UDC 621.315.61 : 620.1.001.8 : 621.316.57

論 文

61-B25

有機物消弧材料の評価試験についての一研究

正 員 金 東 海 (上智大)

正 員 神 谷 利 雄 (上智大)

1. ま え が き

負荷開閉器やカットアウトスイッチには、多くの絶縁材料が耐弧材や消弧材として用いられている。アスベストセメント板、ジルコン磁器、ファイバなどは、古くからよく用いられた耐弧材料であり、油、水、空気、SF₆などは良く知られた消弧材料である。これらの材料は耐弧材または消弧材の単独の役目を受け持つことが多かった。しかし、近年高分子化学の発達によってメラミン樹脂、尿素樹脂、アクリル樹脂などのように消弧力の強い材料が多く産出され、消弧材・兼耐弧材として用いられるようになった。これらの材料の耐弧材としての適否を判定するのに、耐アーク試験法が確立されているが、消弧材としての適否の選択は経験に頼っている。すなわち、材料を開閉器に装着して、実際に負荷開閉試験を行ない、定性的に良否の判断を行なっている。ところが良と判断された材料でも、製造ロットの違いや製造時の天候などによってバラツキが大きく、工学的な困難に直面しているのが現状である。従って消弧力を定性的ばかりでなく定量的に判定できるような方法を見出すことは開閉器分野における社会的要請の一つである。このような観点から、基礎研究を行なっている研究者も見受けられる。例えば、Steel 氏⁽¹⁾は円筒形の負荷開閉器モデルを作り、いろいろな材料について実験し、消弧材料の消耗量、再起電圧、引っぱり強度、膨脹率、粘度などを測定し、消弧過程を化学的に分析している。また、Niemeyer 氏⁽²⁾はアークと消弧材料間のエネルギー授受に着目し、物理的にエネルギー方程式や運動方程式、質量保存式などを導き出している。更に Hettwer 氏⁽³⁾は消弧材料から放出されているガスを分析し、消弧に有用なガス成分を明らかにしている。しかし、

各々にその研究成果はあるが、総合的試験法を確立するまでには至っていない。本論文は有機物消弧材料の評価試験法の確立を目指すものである。

消弧材料の試験方法にはいろいろなものが考えられるが、次のような条件を満足することが望ましい。

(1)装置が簡単であること、(2)測定が容易であること、(3)実験に再現性があること、(4)実験回数が少なくすむこと、(5)少量の実験材料ですむこと、(6)計算処理が容易であること、(7)各種材料間の相対比較が容易であること、(8)汎用の負荷開閉器と構造的に相似し、試験結果から実用開閉器の性能の類推が可能なこと、(9)経済的であること、等々である。

著者らは消弧力と相関のありそうな物理量として、次のようなものがあると考えた。すなわち、(イ)アークコンダクタンス、(ロ)アーク時定数、(ハ)再破壊電圧、(ニ)消弧後の材料表面の絶縁抵抗、(ホ)材料の沿面絶縁耐力、(ヘ)放出ガス成分、温度、熱伝導率と導電率である。そこで、これらの項目の内、ひとまず(イ)～(ホ)項目に注目し、これらを測定するのに適した実験装置を試作した。本論文は試験装置の製作過程における諸考察、消弧材料中におけるアーク放電の安定法、再現性の良い実験法、およびアーク放電諸定数の計算法とアーク放電のシミュレーション、最後に諸試料についての試験結果を記述したものである。

2. 実験装置および実験

〈2・1〉 アーク放電の安定化 試験装置は再現性があり、電極材料の影響を受けずに、その特性を測定でき、かつ試験結果が汎用の開閉器の実負荷試験との相対比較が容易であるような構造が望ましい。実験の再現性を良くするための基本的な重要なことは安定なアーク放電の実現にある。このような要望を実現するための試料の形状は(1)円筒状⁽¹⁾、(2)平板状のものが考えられる。しかし前者はアーク放電の安定化が容易になるなどの利点はあるが、試料の製造が困難で、試験方法も複雑になるので、多種多様な材料を試験する装置としては適当とはいえない。従って、ここでは後者を選択した。

A Method of Experimentally Evaluating Organic Materials for Arc-Quenching Capability. By Tung Hai Chin, Member & Toshio Kamiya, Member (Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Science and Technology, Sophia University).

