

## 철도 차량용 직류 고속도 차단기의 그리드 특성 해석

### Effects of Grid Characteristics on High Speed Circuit Breaker for Railway Vehicle

박지원 · 정주영 · 최진일\*

Ji-Won Park · Joouyoung Jung · Jinnil Choi

**Abstract** High speed circuit breakers(HSCB) interrupt the generated arc within the arc chute to turn off the electricity flowing through the main circuit to prevent ground faults. In order to explore the arc generated from the contactor operation, arc definition, establishment of arc interruption method, and analysis of magnetic driving force are required. In this paper, arc interruption capability has been estimated by exploring the difference in magnetic flux density of Lorenz forces using finite element analysis. In addition, since the number of grids and changes in the grid shape within the arc chute influence the formation of the inner magnetic field, its effects have been explored to enhance arc interruption capability. Assessment of interruption capability and analysis of grid shape, with rated operating current, are reported.

**Keywords** : High speed circuit breaker, Arc-chute, Grid, Lorenz force

**초 록** 철도차량용 직류 고속도 차단기(HSCB)는 주 회로에 흐르고 있는 전류를 정상 차단시 아크 슈트 내부에서 발생아크를 소호하여 접지사고를 방지하는 기능으로 사용되고 있다. 선로에 사용되는 접촉기의 개방시에 발생하는 아크를 연구하기 위하여 아크 구현, 외부자계 등에 의한 효과적인 아크 소호의 방식 정립 및 아크 자기 구동력의 해석이 필요하다. 본 논문은 전자접촉기의 정상 차단시 발생하는 아크를 자속밀도 차와 로렌츠력을 통하여 소호능력을 예측하였다. 아크 슈트 내부의 그리드 개수와 형상은 내부 자계 형성에 영향을 미치므로, 유한 요소법을 이용하여 그리드의 변화에 따른 아크 소호능력을 연구하였으며 정격전압에 따른 그리드의 소호능력 평가와 그리드 형상 특성을 해석하였다.

**주요어** : 직류 고속도 차단기(HSCB), 아크슈트, 그리드, 로렌츠력

## 1. 서 론

통상적으로 해외 철도 차량 가선 직류전압은 3kV이며 국내 도시철도에서는 DC 750V, 1.5kV를 표준으로 사용하고 있다[1]. 가선전압이 높을수록 열차의 차량 수 증가와 장대 편성화와 같은 이점을 갖고 있어 DC 3kV와 1.5kV를 겸용으로 사용되는 개발이 필요할 것으로 보인다[2,3]. 높은 가선전압 뿐만 아니라 표준전압에서도 철도기기 대전류 차단은 빠른 시간내에 안정적으로 이루어져야 하며, 만약 사고전류를 빠른 시간내에 차단하지 못하게 되면 재점호로 인한 큰 사고로 이어질 수 있다. 이와 같은 사고를 방지하기 위해서는 DC 1.5kV 이상의 송전 전압에서도 사용될 수 있는 차단기를 설계하기 위한 연구 및 설계 기술의 향상이 필요하다[4,5]. 이를 위하여 접촉기의 접점 개방시에 발생하는 아크 형성에 대한 효과적인 소호방식 정립 및 자기구동력 해석의 필요성이 증대되고 있다[6]. 따라서 본 연구에서는 구동력간에 자속밀도 차를 통해 소호능력을 예측하는 방법으로 다양한 재질에 따른 아크 모델을 구현 및 검증하였으며, DC 1.5kV와 DC 4.0kV급 아크슈트의 그리드 개수 및 형상에 따른 소호력 특성을 연구하였다.

## 2. 직류 고속도 차단기

### 2.1 직류 고속도 차단기 특성

직류 고속도 차단기는 접촉자를 개방하여 해당 회로의 단락 전류를 차단하는 기능을 한다. 이는 크게 주접촉자와 가동부 그

\*Corresponding author. Tel.: +82-42-821-1083, E-mail: jlchoi@hanbat.ac.kr.

