

KOSHA GUIDE

E - 167 - 2017

활선작업의 최소접근거리 계산에 관한 기술지침

2017. 10.

한국산업안전보건공단

안전보건기술지침의 개요

- 작성자 : 서울과학기술대학교 류보혁
- 제·개정 경과
 - 2017년 10월 전기분야 제정위원회 심의(제정)
- 관련규격 및 자료
 - IEC 61472(Live working - Minimum approach distances - Method of calculation)
 - NFPA 70E(Standard for Electrical safety in the workplace(Chapter I, II))
 - KOSHA GUIDE E-109-2011(활선작업 및 활선근접작업에 관한 기술지침)
- 관련법규·규칙·고시 등
 - 산업안전보건법 제23조(안전조치)
 - 산업안전보건기준에 관한 규칙 제3장(전기로 인한 위험방지)제3절(전기작업에 대한 위험방지)」
- 기술지침의 적용 및 문의
 - 이 기술지침에 대한 의견 또는 문의는 한국산업안전보건공단 홈페이지(www.kosha.or.kr)의 안전보건기술지침 소관 분야별 문의처 안내를 참고하시기 바랍니다.

공표일자 : 2017년 10월 31일

제 정 자 : 한국산업안전보건공단 이사장

활선작업의 최소접근거리 계산에 관한 기술지침

1. 목 적

이 지침은 「산업안전보건기준에 관한 규칙 제3장제3절(전기작업에 대한 위험방지)」에 따라 활선작업 시의 최소 접근거리 계산에 관하여 필요한 사항을 정함을 목적으로 한다.

2. 적용범위

- (1) 이 지침은 72.5 kV~800 kV 사이의 활선작업을 수행하기 위한 최소 접근거리를 계산하는 방법에 대하여 적용한다.
- (2) 이 지침에서 계산한 최소접근거리가 「산업안전보건기준에 관한 규칙 제321조(충전전로에서의 전기작업)」에서의 ‘충전전로에 대한 접근한계거리’보다 짧은 경우에는 해당 규칙을 우선 적용한다.

3. 용어의 정의

- (1) 이 지침에서 사용되는 용어의 정의는 다음과 같다.
 - (가) “접근한계거리”라 함은 「산업안전보건기준에 관한 규칙 제321조(충전전로에서의 전기작업)」에서 규정하는 ‘충전전로 접근한계거리’를 말하며, 유자격자가 충전전로 인근에서 작업하는 경우에 적용한다.
 - (나) “계통 최고전압(U_S)(Highest voltage of a system)”이라 함은 계통의 임의 시간 및 지점에서 정상 운전 조건 하에서 발생하는 운전전압의 최고값(상간 전압)을 말한다.
 - 주) 개폐조작, 비정상적인 조작 및 전압의 순간 변동 등으로 인한 과도 과전압은

고려하지 않는다.

- (다) “과도 과전압(Transient overvoltage)”이라 함은 보통은 크게 진폭을 감소시키는 수천만분의 1초 또는 그 보다 짧은 진동이나 진동하지 않는 단시간 지속 과전압을 말한다.
 - (라) “50% 과열방전전압(U_{50})(Fifty per cent disruptive discharge voltage)”라 함은 절연내력시험이 실시될 때마다 50%의 과열방전 개시 확률을 갖고 있는 임펄스 침투 값을 말한다.
 - (마) “통계학상의 내전압(U_{90})(Statistical withstand voltage)”이라 함은 절연이 견딜 수 있는 확률 90%를 나타내는 과전압을 말한다.
 - (바) “통계학상의 과전압(U_2)(Statistical overvoltage)”라 함은 확률 2 %가 초과하는 과전압을 말한다.
 - (사) “단위값(Per unit value(U))(Per unit value)”이라 함은 $U_S\sqrt{2}/\sqrt{3}$ 으로 표시되는 과전압(또는 전압)의 크기에 대한 단위 값의 표현을 말한다.
- 주) 이는 아래 정의된 U_{e2} , U_{p2} , U_{et} 및 U_{pt} 에 적용된다.
- (아) “최소 접근거리(D_A)(Minimum approach distance)”라 함은 사람의 신체일부 또는 직접적으로 다루는 도전성 기구의 어떤 부분과 전위차가 있는 다른 어떤 설비사이를 유지하는 대기중의 최소거리를 말한다. 이 최소 접근거리는 선정된 전기적, 인간공학적 요소에 따라 바뀐다.
 - (자) “전기 이격거리(D_U)(Electrical distance)”이라 함은 활선작업 중에 전기사고를 방지하기 위하여 이격시킨 대기중의 거리를 말한다. 일반적인 용어에서 충전부 및/또는 접지부 사이로 표현되는 2개의 전극사이의 최소 작업거리의 전기 성분은 선택된 조건에서 발생할 수 있는 가장 큰 전기스트레스 하에서의 섬락을 방지하기 위하여 요구된다.
 - (차) “인간공학적 거리(D_E)(Ergonomic distance)”라 함은 작업 중에 사전 평가된 거리에서 부주의한 움직임이나 실수를 감안한 거리를 말한다. 이 거리는 사용 및 조작되는 기구와 마찬가지로 사람의 행위를 고려한다.
 - (카) “손상된 애자(Damaged insulator)”라 함은 절연 성능에 영향을 미치는 제조 결함이 있거나 사용 중에 기능이 저하된 애자를 말한다.
 - (타) “최소 잔여 절연체 길이(Minimum residual insulation length)”라 함은 부동도체 및 손상된 절연체 부분을 고려하여 활성 부품과 접지된 부품 사이에 파괴 방전을 방지하기 위해 필요한 절연체 길이를 말한다.
 - (파) “부품(Part)”이라 함은 작업자, 활선작업 기구 및 시스템 절연재를 제외하고 작업 위치에 있는 요소를 말한다.

(하) “작업 위치(Work location)”이라 함은 작업 활동이 수행될 예정이거나, 수행되고 있거나, 수행된 현장, 장소 또는 구역을 말한다.

(2) 기타 이 지침에서 사용하는 용어의 정의는 특별한 규정이 있는 경우를 제외하고는 산업안전보건법, 같은 법 시행령, 같은 법 시행규칙 및 산업안전보건기준에 관한 규칙에서 정하는 바에 의한다.

4. 일반사항

4.1 개요

이 지침에서 기술하는 방법에 의하여 계산된 내전압 및 최소접근거리는 다음과 같은 전제조건하에서 평가되었다.

- ① 작업자가 관련 활선작업에 대하여 충분히 교육받고 해당 작업에 숙달(유자격자)되어 있다.
- ② 예상되는 과전압이 최소접근거리를 결정하기 위해 선택한 값을 넘지 않는다.
- ③ 순간 과전압은 결정적인 과전압이다.
- ④ 기구 절연이 표면에 연속적인 수막을 형성하지 않는다.
- ⑤ 작업구역 10 km 이내에 관측되는 뇌는 없는 것으로 본다.
- ⑥ 기구의 도전성 부품 영향을 고려한다.
- ⑦ 절연내력에 대한 고도영향을 고려한다.

4.2 계산 방법

(1) 최소접근거리를 계산하는 경우에는 다음 사항을 고려한다.

- (가) 작업구역(U_2)에서 예상되는 과전압 설정 및 작업구역(U_{g0})에서 요구되는 절연의 내전압 결정
- (나) 애자에 인접하여 작업하는 경우에는 최소 잔여 절연체 길이(D_{LINS})계산
- (다) U_{g0} 과 관련된 최소 이격거리(D_U) 계산
- (라) 부주의한 움직임과 같은 활선작업 관련 인간공학적 요인을 고려한 거리 추가

(2) 최소접근거리(D_A)는 다음과 같이 정의된다.

$$D_A = D_U (K_s = 1.0) + D_E \quad (1)$$

여기에서

- D_U : U_{90} 값을 얻기 위해 필요한 최소 전기 이격거리
- D_E : 거리계산시 작업절차, 훈련수준, 작업자의 숙련도, 구조물의 형태 및 부주의한 움직임이나 실수와 같은 우연성의 요인을 통해 보완된 최소접근거리의 조절을 감안한 인간공학적 거리(<부록 1>의 세부 정보 참조).

주) 인간공학적 거리 D_E 를 고려해 선택된 값은 사용자에게 따라 다르다. 계통 전압과 함께 D_E 는 다음 3가지의 변화량을 갖는다. 즉 증가, 감소, 지속 등. D_E 의 계산값은 각각의 사용자에게 규정되지만 일반적으로 그 값은 0.2 m에서 1 m 범위 내로 한다(보다 자세한 내용은 <부록 6> 참조).

5. 계산에 영향을 주는 요소

근로자가 작업하는 전로 과전압의 최대 크기는 재폐로차단장치를 설치하지 않는 설비 또는 보호갭이나 피뢰기의 사용 등에 의해 감소될 수 있으므로 이를 고려한다. 그리고 일반적으로 보호갭은 69 kV 이상의 송전설비에서 사용되며 가능한 한 작업구역 가까이 또는 말단 장비에 설치한다.

5.1 통계학상의 과전압

(1) 작업 구역에서의 전기적 응력을 알아야 하며, 이것은 작업 구역에 존재할 수 있는 통계학상의 과전압으로 설명된다. 3상 교류 전력 계통에서 위상과 접지 사이의 통계학상의 과전압 U_{e2} 는 다음에 따른다.

$$U_{e2} = (\sqrt{2}/\sqrt{3})U_s U_{e2} \quad (2)$$

여기에서

- $U_s(\sqrt{2}/\sqrt{3})$: 계통의 최대 전압(kV)
- U_{e2} : 단위당 표현되는 통계학상의 대지 과전압

(2) 상간 통계 과전압 U_{p2} 는 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$U_{p2} = (\sqrt{2} / \sqrt{3}) U_s U_{p2} \quad (3)$$

여기에서

- U_{p2} : 단위 당 표현되는 통계학상의 상간 과전압

(3) 만약 상간 자료를 구할 수 없다면, U_{p2} 대략적인 값은 다음의 공식에 의하여 U_{e2} 에서 유추할 수 있다.

$$U_{p2} = 1.35 U_{e2} + 0.45 \quad (4)$$

(3) 고려하여야 할 과도 과전압은 작업중인 선로나 인접 선로 또는 관련 장비 등 어디에서는 계통 고장과 개폐 조작에 의하여 발생할 수 있다(<부록 2> 참조).

(4) 통계학상의 과전압 값은 과도회로망 분석기(TNA)나 또는 디지털 컴퓨터 계산에 의해 측정 또는 결정하여야 한다. 만약, 이러한 연구가 통계학상의 과전압(2% 값)을 제시하지 않고 단지 통계학상의 분포없이 ‘생략된 값’만을 제시한다면, 2% 생략된 값의 변형을 가져올 수 있다(<부록 1> 참조). 다른 값을 구할 수 없는 경우에, 사용하기 위해 통계학적인 과전압의 대표값은 <부록 1>에 나타내었다.

5.2 갭 강도

(1) 최소접근거리를 결정하기 위하여 활선작업시 요구되는 내전압은 다음과 같은 수식에 의하여 결정되는 전압 U_{90} 과 같은 값을 취할 수 있다.

$$U_{90} = K_s U_2 \quad (5)$$

(2) 대지전압과 상간전압을 각각 고려하고, 식 (5)와 식 (2) 및 (3)을 결합하면 다음과 같이 표현된다.

$$U_{e90} = K_s (\sqrt{2} / \sqrt{3}) U_s U_{e2} \quad (6)$$

$$U_{e90} = K_s (\sqrt{2} / \sqrt{3}) U_s U_{p2} \quad (7)$$

여기에서,

- U_{90} : 통계학상의 내전압 (내전압 확률 90%의 절연부의 전압)
- U_2 : 2% 통계학상의 과전압
- K_S : 통계학상의 계수[공식 (5), (6) 및 (7)의 1.0 또는 1.1](5. 참조)
- Ve_{90} 및 U_{p90} : 상-상 및 상-대지의 통계학상의 내전압(kV)
- Ve_2 및 U_{p2} : 단위 당 표현되는 통계학상의 과전압

5.3 전기 이격 거리 계산

5.3.1 일반적인 방정식

갭의 강도는 D_u 값을 계산하기 위한 다음의 공식에 사용되는 계수 K_t 에 결합할 수 있는 일련의 고려사항에 의해 영향을 받는다.

$$D_U = 2.17(e^{U_{90}/1080K_t} - 1) + F \quad (8)$$

여기에서,

- F : 부동체(Floating object)의 거리(m) (5.4.4 참조)
- U_9 : 상-접지(U_{e90})또는 상-상(U_{p90})통계 충격 내전압(kV)
- K_t 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_t = K_s K_g K_a K_f K_i \quad (9)$$

5.3.2 갭 강도에 영향을 미치는 요소

5.3.2.1 통계 표준편차 계수 K_S

계수 K_S 는 통계학상의 절연파괴전압상태를 나타낸다. 만약 표준화된 일반적인 편차 S_e 의 값이 갭 구조 및 사용되는 거리를 대표하는 시험으로부터 알 수 없다면, 양(+)의 임펄스용 5 %의 표준화된 편차 기준인 0.936 을 이용할 수 있다.(<부록 3> 참조)

5.3.2.2 갭 계수 kg

갭 계수 kg 는 공기의 절연 강도에서 갭 배열의 영향을 고려한다(<부록 4> 참조).

