

전기적 접속/접촉부 열화 평가를 위한 수명 온도상승 모델

論 文
51C-2-1

Lifetime-Temperature Rise Model for the Evaluation of Degradation in Electric Connections/Contacts

金正泰* · 金南俊**
(Jeong-Tae Kim · Nam-Joon Kim)

Abstract - In this paper, 'lifetime-temperature rise model' based on the 'lifetime-resistance model' is theoretically proposed, in order to find out the evaluation method of degradation and the residual lifetime by use of infrared image camera for electric connections/contacts. Two assumptions have been builded up for the 'lifetime-temperature rise model'; one is associated with the linear relationship between the temperature rise ΔK and contact resistance, and the other the functional relationship between the temperature of electric connections/contacts and the operating time presenting in the 'lifetime-resistance model'. To prove the proposed model, experiments have been performed for various electric connections/contacts. From the experimental results, measured values were quite similar to the calculated values, which proved the above-mentioned two assumptions. Therefore, by use of 'lifetime-temperature rise model', it is possible to estimate the trend of degradation and the residual lifetime for electric connections/contacts through the temperature measurements.

Key Words : electric connections/contacts, lifetime, temperature-rise, contact resistance, thermal image camera

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 접촉의 용융 등 현장에서 발생되고 있다. 아울러, 이러한 도체간의 접촉은 전력기기 뿐만 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.[1,2]

특히, 운전중인 기기에 대해 열상 카메라를 이용하여 도체 접속/접촉부나 기기의 외관 및 전자회로 기판 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 : ΔK)나 주위 온도의 상승(ΔT)이 기준 값을 넘을 때에는 열화가 가속된

다는 이론을 제시하고 있고 이와 더불어 여러 도체 접속/접촉부의 최대 허용 온도상승과 최대 허용온도의 기준 값을 규정하였다.[3] 이를 이용하면 열상 카메라를 이용한 열화 진단에서 절대적인 판정기준을 결정할 수는 있지만, 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 접촉 저항이 증가한다는 '수명 저항모델(Lifetime-resistance model)'[1]이 제시되어 기본적인 접촉저항과 수명과의 관계를 설명하였으며, 도체 접속부의 접촉저항이 초기 값의 5 ~ 6 배 정도 되면 사고에 이른다는 보고[2]가 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.

따라서, 본 연구에서는 열상 카메라를 이용한 도체 접속/접촉부의 열화 추적 및 잔여수명을 도출하기 위해, 이론적으로 수명 저항모델을 근거로 수명 온도상승 모델을 제시하였다. 그리고, 여러 종류의 도체 접속/접촉부를 제작하고 오븐 속에서 전류를 인가하면서 인위적으로 열화시킨 후 정격 전류를 흘리는 온도시험을 통해 온도상승 ΔK 를 측정하고 열화에 따른 접촉저항을 측정하여, 측정된 온도상승 ΔK 와 접촉저항과의 관련성과 제시한 수명 온도상승 모델을 적절함을 입증하였다.

* 正 會 員 : 大 眞 大 電 氣 工 學 科 副 教 授 · 工 博

** 正 會 員 : 大 眞 大 電 氣 工 學 科 助 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 2001 年 4 月 18 日

最 終 完 了 : 2001 年 12 月 28 日

2. 실험 방법

2.1. 수명 저항 모델[1]

본 연구에서는 온도상승과 열화와의 관련성을 도출하기 위해 접촉저항과 열화와의 관련성을 나타낸 '수명저항 모델 (Lifetime Resistance Model)' [1]을 적용하였다. 수명저항 모델은 접촉/접촉부의 접촉저항이 시간에 따라 증가하게 되어 결국 접촉부의 온도상승으로 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. 이 이론의 수식은 다음과 같다.

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

여기서, $R(t)$: 시간 t 후의 접촉저항,

$R(t=0)$: 초기의 접촉저항,

η : 초기접촉면적(a-spot)과 확산계수 등을 고려한 계수

Q_a : 확산되는 이온의 활성화 에너지,

σ : 각 원자에 가해지는 스트레스(압력)

α^3 : 원자의 단면적,

$\sigma\alpha^3$: 각 원자에 가해지는 스트레스에 의해 행해진 일,

R : 이상기체 상수,

T_a : 접촉면적(a-spot)의 절대 온도

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

단, T_0 : 접촉되지 않은 금속 표면의 절대온도

U : 접촉전압

L : Lorenz 상수

2.2. 수명 온도상승 모델 (본 논문에서의 제안)

수명 저항 모델을 온도상승 ΔK 와 열화와의 관계로 유도하기 위해서는 접촉저항 R 과 온도상승과의 관련성을 파악하여야 한다.

