

# Dry-air 절연을 적용한 72.5 kV GIS용 고속도 접지개폐기의 절연 설계 및 유도전류 개폐 성능 검증

임의환\*, 홍정완\*\*

## Insulation Design and Induced Current Switching Performance Verification of 72.5 kV Dry-air Insulated GIS High-Speed Earthing Switch

Ui Hwan Lim\*, Jung Wan Hong\*\*

---

이 연구는 한성대학교 교내학술연구비 지원과제입니다.

---

### 요 약

지구온난화 물질인 SF<sub>6</sub> 가스를 대체하기 위하여 친환경 절연 매질인 건조공기(Dry-air)를 적용한 72.5 kV GIS용 고속도 접지개폐기의 절연 설계 및 유도전류 개폐 특성을 분석하고 IEC 규격 기반 성능 검증 결과를 제시한다. 뇌 임펄스 내전압 시험을 통해 0.35 MPa 압력에 375 kV의 절연 성능을 만족하는 최적 극간 설계를 도출하였다. 또한 Dry-air와 CO<sub>2</sub> 가스의 아킹 시간(Arcing time)과 소호 성능을 정량적으로 평가 후 구조적 보완 설계를 진행하였다. 아크 쉴드(Arc Shield) 및 아크 러너(Arc Runner)의 형상최적화와 조작기 링크 구조를 개선하여, IEC 62271-102 규격을 적용하여 정전유도 Class B(6 kV, 2 A), 전자유도 Class A(0.5 kV, 50 A)등급의 요구조건을 모두 충족하였다.

### Abstract

This paper presents the insulation design and induced current switching characteristics of a 72.5 kV GIS high-speed earthing switch using dry-air as an eco-friendly alternative to SF<sub>6</sub> gas. An optimal electrode gap was determined through lightning impulse withstand voltage tests, achieving an insulation performance of 375 kV at 0.35 MPa. The arcing time and arc extinction performance of dry-air and CO<sub>2</sub> were quantitatively evaluated, followed by structural improvements. The geometries of the arc shield and arc runner and the linkage of the operating mechanism were optimized. As a result, the switch successfully achieved electrostatic induced current switching Class B(6 kV, 2 A) and electromagnetic induced current switching Class A(0.5 kV, 50 A) in accordance with IEC 62271-102.

### Keywords

72.5 kV GIS, Dry-air insulation, high-speed earthing switch, induced current switching

---

\* 한성대학교 스마트융합컨설팅학과 박사과정  
- ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2392-6463>  
\*\* 한성대학교 산업시스템공학부 교수(교신저자)  
- ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9193-9645>

· Received: Apr. 20, 2026, Revised: May 26, 2026, Accepted: May 29, 2026  
· Corresponding Author: Jung Wan Hong  
Division of Industrial and Systems Engineering, Hansung University, Korea  
Tel.: +82-2-760-4392, Email: [jwhong@hansung.ac.kr](mailto:jwhong@hansung.ac.kr)

## I. 서 론

72.5 kV GIS는 철도변전소 및 신재생에너지의 계통 연계를 위하여 사용되어지고 있으며, 절연 매질은 주로 육불화황(SF<sub>6</sub>) 가스를 사용하고 있다. 최근 전 세계적으로 화석연료 소비가 급증함에 따라 온실가스 배출 문제가 심화되고 있으며, 이는 지구 온난화라는 심각한 환경 위기를 초래하고 있다. IPCC 제6차 보고서의 부정적인 전망에 따르면, 현재의 배출 기조가 유지될 경우 2100년 지구 기온은 산업화 이전 대비 최대 5.7 °C까지 상승할 것으로 우려된다[1]. 기후 재앙을 막기 위해 국제사회는 1997년 교토의정서와 2015년 파리 기후협약을 체결하며 탄소중립을 위한 규제를 강화해왔다[1]. 이러한 흐름 속에서 전력계통의 핵심 설비인 고전압 기기들에 사용되는 절연 매질에 대한 변화의 목소리가 높다. 그동안 전력 산업계는 우수한 절연 내력과 열적 안정성, 높은 열전도율을 가진 SF<sub>6</sub> 가스를 주요 절연체로 활용해왔다[2]. SF<sub>6</sub> 가스는 건조공기(Dry-air) 대비하여 약 3배 이상의 우수한 절연 성능을 가지고 있으나, 지구온난화지수(GWP)가 CO<sub>2</sub> 가스 대비 약 23,900배 높으며, 대기 중의 잔존수명이 3,200년간 지속하는 지구온난화의 주범이 되는 가스이다[1][2]. 이로 인해 SF<sub>6</sub> 가스는 교토의정서에서 지정한 대표적인 규제 대상 온실가스로 분류되어 전 세계적으로 사용제한 조치를 받고 있다[2]. 따라서 기존의 SF<sub>6</sub> 가스를 대체하여 친환경 절연 매질의 개발은 전력설비의 지속가능성을 확보하기 위한 시급한 과제이다[3]. 현재 다양한 대체 가스에 대한 연구가 활발히 전개되고 있으며, CO<sub>2</sub> 가스, Novec 가스, Dry-air등이 있으며 GWP가 0인 가스는 Dry-air이다[3][4].

