

유한요소해석을 통한 횡자계 방식의 진공인터럽터 전극의 로렌츠 힘 분석

김병철, 윤재훈, 허준, 강성화*, 임기조
충북대학교, 충청대학*

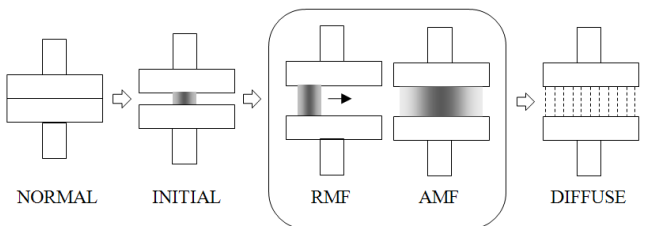
Analysis of Lorentz force of radial magnetic field type vacuum interrupter using finite element method

Byoung Chul KIM, Jae Hun YOON, Jun HOE, Seong Hwa KANG*, Kee Joe LIM
Chungbuk University, Chungcheong University*

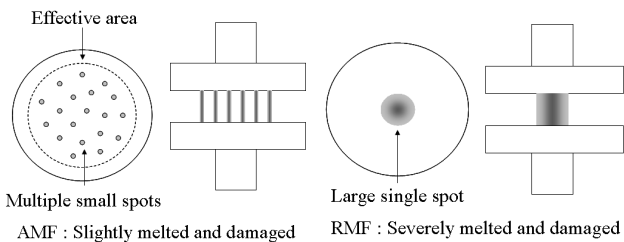
Abstract - There have been few papers using finite element method(FEM) to analyze arc driving force for spiral type vacuum interrupter electrode up to date while there have been many papers dealing with AMF type electrode by means of FEM. AMF analysis is very important in AMF type electrode because it has proportional relation with effective area which means the area of magnetic flux density above critical magnetic flux density to diffuse arc. In the same manner, arc driving force is an important factor to drive arc by Lorentz force. In this paper two models were calculated and compared by using commercial FEM software Maxwell 3D.

1. 서 론

진공인터럽터는 아크소호방식에 따라 축자계방식(AMF)과 횡자계방식(RMF)으로 나뉜다. 축자계방식은 두 전극이 떨어지면서 발생하는 아크를 통하여 흐르는 축방향의 전류와 이에 평행한 축자계사이에서 작용하는 힘으로써 핀치효과에 의한 아크의 수축을 방해하여 최대한 아크를 전극표면에 고르게 분산시켜 전극표면의 손상을 방지하는 방법인 반면 축자계가 없는 횡자계방식은 핀치효과에 의한 아크수축을 막을 수가 없다. 따라서 횡자계방식에서는 전극의 형상에 의해 발생하는 횡자계와 축방향으로 흐르는 전류사이에서 작용하는 로렌츠 힘에 의해 아크를 한 곳에 머무르지 못하도록 구동시키게 된다. 그림1은 축자계방식과 횡자계방식 각각에서 아크가 확산되기까지의 과정을 보여주는 그림이며 그림2는 핀치효과와 관련하여 AMF, RMF에 대하여 상술된 내용과 관련된 그림을 나타낸다. 본 논문에서는 상용 유한요소해석 소프트웨어인 Maxwell 3D를 사용하여 전극상의 petal수가 4개일 경우 고정접점전극과 가동접점전극이 마주보고 있는 형상의 경우와 고정접점전극을 고정시켜두고 가동접점전극을 세로축을 기준으로 회전시켜 마주보고 있는 각을 변화시켰을 경우의 로렌츠 힘을 계산 및 비교하여 두 전극이 마주보는 각이 로렌츠 힘에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.



<그림 1> RMF와 AMF의 아크소호과정



<그림 2> RMF/AMF 방식의 아크형상 비교

2. 본 론

2.1 관련 이론

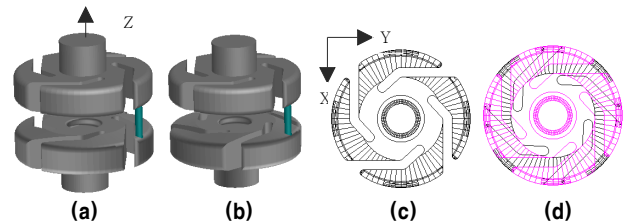
전하량이 q이고 입자의 속도가 v인 단일 전하 캐리어는 자속 밀도가 B인 자계내에서 로렌츠 힘에 의해 힘을 받는데 그 힘은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$d\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \times d\vec{B}) \quad (1)$$

$$\vec{F} = I \cdot (\vec{L} \times \vec{B}) \quad (2)$$

이런 식으로 자속밀도 B와 전류 I에 의해 작용하는 로렌츠 힘으로 수축된 아크를 구동시켜 접점전극 표면의 과열에 의한 손상을 최소화할 수 있다.

