

# 초고압 단로기 접점의 단락전류 통전성능 평가기술 개발

論 文

57-1-8

## Development of Evaluating Technology for the Capability of Carrying Short-Circuit Current at Electrical Contacts in EHV Disconnecting Switches

吳年浩<sup>†</sup> · 宋基東<sup>\*</sup> · 鄭鎮教<sup>\*</sup>  
(Yeon-Ho Oh · Ki-Dong Song · Jin-Kyo Chong)

**Abstract** - Extra-high voltage(EHV) disconnecting switch(DS) consists of the electrical contacts and mechanical parts which actuate the contacts. When the short-circuit condition occurs, a large amount of current flows through the electrical contact in disconnecting switches and this causes considerable temperature rise due to Joule heating. If the temperature rise is higher than the melting point of contact material, the DS contact becomes melting and cannot be usable anymore. For this reason, the analysis for capability of carrying short-circuit current in DS contacts must be performed at a design stage. Here, we proposed a numerical technique for evaluating the capability of carrying short-circuit current at electrical contacts in EHV DS. In this numerical approach, the mechanical and thermal analyses were simulated to check the capability of carrying short-circuit current. First, the applied pressure at contact parts was analyzed considering the mechanical properties, and then contact resistance was calculated by an empirical equation. Finally, thermal analysis was performed with resistance variation at electrical contacts. To verify these numerical results, the distributions of temperature in DS were experimentally measured and compared with each other. The results from experiments were agreed well with those from the proposed numerical simulations.

**Key Words** : Disconnecting switch(DS), electrical contacts, contact resistance, short circuit current, thermal analysis, melting

### 1. 서 론

전력계통의 사고로 인해 단로기에 단락전류가 흐르는 경우 단로기는 전기접점 간에 용착이 발생하지 않아야 하며, 기본 역할인 개폐동작을 충실히 수행해야 한다. 최근 전력 수요의 증가에 따라 단로기의 사용 또한 급증하고 있으며, 여기에 사용되는 전기접점의 안정적인 단락전류 통전 성능 또한 그 중요성을 더해가고 있다.

그러나 안정적인 단락전류 통전 성능 확보를 위한 설계기술은 매우 미흡한 편이다. 국내의 경우 전기접점 제작업체는 대부분 중소기업으로서 기본설계 기술조차 확보하지 못하고 있는 실정이다. 국내 대기업의 경우에도 간단한 실험식에 의존하여 접점을 설계하고 있는 실정이다.

이처럼 전기접점의 단락전류 통전 설계 기술이 미흡한 이유는 접점의 구조와 재질, 접점 간 접촉저항, 대류를 고려한 열전달이 모두 고려되어야 하는 복잡함 때문이다[1,2]. 전기접점에 단락전류가 흐르는 경우 접점 간에 존재하는 접촉저항으로 인해 주열 열이 발생하며, 이 열로 인해 접점 간에 용착이 발생할 수 있다[3]. 따라서 먼저 접점 간에 존재하는 접촉저항을 구한 후, 접점 전체의 열전달을 해석하여 접점의 용착 여부를 판단해야 한다. 단락전류 통전 후 접점 간 용

착이 발생하지 않고 기본적인 개폐기능을 수행할 수 있다면 그 접점은 단락전류 통전 성능을 확보하고 있는 것이다.

본 연구에서는 전기접점의 단락전류 통전 성능 평가 기술을 개발하기 위해 다음과 같이 연구를 진행하였다.

먼저 해석 및 검증 시험을 위한 단로기를 설계·제작하였다. 그리고 전기접점의 접촉저항에 의한 주열열을 계산한 후, 전기 접점에 단락전류가 흘렀을 때 발생하는 물리적 현상을 해석하였다. 해석결과를 바탕으로 단로기 접점의 용착 여부를 확인하여 단락전류 통전 성능을 판단하였다.

또한 연구결과와 신뢰성을 검증하기 위해 단락전류 통전 시험을 수행하여 접점의 온도 상승을 측정하였다. 그 결과 해석 및 시험에 의한 온도 상승 값이 잘 일치하였으며, 단락전류 통전 성능을 파악하기 위한 접점의 용착 여부도 서로 일치함을 확인하였다.

