



## 도체 접속/접촉부의 열화 현상에 대한 고찰

김 정 태 <대전대학교 전기공학과 교수>

함길호 <LG 산전(주) 전력시험기술센터 책임연구원>

### 1. 서 론

각종 전력기기의 도체 부분에 대한 전기적 접속 및 접촉에 있어서 장기간 운전시 접촉저항의 증가에 따라 발열되고 이로 인해 사고가 일어날 우려가 있다. 실제로 이러한 사고는 송전선의 단선 및 도체 접촉부의 용융 등 현장에서 발생되고 있다. 아울러, 이러한 도체간의 접속은 전력기기 뿐 아니라 반도체를 사용하는 전자회로에서도 필수적이며, 이 또한 전자회로의 과열로 인한 오동작과 과대한 전력소모를 유발한다. 따라서, 도체 접속/접촉부의 열화가 어떻게 일어나는지에 대한 연구가 면면히 이어지고 있다.

특히, 운전중인 기기에 대해 열상 카메라를 이용하여 도체 접속/접촉부나 기기의 외관 및 전자회로 기관 등을 촬영하여 국부적인 온도 상승을 측정하는 열화 진단 기법이 제시되어, 현장에서 매우 유용하게 적용되고 있다. 그러나, 아직까지는 단순한 온도의 측정에 그쳐 단순 비교로 열화에 대한 판단을 내리고 있는 실정으로, 도체 접속/접촉부의 열화 메커니즘을 적절히 적용하여 보다 구체적이고 정량적인 진단은 이루어지지 않고 있다.

IEC 60943에서는 전력기기의 도체 접속/접촉부에서 접속/접촉부 온도와 주위온도와의 차이(온도상승

:  $\Delta K$ )나 주위온도의 상승( $\Delta T$ )이 기준 값을 넘을 때에는 열화가 가속된다는 이론을 제시하고 있고 이와 더불어 여러 도체 접속/접촉부의 최대 허용 온도 상승과 최대 허용온도의 기준 값을 규정하였다. 따라서, 이를 이용하면 열상 카메라를 이용한 열화 진단에서 절대 판정기준을 결정할 수 있다. 그러나, 현재까지의 열화 정도는 어느 정도인지 또 앞으로 어느 정도 사용하면 사고에 이르게 될지 등의 열화 추적 및 잔여 수명에 대한 정보는 얻을 수 없다.

최근 금속의 산화/확산 이론에 따라 접속/접촉부의 접촉저항이 증가한다는 '수명 저항모델(Lifetime resistance model)'이 제시되어 기본적인 접촉저항과 수명과의 관계를 설명하였으며, 도체 접속부의 접촉저항이 초기 값의 5 ~ 6 배 정도 되면 사고에 이른다는 보고가 있다. 이 문헌들은 모두 도체 접속/접촉부의 접촉저항 증가로 인해 사고에 이른다는 것을 제시하고 있어, 현장에서 운전 중에 접속/접촉부의 저항을 직접 측정하기 어려우므로 현장 적용성은 거의 없다. 그러나, 접촉저항의 증가는 곧 온도상승이란 점을 고려하면, 열상 카메라의 온도 측정을 통한 열화 추적 및 잔여 수명 도출에 이 연구 결과들의 적용이 가능하다.

본 고에서는 상기한 바와 같은 도체 접속/접촉부

의 열화 현상 및 이론에 대해 정리하여 전력기기나 도체의 접속 부분이 있는 각종 기기에서 발생될 수 있는 문제점을 보다 이해할 수 있도록 노력하였다. 먼저 도체 접속/접촉부의 열화 메커니즘과 관련하여 정리되어 있는 IEC 60943에 대해 소개하고 최근 시뮬레이션을 통해 열화 이론을 정립시킨 '수명 저항 모델'과 실제 사례로서 송전선 접속부의 열화 실험에 대해 소개하도록 한다.

## 2. IEC 60943

IEC 60943(Guidance concerning the permissible temperature rise for parts of electrical equipment in particular for terminals) 규격에서는 기본적으로 도체 접속/접촉부에서 일어날 수 있는 접촉저항과 이의 열화 및 이로 인한 발열에 대해 실험적인 경험으로부터 열화 수식을 전개하고, 여러 종류의 금속(도금 포함) 및 접속의 종류(스프링, 볼트 및 터미널)에서 수명(20~40년)을 보장하기 위한 최대 허용온도 및 허용 온도상승에 대해 언급하고 있다.

### 2.1. 접촉저항(contact resistance) - 도체 접속부 과열의 원인

도체 접속/접촉부에 존재하는 접촉저항으로는 집중저항(constriction resistance)과 경계저항(film resistance)이 있다. 이들은 다음과 같다.

