

아크현상 해석 및 아크에 의한 전기화재위험성 평가

홍 성 호 || 방재설비부 선임연구원 · 공학박사

1. 서 론

전기는 가정생활을 편리하게 해 주는 에너지 공급원 및 산업의 에너지 공급원으로서 현대사회에 있어서 다른 어떤 에너지보다 그 중요성이 크다. 현대사회의 이러한 전기에너지의 의존도를 고려해 볼 때 전기에 의한 재해로 인하여 발생하는 경제적 손실과 인적손실은 매우 심각하다. 전기로 인한 재해 중에서 특히 전기화재는 전기의 사용량이 증가함에 따라 계속 증가하고 있다. 전기화재의 많은 발생에도 불구하고 여전히 전기화재의 원인은 정확하게 규명되고 있지 않다¹⁾.

현재 전기화재 원인을 조사함에 있어 전기설비의 고장에서 기인한 화재인가, 화재에 의하여 전기설비가 손상되었는가를 판단하는 규격화된 화재분석 및 규명법은 거의 없는 실정이다. 다만 화재 발생 후에 전기기기나 전선 등의 손상정도를 보고 추정하는 방법들이 있을 뿐이다²⁾. 특히 전기화재와 관련된 아크에 대한 연구가 상당히 부족하여 화재 현장에서 아크흔적이 발견되면 정확한 원인규명 없이 그대로 화재원인으로 판정하는 경우가 있다³⁾. 일반적으로 회로차단기는 합선 등과 같이 회로에 큰 전류가 흐를 경우에는 회로를 차단해야 하지만 회로차단기가 설치되어 있는데도 불구하고 아크흔적이 발견되는 화재현장이 종종 발생하고 있지만 이에 대한 원인규명이나 대책에 관한 연구가 상당히 미흡한 현실이다.

본 연구는 아크현상에 대하여 수학적으로 해석하고 현재 국내에서 사용되고 있는 저압 상용전압 회로에서 아크가 발생할 경우 아크전압에 따른 아크전류와 전력을 정량적으로 분석하여 아크에 의한 전기화재위험성을 평가함과 더불어 아크에 의한 오류를 감소시키는 데 도움을 주고자 한다.