© 2016 The Korean Society for Railway. All rights reserved.

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2016.19.2.117>

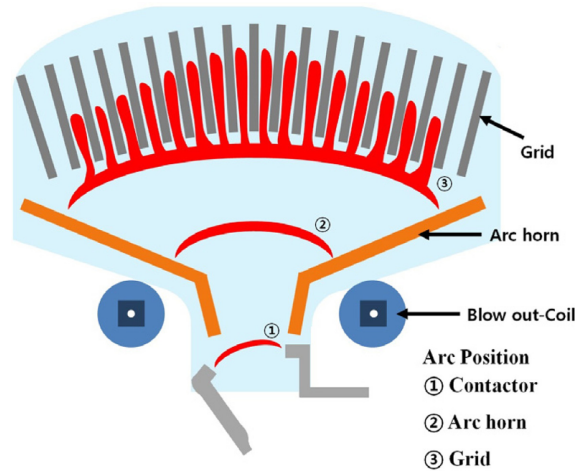


Fig. 1. A Schematic diagram of the arc interrupting process.

리고 아크슈트로 나뉘며 아크슈트는 아크를 소호하는 주된 역할을 수행하게 된다.

Fig. 1에서 고장 전류 발생시 전자 코일에 의해 가동 접점이 개방하게 되고 이와 동시에 아크는 발생하게 된다. 발생한 아크는 블로우 아웃코일을 동작시켜 자계를 형성하게 된다. 자계에 의해서 아크는 아크 혼을 따라 아크슈트로 향하게 되고 그리드는 아크를 냉각 및 확산시켜 소호한다.

## 2.2 직류 고속도 차단기 소호 특성

도전율이 일정치 않은 금속상태의 기체를 통해서 이동하게 되는 아크 전류는 소호실 내부에 일정 간격으로 적층되어 있는 강자성체 그리드로 흡입되고 흡입된 아크는 그리드를 통해 직렬 분할되어 차단된다[7]. 이로 인해 아크 전압이 커지게 되며 주 아크의 직경은 감소하게 되고 고장전류는 차단되게 된다[8]. 그리드가 아크를 빠른 시간 내에 흡입하기 위해서는 형상과 적층된 간격, 재질과 같은 여러 요소들이 작용하게 되며 자기의 밀도 향상이 아크차단에 높은 기여를 하게 된다[9].

아크는 자기 구동력에 따라 이동경로가 길어지게 되므로 발생전류는 감소하게 되고 차단성능은 높아진다고 볼 수 있다[10]. Fig. 1은 아크의 경로를 나타낸 것이며 전류에 의한 자속은 들어가는 방향으로부터 항상 시계방향으로 회전을 하며 주변 영향에 따라 자속밀도 차와 로렌츠력(Lorenz force)이 발생하게 된다. 고장전류는 자력을 띄게 되는데 정상차단 전류와 고장전류의 자속밀도 차를 이용하여 차단성능 평가가 가능하다.

$$\vec{F} = \int_v \vec{J} \times \vec{B} dv \quad (1)$$

여기서  $\vec{J}$ 는 전류밀도,  $\vec{B}$ 는 자속밀도이다.

식 (1)과 같은 전자력에 의해 구동력의 세기를 결정하게 되는 데 아크의 위쪽, 즉 그리드에 가까운 영역에서는 고장전류가 발생하는 역구동력을 형성하게 되며 아래쪽은 정상차단전류가 발생하는 순구동력을 형성하게 된다[11].