주1) 만약 고려되는 계통 전압에서 존재하는 구조 배열을 위한 적절한 갭 계수를 선정할 수 없다면 배열의 다양성을 허용하기 위해 $kg=1.2$, $kg=1.45$ 의 대표값을 권장한다.

주2) CIGRÉ 브로셔 72¹ 및 KS C IEC 60071-2¹는 다양한 갭 배열에 관한 k_g 의 결정에 관한 더 많은 정보를 제공한다.

5.3.2.3 대기계수 K_a

- (1) 대기계수는 공기밀도에 영향을 받으며, 공기밀도는 온도, 습도 및 고도에 따라 달라진다. 온도와 습도의 영향은 고도 영향에 비해 무시할 수 있는 수준이다.
- (2) 작업구역에서 공기절연의 전기적 강도는 해수면 고도(해발, Sea level)의 영향을 받고, 갭의 길이와 넓이의 변화 또는 반대로 내전압을 변경시키는 이 영향은 대기계수 K_a 로 나타낸다. 기준 고도는 가장 빈번하게 활선작업이 이루어지는 곳 바로 아래로, 적당한 K_a 는 <표 1>로부터 구하거나 또는 <부록 5>에 제시된 방법에 의하여 특정고도 및 U_{90} 값으로 계산할 수 있다.

<표 1> 평균 K_a 값

고도(m)	K_a (평균)	고도(m)	K_a (평균)	비고
0	1.000	1,500	0.909	
100	0.995	2,000	0.875	
300	0.983	2,500	0.841	
500	0.972	3,000	0.805	
1,000	0.941			

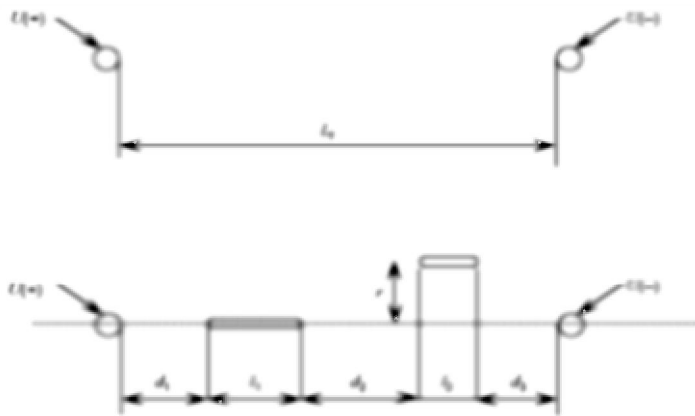
- (3) 활선작업이 기준 고도보다 높은 곳에서 실시되는 경우에는 평균 대기압보다 낮은 기압을 고려하여 전기 이격거리 D_U 를 증가시킨다. 이는 <부록 5>에서 제시한 식을 이용하여 계산할 수 있는 교정고도계수를 D_U 에 곱함으로써 구할 수 있다.

5.3.2.4 부동도체 전체 계수 K_f

- (1) 부동 개체는 장을 왜곡하여 갭의 절연내력을 감소 또는 증가시킬 수 있다.
- (2) 전위가 다른 두 전극 사이에서 전극과 접촉하지 않도록 놓인 도체는 전기적으로 부동 상태이며 중간 전위를 가지게 된다. 부동 도체가 갭의 절연 내력에 미치는 영향은 부동 개체의 수량, 치수, 형태 및 갭 내 기하학적 위치에 따라 달라진다.

부동 개체가 존재하면 공기 갭(air gap)의 실제 전기적 길이가 단축된다.

- (3) 부동 개체의 영향을 계산할 때 가능한 한 모든 파괴 방전 경로를 고려하여 부동 도체 계수 k_f 를 계산해야 한다. 갭축 방향으로 모든 부동 도체의 합은 부동 도체의 길이 F 가 된다.
- (4) 고전압 선로에 대한 대부분의 활선작업에서 k_f 계수는 잔여 갭의 길이 및 갭축으로부터 도체의 측면 거리 r 에 따라 달라진다(<그림 1> 참조). 초기 공기 갭(air gap) L_f 에서 길이 F 를 빼면 D 가 얻어진다(즉, $D=L_f-F$). <부록 6>는 변수 $b=F/(D+F)$ [상 사이의 거리를 고려할 때 $b=F/(P+F)$]를 도입하여 F 와 D (상 사이의 거리를 고려할 때는 P)의 함수로 k_f 계수를 평가하는 기준을 제시한다.
- (5) 실험 연구(<부록 6> 참조)는 활선작업을 대표하는 더 가혹한 조건에서 상에서 접지까지 갭 거리가 1.2m이상일 때 k_f 계수는 0.75까지 감소할 수 있음을 보여주었다.



<그림 1> 갭의 축으로부터 거리 및 치수가 다른 두 부동 도체

- (6) <표 2>는 b 및 L_f 에 따라 k_f 를 결정하기 위한 단순화된 기준을 보여준다. k_f 값은 <부록 6>에 나타난 데이터 보간법으로 얻어진다. 초기 갭 길이 L_f 가 a.c. 시스템의 특성을 결정짓는 주요 변수 중 하나이므로 <표 2>는 잔여 갭 길이 D 의 함수가 아닌 초기 갭 길이 L_f 의 함수로 나타난 b 값을 보여준다.
- (7) 공기 갭(Air gap)에 수직으로 배치된 길거나 평평한 도체(이러한 형상에 대한 실험 데이터가 없음.)에 대해서는 보존적인 값으로 $k_f=0.75$ 를 적용할 수 있다.

<표 2> 부동 도체 계수 k_f

상-접지 갭						상-상 갭					
b^b	L_f^a m				k_f	b^b	L_f^a m				k_f
	이상	최대	이상	최대			이상	최대	이상	최대	
0.1	—	0.9	3.9	—	1	0.05	—	0.9	5.7	—	1
	0.9	3.9	—		0.95		0.9	2.1	3.8	5.7	0.95
0.15	—	0.5	4.7	—	1		0.1	2.1	3.8	—	
	0.5	1	3.3	4.7	0.95	—		0.6	6	—	1
	1	1.2	2.7	3.3	0.9	0.6		1.6	4.6	6	0.95
	1.2	2.7	—		0.85	1.6		2.2	3.6	4.6	0.9
0.2	—	0.4	4.9	—	1	2.2		3.6	—		0.85
	0.4	0.9	3.7	4.9	0.95	0.2	—	0.4	6.3	—	1
	0.9	1	3.1	3.7	0.9		0.4	1.4	5.1	6.3	0.95
	1	1.2	2.6	3.1	0.85		1.4	1.8	4.4	5.1	0.9
	1.2	2.6	—		0.8		1.8	2.3	3.5	4.4	0.85
0.25	—	0.3	5.1	—	1		2.3	3.5	—		0.8
	0.3	0.8	3.8	5.1	0.95						
	0.8	0.9	3.2	3.8	0.9						
	0.9	1.1	2.8	3.2	0.85						
	1.1	1.3	2.4	2.8	0.8						
	1.3	2.4	—		0.75						
비고 b 값과 관련된 통계표는 시험 또는 연구시 실제 유동적인 도전성 물체의 모양과 면적을 고려하기 위해 필요하다.											
^a L_f =실제 공기 갭(air gap) 길이 ^b b =유동적인 도전성 물체(들)의 실제 공기 갭(air gap) 길이의 갭축 방향 내 총 길이의 비											

- (8) 갭축으로부터 부동 개체의 거리 영향을 고려하면 다음 조건을 충족하는 경우에는 절연 내력 감소를 무시할 수 있는 수준이라고 가정할 수 있다.

$$r > 2.5F$$

- (9) 현수애자(Suspension insulator)의 금속 캡과 핀의 영향은 미약하므로 무시한다.

- (10) <부록 6>는 k_f 를 계산하기 위한 일반적인 기준을 제시한다. 부동 개체가 실제로 미치는 영향을 확인하기 위해서는 자세한 분석이 필요하다(<부록 6> 참조).

- (11) <그림 2>는 여러 가지 환선작업 및 이러한 작업이 이루어질 수 있는 구성을 보여준다. 구성에 따라 kg 및 k_f 값을 정확하게 계산해야 한다.

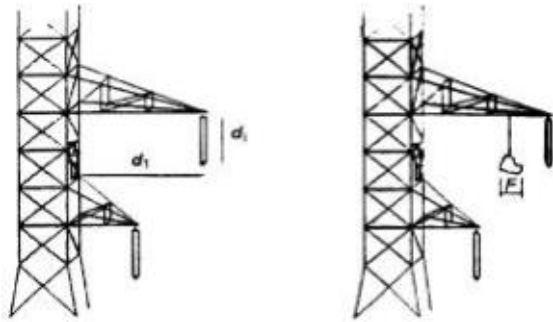
(12) 자세한 내용은 <부록 6>을 참조한다.

부유체가 없는 경우

부유체가 있는 경우

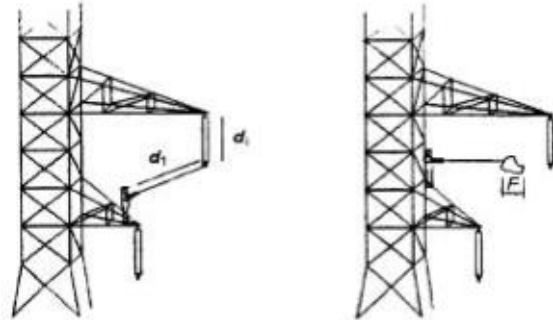
- a) 공기 갭(Air gap)이 없는
작업자

$$d_1 > D_A$$



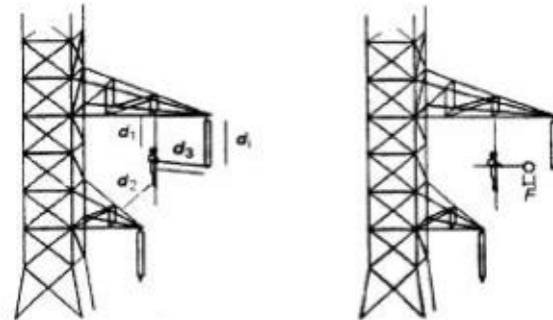
- b) 절연 스틱 사용 작업자

$$d_1 > D_A$$



- c) 중간 전위에서의 작업자

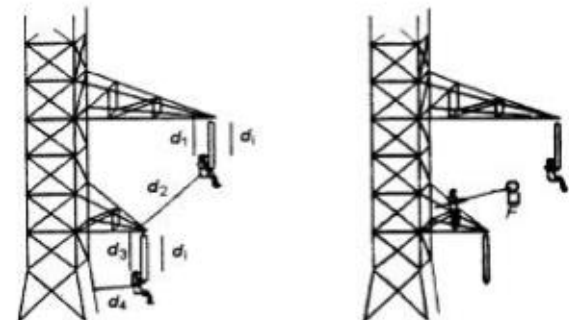
$$d_1 + d_3 \text{ 또는 } d_2 + d_3 > D_A$$



- d) 맨손 작업(직접활선작업)

$$d_1 \text{ 또는 } d_2 \text{ 그리고}$$

$$d_3 \text{ 또는 } d_4 > D_A$$



<그림 2> 대표적인 활선작업의 예

5.3.2.5 손상된 애자 계수 k_i

- (1) 애자에 인접하여 작업할 때는 최소 잔여 절연체 길이 D_{Lins} 를 계산해야 한다. 계산할 때는 손상된 애자 또는 손상된 애자의 위치가 최소 접근 거리에 미치는 영향을 고려해야 한다(방법은 4. 참조).
- (2) 나란히 사용되는 공구, 표면의 수분 또는 오염 물질, 손상된 애자 등으로 인해 애자 장치의 전기적 결함이 발생하지 않도록 주의해야 한다(<부록 7> 참조).
- (3) 작업을 개시하기 전에 손상되지 않은 애자 길이를 최소화하여 작업 위치에서 손상된 애자가 내전압에 미치는 영향을 고려해야 한다. 식 (11)로 주어지는 K_t 및 경험에 의해 유도된 식 (12)에서 주어지는 k_i 의 값을 식 (10)에 대입하여 최소 잔여 절연체 길이 D_{Lins} 를 구한다. 잔여 절연체 길이는 시험 데이터나 다른 방법으로 구할 수 있다.

$$D_{Lins}=2.17(e^{U_{90}/(1.080 K_t)}-1)+F \dots\dots\dots (10)$$

여기에서

$$K_t=k_s k_g k_a k_f k_i \dots\dots\dots (11)$$

$$k_i=1-0.8 k_d(A_d/A_o) \dots\dots\dots (12)$$

여기에서

- A_o 는 아킹 흔이나 균압환으로 분기되지 않고 손상되지 않은 애자의 길이 또는 손상되지 않은 절연 장치의 수량을 나타낸다.
- A_d 는 손상된 애자의 길이 또는 길이 A_o 인 애자의 손상된 장치 또는 아킹 흔이나 균압환으로 분기되지 않은 장치의 수량을 나타낸다.
- K_d 는 손상된 장치의 평균 상태를 나타내는 계수이다.
 - . 강화 유리 애자의 경우 $k_d=1$
 - . 자기 애자의 경우 $k_d=0\sim 1$ 이며 평균값은 $k_d=0.75$
 - . 도전성 또는 반도체성 손상을 입은 복합 애자의 경우 $k_d=1.25$ (<부록 7> 참조)

(4) 아킹 혼 또는 균압환에 관한 자세한 내용은 <부록 7>를 참조한다.

