

난연성 변압기의 현황과 개발동향

허 창 수

인하대학교 전기공학과 조교수

1. 서 론

현대도시의 밀집화와 전력 수요의 급격한 증가로 인하여 도시 주변의 대용량 Power Station의 집중이 예상되고 도시 공간의 효율적 이용이 크게 대두되기 때문에 점차 전력계통의 고압화 및 설비의 소형, 경량화가 필요해지고 있다. 이러한 필요성에 부응하기 위하여 Powersite의 차단기를 비롯하여 Bus, DS, CT, PT 등 관련기기들이 거의 Compressed Gas를 이용한 절연형식을 취하고 있으며 그 성능의 우수성은 이미 널리 알려져 있다. 그러나 변압기는 이들 Total Gas Insulation화를 시도하는데 있어 유일하게 Gas 절연이 안되어 있는 것으로서 이를 위해 선진외국에서는 많은 연구를 수행하여 왔고 또한 현재도 연구중이다. 현재 사용되고 있는 변압기는 Oil을 절연재 및 냉각매체로 사용하기 때문에 화재 및 폭발의 위험이 내재되어 있고 소음 및 큰 부피, 무게 등 운송의 문제 때문에 Dimension에 제한을 받아 최적설계가 어려워 이에 대한 대책이 요구되고 있는 실정이며 이에 대해 절연 및 냉각특성이 공기보다 우수하고 폭발 및 화재의 위험

이 전혀 없는 SF₆ Gas 충전식 변압기가 주목을 받고 있다. 여기에서는 현재 사용되고 있는 난연성 변압기의 종류와 특성을 간략히 살펴보고 SF₆ Gas 변압기 및 증발냉각식 변압기의 개발동향에 대하여 알아보도록 한다.

2. 난연성 변압기의 종류

특히 근래에는 전력수요 및 인구가 밀집된 지역에 대전력을 공급해야 하기 때문에 화재, 폭발에 대한 안정성 보장과 설치장소의 용지비 및 기반공사 등에 많은 문제가 제기돼 난연성 변압기의 소형, 경량화가 절실히 요구되고 있는 실정이다.

특히 민가 등에 근접해서 변전소의 설치가 필요해짐에 따라 불연 및 저소음화 등 환경적 측면에서 보다 제한을 받고 있다. 이에 1970년대까지 주로 사용되어 온 PCB 변압기가 공해문제로 1972년, 제작 및 판매가 금지된 후 이들 지역에 대한 방제상의 법규도 강화되고 있는 실정이다. 현재 이의 대체품으로 사용되고 있는 난연성 변압기 몇 종류를 열거하면 다음과 같다.

<표5-3> 절연물질 비교 특성표

특성 물질	분자량	밀도[g/l] (20°C)	점도[cp] (20°C)	비열[kcal/ kg°C](20°C)	열전도율[kcal/ m°C](20°C)	임계온도 [°C]	임계압력 [kg/m ²]	응점[°C]	승화점[°C]	증발점 [kcal/kg]	비점[°C]
C ₈ F ₁₆ O	420	1760	1.44	0.24	0.06	227.2	16.24	-	-	21	102
SF ₆	140.06	6.1	0.0153	0.154	0.0117	45.64	37.17	-50.8	-63.8		
공 기	28.95	1.16	0.0182	0.24	0.0221	-140.7	37.2				
광 유		866	31.6	0.452	0.107						

비교 표시하였다. 앞에서 서술한 바와 같이 기존의 변압기는 공기나 광유를 사용하였으며 난연성이 요구되거나 변압기의 용량이 더욱 증가하는 경우는 SF₆ Gas에 의한 절연과 냉각을 분리하여 증발잠열이 큰 냉매를 별도로 이용하여 용량 증가를 꾀하고 있다.

증발냉각매체로서 사용가능한 물질은 표5.4에 나타내었다. 이의 선정은 그 동안은 가격 등에 의해 좌우되어 왔으나 현재는 환경보호 측면에서 인체에 무해하고 환경오염이 적은 것이 선정되고 있다. 냉각방식은 이 FC를 Nozzle를 통하여 분사하여 Mist한 다음 Gas와 함께 순환시켜 냉각하는 방법과 Mist가 아닌 Drop 상태로 권선 및 철심에 FC를 낙하시켜 온도상승 부위에 접촉함으로써 증발잠열로 냉각작용을 하는 식 등이 있다. 현재 연구는 Drop 낙하방식을 취하고 있으며 이의 연구를 위하여 Sheel Winding, 펌프를 위시한 순환구조 등이 연구되고 있다.

자냉식의 경우 온도상승으로 인한 압력상승을 고려하여 1.2kg/cm²으로 증진하고 있으며 FC를

충진하는 경우는 FC의 분압이 작용하여 이보다 압력이 증가하게 된다.

현재 대용량 변압기의 냉각물질로 사용되는 것은 표5.3에 표시한 Fluorocarbon(C₈F₁₆O)이라는 물질이다.