## 3. 직류 고속도 차단기 소호 개량

### 3.1 아크 구현 및 슈트모델

고전압 아크슈트 기술 개발에 있어서 다양한 아크제어 관련 부품의 해석이 요구되고 있다. 높은 가선 전압의 선로에 적용 가능한 아크슈트 설계를 위하여 아크 소호력에 대한 최적화 연구가 필요하다. 이론 검증을 위해서 Fig. 2에서 보인 것과 같이 가선 전압 DC 1.5kV급으로 사용되는 Model A와 DC 4.0kV급으로 사용되는 Model B를 통해서 해석을 진행하였다. Model A는 다른 두개의 그리드가 일정 간격을 두어 적층되어 있으며 Model B는 같은 모양의 그리드가 서로 대칭으로 적층되어 있다.

해석 진행은 3차원 해석 조건을 부여하여 그리드가 아크에 영향을 미칠 수 있는 재질, 개수, 형상 등의 변화를 통해 데이터 검증 및 소호력 평가를 위한 구동력과 자속밀도 해석을 진행하였다. 역구동력과 순구동력에 대한 해석을 진행하기 위해서 아크

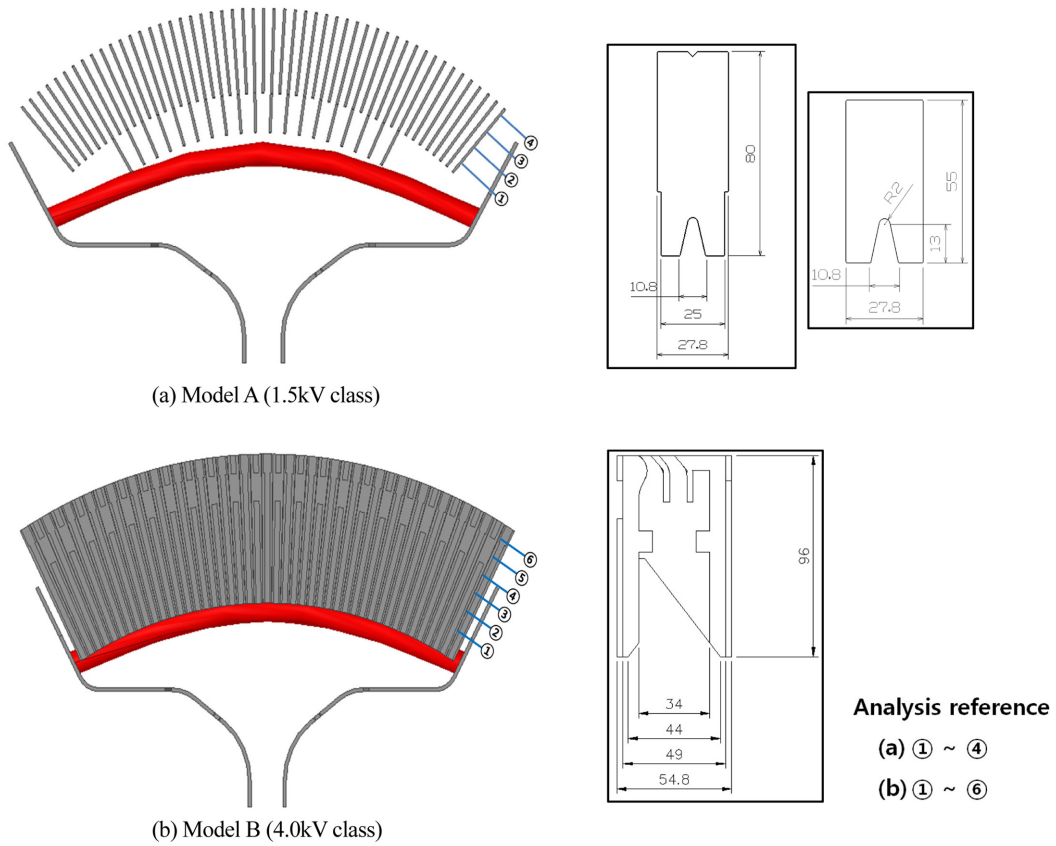


Fig. 2. Design of arc-chute models[12].