본 논문은 Dry-air 절연을 적용한 72.5 kV GIS개발 수행 과정의 한 부분인 고속도 접지개폐기에 대하여 기술하고자 한다. Dry-air 절연을 적용하여 절연 성능을 만족하는 최소압력을 정하고, 고속도 접지개폐기의 정전유도 및 전자유도 시험을 IEC 62271-102의 규격에 부합하게 개폐 성능을 검증하고자 한다.

친환경 절연 매질인 건조공기(Dry-air)를 적용한

72.5 kV GIS용 고속도 접지개폐기의 절연 설계 및 유도전류 개폐 특성을 분석한 연구 결과를 다룬다. SF<sub>6</sub> 가스는 우수한 절연 특성에도 불구하고 CO<sub>2</sub> 대비 약 23,900배의 높은 지구온난화지수와 약 3,200년에 이르는 대기 중 수명으로 인해 대표적인 규제 대상 온실가스로 분류되고 있어, 이를 대체할 친환경 절연 가스 개발이 국제적으로 요구되고 있다. 본 연구에서는 Dry-air를 절연 매질로 적용한 72.5 kV GIS를 대상으로 Femm 4.2 프로그램으로 전계 해석을 수행하여 극간 거리와 가스 압력, 아크 쉴드(Arc Shield) 곡률 반경에 따른 전계 이용률과 허용 전계 강도를 산정하고, 뇌 임펄스 내전압 시험을 통해 최소 정격 가스 압력 0.35 MPa 수준에서 요구 절연 성능을 만족하는 최적 극간 설계를 도출하였다. 또한 IEC 62271-102에서 규정하는 정전유도 및 전자유도 Class 조건에 따라 한국전기연구원에서 Dry-air 0.35 MPa 조건의 참고 시험을 수행하고, 동일 조건에서 CO<sub>2</sub> 0.35 MPa를 적용한 비교 시험을 통해 절연 매질별 아킹 시간(Arcing time)과 소호 성능을 정량적으로 평가하였다. 시험 결과, 아크 쉴드(Arc Shield) 및 아크 러너(Arc Runner) 구조를 최적화하고 조작기 링크 구조 및 스프링을 개선함으로써, Dry-air 절연 고속도 접지개폐기가 정전유도 Class B 및 전자유도 Class A 요구사항을 만족할 수 있는 가능성을 확인 후 IEC 규격을 적용하여 성능 검증 시험을 수행하였다.

본 연구는 Dry-air 절연 적용 시 IEC 규격 만족 여부를 실험적으로 검증하여 SF<sub>6</sub> 대체 가능성을 실증하는 것을 목적으로 한다.

## II. Dry-air 절연을 적용한 72.5 kV GIS용 고속도 접지개폐기의 최적화 설계

### 2.1 고속도 접지개폐기 Lay-out 및 검증 절차

Dry-air 절연을 적용한 72.5 kV GIS의 개발 시험의 일환으로 그중 고속도 접지개폐기의 절연 및 전자유도 시험에 대하여 본 논문을 기술하였다. 제품의 이해를 돕기 위하여 Dry-air를 적용한 72.5 kV GIS의 전체 구조의 사진은 그림 1과 같으며, 선로

용 단로기와 분기된 고속도 접지개폐기는 붉은색 박스 부분으로 표현하였다.



그림 1. Dry-air를 적용한 72.5 kV GIS  
Fig. 1. External view of the 72.5 kV Dry-air insulated GIS

본 연구에서 수행한 72.5 kV Dry-air를 적용한 고속도 접지개폐기의 최적 설계 및 검증 프로세스를 그림 2처럼 구성하여 보았다. 연구 절차는 초기 설계안의 시험 그리고 전계 분포 해석을 통한 취약 지점 도출 후 재검증 시험을 하였고, 유도전류 개폐 참고 시험을 토대로 성능 향상을 위한 소호실 개선 설계, 각 단계별 피드백 과정을 통해 절연 마진을 확보하였다. 최종적으로 한국전기연구원에서 대전력 시험을 통해 그 유효성을 검증하는 단계를 거쳤다.