5. 결 론

현재 기존 변압기의 문제점 해결과 도시 공간의 효율적 이용 및 전력수요의 증가에 대처하기 위하여 난연성 변압기로서 SF₆ Gas 변압기 및 액냉식 대용량 변압기의 개발 필요성이 크게 대두되고 있으나 중전기기 제작기술이 외국에 크게 의존하고 있으며 또한 연구개발비가 매우 크게 소요되므로 일반기업체의 단독 개발은 매우 어려운 상태이다. 본 기술을 보유 및 연구하고 있는 외국회사는 5개사 정도이며, 현재 건식변압기가 사용되는 장소의 전력수요가 증가하고 또한 변전소의 CGI(Compressed Gas Insulation)화가 추진됨에 따라 수요는 상당히 증가할 것으로 생각되며 신규설치 및 기존 변압기의 대체를 고려할 때 세계시장은 성장성 및 연속성이 있을 것으로 추정된다. 이 변압기는 아직 외국에서도 일반적으로 상품화될 정도로 연구가 완료된 상태가 아니므로 기술도입이 어렵고 또한 지금부터 같이 연구를 하면 기술격차를 줄일 수 있다고 생각되므로 기본설계, 제작 연구를 통하여 자체기술의 지속적 연구가 필요하다 하겠다.

<표5-4> 변압기 냉각냉매의 물리적 특성

재료명	비 점	밀 도	빙 점	절연내력	비 고
C ₈ F ₁₆ O	102	1.78	-113	54	} 저가
(C ₄ F ₈) ₂ O	97	1.70	-100	45	
C ₂ HCl ₃	87	1.64	- 87	50	
C ₂ Cl ₄	121	1.62	- 23	50	
C ₂ H ₃ Cl ₃	75	1.32	- 37		

H종 건식변압기

약 30년 정도의 사용실적으로 신뢰성이 우수하며 주로 난연성이 높은 재료인 Poly-amid, Glass 섬유와 H종 배니시를 주절연체로 사용하기 때문에 난연도가 높고 만일의 사고시에도 폭발 및 화재의 위험이 없다. 그러나 절연의 한계로 인하여 용량은 33kV급 10MVA 이하에서 제작되며 용량에 따라 풍냉식과 자냉식이 있다.

Mold 변압기

1970년대부터 유럽에서 개발되어 사용된 변압기로 H종 건식변압기의 특징을 갖추었으며(Coil은 Epoxy 수지층으로 싸여 있어) 내습성이 양호하고 기계적 진동 및 충격에 강하여 H종 건식변압기에 대체하여 사용되고 있다. 또한 Epoxy 수지는 자기소호성이 있기 때문에 난연특성이 매우 우수한 것으로 평가되고 있다. 최근 33kV 10MVA 용량 정도까지 많이 제작되고 있으며 경음이 상대적으로 커서 Building내에 설치되는 변압기에는 변압기 진동을 억제하려는 요구가 커지고 있다.

Si 유 변압기

Si 절연유는 광유와 같은 정도의 전기적 특성과 열전도성을 갖고 있으며, 인화점이 약 300°C 정도가 되어 난연성 및 내열성도 우수하다. 또한 독성이 없으므로 취급이 용이하다. 반면에 가격이 다른 광유 등에 비하여 높으며 Arc가 발생할 경우 SiO₂를 주체로 한 백색 고형물이 발생하여 내전압이 저하하므로 110kV 이상 고전압기에는 사용에 어려움이 따른다. 해외에서 수배전용 변압기와 철도용 변압기에 많이 사용된다.

SF₆ Gas 절연변압기

이 Gas 변압기는 무독, 무취이며 불연성 및 비

폭발성으로 안전성이 매우 높은 SF₆ Gas를 변압기 외함내에 봉입한 불연성 변압기이다. 이 SF₆ Gas 변압기를 포함하여 증발냉각식 변압기의 특징을 좀더 살펴보면

- ① 이 변압기는 물리적 및 화학적으로 매우 안정한 SF₆ Gas가 Tank내에 절연체로 충전되고 냉각능력이 큰 증발냉각방식이 채용되기 때문에 기타의 난연성 변압기에 비하여 소형 경량화가 가능하다.
- ② 변압기 본체는 밀봉탱크 내에 설치되며 외부로부터 온도, Gas 압력 등을 용이하게 감시 점검할 수 있는 구조로 되어 있다. 또한, Dial 온도계는 전기접점이 구비되어 있기 때문에 원격집중 감시가 가능하다. 또한 GIS와 같은 종류의 Gas가 사용되기 때문에 보수 점검이나 Gas의 처환, 주입작업이 공통되며 Bus를 통한 차단기와와의 직결이 가능하여 Total Gas 절연화를 용이하게 할 수 있다.
- ③ SF₆ Gas의 우수한 절연내력과 Gas 절연에 적합한 절연구조로 되어 있기 때문에 유입변압기와 동등한 내절연특성을 갖게 할 수 있다.
- ④ 유입변압기와 같이 집유조나 광유분출을 고려할 필요가 없어 외관상 간단하다.
- ⑤ 유입변압기에 비하면 SF₆ Gas의 중량이 광유의 중량보다 작기 때문에 그만큼 변압기가 가벼워서 수송, 반입이 유리하다. 따라서 위에서 설명한 바와 같이 GIS와 직결하는 경우 변전설비를 보다 Compact하게 할 수 있다.
- ⑥ 기름을 사용하지 않기 때문에 주변이 청결하고 석유를 사용하지 않으므로 자원의 효율적 이용이 기대된다.