기본적으로 전류가 인가될 때의 발열량 Q 는

$$Q = 0.24 I^2 R t \quad (3)$$

로 되며, 전류 I 가 일정하고 시간 t 가 충분히 흘러 온도가 포화에 다다르면 도체 접촉/접촉부 온도와 주위 온도와의 차이인 온도상승 ΔK 는 일정한 값으로 된다. 이러한 상황은 도체 접촉/접촉부에 대한 온도시험에서 나타날 수 있다. 여기서, '온도시험'이란 일정한 정격 전류를 흘리면서 온도상승 ΔK 가 일정하게 포화되는 값을 측정하는 시험으로, 시험

대상 도체 접촉/접촉부가 최대 허용 온도상승 기준 값의 범위 이내 인지를 판단하는 시험이다. 온도상승 ΔK 는 (발열량 Q - 열발산량)의 관계에 있을 것이므로, 온도가 포화되어 발열과 열발산이 일정하다면, 온도상승 ΔK 를 발열량 Q 에 선형적으로 비례한다고 볼 수 있다. 따라서, 식 (3)에서 발열량 Q 가 접촉저항 R 에 비례하므로, 결국, 온도상승 ΔK 는 접촉저항 R 에 선형적으로 비례한다고 가정할 수 있다. 그러므로, 상기 수명저항 모델의 식 (1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{R(t)}{R(t=0)} = \frac{\Delta K(t)}{\Delta K(t=0)} \quad (4)$$

그러나, 수명 저항 모델을 실제로 적용하려면, 접촉압력 σ 가 일정하다고 가정하더라도 접촉점의 온도 T_a 를 알아야 한다. 미세한 접촉점 부위의 온도를 실제로 측정할 수는 없으나, 도체 접촉/접촉부 표면에 열전대나 열상 카메라를 이용하여 온도를 측정할 수 있으므로 이를 적용할 수 있다고 생각된다. 즉, 접촉부위 전체의 온도를 T_c 라 할 때, 접촉점 자체의 온도 T_a 와 접촉부위 전체의 온도 T_c 와는 차이가 있으나, 상기 T_a 에 대한 식 (2)에서도 알 수 있듯이 접촉점의 온도는 주위 도체 표면의 온도에 접촉전압(접촉점의 전압강하)으로 인한 발열을 고려한 것이고, 접촉부 전체의 온도 T_c 가 주위 도체의 온도에 접촉부 전체의 전압강하에 의한 발열을 고려한 것이므로, 개념적으로 유사하다.

이제 상기한 수명 저항 모델의 식 (1)을 실제 측정 가능한 값인 T_c 를 이용하고 온도상승과 수명과의 관계인 수명 온도상승 모델의 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\Delta K(t)}{\Delta K(t=0)} = \frac{1}{1 - \eta t^{\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{C}{T_c}\right]} \quad (5)$$

여기서, $C = \frac{Q_a - \sigma\alpha^3}{2R}$ 인 상수로서 도체 재료와 접촉 방법에 따라 달라지는 값이며, T_c 는 접촉/접촉부의 절대온도 [K]이다.

한편, 수명저항 모델을 제안한 문헌[1]에서 T_a 는 접촉전압과 관련되어 상수로 놓고 있으나, 실제의 경우를 고려한 식 (5)에서는 T_c 를 상수라고 할 수 없다. 왜냐하면, 열화에 따라 저초저항이 증가하고 인저항 저르가 초르다며 다여히 접촉전압이 증가하기 때문이다. 따라서, T_c 는 열화시간에 따라 증가되는 풀이어야 한다.

본 연구에서는 열화와 T_c 와의 관계에 대해 다시 또 하나의 가정을 하고자 한다. 이러한 가정은 상술한 내용에 근거할 수 있는데, 열화에 의해 접촉저항이 증가되고 이에 따라 접촉전압이 증가하고 온도상승을 야기하므로, 이러한 관련성 역시 식 (1)의 수명저항 모델에 따른다고 추정할 수 있다. 즉, 수명저항 모델의 식 (1)에서 다른 값들은 상수라고 가정하고 저항과 수명과의 관계를 단순히 도출하면

$$R(t) \propto \frac{1}{1 - Et^{\frac{1}{2}}}$$

(단, E : 재질 및 접촉 압력 등에 따른 상수)

이며, 열화가 일어날 때 접촉저항과 접촉전압 그리고 접촉부 온도가 모두 비례 관계에 있다는 것을 고려하면 T_c 의 열화시간에 따른 변화 역시 상기 꼴로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_c(t) = \frac{F}{1 - Et^{\frac{1}{2}}} \quad (6)$$

(단, F : 접촉저항과 온도의 관계에 따른 상수)