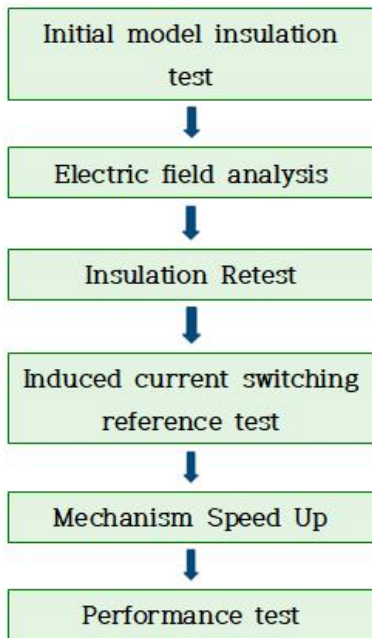


그림 2. 시험 검증 프로세스  
Fig. 2. Test verification process

## 2.2 고속도 접지개폐기의 절연 검증

고속도 접지개폐기의 375 kV이며 시험을 위하여 시험용 부싱(Test bushing)을 통하여 전압을 인가 시키고, 본체와 접지를 분리한 플로팅(Floating) 상태에서 극간 시험을 하였다. 고속도 접지개폐기의 뇌 임펄스 내전압 값은 375 kV이며 전압 인가 시 파형의 파두는 1.2  $\mu$ s ( $\pm$ 30%), 파미는 50  $\mu$ s ( $\pm$ 20%)를 준수하였다. 시험의 방법으로는 IEC 규격에 따라 15회 시험 중 2회 이하의 방전이 발생하여도 합격으로 인정되나, 본 연구에서는 15회 전회 무방전 기준을 적용하여 절연 신뢰성을 극대화하였다[5][6].



그림 3. 고속도 접지개폐기 뇌 임펄스 시험 전경  
Fig. 3. Experimental setup for the lightning impulse withstand test of the HSES

Dry-air의 압력 상승에 따른 절연 내력의 특성을 파악하고, 최소압력 도출을 위하여 0.05 MPa 단위로 상승시키면서 시험을 하였다. 고속도 접지개폐기의 극간의 절연 성능은 정극성, 부극성 모두 만족해야 하며, 시험 결과로는 부극성이 취약한 구조로 나타났다. 시험 결과는 표 1과 같으며, 시험 전경은 그림 3을 참고. 시험 결과를 분석해 보면 가스 압력과 거리에 따라 선형적 증가 패턴이 관찰되었으며, 부극성에서 절연 성능의 취약함을 볼 수 있었다. 극간 거리의 정량적으로 비교 분석하기 위하여 시험 데이터는 정규화(Normalized, p.u.)하여 표기하였으며, 극간 거리(1.0 p.u., 1.33 p.u., 1.66 p.u.) 가스 압력(0.35~0.50 MPa)까지 시험하였다. 최소 극간 거리인 1.0 p.u. 에서 정극성은 0.40 MPa 부극성은 0.50 MPa 까지 압력이 증가했을 때 375 kV 목표치에 도달하였다.

표 1. 극간 거리별 뇌 임펄스 내전압 시험 결과 (kV)  
Table 1. Lightning impulse withstand test results according to gap distance (kV)

| Polarity | Distance (p.u) | Pressure (MPa) |      |      |      |      |
|----------|----------------|----------------|------|------|------|------|
|          |                | 0.30           | 0.35 | 0.40 | 0.45 | 0.50 |
| Positive | 1.0            | 360            | 365  | 375  | -    | -    |
|          | 1.33           | 370            | 375  | 385  | -    | -    |
|          | 1.66           | 375            | 390  | -    | -    | -    |
| Negative | 1.0            | 330            | 350  | 360  | 360  | 375  |
|          | 1.33           | 350            | 365  | 375  | -    | -    |
|          | 1.66           | 360            | 375  | -    | -    | -    |

초기 모델의 극간 거리별 뇌 임펄스 내전압 시험 결과 극간 거리 목표수치를 하회하였으며, 고속도 접지개폐기의 최소 압력 선정 및 극간 절연 성능 최적화를 위해 Femm 4.2 프로그램을 이용하여, 전계 수치 해석을 수행하였다.

