

# 아크의 종류와 응용

역/ 대한전기기사협회 기술실

## 1. 아크의 일반적 성질

아크란 한마디로 말하면 고온의 플라스마주(柱)라고 할 수 있다. 아크의 온도는 수 천°C 이상이며 때로는 수 만°C에 달하기도 한다. 플라스마란 공기중의 산소나 질소 등의 분자가 고온도에 있어서 전자나 원자에 분해된 상태를 말한다. <그림 1>에 아크를 포함한 모델 회로를 든다.

전자는 마이너스 전하를 갖기 때문에 플라스마내를 양극(플라스마 극)을 향해서 진행한다. 플라스마 내에는 이 밖에 전자를 방출하고 있지 않은 원자나 분자도 존재하고 있지만 이것들은 전기적으로 중성이기 때문에 고온 가스로서 전극과는 관계없이 공간을 자유롭게 날아다닌다. 이것들이 혼재된 것이 아크이다.

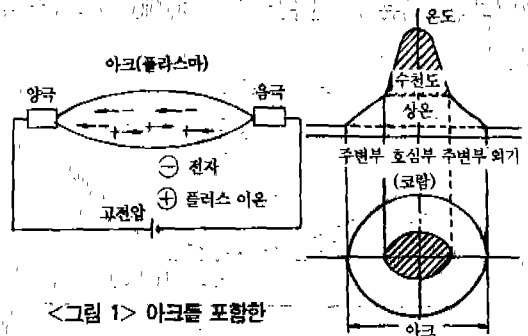
이들 입자의 온도는 각각 전자온도, 이온온도, 가스온도(중성분자온도)라고 호칭되며, 대기압 이상의 기체내에서는 일반적으로는 이들 3종류의 온도가 같고 국소 열평형(LTE)하고 있다고 한다. 그러나 대기압이라도 아르곤내의 경우나 대기압 이하, 압력이 저하하는 데 따라 전자온도가 다른 입자온도보다 높아져 국소 열평형이 성립하지 않게 된다.

여기서 국소 열평형이 성립하는 일반적인 경우를 예로 들어 아크내의 온도분포를 <그림 2>에 든다. 원자가 전리를 시작하는 온도는 대략 5,000~6,000°C 이므로 아크의 온도는 5,000°C 이상이다. 그러나 일반적으로는 아크 전체가 동일한 온도가 아니고 초의 화염과 같이 중심부가 높고 주변은 저온이 된다.

중심의 고온부(호심부)는 전지 에너지로 항상 온도가 유지되고 있고 그 곳에서 발생한 에너지는 방사나 열전도, 대류작용의 형태로 주변부나 외기에 확산된다. 고온의 아크로부터는 대량의 방사광이 방출되기 때문에 광원으로서의 응용도 많다.

아크 호심부는 공기내에서는 의외로 굵지만 최근의 고전압차단기에 사용되고 있는 소호성이 강한 SF<sub>6</sub>(육불화유황) 가스내에서는 소전류가 되면 고온의 호심부가 가는 끈형상이 되는 흥미있는 성질을 가지고 있다. 아크내의 입자밀도는 압력이 일정한 경우 그 온도(정확히는 절대온도, K)에 반비례하므로 3만°C인 경우에는 상온시(300K)의 1/100로 저하하고 있다. 그래서 아크는 「고온·진공의 가벼운 고무끈」이라고 할 수 있다.

아크의 특성을 나타내는 하나의 지표로서 아크의 전계 또는 전압을 들 수 있다. 전계는 단위길이당의



<그림 1> 아크를 포함한 모델 회로

<그림 2> 아크내의 온도분포

전압으로서 V/cm, kV/m 등으로 표시된다. 또 아크 전류와 전계의 적인 아크 전력으로 표시하기도 한다. 아크에는 소전류역에서 아크 전력 일정특성이라는 흥미있는 성질이 있다. 즉, 아크의 전압(전계)은 전류에 반비례하며 전류가 증가하면 아크 전압이 급속히 저하한다. 이 현상을 아크의 부성(수하)(負性(垂下))특성이라고도 하는데, 이것은 극단적인 경우이고 일반적으로는 전류가 증가하면 아크 전력도 약간씩 증가하므로 부성특성은 반비례보다 완만해진다.