### 2. 해석 및 시험용 단로기

전력용 개폐기의 일종인 단로기는 크게 개폐부와 조작기의 두 가지 주요 구성성분으로 이루어진다. 이 중 접점은 개폐부의 필수 요소로서 대개 부스바(busbar) 형태의 고정접점과 가동접점으로 이뤄지며, 가동접점에는 조작기와의 연결을 위해 링크(link)가 설치되어 있다(그림 1(a) 참조). 접점은 전류 통전 시, 허용된 온도 이상의 열량을 발생시키지 말아야 하며, 빈번한 개폐동작에도 이상 없이 작동하여야 한다.

본 연구에서는 해석 및 시험용 모델로서 부스바형 접점을 사용하는 3상 단로기를 제작하였다. 표 1에 본 연구에 사용

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 韓國電氣研究院 先任研究員

E-mail : yhoh@keri.re.kr

<sup>\*</sup> 正會員 : 韓國電氣研究院 電力研究團 先任研究員

接受日字 : 2007年 11月 1日

最終完了 : 2007年 11月 27日

된 단로기의 정격 사양을 나타내었다. 그림 1은 단로기의 구조를 나타내고 있으며, 한 쪽의 접점은 고정되어 있고 다른 쪽의 접점이 가동하며 개폐기능을 수행한다. 가동접점 간에는 접점에 힘을 가하여 접촉저항을 최소화하기 위한 스프링이 설치되어 있다.

그림 1(b)에서 가동접점의 끝은 네 갈래로 나뉘어져 있는데 이를 블레이드(Blade)라고 하며 실제 고정접점과의 접촉은 이 부분을 통해 이뤄진다. 블레이드의 역할은 단락전류 통전 시 도체 사이의 열을 발산하는 통로 역할을 하며, 발산 면적을 늘려 주는 효과가 있다. 접점의 재질은 Touch pitch copper로서 동 함유율이 99.9%이상, 전기저항률이 0.017241 [ $\Omega \cdot \text{mm}/\text{m}$ ]이며, 전기 및 열전도성이 우수하여 전력기기에 주로 사용된다[4].

표 1 단로기의 정격 사양

Table 1 Specification of the DS

정격전압/전류	25.8 [kV] / 2000 [A]
단시간 전류	25 [kArms/3초]
정격주파수	60 [Hz]

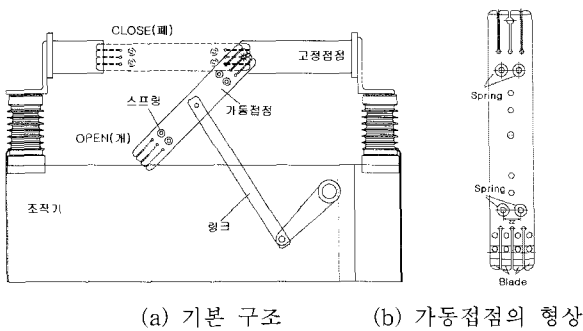


그림 1 부스바형 단로기의 기본 구조 및 동작  
Fig. 1 The mechanism of the busbar type DS

### 3. 열전달 해석

단락전류 통전 시 접점에서 발생하는 열량을 구하기 위해서는 열원의 직접적인 원인이 되는 저항값을 계산해야 한다. 특히 접점 간에 존재하는 접촉저항을 구하기 위해서는 접촉저항에 가장 큰 영향을 미치는 힘을 구해야 한다[2,9]. 단로기 접점 간에 작용하는 힘은 크게 전자력과 접점에 직접적으로 작용하는 스프링의 힘, 두 가지가 존재한다. 전자력은 접점의 형상 등에 따라 전자반발력과 전자흡인력이 존재하게 되며, 스프링의 힘은 접점 구조와 형상, 그리고 스프링의 위치 및 개수 등에 따라 접촉면에 작용하는 힘이 틀려지게 된다.

본 연구에서는 전자력 계산을 위해 상용 프로그램을 이용하여 3차원 전자계 해석을 수행하였으며, 스프링이 접촉면에 작용하는 힘을 구하기 위해 응력 해석을 수행하였다. 접촉면에 작용하는 힘을 구한 후 힘에 따른 접촉저항을 계산한다. 계산된 접촉저항으로부터 주열열을 구한 후 이를 열전달 해석의 열원으로 입력한 후 해석을 수행한다[9]. 이 때 온도에 따른 저항의 변화를 고려하여 열전달 해석을 수행한다. 그림 2에 해석 순서를 나타내었다.