이제, 식 (6)을 식 (5)에 넣고 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta K(t)}{\Delta K(t=0)} &= \frac{1}{1 - \eta t^{\frac{1}{2}} \exp\left[-C \left(\frac{1 - Et^{\frac{1}{2}}}{F}\right)\right]} \\ &= \frac{1}{1 - \eta t^{\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{C}{F}\right] \exp\left[\frac{Et^{\frac{1}{2}}}{F}\right]} \\ &= \frac{1}{1 - At^{\frac{1}{2}} \exp[Bt^{\frac{1}{2}}]} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{단, } A = \eta \exp\left[-\frac{C}{F}\right] = \eta \exp\left[-\frac{Q_a - \sigma a^3}{2RF}\right]$$

$$B = \frac{E}{F} = \frac{\eta \exp\left[-\frac{Q_a - \sigma a^3}{2R\sqrt{T_0^2 + \frac{U^2}{4L}}}\right]}{F}$$

이상과 같은 이론적인 검토에서 온도상승 ΔK 와 수명 t 와의 관계를 도출할 수 있으며, 상수인 A 와 B 에 따라 도체 접속/접촉부의 열화특성이 좌우된다고 할 수 있다. 즉, 상수 A 와 B 는 재질과 접속의 종류에 따른 열화 계수라 할 수 있다.

3. 실험 방법

3.1. 시료 및 실험장치 구성

2장에서 유도한 수명 온도상승 모델을 실험적으로 입증하기 위해 본 연구에서는 다음과 같은 실험을 수행하였다. 그림 1은 본 연구에서 도체 접속/접촉부의 열화 실험을 위해 구성한 시료의 배치도이다. 오븐 속에 실험 대상인 접속 또는 접촉부위를 그림과 같이 6 곳에 배치하였다. 그리고, 접속/접촉부 사이나 연결 부위에는 큰 도체 방열판을 두어 접속/접촉부 이외의 곳에서 더 많이 발열되거나 열 증첩

으로 인한 온도상승을 방지하였다. 도체 접속/접촉부의 온도를 상승시키기 위해 도체에 전류를 인가하였으며, 이를 통해 열화와 온도시험을 수행하였다.

본 연구에서 사용한 시료는 전력설비에서 주로 사용하는 접속 또는 접촉으로 표 1에 시료 종류를 나타내었다. 이때, 각 도체는 모두 정격 전류 600A로 하여 도체의 크기 및 접속/접촉방법(볼트의 개수 및 조임 토크 값 등)을 택하였으며, 참고로 접속의 경우 그림 1과 같이 2 개의 볼트로 접속하였다.

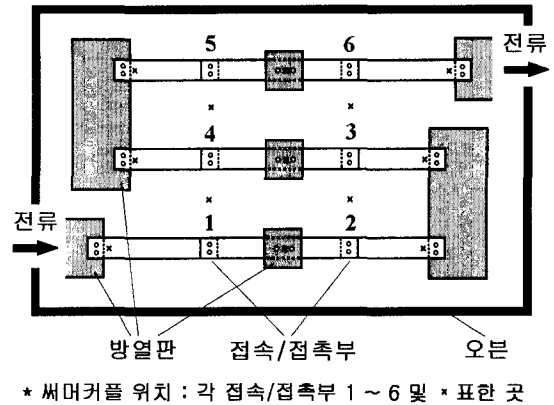


그림 1. 도체 접속/접촉부 열화 실험의 시료 배치도
Fig. 1. Layout of specimens for the degradation experiments of electric connections/contacts

표 1. 시료의 종류

Table 1. Specifications of specimens

종류	재 질	도체 크기 (두께×폭× 길이 [mm ³])	접촉/접속면 의 크기 (가로×세로 [mm ²])	정격 전류
접촉	구리-구리	6×40×255	40×40	600 [A]
	구리-주석도금구리			
	주석도금구리-주석도금구리			
접속	구리-구리	6×40×255	60×40	
	구리-주석도금구리			
	알루미늄-주석도금구리	6×50×275	60×50	
	알루미늄-알루미늄			

한편, 도체 접속/접촉부의 온도는 K 타입의 써머커플 (0.4%급, - 60 ~ 200℃)을 이용하여 그림 1의 각 접속/접촉부 중앙 총 6개와 오븐 내의 온도 측정을 위해 1-4, 2-3, 4-5, 3-6 접속/접촉 부위 사이의 공간에 도체와 같은 높이로 4개, 그리고 참고로 전체 도체 중 접속/접촉 부위의 온도가 가장 높게 형성되는 것을 확인하기 위해 방열판 부위에 모두 9개를 설치하였다. 본 논문이 현장에서 열상카메라로 온도를 측정하여 전력설비의 열화진단 하는 것을 대상으로 하므로 실험에서도 열상카메라로 측정하여야 하지만, 후술하는 바와 같이 오븐의 문을 닫고 오븐 온도를 조절하면서 실

험하였기 때문에 열상카메라의 이용이 불가능하였다. 하지만, 예비 실험으로 오븐의 문을 열고 열상카메라와 써머커플 2 가지로 측정된 온도는 거의 일치하여 써머커플로 열상카메라를 대신하여 온도 측정이 가능함을 알 수 있었다.