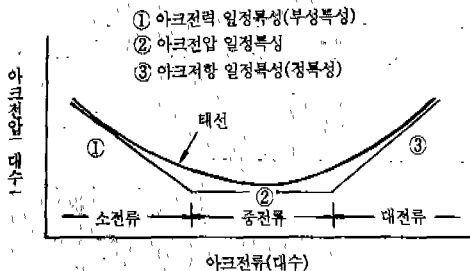
전류가 커지면 이 부성특성이 차차 소멸하며 아크 전압은 전류가 증가하더라도 일정치가 되고(아크 전압 일정특성) 더 대전류가 되면 아크 전계가 증가하기 시작한다(아크 저항, 일정특성, 정특성). 이것들의 관계를 <그림 3>에 든다. 이 특성은 안정화 아크의 경우이다.

자유 아크에 있어서도 거의 동일하지만 대전류가 되면 아크 반경도 증대하기 때문에 아크 전압 일정한 특성이 비교적 대전류까지 성립된다. 다만, 더 대전류가 되면 방사손실이 급격하게 증가하기 때문에 차차 아크 전계가 상승하고 아크의 전압-전류특성이 정특성이 된다.

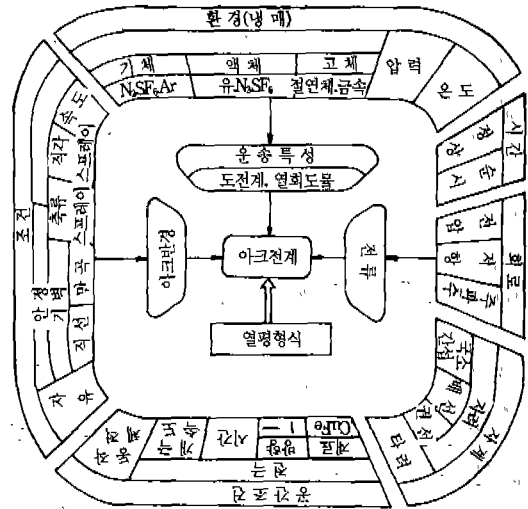
## 2 아크의 종류

### 가. 아크 특성에 미치는 각종 퍼라미터

아크에는 각종 형태가 존재하지만 그 기본적인 인자(퍼라미터)는 (i) 전류값 (ii) 환경 (iii) 아크 반경의



<그림 3> 안정화 아크의 전압-전류특성 (모델도)

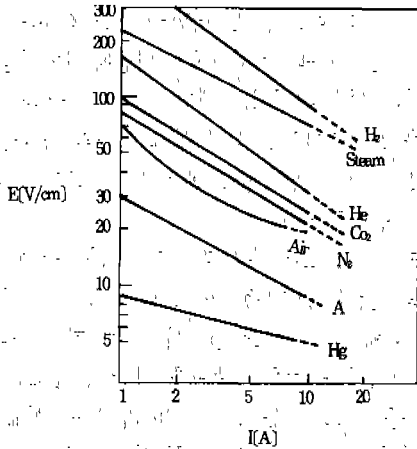


<그림 4> 아크특성에 미치는 퍼라미터 예

세 가지이다. 실제로는 이것에 부가해서 환경의 압력(진공, 대기압, 고기압)과 온도(저온, 고온, 초고온)로 정해지는 환경의 도전율과 열전도율의 대소관계 및 방사광, 시간(정상, 순시), 회로조건: 전압(저전압, 고전압), 저항, 주파수(직류, 교류, 고주파), 자계: 자체 자계(자력): 아크 극소간의 상호작용, 배선, 권선과 타려자계, 공간조건: 전극의 재료(동, 철, 알루미늄), 방향(수평, 수직, 경사), 간격, 개극속도, 아크 공간(작동체적), 냉각조건: 자유 아크(프리 아크), 안정화 아크(기벽안정, 회전안정, 기류안정, 전극안정), 아크 형상(직선, 만곡), 스프레이 조건(스프레이 매체, 축 방향, 직각방향, 스프레이 압력·속도), 혼합조건(기체혼합, 금속증기, 혼합비) 등으로 아크의 형태는 여러가지로 변화한다. 이것들의 퍼라미터 예를 <그림 4>에 체계적으로 정리해서 표시한다. 이하, 주요 인자에 대해서 설명한다.

