

## 고속 개폐 시뮬레이션을 위한 진공 회로차단기의 동적 모델 및 해석

안길영\*, 김수현\*\*

### Dynamic Model and Analysis of a Vacuum Circuit Breaker Mechanism for High-Speed Closing and Opening Simulations

Kil Young Ahn\*, Soo Hyun Kim\*\*

#### ABSTRACT

The dynamic model of a high-speed vacuum circuit breaker mechanism with spring-actuated cam and linkage is derived to simulate the high-speed closing and opening operations. Its validation for an analysis of high-speed motion behavior is checked through experiments. The characteristics of the friction on the camshaft are investigated using the nonlinear pendulum experiment. The parameters of the friction model are estimated using the optimization technique. The analysis exhibits that the friction of the pendulum depends on stick-slip, Stribeck effect and viscous damping. Comparing simulation results with actual responses using a high-speed camera, the appropriateness of derived dynamic models for the rapid closing and opening operations is shown. The spring motion, which has much influence on the closing responses, is observed.

**Key Words** : Vacuum circuit breaker (진공회로차단기), Dynamic model(동적모델), Friction model (마찰모델), High-speed camera (고속카메라)

#### 1. 서론

고압 회로차단기(power circuit breaker)는 높은 전압과 전류 하에서 정상부하 개폐 및 송배전 선로의 과전류, 단락, 지락사고 등에 의한 이상전류 발생시 차단 후, 선로를 복구할 수 있는 기능을 가진 전기기기이다. 이러한 회로차단기들은 전기 접점의 개폐 시에 발생되어지는 아크(arc)의 소호 매질에 의해 공기, 자기, SF<sub>6</sub> 가스, 진공 회로차단기 등으로 분류되고 있다<sup>(1)</sup>. 이들 중 진공 회로차

단기(vacuum circuit breaker: VCB)는 아크를 진공 인 터럽터(vacuum interrupter)내에서 전자기력에 의해 소호시키는 것으로, 차단기의 운용에너지가 기존의 제품에 비해서 작고, 높은 내구성을 가지고 있으며 보수점검이 용이하는 등의 우수한 장점을 지니고 있다. 따라서 VCB는 3.6 ~ 38 kV의 중전압급에서 널리 사용되고 있다.

VCB는 전기접점을 수십 ms 내에 개폐하기 위하여, 스프링에 미리 충전된 탄성에너지를 캠 및 링크들로 이루어진 기구부의 운동에너지로 변환시

☞ 2002년 2월 15일 접수  
\* LG 산전 전력연구소  
\*\* 한국과학기술원 기계공학과

키는 메커니즘을 사용한다<sup>(2)</sup>. 이러한 VCB 메커니즘에는 조인트들과 링크들로 구성된 복잡한 기구학적 체인, 동작시 발생하는 부품들 사이의 충격, 회전조인트에서의 마찰 등과 같은 많은 동적 현상이 존재한다. 이 현상들은 동특성을 분석하기 위한 동적 모델의 수립 및 검증을 어렵게 만든다. 과거에는 이에 대한 체계적 해석과 설계 방법보다는 간단한 이론과 함께 설계자의 경험 및 시행착오(trial and error)에 의해 설계되어 왔다<sup>(3-5)</sup>.

그러나 컴퓨터의 이용과 발전에 따라, 여러 개의 물체로 이루어진 시스템에 대한 다물체 동역학(multibody dynamics)의 연구와 병행하여 여러 상용 프로그램들(DADS, ADAMS 등)이 개발되었다. 이러한 프로그램의 도움으로 회로차단기에 존재하는 여러 동적 현상을 모델링하고, 설계의 개선 및 최적화에 이용하려는 연구가 수행되었다. Root<sup>(6)</sup>는 Westinghouse Type R의 VCB의 동적 응답을 최적화하기 위하여 IMP(integrated mechanisms program) 프로그램을 사용하여 모델링하였다. Jobes<sup>(7)</sup>는 저압(low voltage) 회로차단기에 대하여 링크와 스프링들로 이루어진 메커니즘의 동특성을 분석하기 위해, Walser<sup>(8)</sup>는 SF6 가스(gas) 회로차단기의 개발을 위해 ADAMS를 이용하였다. 이러한 상용프로그램들을 기반으로 구성된 동적모델(dynamic model)이 실제 메커니즘의 동특성을 잘 시뮬레이션하기 위해서는 모델 변수들인 링크들의 질량과 관성, 스프링 상수, 마찰계수 등이 정확히 반영되어야 한다. 특히, VCB 메커니즘과 같이 아주 짧은 시간에 큰 힘이 작용하는 환경에서는 조인트의 마찰을 단순히 가정하거나 무시할 수 없다. 특히, VCB의 캠 회전축에는 베어링뿐만 아니라, 스프링을 인장하기 위한 여러 기계 요소들이 결합되어 있고 그리스(grease)가 도포되어 있기 때문에, 마찰은 단순히 쿨롱마찰(coulomb friction)로 가정할 수 없다.

