



초고압 가스차단기 성능해석 및 설계기술

김홍규<한국전기연구원 HVDC연구본부 책임연구원>

1 서론

차단기(Circuit Breaker)는 전력용 개폐장치의 일종으로 전력계통에서 발생하는 지락, 단락장소를 신속하게 계통으로부터 분리함으로써 계통에 접속되어 있는 기기들의 대전류에 의한 파괴나 사고를 일으킨 기기의 아크에 의한 손상을 방지하기 위하여 사용된다. 차단기의 임무는 전력계통에 어떠한 고장이 발생하여도 신속히 자동차단하는 책무를 가지는 중요한 보호장치인 것이다.

차단기는 사용목적에 따라 발전기용, 선로용, 변압기용, 축전기 회로용 및 분로 리액터용으로 구별된다. 그러므로 그 용도별에 따라 적합한 차단기를 선정하여야 한다. 일반적으로 기계적 접점을 가지고 있으며, 계통의 사고 발생 시에 이 접점을 분리하여 발생한 아크를 전류영점에서 소호시켜 차단하게 된다. 따라서 차단성능, 절연성능, 통전성능, 단락전류에 의한 전자력에 대한 성능 이외에 내아크성이 요구되기 때문에 여러 가지 책무를 완수할 필요가 있으며, 배치면적, 사용전압 및 보수 등을 충분히 협조하여 합리적으로 적용하여야 한다. 차단기 내부의 접점사이에서 발생한 아크를 소호하는 매질에 따라 유입차단기(OCB), 자기차단기(MBB), 공기차단기(ACB),

SF₆ 가스차단기(GCB) 등으로 분류된다. 본고에서는 SF₆ 가스차단기의 차단성능 해석 및 차단성능 향상 설계에 대해서 다룬다.

전력기기는 고전압, 대전류 환경에서 요구되는 기능을 수행하여야 하기 때문에, 가혹한 조건에서의 신뢰성 유지가 중요한 설계 기준이 된다. 따라서 제품 개발 시 시험에 의하지 않고 성능 예측이 가능한 기술이 확보된다면 사용환경에 따른 기기 성능을 예측하여 설계에 반영할 수 있다. 또한 컴퓨터 상에서의 가상 모델 해석을 통해 시험에서는 관측하기 어려운 물리적 현상을 파악할 수 있는 데이터를 확보할 수 있다.

2. 초고압 가스차단기의 차단성능 해석기술

2.1 차단성능 해석 기술 개요

전력계통에서 차단기는 정상 상태에서는 전류를 통전시키는 도체 역할을 하며, 사고 발생 시에는 사고 전류를 차단하기 위한 전기적 절연체 역할을 한다. SF₆ 가스를 절연 및 소호 매질로 사용하는 가스 차단기는 뛰어난 절연성능과 아크 소호능력으로 인하여 초고압용 차단기에 널리 사용되고 있다[1].

가스차단기는 BTF(Bus terminal fault) 및

SLF(Short line fault)와 같은 대전류 차단 성능과, 장거리 송전선로, 케이블, 콘덴서 뱅크 등을 개로할 때 일어날 수 있는 소전류 차단 성능을 동시에 가져야 한다. 대부분의 차단기는 큰 고장 전류를 차단할 때, 첫 전류 영점에서 차단 성공에 이르지 못하고 점점이 충분히 떨어진 후에야 아크를 소호하여 차단에 성공하지만, 진상 소전류와 같이 차단 전류가 작은 경우에는 점점이 분리된 후 곧바로 아크를 소호할 수 있다.

2.2 소전류 차단성능 예측 기술

그림 1은 소전류 차단성능 예측을 위해 필요한 해석기술 및 성능 예측 방법을 나타낸다. 유동해석은 CFD(computational fluid dynamics) 방법을 사용하고, 전계 해석은 일반적으로 유한요소법을 많이 적용하고 있다. 차단기가 소전류 차단에 성공할 것인가 실패할 것인가는 내전압과 인가전압을 비교함으로써 예측된다[2-3]. 이 때 적용되는 내전압 계산식이 곧 성능예측의 지표가 되며, 경험식 혹은 이론식이 적용될 수 있다. 여기서는 아래와 같은 경험식을 적용한다.

$$V_{bd} = a \frac{\rho^b}{E} \quad (1)$$

여기서 ρ 는 가스밀도, E 는 전계세기를 나타내며, a 와 b 는 시험으로부터 구하여야 하는 상수들이다.

그림 2는 냉가스 유동해석 결과 밀도분포 예를 보여준다. 그림에서 고정아크접점과 노즐목 사이의 좁은 유로를 통해 매우 빠른 유동이 형성되어 밀도가 낮아짐을 볼 수 있으며, 이 시점에서 절연내력이 급격히 떨어지게 된다. 유동해석 결과로 얻어진 밀도분포와 전계해석 결과를 이용하여 식 (1)로부터 내전압을 계산할 수 있으며, 차단성능 예측 인덱스 F_{bd} 를 다음과 같이 정의한다.

$$F_{bd} = \min \left\{ \frac{V_{bd} - V_{ap}}{V_{ap}} \times 100 \right\} [\%] \quad (2)$$

여기서 V_{ap} 는 인가전압을 나타내며, F_{bd} 값이 양의 값이 되면 내전압이 항상 인가전압보다 높게 되어 소전류 차단에 성공하는 경우이며, 음의 값이 되면 재점호가 일어나 차단실패로 예측하게 된다.

