

大電力用 Bus Way 技術

李 旭 烈 · 金 相 泰
(現代重電機技術研究所)

■ 차 례 ■

- 1. 序言
- 2. Bus way의 구조와 種類
 - 2-1 導體
 - 2-2 Duct
- 3. IPB의 設計時 고려할 사항
 - 3-1 絶緣
 - 3-2 IPB의 溫度上昇
 - 1) 導體와 Duct에서의 損失
 - 2) IPB의 冷却
 - 3-3 短絡時 發生하는 힘
- 4. 結言
- 5. 參考文獻

① 序 言

Bus way는 發電機 端子和 變壓器 端子的 연결부 分, 變壓器와 Switching 장치의 연결부분등에 주로 使用되고 있다.

最近에는 發電機 變壓器等的 單位容量이 점차 增加하고 있으며, 使用電壓 및 電流도 높아지고 있어, Bus way system도 高度의 技術을 要하게 되었다.

大電力用으로 널리 使用되고 있는 IPB (Isolated Phase Bus)의 경우, 外國에서는 이에 대한 상당한 研究가 오래전 부터 進行되어 왔으나 國內에서는 이에대한 技術이 未洽하여 장치의 대부분을 外國에 依存하고 있다.

本稿에서는 IPB를 中心으로 Bus way의 設計時 고려해야할 一般的인 事項에 대하여 記述하고자 한다.

② Bus Way의 구조와 種類

Bus way는 電力을 傳送하는 導體와 導體를 보호하기 위한 Duct와, 지지물 및 부속장치로 구성되어 있다.

2-1 導體(Bus)

導體의 導電率이 높으면 電力을 經濟的으로 傳達할 수 있을 뿐만 아니라, 電壓降下를 줄여 導體의 溫度上昇은 물론, Duct 內部的 溫度上昇値를 낮출수 있어, Bus Duct 全體의 體積을 줄일 수가 있을 것이다. 一般的으로 가장 널리 使用되고 있는 導體의 材料로서는 銅과 알루미늄을 들 수 있다. 알루미늄은 導電率에서는 다소 떨어지지만 銅보다 가볍고, 값이 싸기 때문에 高電壓 大電流用으로 많이 使用되고 있다.

高電壓 大電流에서 問題가 되는 表皮効果와 近接

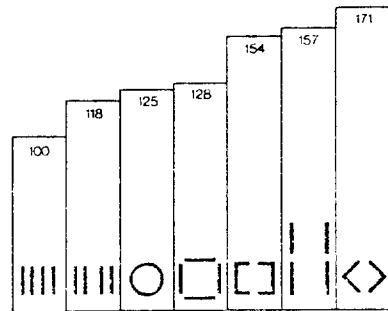


그림 1. 導體의 斷面形狀에 따른 許容電流 비교 (단위 : %)

효과의 영향으로 電流는 어느 한쪽으로 치우쳐 흐르기 때문에 電流密度가 不均一하게 되며, 導體의 抵抗을 增加시키는 結果를 초래하게 된다. 이 表皮 효과와 近接 효과는 導體斷面의 形狀에 따라 다르게 나타난다. 그림 1은 面積이 같은 銅導體에 있어서의 斷面形狀에 따른 許容電流容量을 比較한 것인데, 内部通路가 있는 것이 許容電流容量이 크다는 것을 알 수 있다.¹⁾

2-2 Duct

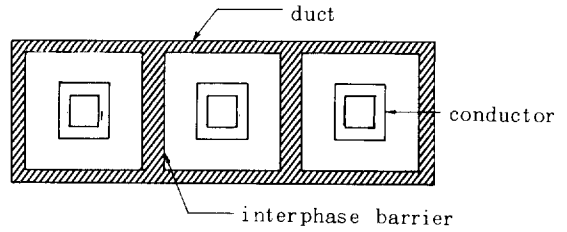
Duct는 人蓄이나 他工作物에 주는 危害를 防止하고 故障時 과급 효과를 줄이기 위하여 導體部를 둘러싸고 있는 金屬製 外函部를 말한다.

