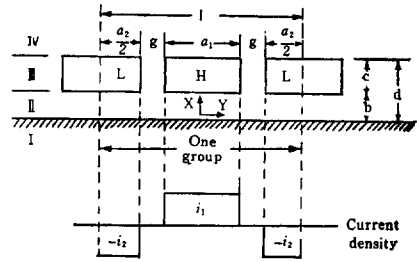


그림 2

(HV)과 低壓(LV)卷線이 duct를 두고 서로 모여져서 하나의 coil群을 구성한다.

지금 이 coil群 電流에 의한 磁場分布를 알기 위한 Vector potential을 구하기 위하여 다음과 같은 가정을 둔다.

- 1) coil群을 무한히 반복되어 있다고 보고 端効果는 무시한다.
- 2) 高壓과 低壓卷線은 같은 반경으로 鐵心으로부터 같은 거리에 있다고 본다.
- 3) 曲率은 무시하고 導體들은 대단히 큰 帶環으로 본다.
- 4) 高壓과 低壓측의 A.T.은 같은 것으로 본다.

이러한 가정하에 한 coil群을 그림 2와 같이 model화시키고 全空間은 鐵心を 기준으로 방사상의 4개 영역으로 나누어 생각한다. 즉,

- 영역 I : 鐵心の 안쪽
- 영역 II : 鐵心과 卷線 사이의 空間
- 영역 III : 卷線이 차지하는 부분
- 영역 IV : 卷線外側 공간

와 같이 구분한다.

Field解析을 위한 좌표는 그림 2에서와 같이 x 는 방사상의 바깥쪽으로 y 는 鐵心軸의 방향으로 정하며, i_1 , i_2 는 高壓과 低壓側電流密度의 分布를 나타낸 것이다.

지금 y 軸방향에 분포된 電流를 Fourier 급수로 표시하면

$$i_2 = \sum_1^{\infty} \frac{2}{n\pi} \left(i_1 \sin \frac{nKa_1}{2} - i_2 \cos n\pi \sin \frac{nKa_2}{2} \right) \cos nKy = \sum_1^{\infty} a_n \cos nKy \quad (5)$$

여기에서 $K = \frac{2\pi}{l}$ 이고 n 은 空間 harmonics의 次數이다.

Vector potential을 구하기 위하여 Poisson과 Laplace方程式을 引用하면 Vector potential을 無次元으로 할 때 다음과 같은 일반방정식이 얻어진다.