주) 아킹 혼 또는 균압환으로 차폐된 애자 부분은 애자열의 절연 내력에 그다지 영향을 미치지 않는다. 따라서 이 부분이 손상되어도 그다지 중요하지 않으므로 작업 중에 이 부분에 대한 작업 시간을 단축할 수 있다.

6. 위험성 평가

(1) 작업구역에서 전반적인 절연과괴 위험은 다음 설명된 상황의 수와 관련이 있다. 이러한 상황이 결합된 경우 절연과괴의 전반적인 위험을 감소하며, 그 예는 다음과 같다.

- (가) 실제 계통 전압은 항상 최대값을 나타내는 것은 아니다.
- (나) 과도 과전압이 최대 값인 곳과 작업 위치가 일치하지는 않는다.
- (다) 실제의 과도 과전압 파두값은 임계값보다 작다.
- (라) 과도 과전압의 약 절반정도가 음극성으로 위험이 덜하다.
- (마) 과도 과전압의 크기와 주파수는 차단기의 재폐쇄를 제한함으로써 감소된다.

(2) 따라서, 다른 전기 작업 실시와 관련된 수준에 절연과괴의 전반적인 위험을 감소시키기 위해 K_S 에 관해 1.1값을 권장한다.

(3) 인간공학적 거리 D_E 가 혼합된 경우, 작업자 또는 물체의 부주의한 움직임으로 인간공학적 이격거리를 넘는 순간에 과전압이 발생할 우려가 아주 낮기 때문에 활선작업 중에 발생하는 절연과괴의 전반적인 위험은 줄어들게 된다. 이러한 이유에 정의된 인간공학적 거리 D_E 가 포함되고 D_A 값이 $K_S=1.1$ 을 이용해 계산되어진 D_A 값 보다 항상 더 크다는 것이 훨씬 유용한 경우에 $K_S=1.0$ 인 값을 사용될 수 있다. 즉,

$$D_A = D_{U(K_S=1.0)} + D_E > D_{U(K_S=1.1)}$$

여기에서,

$D_{U(K_S=1.0)}$ 와 $D_{U(K_S=1.1)}$ 은 각각 $K_S=1.0$ 과 $K_S=1.1$ 을 이용하여 계산된 D_U 이다. 그러

나, 그렇게 할 경우, 영향적인 인간공학적 거리 D_E 는 감소되고, 그때 동일한 절연파괴의 전반적인 위험을 유지하는 것 보다 더 철저히 관리하여야 한다.

7. 최소접근거리의 계산

다음 예는 식 (8) 및 k 값, u_{e2} 또는 다른 인자가 적절하게 제시되지 않거나 전형적인 선택의 사용을 입증하기 위해 제공된다.

(1) 전기 이격거리 $D_U(m)$ 는 다음 식으로부터 계산한다.

$$D_U = 2.17(e^{u_{90}/(1080kt)} - 1) + F \quad (8)$$

여기에서,

- F : 부동체 길이 (5.4.4 참조)
- $U_{90} = K_s U_2$ (식 (5)에서)
- K_t : 식(9) $K_t = K_s kg K_a K_f K_i$ 에서 산출

(2) 인간공학적 거리 D_E (<부록 5> 참조)에 대해 적절한 값을 선정한 후, 최소접근거리 D_A 는 식 (1)에 의하여 결정할 수 있다.

$$D_A = D_{U(K_s=1.0)} + D_E \quad (9)$$

주 인간공학적 거리의 선정은 사용자에 따라 다를 수 있다. 일반적으로 그 범위는 0.2m ~ 1m 사이이다.(<부록 5> 참조)

(3) 이 보기에서는 $K_s=1.0$, $k_s=0.936$, $kg=1.2$, $k_a=0.941$ (1,000 m에 대해서는 <표 1> 참조), k_f 와 $k_i=1.0$, $U_s=525$ kV, $u_{e2}=2.2$, $F=0$, $D_E=0.3$ m에 대한 전기 이격 거리 D_U 를 계산한다.

$$D_U = 2.787 \text{ m}(2.8\text{m})$$

$$D_A = 2.8 \text{ m} + 0.3 \text{ m} = 3.1 \text{ m}$$

<붙임> 관련 기호

A_d	아킹 혼(arcing horn) 또는 균압환(grading ring)으로 분기되지 않은 손상된 애자의 길이 또는 길이 A_o 인 애자의 손상된 장치 수량
A_o	아킹 혼 또는 균압환으로 분기되지 않고 손상되지 않은 애자의 길이 또는 손상되지 않은 장치의 수량
b	본래 공기 갭(air gap) 길이에 대해 부동 도체의 갭축 방향 전체 길이의 비
D	접지-상 잔여 공기 갭(air gap) 길이
D_A	최소 접근 거리
D_E	인체 공학적 거리
D_U	U_{90} 에 필요한 거리
D_{Lins}	최소 잔여 절연 길이
d_1, d_2, d_3, d_4	전위가 다른 작업자와 설비 부품 사이의 거리(<그림 2> 참조)
F	공기 갭(air gap)에 있는 모든 부동 도체의 갭축 방향 길이의 합(단위: m)
K_s	통계 안전 계수
K_t	갭의 세기에 영향을 미치는 여러 가지 요소를 조합하는 계수
k_a	대기 계수
k_d	손상된 장치의 평균 상태를 나타내는 계수
k_f	부동체 계수
kg	갭 계수
k_i	손상된 애자 계수
k_{ic}	손상된 복합 애자 계수
k_{is}	손상된 애자련 계수
k_s	통계 표준 편차 계수
L_f	초기 공기 갭(air gap) 길이
P	상-상 잔여 갭 길이
r	갭축으로부터 도체의 거리
s_e	U_{50} 의 표준 편차로 정규화 값을 퍼센트로 나타낸 값
U_2	2 % 통계 과전압
U_{50}	50 % 파괴 방전 전압
U_{90}	90 % 통계 충격 내전압
U_{e2}	상과 접지 사이의 2 % 통계 과전압
U_{e90}	상과 접지 사이의 90 % 통계 충격 내전압
U_{p2}	두 상 사이의 2 % 통계 과전압
U_{p90}	두 상 사이의 90 % 통계 충격 내전압
u_{e2}	장치당 상과 접지 사이의 2 % 통계 과전압
u_{p2}	장치당 두 상 사이의 2 % 통계 과전압
U_s	두 상 사이의 최대 시스템 전압

<부록 1> 인간 공학적 거리

1. 개요

다음의 두 접근법 또는 이 2개를 혼합한 것은 인간 공학적 안전성 여유를 설정하는데 사용될 수 있다.

- 절대적인 최소 접근 거리를 규정하고, 숙련자가 실시하여야 하는 특수 작업을 하는데 요구되는 추가 거리를 결정한다.
- 모든 발생 가능한 우연성을 고려하기 위한 충분한 안전성의 여유를 허용하는 완전한 최소 접근 거리를 규정한다.

최소 접근 거리를 규정하거나 충전 도체에 근접한 작업을 시작하기 전에 많은 요인을 고려하여야 한다. 여기에서 권장하는 인간 공학적 거리가 비실용적이고 부적절할 때 다음 사항은 각각의 조직에 의해 고려해야 하는 지침으로 제시한다.

2. 훈련, 지식 및 기술

활선작업에서의 기본은 최소 접근 거리 및 기타 방법에 의한 위험에 대한 지식과 인명 보호 수단 제공이다. 작업자는 최소 접근 거리에서 활선작업을 시작하기 전에 활선작업 및 맨손 작업에 관하여 철저히 훈련받아야 한다. 작업 중에는 작업과 최소 접근 거리의 감시에 각각 주의를 기울여야 한다. 작업 절차에 대한 충분한 훈련과 지침은 예상하지 못한 상황에 의해 최소 접근 거리의 관찰을 다른 곳으로 돌릴 우려를 줄일 수 있다.

3. 방호 배리어

작업자와 충전부 사이의 배리어는 요구되는 절연 등급을 제공할 수도 있고, 또는 단지 기계적인 배리어 역할만을 담당할 수 있다. 충분한 기계적 강도를 갖춘 완전히 절연된 배리어만이 최소 접근 거리보다 충전 도체에 가까이 설치할 수 있다.

4. 실수 가능성

작업 도중에 범할 수 있는 실수 가능성은 이용된 작업 절차, 인적 요인, 환경의 영향 및 작업자의 행동이 다른 사람에 의해 감시되는 정도에 따라 좌우된다.

5. 작업 절차

다양한 작업 위치와 작업 방법은 비의도적인 이동에 대한 다양한 허용을 요구하게 된다. 예를 들어, 충전 도체 아래에서의 작업이 옆에서의 작업보다 훨씬 덜 위험하다. 작업자 위치의 안정성은 또한 임무에 따라 다양할 수 있다. 예를 들어, 지상 위에서의 작업과 지상에서의 작업을 비교할 수 있다. 또한 복잡하고 격렬한 작업은 작업자의 주의력을 최소 접근 거리의 감시로부터 다른 곳으로 전환시킬 수 있다.

이러한 요인 때문에 다양한 작업 상황이나 절차에 따라 서로 다른 최소 접근 거리를 사용하도록 고려한다.

6. 인적 요인

작업자의 육체적·정신적·감정적 상태는 비의도적인 움직임의 원인이 될 우려가 있다. 바꾸어 말하면, 이러한 요인은 작업의 지속성과 열의에 의해 영향을 받게 된다. 활선작업은 절차와 최소 접근 거리 모두 지속적인 주의를 요하며, 주의를 인적 요인에 의해 쉽게 산만해질 수 있다. 인적 요인이 손상된 작업자는 가장 작은 최소 접근 거리에서 작업하는 것을 허락해서는 안 된다.

최소 접근 거리를 정확히 판단할 수 있는 능력 또한 작업자에게 중요하다. 이러한 이유 때문에 전압에 대한 인간 공학적 거리를 증가시키는 것이 보다 유리할 수 있다. 그러나 고전압에서 지나치게 먼 거리는 충전 도체의 작은 부품을 보기 곤란하고 작업용 기구를 다루기에 너무 무거울 수도 있다.

작업자는 떨어지거나 바람에 휘날림 또는 흔들림 등에 의하여 충전부에 가까이 근접할 수 있는 느슨한 부분이 있는 옷을 입어서는 안 된다.

7. 환경 요인

환경적 영향은 그러한 환경 조건 하에서는 일반적으로 최소 접근 거리 내에서의 작업 금지를 고려한다. 예를 들면, 인근의 폭우, 강우 또는 절연 기구의 표면에 지속적인 습기층이 있을 경우 일반적으로 작업을 허용하지 않는다.

반대 조건 역시 다른 환경 조건에 의해 발생할 수 있고, 직접적이든 또는 최소 접근 거리 감시로부터 주의를 전환함으로써 발생할 수 있다. 강풍은 도전체, 지지물 또는 장비(예를 들면 가공 장치)를 위험하게 이동시킬 수 있다. 먼지 폭풍은 눈을 위험하게 한다. 구조물의 얼음은 발디딤을 불안하게 하고, 딱따구리 구멍은 승주 위험을 제시하며, 안개나 바다 물보라는 계통 또는 기구 절연에 위험을 가할 수도 있고, 매끄러운 표면은 미끄러울 수 있다. 어둠이나 반짝임은 시력을 손상시킬 수 있다. 고온과 습도가 작업자 피로에 미치는 영향도 고려해야 한다. 이와 같이 활선 도체에 근접한 작업에서는 환경 영향은 있으며, 최소 접근 거리를 설정할 때 고려할 필요가 있다.