2. 전기화재

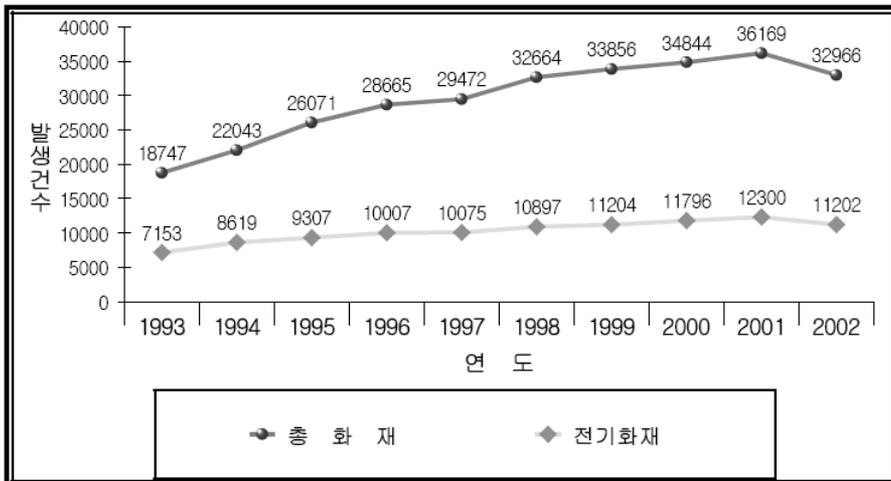
2.1 전기화재통계⁴⁾

최근 10년간 전기화재 발생현황은 <표 1>과 [그림 1]에서 나타난 바와 같이 발생건수는 1993년의 7,153건과 비교하여 2001년에는 약 1.9배가 증가한 12,300건으로 나타났다. 이와 같이 전기화재가 증가하는 이유는 생활수준 향상으로 가전기기가 많이 대형화되고 더불어 다양한 부하기기가 늘어나 과부하현상과 노후한 설비의 적절한 교체가 이루어지지 않은 결과로 분석된다. 또한 <표 1>에서 보듯이 전기화재 점유율은 매년 30% 이상을 차지하고 있는 것으로 나타나 높은 점유율을 보이고 있다. 물론 국내 화재원인조사 여건상 <표 1>의 통계 결과가 완전히 신뢰할 수 있는 결과가 아니라 하더라도 전기화재 점유율이 높은 것은 사실이다.

2002년도 전기화재는 11,202건이 발생하여 이중 합선(단락)에 의한 화재가 전체의 78%인 8,743건이었고, 다음으로 과부하에 의한 전기화재

〈 표 1〉 최근 10년간의 전기화재 현황

연도 \ 구분	총화재	전기화재	점유율(%)	인명피해(명) 사망/부상	재산피해 (백만원)
1993	18,747	7,153	38.2	93/218	20,135
1994	22,043	8,619	39.1	121/258	31,395
1995	26,071	9,307	35.7	78/298	39,209
1996	28,665	10,007	34.9	105/327	51,321
1997	29,472	10,075	34.2	75/273	52,628
1998	32,664	10,897	33.4	88/362	57,647
1999	33,856	11,204	33.1	59/301	54,673
2000	34,844	11,796	33.9	73/389	58,985
2001	36,169	12,300	34.0	77/381	67,856
2002	32,966	11,202	34.0	87/375	57,958

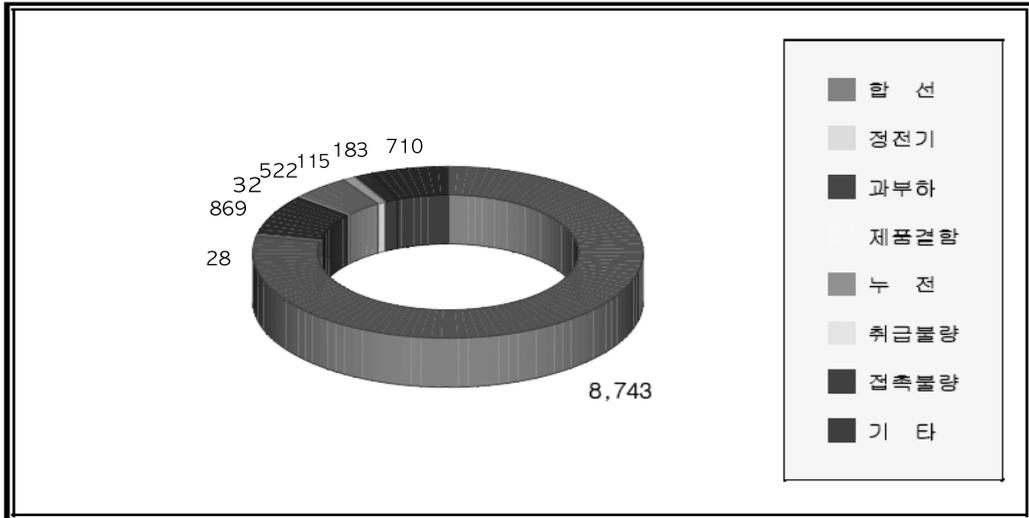


[그림 1] 최근 10년간 전기화재 발생현황

가 869건으로 7.8%를 점유하였고, 누전·절연불량으로 522건(4.7%)이 발생하였다. 합선(단락)에 의한 화재가 매년 수위를 차지하고 있다. 이와 같이 합선으로 인한 화재가 높은 비율을 차지하는 것은 두 가지 이유로 볼 수 있다. 첫 번째는 화재조사 시에 합선 흔적이 발견되면 다른 원인은 고려하지 않고 화재원인을 합선으로 잘못 판단한 결과이고, 두 번째는 합선이 발생한 곳에서의 전기설비에 회

로차단기 등과 같은 회로방호장치(protective system)가 설치되지 않았다는 의미이다.