2.2 3차원 유한요소해석 모델



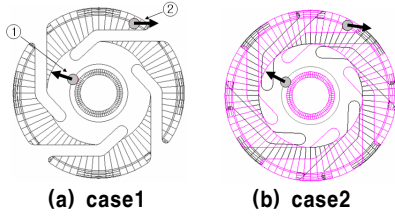
<그림 3> 3차원 유한요소해석 모델
(a): 두 전극이 서로 마주보고 있는 모델
(b): 두 전극 중 가동접점전극을 Z축을 중심으로 45도 회전시킨 모델
(c),(d): (a),(b)각각에 대한 평면투시도

본 논문에서 사용한 모델은 4개의 petal을 가지고 있다. 그림 3(a)은 고정접점전극과 가동접점전극이 서로 마주보고 있는 경우이며 그림3(b)는 가동접점 전극을 Z축을 중심으로 45도(90도를 회전시킬 경우 그림3(a)과 동일하므로 45도가 최대회전각) 회전시킨 경우이다. 그림3(c),(d)는 비틀린 두 전극의 형상확인이 용이하도록 나타낸 평면투시도이다. 그림(d)의 경우 두 전극의 용이하도록 고정접점전극은 분홍색으로 가동접점전극은 검정색으로 각각 나타내었다. 전극의 직경은 44.5mm이며 아크의 직경은 1.2mm이다. 전극간 거리는 4mm일 때로 정하였으며 전극 상에 존재하는 slot의 폭은 1.5mm이다. 아크는 모델의 단순화를 위해 원통형으로 하였다. 실제로 아크중심축에 작용하는 힘은 부위마다 다르기 때문에 유체인 아크는 로렌츠힘에 의해 구동되면서 구동 중에 외형변형을 동반한다. 따라서 모델링은 원통형으로 하되 원통형의 아크의 중심축이 받는 힘을 벡터로 나타내어 그 형상을 어렵지않게 할 수 있도록 하였다.

<표 1> 해석모델 각 부분의 재료속성

재료명	도전율[S/m]	비투자율	
Arc cylinder	arc	2000	1
Contact electrode	CuCr50	1.8×10^7	1
Conducting rod	copper	5.8×10^7	1
Vacuum	vacuum	0	1

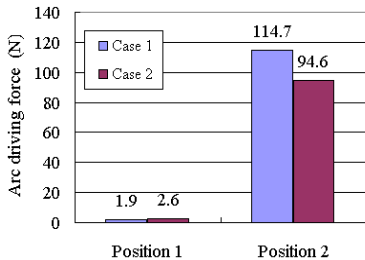
2.3 해석 방법



〈그림4〉 모델별 아크위치와 위치별 로렌츠 힘 방향

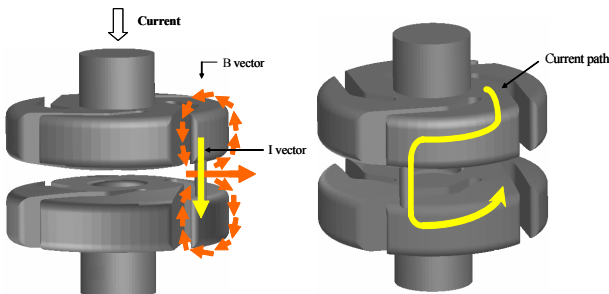
일반적으로 아크의 소호시간은 두 전극이 떨어지는 시점부터 전류영점까지의 시간으로써 전류파형의 반주기내의 범위를 갖기 때문에 이 시간동안 전류의 방향은 한 방향이다. 따라서 전류 영점이전에 전극이 벌어져 갭 거리가 4mm가 되는 순간 25kA의 전류가 흐른다고 가정하고 갭 거리를 4mm로 맞추고 25kA의 직류전류를 인가하여 시뮬레이션을 하였다. 전류차단시 전극이 벌어지면 아크가 특히 접촉부의 안쪽부분에서 발생하여 방사상의 바깥부분으로 구동된다는 점을 고려하면 그 힘이 다른 어느 부분보다도 작은 ①번 위치에서의 구동력향상이 중요하다고 판단되고 로렌츠 힘은 petal 끝부분의 ②번 위치에서 가장 크므로 이 두 위치에서 로렌츠 힘을 비교하였다.