Duct의 形狀은 크게 segregated type (그림 2 a), non-segregated type (그림 2 b) 및 isolated type (그림 2 c)의 3가지로 大別된다.²⁾ non-segregated type은 各相의 導體가 同一 金屬 Duct에 내장되어 있으며, segregated type은 各相의 導體가 서로 金屬障壁에 의해 分離되어 있다. isolated type은 各相의 導體가 각각 單獨 Duct에 내장되어 서로 인접해 있는 것을 말한다.

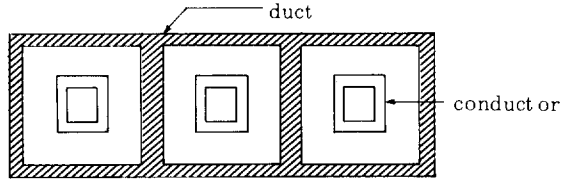
이들 3가지 type들은 各己 長短點이 있으며 大容量에서는 浬급, 熱放散, 短絡時의 電磁力 등을 고려하여 isolated type을 가장 널리 사용하고 있다.

前述한 3가지 type에 대하여 短絡 可能性을 檢討해 보면 nonsegregated type에서는 導體와 Duct 사이의 arc發生에 의한 离子化 gas의 生成이 어려운 반면 相間短絡은 쉽게 일어날 수 있다. 그러나 segregated type에서는 离子化 gas가 하나의 相에만 局限되며, 相間短絡은 發生하기가 稀박하지만, arc電流가 持續적으로 흘러 境界면이 손상되어 离子化 gas가 다른健全相으로 과급되어 相間短絡으로 進前할 수도 있다. isolated type에서는 地絡에 의한 영향이 相間短絡으로 바뀔 경우는 거의 없다. 왜냐하면, 導體와 Duct間에 arc가 發生하여 Duct에 구멍이 날 정도로 심각하다고 할 때 离子化 gas가 외부로 빠져나가 다른 相의 Duct에 닿을지라도 그 Duct는 接地되어 있어 Duct 상호간에는 arc電流를 發生시킬만한 電壓差가 發生하지 않기 때문이다. 즉 isolated type에서는 相間短絡은 일어나지 않는다고 보아도 무방하다. 이러한 이유로 大電力用에는 isolated type (IPB)이 널리 사용된다.

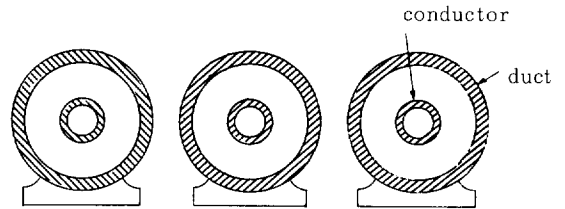
IPB도 Duct의 設計方式에 따라 3가지 形態로 分類할 수 있다.³⁾ Duct 상호간에 순환전류가 흐를



(a) segregated type



(b) nonsegregated type



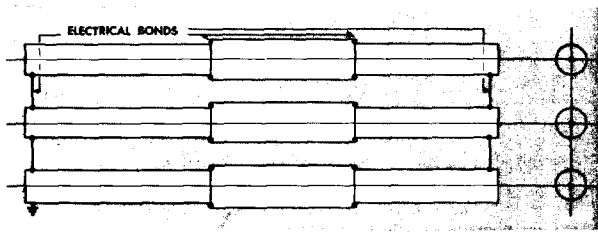
(c) isolated type

그림 2. Bus Duct의 形狀에 따른 種類

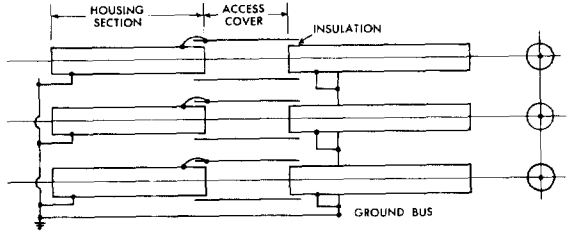
수 있는 bounded enclosure type (그림 3 a)과 Duct에 유기되는 電壓을 줄이기 위해 Duct를 軸方向으로 분할하여 한쪽 끝부분은 接地되고 反射部分은 絶緣이 되어 순환전류가 흐를 수 없는 discontinuous enclosure type (그림 3 b) 및 두 가지의 장점을 살려 조합한 discontinuous bounded enclosure type (그림 3 c)이 있다.

