

3차원 유한요소 해석을 이용한 배선용 차단기의 전자반발력 계산

김 용 기*, 박 홍 태, 송 중 천, 서 정 민, Chen Degui**
 LG산전 전력연구소, **서안 교통대(중국)

Calculation of Electrodynamic Repulsion Force in Molded Case Circuit Breakers
 Using the 3-D Finite Element Analysis

Kim Yong-Gi, Park Hong-Tae, Song Jung-Chun, Seo Jung-Min, Chen Degui
 Electrotechnology R&D Center, LG Industrial System, Xian Jiaotong University, China

Abstract - To the optimization design of molded case circuit breakers(MCCBs), it is necessary and important to calculate the electro-dynamic repulsion force acting on the movable conductor. With 3-D finite element nonlinear analysis, according to the equations among current-magnetic field-repulsion force and taking into account the ferromagnet, contact bridge model is introduced to simulate the current constriction between contacts, so Lorentz and Holm force acting on the movable conductor and contact, respectively, can be integrated to calculate. Coupled with circuit equations, the opening time of movable contact also can be obtained using iteration with the restriction of contact force. Simulation and experiment for repulsion force and opening time of five different configuration models have been investigated. The results indicate that the proposed method is effective and capable of evaluating new design of contact systems in MCCBs.

Index Terms : Finite Element Analysis, MCCB, Repulsion Force, Current Constriction

1. 서 론

저압선로의 단락사고시 기기 및 부하를 보호하는 배선용 차단기(MCCB ; Molded Case Circuit Breaker)는 아크를 신속하게 차단하기 위해 가동자와 고정자를 빠른 시간내에 신속하게 분리시켜야 한다. 이때, 중요한 역할을 가진 부분이 한류 기구부이다. 일반적으로 한류 기구부에서 가장 중요한 것은 두 접점간의 전자반발력을 최대한 이용하는 것이다. 일반적으로 전자반발력은 도체간에 작용하는 로렌츠 힘(Lorentz Force)과 접점사이의 전류집중에 의한 홀름(Holm)의 힘으로 구성된다. 이러한 힘은 배선용 차단기의 접촉력, 개리시간 및 가동자의 개리속도를 결정하는데 중요한 요소로 작용하며, 배선용 차단기의 한류성능에 큰 영향을 미친다. 그러므로 배선용 차단기의 최적화 설계를 위해서는 전자 반발력에 대한 분석이 매우 중요하다. 지금까지 배선용 차단기의 전

자 반발력을 계산하기 위해 많은 연구가 진행되었다.[2~3] 그러나 실제 형상을 단순화하여 계산하였기 때문에 전류분포 등에서 실제의 결과와는 차이가 발생하였다. 그래서 본 논문에서는 접점의 접촉지점을 정확하게 묘사하기 위해 원통형 접촉모델을 이용한 3차원 유한요소 해석을 통해 형상이 다른 배선용 차단기 모델의 전자 반발력과 가동자 개리시간을 계산하였다. 그리고 실험적으로 해석결과의 타당성을 검증하였다.

2. 해석방법

2.1 가동자 접촉 브리지 모델

일반적으로 접점의 접촉을 정확하게 묘사하기 위해서는 접점의 표면조도 상태를 고려한 모델이 필수적이다. 본 연구에서는 접점의 접촉상태를 정확하게 묘사하기 위해 원통형 접촉모델을 사용하였다. 원통형 모델을 사용한 홀름력을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$F_H = \frac{\mu_0}{4\pi} \times \ln\left(\frac{R}{r}\right) \times i^2 \quad r = \sqrt{\frac{F_K}{\pi \cdot \xi \cdot H}} \quad (1)$$

여기서, r 은 접촉반경, F_K 는 접촉력, H 는 경도 그리고 ξ 는 표면조도에 의존하는 상수를 나타낸다. 식 (1)을 이용하여 반경 r 을 계산하였으며, 높이 h 의 매개변수를 나타내기 위해 한쌍의 원통형 접점을 이용하여 해석을 수행하였다. 본 연구에 사용된 접촉모델은 그림 1과 같다.

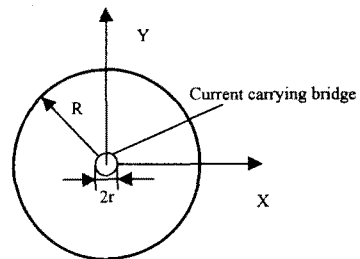


그림 1. 접촉모델

표 1과 2는 해석에 사용된 조건과 그 결과를 각각 나타내고 있다. 해석결과에서 알 수 있듯이, 높이 h 가 0.1~0.25mm의 범위에서는 전자 반발력에 거의 영향이 없는 것으로 나타났다. 그러므로 본 연구에서는 높이 h 의 매개변수를 0.2mm로 하여 해석을 행하였다.

