

# 부스바(Busbar)형 전기접점의 단락통전성능 해석기법 개발

論 文
54B-1-5

## Development of the Analysis Technology for Short Circuit Current Capability of Busbar-Type Electrical Contacts

吳年浩<sup>†</sup> · 宋基東<sup>\*</sup> · 金振基<sup>\*\*</sup>  
(Yeon-Ho Oh · Ki-Dong Song · Jin-Ki Kim)

**Abstract** - This study presents an analysis technique that can consider all variables which are needed in the design of short circuit current capability of electrical contacts. Required variables in the design are material of contact, contacting area, applied force, asperity of surface, current and so on. Short circuit current capability test was carried out for the interrelation of design variables and the verification of analysis technique. Temperature rise equation of the contacts was obtained from the test results, and also, a standard that is criterion of the occurrence availability of melting or spot of contact surface from test results was established.

**Key Words** : 접촉저항, 용점, 돌기, 부스바(busbar)형 접점, 정규분포

### 1. 서 론

전력용 개폐장치에 단락전류(short circuit current)가 흐르는 경우, 접점 사이에 존재하는 접촉저항으로 인해 주울열(Joule heating)이 발생하게 된다. 주울 열로 인한 온도상승이 접점의 용융점(melting point)을 초과하게 되면, 개폐기기로서의 기능을 수행할 수 없게 된다. 개폐기능에 큰 영향을 주지는 않지만 접촉면에 미세한 물리적 변형을 일으키는 용점(spot)도 향후 사고 발생의 가능성을 높이게 된다. 따라서 접점 설계 시에는 설계변수에 대한 상관관계를 파악하여 주울 열의 발생을 억제하고 용점과 용융의 가능성을 설계단계에서 최소화해야 한다. 접점의 단락통전 설계변수로서는 크게 접점의 재질, 접촉면적, 접점 사이에 작용하는 힘, 그리고 접점 표면의 거칠기 등이 있다[1-4].

그러나 국내의 경우, 접점 설계변수를 모두 고려할 수 있는 해석기법이나 용점 또는 용융의 발생 여부를 판정할 수 있는 기준이 전무한 실정이다. 기존의 접점 단락통전 설계 시에는 간단한 실험식으로 한 두 가지 변수만을 고려하고, 나머지 변수는 경험으로 추정하는 경우가 대부분이었다. 하지만 최근 전력수요의 증가로 인한 단락용량 증대와 전력수급의 안정을 위한 고용량, 고신뢰성의 개폐기가 요구되고 있으며, 이로 인한 고정도의 접점 설계기법이 필요하게 되었다.

본 연구에서는 이와 같은 필요성에 의해 접점의 단락통전

설계에 필요한 변수를 모두 고려할 수 있는 해석기법을 개발하였다. 먼저 주울 열 발생에 영향을 주는 접촉저항을 계산하였으며, 열량과 접점 온도상승의 관계에 대한 식을 구하였다. 해석기법의 신뢰성과 용점 또는 용융 여부를 판정할 수 있는 기준을 마련하기 위해 단락통전 시험을 수행하였다. 접점의 형태는 일반적으로 개폐기에 많이 사용되는 부스바(busbar)형 접점으로서 접점의 크기와 힘, 그리고 전류크기와 통전시간을 변경하면서 시험을 수행하였다. 본 연구를 통하여 접점의 단락통전 해석기법과 용점 또는 용융 발생 여부를 판정하는 기준을 확립할 수 있었다.

### 2. 접촉저항 계산

#### 2.1 접점 표면의 모델링

두 접점 사이에 접촉저항이 존재하게 되는 이유는 접점 표면에 존재하는 수많은 돌기(asperities)들로 인해서 접점끼리 완벽하게 접촉되지 않기 때문이다[1,4].

이 때 전류를 흘리게 되면 전류는 접점면 전체를 통하여 흐르는 것이 아니고 극히 일부 접촉된 부분으로만 흐른다. 따라서 전류는 국부적으로 집중하게 되고, 과도한 열이 발생하여 접점이 용융될 우려가 있다(그림 1 참조).

두 접점 간에 힘이 작용하게 되면 접점 표면의 돌기들이 변형하게 되고, 실제 접촉면적(effective contacting area)은 증가한다. 힘이 증가할수록 실 접촉면적은 증가하고 접촉저항은 계속 줄어들지만, 일정한 힘에 도달하게 되면 돌기의 변형이 멈추고 접촉저항은 더 이상 줄어들지 않고 포화된다[4].