#### (1) 집중저항

도체 표면의 불균일로 인해 도체의 면-면 접촉이라도 실제로는 점-점 접촉이 이루어지고, 이에 따라 전류 흐름의 면적이 감소하므로 저항이 커지게 된다. 이로 인해 결과적으로 주울열이 증대되어 발열이 발생한다. 접촉력이 클수록, 도체의 저항율이 작을수록, 금속의 경도가 낮을수록 집중저항은 작아진다.

#### (2) 경계저항

금속이 공기에 노출되면 표면에 산화막이 발생한다. 알루미늄이나 스텐레스 스틸과 같은 경우에는 수 nm 정도의 산화막이 발생하고 일단 산화막이 형성되면 추가 산화를 방지하는 산화 방지막으로 작용하게 되어 이 금속에서의 산화는 매우 느리게 진행된다. 그리고, 구리나 니켈, 주석과 같은 금속이 공기 중에 있거나 은이 황화 가스 환경 하에 있는 경우에는 산화 및 부식이 일어나지만 시간이 갈수록 진행속도는 느려진다. 그러나, 철의 경우에는 산화가 일정한 속도로 진행된다. 산화막이 10 nm 정도까지는 터널 효과(tunneling effect)에 의해 전류 흐름에 지장을 주지 않으나(터널저항(표면저항)으로 표시), 그 이상의 두께인 경우에는 산화막으로 인해 전류의 흐름이 막혀 산화층의 저항(절연체)으로 고려된다.

이러한 집중 저항과 경계저항으로 나타나는 접촉저항  $R_c$ 에 대한 이론적인 계산식은 간이식으로서 다음 식 (1)과 같다. 식에서 알 수 있는 바와 같이 접촉저항은 접촉력과 재질에 따른 특성에 따라 달라진다. 표 1과 2에 각각 터널저항의 대표적인 값과 집중저항 및 경계저항 계수를 나타내었다.

$$R_c = k_1 F^{-0.6} + k_2 \sigma_0 F^{-1} \quad (1)$$

단,  $k_1$  : 집중저항 계수,  $k_2$  : 경계저항 계수,  $F$  : 접촉력,  $\sigma_0$  : 터널저항(표면저항)

표 1. 대표적인 터널저항

금속	상태	$\sigma_0$ [ $\Omega m^2$ ]
구리	신품	$2 \times 10^{-12} \sim 3 \times 10^{-11}$
	산화됨	10-10
	주석 도금	$10^{-12} \sim 4 \times 10^{-12}$
은	-	$4.6 \times 10^{-13} \sim 4 \times 10^{-12}$ (경우에 따라 $2.5 \times 10^{-11}$ 까지 가능)
알루미늄	-	$7 \times 10^{-11} \sim 10^{-9}$

표 2. 대표적인 집중저항 및 경계저항 계수

금 속	집중저항 계수 $k_1$ [ $\times 10^{-6}$ ]	경계저항 계수 $k_2$ [ $\times 10^{-6}$ ]
구리	90	247
황동	360	450
알루미늄	130	135
알멜렉	150	135
은	81	225
주석	400	22.5
니켈	420	585
은도금 구리	88	225
주석도금 구리	57	22.5
주석도금 알루미늄	93	22.5
은도금 황동	310	225
주석도금 황동	200	22.5

표 3. 이종 금속간의 전기화학적 포텐셜 차이

접 촉		전위차[mV]	접 촉		전위차[mV]	
전위차 0.35 V 이상인 접촉	은-주석	470	니켈-알루미늄	620	황동-주철	480
	은-납	560	니켈-카드뮴	640	황동-알루미늄	540
	은-주철	710	니켈-아연	960	황동-카드뮴	560
	은-알루미늄	770	구리-납	370	황동-아연	880
	은-카드뮴	790	구리-주철	520	주석-아연	640
	은-아연	1,110	구리-알루미늄	580	납-아연	550
	니켈-납	410	구리-카드뮴	660	주철-아연	400
	니켈-주철	530	구리-아연	920		
전위차 0.35 V 이하인 접촉	은-니켈	150	니켈-구리	40	구리-황동	40
	은-구리	190	니켈-황동	80	구리-스텐레스	140
	은-황동	230	니켈-스텐레스	160	스틸	
	은-스텐레스	330	스틸			

한편, 접촉저항은 보통 직류 전압을 인가하면서 전류를 측정하여 계산을 통해 알 수 있으나, 교류 전류를 인가하고 접촉부에서의 전압 강하를 측정하여 접촉저항을 측정하는 방법도 이용되고 있다. 접촉저항 측정시의 인가 전압은 운전전압 이하로 경계저항에서 터널 효과나 절연과괴가 일어날 수 있는 정도를 고려한다.

## 2.2. 접촉점의 열화

### (1) 이종 금속간의 접촉

전기화학 포텐셜(electrochemical potential)의 차이가 0.35 [V] 이상인 이종 금속간에 접촉이 이루어질 때에는 전기화학적 작용에 의해 부식이 발생한다고 알려져 있다. 두 이종 금속을 접촉시킬 때의 전기화학적 전위차를 표 3에 나타내었다.