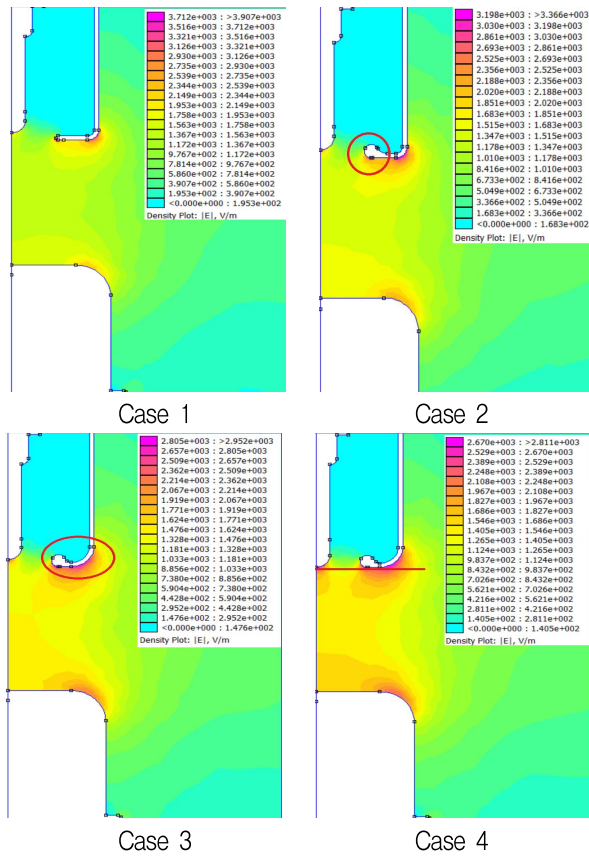


그림 4. 전계분포도  
Fig. 4. Electric field distribution

총 4가지의 Case에 대하여 해석하였으며, 초기 모델인 Case 1은 표 1의 실제 시험 결과와 해석 결과의 일치성을 바탕으로 해석 모델의 신뢰성을

확보 후 추가 해석을 진행하였다. Case 2는 Arc Shield의 형상 설계를 변경하여 특성을 분석하였고, Case 3는 Arc Shield의 곡률 반경을 변화에 따른 전계 집중 완화 효과를 검토하였다. 마지막으로 Case 4는 Arc Runner를 전방으로 배치하였을 때 전계 분포 변화 및 영향을 비교 평가하기 위하여 해석하였다.

해석결과 전계 분포도는 그림 4와 같은 전계집중 현상을 관찰할 수 있었다. 전계집중이 가장 심한 고정전극과 가동전극의 전계강도를 완화하기 위하여, 극간 거리 1.0 p.u에 절연이 가능하도록 Arc Shield의 구조를 개선하고, 곡률 반경 변화에 따른 전계분포를 최적화 하여 안정적 절연 성능을 확보하였다. 설계 변수별로 대표 Case를 선정하여 전계 이용율을 산출하여 평균편도를 파악한 결과 표 2와 같이 도출하였다[3]. 전계 이용율은 평균전계(E<sub>mean</sub>)와 최대전계(E<sub>max</sub>)비로 정의되며 구하는 식 (1)과 같이 구할수 있다[7][8].

$$\text{전계 이용율}(n) = \frac{E_{mean}}{E_{max}} = \frac{V/d}{E_{max}} \quad (1)$$

여기서, V는 인가 전압(Voltage), d는 전극 사이의 최단 거리(Gap distance)이며, E<sub>mean</sub>은 평균 전계 강도(V/d), E<sub>max</sub>는 유한요소법 해석을 통해 도출된 전극 표면의 최대 전계 강도를 의미한다.

표 2. 전계 해석 결과 값  
Table 2. Electric Field analysis result

|                   | Case 1 | Case 2 | Case 3 | Case 4 |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|
| E <sub>max</sub>  | 3.78   | 3.27   | 2.87   | 2.73   |
| E <sub>mean</sub> | 1.88   | 1.84   | 1.81   | 1.92   |
| n                 | 0.497  | 0.562  | 0.633  | 0.704  |

해석 결과를 반영하여 추가로 Case 2 ~ Case 4에 대하여 뇌 충격 내전압 시험을 하였으며, 극간 거리 1.0 p.u에 만족하며, 0.35 MPa 압력 조건으로 뇌 충격 내전압 시험을 수행하였다. 전계 완화 구조가 적용된 Case 3, Case 4 모델은 해당 압력에서 안정적으로 375 kV 뇌 임펄스 내전압 기준을 만족하는 결과를 나타내었으며, 시험의 결과 값은 표 3과 같다.

표 3. 구조에 따른 뇌 임펄스 내전압 시험 결과 (kV)  
Table 3. Lightning impulse withstand voltage test results according to structure (kV)

| Polarity | Case | Pressure (MPa) |      |      |      |      |
|----------|------|----------------|------|------|------|------|
|          |      | 0.30           | 0.35 | 0.40 | 0.45 | 0.50 |
| Positive | 1    | 360            | 365  | 375  | -    | -    |
|          | 2    | 370            | 375  | 395  | -    | -    |
|          | 3    | 375            | 385  | 405  |      |      |
|          | 4    | 375            | 390  | 405  | -    | -    |
| Negative | 1    | 330            | 350  | 360  | 365  | 375  |
|          | 2    | 350            | 360  | 375  | -    | -    |
|          | 3    | 365            | 375  | 385  |      |      |
|          | 4    | 370            | 375  | 390  | -    | -    |

### III. 유도전류 개폐 성능 시험

#### 3.1 시험 항목

정규 72.5 kV 고속도 접지개폐기의 유도전류 시험의 전압 및 전류 값은 IEC 62271-102 Table 9에 따라 표 4와 같이 요약 할 수 있다[9][10].

