

친환경 가스개폐기 개폐성능 향상을 위한 유동해석 및 실험

유련*, 안길영*, 김영근*, 조해용**,#

*LS ELECTRIC(주) 전력연구소, **충북대학교 기계공학부

Fluid Dynamics Analysis and Experimental Trial to Improve the Switching Performance of Eco-friendly Gas Insulated Switch

Lyun Yu*, Kil-Young Ahn*, Young-Geun Kim*, Hae-Yong Cho**,#

*Electrotechnology R&D Center, LS ELECTRIC Co.,Ltd.,

**Department of Mechanical Eng. Chungbuk National University

(Received 18 July 2022; received in revised form 20 July 2022; accepted 29 July 2022)

ABSTRACT

An underground electric switch is a high-voltage switch used in distribution network systems for a reliable power supply. Many studies are being conducted to expand the switch to use an eco-friendly gas using dry air instead of SF₆ gas to reduce greenhouse gas emissions. In this study, a flow analysis model was established to improve the performance of an eco-friendly gas switch. The results were compared and reviewed through experiments. For the optimal arc grid design applied to the switch, the flow characteristics based on the flow path configuration and the changes in arcing time for each configuration were compared. Flow analysis can predict the switch flow distribution, and a comparative review of the flow path configurations of various methods is possible.

Keywords : Underground Electrical Switch(지중부하개폐기), Eco-friendly Gas Insulated Switch(친환경가스개폐기), Optimal Design(최적설계), Arc Grid(아크그리드), Fluid Dynamics Analysis(유동해석)

1. 서 론

배전선로용 지중개폐기(이하 개폐기)는 배전계통 지중선로의 분기 및 투입/개방을 위해 사용되는 고전압용 스위치로서, 사용되는 부하 및 계통연계 조건에 따라 다양한 형태로 적용되는 주요 배전기기 중의 하나이다. 이러한 개폐기는 절연매질에 따라

SF₆가스절연, 에폭시(Epoxy) 고체절연, 친환경가스(Dry-Air, N₂ 혼합가스, NOVEC 가스 등)절연 방식 등으로 구분할 수 있으며, 그 중에서도 SF₆가스의 우수한 절연내력 및 아크소호 성능을 사용하는 제품이 널리 적용 되어왔다. 하지만 최근 기후변화와 관련하여 고전압 제품에서 SF₆가스를 사용하지 않고 진공인터럽터(VI, Vacuum Interrupter) 또는 친환경가스를 아크소호 수단으로 사용하는 제품들의 연구개발이 활발하게 진행되고 있다. 다양한 방식의 친환경가스를 적용한 부하개폐기에 대한 개발이 진

Corresponding Author : hycho@cbnu.ac.kr

Tel: +82-43-261-2464

행되면서 친환경가스 상태에서의 개폐성능 향상 및 신뢰성 확보를 위한 설계 최적화 연구가 지속되고 있다.^[1] 이러한 설계 최적화의 방안으로는 수치해석을 통한 해석 시뮬레이션 분석기법이 많이 활용되고 있으며, 친환경 부하개폐기(이하 친환경개폐기)의 설계 최적화를 위한 유동 해석 시뮬레이션은 부하개폐 현상을 예측할 수 있도록 하는 유용한 수단이 되었다.^[2]

본 연구는 고전압 친환경개폐기의 아크소호를 위해 아크저항과 아크전압을 신속하게 상승시키는 소호부 구조 개발과 관련하여 유동해석 결과와 부하개폐 아킹시간(Arcing Time)의 연관성을 비교하고자 하였다. 특히, 회전가동 접점방식을 적용하는 스위치를 기반으로 하고 아크그리드(Arc Grid)를 추가 적용하는 방식의 소호부 구조설계 최적화에 대한 것이다. 친환경가스를 아크 소호매질로 사용하는 회전스위치의 부하 개폐성능 개선과 관련하여 회전운동으로 발생하는 아크그리드 부분의 유동특성을 수치해석하고 각각 다른 형태의 유동구조를 갖는 아크그리드에 대한 부하개폐시험 결과를 해석내용과 비교 검토하고자 하였다.