표2·1에는 변압기의 사용절연물에 따른 특징들을 열거하였는데 보는 바와 같이 Insulation 물질에 따라서 변압기의 사용온도가 제한이 되며 SF₆ Gas 변압기와 건식변압기가 Nonflammable이라

<표2·1> 변압기 종류의 비교 특성표

Transformer	SF ₆ Gas Insulated Transformer	Dry Type Transformer	Cast Resin Type Transformer	Silicone Liquid Transformer	Oil Immersed Transformer
Insulation Class(IEC)	E	H	B or F	A	A
Insulation Material	Polyester	Polyamide	Epoxy Resin	Kraft	Kraft
Insulation Gas or Liquid	SF ₆	Air	Air	Silicone	Mineral Oil
Resistance to Moisture	Excellent	Necessary to Dry Up	Better to Dry Up	Excellent	Excellent
Resistance to Dust	Excellent	Necessary to Clean Up	Necessary to Dry Up	Excellent	Excellent
Power Loss(%)	100	170	150	100	100

할 수 있다. 그러나 전식은 SF₆ Gas에 비하여 Power Loss 및 중량, 용량, 전압 Class 등에서 많은 제약을 받는다. 또한 기타의 난연성 변압기도 전식변압기에 비해서 불연성이 만족치 못하고 전압 Class 및 Loss면에서 제약이 따르게 되며 SF₆ Gas변압기가 최적화가 된다면 가장 우수한 난연성 변압기라 하겠다. 현재 연구의 초기단계로서 Prototype 변압기의 최적화가 이루어져 있지

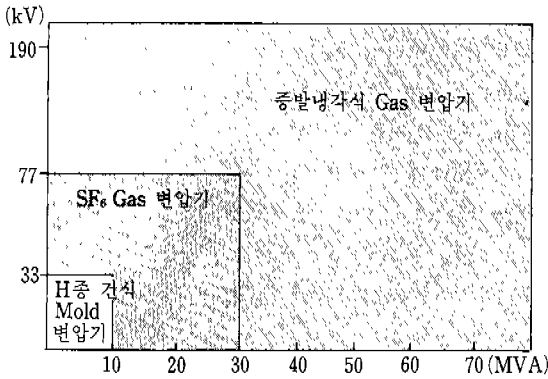
않은 상태이므로 기존의 Oil 변압기와 제원 및 특성 차이를 대등하게 비교할 수 없는 상태이나 외국의 경우 133MVA 용량의 변압기를 비교하여 보면 표2·2와 같다. 이 표에서 알 수 있듯이 Oil을 Gas로 대체함으로써 전체적인 중량이 48% 정도 감소하는 것으로 나타나며 Tank 전체 Volume은 약 34%로 특히 높이의 경우는 Bushing의 이격거리 축소에 의하여 46% 정도 감소시킬 수 있는 것으로 발표되어 있다.

또한 전체적인 Loss는 약 15% 정도 저감되며 특히 Gas는 Oil에 대해 상대적으로 음파전달이 작아 소음이 감소하는 특성을 보임으로써 소음규제가 요구되는 곳에 이용도가 증가하고 있는 것으로 발표되어 있다.

위에서 언급한 바와 같이 요구되는 난연성 변압기의 용량의 한계성을 살펴보면 그림2·1과 같다. 그림에서와 같이 H종 전식 및 Mold 변압기는 고전압화 및 대용량화에 기술적 난점이 많으며 또한 용량이 증가함에 따라 kW당 가격이 높아져 33kV, 10MVA을 최대용량으로 하고 있다. 이에 반해 SF₆ Gas 변압기는 77kV, 30MVA 이하에서 제작되고 있으며 3~5MVA 이하는 자냉식, 그 이상은 강냉식을 채용하고 있다. 용량이 더욱 증가하는 경우에는 SF₆ Gas에 의한 절연과 냉각을 분리하여 증발잠열이 큰 냉매를 별도로