표 4. 유도전류 시험 값  
Table 4. Induced current switching test results

| Test items      | Class   | Voltage | Current | Test number |
|-----------------|---------|---------|---------|-------------|
| Electrostatic   | Class A | 3 kV    | 0.4 A   | 10          |
|                 | Class B | 6 kV    | 2 A     | 10          |
| Electromagnetic | Class A | 0.5 kV  | 50 A    | 10          |
|                 | Class B | 2 kV    | 80 A    | 10          |

#### 3.2 참고 시험

절연 성능으로 검증된 그림 4의 Case 3 모델을 이용하여, Dry-air 0.35 MPa의 압력으로 정전유도 및 전자유도의 성능을 검증하기 위하여 한국전기연구원에서 참고 시험을 수행하였다. 개폐성능의 척도로서 주 접점 분리 후 아크가 소호되는 시점까지의 시간을 Arcing time이라 하여 ms 단위로 표현한다. Arcing time에 따라 고속도 접지개폐기의 소호 능력을 예측할 수 있는 척도로 볼 수 있다. 이에 따라 Arcing time과 개폐 성공 여부와의 상관관계를 연구하였다. 정전유도 시험은 6 kV 2 A의 전류 값을 Class B 등급으로 10회를 수행하여 안정적인 차단

을 하여 만족한 결과를 얻었다. 이후 전자유도 시험을 시행하였다. Dry-air의 특성이 규명되지 않은 관계로 참고 시험에서는 규격의 시험값과 상이하지만 가혹 조건으로 바로 시험하기보다는 단계적으로 수치를 상향하며 기기의 한계점을 찾고자 하였다. 또한 반복적 시험을 통한 접점의 소모를 최소화하기 위하여 1회씩만 시험을 하였다. 동일성 비교 및 검증을 위하여 시료의 접점 교체나 수정 없이 절연 매질을 CO<sub>2</sub>, 0.35 MPa의 압력으로 주입 후 바로 재시험을 수행하였으며, 결과 값은 표 4와 같다. 개폐 시간이 3상 모두 동일하지 않은 관계로 실사용 상태기준으로는 파악해 볼 때 3상 전부 개폐에 성공해야 함으로 마지막 차단 상(Last pole) 차단 시간기준으로 Arcing time을 적용하였다. 3상 교류 계통에서는 상의 위상차는 120°를 가지며, 이로 인해 전류 영점(Current zero)의 도달 시간은 상이하게 나타난다. 시험 결과 동일한 전압 및 전류 조건에서도 Arcing time의 편차가 발생하는 이유는 접점 분리 후 첫 번째 전류 영점에서의 소호 성공 여부와 아크 에너지의 누적에 따른 소호능력 저하를 들 수 있다. 특히 Dry-air와 같은 친환경 매질의 경우, SF<sub>6</sub> 가스 대비 소호 능력이 현저히 낮음으로 위상각에 따른 Arcing time의 변동성이 더욱 현저하게 나타남을 확인하였다. Arcing time의 편차가 발생하며, 시험 횟수가 적은 관계로 절연 매질에 관계없이 Arcing time이 가장 짧고 동일 수치가 존재하는 CO<sub>2</sub> 가스 1 kV 40 A를 기준으로 설정하였다.

표 5. 전자유도 시험 결과  
Table 5. Electromagnetic induction switching test results

| Insulating gas  | Voltage (kV) | Current (A) | Arcing time (p.u.) |
|-----------------|--------------|-------------|--------------------|
| Dry-air         | 1.00         | 41          | 6.04               |
|                 | 0.78         | 31          | 2.04               |
|                 | 1.45         | 83          | Failure            |
|                 | 1.00         | 40          | 3.32               |
| CO <sub>2</sub> | 1.00         | 40          | 1.00 (Reference)   |
|                 | 1.42         | 57          | 1.72               |
|                 | 1.87         | 75          | 5.78               |
|                 | 2.00         | 80          | 7.32               |
|                 | 2.00         | 80          | 14.83              |
|                 | 2.00         | 80          | 10.37              |

서로 다른 절연 매질 간의 소호 성능을 동일한 척도에서 정량적으로 비교 분석하기 위함이며, 표 5에 수록된 시험 데이터는 이 기준을 바탕으로 정규화(Normalized, p.u.)하여 표기하였으며, 그래프는 그림 5로 표현하였다[3][11].