상단의 자속밀도와 아크 하단의 자속밀도를 확인해야 한다. 아크의 중심을 가로지르는 해석 기준선을 만들어 자속밀도 차를 확인하는 방법으로 진행하였으며 그에 따른 로렌츠력을 파악 하였다.

### 3.2 그리드 재질 및 개수

강자성체는 자기 포화능력이 높아 그리드로 사용되고 있다. 그러나 상자성체는 자속에 대한 일정한 자속분포를 형성하지 않기 때문에 그리드의 사용은 적합하지 않다. 따라서 아크슈트 내부에 사용하는 그리드는 강자성체 재질이 많이 사용되고 있어 세라믹과 코발트, 니켈, 철 등의 여러 강자성체의 자속분포를 확인하였다.

Fig. 3은 아크슈트의 자속밀도 분포를 나타내며 자성체 그리드에 자속밀도가 분포되어 있음을 볼 수 있다. 일정 간격으로 적

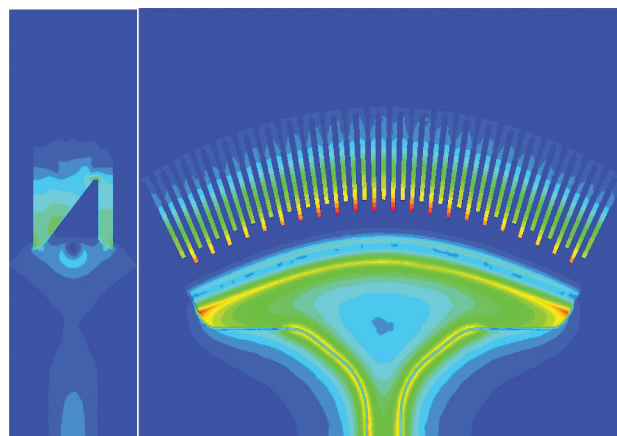


Fig. 3. Contour of magnetic flux density for ferromagnetic grids.

층된 그리드에 자속밀도가 분포되면 아크의 역구동력에 의한 고장전류가 발생하는 영역인 아크 기둥의 상단부 자속밀도가 낮음을 확인할 수 있었다.

그리드의 개수가 증가 하게 되면 아크의 전압이 높아져 차단 성능은 높아질 것이다. 그에 따라, 아크슈트 내부에서 아크 소호에 필수적인 자성 그리드는 가선 전압이 높을수록 많은 적층을 요구하게 되므로 그리드 적층 개수에 따라 아크의 구동력과 소호능력 해석을 진행하였다.

### 3.3 그리드 형상

두 모델의 로렌츠력을 비교 및 해석 결과, Model A의 그리드 개수가 많음에도 불구하고 Model B의 사양이 2배 이상 높은 것으로 나타났다. 그리드는 비대칭인 형상으로 적층되어 있을 때 자속밀도와 로렌츠력이 높은 것으로 보고되고 있으며[13], 그와 같이 Model B 그리드도 비대칭 형상으로 적층되어 있어 높게 나타나는 것으로 판단된다. 두 모델의 가장 큰 차이는 그리드의 형상과 개수이다. Model A의 형상은 긴 그리드와 짧은 그리드가 적층되어 있는데 긴 그리드에 분포된 자속에 비해 짧은 그리드는 자속이 낮아 아크에 영향을 미치지 못할 것으로 보인다. 그에 반해 Model B의 형상은 일정간격으로 아크와의 거리는 동일하게 적층되어 있으므로 모든 그리드가 아크에 균일하게 영향을 미칠 수 있어 소호력 면에서 뛰어나게 나타나는 것으로 확인하였다(Table 1).

Table 1. Characteristics of arc chute models.