8. 감시

작업 중에 발생하는 위험 상황을 작업자에게 경고하는 것은 작업으로부터 일정 거리에 위치한 감시자에 의해 지속적인 감시에 의하여 매우 효과적일 수 있다. 작업자는 실수하기 전에 작업 절차의 각 단계에서 큰 소리로 설명하게끔 분위기를 만들어야 한다. 계속되는 작업 절차 또한 상세화되어야 하며, 작업 시작 전에 작업 책임자와 작업자 사이에 토론이 이루어져야 한다.

<부록 2> 과전압

1. 여러 가지 형태의 과전압

과전압은 p.u.로 표현되며, 1 p.u.는 $U_s \cdot \sqrt{2}/\sqrt{3}$ 와 같다(2.1.10 참조).

KS C IEC 60071-1에 따라 전압과 과전압은 <표 2.1>에 나타난 등급으로 분류된다.

<표 2.1> KS C IEC 60071-1에 따른 과전압 분류

종류	저주파		과도파		
	지속적	일시적	완만파	단파두	급준파
전압 또는 과전압 모형					
전압 범위 또는 과전압 모형	$f=50 \text{ Hz}$ 또는 60 Hz $T_t \geq 3 \text{ 600 s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0.02 \text{ s} \leq T_t \leq 3 \text{ 600 s}$	$20 \text{ ms} < T_p \leq 5 \text{ 000 ms}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0.1 \text{ ms} < T_1 \leq 20 \text{ ms}$ $T_2 \leq 300 \text{ ms}$	$T_f \leq 100 \text{ ns}$ $0.3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$
표준 전압 모형	 $f=50 \text{ Hz}$ 또는 60 Hz T_t^a	 $48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_t=60 \text{ s}$	 $T_p=250 \text{ ms}$ $T_2=2 \text{ 500 ms}$	 $T_1=1.2 \text{ ms}$ $T_2=50 \text{ ms}$	a
표준 내전압 시험	a	단기간 전압 주파수 시험	스위칭 임펄스 시험	뇌 임펄스 시험	a

^a 관련 위원회에 의해 지정된다.

활선작업에서 주요 관심사가 되는 과전압은 개폐 동작으로 인한 완만파 과전압(Slow front overvoltage)이다. 활선작업은 보통 약천후에서 실시되지 않으므로 낙뢰

과전압과 같은 급준과 과도 전압(Fast front transient)은 그다지 중요하지 않다. 낙뢰가 치는 장소에서는 섬락이 발생할 수 있다. 반면에, 10 km이상 떨어진 작업 위치에서는 낙뢰로 인한 과전압이 감쇄하여 섬락이 발생하지 않는다. 활성 작업 중에 개폐로 인한 과전압을 견뎌야 하는 공기 갭(air gaps)에는 영구적 또는 일시적 저주파 과전압이 치명적이지 않으므로 이러한 과전압도 그다지 관심의 대상이 되지 않는다.

특수한 상황에서는 불안정한 회로망 요소의 철 공진으로 인해 심각한 저주파 과전압이 발생할 수 있다. 이러한 현상을 피하기 위한 절차를 규정하여 위험을 방지해야 한다.

2. 과도 완만과 과전압

완만과 과전압의 진폭은 계통의 특성, 위치, 고려되는 사건 등과 같은 여러 가지 요인에 따라 달라진다. 더욱이, 동일한 위치에서 발생하는 동일한 유형의 사건에 대해서도 과전압은 통계적 성질을 띠므로 완만과 과전압의 진폭은 통계적 접근 방식으로 평가된다. 즉, 달성하거나 초과할 확률이 2 %인 과전압(상과 접지 사이에는 U_{e2} , 상과 상 사이에는 U_{p2}) 및 가우스 편차 s 로 예상되는 통계 분포의 표준 편차를 기준으로 한다.

아래에서는 가장 많이 발생하는 과전압 형태를 설명한다.

2.1 발생 원인과 전형적인 값

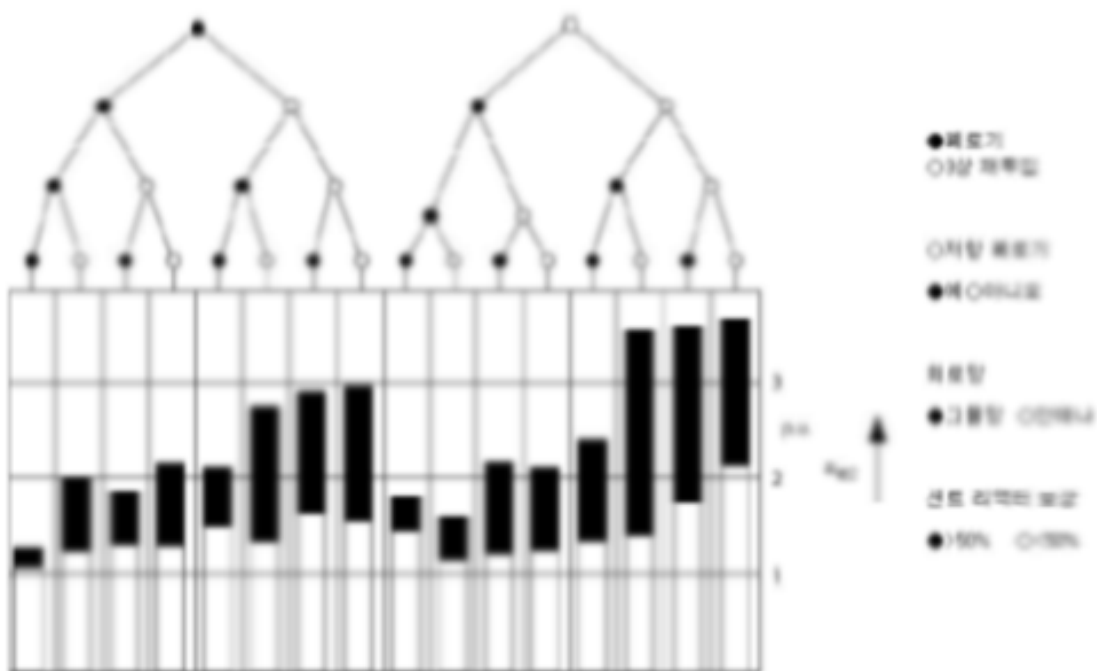
2.1.1 상과 접지 사이의 과전압

투입 및 재투입 시 발생하는 과전압이 가장 흔한 형태의 과전압이다.

상과 접지 사이 과전압의 진폭은 여러 가지 요인에 따라 달라진다. 이러한 요인으로 급전 회로(단락 회로 전원, 0에서 양으로 전이 시 임피던스 비, 급전 시 실제 전압), 교환 선로(길이, 전기적 특성, 이전 활성화로 인한 전압 레벨), 선로 셉트 보상, 활성 평행 선로, 회로 차단기(극 스캔, 예비 점호, 개폐 순간 위상각, 투입 저항), 교환 선로상의 위치(선로를 따라 변전소에서 반대쪽 끝으로 전압이 분배된다.) 등을 들 수 있다.

<그림 2.1>은 선로 활성화 시 여러 가지 조건에 따른 상과 접지 사이 과전압의 최대 진폭 범위를 보여준다. u_{e2} 의 범위는 투입 시 1.2~2.8, 재투입 시 약 1.5~3.8의 범위가 된다.

<그림 2.1>에 나타내지 않은 기타 과전압 감소 방식으로는 피뢰기, 조정 갭 혹은 동기화 스위칭을 들 수 있다.



주 최고 레벨은 최상 직선에 해당한다.

<그림 2.1> 투입 저항 및 선트 리액터가 장착되거나 장착되지 않은 망(그물형 혹은 안테나)의 형식에 따라 투입 및 재투입으로 인해 종단 개방 선로에서 발생하는 u_{e2} 의 범위

일반적으로 용량성 부하 개방으로 인한 과전압은 투입으로 인한 과전압보다 더 낮다. 따라서 투입 시 과전압 값에서 보존적인 예상치를 구할 수 있다.

장애 발생 시 과전압은 정상적인 동작 조건에서 1.6 p.u.~1.7 p.u.가 될 수 있으며 진폭이 쉽게 감쇄하지 않을 수 있다.

장애 제거 시 과전압은 1.7 p.u.~1.8 p.u.가 될 수 있다.

2.1.2 상간 과전압

상과 접지 사이의 과전압과 마찬가지로 상과 상 사이 과전압의 진폭 U_{p2} 는 적용된 감쇄 방식에 따라 크게 달라진다.

감쇄 방식을 적용하지 않거나 투입 저항으로 과전압을 제어하는 경우, 상-상 과전압과 상-접지 과전압의 관계는 일반적으로 다음 식으로 주어질 수 있다.

$$U_{p2} = 1.35 U_{e2} + 0.45$$

이때 표준 편차는 다음과 같다.

$$S_{pp} = S_{pe} \sqrt{2}$$

피뢰기로 과전압을 제어하는 경우에는 이러한 관계식이 달라질 수 있다.

2.2 비정상 상태에서 발생하는 과전압

매우 높은 과전압을 일으킬 수 있는 비정상 상태로는 개방 중 전류 차단기 접점 사이의 재점호를 들 수 있다. 특히 다음과 같은 조건이 주요 관심의 대상이 된다.

- 부하 회선의 단상 혹은 3상 개방
- 상-접지 장애 시 3상 복구

이러한 비정상 동작으로 인해 3상 재투입 시 발생하는 과전압 진폭과 같거나 훨씬 더 높은 과전압 진폭이 발생할 수 있다.

회로 차단기의 재점호 가능성은 일반적으로 낮으며 최신 회로 차단기는 그 가능성이 훨씬 더 낮다. 이러한 사건이 발생할 가능성이 낮아 개방 혹은 장애 복구 동작의 확률 분포에 영향을 미치지 않으므로 관련 U_{e2} 값이 낮아진다.

2.3 환선작업 시 과전압 제어

앞에서 기술된 바와 같이 회로망의 공칭 전압에 따라 완만과 과전압의 최대 진폭과 시스템 최대 전압의 비가 크게 달라질 수 있으며, 시스템 전압에 따라 선택되는 제어 방식에 따라서도 달라질 수 있다.

활선작업 절차는 활선작업 중에 투입 혹은 재투입 조작을 금지하는 경우가 많다. 이러한 경우에는 개방, 장애 발생 및 장애 해제에 의한 과전압만 고려해야 하며, 그 값이 광범위하게 변할 수 있다 (약 1.6 p.u.에서 2.8 p.u.까지).

더욱이 저전압에서는 적용되지 않는 과전압 제어 방식이 과전압에서는 적용되므로 시스템 전압이 증가하면 $u_{e2}(p.u.)$ 가 감소한다는 점을 고려해야 한다.

일반적으로 과전압의 진폭은 여러 가지 변수에 따라 달라지며 고려되는 시스템 별로 자세한 분석이 필요하다. 이러한 이유로 인해 이 <부록에서는 과전압 값을 제시하지 않는다.

마지막으로 작업장 과전압을 제어하기 위한 또 다른 방식은 작업 중에 임시적으로 전압 제한 장치를 설치하는 것이다. 흔히 이용되는 전압 제한 장치로는 로드-로드 갭(rod-rod gap)을 들 수 있다. 이 장치는 활선작업이 수행되는 상에 설치되며 가급적이면 바로 인접한 구조물에 설치하는 것이 좋다. 1960년대 말에 최초로 사용된 갭은 이동식이며 활선작업 중에만 설치된다.

과전압을 줄이기 위한 또 다른 방식으로는 피뢰기와 동기 개폐기가 있다. 금속 산화물 배리스터나 MOV 어레스터는 계전 정비와 회로 차단기 조작 없이도 과전압을 줄일 수 있으므로 공기 갭방식보다 우수하다.