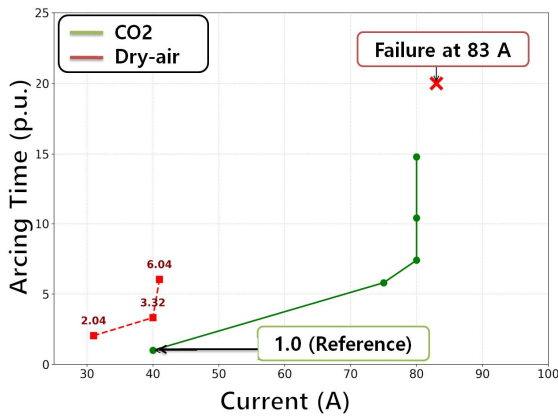


그림 5. 전자유도 시험 결과 그래프

Fig. 5. Electromagnetic induction switching graph

시험 결과 CO<sub>2</sub> 가스 대비 Dry-air의 Arcing time은 약 3~6배가량 Arc 소호가 지연되는 현상이 나타났으며, Dry-air의 경우 1.45 kV, 83 A에서는 Arc 소호에 실패하는 결과를 가져왔다. 반면 CO<sub>2</sub> 가스의 경우 2 kV 80 A에서 Arc 소호까지 최대 14.83 p.u.까지 증가하며, 불안정한 Arcing time을 보였으나, 고속도 접지개폐기의 전자유도 시험 Class B의 성공 가능성을 가늠해 볼 수 있는 의미 있는 결과 값이라 볼 수 있다. 유도전류 시험의 피시험품 모습 그림 6과 같으며, 개폐 시험 후의 접점의 상태는 그림 7과 같이 심한 용착 상태를 확인할 수 있었다.



그림 6. 유도전류 피시험품 시험 사진

Fig. 6. Test setup and the HSES unit induced current switching tests



그림 7. 유도전류 개폐 시험 후 접점 상태

Fig. 7. Surface condition of the contacts after induced current switching tests

### 3.3 참고 시험 결과에 대한 고찰

참고 시험 후 접점을 분해하여 분석해 본 결과 Arc Shield의 넓은 면적에 용착 흔적이 관찰되었다. 아크 소호시 아크에너지 분산되는 것을 예상해 볼 수 있다. 또한 Arc Runner를 전방으로 배치하여 에너지를 집중시킨 후 개폐 속도를 증가시켜 소호능력을 증가시킬 수 있는 방법을 보완책으로 설정하였으며, 내부 상세 개념도는 그림 8과 같다.

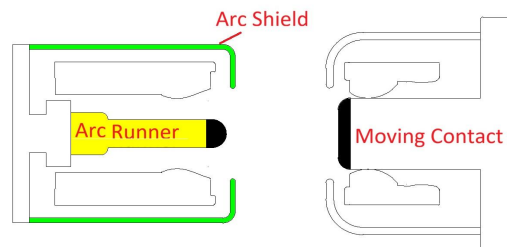


그림 8. 고속도 접지개폐기 내부 이미지

Fig. 8. Internal view of the 72.5 kV high-speed earthing switching

## IV. 고속도 접지개폐기 성능 검증

### 4.1 성능 검증 전 개선사항

본 연구에서는 절연 시험과 전자유도 참고 시험을 통하여 두 가지 보완책을 적용하였다. 첫째 가동 전극(Moving contact) 개극 시 발생하는 아크 에너지가 Arc Shield로 분산되지 않게 Arc Runner를 전방으로 배치하여 Arc Runner로 집중시켜 소호 효율을 극대화하고자 한다. Arc Runner는 전계 분포를 고려하여

그림 4의 Case 4와 같이 절연 성능에 영향을 미치지 않는 최적의 위치로 전방 배치하였다. 또한 소호 시간 지연에 따른 열적 손상을 방지하기 위해 점점 소재를 개선하였다. 기존 SF<sub>6</sub> 기기에서 사용되던 텅스텐 70 wt.% - 구리 30 wt.% 분말야금 합금(W-Cu alloy)은 전도율은 우수하나, Dry-air 환경의 가혹한 개폐 조건에서는 내구성은 검증이 필요한 사항이다. 이를 보완하고자 텅스텐 80 wt.% - 구리 20 wt.%로 조성비를 변경하여, 내마모성과 내 용착성을 확보하였다. 이와 더불어 Arc Shield의 재질을 기존 알루미늄(Al)에서 용점과 열전도성이 우수한 구리(Cu)로 변경하였으며, 절연 신뢰성 유지를 위해 표면 거칠기를 정밀하게 관리하여 제작하였다. 둘째 조작기의 기계적 메커니즘 개선을 통해 Arcing Time을 단축시켰다. 오픈 스프링력 증대 및 링크구조 변경을 통하여 아크 에너지 노출 시간을 최소화하였다. 그림 9의 동작 특성 그래프에서 확인할 수 있듯이, 동작 특성 분석기(TM1800, Megger)로 측정한 결과 오픈 속도(Open speed)가 기존 1.46 m/s에서 3.3 m/s로 약 2.26배로 속도가 향상되었음을 확인하였다.