### 나. 환경의 종류에 따른 영향

환경은 (i) 기체(공기, SF<sub>6</sub> 가스 용접용, 아르곤 가스 등) (ii) 액체(차단기유, 액체절소, 물 등) (iii) 고체(절연용 테프론, 퓨즈의 소화사 등)로 대별된다. 아



<그림 5> 각종 기체내 자유 아크의 전계-전류특성 (1기압)

크에는 다수의 전자가 필요하기 때문에 액체나 고체 내에서는 그대로 점화하지 않고 그것들이 어떠한 에너지로 가열되어 기화하고 또한 고온이 되어 분해·전리한 상태에서 비로소 아크가 될 수 있다. 예를 들면 기름의 경우에는 기름이 열로 분해되면 수소 가스가 발생하고 수소 가스가 분해·전리하여 전자와 수소이온이 되어 그 시점에서 수소 아크가 점화한다고 한다. 이 때문에 액체내, 고체내의 아크 전계는 기체내보다 상승한다.

<그림 5>에 소전류역에 있어서의 각종 기체 자유 아크의 전계특성을 든다. 전계는 공기에 비해 탄산 가스, 헬륨, 수증기, 수소순으로 높고, 반대로 아르곤이나 수은은 낮다. 그림에는 표시되어 있지 않으나 SF<sub>6</sub> 가스내에서는 자유 아크의 전계가 100A로 18V/cm를 표시, 질소 가스내의 10V/cm보다 높다.

다만, 안정화 아크에서는 질소 가스보다 SF<sub>6</sub> 가스가 낮다. 이 역전현상은 SF<sub>6</sub> 가스내 아크에서는 호심부가 가늘기 때문에 자유 아크가 굴곡되기 쉽고 열방산이 심해지기 때문이다. 이것을 루핑 현상이라고 부른다. 아크 전계는 열방산이 클수록 상승하기 때문에 일반적으로는 가벼운 기체일수록 크고 무거운 기체일수록 작다.

#### 다. 압력의 영향

압력으로는 (i) 진공 (ii) 대기압 이하 (iii) 대기압 (iv) 고기압의 4종류를 생각할 수 있지만 실용적인 진공과 대기압 이상이 중요한데, 양자는 아크의 성질도 상이하므로 나누어서 설명한다.

##### (1) 대기압 이상의 안정화 아크

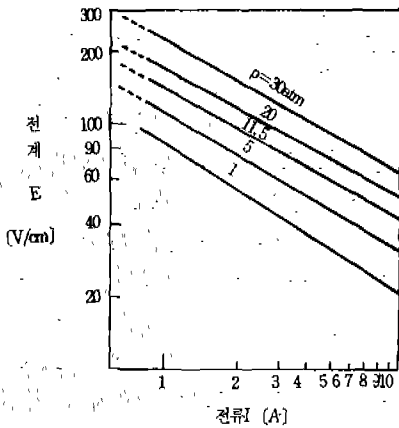
대기압 이상에 있어서는 일반적으로 국소 열평형이 성립하기 때문에 아크 반경을 규제한 안정화 아크에서는 전계-전류특성을 계산으로 구할 수가 있다. 기체의 도전율과 열전도율은 직접적으로는 입자의 개수에 영향받지 않으므로 압력에 의한 열적 특성의 변화는 극히 적다. 따라서 아크의 전계는 고기압이 되더라도 열전도 성분에는 관해서는 대기압의 경우와 대차가 없다.