3.2. 열화 조건

표 1에 나타난 접속 및 접속에 대해 인위적으로 가속 열화를 시켰다. 이 때, IEC 60943에 나타난[3] 수명반감 계수 K_{th} 와 IEC 694에 나타난[4] 최고 허용 온도상승 및 최고 허용 온도의 기준 값에 입각하여 가속 열화를 시켰다. 참고로 IEC 60943의 수명반감 계수 K_{th} 는 다음과 같다.

$$K_{th} = 2^{(x+y)} \tag{8}$$

$$\text{단, } x = \frac{\Delta T_{\uparrow} - \Delta T_{\downarrow}}{\Delta_i}, \quad y = \frac{T_{el} - T_{\downarrow}}{\Delta_e}$$

- ΔT_{\uparrow} : 초기 온도상승 T_{el} : 초기 주위 온도
- ΔT_{\downarrow} : 열화 후 온도상승 T_{\downarrow} : 열화 후 주위 온도
- Δ_i : 온도상승(ΔK)에 따른 수명반감 값
- Δ_e : 주위 온도에 따른 수명반감 값

여기서, 식 (8)은 접속/접속부 온도와 주위 온도의 차이 (온도 상승, ΔK)가 클수록 그리고 주위 온도 자체가 높을 수록 열화로 인해 수명이 줄어든다는 것을 의미하므로, 결국 ΔK 와 주위온도를 안다면 환산 운전시간을 알 수 있다. 표 2는 본 연구에서 수행한 열화 조건을 나타내었다. 즉, ΔK 의 허용 기준 값을 유지하면서 주위온도를 올리는 방법을 택하여 열화 조건을 설정하였다. 이 때, IEC 1545에서 보면 [5] 알루미늄 또는 구리 전선의 클램프접속에 대한 시험에서 주위온도를 20℃로 할 때 접속/접속부의 최대 온도상승이 110K 즉, 130℃를 넘지 않도록 되어 있으므로, 도체 접속/접속부의 최대 온도가 130℃ 이하가 되도록 하였다. 이 온도보다 높다면 정상적인 열화 이외의 효과가 나타날 수 있기 때문이다. 그러나, 열화온도가 낮은 만큼 30년 정도를 도체 접속/접속부의 수명이라 할 때 이에 상응하는 열화시간은 342일과 684일로 나타나 시험에 상당한 시간이 걸리는 문제점이 있다.

따라서, 본 연구에서는 2장에서 제시한 ‘수명 온도상승 모델’을 입증하기 위해 실험을 수행하는 것이고, 시료마다 1년 이상의 실험을 수행하여야 하는 어려움과 실험장비(전류 인가 장치 및 오븐 등) 사용의 문제 때문에 실제 실험을 각 시료당 3개월 동안 수행하였다. 이에 따라, 열화 시작 전에 후술하는 온도시험과 접촉저항을 측정하고 1개월 동안 표 2의 열화 조건에 따라 열화시킨 뒤, 다시 온도시험과 접촉저항을 측정하고 다시 1개월의 열화시키는 방법으로 총 3개월 동안 실험을 수행하였다. 본 논문에서 접속 및 접속 총 7종류에 대해 실험장치 2 세트를 이용하여 실험하였으므로, 실험 시간만 전체적으로 1년이 소요되었다.

한편, ΔK 의 허용 기준 값을 유지하면서 주위온도를 올리는 방법을 택하였다 하더라도, 실제로는 접속/접속부의 접

촉저항으로 인해 각 접속/접속부(그림 1의 1 ~ 6)의 온도가 다르기 때문에 ΔK 역시 달라지므로, 식 (8)을 이용하여 이에 대한 보정을 수행하여 열화시간에 대한 환산 운전시간을 계산하였다.

표 2. 도체 접속/접속부의 재질에 따른 열화 조건

Table 2. Degradation conditions for the various materials used in electric connections/contacts

종류	재 질	한계온도 (IEC 694)	허용 온도상승 (IEC 694)	수명 반감 값 (IEC 60943)	오븐 온도	도체 접속부 목표 온도	환산 운전시간 30년에 해당하는 열화시간
접속	구리	75℃ (40℃ +35K)	35K	8K	80℃ (40℃ +40K)	115℃ (80℃ +35K)	342일
	주석도금 구리	90℃ (40℃ +50K)	50K	8.5K	74℃ (40℃ +34K)	124℃ (74℃ +50K)	684일
접속	구리	75℃ (40℃ +35K)	35K	8K	80℃ (40℃ +40K)	115℃ (80℃ +35K)	342일
	알루미늄	90℃ (40℃ +50K)	50K	8.5K	74℃ (40℃ +34K)	124℃ (74℃ +50K)	684일