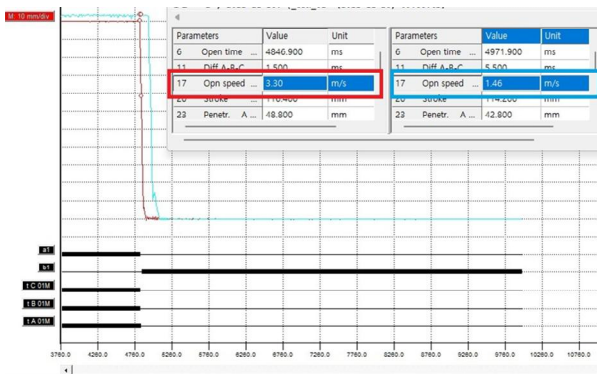


그림 9. 고속도 접지개폐기의 오픈 동작 특성  
Fig. 9. Opening operation characteristics of the HSES

#### 4.2 유도전류 개폐 시험

Dry-air를 적용한 72.5 kV GIS의 최종 상용화 목표인 관계로 고속도 접지개폐기의 항목 시험 비용 및 시간을 고려하여, 정전유도는 Class B, 전자유도는 Class A 상용화를 목표로 시험하여 만족한 결과를 얻었다. 시험은 한국전기연구원 대 전력 시험실에서 진행하였으며, 시험조건 및 상수는 표 6과 같으며, 안정적 운영을 위하여 IEC 규격 기준인 표

4의 수치보다 상회하는 시험 값으로 시험하였다. 시험의 모습은 그림 10과 같다. IEC 62271-102번 규격에 따라 정전유도 전자유도 총 10회의 시험을 통하여 성능확보 및 항목 시험 성적서를 확보하였다. 표 6에 수록된 시험 데이터의 Arcing Time은 절연 매질과 전압 전류 조건이 소호 능력에 미치는 상관관계를 연구하는 지표로서, 참고 시험과 동일한 기준으로 정량적으로 비교 분석하기 위하여, 표 5와 같이 정규화(Normalized, p.u.)하여 표기하였다.

표 6. 유도전류 시험 결과  
Table 6. Induced current switching test results

| Electrostatic coupling (Class B)   |             |                    |
|------------------------------------|-------------|--------------------|
| Voltage (kV)                       | Current (A) | Arcing time (p.u.) |
| 6.0                                | 2.1         | 0.355              |
| 6.0                                | 2.1         | 0.260              |
| 6.0                                | 2.1         | 0.348              |
| 6.1                                | 2.1         | 0.345              |
| 6.1                                | 2.1         | 0.320              |
| 6.1                                | 2.1         | 0.360              |
| 6.1                                | 2.1         | 0.383              |
| 6.1                                | 2.1         | 0.355              |
| 6.1                                | 2.1         | 0.350              |
| 6.1                                | 2.1         | 0.318              |
| Electromagnetic coupling (Class A) |             |                    |
| Voltage (kV)                       | Current (A) | Arcing time (p.u.) |
| 0.8                                | 61.7        | 0.890              |
| 0.8                                | 61.9        | 0.840              |
| 0.8                                | 56.9        | 0.598              |
| 0.8                                | 54.6        | 0.973              |
| 0.8                                | 53.1        | 0.765              |
| 0.8                                | 54.6        | 0.875              |
| 0.8                                | 54.6        | 0.785              |
| 0.8                                | 54.6        | 0.880              |
| 0.8                                | 54.5        | 0.880              |
| 0.8                                | 54.6        | 0.995              |

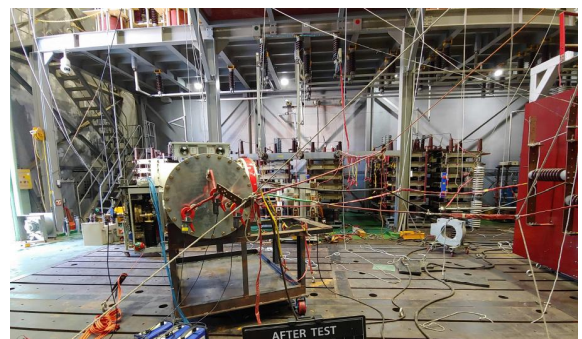


그림 10. 유도전류 시험 모습  
Fig. 10. General view of the induced current switching test set up

## V. 결 론

Dry-air를 적용한 72.5 kV GIS의 고속도 접지개폐기에 대하여, 절연 성능 및 전자유도 시험에 대하여 중점적으로 연구한 내용을 기술하였다. 본 연구의 성과 및 결과로는 SF<sub>6</sub> 대비 절연 내력이 약 1/3 수준으로 낮은 Dry-air의 절연 성능을 극복하고 친환경 기기로서의 절연 성능을 검증하였으며, 뇌 임펄스 내전압 시험을 통해 0.35 MPa 압력에 절연 성능을 만족하는 최적 극간 설계를 도출하였다. 또한 국제 공인기관인 한국전기연구원에서 IEC 62271-102 번의 규격을 적용하여, 정전유도 Class B(6 kV, 2 A), 전자유도 Class A(0.5 kV, 50 A)의 성능을 공식적으로 검증하였다. 또한 Dry-air와 CO<sub>2</sub> 가스의 매질별 소호능력의 유의미한 차이를 확인하였다. Dry-air와 CO<sub>2</sub> 가스의 전자유도 시험에 대한 Arcing time분석을 통하여, 향후 Dry-air를 적용한 전자유도 시험을 Class B(2 kV, 80 A) 달성을 위한 연구 로드맵으로 활용하고자 한다. 결론적으로 본 연구는 고속도 접지개폐기의 절연 및 전자유도 시험 특성에 대한 정량적 지표를 제시함으로써 향후 Dry-air를 적용한 72.5 kV GIS용 고속도 접지개폐기의 설계를 위한 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