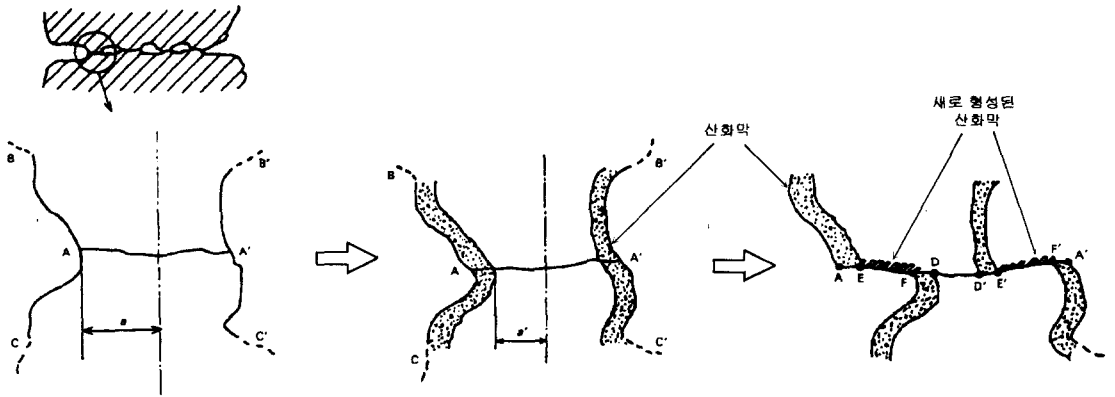


그림 1. 도체 접속/접촉부의 열화 과정

접촉 부위 부근에 수분(50% 이상의 습도) 및 공기(산소)의 존재로 인해 부식되며, 접촉시 부식전류가 흐르게 된다.

(2) 산화

그림 1에 금속의 접촉에 대한 개념과 산화 열화로 인해 접촉 면적이 감소하는 개념을 나타내었다. 접촉점 주위 도체는 공기와 접촉하여 산화가 진행되어 산화층이 두꺼워짐에 따라 접촉점의 면적이 감소하고, 이에 따라 접촉저항이 증대된다. 그러나, 일반적인 경우 이러한 산화는 진행 속도가 느려 접촉저항에 영향을 미치려면 수십 년이 걸리게 된다.

하지만, 부하의 운전 주기(전류 cycle)로 인한 금속의 팽창/수축, 전기적 운전으로 인한 진동, 기타 기계적 충격 등에 의해 접촉면에서 미소한 이동(미끌어짐)이 발생하고, 이로 인해 접촉면적이 줄어들고, 공기에 노출되는 부분은 산화가 진행되므로 원래대로 위치 회복되어도 접촉면에 산화막이 존재하기 때문에 이미 접촉면적은 감소된 상태로 된다. 다만, 이러한 미소 이동은 단순 접촉보다는 볼트 조임과 같은 접속에서는 상당히 줄어들 수 있다.

한편, 접촉면에 각종 기계적인 움직임과 이에 따른 산소의 확산으로 접촉면 자체에도 산화가 진행되어 산화막이 두꺼워져 저항이 증가되지만, 전술한 바와 같이 이러한 과정은 상당히 느리리라 예상된다.

(3) 구리 접촉의 열화 및 온도와의 관계

일반적으로 접촉시에는 접촉부 온도와 주위 온도와의 차이인 온도상승이 한계값 이상으로 크거나 주위 온도 자체가 한계온도 이상일 때에는 열적으로 가속 열화가 진행된다. 이러한 영향에 대해 도전 재료로 많이 사용되는 구리의 경우를 예를 들어 살펴보면 다음과 같다.

온도 상승의 영향

그림 2에 구리 접촉에서 접촉부 온도와 주위온도 차이( $\Delta K$ )에 따른 수명 반감 계수를 나타내었다. 온도 상승  $\Delta K$  가 클수록 열화로 인해 수명이 줄어들게 되며, 대체로 식 (2)에 나타난 바와 같이 계산된다. 예로, 구리 접촉의 경우 허용 온도상승이 35 K이므로(대기온도 20°C로 고려) 접촉부의 온도상승이 45 K라면 수명 반감 계수는 6 K 정도 되어, 수명은 약 0.315 배로 줄어들게 된다.

$$K_i = 2^x, \quad \text{단, } x = \frac{\Delta T_{i1} - \Delta T_{i2}}{\Delta_i} \quad (2)$$

