

Arc Fault에 의해 발생하는 배전반 내부의 압력변화에 대한 전산해석 및 실험적 연구

임남혁[†]·민병수*·김주연*·박상민*

Analysis and Experiment of the Pressure Rise in Switchgear of Arc Fault

Namhyuk Lim, B.S. Min, J.Y. Kim, S.M Park

Key Words: Arc Fault(아크폭발), Switchgear(배전반), CFD(전산유동해석), Image Processing
(영상처리기법)

Abstract

To develop and improve a switchgear, the prediction of the pressure rising within the switchgear is very important. This study investigates the pressure rising characteristics of switchgear in order to evaluate the result of arc fault test. The pressure rising time at the four points of measurement calculated by CFD is well accord with the experimental results. The maximum pressure within the switchgear estimated by CFD is about 1.0bar, the pressure from experiment is 0.7 bar. The results of this study are able to be used to improve the performance of existing switchgear and to develop a new type switchgear.

기호설명

ρ : 밀도
 u_i : 속도성분
 g_i : 중력가속도 성분
 μ_{eff} : 유효점성계수
 μ : 점성계수
 μ_t : 와점성계수
 Pr_t : Prandtl Number

k_t : 난류 전도율
 p : 압력

1. 서론

배전반은^(1~4) 차단장치(차단기, 퓨즈) 또는 개폐장치(접촉기, 단로기류), 외함, 모선, 계기용 변압기, 변류기, 계전기, 계기, 내부 결선 등으로 구성되어 있으며 전력공급, 기기의 보호 및 제어, 계측기능을 하는 전장품을 말한다. 배전반은 분류기준에 따라서 다양하게 분류될 수 있는데 본 연구에서는 선박용 배전반 내부에서 아크가 폭발할 경우에 대한 연구를 수행하였다. 배전반 내부에 쥐 등의 이물질이 투입되면 상간 단락에 의하여 아크가 발생하게 된다. 이때 발생하는 아크에 의하여 배전반 내에서 폭발이 발생하

[†] 현대중공업 산업기술연구소 엔진연구실
 E-mail : alwaysim@korea.com
 TEL : (052)230-6188 FAX : (052)250-9578

* 현대중공업 산업기술연구소 엔진연구실

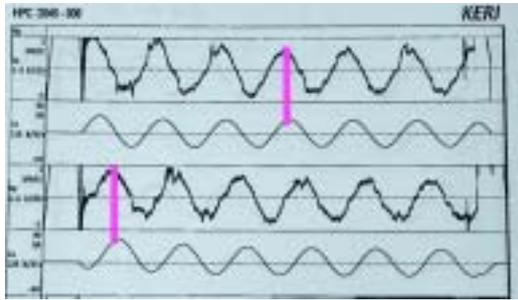


Fig. 1 Oscillograph of arc voltage from arc fault at KERI in 2002

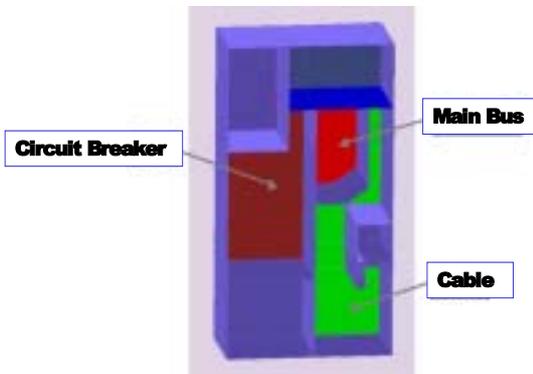


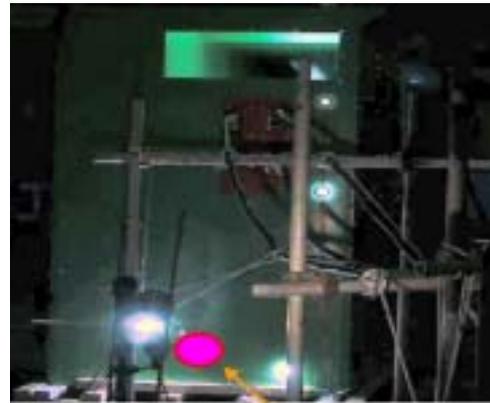
Fig. 2 Schematic of the inner part of a switchgear

게 된다. 배전반 내부의 폭발에 의한 압력과가 배전반 최 상부에 설치된 안전 배기구(relief hole)로 빠져 나갈 수 있어야만 제품의 안정성을 입증 받을수 있다. 만약 성능 시험 시 아크에 의한 압력과 화염이 배전반 최 상부 안전 배기구로 빠져 나가지 못하고 배전반 옆으로 빠져나오면 제품의 안정성은 불합격으로 판정된다. 이러한 시험은 공인기관에서 진행되는데 국내기관으로는 한국전기연구소(KERI), LG산전 등이 있으며, 국외에서는 네덜란드의 KEMA, 이탈리아의 CESI 등이 국제인증시험을 진행하고 있다.