金 東 海: 正員, 上智大学理工学部
神谷利雄: 正員, 上智大学理工学部

次に電極材料による影響を小さくし、測定条件を一定とするためにアーク放電がある一定のアーク長のもとで測定が行なわれた方がよい。従って、アークの引き延ばし方法を考える必要がある。著者らは次に述べる二つの方法について検討した。

(a) 磁気駆動方式の試験装置 最初にアーク放電の発生と測定を別々の場所で行なう方法を考えた。そのために電極が開いて小電流によるアーク放電を発生させ、この小電流のアーク放電を磁気駆動により一定電極距離の別の場所に移動させ、そこで所定の大電流を重畳させているの測定を行なった。測定を行なう場所は平行に配置した試料の板にはさまれ、またアーク放電を安定させ、かつ、アーク長を一定にする目的で、アーク放電の行く手に試料と同じ材質の安定板が設けられた。しかし、この方法で明らかになったことは、アーク放電を安定板（片側にしか設けていない）に押しつけると、アーク放電はかえって不安定になり、アーク電圧が激しく跳躍することである。このようなアーク放電の振舞は有機物絶縁材料特有のものであり、アスベストセメント板やアルミナ板の如き無機質の材料については見られないので、多分に片側にしか配置されていない安定板からの蒸気放出に起因するものと考えられる。

(b) 非駆動方式の試験装置 上記の装置より、片側に安定板をつけたり、安定板に押しつけたりすることは、アーク放電を安定化させられないことが明らかとなった。次の試みとして、両側に安定板を設け、アーク放電を安定板に押しつけない方式の装置を作った。図1は非押付方式の安定板を用いた装置の概形図

図1 試験装置概形

Fig. 1. A overall view of testing equipment.

である。試料からなる試験片は取扱いの簡易化と資料寸法定数の保持を目的にモジュールに組立ててから装置に固定される。図2はモジュールの詳細図である。この試験片モジュールの中で、アーク放電を発生させて試験を行なうことになる。ここで、装置の操作順序を説明する。最初に電極③⑦を閉じた状態にしておき電極間に 7~10 A の初期電流を流す。次に可動電極⑦を開くと、電極間に“種”となるアーク放電が発生する（以後このアークのことを種アークと呼ぶことにする）。可動電極が所定の位置に到達した時点で種アーク電流に所定の測定電流を重畳して流し、諸測定を行なう。⑧はアーク放電安定板である。安定板が電極に接近し過ぎると、図3(a)の測定電流重畳時のアーク電圧波形が示すようにアークはやはり不安定となる。もし安定板の位置を適正に調整すると、同図(b)のように非常に安定なアーク電圧波形が得られる。以下、本論文の実験においてはこの方式の装置を採用した。このようにして、一組の試験片について上記の放電試験を約 100 回繰返し、材料が消耗して消弧力が低下していく様子を調べた。なお、⑤の空気吹付ノズルは毎回試験後のモジュール内残留ガスを清掃するためのものであり、毎試験後 15 秒間、モジュール内の清掃を行なった。

〈2.2〉 実験装置の詳細

次に本論文における実験装置各部の詳細について説明する。実験装置は電極駆動部分、試験片モジュールと回路部分に分かれており、以下順を追って細部構造並びにそのような構造を採用した経緯について説明する。

(a) 電極構造 電極先端の形状の決定に際しては正負ともに平型、中央凸起型、丸型など種々の形状で実験を行ない、比較検討を行なった。多数の実験結果から次のような理由で図2(c)のような丸型電極が最適であると判明した。

(1) 丸型にすると、アークスポットは大体電極の中

図2 試験片モジュール

Fig. 2. Test piece module, (a) front view, (b) side view, (c) shape of electrode.

図3 消弧室内におけるアーク放電の電圧および電流波形

Fig. 3. Voltage and current waveforms of arc discharge caused in the quenching chamber.

