技術解說

酸化亞鉛 바리스터의 技術的 現況과 展望

吳 明 煥

韓國科學技術研究所 電子工學研究部 責任研究員(工博)

1. 序 言

바리스터(varistor)라고 하는 것은 電壓의 變化에 敏感한 非直線抵抗體로서 『電壓에 대한 variable resistor』라고 불리워질 수 있다.

즉, 어느 臨界電壓 이하에서는 素子의 電氣的 抵抗이 매우 높고(10^{10}〔Ohm〕 혹은 그 이상) 絕緣體의 性格을 갖고 있으나, 臨界電壓(혹은 varistor電壓이라고도 불리운다)에 가까운 外部電壓이 印加되면 自體의 電氣的 抵抗이 급격히 낮아져서 導電性을 나타내며, 通電電流가 크게 증가하여도 素子의 兩端間에는 電壓降下가 거의 증가하지 않는 특성을 갖고 있다.

지금까지 사용되어온 바리스터의 종류에는 Se varistor, Cu_2O varistor, Si varistor 및 SiC varistor 等이 있으나 異常電壓 surge 吸收用으로는 주로 SiC varistor가 이용되어 왔다. 그러나 SiC varistor는 電壓非直線特性(電壓變化率에 對한 電流變化率의 크기)이 완만하고 外部의 溫度變化에 따르는 特性變化幅이 크며 衝擊電流에 依한 劣化度가 다소 높아서, surge 吸收用으로 사용하는 경우 制限電壓이 높아지고 따라서 過電壓 保護用으로는 그 役割을 충분히 期待하기가 곤란하였다.

한편 電壓非直線特性이 매우 優秀한 素子로서는 zener diode가 흔히 사용되지만 junction semiconductor이므로 大電流의 surge에 대한 耐久力이 약하여 그 利用範圍가 低壓用 電子回路에 局限되어 있는 實情이다.

最近 電子技術의 進步와 아울러 半導體(IC, transistor, thyristor 等) 利用分野가 廣範圍하게 擴大되어감에 따라, 이들 高價의 態動素子들을 各種 過電壓 surge로부터 保護하기 爲하여 SiC varistor, 電力用 condenser, gap式 避雷器 等이 利用되어 왔으나 電壓非直線性, 容量選定과 價格問題, 放電時間遲延 等의 理由로 因하여 여러 가지의 技術的 難關에 當面하여 왔다.

그러나 1970年代에 새로이 實用化 되기 시작한 金屬酸化物 ceramic varistor 특히, 酸化亞鉛(ZnO)을 主成分으로 한 varistor는 從來의 各種 varistor 素子類의 缺點을 補完시킨 獲期的인 surge 吸收材料로 認定되고 있으며, 美國과 日本을 爲始한 先進諸國에서는 이 分野에 대한 基礎研究 및 應用技術開發에 큰 關心을 보이고 있다. ZnO varistor는 一般 junction-type의 半導體와 달리 製造技術이 그다지 어렵지 않고 ceramic semiconductor이므로 製造原價가 低廉하며(zener diode의 10～20%程度) 機械的 構造가 堅固하여 量產體制가 可能하다. 電氣的 特性은 SiC varistor와 zener diode의 長點을 모두 갖추고 있으며 특히 surge에 대한 耐久力과 應答速度 및 制限電壓 特性面에서 볼 때 매우 優秀하다

고 判明되었다.

本稿에서는 酸化亞鉛을 主成分으로 한 ZnO ceramic varistor의 物性 製造方法, 電氣的 特性 및 利用方法 等에 關하여 調査해 보고자 한다.

2. 物性과 導電機構

그림 1은 ZnO varistor의 物性的 構造를 說明해 주고 있다. 양쪽의 電極板 사이에 놓여진 바리스터의 微細한 內部構造(internal microstructure)를 살펴보면 5~30 micron[1] 정도의 크고 작은 ZnO 導電性粒子(conductive grain)들이 두께가 100~10,000 〔Å〕[2][3] 정도의 非晶質粒界(amorphous intergranular phase)를 갖는 高抵抗 薄膜體에 의하여 둘러 쌓여져 있는 形態를 보이고 있으며, 이들 粒界物質은 Bi_2O_3와 Sb_2O_3 等의 添加物들이 燒結時에 溶融되면서 化學的으로 結合된 polycrystal 半導體임이 實驗的으로 밝혀진 바 있다.[4][5]

또한 ZnO粒子의 固有抵抗은 數ohm-cm 정도로써 粒子間의 絕緣層(interface barrier와 intergranular layer의 resistive film)의 그것에 비하면 10~10倍 정도에 불과한 것으로 밝혀져, 結局 varistor로서의 電壓-電流 非直線性에 큰 影響을 미치는 것이 粒子間의 界面絕緣層이라고 하는 主張을 뒷받침하여 주고 있다.

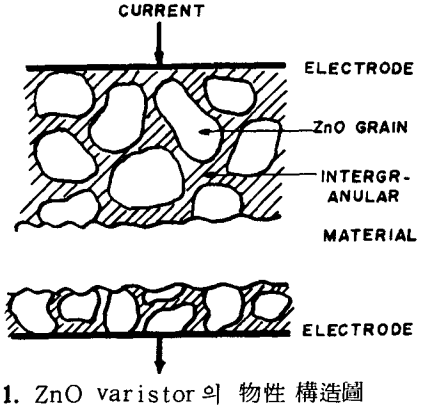


그림 1. ZnO varistor의 物性 構造圖
Fig. 1. Schematic depiction of the microstructure of ZnO varistor.