일정 기준으로 가공된 접점에 있어서, 접점표면에 존재하는 돌기들의 높이와 반지름은 거의 정규분포를 이루고 있다. 돌기의 높이는 수 [ $\mu\text{m}$ ]로서 접점의 가공정도에 따라 달라지며, 반지름은 높이의 3~100배 정도로 알려져 있다[2].

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 韓國電氣研究院 新電力機器그룹 先任研究員  
E-mail : yhoh@keri.re.kr

<sup>\*</sup> 正會員 : 韓國電氣研究院 新電力機器그룹 責任研究員

<sup>\*\*</sup> 正會員 : 진광이앤씨 부설연구소 연구실장

接受日字 : 2004年 10月 26日

最終完了 : 2004年 11月 24日

접점 표면의 모델링을 위하여 그림 2와 같이 편평한 표면에 원형의 돌기를 생성하였다[2,3]. 여기서  $z$ 는 돌기의 높이로서 그 분포는 평균값  $\mu_{a1}$ 과 표준편차  $\sigma_{a1}$ 을 갖는 정규분포 함수  $\phi_{a1}(z)$ 와 거의 동일하다.

$$\phi_{a1}(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{a1}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-\mu_{a1}}{\sigma_{a1}}\right)^2\right] \quad (1)$$

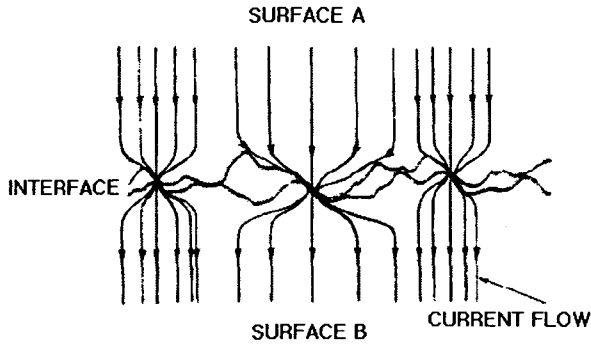


그림 1 전기접점의 접촉면  
Fig. 1 Schematic diagram of a bulk electrical interface

돌기의 반경  $r_i$  또한 평균값과 표준편차를 갖는 정규분포를 이룬다. 여기서 돌기 중심의  $x, y$  좌표는 균일하다고 가정하였다.

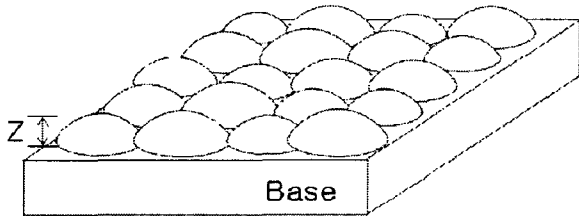


그림 2 접점 표면의 모델링  
Fig. 2 Modeling of Contact Surface

본 연구에서는 표면의 각 돌기는 순수한 탄성변형(elastic deformation)을 한다고 가정하였다. 표면에서 마찰이 없는 완전탄성체인 두 반구가 접촉할 때, 외부에서 가해주는 힘 ( $P$ )과 이때 발생하는 접촉면의 반경( $a$ )과의 관계식으로서 Hertz 방정식이 널리 알려져 있다[2,3,4].

$$a = \left[ \frac{3}{4} P \left( \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

$$\delta = a^2 \left[ \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right] \quad (3)$$

- $a$  : 접촉면의 반경,  $P$  : 하중
- $\delta$  : 수직변위,  $R$  : 구의 반경,
- $E$  : 탄성계수(elastic modulus)
- $\mu$  : 포와송 비(Poisson's ratio)

변위  $\delta$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\delta = \begin{cases} R_1+R_2-S & \text{if } S < R_1+R_2 \\ 0 & \text{if } S > R_1+R_2 \end{cases} \quad (4)$$