표 1은 소전류 차단성능 예측인덱스와 시험 결과를 비교한 것이며, F_{bd} 가 양의 값이면 시험에서 차단성공하였고, 음의 값이면 시험에서 차단실패하였다. 다만 인가전압이 345kV인 경우 예측과 시험 결과가 다르지만, 그 오차는 10% 이내로 상당히 정확히 소전류 차단성능을 예측할 수 있음을 알 수 있다.

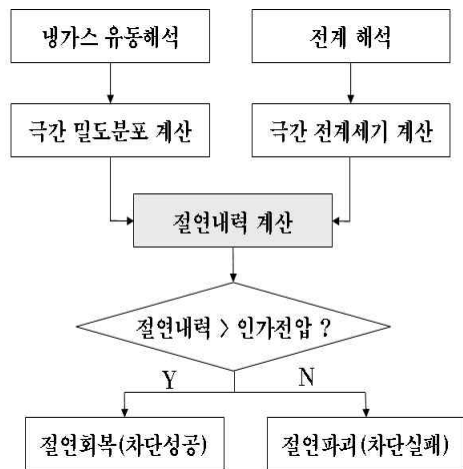


그림 1. 소전류 차단성능 해석 방법

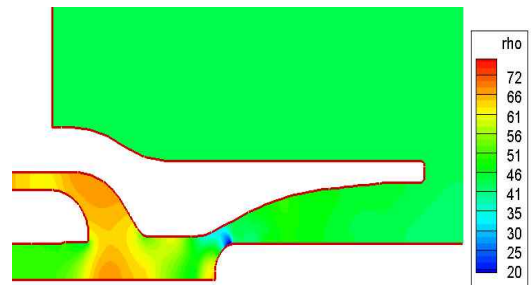


그림 2. 냉가스 유동해석 결과 극간 밀도분포

표 1. 소전류 차단성능 인덱스 및 시험결과 비교

V _{peak} [kV]	T _{arc} [ms]	Test result	F _{bd} [%]
327	3.40	○	9.3
345	2.70	×	0.1
347	3.29	○	2.1
371	3.14	×	-5.1
374	3.25	×	-5.3

○ : success , × : breakdown

2.3 대전류 차단 시의 열유동 해석 기술

대전류 차단 시에 차단부 내에는 극간에 발생한 아크 플라즈마로 인하여 고온의 열가스 흐름이 형성된다. 이 열가스가 탱크와 쉴드, 주접점 주변에 도달하면 고온 저밀도의 열가스에 의해서 절연내력이 저하된다. 근래에 전력 사용량의 증가에 따라 정격 차단전류가 커지고, 컴팩트한 GIS(Gas Insulated Switchgear) 설계를 위해서는 열가스에 의한 절연내력 저하 문제를 반드시 해결하여야 한다. 따라서 열가스 거동 해석 프로그램을 활용하여 절연내력이 저하될 것으로 예상되는 부분을 보완 설계함으로써 고신뢰성, 컴팩트한 차단부 설계를 지원할 수 있다.

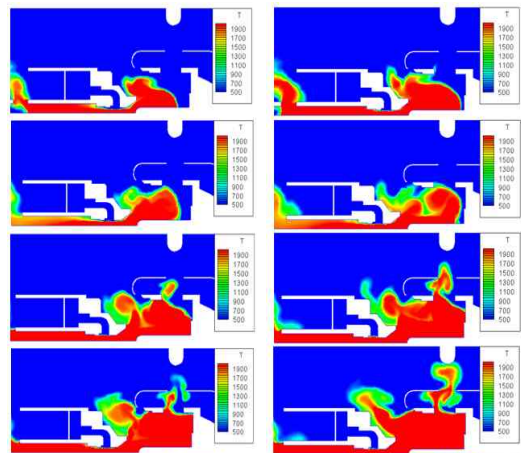
차단부 내의 열가스 거동 해석을 위해서는 아크 플라즈마 영역의 모델링 및 아크모델과 유동해석 프로그램과의 결합 기술이 필요하다[4]. 또한 고온 고압의 아크 플라즈마 물성치 데이터베이스화[5]도 필요하다. 대지간 열가스 거동 해석의 경우, 아크 영역 자체보다는 아크 영역에서 불려 나가는 고온의 열가스가 차단부 내에서 어떻게 분포하는가가 관심이므로 아크 영역을 다음식과 같이 등가적인 에너지 소스로 모델링 할 수 있다.

$$S_e = (1 - \alpha) \cdot V_{arc} \cdot I_{arc} / V_{cell} [\text{Watt/m}^3] \quad (3)$$

여기서 α 는 총 아크에너지 중에서 아크 영역을 벗어나는 비율을 나타내며, V_{cell} 는 아크 영역의 체적을

나타낸다.

그림 3은 유동해석 방법으로 FVFLIC(finite volume fluid in cell)[6]법을 적용하고 아크 영역을 식 (3)의 등가 에너지 소스로 처리한 경우, 대지간 열가스 분포를 보여준다. 그림의 (a)는 아크 전류가 20kA_{rms}인 경우이며, (b)는 30kA_{rms}이며 아킹 시간은 20ms로 동일하다. 그림에서 보듯이 아크 전류가 큰 (b)의 경우 탱크와 쉴드 사이에 온도가 더 높은 열가스가 분포함을 볼 수 있다.