그림 2는 전술한 바와 같은 ZnO varistor의 物性的 構造를 바탕으로 導電特性을 理論的으로 解析하기 위하여 假定한 導電體와 絕緣體(혹은 絕緣性 半導體)의 MATRIX이며, 이와 같은 導電模型을 通하여 많은 學者들이 varistor 素子의 電氣的 特性을 究明하고자 노력하고 있다.

지금까지 研究發表된 導電機構(conduction mechanism)의 解析結果로서는 初期에 粒子層의 두께를 1micron (10,000 Å) 정도라고 推定했던 Matsuoka[2]의 S. C. L. C. (space-charge limited - current) 理論과 粒界層 두께를 100〔Å〕 이하라고 主張한 Levinson 및 Philipp[3]의 direct tunneling 假說(poole frenkel conduction + fowler nordheim tunneling), 그리고 Levine의 interface state 및 Schottky barrier 存在理論 等이 臺頭되었다.

또한 1970年代 後半에는 Bernasconi[6] 의 interface deep state 假定과 surface tunneling 可能性을 基礎로 한 理論的 導電機構 및 Eda[7]의 複合性 導電機構 model, 그리고 Hower와 Gupta[8]의 修正된 Levine barrier 理論等 10餘가지의 導電學說들이 發表되기도 하였다.

이들 導電理論의 解析的 model에 따르면

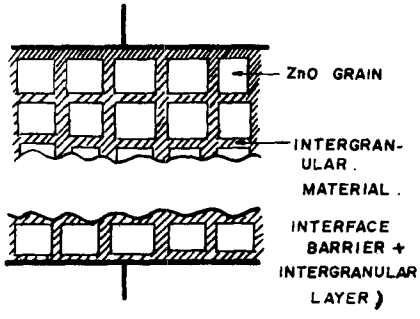


그림 2. ZnO varistor의 導電機構 解析模型
Fig. 2. Block model of ZnO varistor structure.

ZnO 粒子와 粒子間에는 P-N 接合層이나 MIS (metal-insulator-semiconductor)層 또는 SIS (semiconductor-insulator-semiconductor) 格子 matrix가 存在하며, 하나의 barrier間 varistor 電壓은 約 3～4 〔V〕[9][10] 그리고 靜電容量은 50〔nF/㎠〕[11] 정도로 推定된다.

3. 製造方法

酸化亞鉛 바리스터의 製造過程은 一般電子窯業材料의 工程과 類似하다.

그림 3에 圖示된 바와 같이 ZnO 粉粒을 主成分(約 95 % Mol.～97 % Mol)으로 하여 여기에 Bi_2O_3, La_2O_3, Pr_6O_{11}, MnO (또는 MnO_2), Co_3O_4 (또는 CoO), Cr_2O_3, SnO_2, SiO_2 TiO_2, Sb_2O_3 等 여러 가지의 添加物을 몇가지 定量混合시키고 600℃～800℃에서 1～2 時間 假燒한다. 假燒된 粉粒은 polyglycol과 같은 有機物 結合劑를 使用하여 混式混合시키고 適切히 乾燥한 다음 分碎하고 組粒한 후 加壓成型한다.

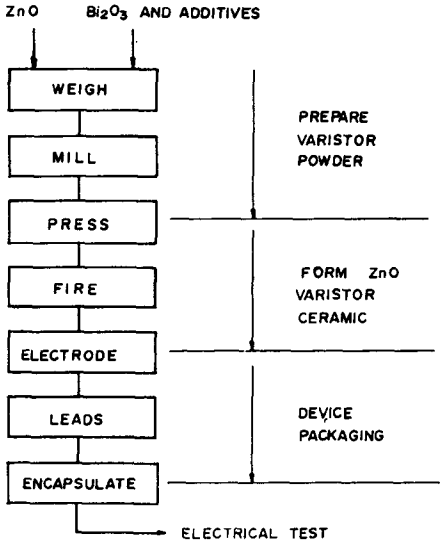


그림 3. ZnO 'varistor의 製造工程
Fig. 3. Simplified flow diagram for the fabrication of ZnO varistors.

燒成工程은 흔히 電氣式 加熱爐속에서 이루어지며, 温度上昇率, 燒成雰圍氣, 燒成温度와 時間 等은 바리스터 添加物의 種類에 따라 약간씩 差異가 있으나 보통 1,200℃ 以上의 高温으로 大氣中에서 約 1時間 정도 행한다. 燒結後의 冷却은 加熱爐속에서 自然空冷式으로 하는 것이 보통이지만, 경우에 따라 外部空氣나 窒素가스 等을 循環시켜서 冷却雰圍氣를 變化시키거나 急冷시킬 수도 있다.

燒成이 끝난 바리스터 素子는 앞뒤 表面을 適切히 研磨한 다음, 眞空알미늄蒸着이나 銀塗또는 銅메탈리콘 等으로 電極處理를 하며 리이드선을 付着시킨 후 epoxy 또는 絕緣途裝을 實施한다.

4. 電氣的 特性

그림 4에는 Kemenade[9]와 Mahan[10]이 微小電極을 사용하여 조사측정한 ZnO 두 粒子間의 電壓-電流特性이 나타나 있다. Zener diode와의 差異點은 그 特性이 兩方向 對稱的이며, 電氣的인 stress를 가하기 전에는 V-I 特性이 順方向이나 逆方向이냐 간에 거의 동일한 값을 갖는다는 點이다.