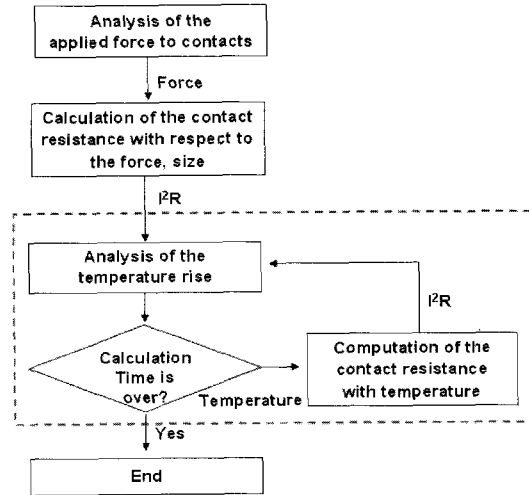


그림 2 단로기의 단락전류 통전 성능 해석순서  
Fig. 2 The flowchart for analysis of DS

### 3.1 단로기 접점에 가해지는 힘

#### 3.1.1 전자력 해석

그림 3은 전자력 해석을 위한 단로기 접점부의 상세도를 나타내고 있다. 전류 방향은 가동접점(blade)에서 고정접점으로 흐르며, 전류크기는 단락전류로서 25kArms이다. 그림 3에서 알 수 있듯이 접점간의 접촉부위에서 전류방향이 달라지며 이로 인한 전자력이 접점간의 접촉을 방해할 수 있다. 해석에 사용된 프로그램은 상용프로그램인 Maxwell 3D이며, 3차원 해석을 수행하였다.

해석결과 각 블레이드 접점과 고정접점 간에는 전자 반발력보다는 전자흡인력이 보다 더 크게 작용하였다. 그러나 스프링이 접점 간에 작용하는 힘에 비해 전자흡인력의 크기는 1.3~2.2[N]으로서 그 영향은 매우 미미하다. 따라서 본 연구에서 전자흡인력의 영향은 무시하였다.

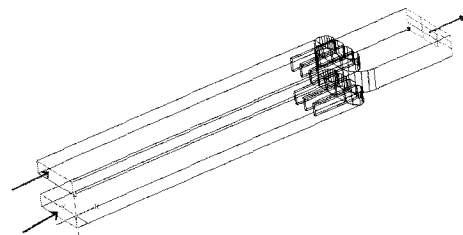


그림 3 전자력 해석을 위한 접점 모델  
Fig. 3 Model of contacts for electromagnetic analysis

#### 3.1.2 응력 해석

접점 접촉부에서 전류 통전으로 인한 영향을 파악하기 위해 전자력 해석을 수행하였다면, 스프링과 접점 구조에 의한 영향을 파악하기 위해서는 응력 해석이 필요하다. 응력 해석을 통하여 접점의 접촉부에 얼마의 힘이 가해지는지를 파악할 수 있다[2].

그림 4는 응력 해석을 위한 접점 모델의 형상을 나타내고 있다. 스프링의 위치와 힘에 따라 접촉부에 가해지는 힘이 달라지므로 정확하게 모델링을 해야 하며, 접촉부위의 블레이드 형상도 정확한 모델링이 필요하다.

(1) 스프링이 가하는 압력

응력 해석을 위해 상용 프로그램인 Comsol 3.2를 이용하였다. 힘의 입력 단위가 압력이므로 스프링의 힘을 압력으로 환산하여야 한다. 본 모델에 사용된 스프링의 힘은 255[N]이다. 스프링이 작용하는 면적은 그림 4에서 스프링 부분에 어둡게 표시된 영역으로서  $176 \times 10^{-6} [m^2]$ 이다. 따라서 스프링이 직접적으로 접촉에 가하는 압력은 다음과 같다.

$$\text{스프링 압력} : 255 / 176 \times 10^{-6} = 1,449,440 [N/m^2]$$

(2) 구속조건

구속조건 (Constraints)은 그림 4와 같이 입력하였다. 즉 고정점점은 x, y, z 세 방향으로 구속되어 있으며, 이는 고정되어 움직이지 않는다는 것을 의미한다. 고정점점의 좌측면은 z 축 방향으로 구속되어 있다.