<표2·2> 133MVA 1φ Autotransformer의 특성 비교표

	Conventional	Gas	Percent Change
Weight(k lbs)			
Core	58.3	50.1	-14
Conductor	27.3	13.5	-51
Dry Total	137.0	97.3	-29
Total	189.5	98.8	-48
Dimensions			
Tank Volume(Ft ³)	1360	900	-34
Overall Height(Ft)	26	14	-46
Losses(kW)			
I ² R	179	145	-19
Stray, Eddy	69	63	-9
Load	248	208	-16
No Load	47	41	-13
Total	295	249	-15
Level(dB)	71	56	-15
Space Factor(%)			
Winding Region	23	69	200
Core Window	17	50	194

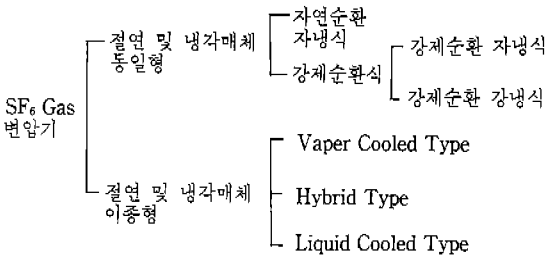


<그림 2·1> 불연성 변압기의 적용구분

사용하여 용량 증가를 꾀하고 있다.

3. SF₆ Gas 변압기의 종류

SF₆ Gas는 공기보다는 냉각특성이 우수한 기체이나 광유보다는 그 냉각특성이 일반적 구조에서는 저하하므로 특히 대용량 변압기의 경우 특별히 고려할 필요가 있으며 그 구조는 냉각방식에 따라 다음과 같이 몇 가지로 대별할 수 있다.



자냉식

밀폐된 용기내의 자연대류에 의한 SF₆ Gas의 순환에 의하여 냉각하는 것으로서 일반적인 변압기와 마찬가지로 용량의 증가에 따라 방열기를 달게 되지만 소용량인 경우에는 방열기가 없이 표면으로부터만 냉각시키는 것이 있다.

자냉식의 최대용량은 수 MVA도 되지만 용량이 커지면 다음에 설명하는 강냉식을 채용한다.

가스 강제순환 자냉식

가스의 순환계통에는 Duct를 설치하여 냉각을 돕고 있지만 자연대류에는 아무래도 냉각에 한계가 있으므로 송풍기를 이용하여 SF₆ Gas를 강제순환시키는 방식이다.

이렇게 함으로써 송풍기 보수 등에 관한 문제의 여지는 있지만 치수 및 중량의 감소에는 커다란 이점이 있어 많이 이용되고 있으며 순환계통을 몇으로 나누어서 만일의 고장에 대비하는 경우가 있다.

가스 강제순환 풍냉식

가스 강제순환 계통중의 방열기의 냉각을 자냉하지 않고 송풍기를 설치하여 강냉하는 방식으로 용량을 증가시킬 수 있다.

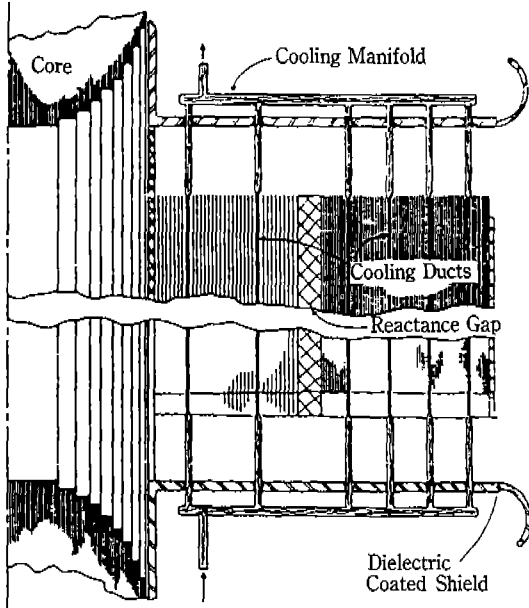
가스 액체 복합식

Gas 자체만을 가지고 절연 및 냉각을 수행하는 경우 용량이 매우 큰 경우는 치수와 무게로 인하여 제한을 받게 된다. 현재는 가스 강제순환 풍냉식과 유사한 가스 강제순환 액냉식 등에도 한계가 있어 절연과 냉각을 분리하여 절연은 SF₆ Gas가 담당하고 냉각은 FC가 담당하여 냉각특성 및 용량을 현격하게 증가시킨 형이다.