3 IPB의 設計時 고려할 事項

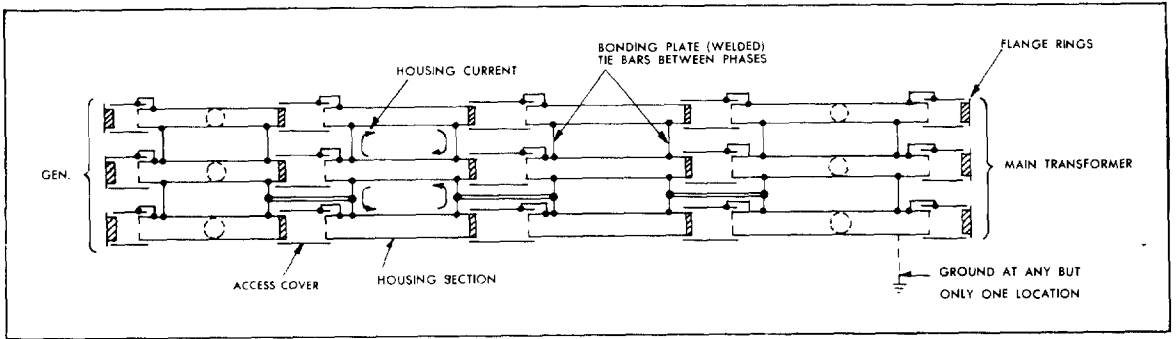
IPB設計의 key point는 導體와 Duct의 半徑, 두께, 材質 등을 決定하는 것이다. 이러한 事項들을 決定하기 위해서는 앞에서 及한 여러가지 條件들을 충분히 고려하여야 하겠다. 여기서는 技術적으로 중요한 몇가지를 들어 좀더 구체적으로 살펴 보기로 한다.



(a) Bonded enclosure type bus



(b) Discontinuous enclosure type bus



(c) Discontinuous bonded enclosure type bus

그림 3. IPB의 種類

3-1 絶緣⁴⁾

IPB의 크기를 決定하는 要素중의 하나가 IPB 内部 電界強度 및 電界分布라고 할 수 있다. IPB에 충격진압, 상용주파 耐電壓, 開閉 surge 電壓이 印加될 경우, IPB에 있어서의 電界強度는 絶緣物의 耐力를 초과하지 않도록 設計되어야 한다.

그림 4와 같은 간단한 形態의 IPB에서 導體 및 Duct의 直径을 각각 C [cm], D [cm]라 하면 임의의 半徑 r [cm] 지점에서의 電界強度는 다음 式 (1)과 같다.

$$E = \frac{V}{r \ln \frac{D}{C}} \quad [KV/cm] \quad (1)$$

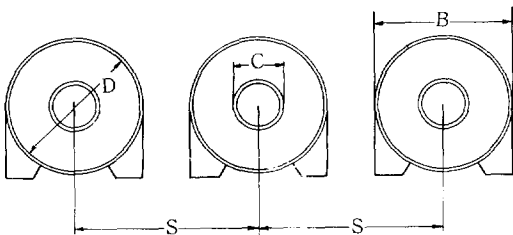


그림 4. Isolated phase bus

V = 導體에 印加된 電壓 [KV]

電界強度는 導體의 表面에서 最大가 되므로 最大 電界強度 E_{max} 는 $r = \frac{C}{2}$ 일때 이며, 그 크기는 式 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{max} = \frac{2V}{C \ln \frac{D}{C}} \quad [KV/cm] \quad (2)$$

그림 5는 IPB의 印加電壓 (V)와 DUCT의 半徑 ($r_2 = \frac{D}{2}$)을 一定하게 유지하고 導體의 半徑

($r_1 = \frac{C}{2}$)을 變化시켰을 때의 最大電界強度 (E_{max})의 變化를 나타낸 것이다. 導體에 電壓이 印加되던 電界強度가 가장 큰 導體表面의 絶緣이 우선적으로 파괴되므로 導體表面에 電界가 集中되지 않도록 導體 및 Duct의 半徑이 定해져야 하겠다.