본 연구에서 먼저 VCB의 개폐동작을 시뮬레이션하기 위하여 동적모델을 ADAMS를 이용하여 유도한다. 여기서 가장 큰 힘을 받는 캠 회전축의 마찰모델을 규명하기 위하여, 캠 회전축에 대한 진자 실험(pendulum experiment)을 수행하고 마찰모델의 변수들은 최적화과정을 통하여 추정한다. 그리고 VCB 동적모델에 의한 응답은 고속카메라(high-speed camera)로 분석된 실험결과와 비교한다. 마지막으로, 캠의 회전량과 속도를 줄이게 하는

스프링의 운동을 관찰한다.

## 2. 진공 회로차단기의 구조와 동작원리

본 논문에서 사용되는 VCB의 구조는 Fig. 1과 같이 스프링으로 구동(spring-actuated)되는 캠(cam)과 링크(linkage)로 이루어져 있으며, 차단전류는 40kA 이고 정격 전압과 전류는 12kV 와 3150A 이다. 그리고 접점의 개폐 동작인 투입(closing)과 차단(opening)은 Fig. 1(a), (b), (c)로 다음과 같이 순차적으로 진행된다.

- 1) 투입동작: 투입 래치②를 해제하면, 캠①은 투입스프링③에 의해 시계방향으로 회전하고 캠은 종동절④을 밀어 접점은 닫히게 되어, Fig. 1(b)과 같게 된다.
- 2) 차단동작: 차단 래치⑥를 해제하면, 압축된 와이프⑥와 인장된 차단스프링⑤에 의하여 종동절이 반시계방향으로 회전하고 접점이 아래로 이동하여 Fig. 1(c)와 같게 된다.

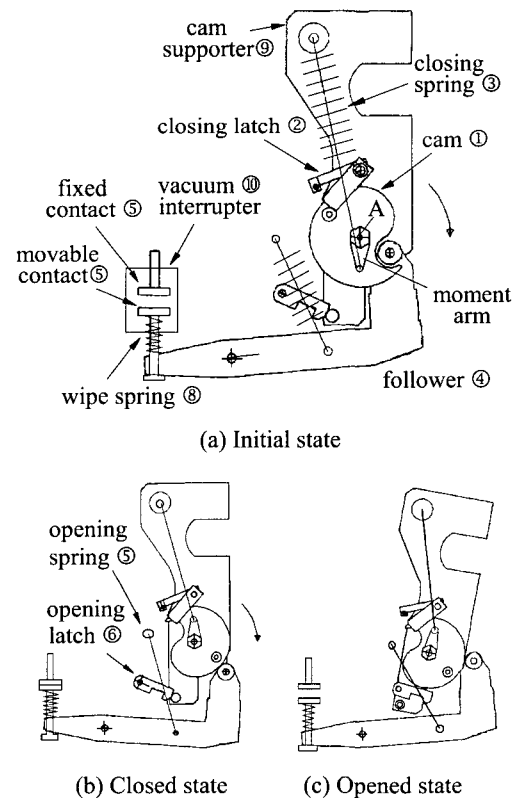


Fig. 1 Structure and operations of vacuum circuit breaker

### 3. 모델링

#### 3.1 진공 회로차단기의 동적모델

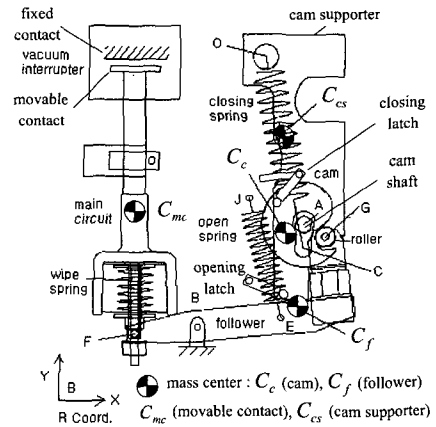
먼저 VCB의 투입동작을 분석하기 위한 동적모델은 ADAMS를 사용하여 Fig. 2(a)와 같이 기본적인 강체인 지면(ground), 캠지지대(cam supporter), 캠(cam), 종동절(follower), 그리고 3상의 가동접점(movable contact)으로 하여 3차원으로 구성된다. 여기서 VCB의 외형틀(outer case)은 지면으로 고려한다. 이들 주요 강체들의 질량, 질량중심의 위치, 관성모멘트는 3차원 모델링 프로그램인 Pro/Engineer에서 계산된다. 그리고 강체들은 서로 조인트로 연결되는데, 캠지지대는 점 O에서 지면과 회전조인트(revolute joint)로, 캠 지지대와 캠은 점 A에서 회전조인트로, 종동절은 점 B에서 지면과 회전조인트로, 가동접점은 점 F에서 종동절과 구면조인트(spherical joint)로, 또한 가동접점은 지면과 병진조인트(translational joint)로 연결된다.