3.3. 온도시험 및 접촉저항 측정

초기 시료 및 열화된 시료에 대해 열화의 정도를 판단하기 위하여, 열화 과정중에 온도시험 및 접촉저항 측정을 수행하였다. 본 연구의 온도시험에서는 오븐의 온도를 15℃로 일정하게 놓고 정격 전류인 600A를 흘리면서 온도가 포화에 다다를 때의 ΔK 를 측정하였으며, 열화 정도에 따른 ΔK 의 변화 양상을 조사하였다. 그리고, 온도시험을 수행하기 전과 후에 접촉저항 측정기를 이용하여 시험대상 접속/접속부의 접촉저항을 측정하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

2장에서 언급한 바와 같이 “수명저항 모델”로부터 본 연구에서 제시하는 “수명 온도상승 모델”로 유도하는 데에는 크게 두 가지의 가정을 세웠다. 즉, 온도상승 ΔK 가 접촉저항에 선형적으로 비례한다는 것과 접속/접속부의 절대온도 T_c 가 “수명저항 모델”에 나타난 함수적인 관계로서 운전시간에 따라 열화된다는 것이다. 따라서, 실험적인 결과로서 이들에 검증을 통해 “수명 온도상승 모델”의 열화 추이를 입증할 수 있다.

4.1. 온도상승 ΔK 와 수명과의 상관관계식에 대한 검증

온도상승 ΔK 가 접촉저항에 선형적으로 비례한다는 “수명 온도상승 모델”의 가정을 입증하기 위하여, 온도상승 ΔK 와 수명과의 상관관계를 실험 결과로부터 정리한 것이 그림 2이다. 그림 2에서 알 수 있는 바와 같이 각종 접속/접속의 경우에 온도시험시의 접속/접속부와 주위온도와 차이인 온도상승 ΔK 는 실험적인 오차를 포함하고는 있지

만 접촉저항과 서로 직선적으로 비례하는 것으로 나타나, 상기한 가정이 적절하였다는 것을 입증하고 있다.

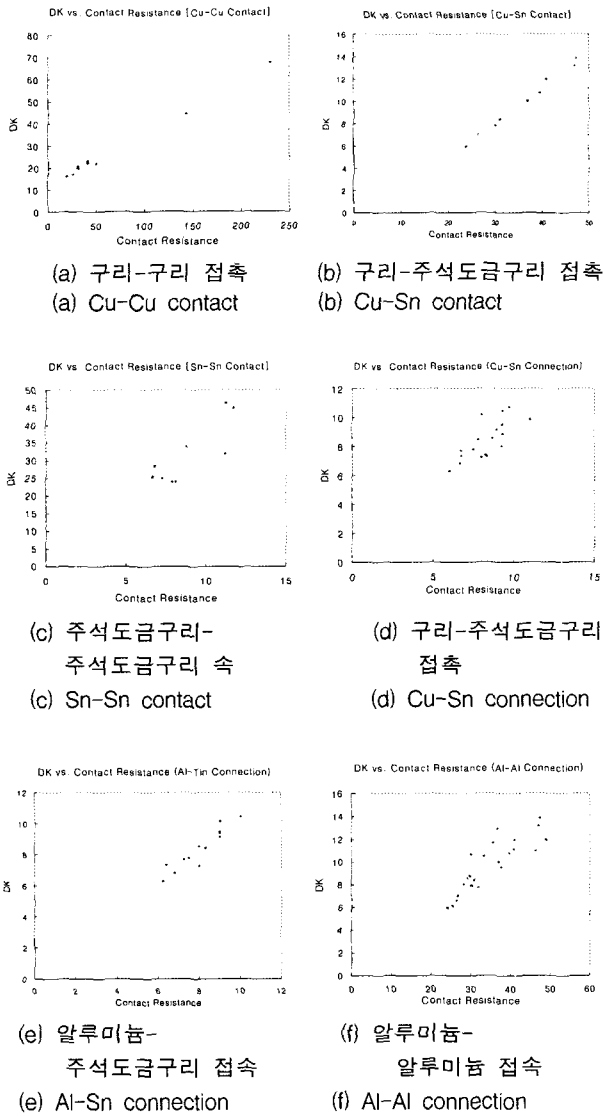


그림 2. 여러 접촉 종류에 따른 접촉저항과 온도상승 ΔK 의 관계

Fig. 2. Correlations between contact resistance and temperature rise ΔK on various connections/contacts