기존 친환경개폐기에 대한 연구로는 Martin Schaak^[3] 등이 진공인터럽터와 회전스위치 구성을 갖는 개폐기의 부하개폐특성에 대하여 비교하였고, Christophe Preve^[4] 등이 보조 진공인터럽터를 활용한 친환경개폐기 기술에 대하여 연구하였다. 주로 부하전류 개폐를 위해 진공인터럽터를 사용하는 방식에 대한 연구가 많이 진행이 되었지만, 진공인터럽터를 사용하지 않고 접점개구에 의해 회로를 차단하는 방식의 친환경개폐기에 대한 연구는 극히 드물다. 본 연구에서는 친환경가스를 소호매질로 사용하는 친환경개폐기에서 아크그리드를 이용하여 아크가 신장되도록 하고, 아크저항과 전압을 상승시키면서 아크가 소호되는 방식에 대한 연구를 하고자 하였다.

2. 수치해석

2.1 해석 모델링 개요

본 연구에서는 해석모델의 계산효율성 및 정합성 확보측면에서 1-방정식 난류 모델인 Spalart-

Allmaras 난류모델을 적용하였으며, 이동격자를 이용해서 친환경개폐기 내부 움직임을 직접적으로 모의하였다. 경계조건은 Table 1에서와 같이 개폐스위치의 회전동작을 모의하기 위하여 초기압력, 개방 각속도 및 스위칭 동작에 대한 조건을 설정하였으며 통기구조에 따른 유동특성 변화와 영향을 고려하고자 했기 때문에 발열량은 적용하지 않는 것으로 하였다. 내부 유체는 친환경가스와 유사한 특성을 갖는 일반 Air 물성치를 이용하여 유동특성을 시뮬레이션 하였다.

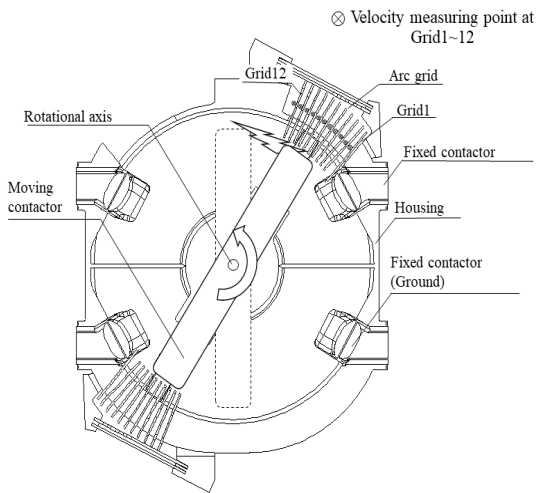
2.2 해석 모델링 형상

Fig. 1은 회전스위치로 구성된 친환경개폐기 주요 구성품과 스위칭 조작에 대하여 나타내었다. Fig. 1 (b)에서와 같이 부하전류 통전상태(Close)에서 반시계방향으로 가동접점이 회전하면서 고정접점과 분리되어 스위칭 동작이 발생하면 두 접점간에 아크가 발생하게 된다. 회전하는 가동접점에서 원심력과 전자력이 발생하면서 아크를 아크그리드 방향으로 확산하게 되며, 신장되는 아크가 개별 그리드에 의해 냉각되면서 아크전압이 상승하다가 전류영점에서 차단이 이루어진다.^[5]

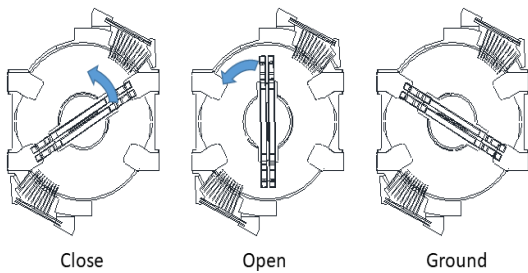
Table 1 Fluid analysis model boundary conditions and internal fluid properties

Model	Rotational contactor of eco-friendly gas switch	Gas	Air
Initial pressure	101325.0 Pa	Dynamic viscosity	1.85508E-5 Pa-s
Switch opening angular velocity	46.5°/15msec	Molecular weight	28.9664 kg/kmol
Switch motion	Rotating(15msec) and stop(15msec)	Specific Heat	1003.62 J/kg-K
Gas	Air	Thermal Conductivity	0.0260305 W/m-K
Dynamic viscosity	1.85508E-5 Pa-s	Temperature	300K