Model	Rated operating voltage (V)	Number of grid	Lorenz force (N)
A	1.5kV	52	61.98
B	4.0kV	45	124.46

## 4. 시뮬레이션

### 4.1 아크에 의한 자속 분포 해석

아크는 이온과 전자에 의한 전류로 기계적인 힘, 자기적 힘의 합성에 의해 변형된다. 아크 내의 모든 입자 운동을 정확히 알기 어렵고 계산하기 쉽지 않아 시뮬레이션을 위해서는 단순화가 필요하다. 시뮬레이션은 아크에 영향을 미칠 수 있는 그리드의 재질, 개수, 형상 등의 변화를 통해 데이터 검증 및 소호력 평가를 위한 구동력과 자속밀도 해석을 진행하였다.

Fig. 4는 두 모델의 그리드에 각각 작용하는 자속밀도 해석결과를 나타낸다. 각 그리드 내부에 자속밀도를 확인하기 위해 Fig. 2와 같이 적층된 그리드의 형태를 따라 일정 간격을 둔 기준선을 만들어 해석을 진행하였다. 기준선에 따른 해석 결과, 두 모델 모두 아크와 가까운 곳일수록 자속밀도는 더욱 크게 나타났다. 중간과 양 끝점에 자속밀도가 비교적 높고 아크와의 거리가 멀어질수록 자속 밀도가 균일한 것으로 그려진다. 양 끝점은 아크 혼에 의한 영향을 받게 되어 자속밀도가 높게 나타나게 된다. Model A에서는 그리드 내에 자속밀도가 전체적으로 낮게 나온다. 이는 아크에 순구동력이 낮음을 의미하게 되는데 소호능력이 낮다고 판단할 수 있고 그리드의 형상에 대한 요인으로 볼 수 있다.

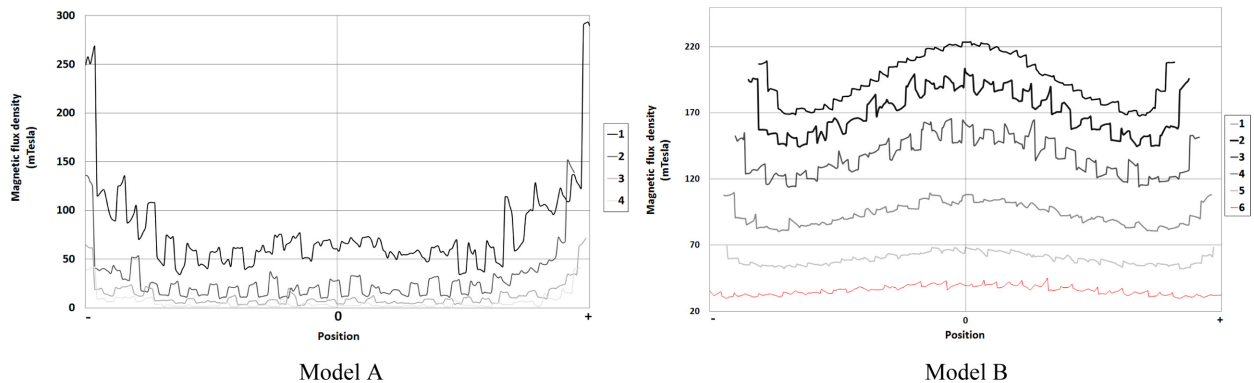


Fig. 4. Graphs of magnetic flux density for different models.

### 4.2 그리드 재질 및 개수 해석

아크를 가로지르는 기준선 해석을 통하여 Fig. 5에서는 역구동력과 순구동력의 자속밀도 차를 나타내었으며 Table 2와 같이 서로 다른 재질에서의 구동력을 볼 수 있다. 구동력의 차이는 비투자율에 의한 차이로 보인다. 아크에 의해 발생된 자속은 전류와 쇄교하게 되는데 비투자율이 높을수록 쇄교하는 양이 증가하게 되어 소호력은 더욱 높아지게 되는 것으로 볼 수 있다.