$\Delta T_{i1}$  : 초기 온도상승

$\Delta T_{i2}$  : 열화 후 온도상승

$\Delta_i$  : 온도상승( $\Delta K$ )에 따른 수명 반감 계수

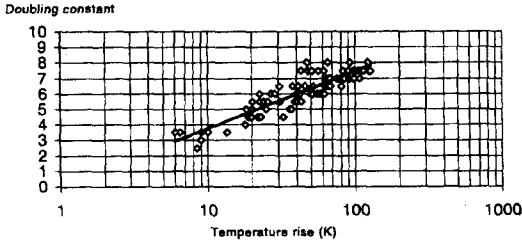


그림 2. 구리 접촉에서 접촉부 온도외 주위온도 차이(ΔK)에 따른 수명 반감 계수

#### 주위 온도의 영향

주위 온도가 높을 경우, 열화가 가속되어 수명이 줄어들게 되며, 그림 3과 식 (3)에 구리 접촉에서 온도 상승(ΔK)에 따른 주위온도 상승시의 수명 반감 계수와 관련 식을 나타내었다. 구리 접촉의 경우, 허용 온도상승이 35 K이므로(주위 온도 40℃로 고려) 주위 온도가 8 K 상승되면 수명은 절반으로 줄어들게 된다.

$$K_e = 2^y, \quad \text{단, } y = \frac{T_{e1} - T_{e2}}{\Delta_e} \quad (3)$$

$T_{e1}$  : 초기 주위 온도

$T_{e2}$  : 열화 후 주위 온도

$\Delta_e$  : 주위 온도에 따른 수명 반감 계수

온도상승(ΔK)과 주위 온도 상승에 따른 총 수명반감 계수 산출

식 (2)와 식 (3)을 조합하면 도체 접촉부의 온도상승(ΔK)과 주위 온도의 상승에 의한 총 열화계수를 산출할 수 있는 수식이 도출된다. 결국, (4) 식을 이용하면 운전 조건에 따라 설계 수명에 비해 수명이 얼마나 저하되는지를 파악할 수 있다.

$$K_{th} = 2^{(x+y)} \quad (4)$$

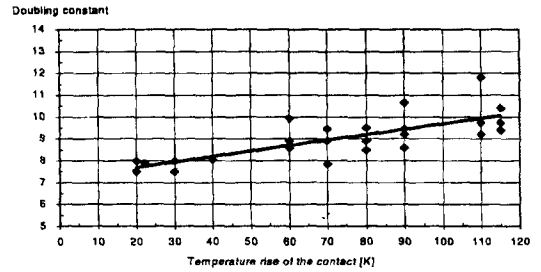


그림 3. 구리 접촉에서 온도상승(ΔK)에 따른 주위온도 상승시의 수명 반감 계수

#### (4) 열화를 고려한 주요 접촉 재료의 사용 주의점

구리를 그대로 사용하는 것은 쉽게 열화될 수 있으므로 좋지 않으며, 특히 접촉부의 온도가 60℃ ~ 85℃를 초과하는 경우에는 수명대로 사용할 수 없다. 그리고, 니켈도금 구리는 기본적으로 접촉저항은 커지지만 발전소나 철도와 같은 특정한 상황에서 부식적인 대기 환경이나 고온의 접촉에 적합하다. 아울러, 주석도금 구리 및 주석도금 알루미늄은 저전압용으로 적합하다. 주석은 경도가 작으므로 접촉저항이 작지만, 이에 따라 접촉이 작은 경우에는 주석 도금이 벗겨질 우려가 있다. 그리고, 은도금 재료와 접촉할 경우 105℃가 넘으면 균열이 발생될 수 있으므로 주의하여야 한다.

주석도금 볼트 접속에서 진동이 가해지는 경우, 정격보다 낮은 전류가 흐르더라도 부식이 발생하여 접촉이 파괴될 수 있다. 이러한 경우에는 은도금 또는 니켈도금 재료를 사용하는 것이 좋다. 알루미늄의 경우에는 산화막인 알루미늄을 브러시 또는 다른 방법으로 제거한 후에 사용하여야 한다.

### 2.3. 허용 온도 및 허용 온도상승

#### (1) 대기 온도

접속(connection)이나 접촉(contact) 부분의 열화는 온도에 따라 상당히 달라지므로 대기 온도가 어느 정도인지를 아는 것은 중요하다. 일반적으로 년중 평균온도는 15℃로 고려되고 있다. 최대 대기온도는

표 4. 전력설비에서 최대 허용 온도 및 허용 온도상승

접촉 종류	구 성 물	최대 허용 온도상승 ( $\Delta K$ ) [K] (주위온도 40°C)	최대 허용 온도 [°C]
스프링 접속 (구리 및 구리합금)	◦ 도금 없음	35	75
	- 공기중	65	105
	- SF <sub>6</sub> 가스중	40	80
	- 절연유중	50	90
	◦ 주석도금(공기, SF <sub>6</sub> , 절연유 중)	50	90
	◦ 은 또는 니켈도금	65	105
볼트 접속 (구리, 알루미늄 및 구리합금)	- 공기, SF <sub>6</sub> 가스중	50	90
	- 절연유중	75	115
	◦ 주석도금	65	105
	- 공기, SF <sub>6</sub> 중	60	100
	- 절연유 중	75	115
	◦ 은 또는 니켈도금	60	100
터미널 (스크류나 볼트로 외부도체와 접속)	- 공기, SF <sub>6</sub> 가스중	50	90
	- 절연유중	65	105

40°C로 보지만, 고도에 따라 2,000 [m] 이상에서는 100 [m] 당 1 %씩 온도가 저하되는 것으로 고려하고 있다.