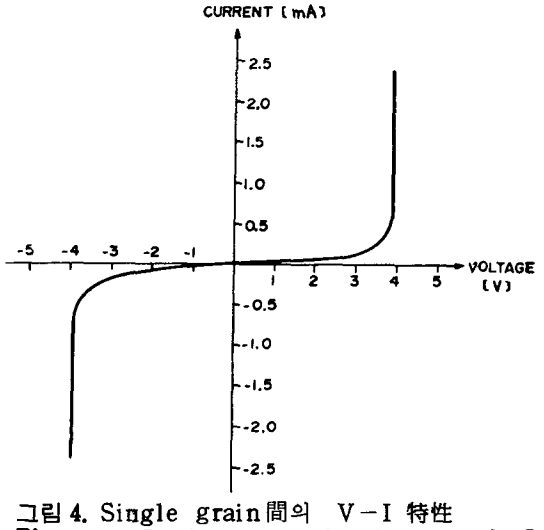


그림 4. Single grain間의 V-I 特性
Fig. 4. V-I characteristics between ZnO single grains.

그림 5의 對數方眼紙에 圖示된 ZnO varistor의 電壓-電流特性曲線으로부터 다음과 같은 代表的 性質을 밝혀낼 수 있다.

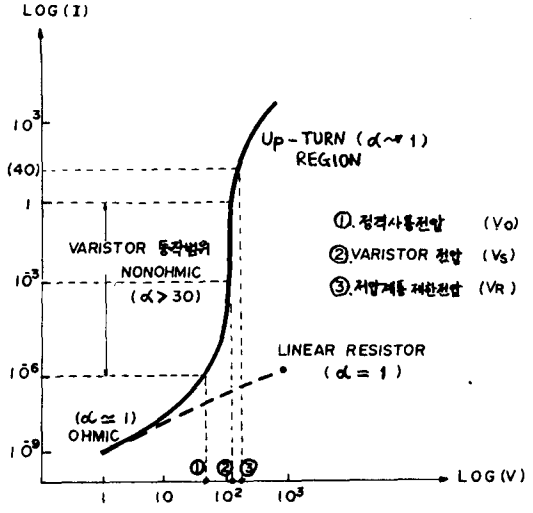


그림 5. LOG (V) -LOG (I)의 變化特性
Fig. 5. LOG (V) -LOG (I) characteristics of ZnO varistors.

1) 低電壓 및 低電流區間에서는(通常 10^{-9} Amperes 以下) linear resistance의 Ohmic 特性을 나타낸다.

2) 一般 使用電壓(또는 定格電壓)에서는 pre-breakdown 特性을 나타내며 V-I 特性은 non-ohmic하게 되고,

3) 導電電流가 10^{-6}~1〔A〕 구간에서는 電氣的인 breakdown 現象을 일으키고 이 구간은 흔히 varistor 動作範圍라고도 부르며 電壓-電流特性은 극히 非直線的으로 되어, varistor 電壓(電流密度 J=1 mA/㎠ 附近에서의 端子電壓)에 도달하면 $I = K \cdot V^{\alpha}$ 또는 $V = K' \cdot I^{n}$의 關係式을 만족하게 된다. 위의 첫번째 關係式에서 常數 K는 varistor 材料의 種類, 크기, 燒成溫度 等에 따라서 決定되고 非直線指數 α는 zener diode와 비슷한 30~50 程度의 높은 값을 갖는다. 또한 두번째 관계식에서 n의 값은 $1/\alpha$에 상응하므로 1/50~1/30 정도로 되며, varistor의 導電電流 I가 크게 增加하여도 端子電壓 V는 거의 增加하지 않고 있음을 나타내어 준다.

4) 導電電流가 10~1000〔A〕 정도로 되면 電壓-電流特性은 또다시 Ohmic 特性을 나타내며 非直線指數는 $\alpha \simeq 1$~2 정도로 減少하고 ZnO 導電粒子 自體의 抵抗率을 갖는 linear resistance로서 動作한다.[12] 따라서 varistor는 導電 電流에 對한 電壓制限能力을 잃게 되며, 電流波高値에 比例하는 電壓이 兩端에 나타나게 된다.

一般的으로 600〔Volt〕級 以下의 低壓 配電系統에서는 放電電流가 40〔Amperes〕[13] 정도일 때의 varistor 兩端子電壓을 殘留電壓(residual voltage) 또는 制限電壓(clamping voltage)이라고 呼稱하며 varistor의 保護能力에 대한 評價要素로서 흔히 製品仕樣書에 明示된다.

그림 6에는 각종 回路保護用 varistor의 電壓-電流 非直線特性을 直線抵抗體의 그것과 比較할 수 있도록 圖示하였다.

위의 特性比較圖에서 볼 수 있듯이 SiC varistor는 制限電壓 保護能力이 不足하고 電力用 zener diode는 電流耐量이 작아서 高電壓用이나 大電流用으로는 사용에 不適合하다.[14]

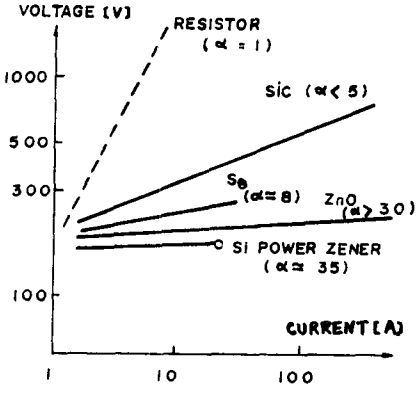


그림 6. 각종 Varistor의 電壓-電流 特性比較
Fig. 6. V-I characteristics of various varistors.