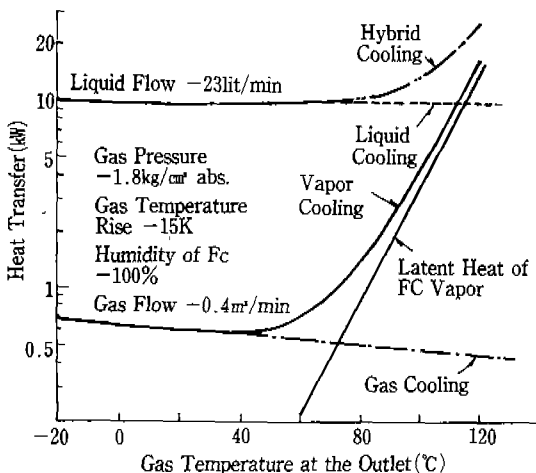
이는 냉각계통을 따로 구성하여 냉매인 FC를 노즐을 통하여 분사함으로써 Coil 및 철심은 냉각하고 다시 이 냉매의 열을 열교환기를 통하여 외부로 방출시키는 방법으로 현재 외국에서는 이 방식으로 345kV의 수백 MVA의 변압기가 개발되어 시험운전중에 있다. 자냉식의 경우 5MVA까지 일반적으로 제작되나 특히 10MVA까지 제작된 경우도 있으며 30MVA 이상은 강제순환풍

냉, 혹은 Vapor Cooling 형식을 취하고 있다.

그림3·1에는 Forced Liquid Cooling 형식의 개략도를 나타냈다. 이 경우 절연은 SF₆ Gas가



<그림3·1> 강제순환 액냉식 변압기의 개요



<그림3·2> 냉각방식에 따른 열전달 특성

유지하고 냉각은 FC(Fluorocarbon C₃F₁₆O)가 담당하며 지지용 고체 절연재료는 PET(Poly-ethylene Terephthalate), Capton Film, Mylar Film 등이 주로 사용된다.

그림3·2에는 액냉식의 경우 종류에 따른 Heat Transfer의 차이를 표시하였는데 현재 연구방향은 Vapor Cooling이 많이 연구되고 있다. 또한 FC의 가격을 고려하여 C₂Cl₄+Oil에 관한 연구도 수행되고 있다.

4. 증발냉각식 변압기의 특징

가. Sheet 및 Foil Winding

대용량 액냉식 변압기의 냉각특성을 향상시키기 위해 많이 연구되는 방식으로 Copper나 Al의 Sheet나 Foil을 사용하는 경우가 많다. 실제로 용량이 수백 kVA로 대용량이 되는 경우 기존 변압기 형태라 할지라도 Cu Strip를 사용하는 경우보다 저압은 Sheet, 고압은 Foil를 사용하는 경우가 더 경제적이다. B.S.에 의하면 0.15mm 이상은 Sheet, 이하는 Foil로 분류하게 된다. 이러한 Sheet 재료는 절연물의 Coating 기술과 함께 더욱 일반화할 것으로 기대된다.

Sheet Winding의 장점으로서는

- ① Sheet Winding은 우수한 열전달 특성이 있어 균일하고 안정된 냉각특성을 갖는다.
- ② 냉각, 절연분리식이기 때문에 Gas압을 냉매의 조건에 상관없이 상승시킬 수 있다. 또한 냉매를 Coil과 Core에 일정하게 공급할 수 있다.
- ③ Sheet Winding은 높은 정전용량과 Impulse 분포가 매우 우수하다.
- ④ 권선작업의 기계화가 가능하고 특별한 기술이 없이 품질을 안정화할 수 있다.
- ⑤ 기존의 변압기에 비하여 손실을 줄일 수 있다.

설정된 전력변압기의 손실을 일정하게 하며 주 문사양에 맞추기 위해서는 사용재료의 상이로 인한 손실 증가를 설계측면에서 보완해 줄 필요가 있다. Strip Dimension의 허용오차 범위는 현재 1% 내외로 매우 양호하나 Sheet나 Foil의 경우 이러한 허용오차 범위에 들기는 매우 어렵다. 치수가 일정치 못한 경우 변압기 자체 체적설계 문제 뿐만 아니라 통전전류 분포 등 다각적 영향이 발생하게 되므로 이에 대한 허용치를 Design Factor에서 흡수할 필요가 있다.

상용화된 Foil을 설계대로 하여 권선을 하는 경우 양 Edge의 Tip이 절연특성에 매우 큰 영향을 미치게 된다. 실제로 국내 제작의 경우 Edge의 Rounding 작업은 매우 어려우며 절연지를 포함하여 단단하게 Winding하기가 어렵다. 용량 및 절연계급에 따라 달라지겠지만 대용량인 경우 Winding이 수백회 이상 달하게 되어 절연지가 층간 삽입 절연물로 사용되는 경우 절연지가 차지하는 두께가 심각하게 된다. 따라서 매우 얇은 PET Film을 절연재로 사용하게 된다.