(3) 해석 결과

그림 5는 응력해석 결과로서 변위의 크기와 방향을 화살표(Arrow)로 나타낸 경우를 나타내고 있다. 그림 5에서 고정점점의 중앙 부분이 z축 아래 방향으로 가장 큰 힘을 받고 있음을 알 수 있다. 각 블레이드에 가해지는 힘의 크기는 다음과 같다(그림 5 참조).

- Blade 1 : -671.557 [N], · Blade 2 : -717.063 [N]
- Blade 3 : -723.704 [N], · Blade 4 : -667.147 [N] (1)

3.2 접촉저항 계산

접촉저항은 두 전기접점 사이에 존재한다. 두 접점 사이에 접촉저항이 존재하게 되는 이유는 접점 표면에 존재하는 수많은 돌기(asperities)들로 인해서 접점이 서로 완벽하게 접촉되지 않기 때문이다. 이 때 전류를 흘리게 되면 전류는 접촉면 전면을 통하여 흐르는 것이 아니고 극히 일부의 전기적으로 접촉된 부분만을 흐른다. 따라서 전류는 국부적으로 집중하게 되고, 과도한 열이 발생하여 접점이 용융될 우려가 있다[3,5].

두 접점 간에 힘이 작용하게 되면 접점 표면의 돌기들이 변형하게 되고, 실제 접촉면적(effective contacting area)은 증가한다. 힘이 증가할수록 실제 접촉면적은 증가하고 접촉저항은 계속 줄어들지만, 일정한 힘에 도달하게 되면 돌기의 변형이 멈추고 접촉저항은 더 이상 줄어들지 않고 포화된다[6,7].

본 연구에서는 힘에 따른 접촉저항의 변화를 파악하기 위해 시험을 수행하였으며, 간편하게 접촉저항을 구할 수 있는 실험식을 개발하였다[8].

시험방법은 전기접점에 20[A]의 전류를 흘리고 정전압을 접점에 인가한 후 전압강하법에 의해 저항을 계산하였다. 접점에 가해지는 힘은 압축기를 이용하였으며, 압축기에서 가해지는 힘을 변경하면서 저항을 측정하였다. 그림 6은 측정 시스템 및 시험 전경을 나타내고 있다. 접점 시험의 재질은 단로기의 접점과 동일한 Touch pitch copper 이다. 시험에 가해지는 힘은 500 ~ 10,000[N]이다.

시험에 적용된 시험결과를 해석에 이용하기 위해서는 단위면적 당 힘에 대한 접촉 저항 변화식이 필요하다. 그림 7은 전체 시험에 가해지는 힘을 압력으로 환산하였을 때 접

촉저항의 변화를 나타낸 것이다[8]. 시험결과로부터 다음과 같은 압력 대비 접촉저항 실험식을 구할 수 있다.

$$y = 5.9915 \times P^{-0.7425} \quad (2)$$

여기서, y = 접촉저항[ $10^{-3} \Omega \cdot mm^2$ ], P = 압력[N/mm<sup>2</sup>] 이다.