(a) I_{arc} = 20kA_{rms} (b) I_{arc} = 30kA_{rms}

그림 3. 대지간 열가스 분포 해석 결과 온도분포

2.4 열가스 하의 절연성능 예측 기술

대전류 차단 시 형성된 열가스가 차단부 내에 분포 시, 전류 차단 직후 인가되는 높은 과도회복전압에 의해 절연과괴 가능성이 높아진다. 인가되는 과도회복전압에 대해서 절연과괴가 발생하지 않는 차단부 설계를 위해서는 열가스 분포 하에서의 절연과괴 전압 예측 기술이 요구된다[7]. 이를 위해서는 열가스의 온도와 압력에 따른 절연과괴 전계세기(=임계 전계세기) data가 필요하다.

균일한 전계 하에서 가스의 절연과괴 전압은 밀도

와 온도의 함수이다. SF₆ 가스 온도가 800K 이하이면 절연과괴 전압은 파센의 법칙에 의해 밀도에 비례한다. 하지만 온도가 이 이상이 되면 가스의 분해 및 이온화에 의해 파센의 법칙에 의해 계산된 절연과괴 전압보다 낮아지게 된다. Cliteur[8] 등은 균일한 전계 하에서 (E/N)_{crit} 값을 온도의 함수로서 계산하였다. 여기서 (E/N)_{crit}는 절연과괴 발생 시 전계값을 number density N으로 나눈 임계값이다. SF₆ 가스의 경우 이 값은 약 1400K까지는 압력에 관계없이 거의 일정한 값(362Td, 1Td=10⁻¹⁷Vcm²)이 되며, 온도가 증가되면 감소하게 된다. (E/N)_{crit}과 온도에 따른 number density N값을 이용하여 온도와 압력에 따른 임계 전계세기 E_{crit}를 구할 수 있다. 그림 4는 이렇게 구하여진 임계전계세기를 온도와 압력에 따라서 나타낸 것이다.

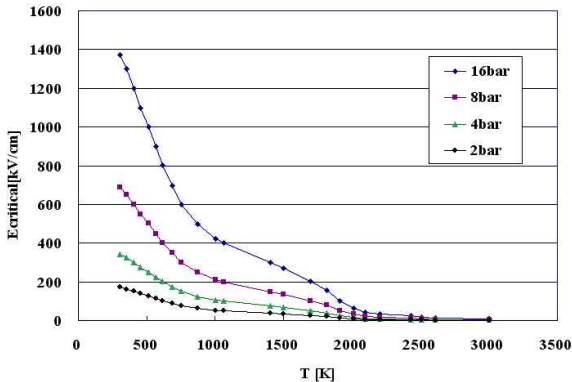


그림 4. 온도 및 압력에 따른 임계전계세기 E_{crit}

열가스의 절연특성은 인가전압에 의한 전계세기가 임계 전계세기보다 크면 절연과괴 가능성이 높은 것으로 예측된다. 따라서 절연성능 인덱스를 인가전계세기/임계전계세기의 비로 정의할 수 있으며, 이 값이 1보다 크면 절연과괴 가능성이 높아지게 된다. 그림 5는 아크 전류에 따른 전류 차단 직후의 온도, 임계전계세기 및 절연성능 인덱스를 비교한 것이다. 그

림에서 보듯이 아크 전류가 큰 (b)의 경우 탱크와 쉴드 사이에 고온의 열가스가 분포하며, 이로 인하여 임계 전계세기가 (a)의 경우보다 낮으며, 절연성능 인덱스가 1에 가까운 지점이 보인다. (b)의 경우는 차단 시험에서 실제로 지락이 발생하였으며, 지락 발생 위치는 그림의 인덱스가 높은 지점(붉은 색 지점) 부근이었다.

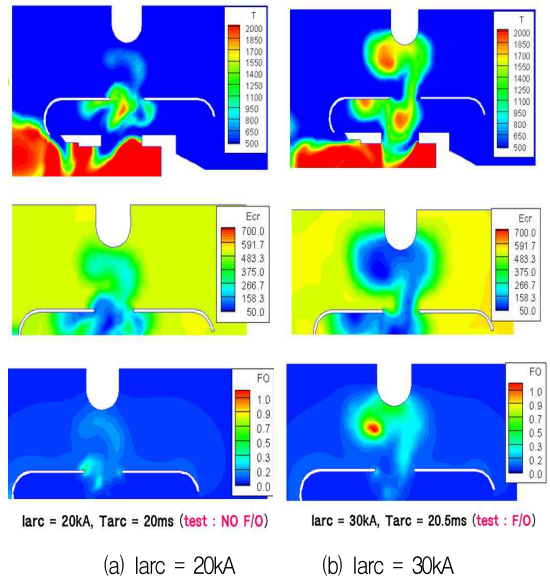


그림 5. 아크 전류에 따른 열가스 온도분포, 임계전계세기 (Ecr) 및 절연성능 인덱스(FO) 비교 (F/O는 flash-over를 의미)

2.5 SLF 차단성능 예측 기술

SLF 사고는 그림 6과 같이 차단기로부터 수~수십 km 이내의 근거리에서 발생하는 사고이다. SLF 사고가 발생한 경우에는 그림과 같이 선로를 따라 진행과가 발생하여 차단 직후에 기류기가 매우 높은 과도회복전압이 발생하며, 이것이 고장전류 차단에 악영향을 미치게 된다. SLF 차단성능 해석 방법은 주로 다음의 세 가지가 이용되고 있다.