그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 Duct와 導體의 半徑의 比가 e (≈ 2.718)일 때 導體表面의 電界強度가 最小가 된다는 것을 알 수 있다. 또한 導體의 半徑을 크게하는 것은 Duct와 의 거리, 즉 絶緣거리를 단축시키지만 表面電界強度는 반드시 增加

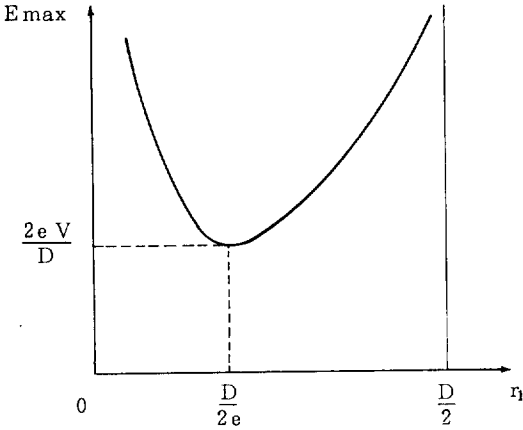


그림 5. 도체의 반경 (r_1)에 따른 표면전계강도

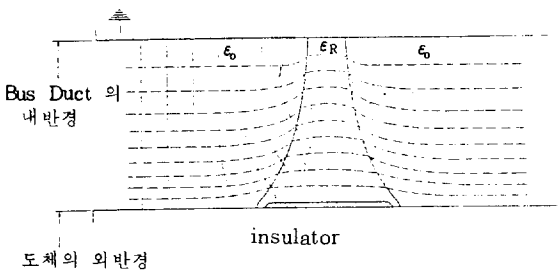


그림 6. 지지물 주위의 등전위선

하지 않는다는 것을 알 수 있다.

支持物의 주위에서는 支持物의 높은 유전율로 인해, 電界는 그림 6에서 보는 바와 같이 歪曲되어 나타난다.

Bus Duct 内の 絶緣媒體로서는 主로 공기가 使用되나, 高電壓, 大電流에서는 絶緣耐力을 높이고, 放熱效果를 좋게하기 위하여 SF₆ gas 등을 使用한다. 표 1에서 보는 바와 같이 공기대신 절연유나, SF₆ gas를 絶緣媒體로 使用하면 Duct의 半径을 줄일 수 있어, 오히려 경제적일 수도 있다.

표 1. Bus Duct의 임계반경

Bus Bar의 반경	공기 (1 atm)	SF ₆ (1 atm)	SF ₆ (2.5 atm)	절연유
5 cm	112.2 cm	15.2 cm	7.8 cm	9.6 cm
10 "	47.4 "	17.4 "	12.5 "	13.8 "
15 "	42.3 "	21.7 "	17.4 "	18.6 "
20 "	43.5 "	26.4 "	22.4 "	23.5 "

3-2 IPB의 温度上昇

1) 導體와 DUCT에서의 損失

導體에 電流가 흘러 抵抗損 ($I_c^2 R$)이 發生하면 導體의 温度는 上昇한다. 導體의 温度가 上昇하면 抵抗이 增加하여 容量을 감소시키며 變壓器, 發電機等 接續機器에 熱이 직접 傳達되어 系統全體에 좋지 못한 結果를 초래하게 되므로 導體의 許容最高温度는 어느 限界에서 制限되어야 한다. 보통 bolt 접속부의 温度는 70°C, 銀接續 또는 용접부위는 150°C 以下로 유지하도록 규정되어 있다. (ANSI C37.23)

Duct 에서는 導體의 熱이 傳達되거나, 自體에서 電流가 흘러 熱이 發生한다.