央部で発生する。(2)アークスポットが少し移動してもアーク長はあまり変わらない。(3)電極先端に銅タンゲステン合金を使えば、電極の消耗量が少なく、多数回の実験にわたってアーク長をほぼ一定に保てる。なお、実験結果に及ぼす開極長の影響が大きく、本実験では全開極長 45 mm に対して 0.1 mm の精度で開極長を調整できるよう微調整装置を固定電極側に設けた。すなわち、0.1 mm は 45 mm に対して 0.2% であり、オシロの精度 3% に対して十分な精度である。

(b) 試験片および安定板 試験片モジュールは図2に示す如く、厚さ 3~5 mm の試料を一辺の長さ 120 mm の正方形に加工したものを試験片として組立てた。試験片は実験中に熱によって変形しないように、厚さ 5 mm のアクリル板で裏打ちし、二枚の試験片の間にスペーサと安定板をはさみ、ビスナットで堅固に締付け、試験片間隔を一定に保持した。試験片間

隔の変動もアーク電圧や時定数の測定に大きな影響を与える。例えば、試験片間隔における 0.1 mm の変動(間隔 2 mm に対して 5%)がある場合においては約 70 V のアーク電圧の変動(最大電圧 $e_m=1,700$ V 約の 4%)となって現われる。従って、試験片の間隔を正確に保持することが大切で、ここでは黄銅製のスペーサを厚みにして 0.02 mm 以上の精度で精密加工した(これは試験片間隔誤差が 1% 以下であることを意味する)。一方、安定板の方はスペーサよりもわずかに薄くし、試験片と同質の材料を使用した。安定板の長さや位置は、アークが最も安定するように決められた。本装置の場合においては安定板の位置は上下ともアークの中心より 20 mm 離れた場所である。上下いずれの安定板が欠けても、アーク放電は不安定となり、試験片外に飛び出したり、アーク電圧が跳躍したりする。安定板の長さは開極長よりも長く、60 mm とした。これによって、材料より発生する蒸気によるアーク放電のとじ込みを確実にできる。

(c) 沿面抵抗試験用電極および耐圧試験用電極

試験片にはそれぞれ沿面抵抗測定用と耐圧試験用の電極が埋込まれた。電極の設置場所は次のような事項を考慮して選ばれた。(1)測定点はアーク特性に影響を与えず、しかもアークが接触し、カーボンの付着量の比較的多い場所が望ましい。(2)放電の中心部はアークが直接接触するので試料の蒸発が盛んであり、このような場所に試験用電極を設けると試料の蒸発量に影響し、ひいては消弧特性に影響を及ぼす恐れがある。(3)中心部におけるカーボンの付着量は周辺部に比べてごく少量である。(4)安定板の近くにおいてはカーボンの付着量は多いものの、ほとんどアークは接触せず、主電極からの離隔距離も長い。しかも実用の開閉器にはない、一種の吹き溜りのような特殊な場所であるので、ここでの測定は好ましくない。このような事項を考慮して、沿面抵抗測定用電極は図2のように 0.8 mm ϕ の銅針 2 本を 20 mm の距離においてアーク放電中心より安定板側へ 10 mm の位置に試験片に埋込んだ。また、反対側の試験片には開極時における主電極間耐圧試験用の 5 mm ϕ の銅電極を 45 mm の間隔においてアーク放電中心より、安定板側へ 10 mm 離れた位置に埋込んだ。主電極の開極長も 45 mm であるので、耐電圧試験用電極はちょうど主電極にかくれる。耐電圧試験用電極の先端は平らにし、試験片の表面と同一面となるように調節して、接着剤で試験片に固定した。

アーク定数測定試験 10 回ごとに耐圧試験を行なった。試験に際しては直流試験電圧を零より 6 kV まで

徐々に約 30 V/S の割合で上昇させた。一度絶縁破壊が起ると試験片表面に付着しているカーボンが焼失したり、飛散したりして、沿面抵抗の値が著しく変るので、上述の二種類の電極は分離する必要があった。また、耐電圧試験においては試験電極と試験片表面との接触を良くし、破壊したときのアークによる電極消耗の影響を少なくするために太い電極を使用した。なお、放電試験中はこれらの電極には何も接続しないでオープン状態としておいた。

