

# ANSYS 를 이용한 전기 접촉 기구의 전자 반발력 분석 및 온도 상승 예측

박우진\*, 김기환, 안길영, 오일성 (LS산전㈜)

## Prediction of Electromagnetic Repulsion Force and Temperature Rise in Electric Contact Mechanism Using ANSYS

W. J. Park, K. H. Kim, K. Y. Ahn, I. S. Oh (LS Industrial systems)

### ABSTRACT

As computer power increased, the system with complex phenomenon has been analyzed with the help of CAE software which can handle the coupled physics, such as electromagnetic, structure, thermal and fluid physics. To predict the electromagnetic repulsion force and the temperature distribution of an air circuit breaker with electric contact mechanism, ANSYS/EMAG, FLOTRAN can be used. Although some assumptions and simplifications were introduced to simulate the model, results from the computational model were in good agreement with actual measurements obtained from experiments.

**Key Words** : Air circuit breaker (기중회로차단기), Electromagnetic repulsion force (전자반발력), Coupled analysis (연계 해석)

### 1. 서론

최근 산업 기기 전반에 걸쳐 축소화 및 대용량화가 진행되고 있으며 전력 기기 분야에서도 보다 작은 제품이 보다 큰 용량의 전류를 차단 또는 통전시키도록 개발되고 있다. 이로 인하여 제품의 단위 면적당 발열밀도가 증가하는데, 제품의 열적 신뢰성과 통전 성능을 좌우하는 통전부를 효율적으로 설계하면 개발 비용 감소 및 기간 단축을 이끌 수 있어 그 중요성은 점차 증대되고 있다<sup>(1)</sup>. 특히 전력 기기에는 도체부, 접촉부 등에서 발생하는 손실에 의해 온도가 상승하게 되는데, 새로운 제작 기법 및 운전 설비의 발전과 더불어 온도문제의 중요성이 커지고 있다.

기중 회로 차단기(Air Circuit Breaker: ACB)는 배전 선로의 과전류와 단락 및 지락 등의 사고 발생 시 기중 소호 방식으로 전류를 차단하여 선로와 부하 기기를 보호하는 전력 기기이다. 일반적으로 가정이나 건물에서 볼 수 있는 배선용 차단기에 비해 차단 용량이 크고, 과전류 트립 장치가 부착되어 있다는 점 등이 특징이다. 현재 정격전압 500V 이하에서 정격전류 630 ~3200A 의 통전 능력을 가진

ACB 가 대부분 사용되고 있지만, 통전 전류가 6300A 까지도 요구되고 있어 대용량화가 불가피한 추세이다.

전력 기기의 발열은 크게 Joule 발열 (Joule heating)과 유도발열 (Induction heating)의 두 가지로 분류할 수 있다<sup>(2)</sup>. 유도발열은 비열 면에서 제한적이나 재질 변경 등을 통해 다소 감소시킬 수 있는 반면, Joule 발열은 통전 전류의 제곱에 비례하므로 현재 상용되고 있는 구리를 사용할 경우에도 많은 양의 열이 발생한다. 더욱이 접촉 연결부가 많은 차단기의 경우, 이를 측정 및 예측하는 것은 상당히 중요하다<sup>(3)</sup>. 하지만, 이러한 모든 조건을 충족시키는 프로그램은 아직 개발되어 있지 않은 실정이다.

본 연구의 목적은 유한요소법을 적용한 전자계 및 열유동 연계 해석을 통하여 ACB 통전부의 정확한 온도 상승을 예측하고 통전 시 발생하는 전자반발력을 분석하여 접촉부에 요구되는 접촉력을 산정함으로써 설계비용 감소 및 성능의 신뢰성 향상에 있다. 전자계해석은 ANSYS/EMAG 으로 수행하였으며, 열유동해석은 ANSYS/FLOTRAN 을 이용하였다.

## 2. 기중 회로 차단기

기중 회로 차단기는 전기 접점들을 단시간에 개폐하기 위하여, 인장 또는 압축 스프링에 의해 구동되는 기구절을 이용한다.