Table 1은 동적모델에 사용된 강체들의 동역학적 변수뿐만 아니라, 투입 및 차단 에너지원을 제공하는 스프링들의 강성을 나타낸다. 여기서 관성모멘트는 지면 제약상 z축에 대해서만 나타내었다.

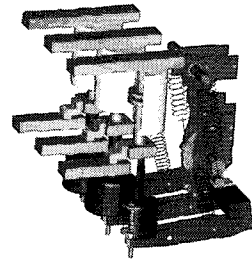
일반적으로 기계시스템에서 조인트들의 마찰 형태는 쿨롱마찰(coulomb friction)로서 고려되지만, VCB의 메커니즘과 같이 아주 짧은 수십 ms 이내에 동작하면서 아주 큰 힘을 받는 조인트들의 마찰은 쿨롱마찰로 가정할 수 없다. 특히 캠 회전축과 같은 경우에는 회전축에 베어링뿐만 아니라 투입스프링을 인장하기 위한 기구 및 여러 부품들이 부가적으로 결합되어 있으므로 마찰은 더욱 복잡하다. 따라서 본 논문에서는 캠 회전축의 마찰을 실험과 해석에 통하여 마찰형태를 규명하고, 추정된 마찰 모델은 VCB 모델에 반영한다. 이 과정은 다음에 상세히 설명한다.

그리고 회로접점의 투입시 발생하는 가동접점(moveable contact)과 고정접점(fixed contact) 사이의 충돌, 캠과 종동물러의 접촉 등과 같은 두 강체들 사이의 힘은 헤르쯔 접촉이론(hertz theory)에 근거한 비선형 스프링과 댐퍼로 등가 모델링 하였다<sup>(9)</sup>. 차단동작의 분석을 위한 동적모델의 초기형상은 Fig. 1(b)와 같으며, Fig. 2(a)의 투입모델의 해석 후에 ADAMS의 애니메이션(animation)을 이용하여 쉽게 얻어진다. 이것은 상용프로그램을 이용함으

로써 얻어지는 하나의 장점이다.



(a) Dynamic model



(b) Three dimensional representation

Fig. 2 Dynamic model for closing operation

Table 1 System parameter values

Mass of system components ( kg )	
cam supporter	9.95
cam	3.68
follower	9.82
movable contact	6.05
Moment of inertia of components: $I_{zz}$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )	
cam supporter	$1.23 \times 10^{-1}$
cam	$4.16 \times 10^{-3}$
follower	$1.14 \times 10^{-1}$
movable contact	$1.05 \times 10^{-1}$
Stiffness of springs ( $\text{kN/m}$ )	
closing spring	24.23
opening spring	15.49
wipe spring	126.59

### 3.2 캠 회전축의 마찰

마찰에 대한 연구는 대부분 미끄럼 접촉하는 평면 슬라이더에 대해서였고, 회전축의 마찰에 대한 연구는 비교적 적었다. Sadler<sup>(10)</sup>은 마찰 원(friction circle)의 개념을 이용하여 4 절 링크메커니즘에서 회전조인트의 마찰을 쿨롱마찰로 고려하였다. Mostofi<sup>(11)</sup>는 토글(toggle) 메커니즘의 회전조인트의 쿨롱 마찰에 의한 동적 및 진동 영향을 분석하였다. Sepehri<sup>(12)</sup>는 굴삭기의 선회시 회전축의 마찰을 Karnopp<sup>(13)</sup>의 모델로 가정하였다. 이들 모두 회전축의 마찰실험에 의해 모델을 추정하지 않았다. 따라서 본 논문에서는 캠 회전축에 대한 진자 실험(pendulum experiment)을 통하여 마찰모델을 규명하고, 마찰 모델의 변수들을 최적화과정을 통하여 추정하고자 한다. 그리고 추정된 마찰모델은 전체 VCB 모델에 반영된다.

