

가속열화에 따른 옥외용 epoxy수지 애자의 전기적특성 평가

조한구, 김인성, 안명상
한국전기연구소 전기재료연구부

Evaluation on the Electrical Properties of Outdoor Epoxy Resin Insulators under Accelerated Agings

H.G. Cho^o, I.S. Kim, M.S. Ahn
Div. of Electrical Materials, KERI

ABSTRACT

Epoxy resin insulator have good electrical properties (high electric strength, high resistivity, low dielectric loss) in addition to high mechanical strength, small dimensions and design versatility. Polymer insulator, however, are subjected to aging processes, caused by the surrounding atmosphere, which may lead to degradation of their properties.

This paper describes the results of a impotant study on the artificial pollution test, Weather-Ometer properties and rotating wheel dip test of high voltage different aging insulators which are the most impotant factors for outdoor uses. Also, the objects of this paper are to (a)result of insulator under dry(wet) flashover voltage, (b)artificial pollution test of salt spray, (c)Accelerated aging test of Weather-Ometer, (d) wet and dry flashover voltage under rotating wheel dip test.

1. 서 론

전력 수요의 증가에 따라 도시 주변에는 환경 및 용지 확보 관점에서 종래의 송전선을 축소형 송전선으로 대체하고자 하는 연구가 요구되고 있다. 즉 축소형의 송전선은 종래의 자기제의 현수애자 대신 고분자애자로서 축소형의 철탑 설계를 도모할 수 있다. 이와 같은 관점에서 경량 또는 고강도인 고분자애자를 개발하는 것이 중요한 과제로 되고 있다. 즉 이를 적용하면 종래의 경우에 비하여 절연강화와 승압이 가능하게 되어 송전용량을 증가시킬 수 있으며, 높이가 3/4, 선로폭을 1/2정도 축소할 수 있어 소형화가 가능하게 되며, 용지비의 경감도 기대된다 [1,2].

또한 이는 자기애자와 비교해서 밀도와 유전율이 낮고, 절연 파괴강도가 크고, 내arc성이 우수하며 기계적특성도 압축강도를 제외하고 자기애자 보다 대부분 우수하다. 또 금구의 삽입이 용이하기 때문에 일체형으로 제조가 가능하며, 애자 높이와 직경을 30%~40% 작고, 중량이 1/3~1/4로 경감할 수 있어 소형화가 이루어져도 누설거리가 긴 내오손 특성이 우수한 형상으로 제조할 수 있다 [1,3].

그러나 이와 같은 우수한 특성이 있는 반면에 이를 옥외용 절연물로 적용시에는 자연환경에서의 자외선 등에 대한 오손이 문제로서 제기되고 있다. 따라서 이러한 문제를 개선하여 사용하면 형상설계의 용이성, 금구와의 접착과 금속매입 부품의 일체화 및 산산화가 가능하게 되어 절연물 고성능화에 기여가 클

것이다 [4].

따라서 내후성이 우수한 고온 경화형의 epoxy수지를 모체(matrix)로서 사용하고 충전제를 배합하여 옥외용 지지애자를 설계 및 제조하고 전기적특성을 평가하였고, 애자의 장기신뢰성 및 오손특성을 Weather-Ometer에 의한 가속열화시험과 옥외폭로시험 및 인공오손시험을 통해 이에 대한 성능 평가와 MGR (merry-go-round) 시험에 의한 건조 및 우수섭락전압 특성을 평가하였다.

2. 실 험

2.1 출발원료

Epoxy수지는 F종 절연(155℃), 내마모성이 우수하고 특히 옥외용으로의 관점에서 오손특성이 우수한 epoxy수지를 사용하였다. 이 epoxy수지는 액상상태이고 경화제는 산무수물(acid anhydride)계로 epoxy수지와 혼합한 후 80℃~100℃에서 경화가 시작되며 경화물은 열변형온도가 높아 내열성재료의 용도로도 이용할 수 있다. 또한 epoxy-산무수물로 형성된 경화물 구조는 에스테르결합(ester-linkage)으로 열적 및 화학적으로 안정하며, 전기적 및 기계적특성도 우수하다. 경화제는 상온에서 고상이므로 35℃~38℃에서 용해시켰다.