그리드 개수에 대한 해석은 동일한 세라믹 재질 그리드를 사용하였으며 Table 3과 같이 그리드의 개수를 줄여가며 해석을 진행하였다. 그리드의 개수가 증가함에 따라서 아크를 흡인하려는 힘은 강해져 로렌츠력이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 그리드 개수 증가로 인해 간극이 줄어들며 그리드 사이에 분포되는 아크의 전자력이 증가하여 로렌츠력이 향상되는 것으로 판단된다.

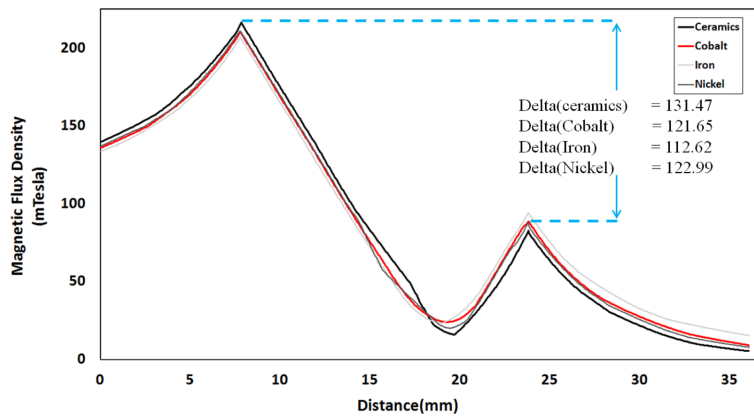


Fig. 5. Graphs of magnetic flux density for paramagnetic and ferromagnetic grids.

Table 2. Lorentz force for different grid materials.

Material properties	Lorentz force (N)
Ceramics	124.46
Cobalt	112.14
Nickel	114.10
Iron	103.60

Table 3. Lorentz forces for different number of grids.

Number of grids	Lorentz Force (N)
20	111.58
22	114.27
24	116.59
28	119.90
32	122.00
36	123.33
40	124.00
45	124.46

### 4.3 그리드 형상 해석

그리드 형상에 대한 아크 소호력 평가를 위해 서로 다른 그리드를 적층시켜 해석을 진행하였다. Fig. 6과 같이 그리드 형상에 대한 소호능력을 비교하기 위해 여러 변수를 두어서 비대칭 형상에 대한 해석을 진행하였다.  $t_1$ ,  $t_2$  및  $h$ 를 고정하고  $\theta$ 의 증가에 따른 아크 성능 평가를 진행하였다. 해석은 40°에서부터 67°로 형상이 대칭을 이룰 때 까지 진행하였다.  $\theta$ 가 증가하게 되면 비대칭성은 줄어들게 되고 Table 4에서 보인 것과 같이 소호력은 감소되었으며 40°에서 로렌츠력이 가장 높은 것으로 확인

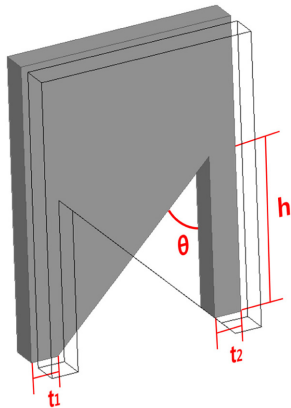


Fig. 6. Geometries of grid variation model.

Table 4. Lorenz force for different angles.

Degree	Lorenz force (N)
40°	87.53
45°	83.75
50°	79.72
55°	76.69
60°	74.24
67°	71.99

할 수 있었다.

초기 설정  $\theta$ 보다 더 작게 설계를 할 시 두께가 일정하지 않은 형상을 띄게 된다. 해석 결과  $\theta$ 가  $36^\circ$  일 경우 로렌츠력이 조금 향상 되었으나(92.2N), 이러한 형상은 설계시 제작의 어려움이 있으며 아크 소호과정에서 아크에 의한 열에 그리드가 휘게 되어 형상이 변하므로 초기 설정 값을  $40^\circ$ 로 설정하였다.