아크그리드는 다양한 방식의 유로(Vent)를 구성할 수 있는데, 상부 커버(Top Cover)의 외부순환채널 구성수준에 따라 Fig. 2와 같이 3가지 유로 구성(Vent type 1: 외기순환채널 없음, Vent type 2: 외기순환채널 50% 수준, Vent type 3: 외기순환채널 최대 확보)으로 해석모델을 선정하였다. 아크가 발생하면 높은 열과 전자력이 발생하여 부하전류 개폐시 내부유동에 영향을 주는 요소가 되지만, 순수하게 회전력에 의해 발생하는 내부유동과 부하개폐 성능특성을 비교하고자 하였다. 각 유로 구성별 아크그리드(Grid 1 ~ Grid 12)에서의 유동 해석을 통하여 유속분포를 산출하고, 부하전류 실험을 통하여 얻을 수 있는 핵심지표인 아킹타임 결과와 비교 검토하였다.

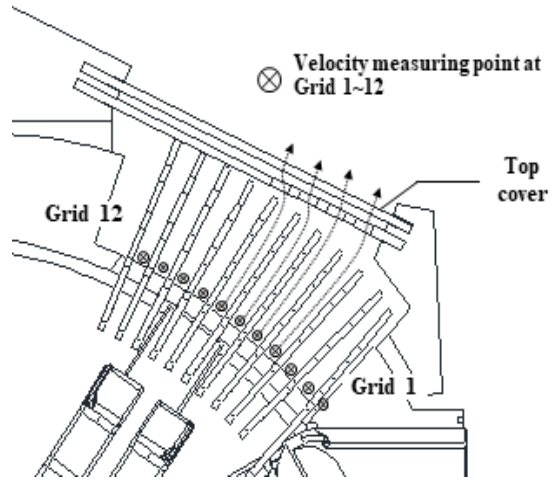


(a) Configuration of switch

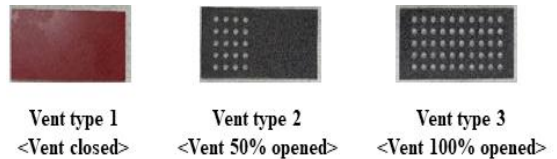


(b) Operation of switch

Fig. 1 Configuration of eco-friendly gas insulated switch



(a) Arc grid flow measurement point (Grid 1~12)



(b) 3 Vent type of top cover

Fig. 2 Arc grid flow measurement point and 3 vent type of top cover

2.3 지배방정식 및 난류모델

난류유동을 해석하기 위해 적용된 Spalart Allmaras 모델은 대표적인 1-방정식(1-Equation) 난류모델로 와류점성모델(1) 및 전달방정식(2)은 다음과 같이 구성된다.^[6]

와류점성모델(Turbulent Viscosity)

$$\mu_t = \rho f_{v1} \tilde{\nu} \quad (1)$$

위에서 ρ 는 유체의 밀도, f_{v1} 는 감쇠함수, $\tilde{\nu}$ 는 확산항이다.

전달방정식(Transport Equation)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \tilde{\nu}) + \nabla \cdot (\rho \tilde{\nu} \vec{V}) \\ = \frac{1}{\sigma_{\tilde{\nu}}} \nabla \cdot [(\mu + \rho \tilde{\nu}) \nabla \tilde{\nu}] + P_{\tilde{\nu}} + S_{\tilde{\nu}} \end{aligned} \quad (2)$$

위에서 \bar{V} 는 평균속도, $\sigma_{\bar{v}}$ 모델계수, μ 는 동점성 계수, $P_{\bar{v}}$ 는 생성항, $S_{\bar{v}}$ 는 사용자 초항(Source term)이다.

생성항(Production Term)

$$P_{\bar{v}} = D_{\bar{v}} + G_{\bar{v}} - Y_{\bar{v}}$$

$D_{\bar{v}}$ 는 비보존 확산항, $\frac{C_{b2}}{\sigma_{\bar{v}}} \rho(\nabla \tilde{v} \cdot \nabla \tilde{v})$, C_{b2} 는 각각 모델계수이다.