0 ~ 2,000 [m] : 40°C

2,000 [m] ~ 3,000 [m] : 30°C

3,000 [m] ~ 4,000 [m] : 25°C

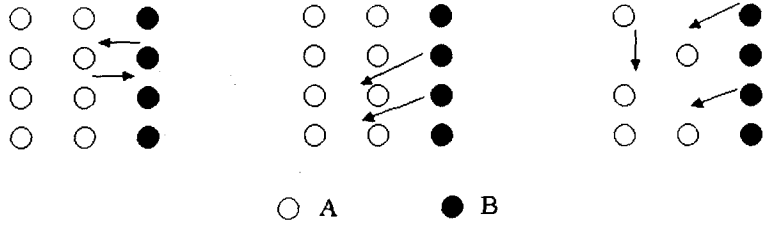
(2) 여러 재료에서의 허용 온도 및 허용 온도 상승  $\Delta K$

전력설비의 각 접속부에서 여러 가지 재료에 대한 최대 허용 온도 및 허용 온도상승은 다음 표 4와 같다. 허용 온도상승  $\Delta K$  의 값은 20 ~ 40년 정도의 수명에 해당하는 장기 시험과 현장 경험에 의하거나

열화의 법칙에 따라 높은 정격으로 단기 시험을 수행한 결과에 의해 구한 값이다. 참고로 IEC 60943에 나타난 허용 온도 및 허용 온도 상승 값은 부족하게 표현되어 있어, IEC 6094에 나타난 값을 표 4에 나타내었다. 여기서, 최대 허용온도는 재료의 성질과 구성, 대기 온도 등을 고려하여 산출된 값으로, 이때 대기 온도는 40°C로 하였다.

3. 수명 저항 모델 (Lifetime Resistance Model)

일반적으로 도체 접속/접촉부의 수명은 그 부위의 산화 열화 정도에 따라 달라지며, 이 산화 열화는 접촉저항을 증대시키게 된다. 이에 따라, 물성적인 축



(a) 원자 상호간의 자리 이동 (b) 격자 사이에 끼어들기 (c) 빈 자리(vacant)로 이동

그림 4. 고체에서 3 가지 확산 메커니즘

면에서 접촉저항과 산화 열화와의 관련성을 나타낸 '수명저항 모델 (Lifetime Resistance Model)' 이론이 제시되었다. 수명저항 모델은 접촉/접촉부의 접촉저항이 시간에 따라 증가하게되어 결국 접촉부의 온도 상승으로 이어져 파괴를 초래한다는 수명이론으로, 접촉부를 이루는 도체(예, Cu, Al 등)의 표면이 산화되고 운전중 시간이 지남에 따라 산소(산화층)의 확산으로 인해 산화층이 두꺼워지는 효과로 인해 접촉면적이 줄어들고 저항이 증가되는 메커니즘을 적용한 것이다.

그림 4에 수명 저항 모델의 기본을 이루는 확산의 원리를 나타내었다. 그림 4에서 A 원자는 금속을 나타내고 대체로 결정 상태이며, B 원자는 산화된 원자이다. 그림 (a)는 원자 상호간의 자리 이동에 의해 산화된 원자가 금속 내부로 진입하여 산화가 진전되는 것을 의미하며(exchange mechanism), 그림 (b)는 산화된 원자가 결정 내부로 이동하여 격자 사이에 끼어드는 것(interstitial)을 나타내고 있다. 그리고, 그림 (c)는 결정 내부의 빈 자리(vacant)로 산화된 원자가 이동하는 것을 나타내고 있다. 이러한 세 가지 메커니즘에 의해 산화된 원자가 금속 내부로 이동하게 되면 금속 표면으로 드러난 산화되지 않은 원자는 산소의 공격으로 다시 산화되어, 산화층이 두꺼워지는 산화 열화가 진행된다. 여기서, (a) 메커니즘은 활성화 에너지가 필요하므로 주로 금속이 용점 가까이 높은 온도일 때 일어나며, (b) 메커니즘은 격자(정상적인 금속 원자)의 크기에 비해 산화된 원자의

이온화 반지름이 작은 경우에 고려될 수 있다. (c) 메커니즘은 상온에서 일반적으로 (a)나 (b) 메커니즘 보다는 쉽게 나타날 수 있는 형태이다.