Fig. 7은 그리드의 비대칭 특성을 심층적으로 분석하기 위해 밀변 두께 비율( $t_1/t_2$ )을 조정하여 진행하였다.  $t_2$ 의 길이가 줄어들 시 일정 길이 이하가 되어야 초기 형상 값보다 높은 로렌츠력을 확인할 수 있었고  $t_2$ 의 값이 커지게 되면 로렌츠력이 향상 되는 것을 볼 수 있었다. 자속의 방향성에 의한 것으로 볼 수 있으며 소호능력은  $t_2$ 가 가장 짧을 때가 뛰어나고 비율이 0.73일 때 좋지 못할 것으로 판단된다. 또한 아크와 같은 플라즈마는 일정한 방향성을 갖지 않으므로 필수 부품들을 필요로 하게 된다. 이로 인해 아크가 상단으로 향하게 될 때 아크가 좌우측으로 치우칠 우려가 있다. 그렇기 때문에 그리드는 교차로 적층해야할 것으로 판단되며 그리드를 교차 설계한 것이 소호능력을 높이는 것으로 확인하였다. 그리드는 전계를 통해 일정한 자계를 띄게 되며 비대칭성을 통해서 소호능력은 변화되는 것으로 확인할 수 있었고 설계 과정에 적용 가능할 것으로 보인다.

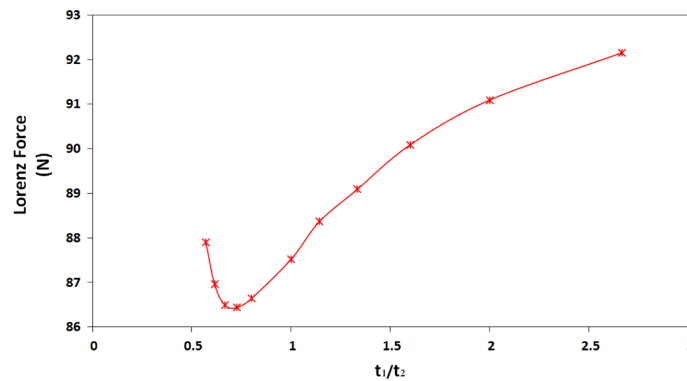


Fig. 7. A graph of lorenz force against grid thickness ratio( $t_1/t_2$ ).

## 5. 결 론

자속밀도와 자기구동력의 해석을 통해 아크슈트 내부에 소호능력 평가를 시행하였다. 재질에 따른 소호능력 평가해석을 위해 여러 강자성체 간에 구동력 차이를 확인 하였으며 로렌츠력 비교 해석을 진행하였다. 아크 소호능력 향상을 위한 그리드 개수에 대한 해석 결과, 그리드의 수가 늘어남에 따라 소호능력은 향상되지만 그리드간 간극이 일정 길이 이상 줄어들었을 때에는 로렌츠력의 증가율이 감소하는 것을 확인하였다. 하지만 그리드의 적층개수는 자기포화에 영향을 미치므로 필요 설계에 맞추어 자기 포화에 의해 더 이상 자성체로서의 능력이 떨어지지 않는 수준에서 적층해야 할 것으로 판단된다. 또한, 두 모델의 비교를 통해 그리드와 아크의 거리를 동일하게 두어 균일한 영향을 줄 수 있는 설계가 소호력을 높일 수 있는 것을 확인하였다. 그리드의 형상은 아크슈트에서 아크를 소호하는 역할을 하기 때문에 각 사양에 따른 그리드 내부의 자속 밀도를 해석하였으며,

그리드 특성 해석을 위해 일정간격 교차로 적층되어 있는 그리드의 형상 해석을 하였다. 비대칭 특성으로 아크 소호능력을 높일 수 있을 것으로 확인하였으며, 이와 같은 특성이 증가할수록 향상될 것으로 판단된다. 그리드의 재질, 개수, 형상 해석 결과를 통해 아크 소호에 영향을 끼치는 내부 그리드 특성연구를 하였으며, 아크슈트 차단성능 향상을 위한 설계 과정에의 적용가능성을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 국토교통부 국토교통기술사업화지원사업의 연구비지원(15TBIP-C074020-02)에 의해 수행되었습니다.