$G_{\bar{v}}$ 는 난류생성 항, $\rho(1-f_{t2})C_{b1}f_{r1}\tilde{S}\tilde{v}$, f_{t2} 는 각각 감쇠함수이다. C_{b1} 는 모델계수, f_{r1} 는 회전함수, \tilde{S} 는 변위 매개변수이다.

$Y_{\bar{v}}$ 는 난류소산항

$$\rho(C_{w1}f_w - \frac{C_{b1}}{k^2}f_{t2})(\frac{\tilde{v}}{d})^2$$

$$C_{w1} = \frac{c_{b1}}{k^2} + \frac{1+C_{b2}}{\sigma_{\bar{v}}}, f_w = g(\frac{1+C_{w3}^6}{g^6+C_{w3}^6})^{1/6}$$

여기서 $g = r + C_{w2}(r^6 - r)$, $r = \min(\frac{\tilde{v}}{Sk^2d^2}, 10)$ 이며, C_{w2} 와 C_{w3} 는 모델계수이다. k 는 the von Karman 상수이며, d 는 벽면까지 거리의 변형 매개변수이다.

$$\tilde{S} = \hat{S} + \frac{\tilde{v}}{k^2d^2}f_{v2}$$

위에서 f_{v2} 는 감쇠함수, \hat{S} 는 스칼라 변위이다.

사용된 각 함수들과 상수들은 Table 2와 Table 3에서와 같다.

Table 2 Damping function

Model variant	f_{v1}	f_{v2}	f_{t2}
SSA	$\frac{\chi^3}{\chi^3 + C_{v1}^6} (1666)$	$1 - \frac{\chi}{1 + \chi f_{v1}} (1667)$	$1.1 \exp(-2\chi^2) (1668)$
HRe SA	1	0	0

Table 3 Model coefficients

Model coefficients	C_{b1}	C_{b2}	C_{w2}	C_{w3}	k	$\sigma_{\bar{v}}$	C_{v1}	C_{prod}
	0.1355	0.622	0.3	2	0.41	2/3	7.1	2

여기서 C_{v1} 는 모델계수, SSA는 표준의 Spalart-Allmaras, HRe SA는 High-Reynolds Number Spalart-Allmaras 이다.

2.4 수치해석 결과

Fig. 3에는 친환경개폐기 가동부의 회전운동에 따른 각 아크그리드 입구부 유속분포 변화에 대한 해석결과를 그래프로 나타내었다. Table. 4에는 유동해석으로부터 산출한 유량값을 그리드 앞부분(Grid 1, 2, 3, 4), 중간부분(Grid 5, 6, 7, 8), 끝부분(Grid 9, 10, 11, 12)으로 나누어 구간별 유량 및 전체 누적유량으로 비교하여 나타내었다.

유로구성 #1(Vent type 1)은 외부로의 순환채널 막혀있는 구조로서 다른 유로구성들과 비교했을 때 가장 높은 전체 누적유량 결과를 나타내었다. 이것은 개폐기 하우징 내부 밀폐된 공간에서 스윙동작에 의해 회전방향으로 밀려나며 압축되었던 유체가 내부 격벽에 막힌 후 다시 되돌아오는 현상이 발생하는 것으로 해석되었기 때문이며, 이로 인해 유로구성 #1에서는 그리드 끝부분에서의 유속과 유량이 크게 증가하는 결과를 나타내었다. 반면에 점점개극 시 강한 아크가 발생하는 그리드 앞부분에서의 유속과 유량은 상대적으로 낮은 수준을 나타내었다. 이것은 유로구성 #1의 경우 외기순환채널이 없기 때문에 내부 유체가 가동점점의 회전동작과 더불어 밀려나는 형태의 유동을 나타내면서 충분한 난류를 형성하지 못하기 때문인 것으로 예상하였다.