Fig. 1 은 스프링 구동 기구절을 가진 기중차단기의 구조를 보여준다.

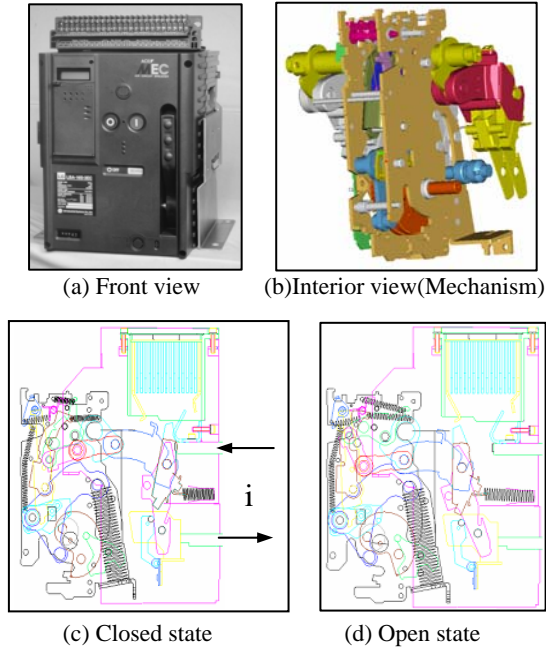


Fig. 1 Structure of air circuit breaker

투입 래치를 해제하면 압축된 스프링의 힘이 기구절을 운동시켜 가동 접점을 고정 접점에 붙이고, 접압 스프링이 압축되어 가동 접점을 가압하면서 투입 동작이 완료되어 통전된다. 접점이 붙은 상태에서 차단 래치를 해제하면 접압 스프링의 충진에너지를 의해 기구절이 구동되어, 가동 접점이 고정 접점으로부터 분리되면서 차단 동작이 완성된다.

IEC 에서는 접속부에 대한 온도를 주위 온도와 의 차이로서 80℃로 규제하고 있다.

## 3. 연계해석 및 실험

### 3.1 주회로의 발열현상

모든 전력 기기는 제품의 안전성, 신뢰성을 갖추기 위하여 IEC, UL, ANSI 등의 국제 규격 및 수출국 요구 사항을 만족시켜야 한다. 이 중 온도 상승에 대해서는 온도 한계치를 설정하여 규제하고 있다. 하지만, 고정된 열원에서 외부로 방출되는 열의 흐름을 파악하는 일반적인 열전달 현상과는 달리 전력 기기의 경우에는 통전 중인 모든 회로에서 열이 발생하고, 접속부의 전기 접촉 저항에 의한

발열과 열 접촉 저항 등을 고려해야 하기 때문에 열의 흐름이 매우 복잡하다. 회로를 흐르는 전류에 의한 발열량은 회로의 전기 저항을 이용하여 Joule 법칙으로부터 얻을 수 있다.

$$Q = I^2 R \quad (1)$$

$$R = R_0 [1 + \alpha_0 (T_1 - T_0)] \quad (2)$$

$$R_0 = \rho_0 \frac{l}{A} \quad (3)$$

여기서  $Q$ 는 발열량[W],  $I$ 는 전류[A],  $R$ 은 저항[Ω],  $\alpha_0$ 는 온도 저항 계수,  $\rho_0$ 는 도체의 비저항[1/℃],  $l$ 은 도체의 길이[m],  $A$ 는 도체의 통전 단면적[m<sup>2</sup>]을 나타낸다.

발열 현상의 주요 원인인 회로의 전기 저항은 도체가 가지고 있는 비저항에 의한 체적 저항(bulk resistance)과 접속부에서 발생하는 접촉 저항(contact resistance)으로 나눌 수 있다. 접촉 저항은 전류가 접촉 요소를 통과할 때 발생하는 집중 저항(constriction resistance)과 접촉면의 산화막과 같은 피막에 의한 피막 저항(film resistance)으로 구분된다<sup>(1)(3)(4)</sup>. 본 연구에서는 체적 저항과 집중 저항을 고려하였으며, 피막 저항은 배제하였다.