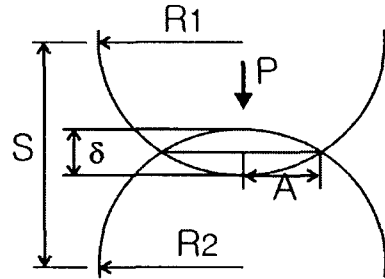


그림 3 두 반구 간에 발생하는 변형  
Fig. 3 Elastic contact of two spheres

본 연구에서는 접점의 한 쪽 면은 불균일한 돌기들이 존재하며, 다른 한 쪽 면은 완전히 편평한 것으로 설정하였다. 이 경우 식 (2)와 식 (3)에서  $R_2 = \infty$  이며,  $P$ 는 접점에 수직으로 작용한다. 또한  $R_1=R_i, \mu_1=\mu_2=\mu, E_1=E_2=E_i$ , 그리고  $P=P_i$  이므로 돌기  $i$ 에 대한 탄성변형을 계산할 수 있다[2].

그림 1에서 전류가 흐르는 접촉점을 a-spot 이라 하고, 단순화를 위해 원형이라 가정한다. 하나의 a-spot 은 반경  $a$ 와 접점의 전기 저항률에 따른 집중 저항값  $R_{1C}$ 를 가지며, Holm의 ellipsoid model 에 의해 다음과 같이 계산된다[1].

$$R_{1C} = \frac{\rho}{2a} \quad (5)$$

접점의 접촉저항은 전체 a-spot 의 저항값과 산화막에 따른 저항의 합이다. 본 연구에서는 산화막에 따른 저항은 고려하지 않았으며, 집중저항에 따른 저항값만 계산하였다. 또한 계산의 간략화를 위하여 온도상승에 따른 전기저항률의 비선형은 고려하지 않았다. 그림 1에서  $n$  개의 병렬 연결되어 있는 a-spot 이 존재하고,  $i$  번째와  $j$  번째 a-spot의 거리가  $S_{ij}$  인 경우 전체 저항  $R_C$ 는 다음과 같다.

$$R_C = \frac{\rho}{2 \sum_{i=1}^n a_i} + \frac{\rho}{\pi n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n \frac{1}{S_{ij}} \quad (6)$$

- $\rho$  : 접점의 전기저항률,  $n$  : 접촉점의 수,
- $S_{ij}$  :  $i$ 번째와  $j$ 번째 a-spot의 거리

### 2.2 접촉저항의 계산 및 검증

계산방법을 검증하기 위해 실제 접점에 적용한 후 접촉저항을 측정하였다. 먼저 접점 표면의 돌기 높이와 반지름을 결정하기 위해 alpha-step scanner로 표면의 돌기를 측정하였다.

그림 4는 alpha-step 스캐너로 접점 표면을 측정된 결과를 보여주고 있다. X-축 방향으로는 1[μm] 단위로 측정하였으며, 전체 길이는 1500[μm]이다. 그림 4의 Y-축은 돌기의 높이 중 가장 낮은 값을 1로 하였을 때 백분율로 나타낸 것이며, 정규분포(normal distribution)에 근접함을 보여주고 있다. 측정결과로부터 평균값(μ<sub>ai</sub>) 3.5[p.u.]와 표준편차(σ<sub>ai</sub>) 0.1 [p.u.]을 구하여 식 (1)의 정규분포 함수에 따른 돌기를 생성하였다.

접점의 물질 특성을 표 1에 나타내었다. 접촉면적은 1.66×10<sup>3</sup>[m<sup>2</sup>]이며, 접점에 작용하는 힘은 각각 60, 200, 300 [kg·f]이다.

표 1 접점의 물질특성

Table 1 Material properties for contact(Cu)

Contacting area	1.66×10 <sup>3</sup> [m <sup>2</sup> ]
Young's modulus of elasticity	1.15×10 <sup>11</sup> [pa]
Possion's ratio	0.35
Electrical resistivity	1.7×10 <sup>8</sup> [Ωm]

식 (2)의 Hertz 방정식에 따른 돌기의 변형을 계산한 후 식 (6)의 접촉저항 계산을 수행하였다.

계산결과를 검증하기 위하여 국제 규격인 IEC(International Electrotechnical Commission) 694 에 따른 접촉저항 시험을 수행하였다. 그림 5에 접촉저항 측정을 위한 시스템을 나타내었다. 시험은 실온에서 수행되었다. 전류는 100 [A]이며, 정전압을 접점에 인가한 후 전압강하법에 의해 저항을 계산하였다. 접점에 가해지는 힘은 스프링의 길이를 조정하여 변경하였으며, 로드셀(load cell)로 힘의 크기를 측정하였다.