#### 3.2.1 실험

캠 회전축의 마찰을 규명하기 위해, Fig. 3 과 같이 회전축 끝단에 링크(link)와 추(weight)를 연결하여 진자 실험을 수행하였다. 여기서 캠 회전축에 큰 힘을 가하기 위해 60kg의 추를 사용하였고, 회전축의 변위를 검출하기 위하여 회전축에 100kΩ 포텐서미터(potentiometer)를 고정하고, 이 출력신호를 저역통과(low pass filter : LPF)와 앰프(amplifier)에 연결하였다. Fig. 4 는 진자를 초기각도 10°에서 자유진동 시킨 경우에 측정된 회전각을 나타낸다. 여기서 회전각이 선형적으로 감소하는 것으로부터 쿨롱마찰이 지배적임을 알 수 있다. 그러나 만일 진자를 높은 속도로 운동시킨다면 점성감쇠의 효과가 존재할 것이다. 진자 실험의 주어진 상황에서 속도를 높이기 위해 링크를 짧게 하고 초기각도를 15°까지 증가시켜 실험하였다.

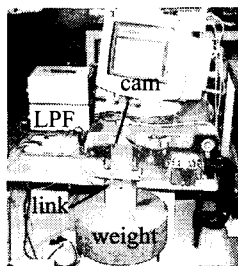


Fig. 3 Pendulum experiment

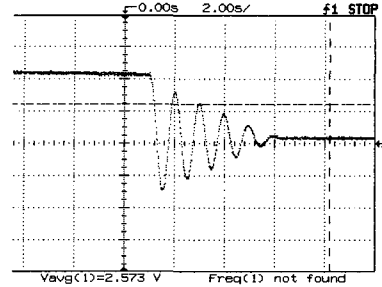


Fig. 4 Rotation angle (initial angle: 10°)

#### 3.2.2 마찰모델

마찰을 포함하는 진자 운동에 대한 운동방정식은 식(1)과 같다.

$$I\ddot{\theta} + MgL\sin\theta + T_f = 0 \quad (1)$$

여기서  $\sin\theta$ 의 비선형 항은 다소 큰 각도에서 자유진동하는 진자의 운동을 고려하기 위해 사용된다. 그리고  $I$ ,  $M$  과  $L$ 은 다음과 같이 계산된다.

$$I = I_c + I_l + M_l L_c^2 + I_w + M_w L_w^2,$$

$$M = M_c + M_l + M_w, L = \frac{M_c L_c + M_l L_l + M_w L_w}{M_c + M_l + M_w} \quad (2)$$

식(2)의 아래첨자  $c$ 는 캠을,  $l$ 은 링크를,  $w$ 는 추를 나타내고, 관성모멘트는 각각 자신의 질량중심 축을 중심으로 계산된다.

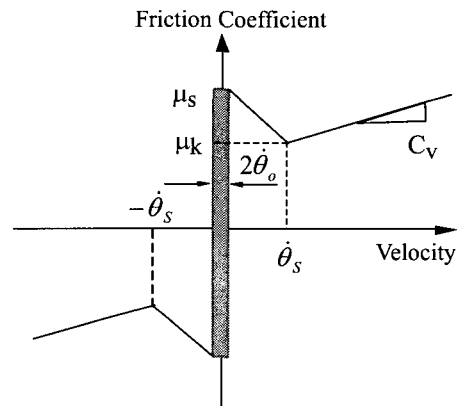


Fig. 5 Hybrid friction model

회전축의 마찰은 Fig. 4로부터 쿨롱 마찰이 지배적이라는 것은 알 수 있지만, 상대속도가 매우 작은 구간에서 속도는 증가하나 마찰력이 감소하는 현상인 Stribeck<sup>(14)</sup>효과와 점성 감쇠를 포함하는

Fig. 5 와 같은 하이브리드 마찰모델(hybrid friction model)로 가정된다. 여기서 쿨롱 마찰에는 스틱-슬립 현상을 가지도록 Karnopp 의 모델을 사용하였고, Stribeck 효과는 일정한 음의 감쇠(constant negative damping)로 가정하였다. 여기서  $\mu_s$  와  $\mu_k$  는 정적과 동적 마찰계수를,  $\zeta$  는 점성 감쇠비율,  $\dot{\theta}_o$  와  $\dot{\theta}_s$  는 마찰형태가 변화하는 천이속도를 나타낸다.