표 1. 해석조건

입력	조건
전류(kA)	10
접점 반경 R(mm)	6.77
접점 높이(mm)	10
접점 브리지 반경 r(mm)	0.5
접점 브리지 개수	1
접점 브리지의 위치	접점의 중심

표 2. 해석결과

높이 h (mm)	반발력 (N)
0.1	22.8
0.125	22.9
0.15	23.0
0.2	23.4
0.25	23.3

2.2 계산방법

배선용 차단기의 회전형 가동자는 그림 2의 나타난 개리 토크 M 에 의해 가속되며, M 은 회전 중심 O 에서의 거리 d 와 가동자와 접점상에 발생하는 힘 F_i 의 벡터 곱의 체적 적분으로 계산할 수 있다. 식 (2)를 사용하여 힘 F 는 M 을 가동자의 길이 l 로 나눔으로써 쉽게 구할 수 있다. 또한 식 (3)에서는 요소를 통해 흐르는 전류밀도 J_i 와 위치 점에서의 자속 밀도의 벡터 곱으로 힘 F_i 를 구할 수 있다.

$$M = \int_0^l \vec{d}_i \times \vec{F}_i dv \quad F = M/l \quad (2)$$

$$\vec{F}_i = \vec{J}_i \times \vec{B}_i \quad (3)$$

전류밀도 J 의 분포는 식 (4)를 이용하여 구할 수 있으며, T 에 대한 경계조건은 식 (5)와 같다.

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\sigma} \text{rot} \vec{T} \right) = 0, \quad \vec{j} = \text{rot} \vec{T} \quad (4)$$

$$\oint \vec{T} \cdot d\vec{l} = I \quad (5)$$

여기서, T 는 전류의 포텐셜 벡터, σ 는 도전율 그리고 I 는 도체를 통하는 총전류를 나타낸다. 전류밀도 J 를 계산한 후 전체 영역내에서 식 (6)을 이용하여 B 와 J 사이의 관계에 따라 J 에 의해 생성된 B 의 분포를 얻을 수 있다.

$$\text{rot}(\nu \text{rot} \vec{A}) = \vec{j} \quad \vec{B} = \text{rot} \vec{A} \quad (6)$$

여기서, ν 는 자기저항, A 는 자계의 포텐셜 벡터를 각각 나타낸다.

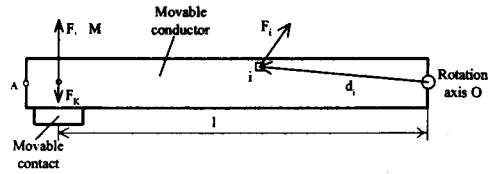


그림 2. 가동자의 형상

3. 해석모델

그림 3은 유한요소 해석을 위해 사용된 해석모델을 나타내고 있으며, 각각 다른 형상을 나타내고 있다. 여기서, CB₁과 CB₂는 고정자의 형상을 각각 수평면과 수직면을 기준으로 U자형 형태를 가진 경우, CB₃는 완전 평판, CB₄는 CB₂와 동일한 형태를 나타내지만 그리드(Grid)의 형태가 짧고 내부에 U형상 요크를 추가한 경우 그리고 CB₅는 CB₁에서 그리드를 삭제한 경우이다.

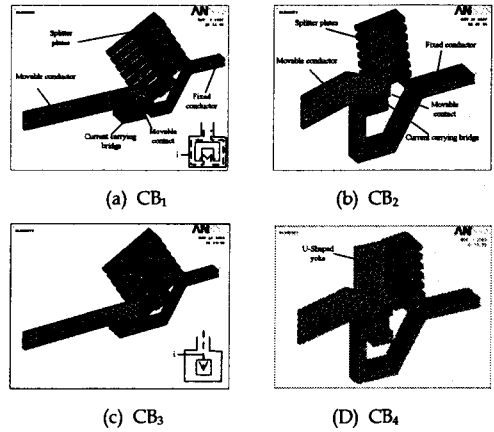


그림 3. 해석모델

그림 4는 CB₃ 해석모델에 대한 전류분포를 나타내고 있다. 전류분포의 예로부터 알 수 있듯이, 접점근처의 전류밀도가 가동자보다 매우 높은 전류밀도를 나타낸 것을 알 수 있다.