Duct 自體의 發熱은 hysteresis 損失에 의한 發熱도 있겠으나 主로 Duct 에 誘起된 電壓에 의하여 흐르는 電流에 起因한다. IPB의 導體를 1次側, Duct를 2次側으로 하여 變壓器의 原理와 유사하게 생각하여, 誘起電壓(e_D)를 求하면 式 3과 같다.

$$e_D = -M_{CD} \cdot \frac{di_c}{dt} \tag{3}$$

e_D : Duct에 誘記되는 電壓

i_c : 導體에 흐르는 電流

M_{CD} : 導體와 Duct 間의 상호 inductance

이 誘記電壓에 依해 그림 7과 같이 Duct 에 電流가 흐르며, 温度가 上昇한다. 이 電流는 Duct의 inductance와 抵抗値에 따라 변하며, 그 크기는 式 4와 같다.⁵⁾

$$i_D = \frac{\omega M_{CD} i_c}{\sqrt{\left(\frac{l}{\sigma A_D}\right)^2 + (\omega L_D)^2}}$$

i_D : Duct에 흐르는 電流

L_D : Duct의 自己 inductance

σ : Duct의 導電率

A_D : Duct의 斷面積

l : Duct의 길이

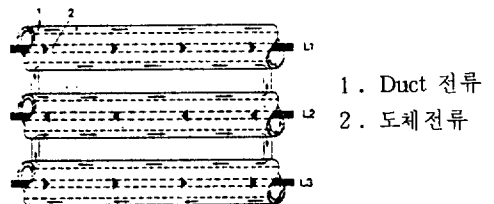


그림 7. Bus Duct에 흐르는 電流

따라서 이 電流가 Duct 에 흐름으로서 發生하는 損失 (W_D)는 式 5 와 같다.

$$W_D = \frac{(\omega M_{CD})^2 i_c^2}{\left(\frac{l}{\sigma A_D}\right)^2 + (\omega L_D)^2} \times \frac{l}{\sigma A_D} \quad (5)$$

여기서 $\omega L_D \gg \frac{l}{\sigma A_D}$ 일 경우 즉 Duct 의 導電率 이 클 경우에는

$$W_D \approx \frac{(\omega M_{CD})^2 i_c^2}{(\omega L_D)^2} \times \frac{l}{\sigma A_D} \quad (6)$$

이므로 損失은 Duct 의 導電率에 반비례한다. 또 $\omega L_D \ll \frac{l}{\sigma A_D}$ 일 경우, 즉 Duct 의 導電率이 작을 경우에는

$$W_D \approx \frac{(\omega M_{CD})^2 \cdot i_c^2}{l} \times A_D \sigma \quad (7)$$

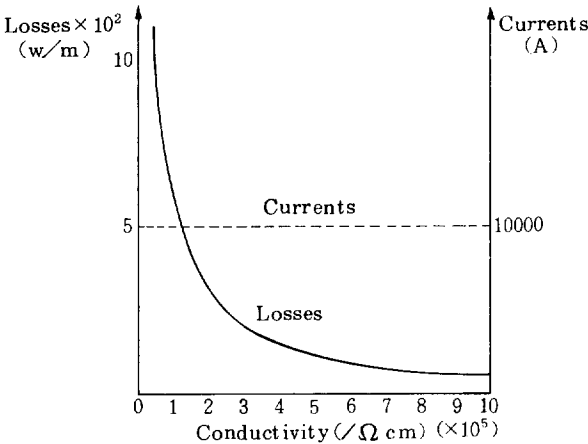
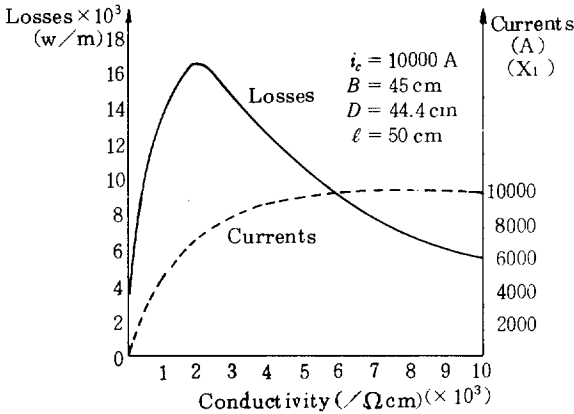