<부록 3> 공기의 절연내력

1. 시험에 이용되는 표준 개폐 임펄스의 형태는 파고에 도달하는데 $250\mu s$ 걸리고 바닥까지는 $2,500\mu s$ 걸린다. 운전 중인 전원 계통에서 발생하는 개폐 과전압은 파고값에 도달하는데 걸리는 시간은 $50\mu s \sim 2000\mu s$ 범위 이내이다. 이 과전압 파고까지의 시간은 공기 갭(Air gap)의 파열 내전압 U_{50} 에 상당한 영향을 주며, 공기 갭(Air gap)에 따라 변화된다. 전압의 크기는 임계파고시간(Critical time-to-crest)이라고 하는 곳에서 가장 작다. 임계파고시간이 있는 파형은 최소접근거리의 결정에 추정하여야 한다.
2. 수많은 개폐 임펄스 시험 결과에 따르면 주로 갭 간격과 전극 배치에 의한 공기 갭 (air gap)의 기하학적 특징으로서 파도 과전압의 임계 파고 시간이 관찰되는 최소 절연 내력에 의해 특징지어진다. 같은 간격의 다양한 갭 사이 $d(m)$ 에서는 갭 끝에서 양극(+)의 봉-평판 갭이 최소 절연 내력을 가지며 이것이 기준으로 사용된다. 길이가 $0.5\text{ m} \sim 12\text{ m}$ 인 봉-평판 갭의 경우, 양극 임계 전단 상승 시간(critical-front-time) 절연내력 U_{50RP} 은 (CIGRÉ Brochure 151의 공식 3)으로 주어진다.

$$U_{50RP} = 1,080 \ln(0.46d + 1) kV \quad (3.1)$$

3. 기타 다른 갭 배치와 영향을 고려한 통계학적인 내전압 U_{90} 은 다음과 같이 K_t 계수를 적용하여 결정할 수 있다.

$$U_{90} = K_t U_{50RP} \quad (3.2)$$

즉,

$$U_{90} = K_t 1,080 \ln(0.46d + 1) \quad (3.3)$$

4. 식 (3.3)을 변환하고 부동체 거리 F 를 고려하면, 전기 이격 거리 D_U 을 위한 식 (8)을 얻을 수 있다.
5. 각각의 갭 거리는 동일 대기 조건하에서, 파괴 전압은 통계학상의 변수가 있을 수 있다. 보통 파괴의 가능성은 실험을 근거로 하는 일반(가우스의) 분포를 갖는다는 것을 가정으로 하여, 이 분포에서 통계학상의 편차는 파형, 과전압의 극성, 갭의 기

하학적 특성 및 대기 조건에 따라 변한다.

6. 통계학상의 내전압과 U_{90} 와 50% 과열방전전압 U_{50} 사이의 관계는 다음과 같다.

$$U_{90} = U_{50} - 0.0128 S_e U_{50} \quad (3.4)$$

여기에서

- S_e : 백분율로 표현된 U_{50} 의 통상적인 편차의 정상값 기준 값
- K_S 는 다음과 같이 정의한다.

$$K_S = 1 - 0.0128 S_e \quad (3.5)$$

7. 식 (2.4)는 다음과 같이 된다.

$$U_{90} = K_S U_{50} \quad (3.6)$$

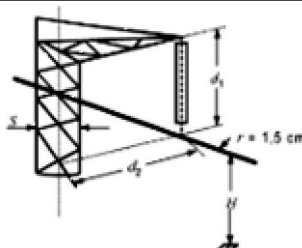
8. 만약 s_e 의 값이 갭 배치와 관련 거리에 관한 대표적인 시험으로부터 알 수 없다면 $s_e=5$ %의 값으로 가정한다. 그러면 식 (3.5)는 다음과 같이 된다.

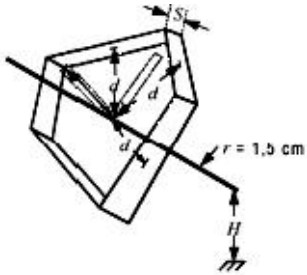
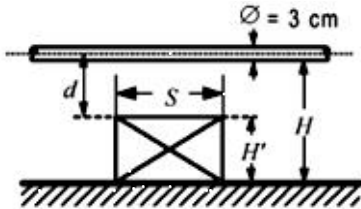
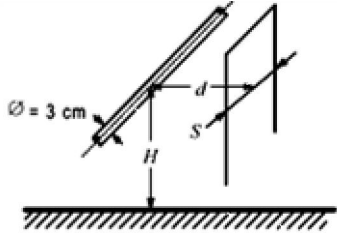
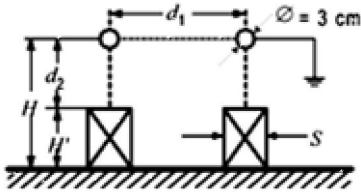
$$kg = 0.936 \quad (3.7)$$

<부록 4> 갭 계수 kg

- 1 m를 넘는 갭의 절연 내력에 가장 큰 영향을 주는 것 중의 하나는 충전된 도전부와 접지된 도전부의 형태 및 크기이다. 갭 배치에서 가장 취약한 것은 봉(rod)에 양(+) 개폐 임펄스가 인가되는 봉-평판이다.
- 만약 접지된 도전부가 평면 또는 충전부와 다르다면 소위 “갭 계수” kg 에 의한 봉-평판 배치보다 큰 U_{50} 보다도 크다. 접지된 도전부(예를 들면 타워, 버스 지지 구조물)가 작으면 작을수록, 지표면으로부터 멀면 멀수록, 배치는 도체-봉 갭이 되는 제한까지 최대 절연 내력을 갖는 kg 의 값은 더욱 커진다.
- 일반 배열에 관한 전형적인 갭 계수값은 CIGRÉ 72 및 KS C IEC 60071-2에서 다시 작성한 <부록 4 표 1>과 같다. 또한, <부록 4 표 1>은 다른 갭 배치를 위한 계산을 허용하는 갭 계수 kg (여기에서 “K”로 나타냄)에 관한 표현이 주어진다. 보다 자세한 갭 계수의 결정에 관한 것은 CIGRÉ 72 참조
- 전기 이격 거리를 계산하기 위하여 <부록 4 표 1>에 주어진 값의 범위에서 선정된 갭 계수를 제안한다. 넓은 구조물 위에 그레이딩 링(300 kV 이상의 계통에서 거의 없음)이 없고 도체 말단 또는 대형 구조물 위를 지나는 도체 인근에서 작업하는 경우와 같은 어떠한 상황하에서, 갭 계수는 1.1 만큼 낮출 수 있다. 반대로, 좁은 구조물에서의 갭 계수는 1.6까지 할 수 있다. 따라서 갭 계수는 일반화할 수도 있어 다양한 구조형태를 포함할 수 있다.
- 상-상 구성에서 갭 계수의 범위는 1.45~1.6이다.

<부록 3 표 1> 실제 배치에서의 갭 계수

배열	공식	전형적인 값
	$k = 1.45 + 0.015 \left(\frac{H}{d_1} - 6 \right) + 0.35 \left(e^{-8S/d_1} - 0.2 \right) + 0.135 \left(\frac{d_2}{d_1} - 1.5 \right)$ <p>범위에 해당되는: $d_1 = 2 \text{ m} \sim 10 \text{ m}$ $d_2/d_1 = 1 \sim 2$</p>	$k = 1.45$

도체 — 원목	$S/d_1 = 0.1 \sim 1$ $H/d_1 = 2 \sim 10$	
도체 — 폭 	$k = 1.25 + 0.005 \left(\frac{H}{d} - 6 \right) + 0.25 (e^{-8S/d} - 0.2)$ 범위에 해당되는: $d = 2 \text{ m} \sim 10 \text{ m}$ $S/d = 0.1 \sim 1$ $H/d = 2 \sim 10$	$k = 1.25$
도체 — 낮은 구조 	$k = 1.15 + 0.81 \left(\frac{H'}{H} \right)^{1.167} + 0.02 \frac{H'}{d}$ $- A \left[1.209 \left(\frac{H'}{H} \right)^{1.16} + 0.03 \left(\frac{H'}{H} \right) \right] (0.67 - e^{-2S/d})$ 여기에서 $S/d < 0.2$ 이면 $A=0$ 그리고 $S/d > 0.2$ 이면 $A=1$ 범위에 해당되는: $d = 2 \text{ m} \sim 10 \text{ m}$, $S/d = 0 \sim \infty$, $H'/H = 0 \sim 1$	$k = 1.15$ 평면 도체 1.5 이상
도체 — 측면 구조 	$k = 1.45 + 0.024 \left(\frac{H'}{H} \right) - 6 + 0.35 (e^{-8S/d} - 0.2)$ 범위에 해당되는: $d = 2 \text{ m} \sim 10 \text{ m}$, $S/d = 0.1 \sim 1$, $H/d = 2 \sim 10$	$k = 1.45$
봉 — 봉 구조 (개방 개폐 장치) 	수평 봉-봉 구조 $k_1 = 1.35 - 0.1 \frac{H'}{H} - \left(\frac{d_1}{H} - 0.5 \right)$ 봉-낮은 구조 $k_2 = 1 + 0.6 \frac{H'}{H} - A 1.093 \frac{H'}{H} (0.549 - e^{-3S/d_2})$ 여기에서 $S/d_2 < 0.2$ 이면 $A=0$ 그리고 $S/d_2 > 0.2$ 이면 $A=1$ 범위에 해당되는: (k1) $d_1 = 2 \text{ m} \sim 10 \text{ m}$, $d_1/H = 0.1 \sim 0.8$, $d_1 < d_2$ (k2) $d_2 = 2 \text{ m} \sim 10 \text{ m}$, $S/d_2 = 0 \sim \infty$, $d_2 < d_1$	$k_1 = 1.3$ $\frac{H'}{H}$ $k_2 = 1 + 0.6$

<부록 5> 고려해야 할 대기 상태

1. 일반사항

주어진 공기 갭(Air gap)의 절연내력은 애자 표면 위에 응축수가 형성되어 있는 지점까지 공기밀도와 공기의 습도에 따라 증가한다. 예를 들어 식 (2.1)에 기술되어 있는 경험적으로 정해진 특수 갭의 전기 강도는 일반적으로 표준 대기조건(온도 : 20. C , 기압 : 101.3kPa , 습도 : 11 g/m³)에서 적용할 수 있다. 그러나, 예상되는 모든 대기조건에 적합한 최소접근거리를 위해, 공기 갭의 전기 강도에서 이러한 세 가지 대기의 영향의 범위를 알아야 한다.

반대의 대기조건을 허용하기 위해 여기에서 사용되는 방법은 KS C IEC 60060-1에 정의 되었다. 따라서 대기보정계수 K는 다음과 같다.

$$K = K_1 k_2$$

여기에서,

K : K_a, K₁ : 공기밀도 보정계수, K₂ : 습도 보정계수

2. 공기밀도

(1) 공기밀도의 영향은 다음에 의하여 주어진 상대 공기밀도 σ 에 의해 설명된다.

$$\sigma = (P/P_0) [(273 + t_0)/(273 + t)]$$

여기에서,

t와 P : 실제온도와 계기상의 압력

t₀와 P₀ : 20℃ 및 101.3kPa의 표준 온도와 압력

그러므로,

$$\sigma = 2.89 P/(273 + t)$$

(2) 공기밀도 보정계수 K₁은 상대 공기밀도에 멱지수 m승에 의하여 설명할 수 있는 갭 배열과 과전압의 형태에 따라 결정된다.

$$K_1 = \sigma^m$$

- (3) 최저 공기 밀도를 제공하는 온도와 기압의 결합, 즉 고온과 저기압은 최저 갭 절연파괴전압을 야기한다. 그러나 예측되는 가장 고온과 최저압은 동시에 발생할 가능성은 아주 희박하다.
- (4) CIGRÉ 72는 2개의 보다 정확한 공기밀도 보정법을 제시한다. 즉, 물리적 방법과 다음의 3,000m까지 조사한 것을 근거로 한 경험적 표현은 여러 공기 갭 배치에 관한 자료에 적합하게 양(+) 개폐 임펄스로 추출한 것이다.

$$\frac{U}{U_0} = \frac{0.8 [1 + T(1-\sigma)] (\sigma-0.2g_o)}{(1-0.2g_o)} + 0.2 \quad (5.1)$$

여기에서,

U_0 : 표준조건에서의 절연파괴전압(kV)

$$T = 1.4 \frac{1-0.8g_o}{1-0.2g_o} (kg)^{1.6} \quad (5.2)$$

$$g_o = \frac{U_o}{500d \left[1 + \frac{kg - 1}{3} \right]} \quad (5.3)$$

여기에서,

d : 공기 갭(Air gap) 길이(m)

3. 습도

- (1) 절연파괴전압에서 습도의 영향은 아주 복잡하다. 습도의 영향은 보통 KS C IEC 60060-1에서 K 로 정의된 계수, 습도와 관련된 경험적인 값과 갭의 길이, 배열 및 파형에 따라 결정되는 먹지수 w 등과 관련된다. 여기에서 습도 보정계수 K_2 는 다음과 같다.

$$K_2 = K^w$$

- (2) 상대 공기밀도용 먹지수 m 뿐만 아니라 w 의 값은 KS C IEC 60060-1에서 주어

진 방법을 이용하여 결정할 수 있다.