결국 금속에서의 산화 열화는 상기한 확산 원리에 의해 진행되며 이를 수식적으로 표현할 수 있다. 즉, 실제 금속간의 접촉점에서 산화가 일어나면 접촉점의 면적(a-spot)이 작아지게 되므로 시간에 따른 확산 메커니즘을 면적이 대해 정리하여 저항의 형태로 나타내면 다음과 같이 된다.

$$\frac{R(t)}{R(t=0)} = \frac{1}{1 - \eta t^{\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{Q_a - \sigma a^3}{2RT_a}\right]} \quad (5)$$

여기서,  $R(t)$  : 시간  $t$  후의 접촉저항,

$R(t=0)$  : 초기의 접촉저항,

$\eta$  : 초기 접촉면적(a-spot)과 확산계수 등을 고려한 계수

$$\eta = \frac{4\gamma}{A_0} D_0^{\frac{1}{2}}$$

단,  $A_0$  : 접촉점(a-spot)의 초기 면적

$D_0$  : 원자의 진동수 인자

$Q_a$  : 확산되는 이온의 활성화 에너지,  $\sigma$  : 각 원자에 가해지는 스트레스(압력)

$a^3$  : 원자의 단면적,  $\sigma a^3$  : 각 원자에 가해지는

는 스트레스에 의해 행해진 일,

$R$  : 이상기체 상수,

$T_a$  : 접촉면적(a-spot)의 절대 온도

$$T_a = \sqrt{T_0^2 + \frac{U^2}{4L}} \quad (6)$$

단,  $T_0$  : 접촉되지 않은 금속 표면의 절대온도

$U$  : 접촉전압

$L$  : Lorenz 상수

결국, 식 (5)는 접촉압력과 접촉부위의 온도의 함수로서 시간이 지남에 따라 초기 접촉저항에 비해 얼마나 커졌는지의 비율을 나타내는 것이 된다. 참고로 식 (5)를 이용하여 계산할 때 각 인자의 값의 예를 표 5에 나타내었다. 이 식을 이용하여 시뮬레이션한 결과를 그림 5와 6에 나타내었다. 그림 5는 구리-구리 접촉의 경우 접촉전압  $U = 140$  [mV]로 하고 여러 접촉압력일 때의 수명저항을 나타낸 것으로, 접

촉압력이 작을수록 수명이 저하되는 것을 보여주고 있다. 또한, 그림 6은 일정 접촉압력  $\sigma = 4 \times 10^8$  [N/m<sup>2</sup>] 일 때 여러 접촉전압에 따른 구리-구리 접촉의 수명 저항을 나타내고 있으며, 접촉전압이 클수록 수명이 저하되는 것을 보여주고 있다. 일정한 전류가 흐를 경우 접촉저항이 클 때에는 당연히 전압강하가 클 것이므로, 접촉전압이 크다는 것은 접촉저항이 크다는 것을 의미하는 것이다.

이상과 같은 시뮬레이션 결과는 실험 결과와 잘 일치하는 것으로 확산 이온으로부터 도출된 수명저항모델이 잘 적용된다는 것을 나타내고 있으며, 수식적으로 수명저항은  $\frac{1}{1 - Ct^{1/2}}$  의 꼴에 비례한다는 것을 입증하고 있다.

#### 4. 송전 선로에서의 실험결과

송전선로와 같은 경우에 송전선의 접속을 위해 적

표 5. 수명저항모델을 이용한 계산시 각 인자의 값

기호	인 자	값	단 위
$D_0$	원자의 진동수 인자		
	- 산화 구리	$6.5 \times 10^7$	[m <sup>2</sup> /s]
	- 산화 니켈	$1.0 \times 10^9$	
- 산화 알루미늄	$6.3 \times 10^{12}$		
$A_0$	접촉점의 초기 면적	$3.74 \times 10^{-4}$	[m]
$R$	이상기체 상수	$1.38 \times 10^{-23}$	[J/mole/K]
$L$	Lorenz 상수	$2.4 \times 10^{-8}$	[V <sup>2</sup> /K <sup>2</sup> ]
$a$	원자의 반경	$4.0 \sim 8.0 \times 10^{-10}$	[m]
$Q_a$	확산이온의 활성화 에너지		[J/mole]
	- 산화 구리	$1.64 \times 10^5$	
	- 산화 니켈	$2.26 \times 10^5$	
	- 산화 알루미늄	$2.41 \times 10^5$	
$T_0$	상온	298	[K]
$U$	접촉전압	0.13~0.15	[V]
$\sigma$	스트레스(압력)	$3.9 \sim 4.1 \times 10^8$	[N/m <sup>2</sup> ]