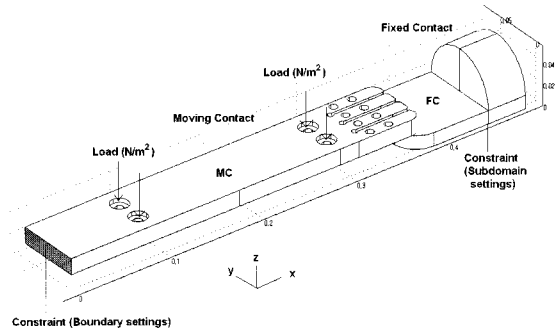


그림 4 해석모델의 구속조건  
Fig. 4 Constraint condition

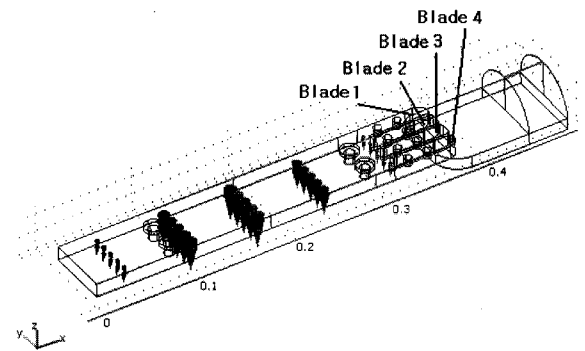
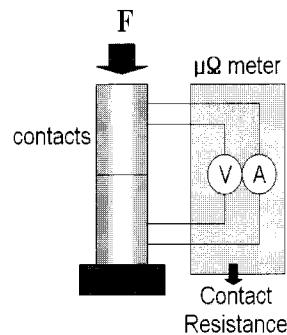
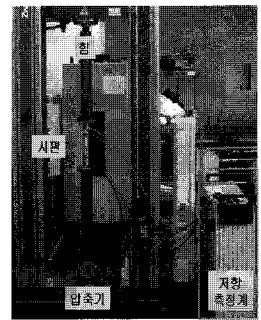


그림 5 응력해석 결과  
Fig. 5 The results of the stress analysis



(a) 측정 시스템



(b) 접촉저항 측정 전경

그림 6 접촉저항 측정 시스템 및 시험 전경  
Fig. 6 Measurement system of the contact resistance

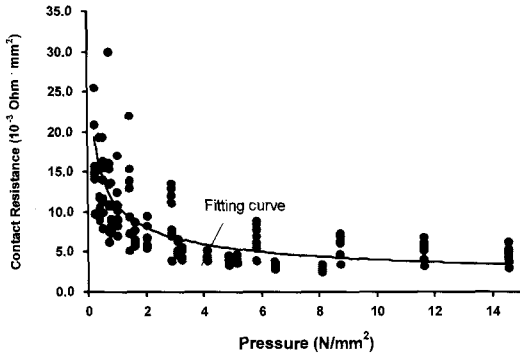


그림 7 압력대비 접촉저항의 변화  
Fig. 7 Variation of contact resistance with pressure

### 3.3 접점의 열전달 해석

#### 3.3.1 해석조건

가동접점과 고정접점의 열원은 주울열(Joule heat,  $I^2R$ )을 계산하여 입력하였으며, 접촉부에는 접촉저항에 의한 열원을 입력하였다[8]. 접촉저항에 의한 열원은 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 얻을 수 있다. 먼저 식 (1)의 힘을 접촉면적으로 나누면 압력 값을 얻을 수 있다. 그리고 식 (2)에서 단위면적에 대한 접촉저항 값을 얻은 후 접점 블레이드의 접촉면적을 고려하여 계산하면 접점 간에 존재하는 접촉저항을 얻을 수 있다. 이를 정리하면 다음 식 (3)과 같다.

$$H = P^{-0.7425} \times \frac{5.9915}{A} \times I^2 \times 10^3 \quad [W] \quad (3)$$

여기서, H = 열원[W], P = 압력[N/mm<sup>2</sup>], A = 접촉면적[mm<sup>2</sup>], I = 전류[A]이다. 표 2는 전류 크기가 25kArms와 40kArms인 경우 각 블레이드에서의 접촉저항과 열원을 나타내고 있다.

표 2 각 접점 블레이드에서의 접촉저항 및 열원

Table 2 Contact resistance and heat source for each blade

항목	Blade 1	Blade 2	Blade 3	Blade 4
접촉저항[μΩ]	11.93	11.16	11.08	12.58
주울열[W]* (25 kArms)	111.2	118.9	119.7	105.5
주울열[W]* (40 kArms)	284.8	304.5	306.6	270.0

\* 블레이드 간의 병렬 연결을 고려하여 계산됨.

접점에서 발생하는 열은 도체를 통해 전도되며, 접점 표면에 접해 있는 대기 중으로 발산된다. 따라서 도체의 열전도 해석과 대기 중으로 열이 발산되는 대류 해석을 동시에 수행하여야 한다. 이를 위한 에너지 방정식은 다음 식 (4)와 같으며 상용 유체 해석 프로그램인 Fluent를 이용하여 해석을 수행하였다[11].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S \quad (4)$$

여기서, ρ : density, k : conductivity,  
T : temperature, S : heat source,

$\vec{v}$  : fluid velocity, H : enthalpy =  $\int_{T_{ref}}^T c_p dT$   
c<sub>p</sub> : specific heat at constant pressure.