4.2. 열화시간(환산운전시간)과 수명과의 관련성

상기한 가정 중 둘째 가정인 접속/접촉부의 절대온도 T_c 가 "수명저항 모델"에 나타난 함수적인 관계로서 운전시간에 따라 열화된다는 것은 결국 최종적인 $\Delta K(t)$ 와 운전시간 t 의 관계식인 식 (7)으로부터 도출한 곡선이 실험 결과와 부합되는가를 확인하는 것이 된다. 이에 따라, 본 연구에서는 실제 열화시간을 식 (8)의 수명반감 계수를 고려한 환산 운전시간을 계산하고 이 때의 측정된 온도시험 데이터인 ΔK 값을 그래프에 플로팅하였다. 그리고, 이 측정값들을

토대로 식 (7)에서 열화계수 A 와 B 를 구하여 그 접속/접촉 종류에 대한 추정 수명곡선을 도출한 후 같은 그래프에 그렸다. 이러한 과정을 통해 각 접속/접촉 종류에 따라 다음 그림 3 ~ 7과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

그림 3은 구리-주석도금구리 접속의 경우 도출된 결과로서 본 실험의 데이터와 이로부터 구한 추정 곡선 및 이 접속의 도체 허용 온도상승 기준 값인 35K(표 2 참조)를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 환산 운전시간 30년이 지난 이후에 허용 온도상승 기준 값 보다 크게 나타나고 있어, 결과적으로 본 연구에서 구한 열화의 추이가 적합하다는 것을 즉, "수명 온도상승 모델"이 적합하다는 것을 입증하고 있다.

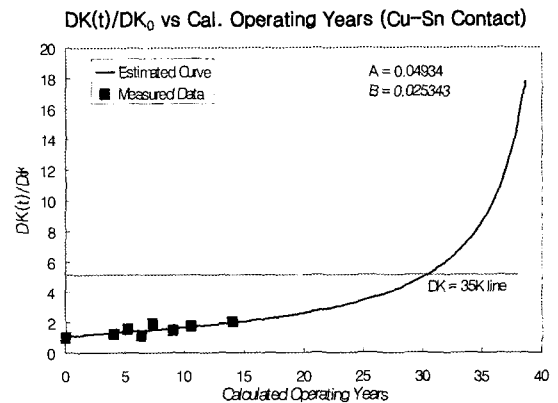


그림 3. 구리-주석도금구리 접속에서 환산 운전시간에 따른 온도상승 추이

Fig. 3. The trend of temperature rise due to calculated operating years for the Cu-Sn contact

따라서, 이러한 모델을 이용하여 구리-주석도금구리 접속에 대한 열화패턴을 알 수 있으며, 이러한 열화패턴은 현장 적용시의 기초 자료로 활용할 수 있다고 판단된다. 즉, 현장에서 구리-주석도금구리 접속부의 온도를 측정하여 그 값이 한계온도나 허용 온도상승 기준값 이상이라면 즉시 '교체' 판단을 내릴 수 있으나, 정상적인 값이거나 약간 높게 나올 경우에 상기한 관계를 적용할 수 있다. 주기적으로 접속부의 온도와 전류를 관측하여 데이터 베이스를 구축하고 그 데이터를 본 연구에서 도출한 열화패턴에 적용하면 대체적인 열화 정도를 파악할 수 있고 나아가 수명 예측도 가능하리라 사료된다.

한편, 그림 4는 구리-구리 접속의 경우로서, 이 때의 허용 온도상승은 35K(표 2 참조)이며 그림에 나타난 바와 같이 대략 25년의 수명에서 한계에 다다른 것을 알 수 있다. 이것은 초기의 온도상승값인 ΔK_0 가 약 18K 정도로 높게 나타났기 때문이며, 후술하는 구리-구리 접속의 경우에도 높은 ΔK_0 를 나타내는 것으로 보아 구리의 재질에 따른 특성이라 판단할 수 있다.

그림 5는 주석도금구리-주석도금구리 접속에서 환산 운전시간에 따른 온도상승 추이로서 주석도금 구리의 허용 온도상승이 50K(표 2 참조)이며, 초기 ΔK_0 의 값이 낮아 수명은 30년을 상회하는 것으로 나타났다. 이러한 이유는 주석

도급에 따른 접촉저항의 저감으로 온도상승이 낮아진 것으로 생각된다.

한편, 접촉의 경우를 그림 6과 7에 나타내었다. 그림 6은 구리-구리 접촉의 경우로서 한계 온도상승은 50K(표 2 참조)이며, 이에 따라 수명은 27년 정도로 나타났다. 이러한 이유 역시 초기 ΔK_0 의 값이 크기 때문으로 구리의 접촉 특성에 따른 접촉저항 값이 큰 탓으로 판단된다. 그림 7은 알루미늄-주석도금구리 접촉의 경우로서, 한계 온도상승인 50K(표 2 참조)에 비추어 수명은 30년 이상인 것으로 나타났다.