2. 연구개요

2.1 전산해석

배전반 아크폭발에 대한 해석을 수행하기 위하여 상용 CFD 코드를 활용하였다. Hunelec에서는 아크폭발에 의한 배전반 내부 압력상승을 예측하기 위하여 시간에 따른 압력변화를 해석했지



Arcing point

Fig. 3 Locations of arcing point



Fig. 4 Inner part of cable compartment, (a) before and (b) after a test

만, 본 연구에서는 배전반 내부에 압력 구배가 발생할 것이라는 예측에 근거하여 배전반 내부에 대한 3차원 열유동 해석을 수행하였다. 아크 해석을 수행하기 위하여 주입된 아크 에너지는 2002년 KERI에서 당사 배전반을 시험했을 때 측정된 전류와 아크전압을 근거로 산출했다. 아크 폴트(arc fault) 시험 시 기록되는 아크전류와 전압이 Fig. 1에 나와 있다. 이때 최고 아크 전이 약 800 V 정도임을 확인 할 수 있다.

Fig. 2은 전산해석을 위하여 간략화 된 배전반 내부를 나타내고 있다. 아크 폴트 시험 시 케이블 부분(cable compartment)이 배전반의 기계적 구조에 가장 크게 영향을 미치기 때문에 전산 해석에서는 케이블 부분에 대한 열유동 해석만 수행했으며 실제 시험 시에 압력 측정과 고속영상촬영도 케이블 부에 대해서만 시행했다.

2.2 실험방법

Fig. 3에서 Arcing Point로 표시된 지점이

아크가 발생하는 점이며 상부에 밝게 빛나는 부분은 안전배기구(relief hole)가 열리고 있는 순간 아크의 빛이 바깥으로 새어나오고 있음을 의미한다. 압력 상승에 따른 배전반 내외 부에서 변화를 촬영하기 위하여 고속 카메라를 이용하였다. 초기 발생 아크 촬영시간과 압력의 변화가 나타나기 시작한 시간을 이용해서 영상과 압력 신호를 동기화 시켰다. 1초 시험이 종료된 후 배전반 외함의 온도를 측정하기 위하여 적외선 카메라를 활용하였다.

Fig. 4(a)는 아크를 발생시키기 위하여 0.5 mm 구리선으로 단락된 케이블 부분의 내부이며 Fig. 4(b)는 인증 시험이 진행된 후 내부에 설치된 모든 가연성 물질이 연소된 상태를 보여준다. 이때 금속 전극의 일부 형상이 변형된 이유는 고온의 아크에 의하여 전극이 용융되었기 때문이다.

3장 연구내용

3.1 전산해석

3.1.1 기본방정식

본 연구에서 전산유동해석을 위하여 사용된 상용 CFD 코드인 FLUENT를 사용하여 유체의 질량 보존방정식, 운동량보존방정식, 에너지 보존방정식의 해를 구하였다. 표준 $k-\epsilon$ 난류모델을 도입하고 텐서(tensor) 표기법을 이용하면 각 방정식은 다음과 같은 미분방정식으로 표현할 수 있다.

질량 보존 방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0$$

운동량 보존 방정식:

$$\rho u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i}$$

$$\mu_{eff} = \mu_t + \mu = \frac{C_\mu k^2}{\epsilon} + \mu$$

난류 운동에너지 방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i}$$

난류에너지 소산 방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \frac{\epsilon}{k} G_k + (1 - C_{3\epsilon}) G_b + C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

$$G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho \sigma_h} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}$$

여기서 μ_t / σ_k 는 k 의 확산계수, μ_t / σ_ϵ 는 ϵ 의 확산계수, G_k 는 k 의 생성항, G_b 는 부력에 의한 생성 항이며, 난류모델의 상수항들은 다음과 같다.

$$C_\mu = 0.09, C_1 = 1.14, C_2 = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$$