### 3.2 전자계와 열유동 연계 해석

통전 중인 차단기의 온도 상승에 영향을 미치는 인자는 전자기장과 열전달 현상이다. 전자기장은 ANSYS/EMAG 을 이용하여 해석하였고, 대류, 전도 및 radiation 의 열전달은 ANSYS/Flotran 을 이용하여 해석하였다. 정확한 온도 상승을 예측하기 위해 이들을 sequential 기법으로 반복 연계 해석하였다.

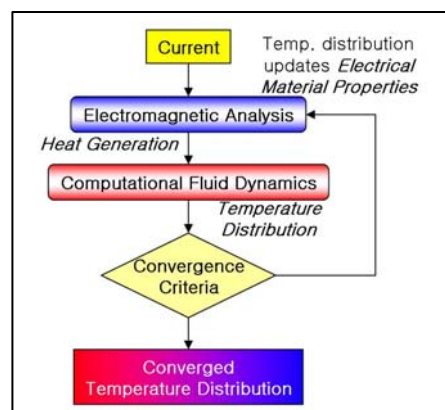


Fig. 2 Sequential coupling flow

먼저, 주어진 경계 조건에 대해 EMAG 해석을 수행하여 Joule 발열량을 얻는다. 이 값을 경계 조건으로 Flotran 해석을 수행하면 Joule 발열에 따른 온도 분포를 얻을 수 있다. 이 온도 상승 효과를 고려하기 위해 Flotran 해석에서 구한 온도 분포에 따

라 각 요소의 전기적 특성을 update 하여 EMAG 해석을 재수행하면, 온도 상승을 고려한 Joule 발열량을 구할 수 있다. 이 과정을 반복하면 Flotran 해석을 통해 얻어지는 온도 분포가 수렴하게 되는데 이 값을 해로 고려한다. Fig.2 는 이 과정을 도식적으로 나타낸 것이다.

### 3.3 전자계 해석

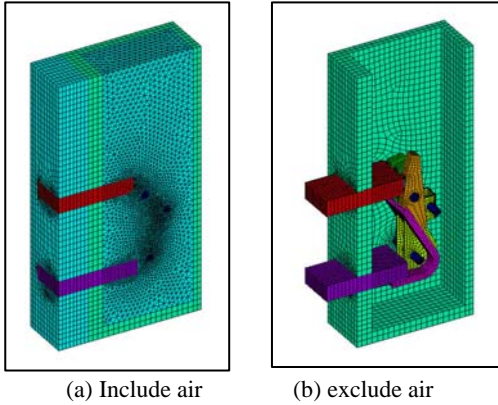


Fig. 3 F.E.mesh for ANSYS/EMAG

Fig. 3(a),(b)은 EMAG 해석용 F.E.model 로 대칭면에 대해 1/2 을 모델링 하였다. 전기 저항은 식 (2) 와 같이 온도에 따라 선형 함수로 가정하였고, 다른 특성들은 상수로 고려하였다. 대칭면을 제외한 전체 시스템의 바깥 면에는 normal flux 를 적용하고, 입력 측에 60Hz 800A 의 교류 전류를 통전시키고, 출력 측에 0V 의 전위 값을 경계 조건으로 적용하여 harmonic analysis 를 수행하였다.

Fig. 4 에 Joule 발열 분포를 나타내었다. Joule 열은 A-spot 과 비저항이 비교적 높은 핀 주위에서 발생하며, 대부분은 A-spot 주위에 집중되어 있다. 전체 시스템의 전력 손실은 7.64Watt 로 대부분 Joule 열로 전환되어, 시스템의 온도 상승에 기여한다.