3. 해석결과



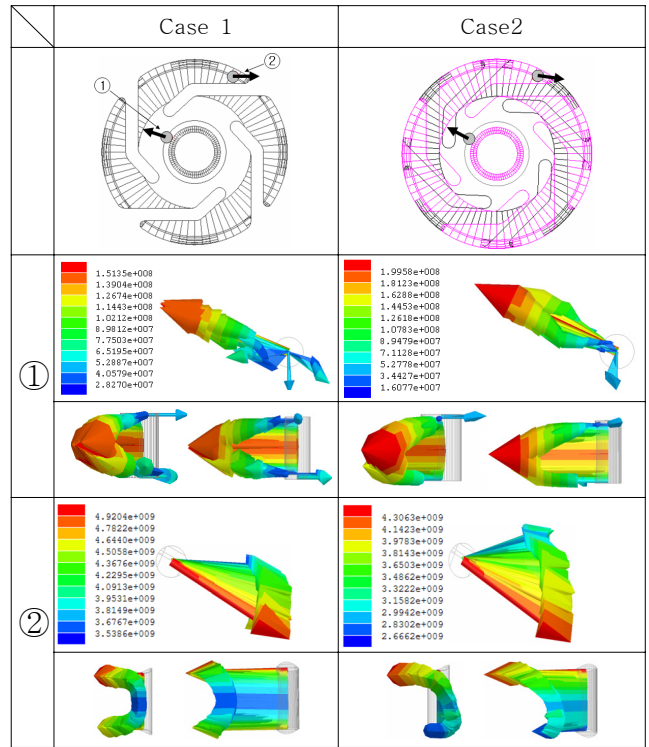
〈그림6〉 아크위치별 로렌츠 힘 비교

그림6은 두 case에 대한 로렌츠 힘의 계산결과 값이다. 이때 힘은 아크가 받는 모든 힘들을 더 한 총 힘(Net force)으로서 이 힘은 아크가 전체적으로 받는 힘을 나타낸다. 로렌츠 힘은 벡터 값이므로 단순 스칼라량으로 이를 비교설명하기에는 부족하다. 따라서 그 힘의 방향은 그림4에 표시하였다. 그림4의 로렌츠 힘의 방향을 보면 알 수 있듯이 각 위치에서 벡터 방향은 거의 비슷하였지만 아크가 petal의 끝부분에 위치하고 있는 ②번 위치의 경우 아크를 원주방향으로 구동시키기 위해서는 벡터방향이 원형인 전극의 접선방향에 가까울수록 좋다고 할 수 있는데 해석 결과로부터 ②번 위치에서 case2의 경우가 비록 그 힘의 크기는 작지만 case1보다는 접선방향에 가깝다. case1의 경우는 case2의 경우보다 접선방향에서 벗어나며 힘도 크기 때문에 전극바깥방향으로 아크구동궤도를 탈선할 가능성이 커진다고 할 수 있다.



〈그림8〉 Case 1의 Position2

비록 그림4에 아크전체에 작용하는 힘을 하나의 벡터로 표시를 하였지만 실제로 아크세로축 상의 각 지점에 작용하는 힘의 크기와 방향은 다르다. 따라서 case별 아크중심축 각 부분들이 받는 힘을 그림7에 나타내어 비록 모델링은 원통형으로 하였지만 아크는 유체상태이므로 이동시에 외형변형을 동반하게 되는데 그림7과 같이 아크 각 부분에 작용하는 힘을 나타냄으로써 그 외형변형을 짐작할 수가 있도록 하였다.



〈그림9〉 모델별 아크중심축 각 부분이 받는 상대적인 힘

3. 결 론

본 논문에서는 상용유한요소해석 소프트웨어인 Maxwell 3D를 사용하여 spiral type 진공인터럽터 전극의 로렌츠 힘을 계산 및 비교분석하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 아크가 접점전극의 중심부에 가까이 있는 위치①에 있을 경우 case2가 case1보다 로렌츠 힘이 더 컸다. 이는 접점전극 중심부에서 로렌츠 힘이 가장 작기 때문에 case2에서 큰 의미를 갖는다고 할 수 있다.
2. 아크가 petal 끝부분에 위치하고 있는 ②번 위치에 있을 때는 case1이 case2보다 로렌츠 힘이 더 컸다. 여기서 로렌츠 힘만을 고려하면 case2가 작지만 아크의 이동궤적방향이 원주방향이라는 점을 고려하면 case1이 구동력이 높고 그 방향이 바깥방향을 하고 있어 케로를 이탈할 가능성이 높은 반면 case2는 로렌츠 힘은 상대적으로 작고 그 방향도 원주방향으로 구동되기에 더 적합하다는 결론을 얻을 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 대학전력연구센터 지원사업의 지원으로 이루어졌으며, 이에 관계자 분들께 감사드립니다.

【참 고 문 헌】

- [1] DULLNI, "Motion of high-current arcs on spiral-type contacts", IEEE Transactions on plasma science, Vol.17, No.6, 1989
- [2] Edgar Dullini, "Vacuum arcs driven by cross-magnetic fields(RMF)", XXth ISDEIV-Tours, December 2002.
- [3] M. Bruce Schulman, "The Behavior of Vacuum Arcs Between Spiral Contacts with Small Gaps", IEEE Transactions on plasma science, Vol.23, No.6, December 1995.
- [4] M. Bruce Schulman, "Separation of Spiral Contacts and the Motion of Vacuum Arcs at High AC Currents", IEEE transactions on plasma science, Vol.21, October 1993.
- [5] Paul G. Slade, "The vacuum interrupter contact", IEEE Transactions on components, hybrids, and manufacturing technology, Vol. CHMT-7, No. 1, March 1984.
- [6] Wilfried Haas and Werner Hartmann "Investigation of Arc Roots of Constricted High Current Vacuum Arcs", IEEE Transactions on plasma science. Vol. 27. No. 4, AUGUST 1999.