〈2.3〉 試験回路 試験回路は図 4 に示す通り、主回路と補助回路および保護回路で構成されている。 E_1 は種アーク放電用補助電源であり、電圧は 3 kV から 20 kV まで段階的に変え得る。 R_1 は種アーク放電の電流値を決める抵抗であり、電流値は主電極が完全開極時においても種アーク放電が消えない程度に調整される必要がある。 L_1 はアーク放電安定用インダクタンスである。主回路には装置の都合上 216 μ F のコンデンサと 25 mH のインダクタンスを用い、半周期約 7.5 ms の減衰振動電流が得られる。コンデンサバンクは電源 E_2 によって充電され、充電電圧は約 6 kV まで調整可能で、その際の主電流の最大波高値は約 500 A である。 S は保護用ギャップ、 SW_2, SW_3 はプランジャー形の電磁スイッチである。スイッチ類の操作装置および波形観測用トリガ発生装置は試験開始命令信号を送ることによって、予め決められたシーケンスに従って自動的に作動するように設定した。

〈2.4〉 試験方法 実験装置の操作手順は〈2.1〉(b)節において述べた通りで、アーク電圧波形は図 3 (b)に示されている。アーク電圧の値はアーク電流が 100 A より大きくなるとほぼ一定となるが、電流零点前後の $i < 100$ A の範囲では大きく変化し、アーク放電についての多くの情報が含まれている。この領域の

現象が良く観測できるように同期装置を製作した。図 3 (c)はこのようにして撮影した電圧、電流の拡大波形の一例である。このような波形を放電試験ごとに写真撮影し、電流零点直前のアーク電圧のピーク値やその発生時刻などを測定し、そしてこれらの値が試験回数の増加に伴って変化していく様子を調べた。また、放電試験 10 回ごとに沿面抵抗と耐電圧試験を行ない、試験片表面の劣化の様子を調べた。試験片は実験の前と後および途中において計三回、重量を計り、アークによる消耗の様子も調べた。

本試験においては、測定データに大きな影響を与えるパラメータとして下記のものがあることが予備試験によって明らかとなった。すなわち、(1)試験片間隔、(2)全開極時における電極開極長、(3)充電電圧である。これは本試験方法において、試験電流が LC 回路の放電によって生成されており、これらのパラメータの変化は電流値その他に影響を与えるからである。従って、これらの値を一定値に保つことは大変重要である。これらの内(1)については試験片をモジュール状に作ることによって間隔を一定値に保つことができた。(2)の電極長については、電極が可動部分を有し、かつ消耗を来すので、最も不正確になりがちである。これらの弱点を克服するため、前者に対しては電極開極時間を十分に取る (54 ms) ことによって機械的振動などによる開極長に関連する誤差の発生を防止し、後者に対しては電極先端に銅タングステン合金を用いて消耗量を減らし、微調整装置を設けて開極長の常時監視、修正することで対応した。(3)については高精度のデジタルボルトメータで充電電圧を有効数字三けたまで正確に電圧を設定した。

試験片の寿命、いいかえれば消弧力を維持可能な試験回数は電極の幅と開極長、試験片間隔長、電流の波高値、および持続サイクル数などのパラメータによって左右される。また、試験片表面には製造工程において剝離剤が混入している場合が多く、最初の数回あるいは十数回程度はこれらの影響を受けることも予想される。従って試験回数をあまり少なくすることも好ましくない。本実験では予備試験により試験回数が 100 回前後で一通りの特性試験が終えられるように開極長を 45 mm、試験片間隔を 2 mm、充電電圧を 5,900 V に設定した。すなわち、適正に設定された条件のもとでは最初の 20 回程度までは半サイクル (最初の電流零点) ですぐ消弧するだけの能力を持つが、100 回目前後になるとアーク放電が 2~3 サイクル持続するほど消弧力が低下するようになる (電圧電流がともに減衰振動であるので、2~3 サイクル持続することはひど

$L_2=1.1$ H, 48Ω , $L_1=25$ mH, $C_1=216 \mu$ F, $R_1=150 \Omega$
 $R_2=10$ k Ω , $r=0.01 \Omega$
 S_1 : 試験装置, S : 過電圧保護ギャップ
 E_1 : 種アーク放電用直流電源, E_2 : 充電用直流電源

図 4 試験回路

Fig. 4. Testing circuit.