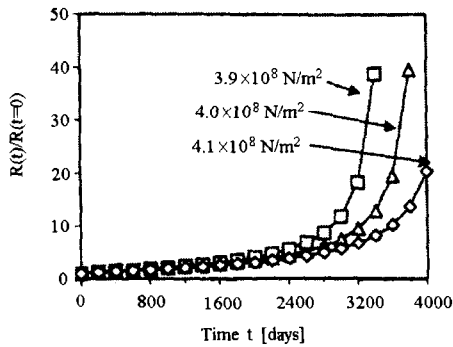


그림 5. 일정 접촉전압(140(mV))일 때 접촉압력에 따른 수명저항

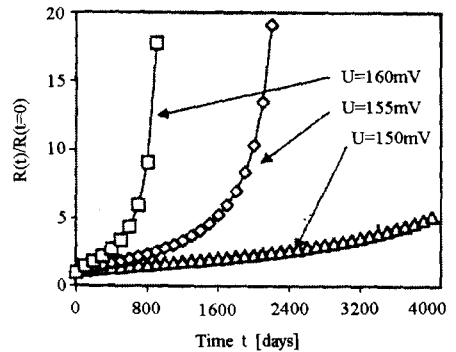
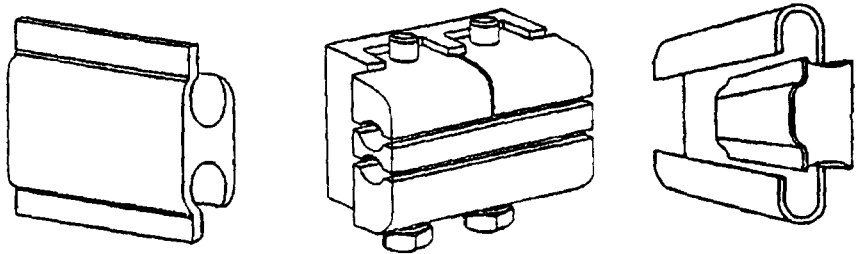


그림 6. 일정 접촉압력(4 x 10^8(N/m^2))일 때 접촉전압에 따른 수명저항



(a) 압착(compression) 접속재 (b) 볼트(bolted) 접속재 (c) fired wedge 접속재

그림 7. 여러 가지 전선용 접속재

절한 형태의 접속재(connector)가 사용되며 이 경우에 ACSR과 같은 송전선과 접속재 사이의 접촉 저항의 증대로 인해 송전선의 단선과 같은 사고가 발생할 수 있다. 송전선으로 많이 사용되는 ACSR은 여러 가닥의 알루미늄 선을 도체로 사용하고 그 가운데 강선으로 하여금 기계적인 스트레스를 담당하도록 한 전선이다. 아울러 접속재는 그림 7과 같은 종류의 압착 접속재, 볼트 접속재 및 fired wedge 접속재 등이 있으며 대부분 표 3에 나타난 이종 금속간의 전기화학적 포텐셜 차이를 줄여 열화가 덜 발생되도록 하기 위해 알루미늄 합금을 사용하고 있다.

이와 같은 전선(알루미늄 또는 구리)과 접속재(알루미늄 합금)를 환경 조건이 나쁜 플로리다의 해안가(온도: 0 ~ 40 °C, 습도: 55 ~ 60 %)에 설치하여 전류를 흘려 3 년 동안 열화를 시킨 열화 시험을 수

행한 경우가 있다. 대체로 전선과 접속재의 초기 접촉저항은 수 십  $\mu\Omega$  정도를 나타내었으며, 회로 전체로는 약 250  $\mu\Omega$  정도였다. 정기적으로 접촉저항을 측정(5 A DC 이용)하여 시간에 따른 열화 정도를 분석하였다.

그림 8은 여러 접속 종류에서 시간에 따른 접촉저항의 변화를 나타낸 것으로, 종류에 따라 다르지만 대체로 어느 정도의 시간이 지나면 접촉저항의 값이 급증하는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 전술한 그림 5 및 6에서 나타난 시뮬레이션 결과와 유사한 것을 알 수 있다. 이 실험에서 대체로 접촉저항이 1,400  $\mu\Omega$  정도일 때 즉, 초기 접촉저항 값의 5 ~ 6 배 정도로 커질 때 접속부에서 사고가 일어났다.

그림 9는 3 년 동안 실험한 사고 데이터를 Gumbel 누적 분포함수로 나타낸 것으로 표 6에 나

표 6. Gumbel 누적 분포함수로 구한 각 접속재의 한계 수명

파라미터	압 착	볼 트	fired wedge
$\lambda$ (location parameter)	838 일	988 일	2,159 일
$\delta$ (scale parameter)	172 일	389 일	884 일

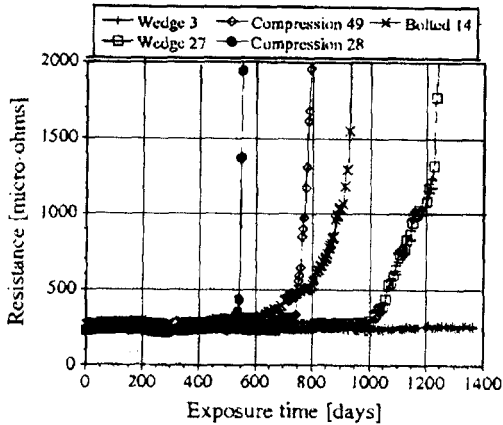


그림 8. 3 종류 접속재의 시간에 따른 접촉저항 변화

타낸 바와 같이 3 종류의 접속부에 대한 한계 수명은 fired wedge type 접속재가 가장 우수한 것으로 나타났다. 여기서,  $\lambda$ 는 location parameter로서 그 접속재의 대표적인 파괴까지의 시간을 말하며,  $\delta$ 는 scale parameter로서 그 접속재의 사고가 일어나지 않는 최소의 시간(한계 수명)을 의미하고 있다.