충진재(filler)는 경화발열과 경화수축을 억제하고, 내트래킹성을 향상시키기 위해 사용하며, 애자를 제조할 경우 epoxy수지와 insert 금구와의 열팽창계수를 줄이게 되어 내열 충격성을 향상할 수 있다. 또한 제면처리된 충전제를 사용하므로 기계적특성, 접착성, 전기적특성, 내수성을 개선할 수 있다 [5,6,7].

2.2 원료 및 경화조건

표 1은 애자를 제조하기 위한 APG(automatic pressure gelat-ion) system의 원료 및 경화조건을 나타내었으며 이 주형법은 수지의 온도 보다 높게 예열된 금형에 배합된 수지를 가압 주형하는 것으로서 생산시간을 상당히 줄일 수 있으며, 경화방식 때문에 종래의 주형 방식 보다 내부 비틀림 및 crack의 발생을 억제할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 설계 형상 및 제원

갓(shed)과 갓사이는 두 갓 중 상부갓의 가장 낮은 위치에서

하부갯까지의 수선을 나타내며, 이는 갯과 갯사이에 있어서 갯우 및 눈에 의한 전교(bridging)를 피하기 위해 >30mm이고, 갯들출거리(shed overhang)와 간격(spacing)은 갯 수를 증가 또는 파도한 갯 들출거리를 너무 크게 증가시키는 것에 대한 것을 의미하며, 애자의 자기세정(self-cleaning)특성에 있어서 중요하다, 갯 들출에 대한 간격의 비는 >0.8이어야 한다[3,8,9]. 간극(clearance)에 대한 누설거리(leakage distance)는 애자의 하부부분 즉, 주름(rib)의 어떠한 부분이 가장 나쁜가를 검증하고 국부적인 전교현상을 피하기 위하여 <5로 하고 있으며, 갯의 기울기는 애자의 자기세정 특성을 나타내는 요소로 갯의 끝으로 부터 갯 상부의 기울기는 5°보다 커야한다. 단 갯의 하부 부분에 대한 기울기는 주름이 없는 갯의 경우 하부의 기울기는 2°이상일 것이 요구된다. 따라서 상부의 경우에는 20°, 하부는 4°로 하였다. 즉 갯의 하부 기울기가 증가할수록 오손밀도가 증가하기 때문이다. 최적의 갯 상부의 기울기에 대한 오손밀도는 >10°일때 낮은 값이며, 20°~30°의 범위에서는 큰 값을 나타낸다. 그러나 가장 낮은 오손밀도는 갯의 기울기가 <45°일때 얻을 수 있는데, 이는 바람에 의해 자기세정 특성이 갯의 기울기가 낮을 경우 더욱 효과적이며, 애자 표면에 부착되어 있는 미분을 제거하는데 효과적이기 때문이다[10]. 애자의 최소공칭규정 누설 거리는 20kV/mm이고, 이 오손등급은 등가염분부착밀도(equivalent salt deposit density)의 경우는 0.1~0.2mg/cm²정도이다. 제조한 애자의 제원은 표 2에 나타내었으며, 표 3에 각각의 열화 조건에 대한 애자를 표시하였다.

3.2 전기적특성 평가[11,12]

이 애자의 평균섬락전압치가 정격전조섬락전압치인 110kV의 95%(104.5kV)를 기준으로 하였으며, 그림 1은 단위 누설거리에 대한 평균섬락전압을 표시하였다. 그림에서 A조건의 애자가 Weather-Ometer(이하 WOM)에 의해 가속열화한 B, 옥외에서 1년간 폭로한 D조건의 애자 보다 평균섬락전압이 큰 것을 알 수 있다.