유로구성 #2(Vent type 2, 외기순환채널 50% 수준)의 해석에서는 전체 누적유량 측면에서는 다른 유로구성 대비하여 최소값을 나타내었다. 이것은 유로구성 #2에서 일부 확보된 외기순환채널로 회전운동 초기에 내부유체가 외부로 빠져나가게 되면서 스윙동작에 의해 밀려나는 유량이 감소하여 그리드 끝부분에서의 유속과 유량이 유로구성 #1에 비하여 감소하기 때문인 것으로 예상되었다. 또한 다른 유로구성들과 비교하여 외기순환채널이 회전운동 초기 부분

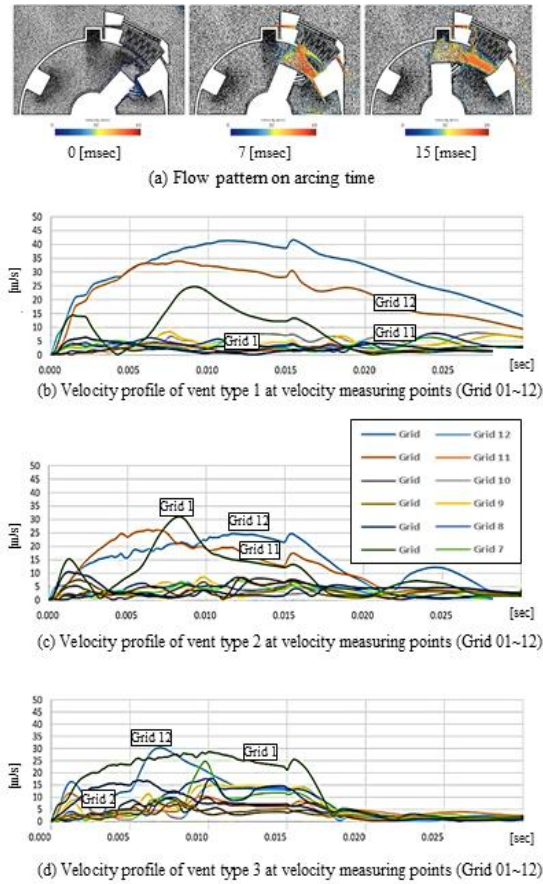


Fig. 3 Flow rate distribution analysis results for 3 types of flow path

Table 4. Flow rate comparison for each analysis model grid(Cumulative volume flow, Grid[01~12])

Grid group	Grid 1~4	Grid 5~8	Grid 9~12	Grid total (1~12)
Vent type 1 cumulative flow (m ³)	1.63E-04	1.27E-04	6.80E-04	9.70E-04
Vent type 2 cumulative flow (m ³)	2.14E-04	1.48E-04	3.52E-04	7.15E-04
Vent type 3 cumulative flow (m ³)	2.61E-04	2.08E-04	2.58E-04	7.27E-04

에만 형성되어 있기 때문에 그리드 앞부분 유량이 중간수준으로 나타났으며, 그리드 전체적으로 발생하는 유량이 가장 균일한 수준을 나타내는 것으로 해석되었다.

유로구성 #3(Vent type 3, 외기순환채널 최대 확보)의 경우에는 외기순환채널로 더 많은 내부유체가 외부로 빠져나가기 때문에 그리드 끝부분에서의 유속과 유량이 가장 크게 감소하는 것으로 해석되었다. 반면에 외기순환채널의 확대와 더불어 그리드 앞부분에서 유동이 집중되어 이 부분에 있어서는 외기순환채널이 없는 유로구성 #1 대비 62%(30ms 이내 범위) 유량이 증가하는 결과를 나타냈다. 상기의 해석 결과에 대한 주요특징을 정리하면 다음과 같다. 유로구성 #1과 같이 밀폐된 구조에서는 내부유체가 회전운동에 의해서 밀려나면서 압축되었다가 되돌아오기 때문에 그리드 끝부분에서의 유속과 유량이 크게 증가하고, 이로 인해 전체적인 누적유량 측면에서 최대값을 나타내는 것으로 생각한다. 유로구성 #2, 유로구성 #3과 같이 외부로 유체가 방출되는 유로가 확보된 경우에는 내부 회전운동에 따라서 유체가 압축되지 않고 외부로 빠져나가는 현상이 발생하기 때문에 유로구성 #1과 대비하여 상대적으로 낮은 전체 누적유량을 나타내는 것을 알 수 있다. 반면에 외기순환 채널이 증가할수록 그리드 앞부분의 유량이 증가하는 결과를 볼 수 있으며, 그리드 앞부분 유량비교에 있어서는 외기순환채널이 없는 유로구성 #1의 누적유량이 최소값을 나타내었고 외기순환채널을 최대 확보한 유로구성 #3이 최대값을 나타내었다.