4. 고도

- (1) 공기 겹의 절연 내력은 온도와 습도가 떨어져 그 영향이 변화된다 하더라도 높은 고도에서는 기압이 낮아지기 때문에 약하게 된다. 고도에 의한 기압의 감소는 다음 식으로부터 계산될 수 있다.

$$P/P_o = e^{-(H/8\ 150)} \quad (5.4)$$

여기에서,

H : 해수면의 높이(m)

- (2) 임의 고도에서의 평균 기압은 그 값 주변에서 발생하는 압력 변화에 적합하게 고도 보정한 표준 압력(101.3kPa)으로 추정할 수 있다.
- (3) 그러나 일반적으로 평균 온도 및 습도가 고도에 따라 감소되기 때문에 전체적인 대기 보정 계수 k_a 는 평균 온도와 습도를 고려해야 한다. 온도와 습도 변화는 기하학적 위치에 따라 변화되기 쉬우므로 주어진 위치에서의 고도 평균 보정 계수의 정확한 값은 해당 지역의 기상 자료를 분석함으로써 결정할 수 있다. 이러한 방법으로 결정된 보정 계수 또한 겹 길이 및 배치, 과전압의 파두에 따라 달라진다.
- (4) 전원 계통에서는 모든 설비에 대해 고도 보정 계수를 적용하는 것을 피하기 위해 통상의 보정 계수를 기준 고도, 즉 대부분의 전원 계통이 위치한 것 이하까지의 모든 설비에 적용한다. 이때 다른 보정 계수를 이러한 기준 고도 이상 범위의 고도에서 결정할 수 있다. 여기에서는 1 000 m의 기준 고도가 KS C IEC 60038을 포함해서 일반적으로 많이 사용되고 있기 때문에 이를 권장된다. 그러나 일부 전원 계통은 해발 1,000 m 이하에 위치하므로 높은 고도와 k_a 의 덜 제한적인 값을 사용하지 않는 고도에서 보다 낮은 지역에서 사용할 수 있는 값을 <표 5.1>에 제시한다.

5. 대기 보정 계수의 합

- (1) 보정 계수의 합은 k_a 의 평균값과 약간의 표준화된 약 1.5 %까지의 통상적인 편차에 의해 통계학상으로 설명된다. 그 평균값은 고도에 따라 결정되고, k_a 의 표준화된 편차 s_a 는 다음과 같이 공기 갭(air gap) 파괴 전압 s 의 편차와 결합될 수 있다.

$$s_t = \sqrt{(s_a^2 + s^2)}$$

- (2) 5 % s 의 권고값과 비교했을 때 1.5 % s_a 의 값은 아주 작은 값이므로, 이 값은 전체 편차 s_t 에 거의 영향을 미치지 않는다. 그러나 약 1,000 m 이상의 고도에서는 s_a 가 1.5 %보다 큰 값이 될 수 있다는 사실을 인식하여야 한다.
- (3) <표 5.1>에 주어진 k_a 의 값은 표준 온도와 습도(20 °C, 11 g/m³)를 기본으로 하여 $kg=1.2$ 에서 식 (8)을 이용하여 g_o 계수를 결정하는 식 (5.1)~(5.4)에서 계산할 수 있다. 보다 큰 갭 길이는 보다 큰 k_a 값을 제공한다는 것을 유의한다.
- (4) 다양한 고도(11 g/m³ 및 20 °C의 습도와 온도의 표준값 추정 대신)에서 기하학상의 측정 위치로부터의 실제 기상 자료를 이용해 k_a 를 계산하는 경우 위의 방법에 의한 k_a 의 계산값은 거의 보수적으로 하기 때문에 여기에서 계산된 k_a 의 값이 더 크다. 더 높은 곳에서의 보다 정확한 k_a 값은 실제 기상 자료의 분석을 통해 결정할 수 있다.

<부록 5 표 1> 다양한 기준 고도 및 U_{90} 값을 위한 대기계수 K_a

고도 m	U_{90} 의 범위(kV)						
	< 199	200-399	400-599	600-799	800-999	1,000-1,190	>1,200
0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
100	0.990	0.992	0.993	0.995	0.996	0.998	0.999
300	0.970	0.975	0.980	0.984	0.988	0.992	0.995
500	0.950	0.958	0.966	0.973	0.980	0.985	0.991
1,000	0.901	0.916	0.931	0.944	0.955	0.966	0.976
1,500	0.853	0.875	0.894	0.912	0.928	0.943	0.956
2,000	0.807	0.833	0.857	0.879	0.899	0.917	0.933
2,500	0.763	0.792	0.820	0.845	0.868	0.888	0.908
3,000	0.720	0.752	0.782	0.810	0.835	0.858	0.880

6. <표 5.1> 값의 계산방법

다음의 절차는 <표 5.1>에 주어진 각각의 값을 계산하기 위해 사용하는 것이다.

- a) U_{90} 은 범위에서 낮은 값이다(예를 들면 200 kV~399 kV 범위에서 200 kV).
- b) $U_o = U_{50} = U_{90}/0.936$ 은 표준 조건에서의 파괴 전압이다.
- c) $kg=1.2$ 로 한다.
- d) $d=2.17(e^{U_{90}/(1080 \cdot k_s \cdot kg)} - 1)$ [식(8)]
 즉, $kg=1.2$ 를 갖는 갭은 표준 대기 조건($k_s=0.936$)에서 U_{90} 에 견딘다.
- e) 식 (5.3)을 이용해 g_o 계산
- f) 식 (5.2)를 이용해 T 계산
- g) 식 (5.4)를 이용해 고도에 대한 $d(=p/p_o)$ 계산(d 는 평균 압력에 의해서만 변하며, 고도의 평균 온도는 변화가 없다고 가정)
- h) 식 (5.1)을 이용해 $k_a(=U/U_o)$ 계산

<부록 6> 계산값 이하로 거리 축소

1. 활선작업용 기구의 영향

- (1) 활선작업 중에는 필요로 하는 금속 피팅류가 있는 기구 또는 다양한 도전성 장비가 공기 갭(air gap) 내로 들어옴에 따라 계통 절연 내력이 감소될 수 있다. 도전복을 입은 작업자가 맨손 작업 중에 접지 도체에서 충전부로 또는 그 반대로 이동하게 된다. 또한 작업자가 도체에 있을 때 도체-접지 사이의 공기 갭은 변화되어 공기 갭 내에 인입된 도체의 크기와 위치에 의존하는 갭 계수와 절연 내력이 변할 수도 있다.
- (2) 기구 또는 작업자에 의한 영향을 정확히 계산할 수는 없으나, 대표적인 배치에 관한 시험실 시험을 통해 정할 수는 있다.
- (3) 중간 전압 이하용의 활선작업용 기구의 절연 내력은 방수 조치를 취하였다 하더라도 습기에 의하여 감소하게 된다. 적절한 표면 코팅 또한 유효한 기법(예를 들면 실리콘을 이용한 코팅)이다. 어떠한 경우에 모든 기구의 표면은 항상 청결한 상태로 유지하여야 한다.

2. 작은 도전성 부품

- (1) 공기 갭의 길이는 공기 갭 내에 인입되거나 이미 존재하는 도전성 물체 부품의 길이(갭축을 따라)에 의해 감소한다. 이러한 부품은 충전 끝단 또는 데드 엔드(dead end)에 있거나 인입될 수도 있고, 갭 내의 부동 전위에 존재할 수 있다. 그러나 부품의 개수 및 또는 길이가 증가함에 따라 갭의 절연 내력은 감소한다. 결론적으로 어떠한 금속 부분도 가능한 한 적거나 거의 없도록 하는 것이 중요하다.
- (2) 이러한 작은 도전성 부품의 존재를 고려하여 실제적인 관점에서 갭축을 따라 측정된 그 부품의 최대 크기 F 의 합을 공기 갭 L_f 의 전체 길이에서 빼는 것과, 다음 식을 이용하여 공기 갭의 파괴 전압의 결과를 계산하는 것이 효과적이다.

$$U_{50}=1\,080\,\ln(0.46\,(L_f-F)+1)\,\text{kV} \dots\dots\dots (6.1)$$

여기서 L_f 와 F 는 미터로 표시된다.

주 부동 도체의 길이가 공기 갭의 10 % 이하일 때 부동 도체 계수 k_f 는 1과 같다.

3. 큰 도전성 물체

3.1 일반적인 전기장 고려사항

- (1) 공기 갭에서의 도전성 물체 또는 공기 갭의 길이에 비교되는 길이 L 의 대형 도전성 물체의 존재는 갭에서 전계의 왜곡을 일으킨다.
- (2) 이 경우 부동체의 크기와 형태, 그리고 갭 내에서의 위치에 따라 의존되고 전계의 왜곡은 갭의 절연 내력을 감소시키거나 증가시킬 수 있다. 절연 내력을 감소시키는 가장 중요한 요건은 다음에 따른다.
 - 접지된 구조물에 측면 접촉된 돌출부가 있는 물체
 - 갭축 위 또는 근처에 있는 물체
 - 물체와 충전 도체 사이의 거리가 전체 공기 갭 길이의 1/4과 1/3 사이에 있을 경우
- (3) 작은 도전성 부품에서 공기의 전체 길이가 L_f-L 또는 L_f-F 와 같은 값을 가지는 공기 갭(air gap)의 하나와 이 절연 내력을 비교하는 것이 쉽다.
- (4) 부동체가 존재하는 곳에서 갭의 최소 절연 내력은 식 (6.2)에 의해 예측할 수 있으며, 여기에서 k_f 는 부동 전극에 상수로 적용한다.

$$U_{50}=1\,080\,k_f\ln(0.46(L_f-F)+1)\,\text{kV} \dots\dots\dots (6.2)$$

- (5) 부동 도체 계수 k_f 는 여러 가지 변수에 따라 달라진다. 최대 치수가 공기 갭과 평행한 방향 내에 있는 긴 형태의 도체나 세 치수의 크기가 동일한 도체의 경우 k_f 값을 어느 정도 예측할 수 있다. 현재 이용 가능한 정보를 바탕으로 6.3.2에 기술된 분석과 일반화를 통해 이러한 예측이 가능하다.

- (6) 그러나 공기 갭과 수직인 평평한 대형 도체에는 이러한 일반화가 적용되지 않는다(즉, k_f 는 0.75까지 낮아질 수 있지만 b 는 거의 0이다). 관련 시험 데이터와 분석 결과가 없는 경우에는 실제 활선작업을 나타내도록 시험 장치를 구성하여 가장 근사한 k_f 값을 계산할 수 있다.

3.2 실험 데이터 분석

3.2.1 일반사항

- (1) 대부분의 연구 결과는 양극의 개폐 충격이 음극보다 더 치명적임을 보여준다. 도체가 있는 갭에서 관측된 절연내력 감소 비율은 양극 충격보다 음극 충격을 가할 때 더 증가한다.
- (2) 부동 도체가 미치는 두 가지 주요 영향은 다음과 같다.
 - 순수 공기 갭을 줄인다. 대형 도체의 경우 공기 갭이 크게 줄어들 수 있다. 이러한 효과는 실제 공기 갭(또는 감소된 길이 $L_f - F$)의 절연내력에 반영된다. 본래 공기 갭에서 도체의 길이를 빼면 감소된 길이 $L_f - F$ 가 구해진다.
 - 갭 내부의 전기장 분포가 변하므로 기준 갭 계수 kg 에 따른 실제 공기 갭의 절연내력에 영향을 미칠 수 있다. 보정 계수 k_f 를 도입하여 이러한 효과를 고려한다.
- (3) 부동 도체가 미치는 영향은 아래에 기술된 바와 같이 여러 가지 요인에 따라 달라지므로 매우 복잡하다.

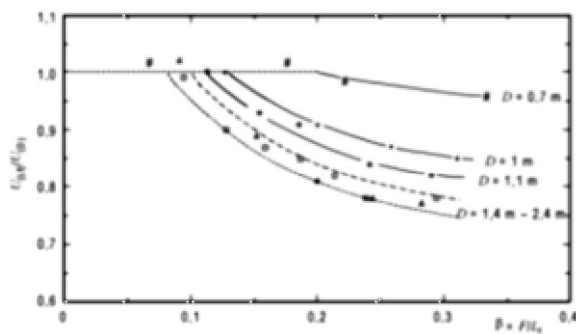
3.2.2 갭 내에서 물체의 위에 따른 영향

- (1) 여러 가지 연구에서 수행된 모든 시험은 부동 도체를 포함하는 공간의 내전압이 감소함을 보여준다.
- (2) 상-접지 구성에서 부동 도체가 활성 전극에 인접해 있을 때 절연내력은 최소가 된다.

(3) 상-접지 구성에서 부동 도체가 양극에 인접해 있을 때 절연내력은 최소가 된다.

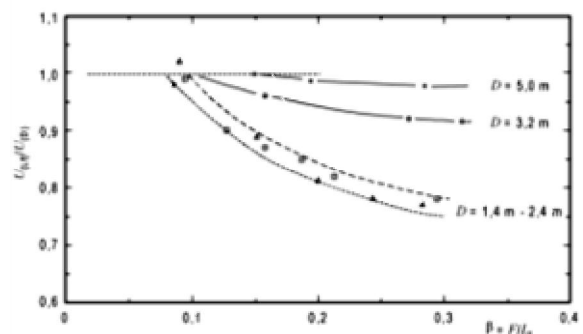
3.2.3 부동 도체의 길이에 따른 영향

- (1) <그림 6.1>과 <그림 6.2>는 갭의 축을 따라 임계 위치에 길이가 서로 다른 부동 도체가 놓일 때 발생하는 전기장 변화로 인한 공기 갭(air gap)의 방전 전압 감소를 보여준다.
- (2) <그림 6.1>의 그래프는 상과 접지 사이의 봉-봉 구성에 따른 k_f 값을 $b=F/(D+F)$ (혹은 $b=F/L_f$)의 함수로 나타낸 것이다. 이 그래프는 임계 위치에 공기 갭을 따라 도체가 놓이면 전기장이 변하여 b 에 영향을 미치므로 절연내력이 감소함을 나타낸다. 시험된 각 D 의 값에 대해 $b < 0.1$ 인 경우 유전강도 감소 효과는 실제로 나타나지 않으며 b 가 증가하면 점차 증가하여 b 값이 크면 포화되는 양상을 보인다.