주수상태에 있어서 애자의 두전극간에 공기중의 통해서 지속 방전을 일으키는 교류전압의 실효치를 애자의 주수섬락전압이라 하며 강우시에 있어서 애자의 절연내력을 평가하기 위해 중요하다. 주수는 수압이 일정한 상태에서 분사시키고, 주수범위는 애자를 충분히 포함하는 넓이가 되어야 한다. 주수량은 수직 성분으로 3mm/min 및 수직성분으로 1mm/min이상, 주수각도는 애자의 중앙부에서 수직방향에 대해서 45°이며, 주수의 저항률은 100Ω.cm±15%로 한다. 상용주파주수섬락치는 5회 정도 측정하고, 그 평균치를 애자의 평균주수섬락전압치가 정격주수섬락전압치 75kV의 90%(67.5kV)를 기준으로 하였다. 그림2는 단위누설거리에 대한 평균섬락전압으로 각각의 애자 조건에 대한 주수섬락전압은 1.87kV/cm, 1.33kV/cm, 1.74kV/cm, 1.69kV/cm, 1.80kV/cm였다. 이러한 주수섬락전압은 건조상태의 평균섬락전압의 87.3%, 58.1%, 70%, 72.8%, 77.3%이다. 이것으로 보아 WOM에 의하여 가속열화한 후 세정하지 않은 B조건의 애자가 가장 큰 폭의 주수섬락전압이 감소하는 것으로 나타났다.

일반적 애자의 섬락사고는 오손물과 물이 결정적인 역할을 한다. 즉 애자의 표면을 통하여 흐르는 누설전류는 오손물질의 종류와 양에 따라 차이는 있지만, 표면에 있는 물의 형태(젖음 상태)에 따라서도 크게 차이가 난다. 표면 누설전류는 절연물이 크게 오손되어 있다 하더라도 건조상태에서 보다는 상당히 크기 때문에 표면의 젖음 상태가 매우 중요하다.

애자의 표면에 silicone으로 coating한 E조건의 애자쪽 옥외에서 1년간 폭로하였다. 이때의 coating 두께는 1mm정도였다. 그

림 3은 E조건의 epoxy수지 애자의 평균주수섬락전압을 나타내었다. Silicone으로 coating한 초기 애자의 섬락전압이 118kV인 반면, coating되지 않은 애자의 섬락전압은 114kV이다. 이와 같은 시험으로부터 silicone은 epoxy수지의 표면을 보호하고 coating 되지 않은 애자 보다 약 10%정도의 섬락전압이 큰 것을 알 수 있다.

저충격전압의 표준파형은 1.2x50μS의 정(positive) 및 부(negative)의 단극성 전파전압으로 파형의 허용치는 파두장 ±30%, 파고치 ±3%로 한다. 애자의 평균저충격섬락전압치가 정격저충격섬락전압치가 정극성 경우 +170kV의 92%(+156.4kV)이상, 부극성인 경우 정격저충격전압치가 -250kV의 92%(-230kV)를 기준으로 그림 4는 저충격전조섬락전압의 정극성, 그림 5는 부극성의 결과이다.

부분방전은 급구의 부착부분을 점지하고 상부에서 전압을 서서히 인가하여 정격전압까지 승압시키고 1분간 방치후 서서히 전압을 감소시켜 정상대지전압의 (V/√3)X1.1배의 전압치로 부분방전의 전하량을 측정한다. 이때 부분방전의 전하량은 100(PC)이하를 기준으로 하며 표4는 부분방전의 결과이다.

그림6은 가속열화시험의 일종인 RWDT (rotating wheel dip test, merry-go-round)로 이는 인가전압 10 kV~15kV, 오손액은 250~750Ω.cm의 저항률을 사용하였다. 이는 애자를 회전판(rotating wheel)에 설치하고 1rpm의 속도로 회전시킨다. 회전판이 180°회전하는 동안 전압이 인가되고, 120°회전하는 동안 오손액에 잠기게 된다. 이와 같은 시험방법으로 A, B, D조건 및 G, H조건의 서로 다른 열화조건의 애자에 대하여 가속열화 시험한 후 상용주파에서 건조 및 주수섬락전압시험을 하여 각각의 열화조건에 대한 특성을 평가하였다.