화재가 발생하면 전선 도체 사이에 아크가 발생하기 때문에 화재조사 시에 합선 등으로 인한 전선도체 사이의 아크인지 화재의 열에 의한 아크인지를 정확히 구분해야 신뢰성 있는 화재원인조사가 될 수 있을 것이다.



[그림 2] 화재원인별 발생현황

2.2 전기화재 발생원인⁵⁾

2.2.1 합선(단락, short)에 의한 발화

보통 저압 옥내 배선이 단락한 순간의 전류는 공급 전압이나 전선의 굵기, 배선의 길이에 따라 상이하나 대략 1,000[A] 이상이다. 합선에 의해 발화하는 사례는,

- ① 단락점에서 발생한 아크 혹은 스파크로 인하여 주변에 있는 가연성 물질(가스, 유류, 분진 등)에 착화되는 경우
- ② 단락 순간 적열된 전선이 주변의 가연성 물질에 접촉되어 착화되는 경우
- ③ 단락점 이외의 장소에서 전선 피복이 연소하여 이것이 발화원으로 되는 경우 등을 들 수 있다.

이상의 각 경우는 통전상태에서의 단락현상이고, 만약 단락 회로가 구성되어 있는 상태에서 전원이 투입된다면 회로 중에서 가장 약한 부분의 전선이 용단되는 경우도 생기는데 이때의 단락흔은 용단 망울을 형성하는 것이 보통이다.

2.2.2 과전류에 의한 발화

전선에 전류가 흐르면 Joule의 법칙에 의하여, 발열량 H[cal]는

$$H = 0.24 \int_0^t I^2 \cdot R dt = 0.24 I^2 \cdot Rt \text{ [cal]} \dots (1)$$

I: 전류[A], R: 저항[Ω], t: 시간[sec]

의 열이 발생되는데 발열과 방열이 평형 되는 안전전류(허용전류)의 정상 상태에서는 이 발열이 화재의 원인이 될 수 없으나, 과부하가 걸리거나, 전선 굵기가 규격 미달이면 과전류 상태가 되어 전선 절연물의 최고 허용 온도를 초과하는 과열 현상이 나타난다. 그 결과 전선 피복이 탈락하여 주변의 착화물에 대한 발화원이 될 수 있다.

2.2.3 누전에 의한 발화

전선이나 전기 기기의 절연이 열화, 노화, 탄화, 기계적 손상 등으로 인하여 파괴되어 충전체가 전기적으로 연결된 건물 내의 금속체를 통하여 대지와 접촉되면, 전류가 그 금속체를 통하여 지면으로 유출되는데 이와 같이 전류가 대지로 흐르는 것을 누전이라 한다.

충전부와 대지 사이에 일단의 누전 경로가 형성

되면 누설 전류로 인한 열이 절연체를 국부적으로 파괴시키게 되므로 시간이 경과함에 따라 누전 상태가 점차적으로 누진되어 이로 인한 발열이 가연성 물질에 대한 발화원이 된다.

2.2.4 절연불량(절연열화, 탄화)에 의한 발화

옥내 배선 및 배선기구, 각종 전기 기기 등의 절연체는 그 대부분이 유기질로 되어 있는데, 일반적으로 유기질은 오랜 세월이 지나면 그 절연성이 열화 된다. 그밖에도 유기질 절연물은 스파크 등의 고온하에서나 공기의 유통이 나쁜 곳에서 가열되면 탄화 과정을 겪어 도전성을 띄게 된다. 이와 같이 도전성을 띄게 된 곳에 전압이 걸리면 미소 전류에 의한 국부 발열로 인하여 탄화 현상이 누진적으로 촉진되어 유기 물질이 고온에 이르러 발화하거나, 부근의 가연물에 착화하게 된다.