### 6. 결 론

본 고에서는 도체의 접속/접촉부에서 발생될 수 있는 문제점의 이해를 위해 도체 접속/접촉부의 열화 현상 및 이론에 대해 정리하였다.

전술한 바와 같이 IEC 60943에서는 도체 접속/접촉부의 열화 메커니즘과 아울러 열화에 따른 수명의 관련식을 실험적인 결과로부터 도출하였고 각 접속/접촉 종류에 따른 한계온도상승 및 한계온도를 제시

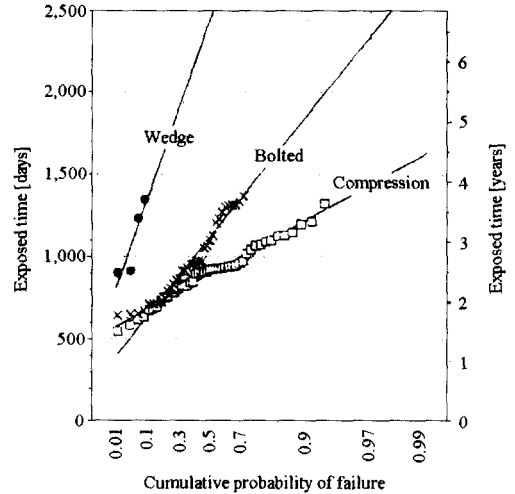


그림 9. 3 종류 접속재의 사고 누적확률분포

하여, 실제적인 도체 접속/접촉부에 대한 열화 판정에 활용할 수 있다. 그리고, 접촉저항이 산화된 금속 원자의 확산에 의한다는 열화 이론을 정립시킨 '수명 저항 모델'로부터 접촉압력이나 접촉전압에 따른 열화의 패턴이  $\frac{1}{1 - Ct^{1/2}}$ 의 꼴에 비례한다는 사실을 알 수 있어, 실험 결과나 각종 측정에 적용할 수 있다. 아울러, 실제 실험 사례로서 전선과 접속부에 대한 열화 실험을 통해 접촉저항의 값이 초기 값의 5 ~ 6 배 정도로 커질 때 접속부에서 사고가 일어났다는 사실도 알 수 있어, 이론적인 수명 저항 모델을 확인할 수 있었을 뿐 아니라 향후 현장 측정시의 참고 값으로 활용할 수 있다.

본 고에서는 접촉저항을 위주로 도체 접속/접촉부의 열화 및 수명을 소개하였으나, 실제로 현장에서는 각종 접속/접촉부의 접촉저항을 직접 측정하기는 어렵다. 그러나, 접촉저항으로 인해 접속/접촉부의 온도

가 상승하므로 현장에서 열상 카메라를 이용하면 도체 접속/접촉부의 열화 추적 및 잔여수명을 도출할 수 있으리라 사료된다. 물론, 본 고에서 소개한 것만으로는 열상카메라의 적용이 어려우나 본 고의 내용은 근간으로 “수명 저항모델”을 “수명 온도상승 모델”로 확대 적용할 경우에는 열상카메라를 이용한 열화 진단도 가능하리라 판단된다. 따라서, 향후 이러한 부분에 대한 연구가 추진되어 현장 적용성을 향상시켜야 할 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

- [1] IEC 60943, Guidance concerning the permissible temperature rise for parts of electrical equipment in particular for terminals, 2nd Ed. 1998-01.
- [2] M.Sun, M.G.Pecht, M.A.E.Natishan, R.J.Martens, "Lifetime resistance model of bare metal electrical contacts", IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Part B : Advanced Packaging, Vol 22, No. 1, pp.60~67, 1999.
- [3] B.W.Callen, B.Johnson, P.King, R.S.Timsit, W.H.Abbott, "Environmental Degradation of Utility Power Connections in a Harsh Environment", IEEE Proc. 45th Holm Conf. on Electrical Contacts, pp.63-76, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, Oct., 1999.
- [4] IEC 694, Common specifications for high-voltage switchgear and controlgear standards, 2nd Ed. 1996-05.

### ◇ 著 者 紹 介 ◇



#### 김 정 태(金正泰)

1960년 1월 1일생. 1982년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1992년~1995년 대한주택공사 주택연구소

선임연구원. 1995년~현재 대전대 전기공학과 교수.



#### 함 길 호(咸吉鎬)

1959년 5월 25일생. 1982년 한양대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1982년~현재 LG산전 근무. LG산전 전력시험기술센터 책임연구원.