식별부호

- # $D(m)=0.7$
- * $D(m)=1.0$
- $D(m)=1.1$
- △ $D(m)=1.4$
- $D(m)=2.4$



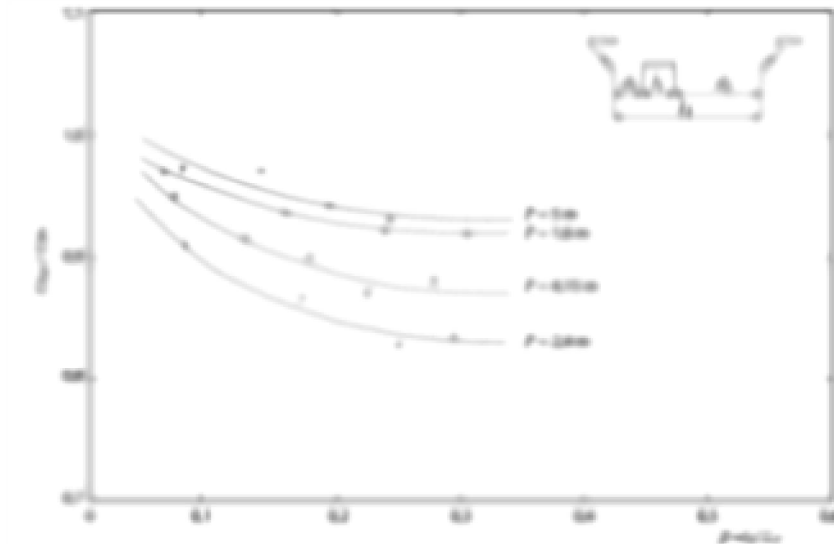
식별부호

- △ $D(m)=1.4$
- $D(m)=2.4$
- $D(m)=3.2$
- * $D(m)=5.0$

<그림 6.1> 부동 도체의 길이에 따른 영향 — 상과 접지 사이의 봉-봉 구성 — $250 \mu s / 500 \mu s$ 충격

(3) <그림 6.2>는 상간 도체-도체 구성의 특성을 보여준다.

주 전기 이격 거리 D_0 를 계산할 때는 항상 부동 도체 F 의 길이를 더해야 한다[5.3.1의 식 (8) 참조].



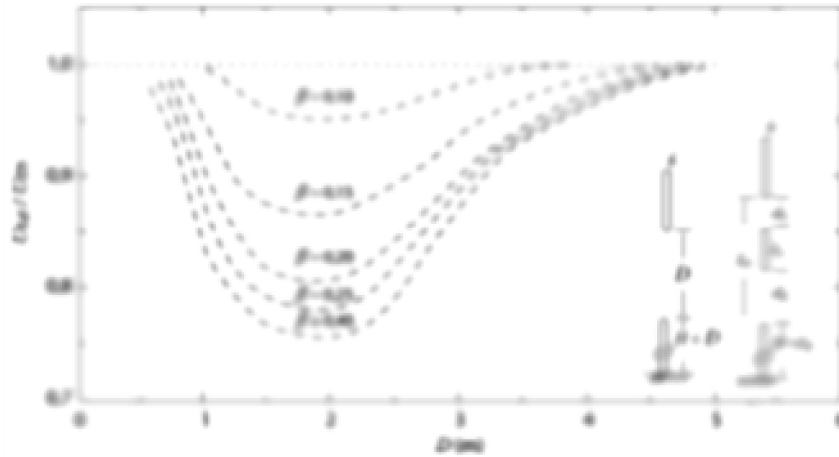
$$d_1 + d_2 = P = \text{일정} \quad Y = d_1/L_f = 0.15 (\text{임계치})$$

주) 기호는 2. 참조

<그림 6.2> 부동 도체의 길이에 따른 영향 - 상간 도체-도체 구성 - $250 \mu_s/2500 \mu_s$ 충격

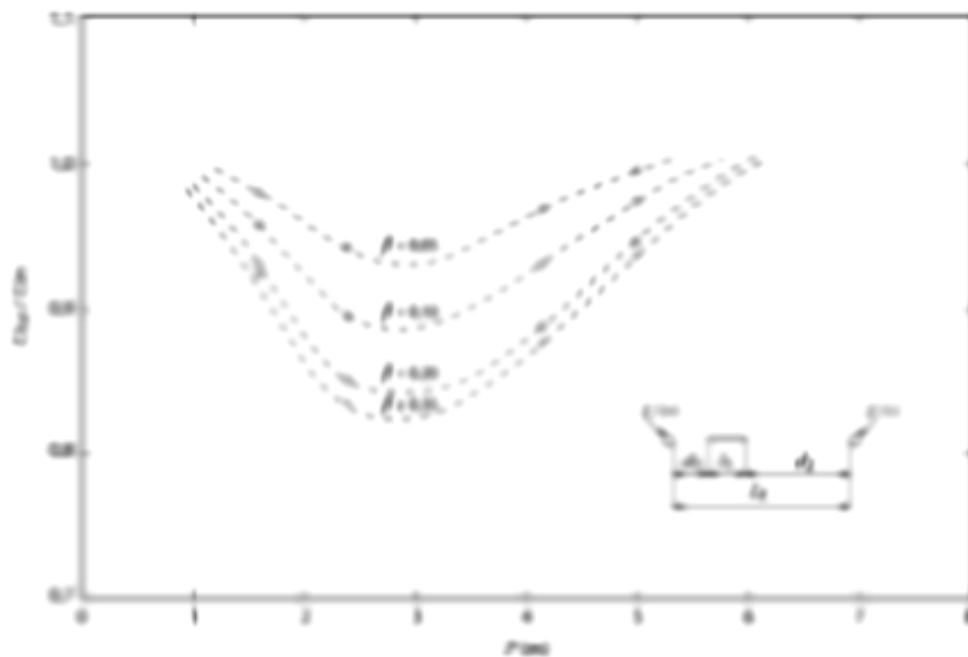
3.2.4 잔여 공기 갭의 길이에 따른 영향(D 혹은 P)

- (1) <그림 6.1>과 <그림 6.2>는 D 혹은 P 의 영향에 대한 예를 보여준다. b 값이 고정된 경우 부동 도체의 영향은 상-접지 및 상-상 모두에서 U형으로 나타낸다 (<그림 6.3 및 6.4> 참조). 상-접지(D) 및 상-상(P) 구성에서 잔여 공기 갭의 길이가 각각 2 m와 3 m일 때 k_f 가 최소가 된다(부동 도체의 영향이 최대).



$$d_1 + d_2 = D \quad Y = d_1 / L_f = 0.3 (\text{임계치})$$

<그림 6.3> b 값이 일정할 때 길이 D 의 함수로 나타낸 절연내력 감소 —
상과 접지 사이의 봉-봉 구성



$$b = l_1 / L_f \quad d_1 + d_2 = P \quad Y = d_1 / L_f = 0.15 (\text{임계치})$$

<그림 6.4> b 값이 일정할 때 길이 P 의 함수로 나타낸 절연내력 감소 —
상과 접지 사이의 도체-도체 구성

3.2.5 갭에 있는 물체의 형태와 수량에 따른 영향

(1) 시험 데이터로부터 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

- 공기 갭(air gap)을 따라 도체가 여러 개 있는 경우 임계 위치에 있는 가장 큰 도체가 나머지 도체에 비해 공기 갭(air gap)의 절연내력 감소에 미치는 영향이 더 작다.
- 바에 비해 횡 방향 치수가 큰(10배 이상) 이중 T와 같은 형태의 도체는 공기 갭(air gap)의 축을 따라 측정한 길이가 같은 경우 절연내력 감소량은 바 자체로 인한 감소량과 비슷한 것으로 보인다. 반면에 공기의 공기 절연 거리가 원형 도체로 완전히 분리되는 경우 전기장의 변화는 거의 없는 것으로 나타난다.

3.2.6 갭축으로부터 변위에 따른 영향

공기 갭(air gap) 축에서 $r > 2.5 F$ 를 충족하는 거리 r 만큼 물체를 평행 이동하면 도체로 인한 절연내력감소 효과가 상쇄되는 것으로 보인다.

3.2.7 갭 계수 kg 에 따른 영향

갭 계수가 증가하면 영향이 증가하며 상-상 구성보다 상-접지 구성이 더 큰 영향을 받는다.

3.3 부동 도체가 개폐 충격 절연내력에 미치는 영향 평가

- (1) 식 (6.2)를 적용하기 위해서는 k_f 를 구해야 한다. 가장 간단한 방법은 주어진 실험 데이터에 외삽법과 내삽법을 적용하여 일반화하는 것이다.
- (2) 예를 들면 b 값이 0.1 이상이고 D 값이 4 m이하일 때 5차 다항식을 이용하여 <그림 6.3>(상-상 구성)의 결과를 상당히 정확하게 보간할 수 있다.

$$k_{f(\beta=0.4)} = 0.0026D^5 - 0.033D^4 + 0.124D^3 - 0.049D^2 - 0.415D + 1.225$$

$$k_f @ [1 - (1 - k_{f(\beta=0.4)})(1 - e^{-20(\beta-0.1)})]$$

(3) D 는 미터로 표현되며 다음과 같은 조건이 적용된다.

- b 가 0.1 미만인 경우 D 와 무관하게 k_f 는 1이 된다.
- D 가 4 m 이상인 경우 k_f 는 1이라고 가정한다.

(4) 유사한 관계식을 유도하여 <그림 6.4>(상-상 구성)에 나타낸 데이터를 보간할 수 있다.

3.4 특별한 고려가 필요한 대형 부동 도체

- (1) 전세계에서 30년 이상 동안 활선작업에는 헬리콥터가 동원되었다. 크기, 치수 및 회전 날개로 인해 헬리콥터는 공기 갭에 대형 도체를 형성하는 특수한 경우에 해당한다. 헬리콥터가 갭의 전기적 특성에 미치는 영향은 헬리콥터의 형태에 따라 다를 수 있으며 헬리콥터의 크기와 부유 상태의 도전성 부하(바스켓, 플랫폼, 부스바 등)에 따라 달라진다.
- (2) 또한 회전 날개의 코우닝(기계적 휨), 마찰 전기 효과(회전 날개의 회전으로 인해 발생하는 전하), 세류 효과 등이 발생한다.
- (3) 선정된 헬리콥터와 작업대 형식에 대해 일부 시험 데이터가 발표되었지만, 특정 활선작업에 이용되는 다양한 형태의 헬리콥터의 특성을 일반화하기에는 충분하지 않다.
- (4) 크레인으로 대형 도체를 운반할 때에는 또 다른 요소를 고려해야 한다. 이러한 상황에서는 별도로 분석이 필요하며 이 <부록에 제시된 부동 도체 계수의 개발 범위를 벗어난다.

<부록 7> 오염, 손상 또는 습한 절연체 인근에서의 활선작업

1. 오염된 절연

- (1) 오염된 경우, 전력 주파수 전압에 의한 외부 절연체의 영향은 아주 중요하므로 이를 설계시에 반영하게 된다. 일반적으로 절연 섬락은 오염된 표면이 약한 비, 눈, 얼음, 이슬 또는 안개로 인해 습하게 되었을 경우 발생하며, 확실한 청소가 이루어진 경우에는 발생하지 않는다.
- (2) 활선작업시에는 다음과 같은 사항이 실시될 수 있다.
 - (가) 계통 운전 전압 및 손상된 애자에 의하여 감소되는 설계 거리를 감안하여 작업 구역에서 애자의 실제적인 연면거리를 점검한다.
 - (나) 활선작업이 실시될 때 오염되고 습기가 존재하는 실제 조건을 설계 목적에 맞게 가정된 조건에서의 편차를 확인하여야 하고, 그 설계는 이러한 오염 수준을 감안하여야 한다.
 - (다) 그 외에, 오염 섬락은 점진적으로 진행되고, 사전 경고로써 시각, 청각적인 방전 및 부분적인 섬락이 선행한다. 만약, 이러한 현상이 나타나면 활선작업을 실시해서는 안 된다.