2.2.5 접촉불량에 의한 발화

전선과 전선, 전선과 단자 등의 도체에 있어서 접촉 상태가 불완전하면 특별한 접촉저항을 나타내어 발화하게 된다. 이 발열은 국부적이며 그 부분에 산화, 열팽창, 수축 등의 현상이 나타나 접촉면이 거칠어지므로 접촉 저항이 증대해져서 적열 상태가 되어 주위의 가연물을 발화시킨다. 이 경우에는 특수한 부식 및 과열의 흔적이 남기 때문에 식별하기가 용이하다. 구체적인 실례로써 코드를 도중에서 접속하였을 때 그 접촉 상태가 좋지 않아 발열하여 코드에 발화하는 경우와 주상 변압기의 2차 리드선과 캐치홀더(catch holder)의 접속부에서 조임이 이루어져 접촉불량으로 발열하여 리드선에 착화되는 경우 등을 들 수 있다.

2.2.6 정전기에 의한 발화

정전기로 인하여 화재로 진전되는 것은 정전 스파크에 의하여 가연성 가스와 인화성 물질에 인화되는 경우로서 아래의 조건이 만족되어야 한다.

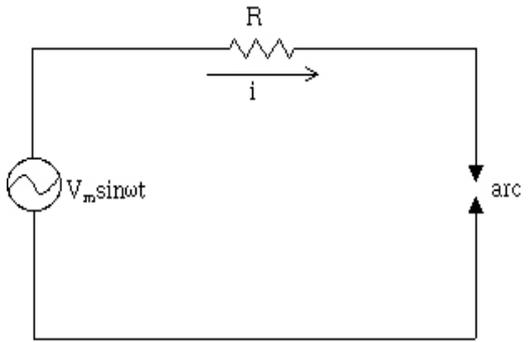
- ① 가연성 가스 및 증기가 폭발한계 내에 있을 것.
- ② 정전 스파크의 에너지가 가연성 가스 및 증기의 최소 착화 에너지 이상 일 것.
- ③ 방전하기에 충분한 전위가 있을 것.

정전기의 방전 에너지는 다음 식으로 주어진다.
 $W = \frac{1}{2} Q \cdot V = \frac{1}{2} C V^2$ [J].....(2)
 V:대전전압[V], C:정전용량[F], Q:정전하량[C]

3. 아크현상 해석^{6)~8)}

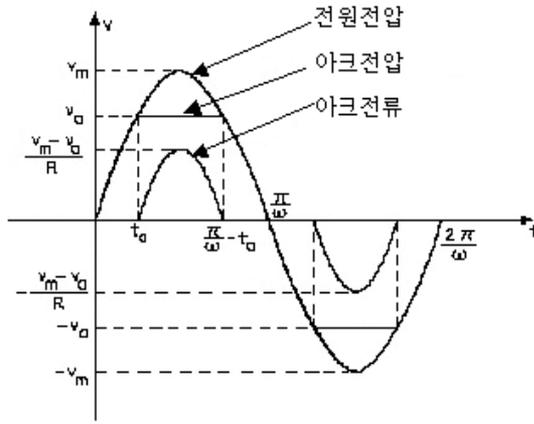
[그림 3]은 아크가 발생했을 때 전원전압과 아크 발생점까지 임피던스와의 등가회로이다. 본 연구에서는 아크점까지의 임피던스를 순저항만으로 구성되어 있다고 가정하였다.