3.3 내구성시험

인공오손시험은 오손선행법과 오손분위법(염수분무법)이 있으며, 오손선행법인 경우 오손물질인 SiO₂, caoline, 식염 등이 혼합된 오손물에 애자를 넣었다 꺼낸 후 수증기로 포화 시킨 뒤 전압을 인가하는 방법이다. 이는 애자 표면의 발수성이 우수하기 때문에 오손시키는 것이 곤란하므로 애자 표면을 sand-paper 100#으로 연마한 후 표 5의 오손액에 담갔으며, 이의 오손도는 등가염분부착밀도가 0.35mg/cm²를 채택하였다. 오손액은 표 5의 배합조성으로 제조 후 약 48시간 후에 사용하였고, 이때 점도는 상온에서 2000±20CP(%)이며 애자의 표면에 오손층을 만든 후에 요구하는 오손층의 도전도에 도달할 때 까지 상대습도가 80%이상인 곳에서 30분 건조하였다. 내전압시험에서는 애자 표면의 발수성을 인위적으로 제거하였기 때문에 섬락되었다. 따라서 염수에 의한 염수분무법이 타당성이 있다고 판단되었으며, 염수는 수돗물에 식염(99.9%)을 용해시킨 것으로 압축된 공기를 이용하여 염무실에 포화가 1시간 정도 분무(salt fog)시켰다. 염수 분무속도는 0.5dm²/min±10%이며, 염무실의 주위온도는 23°C이다. 염수의 농도는 비중계로 비중이 1.075정도이며 이는 오손선행법에 의한 오손도인 등가염분부착밀도(ESDD)가 0.35mg/cm²와 같은 값이다. 오손상태에서의 절연내력을 평가하기 위한 내전압시험은 포화된 염무실의 시료에 상간 최대전압과 대지간의 시험전압인 14.9kV의 전압을 1시간 간격으로 3회 3시간 동안 인가하여 부분적인 아크방전과 섬락이 일어나는 유무를 관찰한 결과 애자의 초기 섬락전압은 시험용 변압기의 최대 인가 전압인 37kV에서도 섬락되지 않았기에 이는 내오손특성이 우수한 것으로 판명되었다. 또한 염무 3시간 동안에도 14.9kV에서도 섬락되지 않았다. 3회 3시간 후에 인가 전압을 상승하였는데 28kV에서 미소한 발광현상 및 섬락이 발생하였지만 애자의 표면에 track(도전로)의 형성이 발생하지 않

은 것으로 보아 제조된 애자는 우수한 내오손특성을 가진 것으로 추측되며 표 6은 인공오손시험의 결과를 나타내었다.

가속열화시험은 고분자애자를 옥외의 전력계통에 적용하기 위해서는 옥외의 환경조건에 대한 의한 열화의 장기신뢰성을 평가하는 것이 중요하다.

따라서 애자를 자외선, 습도, 온도, 강우의 조건하에서 가속열화시키기 위해 WOM을 사용하였고, 이 광원으로는 2500W xenon arc lamp로 outer 및 inner filter는 borosilicate glass로 이는 275nm이하의 파장을 차단시켜 방사되는 에너지는 태양광선의 분포와 유사하기 때문이다. 내부의 온도는 $63 \pm 2^\circ\text{C}$ 로 설정하였고, 옥외 절연체의 경우 태양광 뿐만 아니라 강우가 있으므로 주수를 120분중 18분의 비율로 주수하였으며, 주수 nozzle의 반경은 1.2mm, 주수압은 $1\text{kg}/\text{cm}^2$ 이다. 습도는 무강우시 50의 회전속도는 1rpm, 애자가 받는 조사량을 균일하게 위치를 180° 변경하였고, 광원과 애자의 거리는 212mm이며 애자의 상태는 축심과 직각방향으로 고정하였다. 옥외폭로시험은 크기를 $2000 \times 700\text{mm}$, 구조재는 Al이며 폭로대의 방향은 동쪽으로 향하도록 했으며 수평면과의 구배는 30° 이다. 애자는 테프론선으로 부착하였으며, 폭로한 애자의 상태는 축심과 직각방향으로 폭로하였다. 이 때 폭로면과 지면과의 높이는 900mm이다.