2.5.1 전류 영점 시의 압력을 이용하는 방법

차단기의 임계 과도회복전압 상승률(RRRVc)을 다음과 같은 실험식을 이용하여 구하는 방법이다.

$$RRRVc = k P^\alpha \left(\frac{di}{dt}\right)^{-\beta} \quad (4)$$

여기서 k, α, β는 차단기 구조 등에 따른 상수이며 시험에 의해 결정되어야 한다. P는 전류 영점에서의 압력, di/dt는 전류 기울기를 의미한다. α, β는 차단기 구조에 따라서 넓은 범위를 가지기 때문에 이 방법을 적용할 경우 많은 시험 데이터가 필요하다.

2.5.2 영점 후 전류 계산 방법

전류 차단 직후 인가되는 과도회복전압의 기울기 dv/dt에 따른 영점 후 전류를 계산하여, 전류가 0으로 수렴하면 차단성공, 발산하면 차단실패로 예측하는 방법이다. 그림 7에서처럼 영점 후 전류가 수렴과 발산을 보이는 경계가 되는 dv/dt를 임계 과도회복전압 상승률(RRRVc)라고 한다. 이 방법을 적용하기 위해서는 아크 모델과 CFD를 이용하여 전류 영점까지 열가스 해석을 수행 한 후, dv/dt에 따른 영점 후 전류를 계산한다. 이 때 극간의 아크 플라즈마 해석이 중요하며, 복사열전달, 난류모델, 노즐 용삭 등 복잡한 물리적 현상들이 고려되어야 한다.

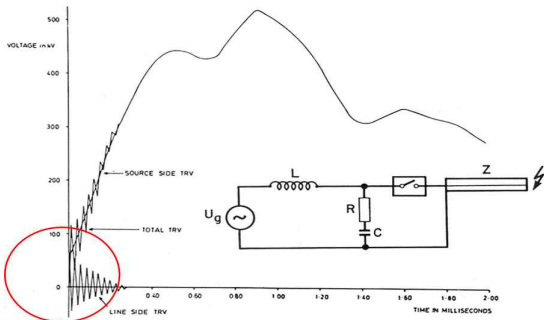


그림 6. SLF 차단 직후의 과도회복 전압 파형

그림 8은 대전류 구간 및 전류 영점 직전에 극간 열가스 해석을 통해 얻어진 온도 분포를 보여준다. 대전류 구간 결과에서는 아크가 노즐목 전체를 채우는 clogging 현상을 볼 수 있으며, 전류 영점 직전에 아크는 매우 가늘고 온도는 최대 15,000K 정도이다.

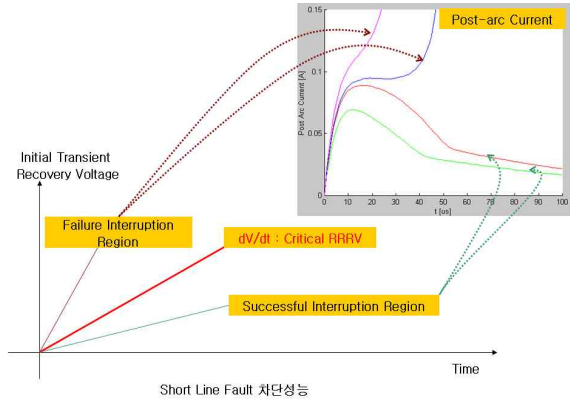
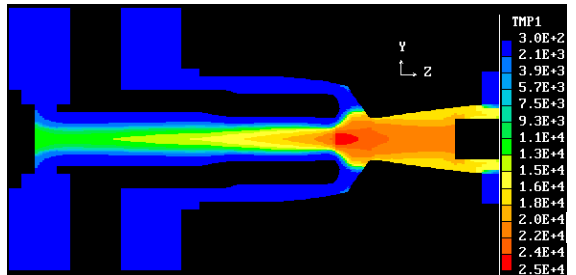
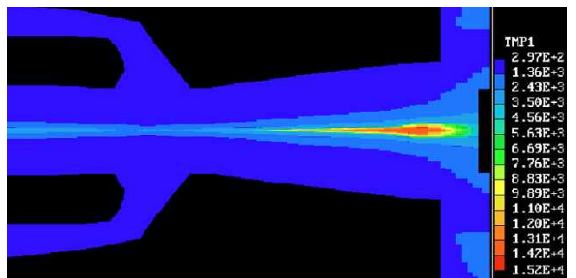