$t = 0$ 에서부터 시간이 진행할 때 전류는 0이 되고 전압은 증가한다. 시간 t_a 에서 전압이 V_a 로 될 때 아크전압은 전류가 흐르는 동안 일정하게 된다. 그리고 시간 $(\frac{\pi}{\omega} - t_a)$ 에서 전압은 V_a 로 되지만 아크 내에 전류는 흐르지 않는다. 두 번째 반주기에 서도 같은 현상이 발생하면서 부호만 반대이다. 이와 같은 과정을 나타낸 것이 [그림 4]이다.



[그림 3] 아크전압과 임피던스에 대한 등가회로

첫 번째 반주기에 대하여 아크전압을 수학적으로 나타내면



[그림 4] 아크전압과 아크전류파형

$$\begin{aligned}
 v &= V_m \sin \omega t & 0 < t < t_a \\
 v &= V_a & t_a < t < \pi/\omega - t_a \\
 v &= V_m \sin \omega t & \pi/\omega - t_a < t < \pi/\omega
 \end{aligned} \dots\dots(1)$$

여기서 $t_a = 1/\omega \sin^{-1}(V_a/V_m)$

아크전류는

$$\begin{aligned}
 i &= 0 & 0 < t < t_a \\
 i &= \frac{V_m \sin \omega t - V_a}{R} & t_a < t < \pi/\omega - t_a \\
 i &= 0 & \pi/\omega - t_a < t < \pi/\omega
 \end{aligned} \dots\dots(2)$$

전류의 RMS(root mean square)값은

$$I = \sqrt{\frac{2\omega}{\pi} \int_{t_a}^{\pi/2\omega} \left(\frac{V_m \sin \omega t - V_a}{R} \right)^2 dt} \dots\dots(3)$$

식 (3)을 적분하고 항들을 정리하면

$$I = \frac{V_m}{R} \sqrt{\frac{2}{\pi} \left[\left(\frac{1}{2} + x^2 \right) \left(\frac{\pi}{2} - \sin^{-1} x \right) - \frac{3}{2} x \sqrt{1-x^2} \right]} \dots\dots(4)$$

여기서 $x = V_a/V_m$

식 (4)의 근호부분을 라 하면

$$I = \frac{V_m}{R} f_1(x) \dots\dots(5)$$

식 (3)을 이용하여 아크내의 전력을 나타내면

$$P = \frac{2\omega}{\pi} \int_{t_a}^{\pi/2\omega} \frac{V_a (V_m \sin \omega t - V_a)}{R} dt \dots\dots(6)$$

식 (6)을 적분하고 항들을 정리하면

$$P = \frac{V_m^2}{R} \frac{2}{\pi} x \left[\sqrt{1-x^2} + x \left(\sin^{-1} x - \frac{\pi}{2} \right) \right] \dots\dots(7)$$

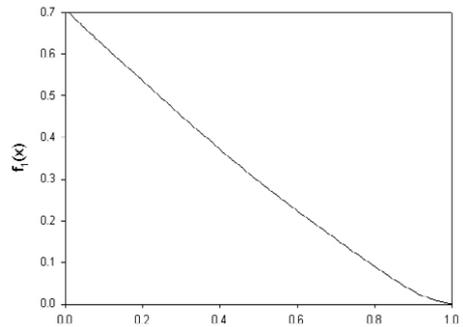
식을 간소화시키기 위하여 로 놓으면

$$P = \frac{V_m^2}{R} f_2(x) \dots\dots(8)$$

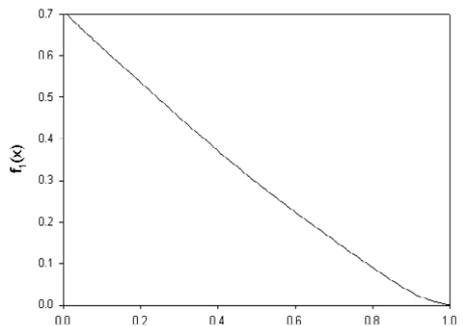
본 연구에서는 이와 같은 수식들을 이용하여 아크전류를 계산하고, 이 아크전류와 아크전압에 따른 전력을 계산하여 아크에 의한 전기화재위험성을 평가하였다.