い消弧力の低下を意味する)。従って、100 回程度で実験を打切っても十分に材料の優劣判定ができるだけのデータが得られる。なお、これは一種の寿命加速試験法と考えることができる。実際の装置では、開極から消弧までの時間が回を追って徐々にふえるので、本実験での寿命と異なることは言うまでもない。

3. アーク放電定数の測定理論

図3のアーク電圧電流写真からも明らかにように、本試験におけるアーク放電は非常に安定でばらつきも少ないので、放電諸定数の測定も正確に行なえる。ここで、試験結果の説明に先立って、まず放電諸定数測定に関する理論的裏付けについて検討する。アーク放電の数学的モデルはいろいろ考察されているが⁽⁵⁾⁽⁷⁾、ここでは(1)式に示す Yoon 氏のモデルを用いる⁽⁴⁾。但し、式中の G はアーク放電のコンダクタンスで、 G_s はある電流値における定常アークが取るべきコンダクタンス値で、以下定常値と呼ぶこととし、 θ はアーク放電の熱的時定数である。

$$\frac{dG}{dt} = \frac{1}{\theta} (G_s - G) \dots \dots \dots (1)$$

次にアーク電圧の定常特性として Ayrton 夫人の式の第二項まで考えて(2)式のように仮定し、 A と B は定数とする。

$$e_s = \frac{A}{i} + B \dots \dots \dots (2)$$

そして、(3)式に示す電流 i をアーク放電に流すとアーク放電の振舞は(4)式で定義される。但し、 $u(t)$ は単位ステップ関数とする。

$$i = I_m \sin(\omega t) \cdot u(t) \dots \dots \dots (3)$$

$$\frac{dG}{dt} + \frac{G}{\theta} = \frac{\{I_m \sin(\omega t) \cdot u(t)\}^2}{\theta \cdot \{A + B \cdot I_m \sin(\omega t) \cdot u(t)\}} \dots \dots \dots (4)$$

図5 計算によるアーク特性 (第1回目の電流零点直前の電圧電流波形)

Fig. 5. Calculated arc dynamics.

($I_0 = 7 \text{ A}$ 一定)
 $\bullet$ $\{I_m = 520 \text{ A}, B = 200, \theta = 5 \mu\text{s}$
 $\omega = 469 \text{ r/s}, A = 2,000 \sim 25,000 \text{ W}$
 $\times$ $\{I_m = 520 \text{ A}, \theta = 5 \mu\text{s}, \omega = 469$
 $\times \{A = 500, 6,000, 12,000 \text{ W}, B = 50 \sim 500 \text{ V}$
 $\triangle$ $\{I_m = 520 \text{ A}, A = 5,000, B = 200$
 $\omega = 469, \theta = 1 \sim 20 \mu\text{s}$
 $\square$ $\{A = 5,000, B = 200, \theta = 4 \mu\text{s}, \omega = 469$
 $\{I_m = 100 \sim 2,000 \text{ A}$
 $\circ$ $\{I_m = 520, A = 5,000, B = 200, \theta = 4 \mu\text{s}$
 $\omega = 100 \sim 1,500 \text{ rad/s}$

図6 規格化した時定数とアーク電圧の関係

Fig. 6. The normalized time constant vs. arc voltage.

(4)式の一般解は(5)式で示される。

$$G = e^{-\zeta t / \theta} \cdot \left[\int \frac{I_m^2 \sin^2(\omega t) \cdot e^{\zeta t / \theta}}{\theta \cdot \{A + B I_m \sin(\omega t)\}} \cdot dt + K \right] \dots \dots \dots (5)$$