그림 7 에는 ZnO varistor의 電氣的 等價回路를 圖示하였다. Varistor를 商用周波數 혹은 그 以上의 交番周波數를 갖는 交流回路에 사용할 때에는 前項의 物性論的 構造에서 밝힌 ZnO 單位粒子間의 靜電容量으로 인한 素子의 充電電流를 勘案하여 回路를 設計하여야 한다.

現在까지 實驗的으로 밝혀진 硏究結果에 따르면 ZnO粒子間의 靜電容量은 粒界絕緣物質의 誘電常數(dielectric constant) 및 實效 粒界薄膜두께(bias電壓에 따라 變化함)와 密接한 關係가 있으며, varistor의 誘電常數는 그림 8에 圖示된 바와 같이 測定周波數와 温度에 따라 變化하지만 粒界薄膜層의 두께를 勘案할 때 1〔KHz〕에서의 實際 誘電率은 $\varepsilon_r \simeq 16$ 程度로 推定된다.[3][15]

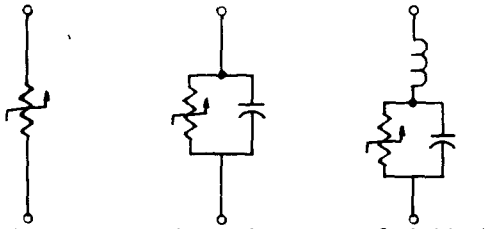


그림 7. 入力信號에 따른 電氣的 等價回路
Fig. 7. Equivalent circuit corresponding to various input voltage.

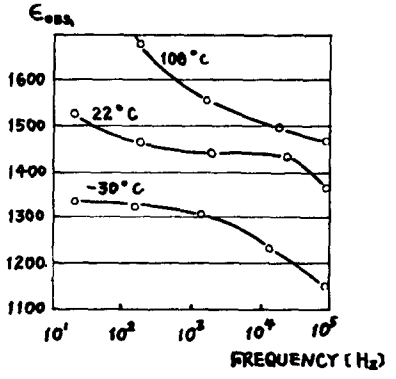


그림 8. 温度 및 測定周波數에 따른 誘電常數의 變化
Fig. 8. Observed dielectric constant of a ZnO varistor.

그림 9 는 ZnO varistor 製造時의 燒結温度 變化에 따른 電壓-電流 非直線指數(α)와 電流密度 J = 1mA/㎠ 에서의 varistor 電壓 變化特性으로서 이들의 값은 燒結温度(sintering temperature)가 1350℃를 超過하면 急速히 減少한다고 밝혀져 있다.[16] 또한 一部 實驗結果에 따르면 非直線性은 주로 MnO와 Co_3O_4 添加酸化物의 成分比에 큰 影響을 받으며, varistor의 燒成雰圍氣 및 時間 그리고 冷却條件에도 關係된다는 것이 物性硏究陣에 의하여 主張된 例도 있다.[7][17] 特히 varistor의 試料두께가 어느 臨界値(約 0.5 ㎜ 程度) 以下로 되면 非直線係數와 varistor 電壓이 急激히 低下된다고 하는 實驗結果는 매우 興味있는 事實이다.[18]

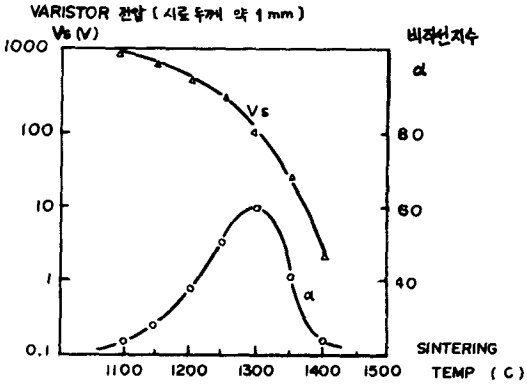


그림 9. 燒結温度－varistor 特性의 變化
Fig 9. Varistor characteristics vs. sintering temperature.

5. 安安化 處理와 製品의 壽命

一般的으로 燒結型 varistor의 경우에는 製造한 直後에 測定한 初期 電壓-電流特性과 2次 혹은 3次 測定結果 사이에는 약간의 特性差異가 발생하며 $10^{-10} \sim 10^{-9}$〔Amperes〕 정도의 小電流領域에서는 50%～100%, 그리고 $10^{-7} \sim 10^{-6}$〔Amperes〕 부근에서는 10～30%에 가까운 電流測定偏差가 생긴다.[18]

이와 같은 特性偏差의 원인은 아직까지 확실하게는 규명되지 않았으나 粒子間 絕緣薄膜의

一時的 分極現象(polarization)이라고 보는 견해가 많으며[19] 다른 한편으로는 燒結時에 形成된 이들 絕緣薄膜들 중 너무 얇거나 약한 부분들이 測定 도중에 破壞되어 새로운 導電路를 形成한다고 하는 주장도 발표된 바 있다.