그림 8. 導電率에 따라 DUCT에서 發生하는 電流와 損失

이므로 損失은 Duct 의 導電率에 비례한다. 그림 8 은 導電率에 따른 Duct 의 電流 및 損失을 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 알루미늄 ($\sigma \approx 3.5 \times 10^5 / \Omega \text{cm}$) 처럼 導電率이 큰 材料를 使用하면 Duct 에 흐르는 電流는 導體에 흐르는 電流의 값과 비슷하며^{5),6)} Duct 에서의 損失도 작다는 것을 알 수 있다. 한편 concrete나 epoxy 수지등과 같이 導電率이 현저히 낮은 경우 (10^2 이하) 에도 損失은 줄어들는다. 그러나 磁氣차폐 효과가 미흡하며, 熱傳導性이 좋지않아 大電力用으로서 는 부적합하다.

Duct 의 材料로서는 鋼板과 알루미늄이 주로 使用된다. 이들 두 金屬材料의 特性을 比較하면 용점은 鋼板이 1,300 (°C), 알루미늄은 690 (°C)로 鋼板이 약 2 倍로 높으며, 비열도 약 50 (%) 정도 높아 鋼板이 耐熱性, 耐 arc 性이 우수하다. 실제로 6 [mm]의 鋼板과 알루미늄板의 熱的強度를 試驗한 結果, 40 [KA]의 arc 電流에 대하여, 鋼板은 0.5 [Sec] 간 이에 견디는 반면 알루미늄板은 0.1 [Sec] 정도 밖에 견디지 못한 것으로 나타났다.¹¹⁾ 鋼板이 耐熱性, 耐 arc 性이 우수하고 加工性이 좋으며, 價格이 싸므로 2,000 [A] 이하에서는 주로 鋼板을 使用하지만 그 以上의 大電流에서는 鋼板을 使用하면 hysteresis 損이 너무 커지기 때문에 非磁性體인 알루미늄을 使用한다.

2) IPB의 冷却

IPB의 冷却方式에는 自然冷却方式과 強制冷却方式이 있다. 自然冷却方式에서는 絶緣媒體로 使用하는 空氣나 SF₆ gas를 冷媒로 하여 對流나 輻射에 依하여 發生熱을 外部로 放出하고 있다. 그러나 8,000 [A] 以上의 大容量에서는 冷却裝置를 利用하여 強制冷却 시킴으로써 Bus Duct I의 크기를 줄이는 것이 全體적으로 所要되는 費用을 줄일 수 있어 경제적인 것으로 보고되고 있다.⁷⁾ 그림 9는 空氣를 冷媒로한 強制冷却式 IPB의 한 例를 보여 주고 있다.

IPB의 設計時 특별히 強制冷却方式을 채용할 것 인가를 決定하기 위해서는 우선 Duct 의 表面으로부터 對流나 輻射에 依하여 放散되는 熱量을 計算할 필요가 있다. 왜냐하면 最高許容溫度의 범위내에서 熱을 自然放散 시킬 수 없다면 殘餘熱은 強制冷却에 依하여 제거되어야 하기 때문이다.