しかし、(5)式中の積分項は積分不能であるので、(4)式を数値的に解いて、アーク放電の電圧電流波形と放電諸定数との関係を調べた。すなわち、(4)式中の $I_m, \omega, A, B, \theta$ に適当な数値を設定してルンゲクッターギル法で計算すると図5のような電圧電流波形が得られた。この図は最初の電流零点付近の電圧電流波形を描いたものであり、電流零点付近に発生する最大アーク電圧を e_m 、電流零点から測った最大アーク電圧時点までの時間を Δt とする。次に定数の設定値をいろいろ変えて計算し、その結果から $(\Delta t / \theta)$ と (e_m / B) の関係を求めてみると図6のような関係が得られた。すなわち、すべての設定条件 (A, B, θ, ω と I_m) に対して、その結果はほぼ同一の直線上に乗ることが明らかとなった。この直線を実験式化すると(6)式が得られる。

$$\frac{\Delta t}{\theta} = \frac{0.35}{e_m/B - 1} + \sqrt{2} \dots \dots \dots (6)$$

この式で $B = 0$ とおくと、 $\Delta t / \theta = \sqrt{2}$ となり、Mayr 氏のモデルなどにおいてよく知られた関係が得られ

る⁽⁵⁾⁽⁶⁾。いいかえれば、(6)式は Mayr 氏のモデルでアークの定常特性として $e_s = A/i + B$ とした場合の時定数の関係式と考えられる。なお、 B はアーク電流が十分に大きい時点のアーク電圧 e_B にほぼ等しいので(6)式は e_m , B , Δt を測定すれば、時定数 θ が求められることを示す。

一方、(1)式を変形すると(7)式が得られる。

$$\frac{1}{i} \frac{di}{dt} - \frac{1}{e} \frac{de}{dt} = \frac{1}{\theta} \left(\frac{e}{e_s} - 1 \right) \dots \dots \dots (7)$$

アーク電圧のピーク時点においては $de/dt = 0$ であるので、この時点での電流 i の変化を直線とみなして、 $i \cong I_m \cdot \omega \cdot t$ と置けば(8)式が得られる。

$$-\frac{I_m \cdot \omega}{e_m} + \frac{I_m \cdot \omega \cdot \Delta t}{e_m \cdot \theta} = \frac{1}{\theta} \frac{(I_m \cdot \omega \cdot \Delta t)^2}{(A + B I_m \cdot \omega \cdot \Delta t)} \dots \dots \dots (8)$$

(8)式は A について整理すると(9)式となる。

$$A = \left(\frac{e_m}{1 - \frac{\theta}{\Delta t}} - B \right) \cdot I_m \cdot \omega \cdot \Delta t \dots \dots \dots (9)$$

以上のようにして(1)式と(2)式を定義するアーク放電定数 A , B , θ は電圧電流波形における特定の値 e_m , Δt , I_m , e_B (最大電流時点におけるアーク電圧)より求めることが可能となる。

4. 浮遊容量の影響と放電シミュレーション

前節においては、アーク定数の求め方について説明した。Yoon 氏のモデルが実際のアーク放電をどの程度まで表現できるかについて検討した。シミュレーションに当って、まず、実験データよりアーク定数の採集を行なった。例えば図7は消弧材として広く用いられているアセタールコポリマ (Acetal Copolymer, 商品名・ジュラコン) を試験片とした場合のアーク電圧電流波形である。(a)は14回目の試験で、消弧力が

高く半サイクルで消弧した場合の波形である。(b)は(a)の時間軸を延ばしたものであり、これを見ると e_m が高く、 Δt が小さい。これに対して(c)と(d)は98回目の試験波形で、 e_m が低く、 Δt も長い。これは消弧力が極端に低下した状態である。各波形よりデータを読み取り、前記の方法によりアーク定数を求めた。次に(1)~(5)式に従ってシミュレーションを行なうと、図7(a)~(d)'に示す如く、実験波形と極めて相似する電圧電流波形が得られる。後述する一部のずれ(原因が明らかにされ、修正が可能)を除けば、実験波形と計算波形とのずれはほとんど10%以内にとどまっている。これより Yoon 氏のモデルは本稿の装置の中で点ぜられているアーク放電に対して、極めて高い模擬性を持つことが明らかである。

しかし、波形を詳しく観察すると、疑問となる点が見つかり、しかも、これがアーク定数の決定に大きな影響を及

(a)は16回目の波形、(b)は(a)の拡大波形、(a)'は(a)、(b)'は(b)のシミュレーション波形、(c)は98回目の波形、以下同様

図7 アセタールコポリマ中におけるアーク放電の電圧電流波形およびシミュレーション波形

Fig. 7. Voltage and current waveforms of arc discharge caused in acetal copolymer and it's simulations.