4. 아크에 의한 전기화재위험성

[그림 5]는 아크전압과 전원전압의 비율에 따른 아크전류를 나타낸 것으로 아크전압과 전원전압의 비가 커질수록 아크전류의 크기는 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 전압이 커짐에 따라 전류는 상대



[그림 5] $x = (V_a/V_m)$ 에 대한 $f_1(x)$



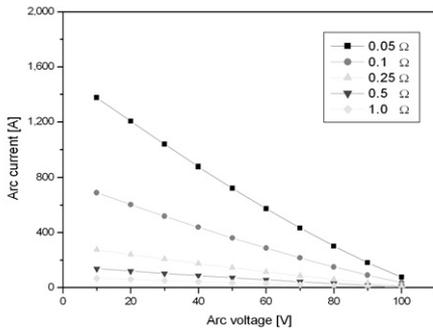
[그림 6] $x = (V_a/V_m)$ 에 대한 $f_2(x)$

적으로 낮게 나타난다는 것을 의미한다.

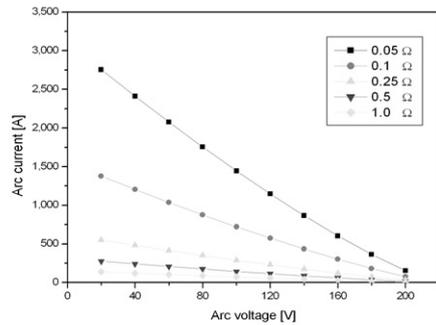
[그림 6]은 아크전압과 전원전압의 비율에 따른 아크전력을 나타낸 것으로 아크전압과 전원전압의 비가 0.4 정도 되는 부분에서 가장 높은 값을 나타내는 것을 볼 수 있다. 물론 식 (7)과 (8)에서 알 수 있듯이 전력은 전원전압의 자승에 비례하기 때문에 실제 아크전력은 [그림 6]에 나타난 것과 다소 다르게 될 수 있지만 전압비 항만을 고려할 때 아크전력은 전압이 커짐에 따라 선형적으로 증가하는 것이 아니라는 것을 알 수 있다.

일반적으로 전선의 도체로 사용되는 구리나 알루미늄의 저항은 25℃일 때 100당 0.05 ~ 1 [Ω] 정도이다⁹⁾. 따라서 [그림 4]의 등가회로에서 알 수 있듯이 R은 전선의 도체저항이라 할 수 있으므로 전절에서 고찰한 수식의 저항 R은 이 범위의 저항을 고려해야 한다.

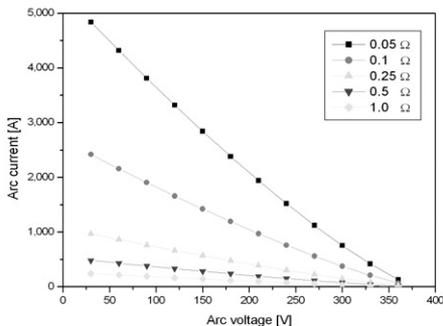
[그림 7]에서 [그림 9]는 국내에서 사용되고 있는 저압 상용전압인 110 V, 220 V, 380 V를 사용하는 회로에서 아크가 발생했을 때 아크전압에 따른 아크전류의 크기를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 아크전류는 아크전압이 커짐에 따라 점차 감소하는 것을 알 수 있으며, 전원전압이 커짐에 따라 발생하는 아크전류의 크기도 커지는 것을 확인할 수 있다. 이것은 전절의 아크현상 해석에서 살펴본 것듯이 아크전류는 아크전압에 반비례하기 때문인 것으로 사료된다. 현재 일반적으로 가장 많이 사용되는 상용전압인 220 V의 경우 [그림 8]에서 보듯이 전선의 도체저항이 0.05Ω인 회로에서 아크가 발생하게 되면 전류는 수천 A가 되는 것을 알 수 있다. 단순히 전류의 열작용만을 고려할 때 이와 같은 전류는 주위 가연물을 손쉽게 발화시킬 수 있는 값이라는 것을 알 수 있다. 또한 그림에서 보듯