에너지 보존 방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i H) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{k_t}{c_p} \frac{\partial H}{\partial x_i} \right) + \tau_{ik} \frac{\partial u_i}{\partial x_k}$$

3.1.2 방출 에너지 및 경계조건

아크 폭발 시 발생하는 에너지는 Fig. 1에서 확인할 수 있듯이 사인(sine)과 형태를 나타낼 것이며 이 때 발생하는 에너지의 양은 전류와 전압의 곱이다. 본 연구에서는 전류(AC, 10~30 kA)와 오실로그래프에서 확인된 아크전압(200~1000 V)을 아크 발생지점에서 발생시켜 해석을 수행하였으며 배전반 벽면은 모두 점착(No-Slip)조건으로 해석을 수행하였다. 배전반 내부에서 아크가 발생할 경우 아크 주변의 기체는 이상 기체의 거동에서 많이 벗어나게 되지만 본 연구에서는 배전반 내부 압력을 파악하는 것이 주요한 목적이었기 때문에 온도변화에 따라서 이상기체상태를 벗어나는 부분에 대한 고려는 제외하였다.

온도 변화에 따른 엔탈피(enthalpy) 변화에 대한 고려가 없기 때문에 배전반 내부 온도는 실제와 다르게 계산되지만 해석에 의한 압력예측은 실제와 비슷하게 도출될 수 있음을 초고압 차단기 아크 해석의 결과로 알 수 있다.⁽⁵⁾

3.2 실험방법

3.2.1 압력측정

폭발에 의한 압력변화는 약 10~100 ms 이내에 이루어지기 때문에 고속응답이 가능한 센서와 수백 kHz의 Sampling Rate를 갖는 Data Acquisition Board가 필요하다. 따라서 본 연구

에서는 이러한 조건을 만족시키기 위해서 0 ~ 10 bar의 압력 측정 범위를 가지는 KISTLER 4075A 압력센서와 HP DAQ(SCB-68) Data Acquisition Board를 이용하였다.

3.2.2 고속영상촬영

본 연구에서는 압력에 의한 배전반 상단부 안전배기구의 열림 현상 관찰과 함께 아크발생 순간과 압력 데이터의 정확한 동기화를 위해서 초기발생 아크의 촬영이 중요하다. 이러한 현상은 10 ~ 100 ms의 짧은 시간에 이루어지기 때문에 고속카메라(1K*1K, 1500 fps)를 이용하였다.

3.2.3 온도측정

안전 배기구의 열림 외에 아크의 고열에 의한 열응력으로 인해서 배전반 정면부가 열리는 현상이 발생할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 열응력에 의한 현상을 규명하고자 열화상 카메라(Nikon, LAIRD Series)를 이용하였다. 열화상 카메라는 배전반의 전체적인 온도 분포장을 가시적으로 확인 가능하게 해서 배전반 특정부분의 열응력의 집중상태를 확인 가능하게 한다.

4. 결과 및 고찰

4.1 해석결과

4.1.1 압력분포

Fig. 5은 배전반 내부에서 아크가 폭발한 후 0.007초 동안 계산된 내부 압력분포와 아크가 발생된 지점을 나타내고 있다. 아크가 발생된 후 초기에는 아크 발생 지점과 가장 근접된 벽면에서 최고압을 유지하다가 시간이 지나면서 압력파는 벽면을 타고 지나다가 0.007초경에 안전 배기구에 도달하는 양상을 나타내고 있다. 비정상상태 해석으로 열유동 계산을 수행했기 때문에 해석 시간간격의 영향을 확인하였다. 해석 시간간격이 0.00001초 보다 큰 경우에는 시간간격이 변할 때마다 압력파가 안전 배기구에 도달하는데 소요되는 시간이 변했다. 0.00001초 보다 시간간격이 작은 경우에는 안전 배기구까지 압력 도달 시간에 변화가 없음을 확인 하였다. 하지만 시간 간격이 0.00001초 보다 더 줄어들면 배전반 내부 압력 분포에 확산항의 영향이 감소되는 압