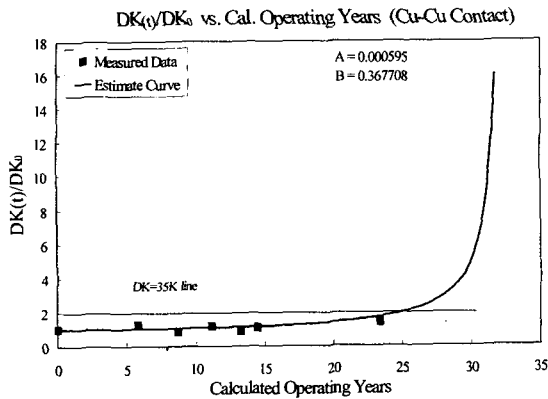


그림 4. 구리-구리 접촉에서 환산 운전시간에 따른 온도 상승 추이
Fig. 4. The trend of temperature rise due to calculated operating years for the Cu-Cu contact

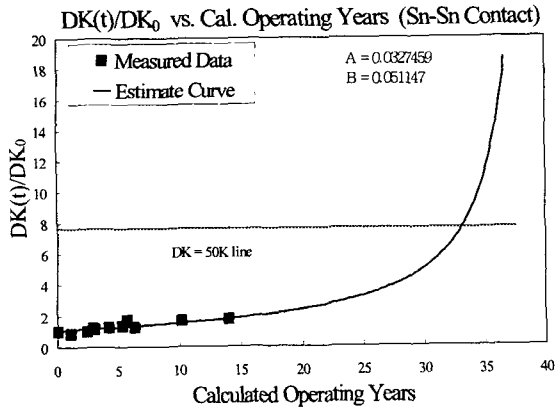


그림 5. 주석도금구리-주석도금구리 접촉에서 환산 운전 시간에 따른 온도상승 추이
Fig. 5. The trend of temperature rise due to calculated operating years for the Sn-Sn contact

본 실험에서 나타난 열화계수 A 와 B 를 정리하면 다음 표 3과 같다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 A 와 B 값은 접촉이나 접촉의 경우를 막론하고 구리-구리 접촉과 접촉의 경우와 나머지의 경우로 대별되고 있다. 즉, 구리-구리 접촉과 접촉의 경우에는 전술한 바와 같이 초기 ΔK_0 값이 큰 관계로 나머지의 경우와 다른 열화 곡선을 그리게 되며 이

에 따라 예상 수명도 저하되고 있다.

열화계수 A 와 B 는 식 (7)에 나타난 대로 둘 다 접촉되는 재료의 재질과 접촉의 종류에 따른 일종의 열화 계수라 할 수 있으며, A 가 작고 B 가 크다고 하여 특별한 물리적인 의미의 차이는 없고, 다만 열화 곡선의 추이를 나타내는 값이라고 볼 수 있다. 도체 접속/접촉부의 열화는 초기의 접촉 저항, 접촉압력, 운전 전류 및 주위 환경조건(온도, 습도, 먼지 및 공해환경) 등에 따라 달라질 수 있으므로, 표 3에 나타난 열화계수는 본 실험의 조건 및 환경에 맞는 계수라 할 수 있다. 즉, 이러한 열화 환경이 달라지면 계수 A 와 B 의 값은 달라지리라 생각된다.

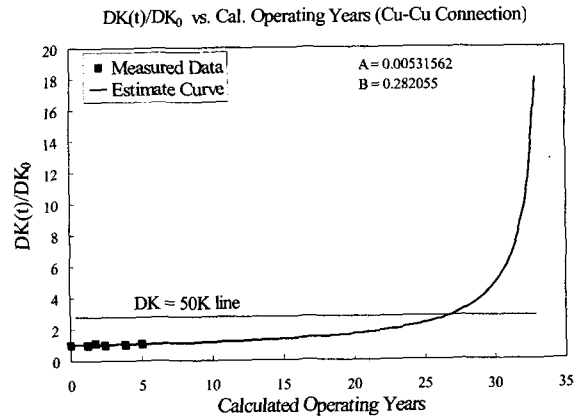


그림 6. 구리-구리 접촉에서 환산 운전시간에 따른 온도 상승 추이
Fig. 6. The trend of temperature rise due to calculated operating years for the Cu-Cu connection