식(1)에서 마찰 토크  $T_f$  는 제안된 마찰모델을 바탕으로 수식화 하면 다음과 같다.

$$T_f = \min(|T_e|, |T_{cs}|) \operatorname{sgn}(T_e) \text{ for } |\dot{\theta}| \leq \dot{\theta}_o \quad (3)$$

$$T_f = T_{cs} + T_s \text{ for } \dot{\theta}_o < |\dot{\theta}| < \dot{\theta}_s \quad (4)$$

$$T_f = T_{ck} + T_v \text{ for } |\dot{\theta}| \geq \dot{\theta}_s \quad (5)$$

여기서,

$$T_e = -MgL \sin \theta, \quad T_{cs} = \mu_s r F_o \operatorname{sgn}(\dot{\theta})$$

$$T_{ck} = \mu_k r F_o \operatorname{sgn}(\dot{\theta}), \quad T_v = C_v (\dot{\theta} - \dot{\theta}_s), \quad C_v = 2\xi \sqrt{IM g L}$$

$$T_s = \left\{ \mu_s - (\mu_s - \mu_k) \dot{\theta} / \dot{\theta}_s \right\} r F_o \operatorname{sgn}(\dot{\theta})$$

$T_{cs}$  는 정적 마찰토크를,  $T_{ck}$  는 동적 마찰토크를,  $T_s$  는 Stribeck 효과에 의한 마찰토크를,  $T_v$  는 점성 마찰토크를,  $T_e$  는 외부토크를 각각 나타낸다. 그리고  $r$  는 회전축의 반경을,  $F_o$  는 회전축의 반력을 나타낸다. 회전축의 반력은 아래 식에서 얻어진다.

$$F_o = \sqrt{(F_{on}^2 + F_{or}^2)} \quad (6)$$

$$F_{on} = Mg \cos \theta + ML \dot{\theta}^2, \quad F_{or} = Mg \sin \theta + ML \ddot{\theta} \quad (7)$$

여기서  $F_{on}$  는 회전축과 진자의 질량중심을 통과하는 법선 방향이며,  $F_{or}$  는  $F_{on}$  방향의 수직 방향이다.

### 3.2.3 변수추정

제안된 마찰모델의 변수들은 모델(운동방정식)과 진자 실험에 의한 회전각사이의 오차(error)가 최소가 되도록, 다음과 같은 최적화를 통하여 추정된다. 먼저  $\mathbf{x}$  를 추정 변수,  $\tilde{\mathbf{x}}$  를  $\mathbf{x}$  의 추정값이라 하자. 실험과 모델사이의 출력 오차는 식(8)과 같다.

$$e(\tilde{\mathbf{x}}, t_i) = \theta_e(\mathbf{x}, t_i) - \theta_m(\tilde{\mathbf{x}}, t_i) \quad (8)$$

여기서  $\theta_e$ ,  $\theta_m$  각각 어떤 시간  $t_i$  에서 진자실험과 모델의 회전각이고,  $i$  는 1, 2, ...,  $N$  을,  $N$  는 샘플된 데이터의 개수를 나타낸다. 그리고 식(8)를 이용한 최적화문제는 다음과 같다.

$$\text{Minimize } J(\tilde{\mathbf{x}}) = \sum_{i=1}^N q_i (e(\tilde{\mathbf{x}}, t_i))^2 \quad (9)$$

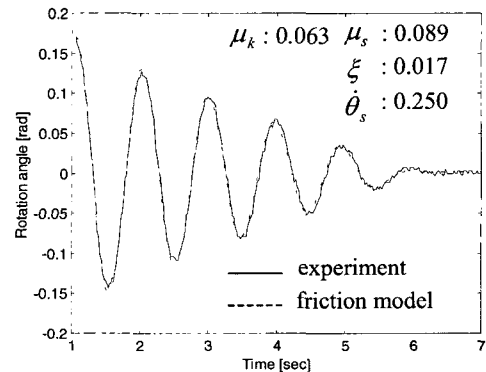
$$\text{Subject to the nonlinear dynamics: } \theta_m = G(\tilde{\mathbf{x}}, t_i)$$

여기서  $q_i$  는 시간과 함께 변하는 양의 가중치이고,  $G$  는 앞 절에서 제안된 마찰모델을 포함하는 진자의 비선형 운동방정식이 된다. 식(9)의 목적함수가 최소화 되면, 추정되어야 할 변수  $\mathbf{x}$  는  $\tilde{\mathbf{x}}$  와 같아지게 되며, 결국 실험과 모델의 회전각은 같게 된다.