自然冷却의 경우 對流와 輻射에 依해 放散되는 熱量은 式 8과 式 9로 表示된다.^{7),8)}

$$Q_C = t w_1 \left(\frac{t}{100}\right)^{1/4} A_D \quad (8)$$

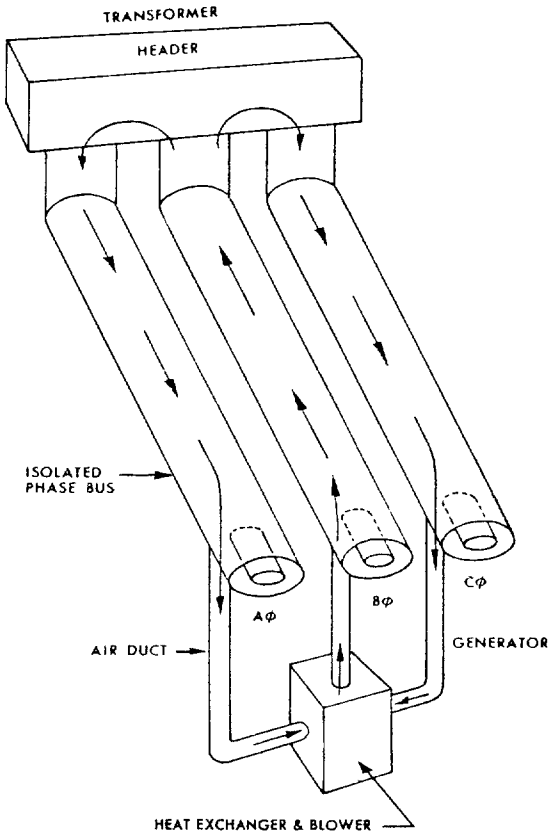


그림 9. 強制冷却式 IPB

$$Q_r = 36.8e \left[\left(\frac{T_m}{1000} \right)^4 - \left(\frac{T_o}{1000} \right)^4 \right] P \quad (9)$$

Q_c : 对流에 의한 熱 (watts / ft)

Q_r : 輻射에 의한 熱 (watts / ft)

t : Bus Duct의 平均溫度上昇 (°C)

$w_1 = 0.00128 / \log^3 \sqrt{B}$; Duct의 열전달계수 (watts / in² / °C)

A_D : Duct의 表面積 (inch² / ft)

B : Duct의 直径 (inch)

e : Bus Duct의 熱放散係數

T_o : Duct 주위 온도 (°K)

T_m : Bus Duct의 平均溫度 (°K)

P : 有效輻射係數

여기서 有效輻射係數 P 는 다음식 10과 式 11로 表示된다.

中間相 : $P = \left[(360 - 4a) / 360 \right] A_D \quad (10)$

外相 : $P = \left[(360 - 2a) / 360 \right] A_D \quad (11)$

단, $a = \sin^{-1} \frac{R}{S}$

$R = \frac{B}{2}$: Duct의 外半徑 (in)

S = 相間거리 (in)

위의 式은 Bus Duct의 溫度가 均一하게 上昇할 경우이며, 실제로는 Bus Duct가 그림 3처럼 분할되어 있어 尖端部分에서는 순환전류가 집중적으로 흘러, 다른 부분보다 溫度가 훨씬 높다.

5,000~20,000 [A]의 電流에서 相間거리가 Duct 直径의 1.5 배 정도인 Bus에서 高溫部의 溫度는 平均溫度보다 50 [%] 정도 높은 것으로 알려져 있으며⁸⁾, 設計時 이점도 고려되어야 할 것이다.

对流에 의한 熱傳達은 熱源과 熱을 받는 物體의 相對的 溫度과 表面積 및 表面의 形상에 따라 決定되며, 輻射에 의한 熱傳達은 此外에 表面의 상태에 따라서도 決定되므로 輻射에 의한 熱放散效果를 높이기 위하여 Duct를 表面處理하는 경우도 있다.

IPB의 各 相間이격거리 (S)를 決定할때에도 熱放散 能力을 고려해야 한다는 것을 앞의 式에서 알 수 있다.

強制冷却方式에서 冷却장치가 負擔해야할 放散熱量은 다음식 12와 같이 表示할 수 있다.

$$Q_a = (W_c + W_D) - (Q_c + Q_r) \quad (12)$$

3-3 短絡時 發生하는 힘

그림 2의 segregated type이나 non-segregated type에서는 短絡時에 各相의 導體상호간에는 막대한 힘이 作用하지만 IPB의 경우에는 相間에 作用하는 힘은 별 문제가 되지 않는다. 왜냐하면 Duct에 誘起되어 흐르는 電流는 導體에 흐르는 電流와는 크기가 같고 反對方向으로 흐르기 때문에 Duct外部에는 磁界가 發生하지 않는다고 볼 수 있기 때문이다.^{2), 4), 6)}

그러나 Duct와 導體사이에는 힘이 作用하며, 이 힘은 數値解析의인 方法에 依해 求해진다고 알려져 있다.¹⁰⁾

導體에 作用하는 外壓 (P_2)와 Duct에 作用하는 內壓 (P_1)에 의하여 導體와 Duct에 應力이 發生하며, 이 應力의 最大値는 各各 다음식 13과 式 14와 같이 나타난다.