좌편의 두 번째 항은 유체 속도에 의한 대류 에너지의 전달을 나타낸다. 우편의 항은 접점 내 열원과 전도에 의한 열유속(heat flux)을 나타낸다. 단로기 접점의 대칭을 고려하여 모델의 반만 해석을 수행하였으며, 3차원 모델링을 하였다. 그림 8에 열전달 해석을 위한 모델을 나타내었다. 해석을 위한 계산 격자수는 약 50만개이다.

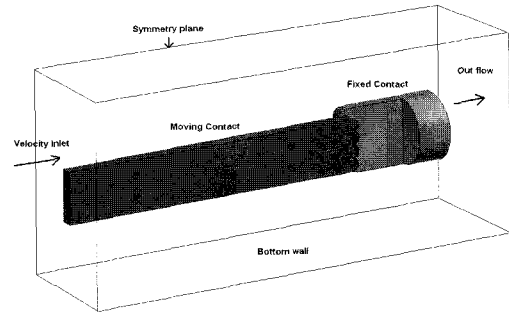


그림 8 열전달 해석을 위한 모델  
Fig. 8 Model for heat transfer analysis

전류크기는 25kArms 3초와 40kArms 3초의 두 가지를 설정하였다. 25kArms 3초의 경우 시험조건과 동일하게 외부에서 300.7 K의 온도를 가진 공기가 1 m/s의 속도를 가지고 유입되는 것으로 가정하였으며, 해석 모델의 바닥면은 단열로 설정하였다. 40kArms 3초의 경우 외부 온도는 302 K이다. 접점의 저항률은 온도에 따른 함수로 입력하였으며, 이에 따라 접점의 주울열 또한 온도에 따라 변화된다. 접점의 온도에 따른 Touch pitch copper 접점의 저항률 변화를 그림 9에 나타내었다[8,9].

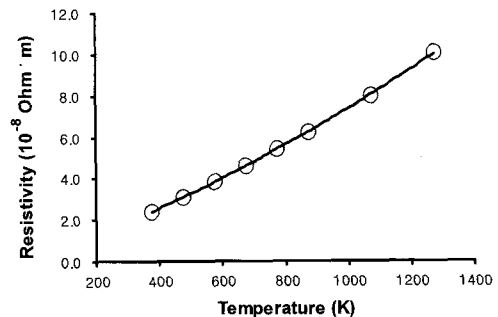


그림 9 온도에 따른 동접점의 저항률 변화  
Fig. 9 Variation of touch pitch copper resistivity with temperature

#### 3.3.2 해석결과

그림 10은 전류크기 25kArms 에서 계산시간 3.2s와 10.0s 일 때의 등온도 분포를 나타낸다. 계산시간 3.2s에서 최대 온도값은 Blade 2와 Blade 3에서 311K 이며, 외부 표면에서

는 310 K이다. 계산시간 10.0s에서는 최고온도가 Blade 2와 3에서 306 K로 나타났다.

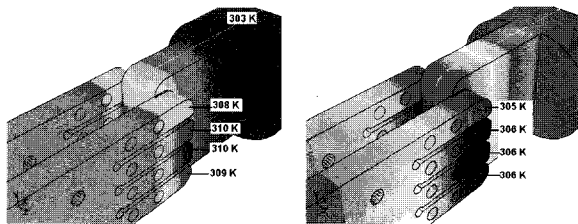
그림 11은 시간에 따른 온도상승 변화를 시험결과와 비교하여 나타낸 것이다. 해석결과 전류크기 25kArms에 대해 시간 3.25s일 때 310.44K로서 최대치를 나타내고 있다. 실제 실험값은 311.1 K로서 거의 일치함을 알 수 있다. 전류크기가 40kArms인 경우 계산값은 330.3 K이며, 실험값은 334.5 K로서 거의 일치한다. 온도값은 전류통전이 3초간 지속되는 동안 계속 상승하며 전류통전이 끝난 후에도 계속적으로 상승하는데 이는 접촉부에서 발생한 열이 열원이 사라진 후에도 점점 표면으로 전도되어 나타나기 때문이다. 시험결과가 해석결과에 비해 온도 하강이 완만한 이유는 온도센서를 감싸고 있는 절연지로 인해 외부로의 열전달이 잘 이뤄지지 않기 때문인 것으로 판단된다.