접촉저항 측정 및 시험결과를 그림 6에 나타내었다. 힘이 200 [kg·f]을 초과하는 경우, 실험치는 더 이상 접촉저항이 줄어들지 않고 있지만 계산치는 여전히 줄어들고 있다. 이러한 차이는 리드(lead)선의 접촉, 실제 접점 표면의 가공도 차이 등에 기인한 것으로 판단된다. 그러나 전체적으로 힘과 접촉면에 따른 접촉저항의 변화는 합리적인 결과를 나타내고 있어, 향후 측정방법의 개선으로 더욱 더 정확한 비교가 가능할 것이다.

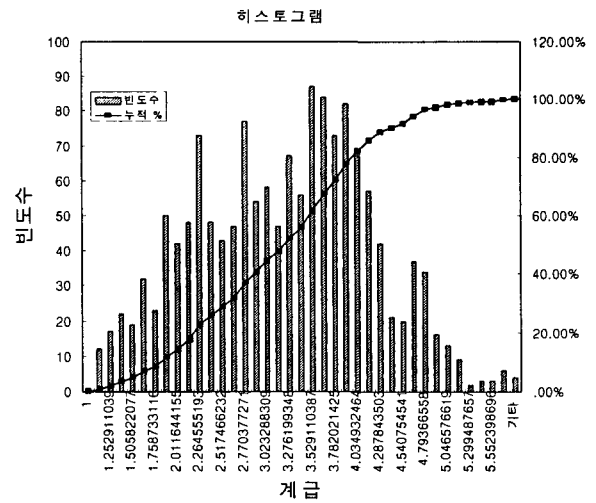
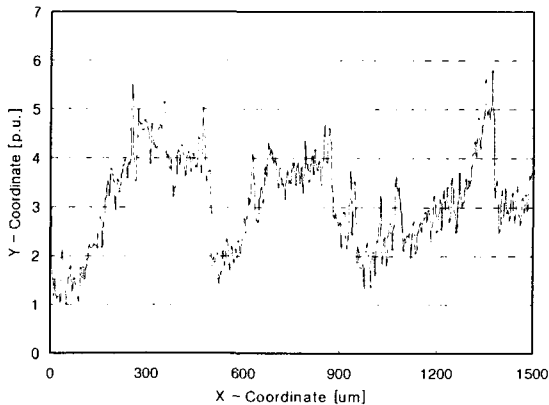


그림 4 측정된 접점의 표면  
Fig. 4 Measured surface profile

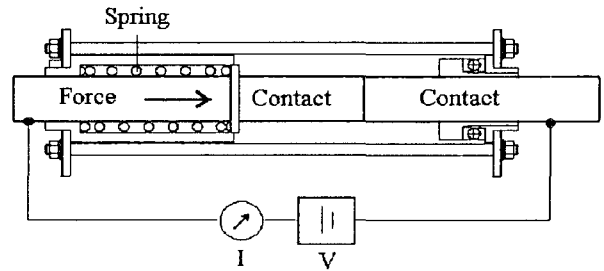


그림 5 접촉저항 측정장치  
Fig. 5 Contact resistance measurement equipment

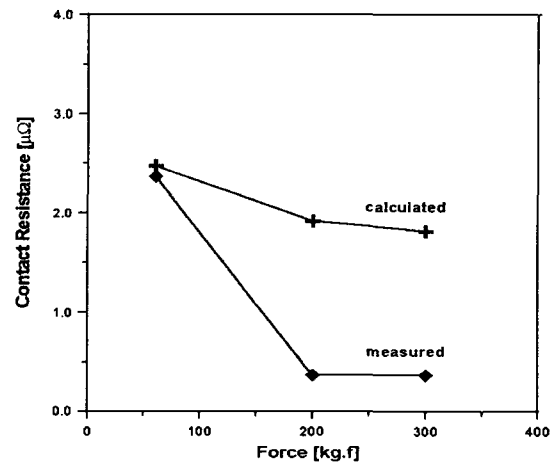


그림 6 측정 및 계산결과 비교  
Fig. 6 Comparison of the measured and calculated contact resistance

### 3. 부스바형 접점의 단락통전 성능 예측

부스바형 접점에 대해 전류크기, 통전시간, 힘, 접점 크기 등에 따라 단락통전 시험을 수행하였다. 단락통전 시험 중에 접점의 접촉부의 온도를 측정하였으며, 앞서 언급한 접촉

저항 계산법을 적용, 열량과 접점 온도상승의 관계식을 구하고, 용융 및 용접의 발생 여부를 판정할 수 있는 기준을 마련하고자 하였다.