그림 7. 영점 후 전류를 이용한 RRRVc 계산



(a) 대전류 구간



(b) 전류 영점 직전

그림 8. 아크플라즈마와 CFD 해석을 통한 극간 온도 분포

2.5.3 전류영점 전 200ns의 아크컨덕턴스를 이용하는 방법

네덜란드 KEMA에서 SLF 차단성능 시험 데이터를 분석한 결과, SLF 차단성능과 전류 영점 전 200ns에서의 아크 컨덕턴스 $G(-200ns)$ 가 밀접한 관계가 있음을 파악하였다[9]. 그림 9에서 SLF 차단에 성공한 A,B의 경우와 실패한 C, D의 경우 아크 컨덕턴스를 비교하면 실패한 경우가 높게 측정이 되었다. 특히 전류 영점 전 200ns에서의 아크 컨덕턴스는 SLF 차단성능 예측 인자로서 차단기 타입, 정격에 관계없이 사용 가능성이 보고되었다. 따라서 이 방법을 적용할 경우, 영점 후 전류를 계산하는 방법보다 해석 시간이 짧아지고 안정도 높은 차단성능 예측이 가능할 것으로 예상된다. 그림 10의 (a), (b)는 차단 성공 및 실패의 경우에 전류 영점 시 극간 온도분포를 보여준다. 차단 실패한 경우는 성공한 경우에 비해 극간에 더 많은 열가스가 존재하고 있음을 볼 수 있다. 그림 (c)는 계산된 전류 영점 전 아크컨덕턴스를 보여주며, 차단 성공한 경우의 $G(-200ns)$ 가 실패한 경우보다 낮음을 해석적으로도 파악할 수 있다. 차단기 개발 시에 제작 및 시험 이전에 이러한 해석적 방법을 통해 아크 컨덕턴스가 상대적으로 낮은 모델을 설계함으로써 차단성능이 향상된 모델을 확인 할 수 있다.

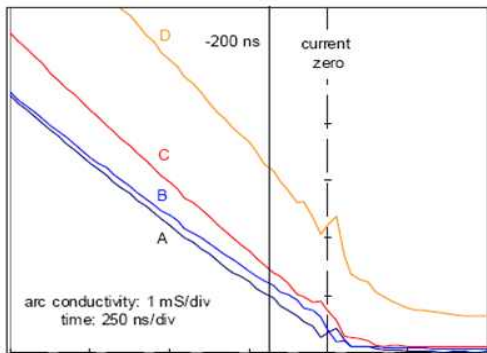
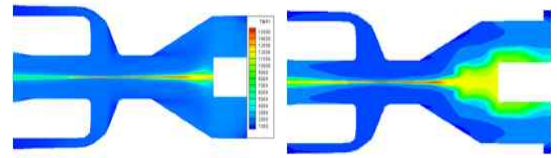
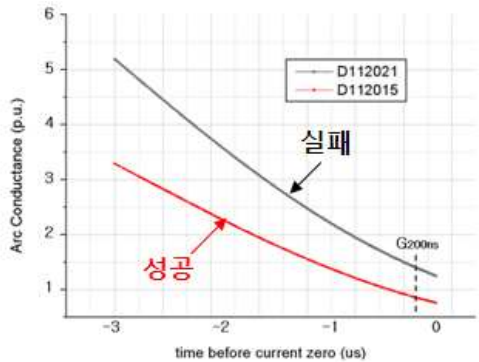


그림 9. 전류영점 부근의 아크 컨덕턴스 변화 비교 (A,B : 차단성공, C,D : 차단실패)



(a) 차단성공 (b)차단 실패



(c) 전류 영점 전 아크컨덕턴스 비교

그림 10. 전류 영점 시 극간 온도와 $G(-200ns)$ 비교

3. 초고압 GIS 절연성능 예측기술

GIS는 기중절연 변전소에 비하여 소형 제작이 가능하며 외국의 선진 제작업체들은 기술력을 바탕으로 더욱 소형·축소화된 GIS를 개발하기 위해 지속적으로 노력하고 있다. 고전압이 인가된 도전부와 접지 탱크간의 거리가 더욱 짧아져 축소에 따른 각종의 절연 문제가 발생하고 있어 이것들을 효과적으로 해결하는 것이 매우 중요한 과제가 되고 있다. 대표적인 것들은 여러 가지 이상전압의 침입에 의한 절연과피, 도체-절연물-가스가 동시에 공존하는 삼중점부와 같은 취약한 절연구조, 스페이스 등의 절연물 연면의 절연과피, 금속이물질의 발생에 의한 절연성능의 저하 등을 들 수 있다[13-16]. 또한, GIS는 축소된 공간에서 충분한 절연거리를 확보하기 위해 공기 대신 절연성능이 우수한 SF₆ 가스를 절연매체로 이용하고 있는데 이것은 공기와는 다른 절연과피 특성을 갖고 있다.

기술해설

즉, 전극 특히 음전극 표면의 영향을 받기 쉬워 전극의 표면적이 커짐에 따라 파괴전계 값이 낮아지는 소위 면적효과가 있는 점, 전계분포가 약간의 비대칭성을 나타내어도 극성효과로 두드러지게 나타나는 점 등, 공기 등의 잘 알려진 기체와는 다른 특징적인 성질들이 있다. 그동안 외국의 선진 제작사들은 가스압력, 전극간 거리, 전극구조, 전극면적의 크기, 이상전압의 종류, 금속 이물질 등에 따른 SF₆가스의 절연과 파괴특성과 절연물 연면에서의 절연과 파괴특성을 집중적으로 연구해 왔으며 그 결과를 통하여 SF₆가스에 대한 절연설계기준을 확보하여 설계에 활용하고 있다.

일반적으로 SF₆ 가스의 절연과 파괴 전계는 가스압력 P를 이용한 다음의 식을 많이 사용하고 있다.

$$E_{bd} = aP^b \quad (8)$$

여기서 a, b는 상수이며, 인가전압 파형, 전계 불균일, 전극 형상, 표면 거칠기, 습도 등 많은 영향이 고려되어 실험적으로 구하여야 한다.

절연특성 예측 시 필요한 전계 해석은 유한요소법 등을 이용하면 매우 정확도 높게 가능하다. 따라서 절연특성 예측의 핵심은 식 (8)의 상수 a,b를 구하는 것이며, 이를 위한 많은 데이터 베이스가 필요하다.