따라서 SiC varistor의 경우에는 실제로 生產工場에서 電極處理를 하고 나면 試料의 特性試驗을 하기 이전에 電氣的 衝擊을 가하여 적절한 安定化處理(electrical conditioning 혹은 formation treatment)를 시키는 것이 보통이었다.[20]

ZnO varistor의 경우에는 이와 같은 電氣的 衝擊에 의한 特性安定化處理에 關하여 별로 발표된 바는 없으나, 일부 實驗結果[18]에 의하면 持續時間 20〔μS〕 정도의 짧은 衝擊電流(impulse current)를 15～30秒 간격으로 3～10回 인가한 후 사용하는 것이 小電流範圍에서 보다 安定化된 電壓-電流特性을 얻을 수 있다.

한편 varistor의 電氣的 壽命問題에 관해서는 흔히 그 使用壽命의 有效期間을 『varistor 電壓이 規定値의 ±10% 以上으로 經年變化될 때까지』라고 定義하고 있다.

ZnO varistor도 半導體의 一種이므로 定格

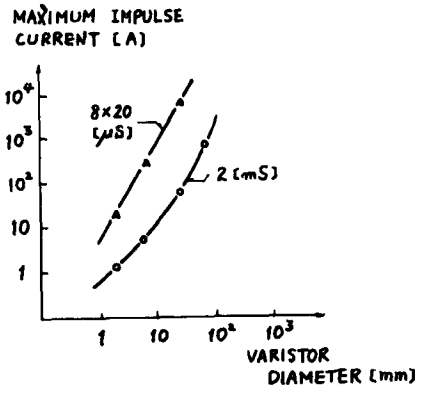


그림 10. Varistor 直經 對 最大許用 放電電流의 關係

Fig. 10. Maximum permissible surge current Vs varistor diameter.

許用電流最大値(그림 10과 그림 11 참조)를 超過하는 衝擊電流를 흘리면 그 電氣的 特性이

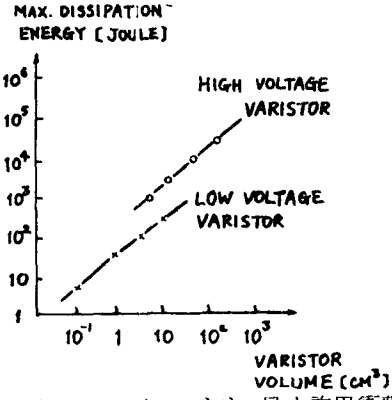


그림 11. Varistor의 크기와 最大許用衝擊 energy의 關係

Fig. 11. Maximum impulse energy Vs. varistor volume.

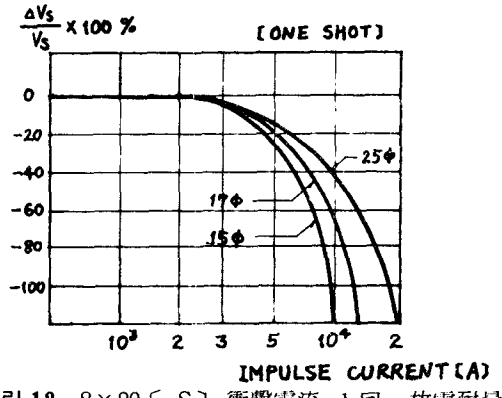


그림 12. 8×20〔μS〕 衝擊電流 1回 放電耐量特性

Fig. 12. Variation of Vs〔1mA〕 due to impulse current (8×20 μS).

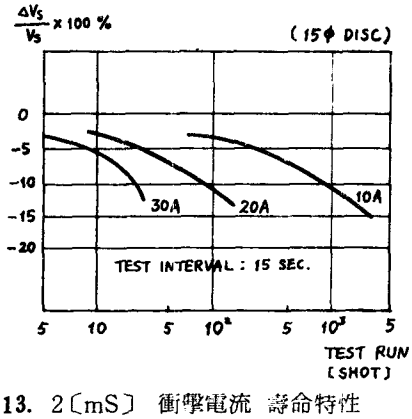


그림 13. 2〔mS〕 衝擊電流 壽命特性

Fig. 13. Variation of Vs〔1mA〕 due to impulse current 〔2mS〕.

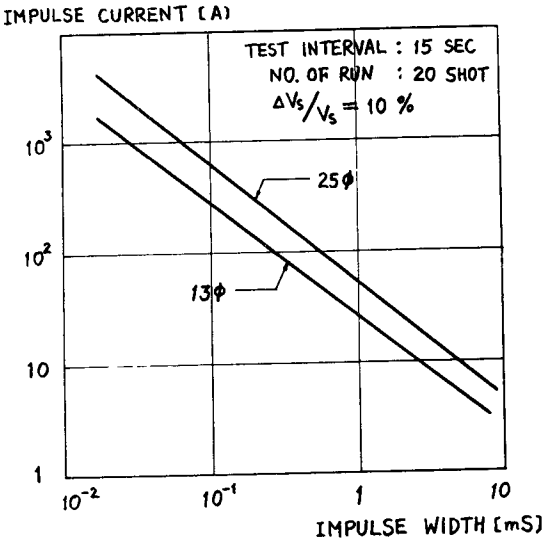


그림 14. 衝擊電流의 許容波高値와 持續時間과의 關係

Fig.14. Pulse width dependence of discharge current withstand.