3.1 접점 시편 및 측정 센서

그림 7은 제작된 부스바형 접점을 나타내고 있으며, 스프링이 작용하여 접점을 압착하고 있다. 각 접점의 명칭은 A1~A9로 주어졌고, A1, A2, A3는 동일한 크기에 작용하는 힘이 다르며, 40[kA] 단락전류용으로 설계되었다. 마찬가지로 A4, A5, A6는 25[kA], A7, A8, A9는 12.5[kA]용으로 설계되었으며 동일 크기에 작용하는 힘이 다르다. 그림 8에 시험 중인 접점 시편을 나타내었으며, 접점의 재질은 구리(Cu)이다.

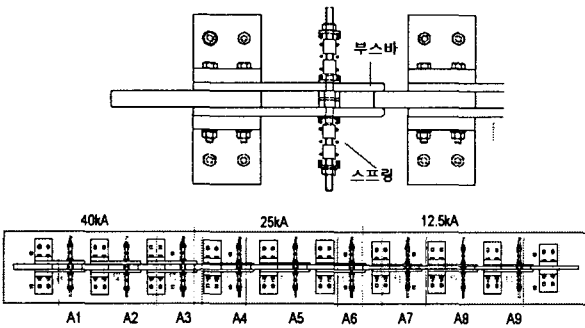


그림 7 제작된 부스바형 접점  
Fig. 7 Manufactured busbar contacts for test

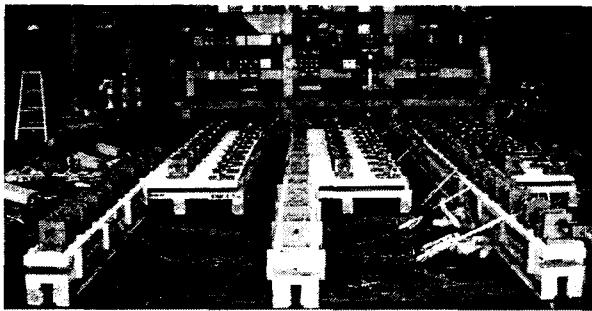


그림 8 단락전류 통전능력 시험  
Fig. 8 Test of short circuit current carrying capability

표 2는 각 부스바형 접점의 크기, 힘, 그리고 접촉면적과 접촉저항(계산값)을 나타내고 있다. 부스바형 접점에 작용하는 힘은 20, 30, 45 [kg · f]이다. 전류크기는 12.5, 25, 40[kA]이며, 통전시간은 1초에서 4초까지 변경하면서 온도 상승치를 측정하였으며, 시험을 수행한 후 표면의 용접 또는 용융 여부를 확인하였다. 시험결과로부터 각 설계변수의 상관관계에 대한 실험식을 구하였으며, 이를 통해 온도상승 계산식을 정립할 수 있었다.

본 시험에서는 취급이 용이하고 경제적인 열전대 센서를 설치하여 온도를 측정하였다. 열전대를 사용할 경우 문제점은 권선도체에 직접 접촉될 경우 큰 전압이 유기되므로, 측정설비에 전기적 절연상의 문제점을 일으킬 우려가 있다는

것이다. 따라서 열전대 양단을 열전도성이 양호하고 절연특성이 좋은 두께 50μm 인 Kepton 절연필름으로 감쌌다. 측정된 신호는 HP 34970A를 통하여 컴퓨터로 저장된다.

표 2 부스바형 접점의 사양

Table 2 Specification of the busbar contact

시료 No.	스프링 힘 [kg · f]	접촉면의 치수[mm] (폭×깊이)	접촉저항[μΩ] (계산값)
A1	45	100×15	2.6
A2	30	100×15	2.8
A3	20	100×15	3.16
A4	45	80×15	2.74
A5	30	80×15	2.99
A6	20	80×15	3.26
A7	45	65×15	2.84
A8	30	65×15	3.14
A9	20	65×15	3.46

3.2 측정 및 결과 검토

그림 9는 시험 후 접점 표면의 용접 및 용융 상태를 나타내고 있다. 접점의 설계변수에 따른 온도상승을 파악하기 위해서는 무엇보다 설계변수를 모두 표현할 수 있는 관계식을 세우는 것이 중요하다. 본 연구에서는 이를 위해 열량에 따른 온도상승 관계를 이용하였다.