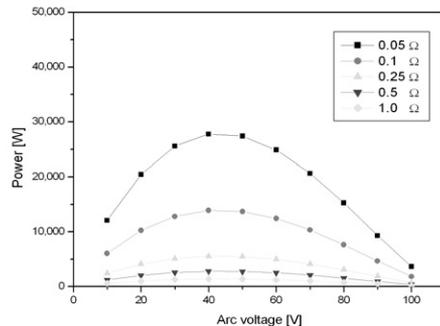
[그림 7] 전원전압 110V인 경우 아크전압에 따른 아크전류



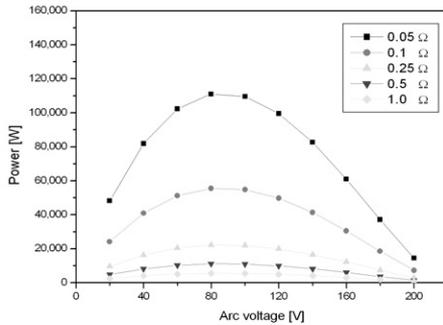
[그림 8] 전원전압 220V인 경우 아크전압에 따른 아크전류



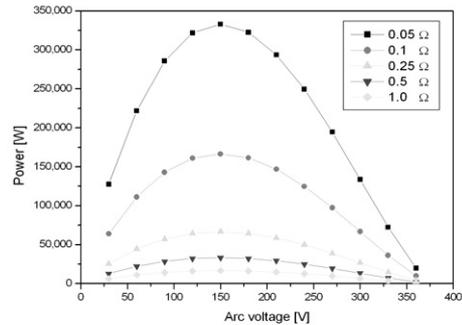
[그림 9] 전원전압 380V인 경우 아크전압에 따른 아크전류



[그림 10] 전원전압 110V인 경우 아크전압에 따른 아크전류



[그림 11] 전원전압 220V인 경우 아크전압에 따라 발생하는 전력



[그림 12] 전원전압 380V인 경우 아크전압에 따라 발생하는 전력

이 아크전압이 높게 되면 아크전류는 상당히 낮게 된다. 이는 회로에 차단기 등의 회로보호장치가 설치되어 있을지라도 아크가 발생하여 아크전압이 높게 되면 아크전류는 낮기 때문에 현재 사용되고 있는 전류동작형의 회로보호장치는 동작하지 않을 것이고 아크는 계속 발생, 축적된 에너지에 의해 전기화재가 발생할 가능성이 높아지는 것이다.

[그림 10]에서 [그림 12]는 전원전압이 각각 110 V, 220 V, 380 V인 경우에 아크전압에 따른 전력을 나타낸 것이다. 아크에 의한 전력은 아크전류와는 다르게 아크전압이 커짐에 따라 상승하지 않고 전원전압의 약 40 % 이상이 되면 다시 감소하는 것을 알 수 있고, 저항이 커짐에 따라 발생할 수 있는 전력의 크기는 작다는 것을 확인할 수 있다. 아크전압에 따른 전력이 최고치가 되기 전에 회로를 차단해야 전기화재위험성을 감소시킬 수 있다.

[그림 10]을 보면 도체저항이 0.05Ω이고 전원전압이 110 V인 경우 전력은 30 kW까지 발생하

는 것을 알 수 있다. 시간개념을 도입했을 때 이와 같은 전력에 의해 상당히 높은 에너지가 방출될 수 있으므로 전압이 비교적 낮은 110 V일지라도 전기화재위험성은 매우 높다는 것을 알 수 있다. 또한 220 V인 경우에는 도체 저항이 큰 경우에도 수십 kW의 높은 전력이 발생한다는 것을 알 수 있고, 380 V인 경우에는 더 높은 전력이 발생할 수 있어 전기화재위험성이 매우 높다는 것을 알 수 있다.