친환경개폐기는 개극 시 발생하는 아킹타임이 통상 15 ms 수준 동안 아크가 유지되는데, 효과적인 아크 소호성능 확보를 위해서는 아크발생이 시작되어 집중되는 그리드 앞부분에서 높은 유속과 유량을 발생시키는 것이 아크신장 및 안정적인 아크전압상승을 유도하여 아크소호에 유리한 결과를 기대할 수 있을 것으로 예상하였다.^[7] 가장 강한 에너지의 아크가 발생하는 그리드 앞부분에서의 강한 유속과 유량으로 아크의 확산과 신장을 일으켜서 아크전압상승을 유도하는 역할을 하는 방향으로 유로구조를 설계하는 것이 바람직하다고 생각된다. 또한 고전압에서의 부하개폐 아크를 안정적으로 소호하기 위해서는 그리드 전체에서 지속

되는 유동을 발생시켜서 그리드의 아크냉각 및 전압분압 효과를 전반적으로 활용할 수 있는 유동구조설계를 확보하는 것이 안정적인 개폐성능에 도움이 될 것이다.

3. 부하개폐 성능 실험

3.1 실험 방법

본 연구에서는 유동해석 결과와 친환경개폐기의 부하전류 개폐 성능과의 비교검토를 위해 Fig. 4와 같이 실험 장치를 구성하였다. Fig. 4(a)에 부하전류 시료의 내부 설치를 나타내었으며, 개폐기 하우징 외부에 아크그리드를 설치하고 부싱을 통하여 전원인가부와 부하측이 연결되는 방식으로 구성되었다. (b)에는 부하전류 개폐시험 시료설치를 나타내고 있으며, 내부 개폐기 설치 후 밀폐하고 3M사 Novoc 4710 가스를 2psi 압력으로 주입하였다. 내부의 부싱을 통하여 개폐기 외부에는 고압케이블이 전원인가부와 부하측으로 각각 연결되었다. 내부 접지단자는 개폐기 탱크에 연결이 되고 외부 접지선을 통해서 접지가 연결되었다.