절연성능 예측 기술 비교를 위해서 Cigre Working Group A3.20에서 차단기 극간의 절연과 파괴 전압을 예측하고, 이를 시험과 비교한 결과를 발표하였다[20]. 참가한 업체는 ABB, Siemens, Areva, Toshiba, Hitachi, KERI이며, 절연과 파괴전압 측정은 KEMA에서 실시하였다. 그림 11은 차단부 모델을 보여주며, 그림 12는 6개 업체가 해석한 전계값을 위치에 따라서 차이를 비교한 것이다. 그림에서 보듯이 각 업체별 해석된 전계값의 차이는 5% 미만으로서, 전계해석은 모든 업체에서 정확히 수행하였음을 의미한다.

그림 13는 각 업체별로 예측된 절연과 파괴 전압을 측

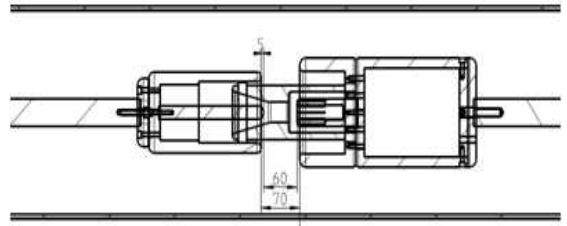


그림 11. 절연성능 예측 비교용 차단부 모델

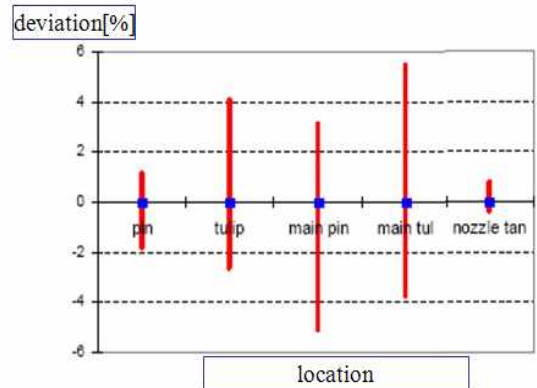


그림 12. 위치별 전계해석 결과 차이 비교

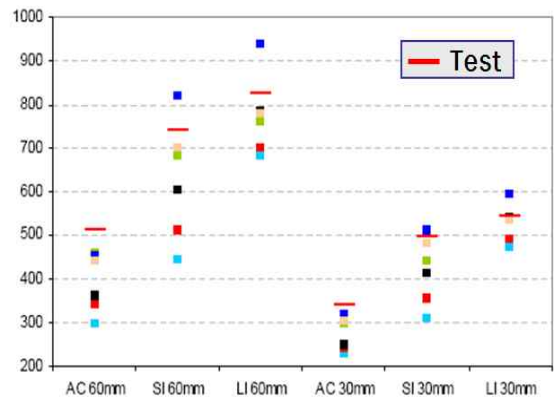


그림 13. 절연과 파괴 전압 비교(AC 60mm는 전압 파형은 AC, 극간 거리가 60mm임을 의미)

정된 값과 비교한 것이다. 시험 시 전압 파형은 AC, LI(Lightning impulse), SI(Switching impulse)

이며, 극간 거리는 30mm 및 60mm로 설정하였다. 각 업체별로 예측된 전압값의 차이가 크며, 측정값과 비교 시 최대 40%까지 오차를 보여주는 업체도 있었다. 이는 업체별로 확보하고 있는 절연 성능 예측식(데이터 베이스)가 다르며, 따라서 동일한 예측식을 모든 업체의 제품에 적용하기에는 무리가 있음을 의미한다.

4. 차단성능 향상 설계기법

4.1 순차적 근사화 모델을 이용한 최적화 프레임

최적 설계 시에는 많은 회수의 목적함수 계산이 필요하며, 만일 한 번의 계산시간이 길면 실제문제에서는 이러한 최적화 알고리즘 적용이 거의 불가능하다. 예를 들어 CFD를 이용한 차단기 유동 해석의 경우 짧게는 수 시간에서 길게는 2-3일이 소요되며, 최적화 시에 1,000번의 목적함수 계산이 필요하다면 실제 설계에는 이러한 최적화 기법 적용이 시간상 불가능하다. 이러한 문제점을 극복하기 위해서 근래에 근사화 모델(approximate model)을 적용한 최적설계 기법이 많이 사용되고 있다.

근사화 모델로 크리깅(Kriging)을 적용한 최적화 프레임을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 초기 샘플링 데이터를 LHS(Latin Hypercube Sampling) 방법으로 구한다. 이 방법은 샘플링 사이즈에 대해서 균일한 분포의 데이터를 제공하기 때문에 컴퓨터 실험에서 많이 사용되고 있다. 특히 근래에서는 OLHD(Optimized latin hypercube design)에 관한 연구가 많이 수행되어 점들 간의 거리균등도가 최대가 되도록 샘플링 위치를 결정하고 있다.
- 2) LHS로부터 구한 초기 샘플링 점에서 CFD 해석을 수행하여, 각 점에서의 함수값을 구한다. 이로부터 초기 샘플링 데이터에 대한 크리깅

(Kriging) 모델을 구성한다.