〈표 2〉는 전원전압에 따른 각 도체저항에서의 전력의 최대값을 나타낸 것으로 도체저항이 낮은 경우에는 전력이 수백 kW까지 높아지는 것을 알 수 있다. 따라서 일단 전선 절연물이 열화 등에 의하여 합선 등으로 인한 아크가 발생한다면 전기화재위험성은 매우 높기 때문에 아크가 발생하지 않도록 사전에 차단해야 하지만 현재 사용되는 전류동작형의 차단기 등은 [그림 7, 8, 9]에서 알 수 있듯이 아크전압이 높은 경우에는 회로를 차단할 수 없다. 따라서 전류동작형의 회로차단기와 전압동

〈표 2〉 전원전압과 도체저항에 따른 전력의 최대값

도체저항[Ω]	0.05	0.1	0.25	0.5	1
전원전압					
110 V인 경우의 전력 [W]	27,769.06	13,884.53	5,553.81	2,776.91	1,388.45
220 V인 경우의 전력 [W]	111,076.2	55,538.12	22,215.25	11,107.62	5,553.81
380 V인 경우 전력 [W]	333,059.7	166,529.9	66,611.94	33,305.97	16,652.99

작형의 회로차단기가 병용되어야 아크에 의한 전기화재위험성을 최소화시킬 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

전기화재와 관련한 아크에 대하여 수학적 모델링을 통하여 화재위험성을 정량적으로 분석한 결과 아크전류의 크기는 아크전압과 전압전압의 비가 높아질수록 커지고, 전력은 아크전압이 전압전압의 약 40 %되는 부분에서 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 또한 아크전압에 따른 아크전류는 도체저항이 작은 경우에도 수천 A에 도달하지만, 아크전압이 높아짐에 따라 아크전류도 낮아져 회로방호장치가 설치된 경우에도 아크는 계속 유지되어 이에 의한 전기화재발생 가능성이 높은 것을 확인할 수 있었다.

또한 아크전류와 아크전압에 의해 발생하는 전력은 도체저항이 낮은 경우일지라도 수십~수백 kW의 높은 전력이 발생되므로 이로 인한 에너지에 의하여 전기화재위험성이 높은 것을 알 수 있었다.

현재 대부분의 회로차단기는 변류기를 이용하여 고장전류를 검출하는 방식의 전류동작형을 사용하고 있지만, 좀더 확실하게 전기화재를 예방하기 위해서는 전류동작방식과 전압동작방식이 혼합된 형태의 회로차단기에 관한 연구가 필요할 것으로 사료된다. **FILK**

[참고문헌]

1. 김두현의 5인, 전기안전공학, 동화기술, pp235~244, 1995
2. 東京消防廳 警防部 調査課, 電氣火災 - 原因と鑑識, 1993
3. B. Beland, "Arcing phenomenon as related

to fire investigation", Fire technology, Vol. 17, No. 3, pp189~201, 1981

4. 전기안전공사, 전기재해통계, 2003
5. F. W. Cooper, Electrical safety engineering, 3rd ed. Butterworth Heinemann, pp.113~144, 1993.
6. E. K. Greenwald, Electrical hazards and accidents - their cause and prevention, Van nostrand reinhold, pp116~134, 1991
7. Bruce, V. Ettling. "Electrical wiring in building fires", Fire technology, Vol 14, No. 4, pp317~325, 1978
8. A. A. Hattangadi, Electrical fires and failures, Mcgraw-Hill, pp35~60, 1999
9. B. Beland, "Examination of electrical conductors following a fire", Fire technology, Vol. 16, No. 4, pp252~258, 1980