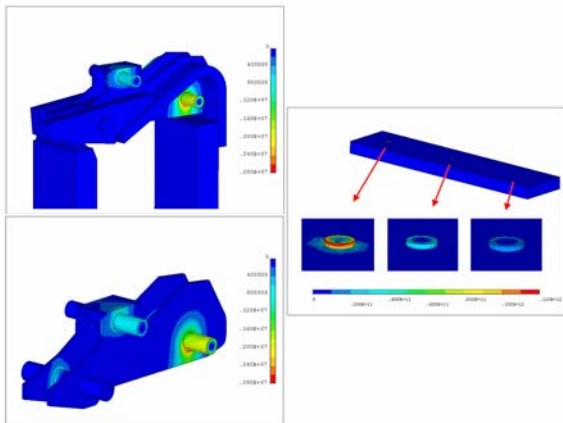


Fig. 4 Joule heat generation

### 3.4 전자반발력 해석

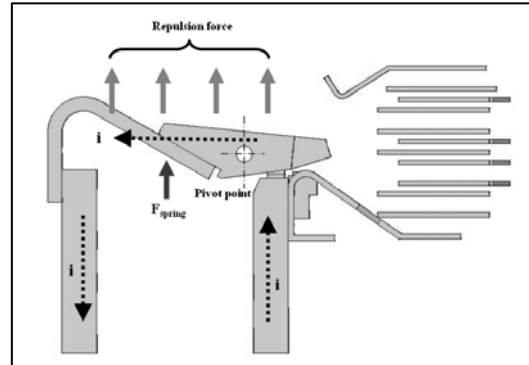
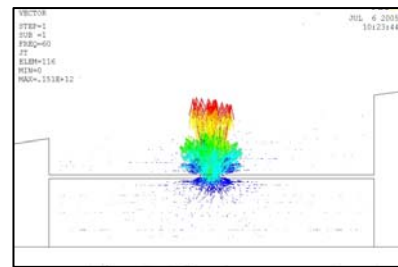


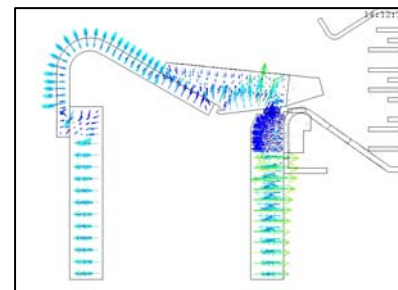
Fig. 5 Repulsion forces from current loop system

상기 전자계해석은 온도상승예측을 위한 발열량 정보를 제공할 뿐 아니라 접촉구조의 효율성 분석을 위한 전자반발력 해석에도 이용된다.

Fig. 5 는 전류(i)의 흐름(U-loop)과 이로인해 발생하는 가동자의 전자반발력을 나타낸 것이다. 전류의 크기에 따라 전자반발력의 크기도 비례하여 증가하며 가동자의 회전축 중심 시계방향으로 모멘트를 발생시키게 되어 접촉력을 증가시키는 효과를 가져온다. 또한 접촉력의 증가는 접촉자간 저항을 감소시키므로 기중차단기의 단시간 통전능력을 높여주는 역할을 하게된다.



(a) Current density at contact area (a-spot)



(b) Repulsion forces

Fig. 6 Magnetic forces from the current loop

Fig. 6 (a),(b)은 65kA(rms)전류 인가 시 발생하는 가동자와 고정자의 접촉부(a-spot)에서의 전류밀도와 전자반발력을 나타내고 있다. 기중 회로 차단기의

접압력 선정은 통전 시 발생하는 전자반발력의 크기와 밀접한 관계를 가지고 있으며 접압 스프링의 사양결정 시 이를 반영하는 것이 필수적이다.