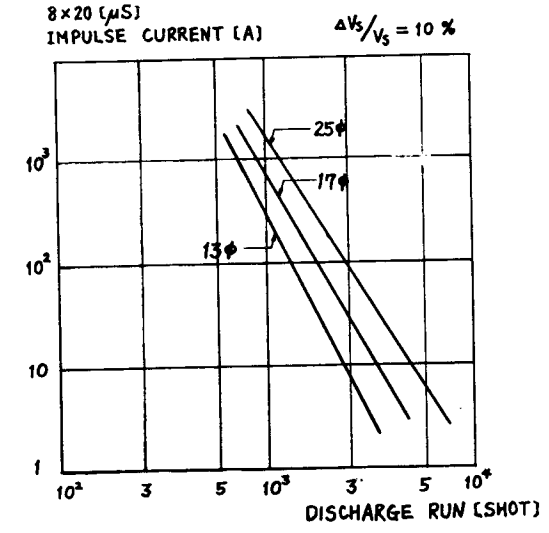


그림 15. 衝擊電流波高値와 許用放電回數의 關係

Fig. 15. Impulse current amplitude Vs. permissible discharge runs.

劣化되며 非直線性이 低下되고 定格電壓에서의 leakage current (보통 10^{-6} Amperes 정도)가 增加하여 varistor 電壓과 制限電壓이 變化한다.[21][22]

그림 12와 그림 13은 衝擊電流波形이 各各 8×20〔μS〕 exponential wave일 때와 2〔mS〕 rectangular wave 일 때의 varistor 放電耐量特性 및 壽命特性을 圖示한 것이며, 이로부터 許用衝擊電流의 波高値와 衝擊持續時間 및 反復印加回數와의 函數關係를 나타낸 것이 그림 14와 그림 15이다.

6. 製品의 利用方法

ZnO varistor의 주요 使用目的을 열거하면,

1) 落雷나 開閉 surge로부터 基因하는 回路의 異常過電壓 吸收用

2) 各種 半導體素子의 保護用

3) 機器의 電壓安定化用

4) 繼電器 및 遮斷器의 接點保護用

等으로 區分할 수 있으며, 그림 16에서 볼 수 있는 바와 같이 入力電源側 또는 保護對象素子와 繼電器接點間에 並列로 접속하여 過電壓 侵投時에 스스로 surge放電電流를 吸收하므로써 varistor素子의 規定된 制限電壓(clamping voltage) 以下로 回路의 電壓上昇을 抑制한다.

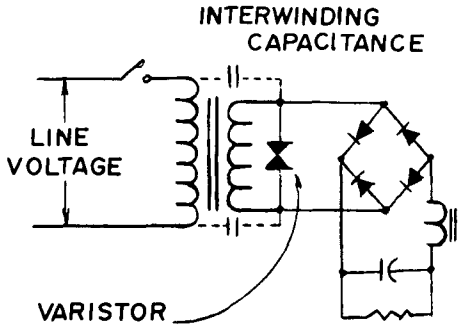
그림 17에는 10,000〔Volt〕급 雷surge가 小型變壓器의 1次側에 侵入했을 경우의 2次側 回路制限電壓特性을 나타내었으며, 그림 18에는 繼電器의 magnet coil inductance로 인한 過渡電壓上昇으로부터 回路遮斷時의 接點保護 surge 吸收特性을 圖示하였다.

이와 같이 ZnO varistor를 異常過電壓 吸收素子로 사용할 때에는 다음과 같은 技術的인 사항에 留意하지 않으면 안된다.

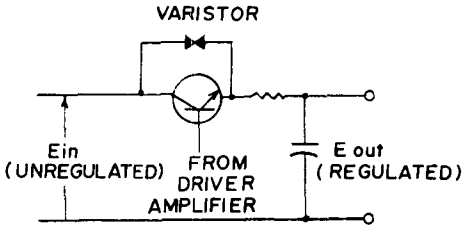
첫째, varistor의 製造規格別로 表示되어 있는 最大許用回路電壓 以上의 常時定格電壓에서는 사용하지 말 것.

둘째, 保護對象機器나 回路의 絕緣協助에 부합하는 制限電壓을 계산해 본 후에 적절한 素子를 선택할 것

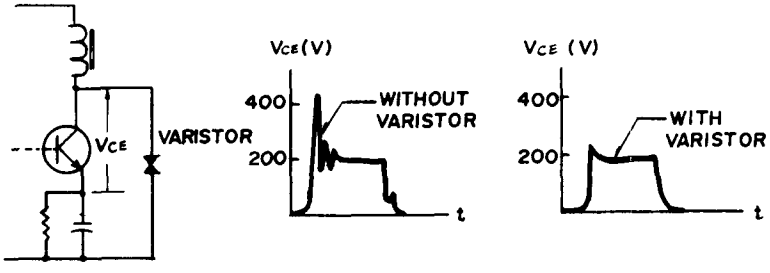
셋째, 商用周波數 以上의 高周波回路에 사용할 때에는 素子의 靜電容量과 誘電體損失을 고



(a) Trans secondary components protection.

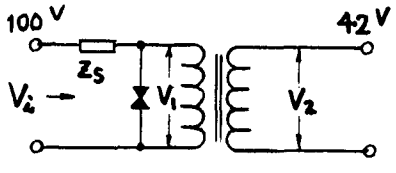


(b) Driver regulation.