## References

- [1] J. H. Lee and S. G. Goo, "Site test result of fluoro-based 170 kV EGIS", Proc. of the KIEE Conference, Yeosu, Jeollanam, pp. 1649-1650, Jul. 2022.
- [2] S. Bang, Y. K. Mo, O. Lee, J. Kim, J. O. Kang, H. Lee, S. Nam, and H. Kang, "Analysis on the Dielectric Characteristics of Dry-air", Proc. of the KIEE Conference, Muju, Jeonbuk, pp. 1195-1196, Jul. 2015.
- [3] C. H. Yang, J. S. Oh, H. T. Park, and Y. I. Kim, "Insulation Characteristics of Dry-air Insulated Switchgear for 72.5 kV Wind Power Generation", Journal of Wind Energy, Vol. 15, No. 2, pp. 5-9, 2024. <http://dx.doi.org/10.33519/kwea.2024.15.2.001>.
- [4] J. K. Park, H. J. Jang, W. Y. Lee, J. H. Kang, H. S. Oh, J. U. Jeon, and Y. H. Oh, "Interrupting Performance of Gas Circuit Breaker According to SF<sub>6</sub>, g<sup>3</sup>, and CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> gases", Proc. of the KIEE Conference, Pyeongchang, Gangwon, pp. 1146-1147, Jul. 2021.
- [5] IEC, "High-voltage switchgear and controlgear - Part 1: Common specifications for alternating current switchgear and controlgear", IEC 62271-1 Standard, Edition 2.1, International Electrotechnical Commission, Jul. 2021.
- [6] IEC, "High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements", IEC 60060-1 Standard, Edition 3.0, International Electrotechnical Commission, Sep. 2010.
- [7] S. M. Bang, O. Y. Lee, J. I. Kim, J. O. Kang, H. S. Lee, T. K. Ko, and H. G. Kang, "Analysis on the Dielectric Characteristics of Gaseous Nitrogen for Developing Eco-friendly High Voltage Apparatuses", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers P, Vol. 63P, No. 4, pp. 356-360, 2014. <https://doi.org/10.5370/kieep.2014.63.4.356>.
- [8] J. Y. Na, "A Comparative Study on Eco-friendly Insulating Gas to Determine the Operating Pressure of 170 kV High Voltage Disconnectors", Ph.D. dissertation, Hanyang University, Seoul, Korea, 2024.
- [9] IEC, "High-voltage switchgear and controlgear - Part 102: Alternating current disconnectors and earthing switches", IEC 62271-102 Standard, Edition 2.0, International Electrotechnical Commission, May 2018.
- [10] T. Psotta, V. Hinrichsen, and B. Lutz, "Breaking Capacity of Disconnectors and Earthing Switches Operated in Alternative Gases", 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Athens, Greece, pp. 1-4, Sep. 2018. <http://dx.doi.org/10.1109/ICHVE.2018.8641761>.

- [11] G. W. Fan, S. Huang, G. Li, S. Yao, and H. J. Liu, "Introduction and Test Analysis of the Disconnecter and Earthing Switches of SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> Mixed Gas in GIS", 2019 5th International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology (ICEPE-ST), Kitakyushu, Japan, pp. 70-76, Oct. 2019. <http://dx.doi.org/10.1109/ICEPE-ST.2019.8928674>.

## 저자소개

### 임 의 환 (Ui Hwan Lim)



2020년 8월 : 한국공학대학교  
전자제어공학과(공학석사)  
2024년 9월 ~ 현재 : 한성대학교  
스마트융합컨설팅학과 박사과정  
관심분야 : Switchgear, GIS

### 홍 정 완 (Jung Wan Hong)



1990년 2월 : 서울대학교  
산업공학과(공학석사)  
1994년 2월 : 서울대학교  
산업공학과(공학박사)  
1994년 7월 ~ 1996년 2월 : 한국전  
자통신연구소(ETRI) 선임연구원  
1996년 3월~ 현재 : 한성대학교

산업시스템공학부 교수

관심분야 : 비즈니스 컨설팅, 스마트 팩토리, Process  
Innovation