4. 결 론

본 논문에서는 epoxy수지로 옥외용 애자의 형상설계 및 절연설계를 통하여 APG(automatic pressure gelation) system에 의한 최적의 경화 및 mold 예열온도로서 애자를 제조하였으며, 또한 제조한 애자를 태양광선 및 옥외의 제조조건으로 인한 내후성 특성을 검토하기 위해 Weather-Ometer, RWDT(rotating wheel dip test)에 의한 가속열화시험과 옥외폭로시험, 인공오손시험등을 통하여 전력계통에 적용시 환경조건에 대한 특성을 검토한 결과 epoxy수지 애자를 옥외에 적용하는 경우에 대한 여러가지 특성을 오손특성에 대하여 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Harri Lehtinen, "Cast Resin in Outdoor Insulator", CIGRE, No.22-80.
- [2] "66kV 都市型コンパクト 送電線の 概念圖", 日本電氣新聞, 1990.5
- [3] J. S. T. Looms, "Insulator for High Voltage", Peter Peregrinus, 1988.
- [4] D. Baumann, et al, "New laboratory Results about the Erosion Resistance of Epoxy Casting Systems and their Significance for the Outdoor weathering Resistance", IEEE Inter. Sympo. on High Voltage Engineering, Vol.23, No.19, 1979
- [5] 角田光雄, "複合材料と 界面", 綜合技術出版, 1986.
- [6] 吉岡 博, "シリンプリンク劑による 表面改質", 表面科學, Vol.21, No.3, 1983.
- [7] 竹内光二, "無機物 含有材の 表面改質", 表面科學, Vol. 3, No.2, 1982.
- [8] 何村達雄 外, "がいし", 日本電氣學會, 1983.
- [9] "Guide for the Selection of Insulators in Respect of Polluted Conditions, IEC Report 815.
- [10] M. A. B. El-Koshairy, et al "The Performance of High Voltages Transmission Lines Epoxy Resin Insulators Under Desert Pollution Conditions.", Inter. Confer. on the Voltages Electric System, 1978.
- [11] Korea Electric Power Corp. Standard, ESB 131-107-174.
- [12] 原田達哉, "高電壓試驗 핸드ブック", 日本電氣學會, 1983.

Table 1 Chemical composition of the epoxy casting materials and curing temperature, mold temperature.

Casting materials	Compositions	Curing temperature	Mold temperature
Epoxy resin	100(%)	160°C/10hrs	140°C ~ 160°C
Curing agent	90(%)		
Accelerator	1(%)		
Silane treated SiO ₂	61.1(wt%)		

Table 2. Parameter characteristics of developed 24kV post insulators.

Parameters	Data
Distance of shed and shed	40(mm)
Ratio of spacing and shed overhang	0.90
Ratio of creepage distance and clearance	1.40
Shed inclination of upperside	20(°)
Shed inclination of underside	4(°)
Minimum specific creepage distance	20(kV/mm)
Creepage factor	2.1
Profile factor	1.0
Insert distance of upperside	30(mm)
Insert distance of underside	60(mm)
Leakage distance	475(mm)
Shape coefficient	2.11
Numbers of shed	5
Insulator diameter	120(mm)
Stem diameter	60(mm)
Continual distance	225 ± 1(mm)
Effective distance	225 ± 1(mm)
Weight	1.8(kg)

Table 3 Insulator of aging conditions

Conditions of insulator	Sign
Original	A
Accelerated weather-ometer 3000hr	B
Cleaning after accelerated weather-ometer 3000hr	C
Outdoor exposure 1 year	D
Silicone coating	E
Outdoor exposure 1 year after silicone coating	F
Accelerated weather-ometer 1000hr	G
Outdoor exposure 5 year	H

Table 4 Test results of partial discharge.

Types	Conditions	Test voltage (kV)	Results (PC)	Partial discharge voltage (IPC이하)
A	(23/√3)X1.1	1(PC)이하	36kVrms	
B	(23/√3)X1.1	1(PC)이하	35kVrms	
C	(23/√3)X1.1	1(PC)이하	37kVrms	
D	(23/√3)X1.1	1(PC)이하	36kVrms	
E	(23/√3)X1.1	1(PC)이하	36kVrms	

Table 5 Chemical composition of contaminants for equivalent salt deposit density degree.

Contaminants	ESDD(mg/cm ²)
	0.35
Kaoline	40g
SiO ₂ (2~20 μm)	10g
Water	1 l
NaCl	140g

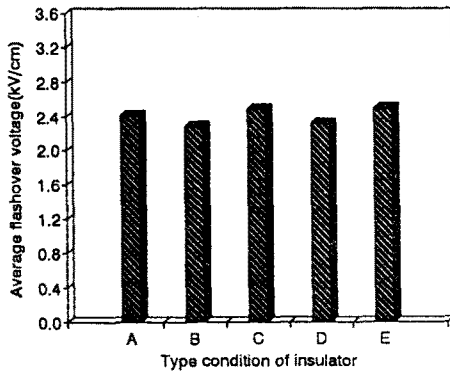


Fig. 1 Average flashover voltage for leakage distance for types insulator(dry).