4. 접점의 단락전류 통전 성능 평가

단락전류 통전 설계의 관건은 수십 kA에 이르는 단락전류 통전 시에도 접점 간 용착이 발생하지 않아야 하며, 통전이 끝난 후에도 기본적인 개폐기능을 수행해야 하는 것이다. 접점의 온도상승이 용융점(melting point)에 이르지 않더라도 열변형이 일어나는 연화온도(softening temperature)에 이르게 되면 접점 표면이 손상될 수 있다. 이러한 손상은 접촉부의 저항을 증가시켜 결국 접점의 용착을 초래하게 된다.

따라서 접점의 온도상승이 연화온도에 이르지 않도록 설계해야 한다. 본 연구에서는 단락전류 통전 설계 시 접점의 연화온도를 기준으로 설정하여, 이 값을 초과하면 단로기는 단락전류 통전 성능이 미흡한 것으로 판단하였다. 구리의 연화온도는 463K 이므로 본 연구 모델의 접촉부에서의 온도값은 463K를 초과해서는 안 된다.

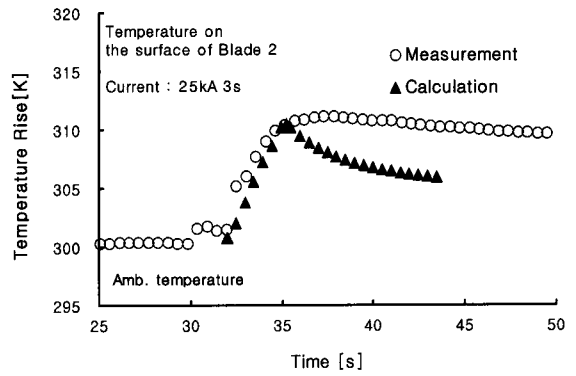
그림 12(a)는 전류크기 25kArms에서 계산시간 3s 일 때의 온도분포를 나타내고 있다. 접촉부에서의 최고 온도값은 350K이며 연화온도에 이르지 않으므로 접점 표면은 손상되지 않음을 알 수 있다. 그러나 전류 40kArms에서의 최고 온도값은 접촉부에서 517K로서 연화온도를 초과하므로 접점 표면에 용점(melting point)을 발생시킨다(그림 12(b)참조). 이는 그림 13의 시험결과에서도 확인할 수 있다. 따라서 본 연구의 단로기는 25kArms 3초에 대한 단락전류 통전 성능을 갖고 있으며, 40kArms 3초에 대한 성능은 미흡한 것으로 평가할 수 있다.



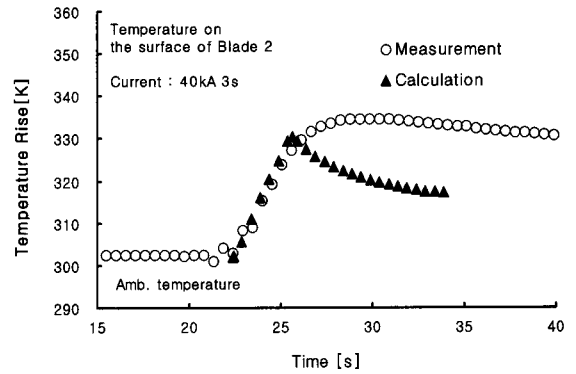
(a) 계산시간 3.2s (b) 계산시간 10.0s

그림 10 등온도 분포 (25kArms 3초)

Fig. 10 Temperature distribution



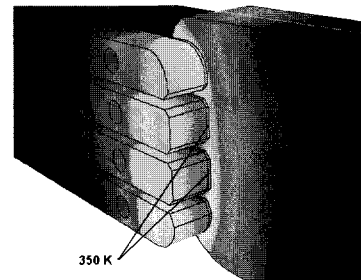
(a) Blade 2에서의 온도상승 (25kArms 3초)