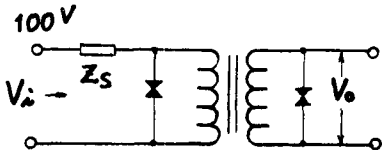


(c) Transistor protection from overvoltage transients

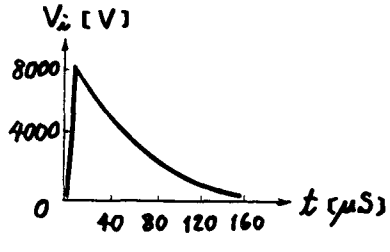
그림 16. 低壓用 ZnO varistor 應用方式의 例
Fig 16. Applications of ZnO varistor for low voltage circuit protection.



(a) With primary varistor only.



(b) With primary and secondary varistors.



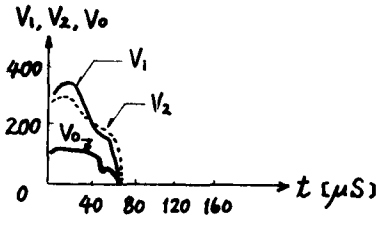
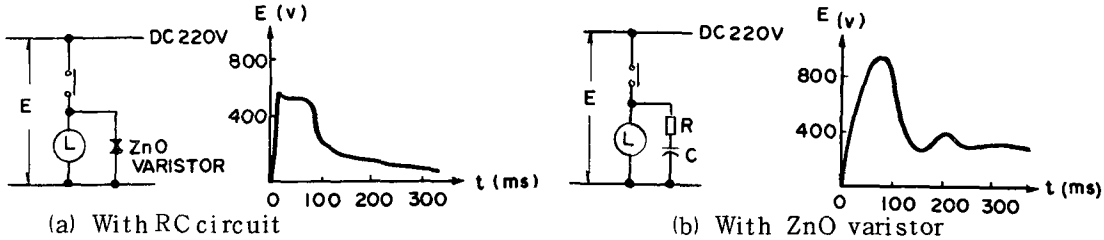


그림 17. 雷 surge 吸收効果(小型 變壓器)
Fig. 17. Secondary protection from primary lightning surge.

려하여 回路를 設計할 것.

네째, 回路의 surge特性 impedance가 낮고 衝擊電流의 波高値가 varistor의 放電耐量보다 클 것으로 豫想될 때에는 적절한 2重保護對策(例 : 放電電流 fuse의 使用)을 세울 것.

다섯째, 適用溫度가 定格使用溫度를 超過하



(a) With RC circuit (b) With ZnO varistor

그림 18. 繼電器의 接點保護特性
Fig. 18. Contact protection and spark suppression.

지 않도록 環境條件을 檢討할 것.

여섯째, varistor의 直並列接續時에는 並列係數(parallel coefficient)[13]를 고려하여 等價合成容量을 算定한 후에 素子를 選擇할 것 等이다.

7. 今後의 研究開發過程

ZnO varistor는 1970年代 初에 實用化되기 시작한 새로운 ceramic semiconductor 로서 그 研究開發過程을 紹介하면 그림19와 같다. 이들중 varistor 素子의 低壓化가 가능했던 것은 surge 吸收能力을 低下시키지 않고도 동일한 燒結溫度에서 ZnO 粒子의 成長을 促進시키는 새로운 添加物(예를들면 Sb_2O_3에 代身하는 TiO_2 添加劑의 사용 等)의 개발에 基因하였다. 또한 素子의 高壓化 내지는 高energy surge 吸收能力의 향상을 위하여 希土類添加物(La_2O_3, Pr_6O_{11}, Co_3O_4 等)[22] 의 역할에 관한 技術開發研究가 이루어졌으며, varistor 自體의 製造工程을 改善하여 이른바 有効導電面積($V_{1m}A$ ± 3% 以內의 varistor 電壓特性을 갖는 導電面積)을 全電極面積의 80% 以上으로 향상시키는데 成功하였다.[23]

그리하여 1970年代末에 이르러서는 單位素子當 30,000〔Joule〕의 surge 耐量特性을 갖는 gapless 避雷器用 大型素子의 開發이 可能하게 되었고, varistor電壓의 素子두께에 대한 比率($V_{1m}A$／㎜)도 낮아지게 되어 從來의 1〔㎜〕當 200~300〔Volt〕로부터 100〔Volt〕정도에 이르기까지 低壓化 되었다.

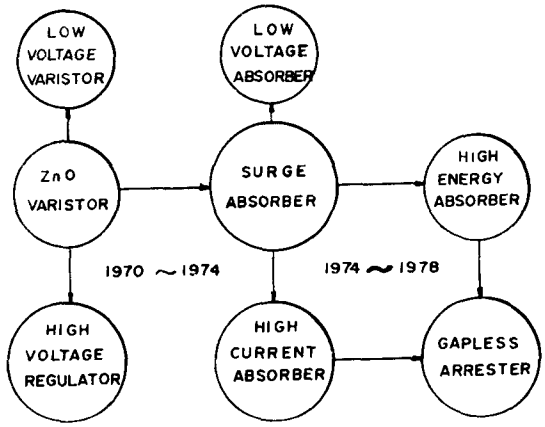


그림 19. ZnO varistor의 技術開發過程

앞으로 1980年代의 研究課題로서는 아직까지 完全한 解析的 模型이 確立되지 아니한 物性的 構造, 導電機構, 劣化機構, 等에 關한 理論的 解析을 위시하여, 보다 높은 energy 密度를 갖는 素材의 開發, 大電流 領域에서의 電壓-電流 非直線性의 向上, 製品의 信賴度提高 等 여러 가지의 問題點이 남아 있다.