導體의 경우 :

$$\sigma_{tmax} = \frac{-2P_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \quad (13)$$

Bus Duct 의 경우 ;

$$o_{lmax} = \frac{P_1 (r_2^2 + r_1^2)}{r_2^2 - r_1^2} \quad (14)$$

- 여기서 r_1 : Duct 의 內半徑
- r_2 : Duct 의 外半徑
- r_1' : 導體의 內半徑
- r_2' : 導體의 外半徑

따라서 IPB 의 경우, 短絡時에 導體와 Duct 가 파손되지 않기 위해서는 위에서 구한 最大應力에 견딜 수 있도록 導體 및 Duct 의 材料와 두께를 적절하게 선정하여야 한다. 물론 Duct 의 두께가 두꺼울수록 最大應力은 작아지 力學的으로 安定되지만 경제적인면을 고려하여 適定한 두께로 設計하여야 하겠다.⁹⁾

segregated type 이나 non-segregated type 에서는 相間거리가 短絡時의 電磁力을 고려하여 設計되지만 IPB 의 경우에는 相間거리를 決定하는 主要素는 주로 앞에서 언급한 熱放散이라고 할 수 있겠다. 특히 三相의 導體가 하나의 Duct 로 둘러싸인 三相 1 相형에서는 相間에 發生하는 電磁力이 매우 커짐으로 특히 유의하여야 하겠다.¹⁰⁾

4 結 言

Bus way 의 設計時에는 使用電壓, 電流에 따라 導體, 支持物, Duct 等の 구조나 材質을 적절히 選定하여야 하며, 특히 大電力 系統에서는 表皮效果, 近接效果 및 短絡時에 發生하는 電磁力과 銅損, hysteresis 損에 의한 溫度上昇等を 充分히 고려해야 한다. 이외에도 수송, 설치, 운전, 보수 및 주위환경 조건도 고려해야 하겠다.

Bus way 에 관한 技術은 低, 高壓에서는 그리 문제가 되지 않으나 特高壓, 超高壓의 大電力用에서는 상당한 技術을 要하므로 우리나라에서도 2,000 年代의

800 [KV] 급 送電計劃에 발맞추어 이分野에 관심을 갖고 계속적인 研究를 並行하여야 하겠다.

參考文獻

- 1) 'Switchgear Manual' - 6th ed. - (1978) Brown Boveri & C/E
- 2) Smeaton, 'Switchgear and Control Handbook' McGraw-Hill
- 3) IEEE 'Guide for Calculating Losses in Isolated Phase Bus' ANSI C 37. 23. (1970)
- 4) H.W. Graybill & J.A. Williams, 'Underground Power Transmission with Isolated Phase Gas-Insulated Conductors' IEEE PAS-89 (1970)
- 5) Peter Craneu, 'Underground Power Transmission' John Wiley & Sons (1979)
- 6) M.P. Jain & L.M. Ray, 'Proximity Effects in Cylindrical Bus Enclosure' IEEE PAS-92 (1973)
- 7) Moudood A. Aslam, et. al, 'Forced Air-cooled Isolated Phase Experiment Verification of design Parameter', IEEE PAS-92 (1973)
- 8) R.H. Albright .et. al. 'Isolated Phase Metal Enclosed Conductors for Large Electric Generators' IEEE Trans PAS Vol. 81 (1963)
- 9) '전기공학 핸드북' 대광서림
- 10) J.C. Cronin, et. al. 'Basic Design Characteristic of a three Conductor Gas-insulated Power Transmission System' IEEE PES SUMMER MEETING (1973)
- 11) Wolfram Müller, 'Siemens Review' Vol. XLIII No. 3 (1976)