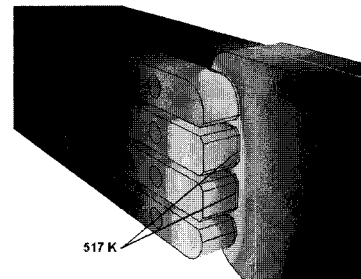
(b) Blade 2에서의 온도상승 (40kArms 3초)

그림 11 시간에 따른 온도상승 비교

Fig. 11 Comparison of temperature rise accordance with time



(a) 25kArms 3초 (Calculation time = 3s)



(b) 40kArms 3초 (Calculation time = 3s)

그림 12 접촉부에서의 온도분포

Fig. 12 Temperature distribution at contacting parts

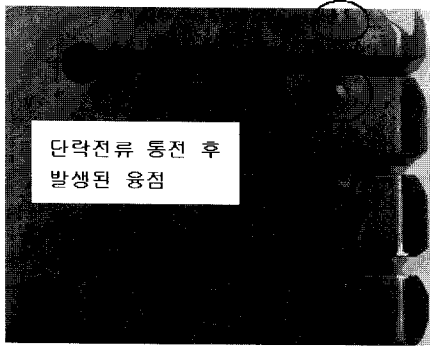


그림 13 40kArms 단락전류 통전 시험 후 접점표면의 상태  
Fig. 13 The status on contact's surface after test

### 5. 결 론

본 연구에서는 초고압 단로기의 단락전류 통전 성능 평가 기술을 개발하였으며, 다음과 같은 성과를 얻었다.

- 1) 단로기 접점의 전자력과 응력 해석을 통하여 접점의 접촉부에 가해지는 힘을 계산하였다.
- 2) 힘에 따른 접촉저항의 변화를 측정하여 실험식을 구하였으며, 이를 통해 단로기 접점 간의 접촉저항을 계산하였다.
- 3) 주열을 열원으로 입력하여 열전달 해석을 수행하였으며, 접점의 용착 여부를 확인하였다.
- 4) 연구결과와 신뢰성을 검증하기 위해 단락전류 통전 시험을 수행하였으며, 해석 및 시험에 의한 온도 상승 값이 잘 일치하였음을 확인하였다. 또한 단락전류 통전 성능을 파악하기 위한 접점의 용착 여부도 서로 일치함을 확인하였다.
- 5) 본 연구의 단로기에 대한 단락전류 통전성능 평가 결과 25kArms 3초에 대해서는 충분한 성능을 갖고 있지만, 40kArms 3초에 대한 성능은 미흡한 것으로 평가되었다.

본 연구를 통하여 초고압 단로기의 전기접점에 대한 단락전류 통전성능 평가 기술을 확보할 수 있게 되었으며, 일반 전력기기의 전기접점에도 본 연구결과를 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

- [1] Ragnar Holm, Electrical Contacts : Theory and Applications 4th Ed., Berlin, Springer Verlag, pp. 1-26, 1979
- [2] 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
- [3] 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
- [4] 한국표준협회, KS D 5103 구리 및 구리 합금 선, 2004

- [5] Paul G. Slade, Electrical Contacts : Principles and Applications, Marcel Dekker, Inc., pp. 1-83
- [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] S. S. Babu, et al., "Empirical model of effects of pressure and temperature on electrical contact resistance of metals," Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 6, No. 3, pp. 126-132, 2001.
- [9] Metals Handbook, 10th edn, Vols. 1 and 2; 1990, Materials Park, OH, ASM International.
- [10] Metals Handbook, desk ed. 2nded, ASM International, 1998, pp. 506-525
- [11] M. Necati Ozisik, Heat Transfer, McGraw-Hill, Inc., pp. 422-436, 1985.

## 저 자 소 개



#### 오 연 호 (吳年浩)

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



#### 송 기 동 (宋基東)

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



#### 정 진 교 (鄭鎭敎)

1967년생. 1991년 강원대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1994년 강원대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전기연구원 전력연구단 선임연구원  
Tel : 055-280-1564, Fax : 055-280-1589  
E-mail : jkchong@keri.re.kr