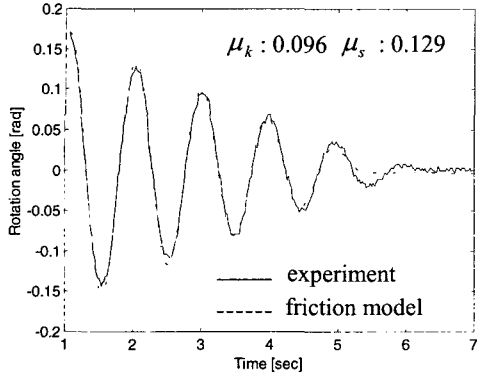
식(9)의 최적화 경우, 일반적인 최적화과정에서 필요한 목적함수의 미분값을 계산하기 어렵기 때문에 이를 피할 수 있는 방법 중의 하나인 개선된 심플렉스(modified simplex)방법을 선택하였다<sup>(15)</sup>. 이 방법은 다중설계변수를 갖는 최적화문제에서 많이 사용되는 방법이다. 매개변수의 추정은 두 가지 경우에 대해서 수행되었다. 하나는 본 논문에서 제안된 하이브리드 마찰모델이고, 다른 하나는 단지 스틱-슬립만 가진 모델이다.

Fig. 6(a)와 (b)는 두 가지 경우에 대해 추정된 모델 변수들에 의한 결과를 실험결과와 비교한 것이다. 이 결과로부터 제안된 하이브리드 마찰 모델이 단지 스틱-슬립만 포함하는 마찰모델보다 실험결과에 보다 더 가깝다는 것을 알 수 있다. 따라서 캠 회전축의 마찰은 점성감쇠가 포함된 마찰 모델이어야 함을 알 수 있다.

Fig. 7 은 경우 1 과 2 에 대해서 실험과의 오차를 나타낸 것으로, 경우 1 는 8%이고 경우 2 는 13%였다. 여기서 Fig. 6(a)의 자유 진동 후의 첫번째 최고 변위인 0.15 rad 이 오차계산에 사용되었다. 이 결과에서도 제안된 모델이 단지 스틱-슬립만 가지는 모델보다 더 타당함을 보여준다.



(a) Hybrid friction model



(b) Stick-slip model only

Fig. 6 Comparisons of responses of experiment and friction model

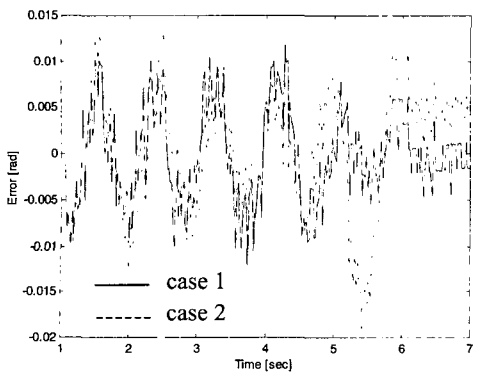


Fig. 7 Errors between responses of experiment and friction model

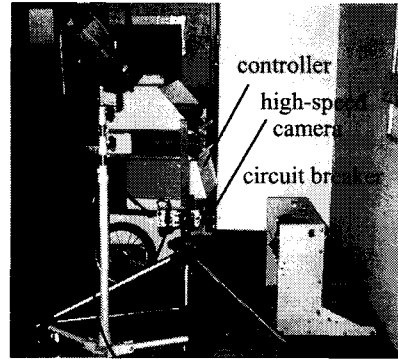
#### 4. 실험 및 해석결과

##### 4.1 고속카메라를 이용한 실험

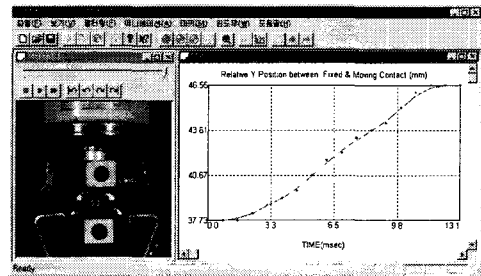
본 논문에서 VCB 메커니즘의 동특성을 분석하기 위한 실험장치로서, 1 초당 최대 12000 장까지 촬영할 수 있는 고속카메라(high speed camera)를 사용하였다. 즉 VCB의 동적모델에서 추정되는 가동접점의 변위특성, 종동절의 변위특성, 캠의 회전 변위 등이 고속카메라로 분석되었다. 또한 캠을 회전시키는 1kg의 큰 질량을 가진 투입스프링의 운동현상과 강체들 사이에서 발생하는 충돌현상의 관찰(observation)에도 사용되었다.

고속카메라의 장치는 Fig. 8(a)와 같이 고속카메라, 영상을 고속으로 처리하는 컨트롤러, 광원, 모

니터 등으로 구성되어 있다.



(a) Experimental setup



(b) Image-processing program

Fig. 8 Measurement of high-speed motion

그리고 촬영된 영상으로부터 변위들은 Fig. 8(b)의 영상처리프로그램(image-processing program)을 이용하여 분석되었다. 여기서 관심있는 링크의 한 부분이 추적되며, Fig. 8(b)는 투입시 가동접점의 운동을 추적한 결과이다.