2. 결함이 있는 캡 및 핀 애자

- (1) 수많은 활선작업이 손상된 캡 및 핀 애자편을 교체하기 위하여 실시된다. 따라서, 섬락의 위험이 없는 계통 절연 인근 또는 그 위에서의 작업시 발생할 수 있는 애자의 손상 한도를 인지하는 것은 아주 중요하다. 손상된 개수를 포함한 캡 및 핀 애자편의 잔류 절연 내력은 애자의 형태, 손상된 애자편에서 손상 위치 및 수량, 그리고 그들의 손상 정도에 따라 크게 변할 수 있다.
- (2) 일반적으로 이러한 변화의 경향은 다음에 따른다.
 - (가) 강도 감소 정도는 유리 애자보다 자기 애자에서 더욱 크다. 이는 자기 애자는 여러 원인에 의하여 깨질 수 있는 반면에, 보강용 강철선이 내장되어 있는 강

화유리 애자는 깨지더라도 항상 중심축이 남아 있기 때문이다. 강도는 남아있는 자기 애자의 가장자리 부분에 따라 크게 의존된다.

(나) 일반적으로 손상된 애자의 가장 취약한 위치는 선로 말단이다. 절연 내력은 같은 수량의 손상된 애자가 구조물 끝단에 있을 경우보다 높고, 애자련의 중간에 손상된 애자가 있을 경우에도 높게 나타난다. 그러나 절연 내력의 최대저하 조건은 애자련의 길이, 선로 엔드의 피팅 형태(예를 들면 경사 링) 및 구조물의 형태에 따른 애자련의 사이의 전계 분포에 의존된다.

(3) 손상된 애자의 수량이 많으면 많을수록 절연 내력의 감소는 더욱 커지게 된다. 그러나 비록 애자 모두가 손상되었다고 하더라도 건조된 애자련은 여전히 20 %의 절연 내력을 유지한다. 손상된 애자의 수량에 따른 절연 내력의 변화는 첫 번째의 근사값으로서 선형으로 추정할 수 있고, 많은 시험 자료의 분석으로 식 (7.1)에서 유도한다.

$$k_{is}=1-0.8k_d(A_d/A_o) \dots\dots\dots (7.1)$$

여기에서

A_d : 애자련의 손상된 애자 수량

A_o : 애자련의 애자 수량

k_d : 유리인 경우 1.0, 자기인 경우 0.75

k_{is} : 손상된 절연 애자련 계수

(4) 다음은 애자련에 허용되는 손상 애자 수량을 계산할 때 k_{is} 를 구하여 적용하는 방법을 보여준다.

(5) 애자련의 손상된 애자 수량에 필요한 D_{Lins} 를 계산한다.

$$D_{Lins}=2.17(e^{U_{90}/(1.080 K_t)}-1)+F \dots\dots\dots (7.2)$$

(6) <표 7.1>을 보면 565 kV peak의 활선작업(U_{90})에서 요구되는 내전압을 가진 220 kV 계통에서 매 연마다 14개의 유리 애자($k_d=1$)를 사용한다. $k_a=0.931$, $k_g=1.4$, $k_s=0.936$, $k_f=1$, k_{is} 는 식 (7.1)을 이용하여 계산한다고 가정한다. 유리와

자기 애자에 요구되는 최소 잔여 절연체 길이 D_{Lins} 의 값은 식 (7.2)를 적용하여 계산할 수 있다.

$$U_{90}=565 \text{ kV}$$

$$K_t=k_s \cdot k_g k_a k_f \cdot k_{is}=1.22 \cdot k_{is}$$

k_{is} 는 식 (7.1)로 계산

- (7) 애자 14개(각각 146 mm)로 된 애자련의 길이는 2.04 m이다. 애자련 길이와 같거나 더 짧은 D_{Lins} 에 따라 U_{90} 에 필요한 내전압을 주는 애자련에서 손상된 애자의 최대 수량이 설정된다.

<표 7.1> 손상된 애자의 최대 수량 계산(갭 계수 1.4)

A_d	유리				자기		
	A_d / A_o	k_{is}	K_t	D_{Lins}	k_{is}	K_t	D_{Lins}
1	0.071	0.943	1.15	1.24	0.957	1.19	1.2
2	0.143	0.886	1.081	1.35	0.914	1.12	1.3
3	0.214	0.829	1.01	1.47	0.872	1.06	1.38
4	0.286	0.771	0.94	1.61	0.828	1.01	1.47
5	0.357	0.714	0.871	1.79	0.786	0.96	1.58
6	0.429	0.657	0.801	2.00	0.743	0.906	1.7
7	0.500	0.600	0.732	2.26	0.7	0.854	1.83
8					0.66	0.805	1.98
9					0.614	0.749	2.19

- (8) <표 7.1>은 손상된 유리 애자의 최대 수량은 6개이며, 자기 애자련에서 손상된 애자는 8개가 허용되며 내전압은 565 kV임을 보여준다.

- (9) <표 7.2>는 갭 계수가 1.2인 경우에 계산 결과를 보여준다.

<표 7.2> 손상된 애자의 최대 수량 계산(갭 계수 1.2)

A_d	유리				자기		
	A_d / A_o	k_{is}	K_t	D_{Lins}	k_{is}	K_t	D_{Lins}
1	0.071	0.943	0.984	1.52	0.957	1.00	1.49
2	0.143	0.886	0.927	1.64	0.914	0.956	1.6
3	0.214	0.829	0.867	1.8	0.872	0.912	1.68
4	0.286	0.771	0.806	1.98	0.828	0.866	1.8
5	0.357	0.714	0.747	2.2	0.786	0.822	1.93
6					0.743	0.777	2.08

- (10) 이러한 경우 손상된 애자의 최대 수량은 유리 애자는 4개, 자기 애자는 5개가 된다.

3. 손상된 복합 애자

- (1) 복합 애자가 설치되어 있는 장소에서 활선작업을 할 때는 안전한 조건 혹은 절연체 근처에서 작업을 수행하여 섬락 위험을 피할 수 있도록 절연체의 최대 손상 범위를 확인하는 것이 중요하다. 손상된 복합 애자의 잔여 절연 내력은 손상 형태, 축 거리 및 손상 부위에 따라 크게 달라질 수 있다.

- (2) 이러한 변수의 일반적인 경향은 다음과 같이 요약된다.

(가) 도전성 또는 반도체성 결함이 있는 경우에는 절연 내력이 훨씬 더 많이 감소한다. 이러한 예로는 애자 하우징의 탄화 절연 내력 감소를 추적하는 경우를 들 수 있다.

(나) 최악의 손상 위치는 일반적으로 선로 끝에 인접한 경우이다. 손상의 범위가 구조물 종단인 경우에는 애자 강도가 높아지며 애자 중간까지 미치는 경우에는 훨씬 더 높아진다. 잔여 절연 강도가 최대로 감소하는 조건은 애자 상의 전계 분포, 즉 애자의 길이, 선로 종단 고정 방식(예: 균압환) 및 구조물 형태에 따라 달라진다.

- (3) 손상 범위가 클수록 절연내력이 더 많이 감소한다. 전체 절연체 길이에서 최악의 손상이 발생하면(도전성 손상) 복합 애자의 절연내력은 0이 된다.

- (4) <그림 7.1>은 도전성 및 반도체성 결함을 시뮬레이션 한 복합 애자에 대한 실험 결과를 보여준다. 결함이 있는 애자의 절연 내력(U_d)은 정상적인 애자의 절연 내력(U_o)으로 나타내며 축 방향 손상 길이(l_d)는 애자의 전체 절연 길이로 나타낸다(l_o). 실험 데이터 분석 결과에서 도전성 결함에 해당하는 보존적 조건은 식 (7.3)에 나타낸 절연 내력의 선형 변화로 가정할 수 있다.

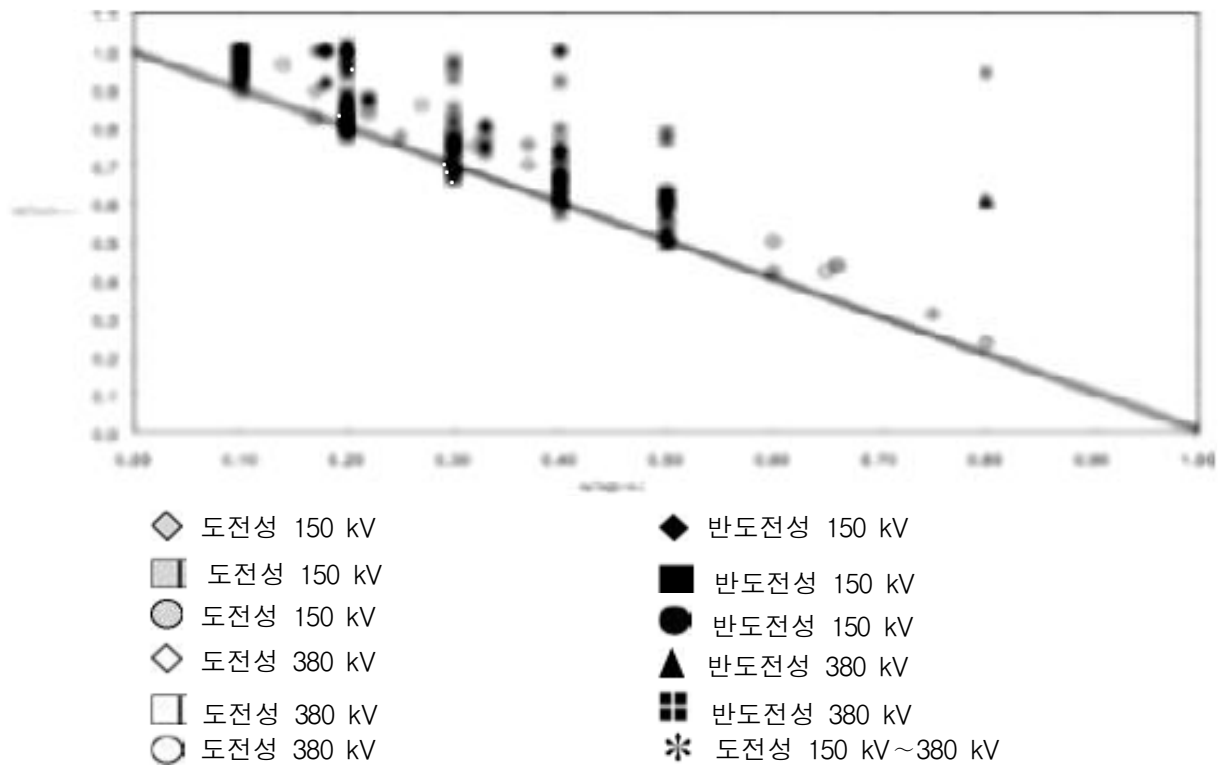
$$k_{ic} = 1 - (l_d/l_o) \dots\dots\dots (7.3)$$

여기에서

l_d : 애자 축 방향 손상 길이

l_o : 애자의 절연 길이

k_{ic} : 손상된 복합 애자 계수



<그림 7.1> 도전성 및 반도체성 결함으로 인한 복합 애자의 절연 내력

(5) 아래는 복합 애자에 허용되는 도전성 손상 길이를 계산하여 k_{ic} 의 최대 허용치를 계산하는 예를 보여준다.

(6) 애자 길이와 동일한 D_{Lins} 에 필요한 결함 길이를 계산한다($D_{Lins}=l_o$)

$$l_{dmax} = l_o \left[1 - \frac{U_{90}}{[1080 \ln(0.46(l_o - F) + 1)] k_s k_g k_a k_f} \right] \dots\dots\dots (7.4)$$

(7) 계산된 l_{dmax} 값보다 결함 길이가 더 짧은 경우에는 안전한 상태에서 활선작업을 수행할 수 있다.

(8) 활선작업에 필요한 내전압(U_{90})의 침투치가 565 kV인 220 kV 시스템에서는 전체 길이가 캡-핀 애자 14개와 동일한($l=2.04$ m) 복합 애자를 사용할 수 있다. 애자의 절연 거리(l_o)는 1.86 m와 같다. $k_a=0.931$, $k_s=0.936$, $k_f=1.0$ 이라고 가정

한다. l_0 와 동일한 최소 절연 길이 D_{Lins} 에 해당하는 최대 결함 길이는 타워 형상의 갭 계수를 가정하여 식 (7.4)로 계산할 수 있다. 전형적인 절연체 구성에서($kg=1.4$ 및 $kg=1.2$) kg 로 계산한 결과는 다음과 같다.

$$l_{d \text{ max}} (kg=1.4)=0.57 \text{ m}$$

$$l_{d \text{ max}} (kg=1.2)=0.357 \text{ m}$$

4. 광섬유 케이블에 대한 절연 상-접지 전이

- (1) 광섬유 케이블의 절연 상-접지 전이에 대한 계수 k_1 를 평가하는 방법을 고려 중이다.
- (2) 고품 중공 애자(Hollow core insulator)로 된 전이 형식에 대해서는 복합 애자에 적용되는 식 (7.3)을 적용할 수 있다.