### 3.5 열유동 해석

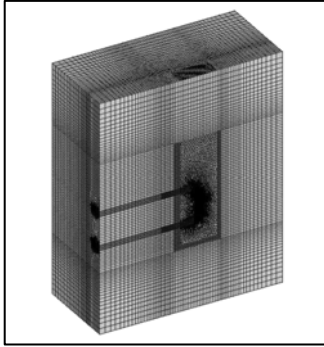


Fig. 7 F.E.mesh for ANSYS/FLOTTRAN

Fig. 7 은 대칭면에 대해 1/2 을 모델링한 Flotran 해석용 F.E.model 이다. 아크 슈트와 이를 중심으로 내부 및 외부의 유체 영역 등 크게 3 부분으로 나눌 수 있다. 아크 슈트 외부 유체 영역은 대류 작용을 구현하기에 충분한 영역을 포함하였다. 대칭면에는 대칭 조건을 적용하고, 이를 제외한 외부 유체 영역 바깥면에는 대기압 및 25℃를 경계 조건으로 부여하였으며, 고체 영역에는 radiation 에 의한 열전달을 가정하였다. 초기 조건으로는 유체 영역 전체에 대해 대기압, 0℃을 적용하였고, 앞서 EMAG 해석에서 구한 Joule 열을 체적력으로 고려하였다. 시스템 전체의 특성이 일정하고, 유체는 비압축성 난류 모델로 가정하여 steady state analysis 를 수행하였다.

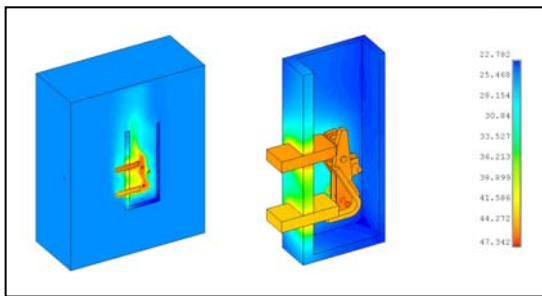


Fig. 8 Temperature distribution

Fig. 8 은 EMAG 및 Flotran 해석을 3 회 반복 계산하여 수렴한 결과로 내·외부 유체 영역을 모두 포함한 모델과 고체 영역만의 온도 분포 및 유체 입자의 유동 경로를 나타낸다. 유체는 자연 대류에 의해 운동하므로, 아크 슈트 외벽을 타고 상승한 유체가 압력 차로 인해 열원 부근까지 하강하여 데워지게 되고, 다시 대기 중으로 수직 상승하게 된

다. 유체 입자의 유동이 원활한 부분은 비교적 온도가 낮은 것을 알 수 있다. 온도 상승의 직접적인 원인은 전기 저항이지만, 대류 작용을 활발하게 야기시키면 대기로의 열전달을 통해 온도 상승을 억제할 수 있다. 이 결과들을 통해 보다 안정적인 구조로의 설계를 유도할 수 있다.

### 3.5 실험 결과

차단기를 25℃의 실험실에서 60Hz 800A 의 교류를 통전시켜 온도 분포가 포화 상태에 이르도록 한 후 주요 관심 위치의 온도 추이를 측정하였다. 실험과 해석을 통해 얻은 온도 분포와 Joule 열을 Table. 1 에 비교하였다. 두 결과들은 6%의 오차 내에서 근사하고, 제시한 해석 기법은 차단기의 온도 분포를 잘 예측함을 볼 수 있다.

Table 1. Experiment vs FEA

25℃	Result		Error
	Experiment	FEA	
Busbar on line	44.2	44.9	1.62%
Busbar on load	43.8	43.3	1.08%
Cage (Internal)	31.8	30.0	5.66%
Arc contact	43.8	45.2	3.24%
Contact	43.9	45.9	4.60%
Ambient	26.0	25.0	3.85%

## 4. 결론

ANSYS 의 EMAG 과 Flotran 의 연계 해석을 통하여 기중 회로 차단기의 전기 접촉부의 온도 상승을 예측하였다. 예측된 결과와 실험 결과의 유사성으로부터 본 연구를 통하여 확립된 해석 process 가 타당함을 알 수 있었다. 이러한 방법은 기중 차단기의 통전부 설계에 활용될 뿐 아니라, 제품의 열적 신뢰성을 향상시키는데 적용될 것이다.

## 참고문헌

1. 일본전기학회, “중전압 스위치기어의 방열기술”, 전기학회기술보고, 제 839 호, 2001
2. Daview, E.J., “Conduction and induction heating”, IEE Power Engineering Series 11, ISBN 086341 174 6, 1990
3. Slade, P. G., “Electrical contacts”, Marcel Dekker, New York, 1999
4. IEC-60943, “Guidance concerning the permissible temperature rise for parts of electrical equipments, in particular terminals, 2nd edition”, 1988