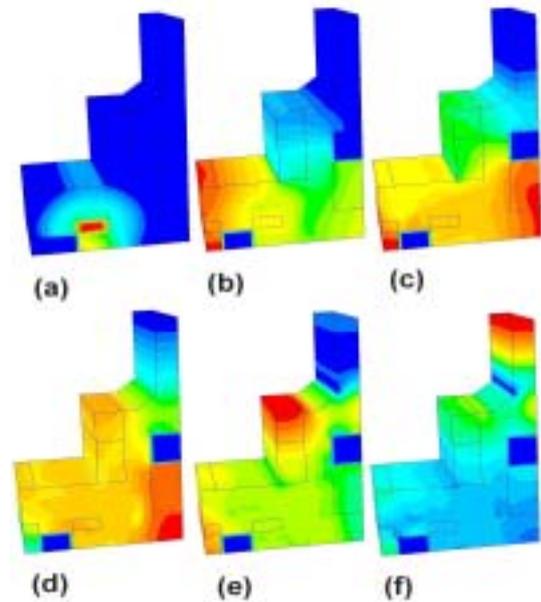


Fig. 5 Pressure variations in a switchgear with time after arc ignition, (a) 0.01 s, (b) 0.03 s, (c) 0.05 s, (d) 0.07 s, (e) 0.09 s, (f) 0.11 s

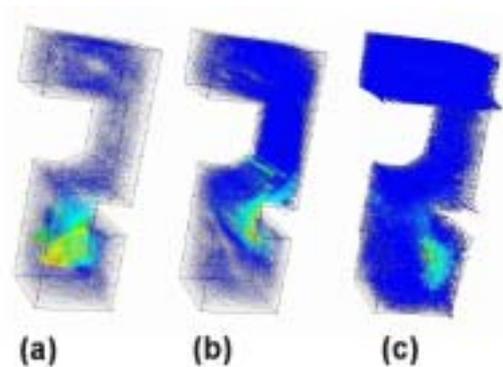


Fig. 6 Vector plot with various colors of temperature, (a) 0.002 s, (b) 0.006 s, (c) 0.03 s

력분포계산 결과를 나타냈다. 따라서 시간간격을 0.00001초로 고정한 후 이후 해석을 수행하였다.

4.1.2 온도분포

Fig. 6은 해석결과 배전반 내부에서 발생한 흐름의 벡터와 온도의 분포를 같이 나타내고 있다. 계산결과 시간이 0.03초가 되어도 배전반 내부 온도는 크게 상승하지 않았다. 추후 이상기체를 벗어난 정도와 아크 복사에 대한 충분한 모델

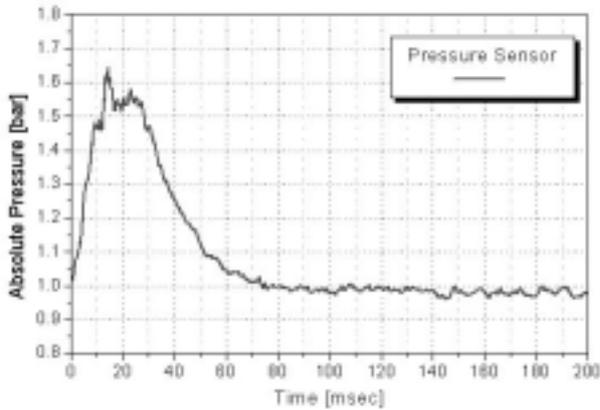


Fig. 7 Pressure rise in the switchgear

링이 보강되어야 배전반 내부 온도 예측의 정량적 정확성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

4.2 실험결과

4.2.1 압력 측정

시간에 따른 배전반 내부 압력 변화는 Fig.7와 같다. 압력이 상승하는데 소요된 시간은 약 0.01초이며 0.03초가 지나면 압력이 강해지고 있음을 알 수 있다. 배전반 내부에 나타난 압력상승은 약 0.7 bar이며 압력 측정 지점에 따라서 압력상승이 시간차를 가지고 있음을 알 수 있다. 전산유동 해석을 통하여 예측된 0.5 ~ 1.0 bar와 거의 유사한 압력 상승을 나타냄을 확인했다. 안전 배기구에 압력이 상승하는 시각은 0.0005초 정도이며 0.008초경이면 0.5bar 정도 상승함을 Fig. 7을 통하여 확인할 수 있으며 계단형 압력파는 아크의 요동에 의한 것으로 판단된다. 최고압에 도달한 후 압력이 하강할 때 약 0.01초 정도 지연되는 경향을 확인할 수 있다. 이러한 지연 현상은 배전반 내부에서 고온에 의하여 팽창되는 공기가 배전반 내부로 배출되는 요인으로 정된다.