나. Lead Model

Sheet Winding을 변압기에 사용하는 경우 인입 Lead선 및 Tap을 위한 Lead선을 연결할 필요가 있으며 이 경우 Sheet를 그대로 인출시킬 수 없으므로 편각동선을 접속시킬 필요가 있다. 이 경우 많은 모서리들이 발생하며 전계가 집중되는 곳이 많아져 PD 발생 등 취약점이 되므로 절연보완 등 구조에 관한 연구가 필요하다. Lead선의 표면 부근과 Sheet선의 두께에 차가 생기고 Gas Wedge, Lead에 부착되는 Sheet의 Edge 등이 가장 문제가 되며 실험결과 Gas Edge 부근에서 Corona가 가장 먼저 발생하는 것으로 알려져 있다. 이에 대한 대책으로서 Gas Wedge를 Solid Wedge로 충전하고 Sheet쪽을 절연물로 보완함

으로써 취약점을 보완할 수가 있다. 이러한 Tap이나 Joint를 내는 방법에는 그 두께에 따라 보다 효과적인 방법이 사용되지만, 일반적으로 ① Mechanical Joint, ② Grazing or Welding, ③ Soldering, ④ Cold Welding 등 네 가지가 있다.

Mechanical Joint나 Welding은 비교적 두꺼운 Sheet에 사용되며 Foil에는 Soldering이나 Cold Welding이 사용되거나 Soldering의 경우에는 부식액이 잔존하게 되므로 이의 제거에 주의할 필요가 있다. 실제 제작에는 Sheet Winding을 함으로써 Spacer Factor의 문제가 커지며 이를 고려하여 Cu나 Al를 선정하여야 한다.

다. 권선의 절연특성

Sheet나 Foil을 권선으로 사용하는 경우 저압 권선은 권선높이 만큼의 단일 Sheet를 사용하게 되며 고압 코일은 몇 개의 Section으로 나누어서 직렬 연결하여 사용하게 된다. 구조적으로 변압기는 Radial 방향의 Flux 분포가 일정하지 않아 전류의 분포가 외곽되게 된다. 고압코일은 전높이에 대해 몇 개의 Section으로 나누어서 직렬 접속하게 되므로 전류 분포는 비교적 균일하게 할 수 있으나 저압의 경우는 단일 Sheet를 사용함으로써 더욱 외곽된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 철심의 상하부에 자속을 균일하게 하는 Shunt를 설치하게 되며 이의 최적설계가 변압기의 단락특성 등에 영향을 미치게 된다. 이러한 변압기 절연에서 가장 빈번히 발생하는 절연파괴 현상은 Switching Surge나 외부 Surge에 의해 권선간에 인가되는 과도전압에 의해 권선절연이 파괴되는 경우와 권선선의 지지나 기타 절연물이 절연파괴되는 경우로 나눌 수 있다. 또한 액냉식인 경우 절연 및 냉각계통이 분리됨으로써 냉각계통의 냉매이동 Pipe 및 Manifold의 절연 보완이 문제점으로 지적된다. Sheet와 절연지를 함께

Winding하는 경우 Void Free 상태로 감겨야 되며 Void가 제거되지 않는 경우 Gas를 충전해도 Void로 남게 되어 PD 발생의 원인이 된다.

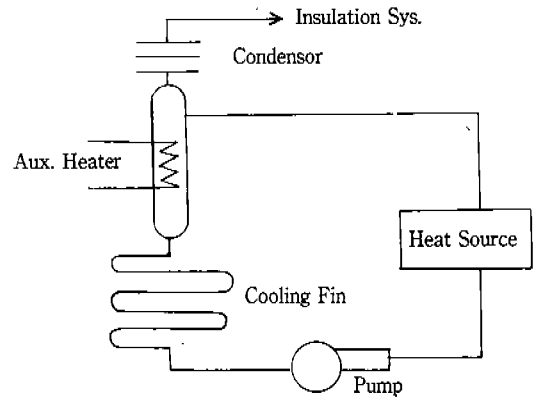
라. 냉매중의 기포 영향

밀폐된 용기내에서 변압기 Coil에서 발생하는 열을 냉매를 통하여 방열시킬 때는 냉매가 Duct를 통과하여 온도가 상승하며 일부 기화하게 된다. 이러한 과정에서 냉매에는 Hot Point에서의 Boiling에 의해 기포가 발생하며 또한 순환계통의 온도 차이에 의하여 냉매에 함유된 Gas의 포화농도가 다르기 때문에 발생하는 경우가 있다. 이 기포가 순환계통에 적체되는 경우 냉매의 순환을 제한하게 되며 Duct의 연결이 병렬로 구성된 경우 냉매순환의 불균형을 초래하게 되어 국부발열의 원인이 된다. 또한 고압 Coil 부근에서 기포는 액체와의 유전율 및 절연내력 차이로 인하여 방전을 일으키게 되어 전체 변압기 절연설계에 악영향을 미치게 된다.