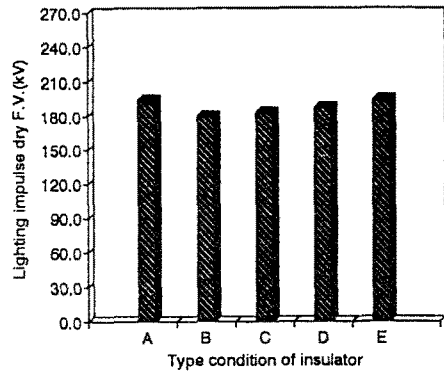


Fig. 4 Lighting impulse dry flashover voltage for types insulator of positive

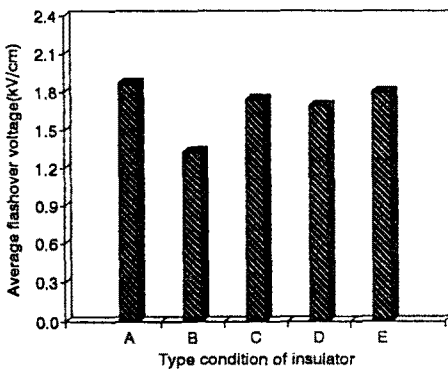


Fig. 2 Average flashover voltage for leakage distance for types insulator(wet).

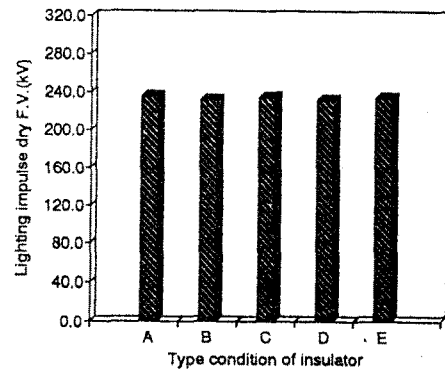


Fig. 5 Lighting impulse dry flashover voltage for types insulator of negative.

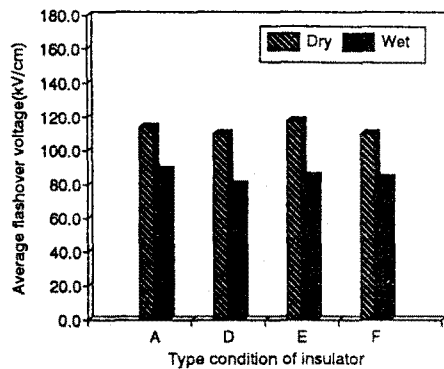


Fig. 3 The flashover voltage for silicone coated and uncoated epoxy resin insulators.

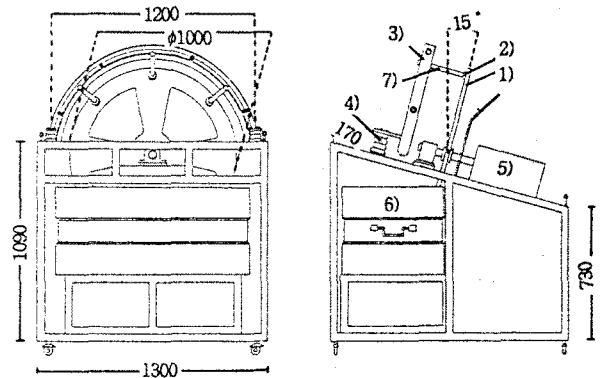


Fig. 6 Test apparatus of RWDT(MGR-merry-go-round)
 1)rotating wheel, 2)specimen holder 3)electrode,
 4)post insulator, 5)D.C motor, 6)salt solution
 7)specimen(test insulators)

Table 6 Test results of artificial pollution.

Test	Salt spray initial withstand voltage(kV)	During salt spray 3 number 3(hrs) withstand voltage(kV)	After salt spray 3 number 3(hrs) withstand voltage(kV)
A	35이상(NFO)	14.9(NFO)	28(FO)
B	35이상(NFO)	14.9(NFO)	28(FO)
C	35이상(NFO)	14.9(NFO)	28(FO)
D	35이상(NFO)	14.9(NFO)	28(FO)
E	35이상(NFO)	14.9(NFO)	28(FO)

NFO:non-flashover, FO:flashover