열량은 전류의 크기와 통전시간, 그리고 접촉저항으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = I_s^2 R_c \Delta t \tag{7}$$

접촉저항은 접점의 재질, 힘, 그리고 접촉면적에 의한 변수로서, 본 연구에서 고려할 수 있는 설계변수를 모두 포함하게 된다.

그림 10~그림 12는 A1~A3, A4~A6, A7~A9 접점의 열량 대비 온도 상승 측정치와 용접 및 용융이 발생했을 때의 측정치를 나타내었다. 전체 시편에서 가장 높은 온도 측정치를 1로 하였을 때의 백분률[p.u.]로 나타내었다. 그림 10~그림 12에 열량 대비 온도 상승에 대한 관계를 열량의 누승으로 나타내었으며 식은 다음과 같다.

$$\Delta T = aQ^b \tag{8}$$

여기서 a, b : 실험계수,  
열량  $Q = I_s^2 R_c \Delta t$  이다.

식 (8)은 힘, 접촉면적, 재질, 표면의 거칠기, 전류 크기와 통전시간을 고려하여 접점의 온도상승을 구할 수 있는 관계식이다.

그림 10과 그림 11에서 열량이 "A" 일 때, 접점 크기 A

1~A3 에서는 온도 상승치가 약 0.2[p.u.] 이지만, A4~A6 약 0.35[p.u.]으로서 동일 열량에 대해 온도 상승치는 접점의 크기 별로 다르게 나타난다. 이는 단락전류 통전 시 외부의 공기로 열이 방사되는 효과가 접점 크기에 따라 다르기 때문인 것으로 판단되며, 식 (8)을 접점 크기를 고려하여 다음과 같이 수정하였다.

$$\Delta T = aQ^b (c \ln A + d) \quad (9)$$

여기서 a, b, c, d : 실험계수,  
A : 외관상 접촉면적[mm] 이다.

용점과 용융의 발생 여부는 온도 상승치를 기준으로 하였다. 열량을 기준으로 할 경우에는 식 (7)과 같이 설계변수에 따른 기준을 확립할 수 있지만 접점의 크기에 따라 기준값이 달라진다. 즉 그림 10과 그림 11에서 열량이 "A" 일 때, 접점 크기 A1~A3 에서는 용점 발생의 경계선상에 있지만, A4~A6 에서는 용융이 발생하였다. 따라서 접점의 온도 상승치를 용점과 용융 발생 여부를 판정하는 기준으로 삼았다.

그림 10에서 온도상승 약 0.2 [p.u.] 까지 용점이 불규칙적으로 발생하고 있다. 이는 시편의 조립 과정 중, 접점 표면에 균일하게 힘이 가해지지 않아 국부적인 온도상승이 발생하여 용점이 생긴 것으로 판단된다. 그림 11에서 온도 상승치 0.23 [p.u.] 이후로는 거의 모든 시편에서 용점이 발생하고 있으며, 용융은 약 0.32 [p.u.] 이후부터 발생하고 있다. 그러므로 용점 및 용융의 발생 기준은 온도 상승치 0.23 [p.u.], 0.32 [p.u.] 로 한다.

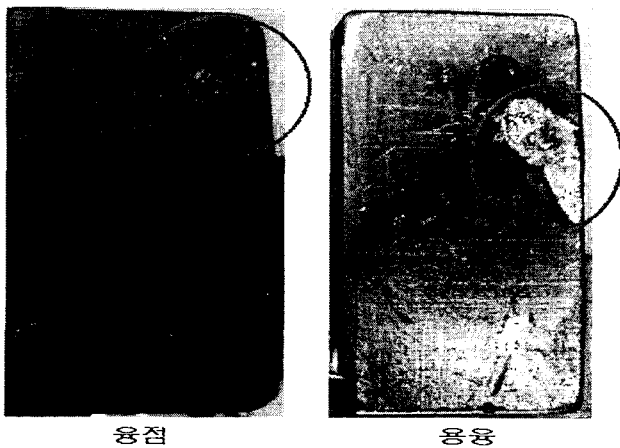


그림 9 접점 표면의 용점 및 용융 여부  
Fig. 9 Spot and Melting on the surface of contact

식 (9)를 이용하여 힘이 20, 30, 45[kg·f]일 때의 온도상승을 계산하였으며, 그림 13에 측정치와 비교하여 나타내었다. 여기서 최고 온도상승이 40[kA] 2[s]일 때 0.19 [p.u.]로서, 용점의 발생 기준인 0.23 [p.u.]이하를 만족하므로 설계상 용점의 발생 가능성은 없음을 알 수 있다.