ばす箇所でもある。これは図7(b)に見られるように、アーク電流の変化が零点の直前で直線よりはずれることである。そのために Δt の値の決定に大きな支障をきたすことになる。しかし、詳しく現象を分析した結果、この電流のずれは電極部分の浮遊キャパシタンスの影響によることが明らかとなった。すなわち、(b)図のような消弧性能の高い放電の場合、零点直前のアーク電圧の変化率 de/dt が大変に大きい。そのために、浮遊静電容量に蓄えられていた電荷がアーク放電に放出されて、電流零点を遅らせることになる。従ってアーク放電のシミュレーションにおいては浮遊容量の影響を考慮に入れる必要がある。また、零点直前ではアーク電圧そのものも高いために、電流波形がその影響も受けるので、アーク電圧も考慮に入れる必要が起った。図8は実験回路のすべての要素を記入した最終的なシミュレーション回路である。なお、浮遊容量の実測は水銀リレーと既知インダクタンスを用いて、 L - C 振動の原理により測定した。本論文の装置ではその値が 130 pF である。

図9は上記回路に対して行なったシミュレーション波形である。浮遊容量のために電流零点がずれて、直線的電流変化の場合と比較して、 Δt が δt の分だけ

図8 シミュレーション回路図

Fig. 8. Circuit model used for simulation.

図9 浮遊静電容量の影響を考慮したシミュレーション波形

Fig. 9. Simulation waveforms under the influence of stray capacitance.

増加する。幸いに、電圧が最大となる点においては、 de/dt が零となるので、この時刻 T_1 における電流 I_1 は浮遊容量の影響を受けない。従って、浮遊容量が存在しない直線的電流変化を仮定し、最大電圧点より十分前の任意の時刻 T_2 における電流値 I_2 をとり、浮遊容量が存在しない場合における Δt の正しい値を次式に基づいて計算することができる。

$$\frac{I_1}{\Delta t} = \frac{I_2 - I_1}{T_1 - T_2} \dots\dots\dots (10)$$

5. 実験結果および検討

以上において、試験片中における不安定なアーク放電の原因を解明し、その安定方法、およびその放電に関連する諸定数の測定法について説明した。次にこれらの方法に基づいて、各種試料について試験を行ない、それらの試料の消弧性能の判定法についての検討を試みた。試験は消弧材料として広く用いられているアセタールコポリマとユリア樹脂について行なった。

図10はアセタールコポリマについて実験した結果であり、同図(a)は試験回数の増加に伴って変化する熱時定数 θ の様子を示すが、初めの10回程度は下向曲線を描いて低くなるが10回を過ぎるころから安定

図10 アセタールコポリマのアーク定数

Fig. 10. Variation of arc constants of acetal copolymer.

図11 ユリア樹脂のアーク定数(図の説明は図10参照)

Fig. 11. Arc constants obtained for urea resin. (for description see Fig. 10)

期に入り、25 回程度まで持続する。その後は増力に転じ、やがて加速度的に増加していく。70 回を過ぎるころからバラツキが大きくなる。これは試料の消耗が進行し、試験片の中心部分の間隔が広がりかつ不均一化し、アーク放電の点弧位置が不確定化するためと考えられる。同図(b)はアーク定数 A を示す。同図(c)はアーク電圧のピーク値 e_m (単位長当りに換算) およびアーク定数 B を示す。両方ともに試験の進行に従って一様に低下する傾向にある。定数 A は Mayr 氏によれば単位長当りの損失となるが、最初の十数回を除いて、ほぼ一定値を保つ。これはアーク放電の太さが変わっても損失があまり変わらないことを意味する。同図(d)は遮断サイクル数であり、25 回まではほとんど半サイクルで切れている。25 回を過ぎると 1 サイクルとなるが、境界点のバラツキは非常に少ない。これに対して 1 サイクルから 1.5 サイクルに移るときはバラツキが大きくなり、境界領域の帯が 15 回程度となっている。1.5 サイクルから 2 サイクルに移るときも同様である。同図(e)には絶縁抵抗測定端子間で測定した試料表面の絶縁抵抗の値が示されているが、その値はほとんど無限大である。同図(f)は耐圧試験結果を示し、0~6 kV の直流電圧を印加したが破壊しなかったのが白丸で示してある。これに対して、他の材料におけるように、もし破壊起ることがあればその電圧値を黒丸で示すこととする。これらのグラフには、所々、データが欠落している場所があるが、そこはデータを取りそこなったところである。