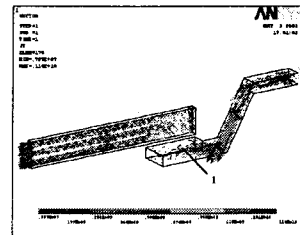


그림 4. 전류분포(CB₃)

표 3은 CB₁모델의 경우 전류와 반발력 사이의 상관 관계를 나타낸 것으로 반발력은 전류자승에 비례함을 알

수 있다. 그리고 전류집중에 의한 반발력 F_H 는 전체 반발력의 약 70%를 차지하는 것으로 나타났다.

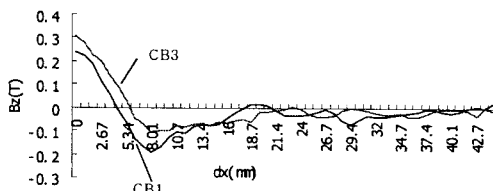
표 3. 전자 반발력과 전류사이의 상관관계

전류(kA)	$F_L(N)$	$F_H(N)$	Total(N)
2.5	0.96	2.27	3.23
5	3.35	9.03	12.38
7.5	6.63	20.24	26.87
10	10.71	35.88	46.59

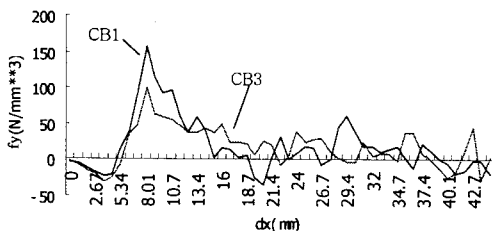
표 4는 전류가 10kA인 경우, 해석모델에 대한 전자 반발력을 계산한 결과를 나타내고 있다. CB_1 과 CB_3 을 비교해 보면, 고정자의 형상변화에 따라 반발력이 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 수평면을 기준으로 한 U자 형상으로 인해 접점근처의 자계로 인해 반발력이 증가하는 것으로 생각된다. 그리고 그리드가 없는 경우(CB_5)의 F_L 은 CB_1 에 비해 약 40%정도 감소하였다. 또한, CB_2 의 그리드를 짧게 하고, U자 형상 요크를 추가한 경우(CB_4)에 F_L 은 증가하는데, 이것은 배선용 차단기의 차단성능을 향상시키기 위해 적용되는 가스유동을 이용한 아크 소호기술을 적용하는데 있어 매우 편리한 방법으로 생각된다.

표 4. 계산결과(10kA)

Model	Radius of current carrying bridge(mm)	$F_L(N)$	$F_H(N)$	Total(N)
CB_1	0.0443	10.71	35.88	46.59
CB_2	0.0443	8.54	34.49	43.03
CB_3	0.0443	6.00	35.48	41.48
CB_4	0.0588	12.34	30.98	43.32
CB_5	0.0588	15.04	31.10	46.14



(a) Z성분의 자계분포



(b) Y성분에 작용하는 힘의 분포

그림 5. 가동자에 작용하는 자계 및 힘의 분포

4. 실험방법 및 결과

4.1 실험방법

그림 6은 해석결과의 타당성을 검증하기 위해 사용된 실험회로를 나타낸 것으로 실험전류는 LC공진회로를 통해 발생된다. 실험에 사용된 전류는 $10kA_{rms}$, 주파수는 50Hz이다. 그리고 아크전압 및 전류측정을 위해 분압기 및 로고스키 코일을 각각 사용하였다.

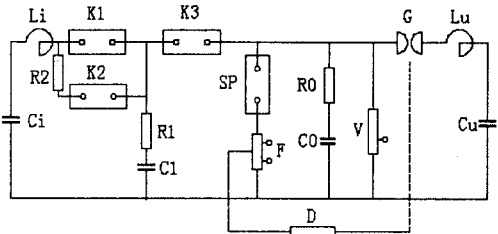


그림 6. 실험회로

4.2 힘의 측정

가동자에 작용하는 힘을 측정하기 위하여 로드셀 (Load Cell)을 사용하였으며, 실험대상은 CB_3 모델을 4배로 확대하여 구성하였다. 그림 7은 실험전류가 10kA인 경우, 가동자에 작용하는 힘을 측정한 것이다. 이때, 초기에 작용하는 힘은 25.1N으로 동일하게 하였으며, 절점재질은 동(Cu) 그리고 매개변수 ξ 는 0.45로 가정하였다. 표 5의 결과에서 알 수 있듯이 해석결과와 실험결과가 거의 일치함을 알 수 있다. 그러므로 본 연구에서 사용된 원통형 절점속모델이 배선용 차단기의 전자 반발력을 해석하는데 있어 매우 타당하다고 할 수 있다.