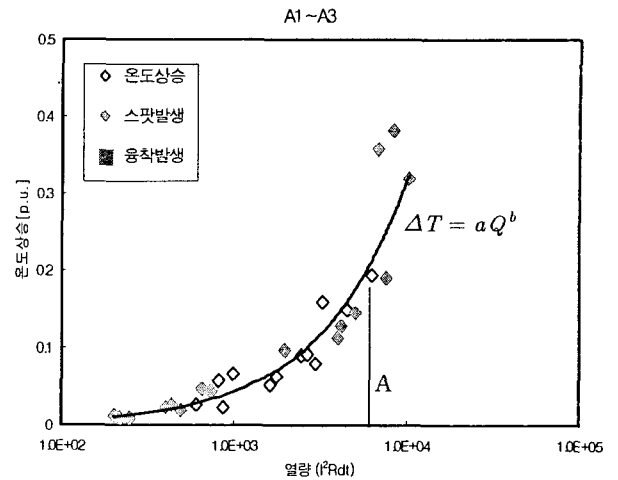


그림 10 A1, A2, A3 접점의 열량 대비 온도 상승값  
Fig. 10 Temperature rise for A1 ~ A3

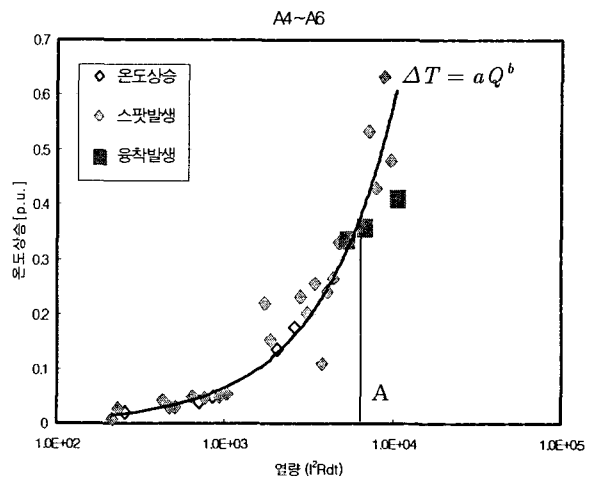


그림 11 A4, A5, A6 접점의 열량 대비 온도 상승값  
Fig. 11 Temperature rise for A4 ~ A6

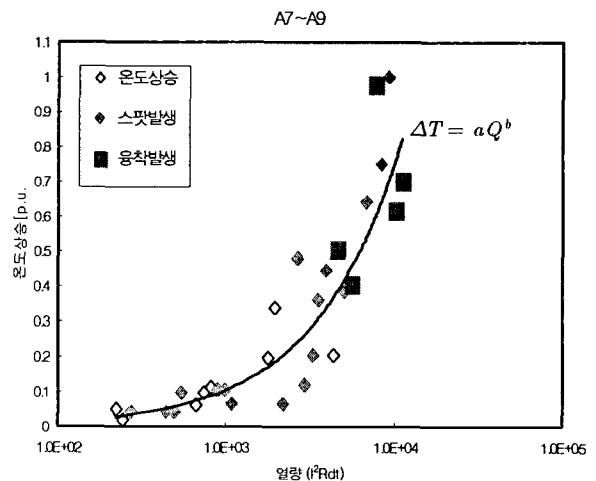


그림 12 A7, A8, A9 접점의 열량 대비 온도 상승값  
Fig. 12 Temperature rise for A7~A9

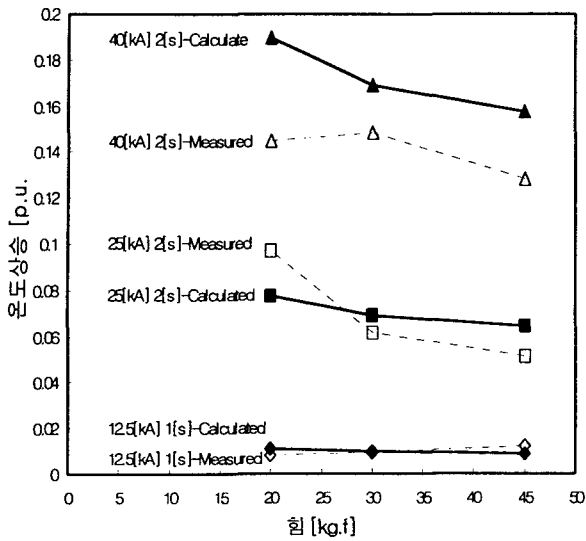


그림 13 힘에 따른 온도상승(시편 A1, A2, A3)  
 Fig. 13 Temperature rise for A1~A3 in accordance with force

4. 결 론

본 연구에서는 부스바형 접점의 단락통전 설계 시, 필요한 모든 변수를 고려할 수 있는 온도상승 계산식과 용점 또는 용융 판정 기준을 확립하고자 하였다. 이를 위해 주어진 설계변수에서 실제 표면의 거칠기를 모델링하고, 힘에 따른 변형을 고려하여 접촉저항을 계산하였다. 또한 각 설계변수의 변경에 따른 온도상승 시험을 수행하였으며, 이를 통해 온도상승 계산식을 구할 수 있었다. 접점의 용점 또는 용융 판정은 단락통전 시 발생하는 온도 상승치를 기준으로 하였으며, 시험결과를 통하여 용점은 0.23 [p.u.], 용융은 0.32 [p.u.] 로 하였다.

본 연구를 통하여 접점의 단락통전 설계에 필요한 변수를 모두 고려할 수 있게 되었으며, 향후 전력기에 요구되는 단락용량 증가와 고신뢰성에 유연하게 대처할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2004년도 부품소재기술개발사업인 전력용 스위칭 조작기 및 단로기(DS/ES) 개발 과제 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] Ragnar Holm, Electrical Contacts : Theory and Applications 4th Ed., Berlin, Springer Verlag, pp. 1-26, 1979/  
 [2] R. W. Caven, Jr. and J. Jalali, Predicting the contact resistance distribution of electrical contacts by modeling the contact interface, Proc. of the Thirty-seventh IEEE Holm Conf. Electrical Contacts, pp. 83-89, 1991.