- 3) 함수 최대화 문제를 풀어서 크리깅 함수의 극대점들을 구한다. 극대점들은 함수의 형상을 표현하는 유용한 점이다.
- 4) 함수 최소화 문제를 풀어서 크리깅 함수의 극소점들을 구한다. 극소점들은 함수의 형상을 표현하는 유용한 점이다.
- 5) 수렴 기준을 체크한다. 수렴 기준을 만족하면 끝내고 그렇지 않으면 6)으로 간다. 일반적으로 이전 스텝의 함수값과 현재 스텝의 함수값의 변화율이 일정값 이내가 되면 수렴한 것으로 처리한다.
- 6) 찾아진 극대점과 극소점들 중에서 샘플링 데이터에 추가될 점들을 선정한다. 추가점에 대한 목적 함수값을 CFD 계산을 통해 구하여 샘플링 데이터 집합을 update 한다.
- 7) update된 샘플링 데이터 집합에 대한 크리깅 모델을 구현한 후 3)으로 간다.

4.2 소전류 차단성능 최적설계

소전류 차단성능 인덱스 F_{bd} 는 식 (2)와 같이 정의되었으며, 이 값이 클수록 차단기는 소전류 차단에 더 큰 여유를 가지게 된다. 즉, 소전류 차단성능 설계는 F_{bd} 를 최대화하는 문제를 푸는 것이다. 본 연구에서는 소전류 차단성능에 영향을 미치는 7개의 변수를 그림 14와 같이 설정하여 앞에서 설명한 순차적 최적화 기법에 의해 차단성능이 향상된 모델을 찾고자 한다. 각 변수의 설명은 다음과 같다.

- V1 : 고정아크접점 반경 [mm]
- V2 : 노즐 상류장 위치[mm]
- V3 : 노즐목 길이 [mm]
- V4, V5 : 노즐 하류장 형상 [mm]
- V6 : 개극속도
- V7 : 접점 중첩길이 [mm]

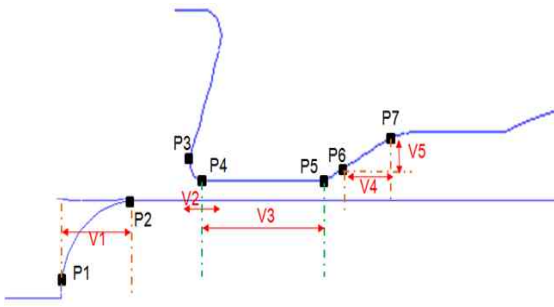


그림 14. 소전류 차단성능 향상설계 설계변수 설정

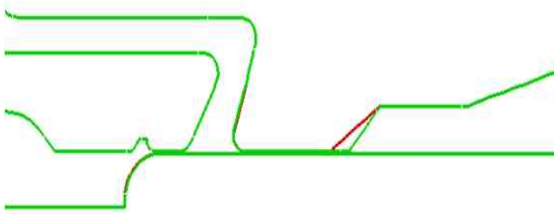
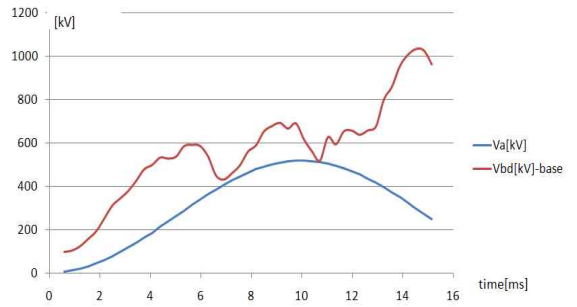


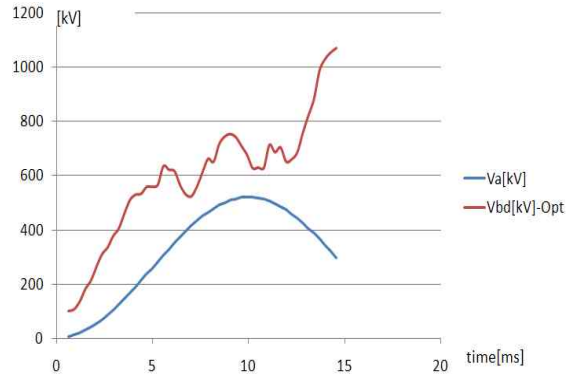
그림 15. 기본모델(green)과 최적설계된 모델(red)의 형상 비교

그림 15은 기본모델과 최적설계된 모델의 형상을 비교한 것이다. 최적설계된 모델은 기본모델보다 고정아크접점 반경이 약간 크며, 노즐목 길이가 짧고 하류장 발산각도가 더 크다.

그림 16은 기본모델과 최적설계된 모델의 내전압 특성을 비교한 것이다. 그림 (a)의 기본모델에서는 개극 후 약 7 및 11[ms] 시점에 내전압이 저하되는 것을 볼 수 있다. 하지만 최적 설계된 모델의 경우는 모든 시점에서 내전압이 인가전압보다 높기 때문에 차단성공 가능성이 매우 높은 모델이다.



(a) 기본모델의 Vap-Vbd 곡선



(b) 최적설계된 모델의 Vap-Vbd 곡선

그림 16. 기본모델 및 최적설계모델의 절연내력 비교

5. 결론

시험에 의하지 않고 기기의 성능을 예측할 수 있는 전산해석 기술은 제품개발 비용 절감, 기간 단축 및 성능향상 최적 설계의 측면에서 제품개발 프로세스의 한 축을 이루고 있다. 특히 시험비용이 높은 전력기기 분야에서 이러한 전산설계 기술을 도입한다면 기업의 제품 경쟁력에 크게 기여할 수 있다.