예를 들면 SF<sub>6</sub> 가스의 경우 직경 5mm의 10A 아크 전계의 열전도 성분은 대기압으로 14V/cm이지만 20기압으로 12V/cm가 되며 십 수% 저하하는 정도로 계산되고 있다. 그러나 1만°C 이상에서는 방사성분이 압력의 거의 2승에 비례하여 급증하므로 대전류 아크에서는 전체적으로 압력과 함께 전계도 증가한다.

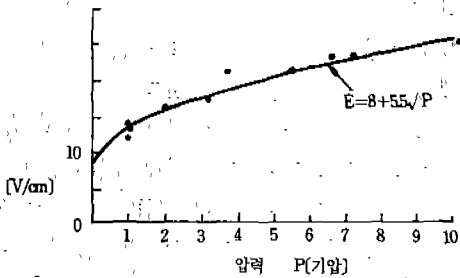
##### (2) 대기압 이상의 자유 아크

자유 아크에 있어서는 안정화 기벽이 존재하지 않으므로 아크 반경은 주위와의 냉각조건으로 정해진다. 실제로는 아크 호심부 주위에 저온의 가스층이 확산되어 있기 때문에 아크 반경의 편차가 용이하지 않다. 안정화 아크의 이론을 그대로 자유 아크에 적용하는 것은 어렵다. 실측 예에 의하면 어느 기체나 압력 P(기압)이 증가하면 아크 전계 E(V/cm)도 증가한다. 100A의 SF<sub>6</sub> 가스 자유 아크에서는 2기압 이상으로 전계가 압력의 거의 반방근에 비례하여 증가한다(E=13P<sup>0.6</sup>).

<그림 6>에 질소 가스내의 압력 1~30기압에 있어서의 10A 자유 아크의 전계를 표시한다. 소전류이기 때문에 전계-전류특성은 수하특성을 나타내고 전계는 전류의 0.5~0.6승에 반비례해서 감소한다. 이 반비례수는 압력이 증가하여도 거의 바뀌지 않는다. 전계는 압력에 대해서는 그 0.31승에 비례해서 증가



<그림 6> 자유 아크의 전계-전력특성(질소 가스내, 10A)



<그림 7> 1000A 아르곤내 자유 아크의 전계-전력특성

하고 있다. 다음에 대전류의 예로서 1,000A 아크에 있어서의 전계-압력특성을 <그림 7>에, 그 실험식을 <표 1>에 든다. 대체로 아크의 전계는 압력의 평방근에 비례해서 증가한다고 볼 수 있다.

(3) 진공 아크

10<sup>-4</sup>Torr 정도의 진공내에 있어서의 아크는 이른바 환경이 없기 때문에 통전에 필요한 전자는 음극에서 제트형상으로 분출되는 금속증기로부터 공급된다. 따라서 진공 아크는 전극의 재료와 가공면에 따라서 특성이 변화한다. 제트의 분출속도는 동전극의 30A

<표 1> 고기압 자유 아크의 전계-전력실험식

기 체	압력P [기압]	전 류 [A]	전 계 E [V/cm]
수 소	0~75	250~1600	$E \approx 8 + 35\sqrt{P}$
아 르 곤	0~10	1000	$E \approx 8 + 5.5\sqrt{P}$
질 소	1~6	1000	$E \approx 8 + 4.2\sqrt{P}$

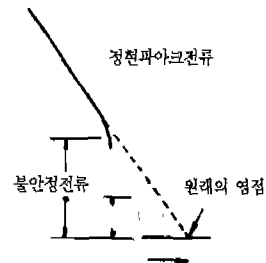
아크로 십 수km/s의 초고속이다. 음극 휘점의 개수는 kA급 이하의 아크에서는 극면 전면을 감싸는 다수의 휘점이 발생하는데 비해 10kA 이상에서는 집중된 한 덩어리의 대형 휘점이 발생한다. 진공 아크의 전기적 특성은 소전류에서는 진공 아크 고유의 특성을 나타내지만 10kA 이상에서는 본질적으로 고기압 대전류 아크와 유사해진다.