8. 結　　言

1970年代 새로이 出現한 ZnO varistor는 電子窯業分野의 Ferrite, Barium titanate 等과 함께 獲期的인 技術的 發展을 이루어왔으며, surge에 대한 保護素子로서 電氣的 特性이 安定되어 있고 異常過電壓 吸收能力이 優秀하며 값이 저렴한 長點들을 갖고 있기때문에 앞으로

는 그 利用分野가 크게 擴大될 것으로 展望된다.

各種 家庭用 電氣機器의 高電壓電流 吸收裝置로서 뿐만 아니라 電話器나 交換臺의 雜音抑制素子 및 送配電 電力系統의 gapless 避雷器素子로서와 電力用 半導體保護用 等 그 使用方法과 用途에 맞추어 製品의 開發도 多樣해질 것이다.

끝으로 우리 나라에서도 이와 같은 ZnO varistor 의 基礎的 硏究 및 應用技術의 開發을 위해서는, 學界와 硏究所 및 産業界가 共同으로 이 分野의 學問的, 技術的, 經濟的 關心과 함께 專門的으로 硏究活動을 支援함이 바람직할 것으로 생각된다.

參 考 文 獻

1. J. Wong, Barrier voltage measurement in metal oxide varistors." Journal of Applied physics, 47 (11), p. 4972 (1976)
2. M. Matsuoka, "Nonohmic properties of zinc oxide ceramics." Japanese jour - nal of Applied physics, 10(6), p. 739 (1971).
3. L. M. Levinson and H. R. Philipp, "The physics of metal oxide varistors. Journal of Applied physics, 46 (3), p. 1332 (1975).
4. M. Inada, "Crystal phases of nonohmic zinc oxide ceramics." Japanese Journal of Applied physics, 17(1), p. 1 (1978).
5. D. R. Clarke, "The microstructural location of the intergranular metal-ox - ide phase in a zinc oxide varistor." Journal of Applied physics, 49(4), p. 2407 (1978).
6. J. Bernasconi, S. Strassler, B. knecht, H. P. Klein and A. Menth, "Zinc oxide based varistors : A possible mechanism." solid state Communications, 21, p. 867 (1977).
7. K. Ede, "Conduction mechanism of non -ohmic zinc oxide ceramics." Journal of Applied physics, 49(5), p. 2964(1978).
8. P. L. Hower and T. K. Gupta, "A bar - rier model for ZnO varistors." Journal of Applied physics, - ( ), p.( ).
9. J. T. C. van Kemenade and R. K. Eijnthoven, "Direct determination of barrier voltage in ZnO varistors." Philips Research Report, M. S. 10. 245 (1978).
10. G. D. Mahan, L. M. Levinson, and H. R. Philipp, "Single grain junction studies of ZnO varistors - Theory and experiment." Applied physics Letter, 33(9), p. 830 (1978).
11. M. Buchy and M. Salmon, "Etude des mecarismes de conduction non line - aire dans les composants passifs type varistance." Thomson - CSF Report 75-7-1611 (1978).
12. L. M. Levinson and H. R. Philipp, "High - frequency and high-current studies of metal oxide varistor." Journal of Applied physics, 47(7), p. 3116 (1976).
13. S. Nozawa and K. Fujioka, "Z - trap and its application (part 2)." Fuji Review, 50 (2), p. 118 (1977).
14. J. D. Harnden, F. D. Martzloff, W. G. Morris, and F. D. Golden, "Metal-oxide varistor : a new way to suppress transients." Electronics, 45, p. 91 (1972).
15. L. M. Levinson and H. R. Philipp, "AC properties of metal-oxide varistors."

Journal of Applied physics, 47 (3), p. 1117 (1976).

16. N. Ichinose and Y. Yokomizo, "High-performance ceramic varistor element - TNR." Toshiba Review, 27 (12), p. 1167 (1972).
17. M. Graciet, R. Salmon, M. Hildebrandt and F. Buchy, "Evolution et role des constituants chimiques au cours du processus de fabrication des varistances a base d'oxyde de zinc." Rerue de physique Appliquee, 13 (2), p. 5 (1978).
18. M. H. OH, "Contribution a l'etude d'une varistance a base d'oxyde de zinc en vue de son application a la realisation d'un parafoudre haute-tension." PHD Thesis Report, 661-1979. University of Paul Sabatier (1979).
19. S. Hieda, M. Kobayashi, N. Furuya, N. Kondo, K. Mitani and T. Aizawa, "Gapless lightning arresters for power systems." Meiden Review, 11 (6), p. 69 (1974).
20. 日本 避雷器 專門委員會 : 避雷器 特性要素に關する最近の諸問題. 電氣學會 技術報告, 第68號, p. 26 (1965).
21. C. G. Shirley and W. M. Paulson, "The pulse-degradation characteristic of ZnO varistors." Journal of Applied physics, 50 (9), p. 5782 (1979).
22. S. Nozawa, "Fuji Z-trap (Ceramic Surge Absorber)" Fuji Research Report, UDC 621. 316. 933. p. 464 (1977).
23. 松岡・江田, "高壓・高エネルギー用 ZNR ーサージアブソーバ" 電子材料, p. 57 (1977年2月).