図 11 はユリア樹脂についてのデータである。ユリア樹脂も、現在広く消弧材として用いられているが、アセタールポリマと比較して次のような特徴がある。すなわち、定数 B を除いて時定数 θ 、アーク電圧のピーク値 e_m および定数 A は共にバラツキが大変大きいこと、また試験が進むにつれて、絶縁特性が低下することである。なお、データにバラツキがあっても、毎回の試験は安定なアーク放電が得られた。ところが両者の消弧特性を比較した場合、ユリア樹脂のアーク定数は数値的にバラツキがあるけれども、全体としてアセタールポリマの数値よりも良い側にある。例えばユリア樹脂の θ の値はばらついているが、大きい方の値でもアセタールポリマのそれと同程度であり、平均値としては小さくなる。従って、ユリア樹脂はアセタールポリマよりは良い消弧性をもつことになる。このことは消弧サイクル数(図 d)のデータからも読み取ることができる。一方、表面絶縁耐力の点でユリア樹脂は難点があるようである。なお、定数 B についてはユリア樹脂の値がほぼ一定で低い、消

弧性に及ぼす影響は θ と A ほどではないようである。

6. 結 論

有機物消弧材料の試験法の確立を目指して、装置の最適構造、ならびに測定値より必要な物理定数の導出方法などについて初歩的研究を試み、その結果次のような成果が得られた。

(1) 試験片と安定板で囲われた空間において、非常に再現性の良いアーク放電の安定法が得られ、アークコンダクタンス、アーク時定数、最大アーク電圧、再破壊電圧、材料表面の絶縁抵抗などが測定可能となった。

(2) 上記試験空間において点ぜられたアーク放電に対して、Yoon 氏のモデルによるシミュレーションは実験結果と極めて良い一致が見られた。

(3) アーク放電の定常的電圧電流特性を $e_s = A/i + B$ と仮定した場合におけるアーク定数 A 、 B および熱時定数 θ を実験データより算出する方法を確立した。これによって消弧性能の定量的判定基準が得られる見通しが立った。

以上の通り、試験法の確立に向けて大きな前進をなし得たが、なお多くの未解決の問題が残され、今後の研究が引き続き必要である。例えば、アーク放電諸定数と遮断特性との相関、試験装置と実装置との対応性などを明確にしなければならぬし、試験法の簡易化も計る必要がある。

最後に、研究の助言をいただいた OHT 技術士事務所の大森豊明氏、材料など多くの助力をいただいた日本ポリプラスチック(株)の高野菊雄氏、また実験に協力した卒業生の小泉 潤氏(現在・本田技研)、金子敏彦氏(現在・東芝機械)に深く感謝する。

(昭和 60 年 3 月 29 日受付)

文 献

- (1) R. B. Steel, et al.: "Arc Quenching Materials for Load-Break Separable Insulated Connectors" 7th IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, April 1, 6 (1979)
- (2) L. Niemeyer: "Evaporation Dominated High Current Arcs in Narrow Channels" IEEE Trans. Power Apparatus Sys. PAS-97, 3 (1978)
- (3) P. F. Hettwer: "Arc-Interruption and Gas-Evolution Characteristics of Common Polymeric Materials" ibid. PAS-101, 6 (1982)
- (4) K. H. Yoon: "A Study of the Dynamic Response of Arc" ibid. PAS-69, 12, 1002 (1963)
- (5) O. Mayr: "Über die Theorie des Lichtbogens und Seiner Löschung" E. T. Z. 49/50, 645 (1943)
- (6) O. Mayr: "Beiträge zur Theorie des statischen und des dynamischen Lichtbogens" Archiv für Elektrotechnik 7, 12, 588 (1943)
- (7) A. Morris Cassie: "Arc Rupture and Circuit Severity" CIGRE Rep-102, 1 (1939)