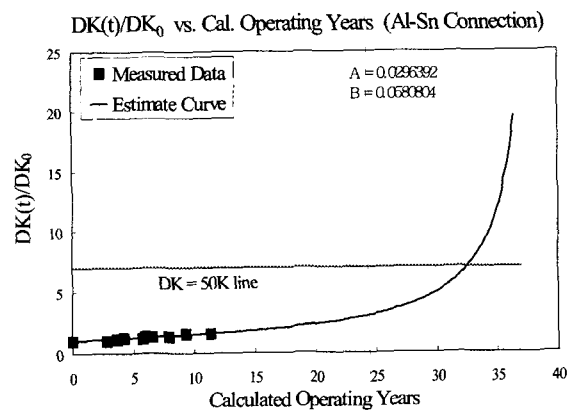


그림 7. 알루미늄-주석도금구리 접촉에서 환산 운전 시간에 따른 온도상승 추이
Fig. 7. The trend of temperature rise due to calculated operating years for the Al-Sn connection

한편, 그림 3 ~ 7에서 알 수 있는 바와 같이, 3.2절에서 언급한 바와 같이 각 시료마다 1년 이상의 열화를 시켜야 하지만 시간 문제상 충분히 열화시키지 못하였기 때문에 도출된 결과는 최종 예상 수명까지 다다르지는 못하였다. 그러나, 그림에 나타난 바처럼 식 (7)에 의해 도출된 추정 수

명곡선이 예상 수명(30년) 정도에 이를 때의 $\Delta K/\Delta K_0$ 값이 5 이상으로 나타나, 접촉저항이 초기 값의 5 ~ 6 배 정도 되면 사고에 이른다는 보고[2]와 어느 정도 일치하고 있으므로, 일단 본 연구에서의 이론 및 실험이 타당성을 갖는다고 할 수 있다. 물론, 본 연구에서 제시하는 '수명 온도상승 모델'의 입증은 위해서는 보다 많은 장기간의 실험을 수행하여야 하지만 이 보다는 현장에서 많은 측정으로 구축한 데이터를 통해 본 모델을 검증하는 것이 효과적이라고 판단된다.

표 3. 각종 접속/접촉에서의 열화계수 A와 B
Table 3. Degradation coefficient A and B in various electric connections/contacts

접속/접촉 종류		A	B	비고 (환산수명)
접촉	구리 -주석도금구리	0.049430	0.025343	31년
	구리-구리	0.000595	0.367708	26년
	주석도금구리 -주석도금구리	0.032746	0.051147	33년
접속	구리-구리	0.005316	0.282055	27년
	알루미늄 -주석도금구리	0.029639	0.058080	33년

5. 결 론

본 연구에서는 현장에서 열상 카메라를 이용하여 도체 접속/접촉부의 열화 추적 및 잔여수명을 도출하기 위해, 이론적으로 "수명 저항모델"[1]을 근거로 "수명 온도상승 모델"을 제시하고 이를 입증하기 위해 여러 종류의 도체 접속/접촉부에 대한 실험을 수행하였다.

본 연구의 이론 도출을 위해서 온도상승 ΔK 와 접촉저항이 선형적으로 비례한다는 것과 접속/접촉부의 온도가 "수명 저항모델"에 나타난 운전시간에 따른 함수적인 관계에 있다는 두 가지 가정을 세웠다. 실험 결과, 실험 값과 이론 값이 잘 일치하여, 본 연구에서 세운 가정이 적절함을 보였다. 따라서, 본 연구에서 제시한 "수명 온도상승 모델"이론을 이용하여, 현장에서 도체 접속/접촉부의 온도 측정을 통해 열화 추적 및 잔여 수명의 도출이 가능하리라 사료된다.

그러나, 본 연구에서는 도체 접속/접촉부의 열화에 상당히 시간이 걸리기 때문에 제시한 이론에 대한 충분한 실험적인 입증은 하지 못하였다. 이러한 부분에 대해서는 향후 장기적인 실험보다는 현장 측정 데이터 구축을 통해 검증하는 것이 효과적이라고 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] M.Sun, M.G.Pecht, M.A.E.Natishan, R.I.Martens, "Lifetime resistance model of bare metal electrical contacts", *IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Part B : Advanced Pakaging*, Vol 22, No. 1, pp.60~67, 1999
- [2] 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
- [3] IEC 60943, *Guidance concerning the permissible temperature rise for parts of electrical [1] IEC 60943, Guidance concerning the permissible temperature rise for parts of electrical equipment in particular for terminals*, 2nd Ed. 1998-01
- [4] IEC 694, *Common specifications for high-voltage switchgear and controlgear standards*, 2nd Ed. 1996-05
- [5] IEC 1545, *Connecting devices - Devices for the connection of aluminium conductors in clamping units of any material and copper conductors in aluminium bodied clamping units*, 1st Ed. 1996-01

저 자 소 개



김 정 태(金正泰)

1960년 1월 1일 생. 1982년 한양대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1992년~95년 대한주택공사 연구소 선임연구원. 1995년~현재 대전대학교 전기공학과 부교수



김 남 준(金南俊)

1964년 12월 19일 생. 1988년 한양대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1992년~현재 대전대학교 전기공학과 조교수