아크 전압으로서 특기할 성질은 (i) 음극재료마다 고유의 값이 있다(동:약 22V, 은:약 17V). (ii) 100A 이하에서는 아크 전류에 의존하지 않는다. (iii) 아크 길이에 의존하지 않는다. 다만 수 십kA급의 대전류 동 아크에서는 100~300A가 되는 예도 있다. 아크내의 입자밀도는 100A 동 아크로 중성원자:10<sup>14</sup>개/cm<sup>3</sup>, 전자 및 이온:10<sup>13</sup>개/cm<sup>3</sup>의 오더로 전리도는 1할 정도이다.

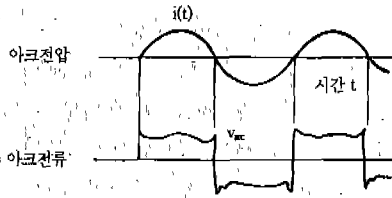
진공 아크에는 최저 유지전류가 있으며, 교류 아크에 있어서는 전류 영점직전에 <그림 8>과 같이 전류 재단현상이 생긴다. 이 때문에 진공차단기에 있어서는 회로조건에 의해 전류차단시에 서지 전압이 발생하는 일이 있지만 전극의 재료와 형상을 연구하여 상당히 개선되고 있다.

라. 주파수의 영향

주파수는 (i) 직류 (ii) 교류로 대별되며, 또 교류는 상용주파수와 고주파로 분류된다. 교류가 변화한 경우의 파도 아크에 있어서 열평형이 성립하는 데 필요한 시정수에 대해서는 잘 알려져 있지 않으나 10<sup>-7</sup>



<그림 8> 진공아크의 전류재단 현상



<그림 9> 교류아크의 전압파형

초의 오더로 생각되고 있다. 이 때문에 전류가 상용 주파수로 변화하더라도 아크의 여러 특성은 전류의 변화를 거의 따라갈 수 있으며 직류 아크도 교류 아크도 전류의 순시값으로 비교하면 큰 차이가 없다고 본다. 다만 주의할 것은 <그림 9>와 같이 아크 전압  $V_{arc}$ 는 전류  $i(t)$ 가 변화하더라도 그리 바뀌지 않으므로 아크 전력  $P_{arc}$ 가 거의 전류에 비례하게 되며 아크 에너지  $W$ 는

$$W = \int p_{arc} dt = \int v_{arc} i(t) dt = v_{arc} \int i(t) dt = v_{arc} \cdot \bar{I} \cdot t$$

( $\bar{I}$ : 전류의 평균치,  $t$ : 시간)

가 된다. 따라서 전류로서는 실효값이 아니고 평균값을 사용하지 않으면 에너지나 발열량 등을 계산하는데 잘못된다.

### 3. 아크의 응용례

아크의 특징있는 성질로서 (i) 고온도 (ii) 고휘도 (iii) 고에너지 (iv) 고도전율 (V) 소호성 (Vi) 소호후의 절연내력 (Vii) 고제어성 (Viii) 고크린성 등을 들 수 있다. 각각 또는 그것들을 합쳐서 각종 기기가 개발 또는 실용화되고 있다.

#### 가. 고에너지 이용기기

##### (1) 아크로

아크의 특징인 고온도, 고에너지, 고제어성, 고크린성을 이용해서 아크로가 가동되고 있다. 탄소전극간에 대전류 아크를 점화하고 그 대량열로 각종 물체를 용해하고 있다.

##### (2) 플라스마 토치

아크를 가늘게 죄어 넣은 플라스마 토치가 물체의 가열·용융, 절단에 이용되고 있다. 대상물체는 금속이나 비금속이 좋고 금속의 경우에는 그것을 대향전극에 사용함으로써 효율도 향상된다. 1,000A의 토치를 사용하면 공기내에서 두께 20cm정도의 스텐레스를 절단할 수 있다.

##### (3) 아크 용접

아크의 편극을 피용접물로 하고 그곳에서 용접물을 용융시켜 둘 이상의 피용접물을 용접하는 방법으로서, 또 한쪽의 전극 종류에 따라 소모형과 비소모형으로 분류된다. 소모형은 전극 자체가 녹아서 피용접물로 이행하지만 비소모형은 전극이 거의 소모되지 않는다. 용접 아크의 분류를 <표 2>에 든다.