[3] Stephan Schoft, Josef Kindersberger and Helmut Lobl, Joint Resistance of Busbar-Joints with Randomly Rough Surfaces, Proc. of the 21th Conf. on electrical Contacts, pp230-237, 2002.  
 [4] Paul G. Slade, Electrical Contacts : Principles and Applications, Marcel Dekker, Inc., pp. 1-83.  
 [5] J. A. Greenwood, Constriction resistance and the real area of contact, Brit. J. Appl. Phys., Vol.17, pp. 1621-1632, 1966.  
 [6] J. A. Greenwood, A unified theory of surface roughness, Proc. R. Soc. Lond. A 393, pp. 133-157, 1984.  
 [7] Peter Wriggers, Computational Contact Mechanics, Wiley, pp. 55-71, 2002.  
 [8] J. A. Greenwood, the area of contact between rough surfaces and flats, Journal of Lubrication Technology, pp. 81-91, 1967.

저 자 소 개



오연호(吳年浩)

1991년 동아대 공대전기공학과 졸업(학사). 1993년 동아대 전기공학과 대학원 졸업(석사). 현재 한국전기연구원 전력연구단 신전력기기연구그룹 선임연구원  
 Tel : 055-280-1566  
 Fax : 055-280-1589  
 E-mail : yhoh@keri.re.kr



송기동(宋基東)

1988년 인하대 공대전기공학과 졸업(학사). 1990년 인하대 전기공학과 대학원 졸업(석사). 2003년 부산대 전기공학과 대학원 졸업(박사). 현재 한국전기연구원 전력연구단 신전력기기연구그룹 선임연구원  
 Tel : 055-280-1563,  
 Fax : 055-280-1589,  
 E-mail: kdsong@keri.re.kr



김진기(金振基)

1965년생. 1991년 한양대 공대전기공학과 졸업(학사). 2004년 현재 진광이앤씨 부설연구소 연구실장  
 Tel : 031-333-3444,  
 Fax : 031-332-5300  
 E-mail : research2@jinkwang.co.kr