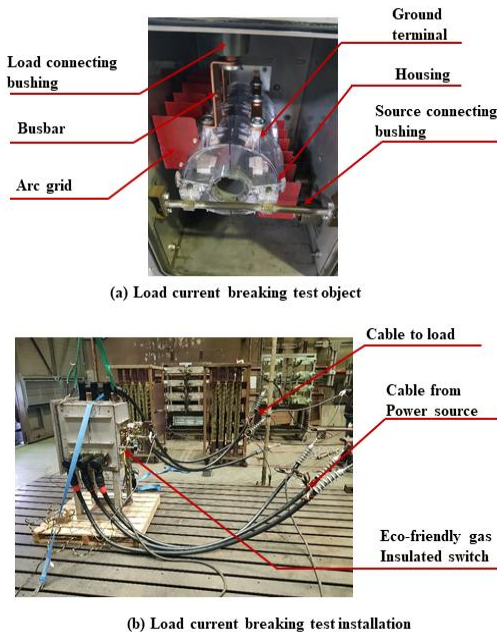


Fig. 4 Load current breaking test installation

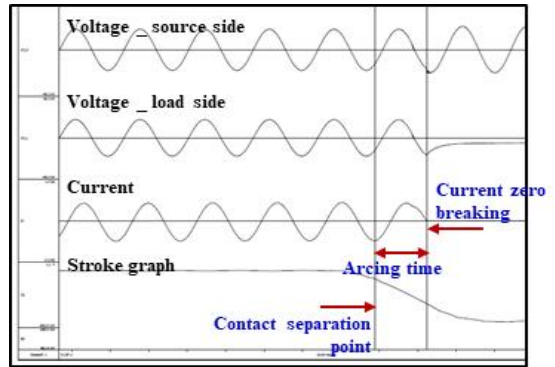
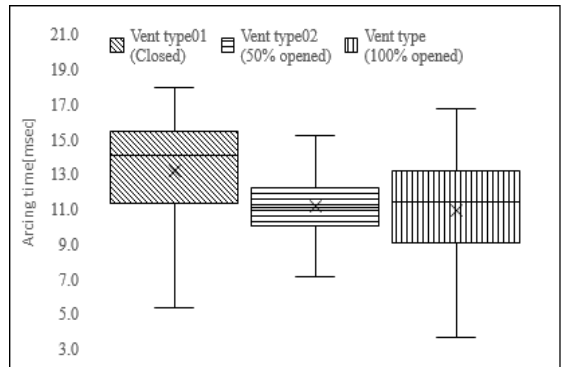
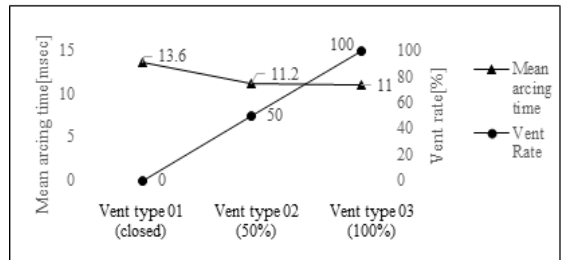


Fig. 5 Load current breaking arcing time measurement



(a) Arcing time of 3 vent types



(b) Vent rate & mean arcing time

Fig. 6 Arcing time measurement results

24kV 630A 60Hz의 3상(3 Phase) 전류를 인가하였으며 Fig. 5와 같이 전류센서와 오실로스코프를 이용하여 아킹타임을 측정하였다. 아킹타임은 개폐기의 스위칭 동작에 의해서 접점이 개극(Stroke Graph의 Contact Separation Point)되어 아크가 발생하는 시점부터 접점의 개극 간격이 증가하면서 아

크가 확산되다가 전류과형(Current)에서와 같이 전류영점(Current Zero Breaking)에서 소호되어 절연상태가 회복되는 시점까지의 시간간격을 측정하는 것이다. 아크그리드 유로구성별 각각 100회의 부하개폐 시험을 진행하면서 아킹타임을 측정하였다.

3.2 실험결과 및 수치해석 비교

친환경가스절연 개폐기에 24kV 630A의 전원을 각 유로구성별로 인가하면서 매회 아킹타임을 측정하였다. 부하개폐 시험의 간격은 개폐시험 후에 내부의 냉각 및 안정화를 일정 수준 확보할 수 있도록 90초 ~ 120초 수준을 유지하여 진행하였다. Fig. 6에 각 유로구성별 아킹타임의 분포를 상자수염 차트를 이용하여 산포를 표시하였다. Fig. 6(b)에서 볼 수 있듯이, 유로구성 #1의 평균 아킹타임은 13.6ms, 유로구성 #2는 11.2ms, 유로구성 #3은 11.0ms으로 나타났으며, 외기순환채널의 확보 수준이 증가할수록 평균 아킹타임이 감소하는 경향을 나타내었다.

유로구성 #1의 경우에는 최대값과 최소값의 편차가 크게 나타났으며, 50회 이상의 시험에서 아킹타임이 14 ms을 넘는 현상을 나타내었다. 외기순환채널의 확보 수준을 다르게 구성한 유로구성 #2와 유로구성 #3의 평균 아킹타임은 유사한 수준으로 의미 있는 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 다만, 유로구성 #2의 경우 최대값과 최소값의 편차가 가장 작게 나타났으며 10 ~ 12.5ms 범위에서 50회 이상 유지되는 것을 확인하였다. 유로구성 #2의 경우에는 그리드 전체에서 발생하는 유량이 다른 유로구성에 비교하여 비교적 균일한 특징을 나타내는데, 이런 이유로 최대값과 최소값 편차가 적게 발행한 것으로 판단되며 내부 유동구조 설계에도 활용이 필요할 것으로 검토되었다.