GCB 설계에 필요한 해석기술 분야 중 스트레스 해석은 수치해석 알고리즘의 향상과 컴퓨터의 발전에 힘입어 상당히 정확도가 높아졌지만, 아직도 성능 예측 기술은 많은 경험과 데이터 베이스가 필요하다.

Cigre WG A3.20의 절연성능 예측 비교 결과에서 보듯이 비록 스트레스 해석이 정확히 이루어지

라도 절연성능 예측 식은 선진업체라도 서로 다를 수 있다. 따라서 전산해석기술을 제품 개발에 적용 시에는 해석 프로그램의 단순 도입이 아니라 업체 모델에 맞는 성능예측 기술 확보에 대한 연구도 필히 진행되어야 한다.

참고문헌

[1] Kunio Nakanishi, "Switching Phenomena in High-Voltage Circuit Breakers", MARCEL DEKKER, INC., 1991.

[2] 송기동, 이병윤, 박경엽, 박정후, "초고압 SF₆ 가스차단기의 소전류 차단성능 해석 기술 I", 대한전기학회 논문지 Vol. 50B, No. 7, pp. 331-337, 2001년 7월.

[3] 송기동, 이병윤, 박경엽, 박정후, "초고압 SF₆ 가스차단기의 소전류 차단성능 해석 기술 II", 대한전기학회 논문지 Vol. 50B, No. 8, pp. 384-391, 2001년 8월.

[4] Y. Hayashi, et al., "On the hot gas exhaustion in the exhaust chamber of a gas circuit breaker after short-circuit current interruption", J. Phys. D, Appl. Phys., Vol. 30, pp. 3123-3130, 1997.

[5] L. S. Frost and R. W. Liebermann, "Composition and transport properties of SF₆ and their use in a simplified enthalpy flow arc model", Proc. IEEE, Vol. 59, pp. 474-485, Apr., 1971.

[6] Y. Zhao and D. E. Winterbone, "The finite volume FLIC method and its stability analysis", Int. J. Mesh. Sci., Vol. 37, pp. 1147-60, 1995.

[7] T. Uchii, S. Nishiwaki, and S. A. Boggs, "Effects of hot SF₆ on post-arc circuit breaker design", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 19, pp. 124-130, Jan., 2004.

[8] G. J. Cliteur, Y. Hayashi, E. Haginomori, and K. Suzuki, "Calculation of the uniform breakdown field strength of SF₆ gas", IEEE Trans. Dielect. Elect. Insulation, Vol. 5, pp. 843-849, 1998.

[9] R.P.P. Smeets, et al., "A new arc parameter database for characterisation of short-line fault interruption capability of high voltage circuit breakers", Proc. of Cigre Session 2006, Paper No. A3-110, 2006.

[10] D. Konig and Th. Facklam, "Pressure rise in metal enclosed SF₆-insulated high voltage switchgear of single-phase enclosure type due to internal arc", ELECTRA, No. 93, pp. 25-52, 1973.

[11] X. Zhang, G. Pietsch, and E. Gockenbach, "Investigation of the thermal transfer coefficient by the energy balance of fault arcs in electrical installations", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 21, No. 1, pp. 425-431, 2006.

[12] G. Friberg, and G. J. Pietsch, "Calculation of pressure rise due to arcing faults", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, No. 2, pp. 365-370, 1999.

[13] N.H.Malik and A.H.Qureshi, "Breakdown Mechanisms in Sulphur-Hexafluoride" IEEE Trans. Electr. Insul, Vol E-13 No 3, June 1978.

[14] Shuichi Sugiyama 외 5, "An Investigation of Breakdown Voltage with Small Arc Current Due to Poor Contact in SF₆ Gas", 91 SM 377-2 PWRD, IEEE, May 17, 1991.

[15] Y.Kawaguchi 외 2, "Dielectric Breakdown of Sulphur

Hexafluoride in Nearly Uniform Fields", Paper 70 TP 577-PWR, IEEE Summer Power Meeting and EHV Conference, Los Angeles, Calif., July 12-17, 1970.

[16] S. Menju 외 3, "Dielectric Breakdown of High Pressure SF₆ in Sphere and Coaxial Cylinder Gaps", Paper T 74 180-6, IEEE PES Winter Meeting, New York, N.Y., January 27-February 1, 1974.

[17] J. K. Kim, et al., "Temperature rise prediction of EHV GIS bus bar by coupled magnetothermal finite element method", IEEE Trans., on Magn., Vol. 41, No. 5, pp. 1636-1639, May 2005.

[18] Yunus A. Cengel, Heat Transfer: a practical approach, 2nd ed., McGraw-Hill, 2002.

[19] S. V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Co., 1980.

[20] M. Kriegel, et al., "Simulations and calculations as verification tools", Cigre General Session 2008, Paper No. A1-109, 2008.

◇ 저 자 소 개 ◇



김홍규(金洪樑)

1969년생. 1995년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 서울대 공대 전기공학부 대학원 졸업(석사). 2001년 서울대 공대 전기공학부 대학원 졸업(박사). 현재 한국전기연구원 전력기기

연구센터 책임연구원.

Tel : (055)280-1568

Fax : (055)280-1589

E-mail : kimhk@keri.re.kr