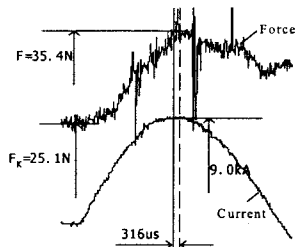


그림 7. 전류에 따른 반발력 측정결과

표 5. 해석 및 실험결과

전류파크(kA)	상간차(ms)	해석 F(N)	실험 F(N)	상대적 에러(%)
9.0	0.316	37.84	35.4	6.4

4.3 개리시간 측정

전자 반발력이 작용하는 경우 가동자의 개리시간을 측정하였다. 실험에 사용된 모델은 CB_2 이며, 실험전류는 10kA로 하였다. 그림 8은 아크전류 및 전압파형을 나타내

고 있다. 가동자의 개리시간은 아크전압 파형으로부터 분석할 수 있으며, 이 경우 가동자의 개리시간은 759 μ s, 전류는 3,033A로 나타났다. 이때, CB₂의 접촉력은 4.4N이다. 이 결과를 해석결과와 비교하면 해석결과보다 약간 높게 나타날 수 있는데, 이는 실험모델의 회전축에 작용하는 마찰력때문인 것으로 생각된다.

예상 전류 피크 값이 10kA와 함께, 반복 과정을 이용하여 계산결과는 전류가 3,020A로 상승할 때 가동자의 개리 시간은 674 μ s를 나타낸다. 실험 데이터와 비교하면 회전축의 마찰력의 영향 때문에 아마도 계산결과는 실험 결과 보다 약간 적을 것이다. 위의 분석으로부터 제안된 방법은 어떤 사고 전류에 따라 가동자의 개리시간을 계산하는 것이 가능하다는 것을 증명하고 있다.

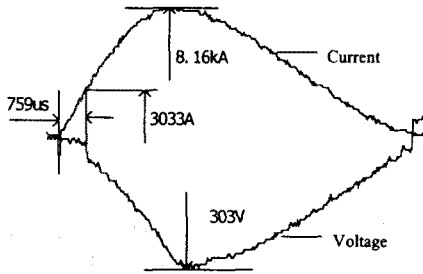


그림 8. 아크전류 및 전압파형(CB₂)

5. 결 론

본 연구에서는 유한요소 해석법을 이용하여 가동자의 구조가 다를 때, 전자 반발력을 계산하였으며, 해석결과 타당성을 실험적으로 검증한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 배선용 차단기의 전자 반발력 계산을 위해 사용된 원통형 접촉모델의 타당성을 검증하였다. 이는 배선용 차단기의 가동자 구조 최적화에 적용될 수 있을 것으로 생각된다.
- (2) 접점근처에 작용하는 반발력은 전체 반발력의 약 70%를 차지하는 것으로 나타났다.
- (3) 배선용 차단기에 적용되는 그리드는 자기 구동력 뿐만 아니라 반발력의 증가에 매우 효과적이라는 것을 확인할 수 있었다.
- (4) 수평면을 기준으로 U자 형상을 가진 고정자가 가장 높은 반발력을 나타내었다. 그리고 U자 형상의 요크와 짧은 그리드의 경우가 반발력을 증가시킬 뿐만 아니라, 요크의 내벽에 가스화 물질을 고정시킴으로써 차단성능을 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다.

[참 고 문 헌]

- [1] R.Holm, " Electric Contacts", 4th Ed, Springer-Verlag, 1967
- [2] Hartwig Stammberger, Force Calculation for the Movable Contact of Circuit Breakers, 19th International Conference on Electric Contact Phenomena, 14-17 Sep, 1998, Nuremberg, Germany, 369-374
- [3] Sun Haitao, Chen Degui, Li Xingwen, Liu Qingiang, Analysis on three-dimension magnetic field of contact systems of low-voltage molded case circuit breakers Analysis on three-dimension magnetic field of contact systems of low-voltage molded case circuit breakers, Transactions of China Electrotechnical Society, 2002(8), 31-35
- [4] Yoshihiro Kawase, Hiroyuki Mori and Shokichi Ito, 3-D Element Analysis of Electrodynamic Repulsion Forces in Stationary electric Contacts Taking into Account Asymmetric Shape, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 33, No. 2, March, 1997, 1994-1999
- [5] Shokichi Ito, Yoshiaki Takato, Yoshihiro Kawase and Tomohiro Ota, Hiroyuki Mori and, Numerical Analysis of Electromagnetic Forces in Low Voltage AC Circuit Breakers Using 3-D Finite Element Method Taking into Account Eddy Currents, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.34, No. 5, September, 1998, 2597-2600