아킹타임 분포를 수치해석을 통한 유량과의 관계를 비교해 보았다. 전체 그리드의 누적유량은 외기순환채널을 적게 할수록 증가하는 것을 알 수 있었지만, 단순한 전체 누적유량의 증가는 친환경개폐기의 개폐성능과 연관이 있는 평균 아킹타임을 효과적으로 감소시키지 못하는 것을 확인하였다. 상대적으로 유로구성 #2와 유로구성 #3과 같이 외기순환채널을 확보하는 경우, 전체 누적유량은 적지만, 아크발생이 집중되는 그리드 앞부분의

유량이 증가하였다. 그리드 앞부분의 유량이 증가할수록 평균 아킹타임은 감소하는 경향을 나타내었다. 친환경개폐기의 개폐성능 향상과 관련하여 아킹타임을 감소시키기 위해서는 전체적인 유량을 증가시키기 보다는 적절한 외기순환채널 확보를 통하여 강한 아크가 발생하는 그리드 앞부분에서의 유속과 유동을 효과적으로 늘리는 설계가 필요하다. 또한 유로구성 #2와 같이 외기순환채널을 부분적으로 확보하여 그리드 전체에서 유동을 확보하는 경우에는 아킹타임의 산포를 줄일 수 있을 것으로 예상하였다.

4. 결론

본 연구에서는 아크그리드를 적용한 친환경개폐기의 개폐성능 향상을 위한 유로구성 방안을 제시하고 수치해석과 부하개폐 성능실험을 통해 아킹타임의 유동분포를 모사 및 검증하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 친환경개폐기 유동분포 모사를 위한 유동해석을 수행하고 부하전류 개폐실험을 통해 측정하는 아킹타임 데이터와 비교한 결과 부하개폐 성능과 연관성을 갖는 아킹타임(Arcing Time)과 개폐기 유동특성 간 시간적 상관관계를 확인하였다. 이러한 유동해석의 활용은 친환경 부하개폐기의 개발기간을 단축시키고 효율적인 아크그리드 설계에 도움이 될 것이다.
2. 유동 해석결과와 아킹타임분포 시험결과 비교에 의하면, 전체 누적유량을 증가시키기 보다는 그리드 앞부분에서의 유량증가가 부하개폐의 아킹타임을 감소시키는 것을 확인하였다. 따라서 적정수준의 외부순환채널을 확보하는 유로구조 설계로 그리드 앞부분에서의 유속과 유량을 증가시키고, 이를 통해 아크전압상승을 유도할 수 있도록 아크그리드를 설계하는 것이 아킹타임 감소에 바람직하다.
3. 외기순환채널의 부분적 확보를 통해 그리드 전체에서 전반적으로 균일한 유동을 확보하고, 이를 통해 그리드의 아크냉각 및 전압분압 성능을 개선하는 것이 안정적인 개폐성능을 확보하는데 도움이 될 것이다.

후 기

“이 논문은 LS ELECTRIC의 채원과 전력시험기술원(PT&T)의 대전력 시험협조로 수행되었음.”

REFERENCES

1. Heo, S. H., Lee, S. J., Chung, S. J., Sim, B. S., Kim, H. D. and Seo, I. Y. “Analysis of Trend for Distribution Switchgear Technology in Domestic and Foreign Country,” Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, pp. 79, 2016.
2. Bang, B. H., Lee, Y. S., Cho, J. U., "A Study on Thermal-Flow Analysis and Design Optimization for Interruption Performance Improvement of SF6 Gas Circuit Breaker," KIEE Conference, pp. 26~28, 2013.
3. Martin, S. et al., "Comparison of SF6-Free Load-Break Switching Principles", CIRED.25th International Conference on Electricity Distribution, Madrid, 2019.
4. Christophe, P. et al., "Innovative SF6 Free Switch with Shunt Vacuum Interruption Technology", CIRED 25th International Conference on Electricity Distribution, Madrid, 2019.
5. Park, W. J., Lee, S. C., Ahn, K.Y., and Kim, Y. K., “Phenomena and Method of Arc Extinction in Air Circuit Breaker”, ICEE 2018.
6. Spalart, P. R. and Allmaras, S. R., "A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows," La Recherche Aerospaciale, No. 1, pp. 5-21, 1992.
7. Park, W. J., Kim, I. H., Ahn, K.Y., and Kim, Y. K. “A Study on Characteristics and Methods of Extinguishing Arc in Low Voltage Direct Current System”, KIEE Conference, pp. 1688~1693, 2019.