4.2.2 고속영상

배전반 내부에서 발생하는 아크에 의하여 발생된 폭발 화염이 Fig. 8에 나와 있다. Fig. 8에서 뒤쪽으로 화염이 빠져나오고 있는데 이는 폭발의 압력파에 의하여 배전반의 문이 휘어졌기 때문이다. 즉 실패한 경우의 영상이다.

Fig. 9는 본 연구에서 1초에 1,500 프레임으로 고속 촬영한 영상을 나타내고 있다. 0.0012



Fig. 8 Flare from arc fault test

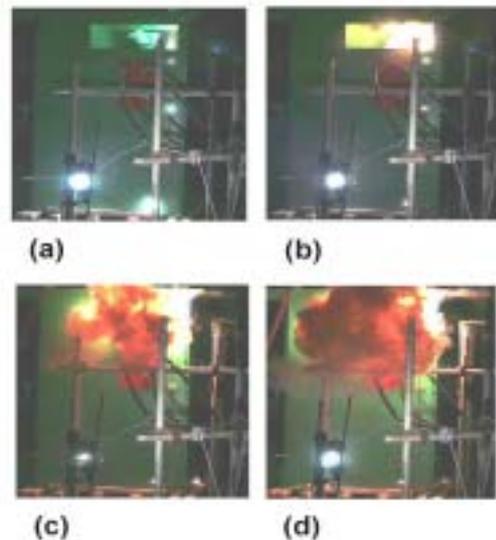


Fig. 9 High speed images of an arc fault test

초경에 안전 배기구가 열리는 모습(a), 안전 배기구로 열가스가 빠져나오는 모습(b) 그리고 화염이 빠져나오는 모습(c, d)이 잘 나타나 있다. 고속 영상에서 전류의 파형에 따라 아크가 출렁이는 현상이 압력 측정구를 통해 비치는 빛의 밝기 변화로 확인할 수 있다.

4.2.3 온도측정

배전반 테스트 후 외함의 온도장 측정을 위하여 적외선 카메라로 영상을 촬영하였지만 외함의 온도가 국부적으로 철의 용융점 정도까지 상승하리라는 예상보다 너무 낮았기 때문에 카메라의 측정 온도 범위를 벗어나서 영상을 잡지 못했

다. 외함의 온도는 손으로 만졌을 때 따뜻한 정도였기 때문에 100℃ 이하인 것으로 판단된다.

4. 결 론

상용 CFD 코드를 활용하여 아크 폭발 시험 시 배전반 내부 압력상승 시간과 압력상승 정도를 계산하였다. CFD 해석을 위하여 계산에 사용할 아크 폭발 에너지는 아크 폭발 시험시 확보되는 아크 전압을 분석하여 계산했으며 실험을 통하여 검증하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

① 해석을 통하여 아크 폭발 시험시 압력과 가 안전 배기구까지 도달하는데 소요되는 시간은 약 0.007초였으며 압력 상승폭은 약 1 bar 였다.

② CFD 해석 결과를 검증하기 위하여 배전반 아크 폭발 시험 시 배전반 내부의 압력 변화를 측정하였다. 압력 측정 결과 상승폭은 최대 0.7 bar 정도였으며 안전배기구에서 압력 상승은 0.005초경에 발생하여 0.008초경에 최고압에 도달하였다.

③ 압력측정과 동시에 고속영상 촬영을 실시하여 배전반 내외부의 거동을 관찰하였다. 안전배기구는 0.008초경에 작동하기 시작하여 0.012초경에 완전히 열렸다.

참고문헌

- (1) Song, G.D., Lee, B.Y., Park, G.Y. and Park, J.H., 2001, "Evaluation Method of the Small Current Breaking Performance for SF₆-Blown High-Voltage Gas Circuit Breakers", *Trans. KIEE*, Vol 50, No.8, pp384~391.
- (2) Yan, J.D., Fang, M.T.C. and Hall, W., 1999, "The Development of PC Based Tools for Auto-Expansion Circuit Breaker Design", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.14, No.1, pp.176~181.
- (3) Frost, L.S. and Liebermann, R.W., 1971, "Composition and Transport Properties of SF₆ and Their Use in a Simplified Enthalpy Flow Arc Model", *Proceedings of IEEE*, Vol.59, No.4, pp.474~485.

(4) Ko, Sung-Hoon, 2001, "Dynamic Analysis of Molten Pool Behavior in Arc and Laser Welding", Ph-D thesis, *KAIST*.

(5) Park, Il-Seok, 2003, "Characteristics of Gas Flow for the High Voltage Circuit Breaker" *HIRI - 02 - AC - 249*.