##### 4.2 결과 및 고찰

앞 절에서 추정된 캠 회전축의 마찰모델을 Fig. 2(a)의 전체 VCB 모델에 적용하여, 접점의 투입 및 차단특성을 분석하였다. 여기서 종동절 회전축은 단순히 핀 조인트(pin joint)를 사용하므로 마찰은 정적과 동적마찰계수가 각각 0.1 과 0.07 인 스틱-슬립 모델을 사용하였다.

Fig. 9는 VCB의 투입 동작시에 종동절의 변위를 나타낸다. 여기서 캠 회전축의 마찰이 스틱-슬립인 경우, 과도한 마찰로 인하여 투입속도를 더 느리게 함을 알 수 있다.

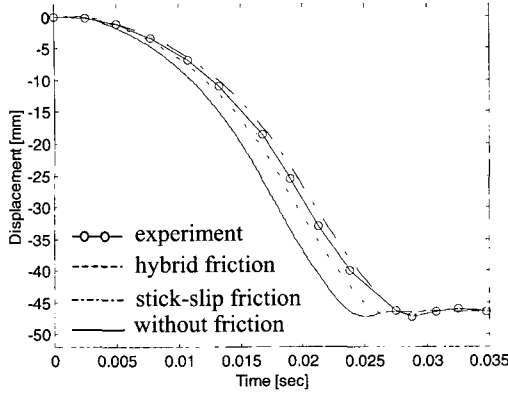


Fig. 9 Displacement of follower during closing operation

Fig. 10 은 VCB 의 투입스프링 운동을 고속카메라로 촬영한 것이다. 이 그림으로부터 투입스프링의 힘이 캠 회전축의 모멘트 암을 통하여 전달될 때, 1kg 정도의 큰 질량을 가진 투입스프링은 중방향뿐만 아니라 횡방향으로 운동함을 알 수 있다. 이러한 질량효과는 막대가 휘어지는 것과 같은 굽힘 운동을 야기시키고 캠의 회전방향이 바뀌는 곳에서는 더욱 심한 굽힘이 나타난다. 이것은 결국 캠의 회전변위를 작게 하고, 또한 투입속도도 느리게 한다. 따라서 현재 VCB 모델은 중동절의 운동특성을 느리게 하는 스프링 운동을 반영하지 못하므로, 캠 회전축의 마찰모델은 운동특성을 더 느리게 하는 스틱-슬립 모델보다 하이브리드 모델이 적합함을 알 수 있다.

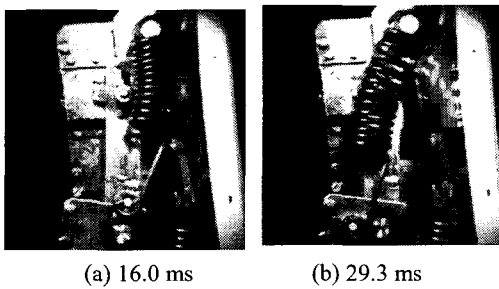


Fig. 10 Closing spring motion

Fig. 11 은 투입 동작시 캠과 중동절의 회전축에 작용하는 마찰력으로서, 캠 회전축의 마찰력이 중동절의 경우보다 아주 크고 VCB의 운동특성에 아주 지배적임을 알 수 있다. Fig. 12 는 차단 동작시

에 중동절의 변위를 나타낸다. 여기서 차단 동작시 투입스프링과 캠의 역할이 없으므로 모델의 응답이 실험과 유사함을 알 수 있다.