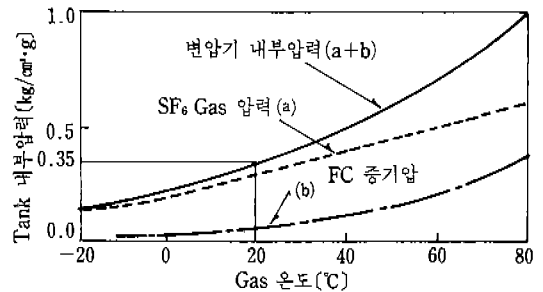
다음 그림4·1에는 기포를 억제하기 위한 System을 나타내었는데 변압기 코일 혹은 기타 열원에서 가열된 냉매가 Expansion Chamber에서 좀더 가열된다. 액체가 더욱 가열됨으로써 액체의 Vapor와 SF₆ Gas가 상승하여 응축기에서 Vapor만 응축되어 다시 액체와 합쳐지고 포화 Gas 농도를 낮춘 후 냉각기에서 냉각되어 Pumping됨으로써 열원에 분사시 온도 차이에 의한 Gas 발생량을 줄일 수 있다.

마. 내부압력과 변압기 외형

SF₆+FC가 혼합냉매 및 절연매체로 사용되는 경우 변압기 Tank는 온도상승에 따른 부피팽창을 유발하여 압력을 상승시키는 원인이 된다. SF₆ Gas는 온도상승에 의하여 부피가 팽창하며



<그림4·1> 냉매의 Gas 방출 System



<그림4·2> SF₆+FC의 압력상승의 온도 의존성

FC는 종류에 따라 다르지만 FC의 경우에는 상압에서는 약 50°C에서 기화하게 되어 매우 높은 압력상승을 유발한다. 그림4·2는 전체용적 3L의 용기에 FC를 1L 충전하여 측정한 결과이다.

이러한 결과는 전체 용기의 용적과 충전 FC의 양에 따라 달라질 수 있을 것으로 사료되며 실제로 변압기에 충전될 비율을 가정하여 시험한 결과이다. 초기 상온에서의 전체 충전압력은 1.2 kg/cm²으로 하고 있는데 이는 온도 상승시 압력상승을 고려하여 그 최대치가 고압용기의 규제를 받는 압력 이하로 하기 위함이었다. Gas만을 충전하였을 경우 변압기 운전온도를 고려하였을 때 2kg/cm²의 상승을 보임으로써 고압용기의 규제를

받지 않을 수 있으나 FC를 충전하는 경우 그림 4·2에서와 같이 증발압력이 급격하게 SF₆ Gas압에 더해져 급격한 압력상승을 초래한다. 따라서 복합절연의 형식을 취하는 변압기는 고압용기로써 취급되어 설계되어야 할 것이다.

5. SF₆ Gas 변압기의 사용재료

Gas 변압기의 본체는 기존의 Oil 변압기와 마찬가지로 냉각매체, 절연매체 및 구조재료로 크게 대별된다. 절연 및 냉각매체로 사용되는 Gas의 필요조건으로는 다음과 같은 몇 가지를 꼽을 수 있다.

- 절연내력은 저기압하에서도 매우 높은 특성을 가질 것.
 - 응축온도가 사용온도보다 낮아서 응축으로 인한 압력저하로 절연내력이 저하하지 않을 것.
 - Gas와 이와 유사한 분해 물질은 무독해야 하며 기타 절연지지물 및 구조물에 부식성이 없을 것.
 - 화학적으로 매우 안정되어 있고 비폭발성일 것.
 - 열전달 특성이 매우 양호하여 기기의 냉각을 효율적으로 설계할 수 있을 것.
- 이와 같은 조건을 가장 잘 만족시키는 것은 SF₆ Gas로서 그 일반적인 특성이 변압기 설계에 기초 자료가 된다.

가. SF₆ Gas의 특성

Gas 절연변압기의 주절연 및 냉각매체로 사용되는 SF₆ Gas는 기존의 전식변압기의 공기와 습식변압기의 광유에 비하여 매우 양호한 절연 및 냉각특성을 갖고 있다. SF₆ Gas는 충전압력에 따라 절연 및 냉각특성을 변화시킬 수가 있어 전력기기의 설계영역을 확장시킬 수 있는 장점도 있다.

취급에 필요한 물리적 특성을 표5·1에 표시하

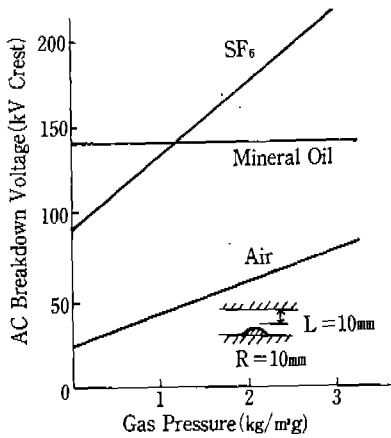
<표5·1> SF₆ Gas의 물리적 특성

Molecular Weight	146.06
Melting Point(°C)	-50.8
Sublimation Temperature(°C)	-63.8
Density(solid) at 50°C	2.51g/ml
Density(liquid) at 50°C	1.98g/ml
at 25°C	1.329
Density(gas at one bar and 20°C)	6.164g/l
Critical Temperature(°C)	45.6
Critical Pressure(bar)	36.557
Critical Density	0.755g/ml
Specific Heat(25°C-cp)	7.0g cal/ml°C
Surface Tension(-50°C)	11.63dyn/cm
Coefficient of Expansion(18.5°C)	0.027
Thermal Conductivity(×104)	3.36cal/sec/cm ² /°C/cm
Viscosity(gas at 25°C×104)	1.61 poise
Boiling Point(°C)	-63
Specific Heat(30°C)	0.143cal/g
Relative Density(air=1)	5.10
Expansion on Melting	30%
Vapour Pressure(20°C)	10.62bar
Relative Index(N at 0°C)	1.000783
Density(20°C, 1bar)	6.5kg/m ³