## References

- [1] S.K. Shin, H.S. Jung, H.C. Kim, J.Y. Park (2014) Analysis of utilizing regenerative energy in railway system through a DC power simulation, *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, 63(10), pp. 1479-1484.
- [2] K.K. Lee, I.D. Kwon, E.S. Chung, J.S. Han (2012) Development for propulsion system applied dual voltage AC 25kV and 3kV, *2012 Autumn Conference of the Korean Society for Railway*, Gyeongju, pp. 1874-1879.
- [3] H.S. Jung, Y. Park, H.S. Na, S.H. Jang (2012) Performance evaluation of SHF sensor for partial discharge signal detection on DC rectifier, *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, 61(7), pp. 1056-1060.
- [4] N.G. Jun, H.S. Jung, K.W. Koo, J.M. Kim (2014) The analysis of short current on actual system through power analysis of AT feeder system for electric railway, *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, 63(11), pp. 1582-1587.
- [5] R. Ma, M. Rong, F. Yang, S. Hao, Y. Wu *et al.* (2013) Investigation on arc behavior during arc motion in air DC circuit breaker, *IEEE Transaction on Plasma Science*, 41(9), pp. 2551-2560.
- [6] Y. Fei, M. Ruiguang, W. Yi, S. Hao *et al.* (2012) Numerical study on arc plasma behavior during arc commutation process in direct current circuit breaker, *Plasma Science and Technology*, 14(2), pp. 167-171.
- [7] J.Y. Park (2013) Improvement on the current limiting characteristics of MCCB through design of mechanism and arc quenching unit, PhD Thesis, Chungbuk National University.
- [8] J.H. Hwang, J.C. Lee, Y.J. Kim (2008) Effects of electrode configurations on the characteristics of axial magnetic fields in vacuum interrupter, *The Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, A32(1), pp. 7-12.
- [9] B.H. Min, W.J. Jang, I.S. Ko (2006) The characteristic study for small current breaking of high speed DC circuit breaker, *The Transaction of the Korean Institute of Electrical Engineers*, 55B(8), pp. 396-402.
- [10] K. Sawa, M. Tsuruoka, M. Morii (2014) Fundamental characteristics of arc extinction by magnetic blow-out at DC voltage(<500V), *2014 IEEE 60th Holm Conference on*, New Orleans, LA, pp. 1-6.
- [11] Y.K. Choi, C.K. Park (2004) Development of 460V/225A/50kA Contact system in current limiting MCCB using an estimation and analysis method for the interrupting capability, *Journal of the Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, 18(1), pp. 78-84.
- [12] www.wjem.co.kr (Accessed 1 October 2015).
- [13] S.S. Lee, E.H. Jung, J.H. Yoon, S.H. Kang, *et al.* (2009) Improvement of short circuit performance in 460V/400A/85kA mold case circuit breakers, *2009 Autumn Conference of the Electrical & Application Properties Institute of Engineers*, Ilsan, pp. 67-68.

(Received 14 October 2015; Revised 11 January 2016; Accepted 7 March 2016)

**Ji-Won Park** : cdpiw123@naver.com

Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, 125, Dongseo-daero, Yuseong-gu, Daejeon, 34158, Korea

**Jooyoung Jung** : manuking1@hanmail.net

Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, 125, Dongseo-daero, Yuseong-gu, Daejeon, 34158, Korea

**Jinnil Choi** : jlchoi@hanbat.ac.kr

Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, 125, Dongseo-daero, Yuseong-gu, Daejeon, 34158, Korea