<표 2> 용접 아크의 분류



용접 아크에 있어서는 아크를 안정시키고 고온 용융부를 불순물로부터 보호하기 위해 아르곤 등의 이너트(불활성) 가스를 아크 주위에 흘리는 일이 있으며 이것을 TIG 또는 MIG 용접이라고 한다. TIG 아크의 전압-전류특성은 소전류에서는 부성특성을 표시하지만 200A 이상에서는 반대로 정특성이 된다. MIG 아크의 전압-전류특성은 부성특성이 없고 전부 정특성을 표시한다.

#### 나. 조명 아크

아크의 고휘도성 등을 이용해서 아래와 같은 조명 등이 실용화되고 있다.

(i) 탄소 아크: 양극에 회토류 원소의 불화물 등을, 음극에 알칼리 염류 등을 배합해서 양호한 연색성, 고휘도, 고안정성이 얻어진다.

(ii) 수은 아크: 대략 증기압이 높을수록 발광효율이 상승하기 때문에 고압력으로 사용된다. 1W당 1기압에서 약 40 lm, 10기압에서 60 lm의 효율이 있고 가시역에서는 연속 스펙터 성분이 많은 녹색을 강하게 발광한다.

(iii) 형광등: 열음극을 가진 수은·아르곤의 혼합 가스 아크의 일종으로, 수은원자의 전이 스펙터를 형광물질의 여기선으로서 이용하고 있다. 저증기압으로 발광강도가 높기 때문에 주위온도 40°C 부근에서 최고 효율이 된다.

(iv) 키세논 아크: 1~10기압으로 사용하며, 고휘도로서 천연주광에 가깝다.

(v) 지르코늄 아크: 점광원에 가깝다. 휘도가 수천~1억cd/m<sup>2</sup>에 달하므로 광학적 검사에 적합하다.

(vi) 나트륨 아크: 가시역에서 등황색을 방사한다. 발광효율이 비교적 높아 도로조명에 사용되고 있다.

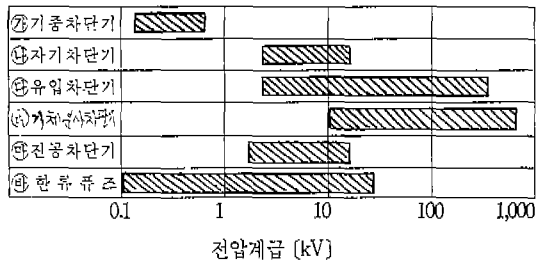
**다. 차단 아크**

아크에서 급속하게 에너지를 뺏으면 아크의 도전성이 저하하므로 교류와 같이 전류 영점이면 그 점에서 아크를 소멸할 수 있다. 차단점에서의 에너지 평형식으로는 ① 카시의 식 ② 마이어의 식 등이 있다.

**(1) 아크 시정수**

아크의 도전성이 변화하는 시정수를 아크 시정수라고 하지만 이 값은 공기로서 수십μs, 탄산 가스로 수십μs인데 비해 SF<sub>6</sub> 가스는 1μs 오더로 극히 응답이 빠르다. 아크 시정수는 아크 반경의 2승에 비례하여 증가한다고 하지만 실측값에 의하면 가스 압력에 거의 비례해서 증가하고 기체를 불어붙이는 경우는 기체유속에 거의 반비례하여 저하한다. 따라서 공기

<표 3> 전력용 차단기와 전압계급



차단기라도 스프레이 유속을 100m/s 정도로 빠르게 하면 아크 시정수를 1μs 정도까지 저감시킬 수 있다.

**(2) 소호방식**

손실을 크게 하면 아크가 소멸한다. 소호기구로서는 (i) 확산 (ii) 소이온 (iii) 가압 (iv) 교환 (v) 팽창 (vi) 벽면소호 등이 생각되지만 실제로는 여러 요인이 작용하여 차단된다. 실용화 되고 있는 차단기의 종류와 전압계급을 <표 3>에 들었다.