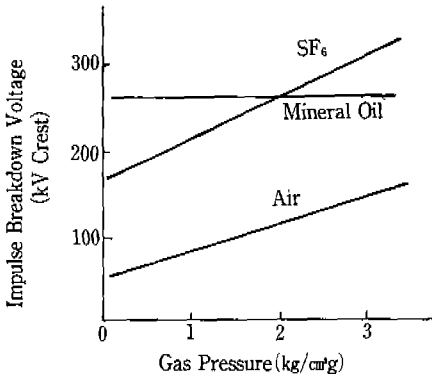
였는데 넓은 온도 및 압력 영역에서 매우 안정한 무독, 무취인 Gas이다.

위와 같이 SF₆ Gas는 정상상태에서는 매우 안정되어 있고 불활성이나 전력기기의 Arc라든지 고열에 의하여 SF₆ Gas가 분해되면 매우 독성이 강하며 활성인 부산물이 발생하여 절연재 등을 침식하는 성질이 강하므로 Arc가(혹은 PD) 발생할 가능성이 있는 부위는 이 부산물 등에 대한 내식성이 강한 재료를 선정할 필요가 있다. 특히 Si 포함절연재는 이 부산물 Gas에 매우 취약하여 절연재나 Gas 기밀용 가스켓은 Si가 함유된 재료는 피하는 것이 바람직하다.

그림5·1 및 그림5·2에 AC 내압특성과 Impulse 절연파괴 특성을 Gas 변압기에 사용되는 압력범위 안에서 표시하였다. Gas의 충전은 20°C에서 1.2kg/cm² 정도로 충전되고 있는데 이 압력은 사용최고온도(95°C)까지 온도가 상승하여도 2.0kg/cm²를 넘지 않는 압력이다.



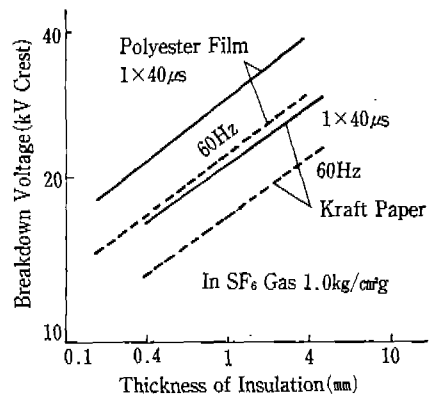
<그림5.1> SF₆ Gas의 AC 내전압 특성



<그림5.2> SF₆ Gas의 충격전압 특성

<표5.2> Polymer의 제특성

Property	Material	Polyester PET	Polypropylene PP	Polyethylene PE	Kraft Paper
Tensile Strength (kg/mm ²)		22	18	2	10
Elongation (%)		110	100	300	3
Tear Propagation Resistance (kg/mm)		22	14	1.5	—
Dielectric Constant		3.0	2.0	2.2	2.0
Thermal Conductivity (kcal/mhr°C)		0.14	0.12	0.39	0.11



<그림5.3> PET, Kraft의 내전압 특성

나. 고체 절연재료

이 Gas 변압기 절연에는 SF₆ Gas 절연 이외에 지지 및 권선피복을 위한 고체절연물이 필요하게 되는데 Kraft Paper 대신에 Polyester Film과 Polyester Spacer가 이용되고 있다. 이외에도 다른 고분자 재료들이 Lead선 등과 같은 부위의 지지에 사용되며 선택은 흡습도에 의하여 결정하게 된다. 주로 사용되는 재질들의 특성을 표5.2에 나타내었다. Kraft Paper도 절연유 중에서는 건

조후 유에 함침되기 때문에 흡습이 억제되어 양호한 절연특성이 나타나나 Gas 변압기에 사용되는 경우는 습기에 직접 노출이 되므로 문제가 된다. Polyester Film과 Kraft Paper의 절연내력 특성을 그림5.3에 나타내었다. 표5.2에서 보는 바와 같이 PET Film이 PP나 PE보다 Tensile Strength나 Tear Propagation Resistance가 우수하기 때문에 변압기 도체처럼 각형권선의 Taping에 훨씬 유용하다.

다. 냉각 절연재료

변압기는 일반적으로 절연물질이 냉각도 같이 담당하고 있으며 표5.3에는 이들 재료의 특성을