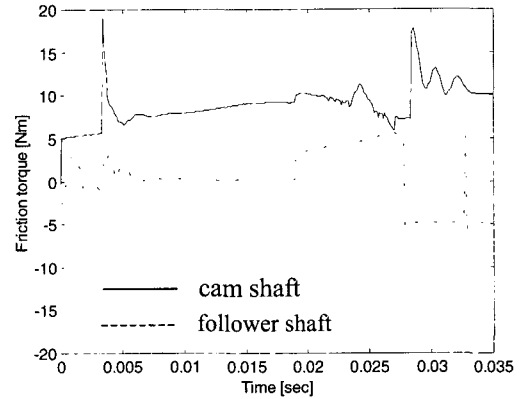


Fig. 11 Friction torques during closing operation

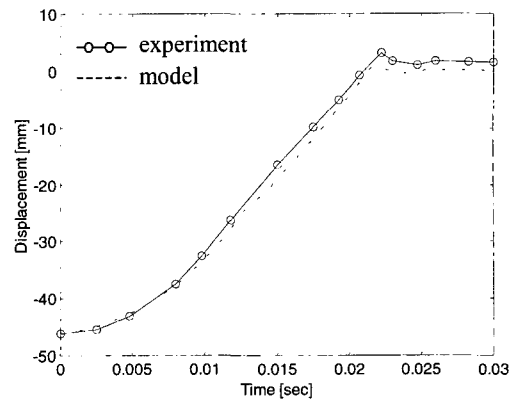


Fig. 12 Displacement of follower during opening operation

### 5. 결론

진공 회로차단기의 고속 개폐 시뮬레이션을 위한 동적 모델의 수립 및 검증을 위하여, 먼저 ADAMS를 이용한 기구학적 체인의 모델링뿐만 아니라, 또한 아주 짧은 순간에 큰 힘을 받는 캠 회전축의 마찰을 규명하고 실험적으로 모델 변수를 추정하여 전체 동적모델에 반영하고 분석하였다. 이러한 모델링 과정에서 얻어진 결과들은 다음과 같다

1) 캠 회전축의 마찰형태는 진자 실험을 통하여 스틱-슬립, Stribeck 효과와 점성감쇠를 포함하는 하이브리드 모델에 의존했다. 그리고 마찰모델의

변수들은 개선된 심플렉스방법을 이용한 최적화과정을 통하여 추정하였다.

2) 캠의 회전변위를 작게 하고 회전속도를 느리게 하는 스프링의 운동이 관찰되었다. 이러한 스프링의 운동이 전체 동적모델에 반영되어 진다면 투입특성은 실제와 더 유사함을 예시하였다.

3) 투입 동작시 캠 회전축의 마찰력이 종동절의 경우보다 아주 크며 차단기의 운동특성에 아주 지배적임을 알 수 있었다.

### 참고문헌

1. Flurscheim, C. H., *Power Circuit Breaker Theory and Design*, Short Run Press Ltd., 1975.
2. Greenwood, A., *Vacuum Switchgear*, Short Run Press Ltd., 1994.
3. Van Sickle, R. C. and Goodman, T. P., "Spring Actuated Linkage Analysis to Increase Speed," *Product Engineering*, Vol. 24, pp. 152-157, July 1953.
4. Barkan, P., "Dynamics of High-Capacity Outdoor Oil Circuit Breaker," *AIEE Transactions*, Vol. 74, Part III, pp. 671-676, 1955.
5. Bush, R. R. and Carter, G. K., "The Application of Analytical Methods in Power Circuit Breaker Mechanism Design," *AIEE Pacific General Meeting*, Vancouver, B. C. Canada, Sept. 1-4, 1953.
6. Root, R. R., "The Circuit Breaker-A Practical Example in Engineering Optimization," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 18, No. 3, pp. 229-235, 1983.
7. Jobes, C. C., Palmer, G. M. and Means, K. H. "Synthesis of a Controllable Circuit Breaker Mechanism," *ASME-Journal of Mechanical Design*, Vol.112, pp. 324-330, Sept. 1990.
8. Walser, H., "Using ADAMS in the Development of High Voltage Switching Gears," *11<sup>th</sup> European ADAMS User's Conference*, pp. 365-375, Nov. 19-20, 1996.
9. Timoshenko, S. P. and Goodier, J. J., *Theory of Elasticity*, McGraw-Hill, 1970.
10. Sadler, J. P., "Dynamic Analysis of Mechanisms Including Coulomb Friction via Equilibrium Equations," *Proceedings, Third Applied Mechanism Conf., Oklahoma State Uni., 13*, pp. 1-11, 1973.
11. Mostofi, A. "Toggle Mechanism: Dynamics and Energy Dissipation," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 20, No. 2, pp. 83-93, 1985.
12. Sepehri, N., Sassani, F., Lawrence, P. D. and Ghasemipoor, A., "Simulation and Experimental Studies of Gear Backlash and Stick-Slip Friction in Hydraulic Excavator Swing Motion," *ASME-Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 118, pp. 463-467, 1996.
13. Karnopp, D., "Computer Simulation of Stick-Slip Friction in Mechanical Dynamic Systems," *ASME-Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 107, pp. 100-103, 1985.
14. Sepehri, N., Sassani, F., Lawrence, P. D. and Ghasemipoor, A., "Simulation and Experimental Studies of Gear Backlash and Stick-Slip Friction in Hydraulic Excavator Swing Motion," *ASME-Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 118, pp. 463-467, 1996.
15. Rao, S. S., *Optimization Theory and Application*, Wiley Eastern Limited, New York, 1978.