

# 인공신경망을 이용한 수변전설비의 예방보전을 위한 고장 조기 감지시스템에 관한 연구

## A Study on the Fault Early Detection System for the Preventive Maintenance in Power Receiving and Substation

이정기<sup>1\*</sup>  
Jung-Ki Lee<sup>1\*</sup>

### <Abstract>

The modern society longing for the convenience of up-to-date technology, there are attempts of miniaturization and high reliance of power equipments in the effectiveness aspect of urban area's usage of space while requiring more electrical energy than now. Consequently, paper used to the Neral Network for a forcasting conservation system. A neral network is powerful asta modeling tool that is able to capture and represent complex input/output relationships. The true power and advantage of neral networks lies in their ability to learn these relationships directly from the data being modeled. Traditional linear models are simply inadequate when it comes to modeling data that contains non-linear characteristics. Form results of this study, the Neral Network is will play an important role for insulation diagnosis system of real site GIS and power equipmnet using SF<sub>6</sub> gas.

**Keywords : Neral Network, Fault Early Detection System**

### 1. 서 론

산업사회의 발달과 더불어 신뢰성 높은 양질의 전기에너지와 운전 및 보수의 간편화, 계통 운용의 신뢰성, 안전성 확보가 요구되고 있다. 이에 따라 절연 특성이 매우 우수한 고압의 SF<sub>6</sub>가스를 절연재료로 사용하는 전력기기의 사용이 증가되고 있다. 또, 현대사회가 첨단과학의 이기를 갈망함에 따라 현재보다 더 많은 전기에너지를 필요로 함과 동시에 도시의 공간 활용의 효율성 측면에서 전력기기들의 소형화 및 고 신뢰화가 시도되고 있다.

이에 고압가스를 절연매체로 하는 가스절연

개폐장치나 변압기 등과 같은 고전압 전력기기는 신뢰성 향상을 위해 기기의 운전 중에 이상 유무를 검출할 수 있는 상시감시 시스템체제 구축이 대단히 중요하다. 대표적인 전력기기인 GIS(Gas Insulated Switchgear)는 설계 및 운전 중에 결함이 존재할 경우 운전시간이 경과함에 따라 이 결함에 의해 절연열화가 진전되는 것이 일반적인 현상이며, GIS의 사고는 전체 시스템의 정전을 초래할 수 있어 사고에 대한 예방 보전을 위한 조기감지시스템의 적용이 절실히 요구된다.

따라서 본 논문에서는 인간의 뇌 구조를 이용하여 모델링된 알고리즘으로 패턴 인식(숫자

<sup>1</sup>정희원, 한국폴리텍VI대학 대구캠퍼스, 전기공학과, 교수, E-mail:Jungi@kopo.ac.kr

<sup>1</sup>Dept. of Electrics, Korea Polytechnic VI College, Daegu Campus, Prof.

인식)을 이용하여 스페이스와 구전극에 대하여 설계하였으며, 스페이스의 경우에는 박리결합과 보이드결합 두가지 종류에 대해 설계하여 각 결합별로 발생하는 방전전하량을 추론할 수 있는 신경망 모델을 개발함으로써 수변전설비의 결합 발생시 측정되는 방전전하량을 추론 및 인식하여 GIS 시스템의 안전상태를 진단할 수 있는 유용한 도구로 활용이 기대된다.

정하고 전압을 인가한다. 실험 스페이스의 접지선을 탱크외에는 각각 독립적이고 고주파전류 프로브에 접속하며 검출되는 부분방전 신호는 전기-광변환에서 광파이버 케이블을 개입하여 부분방전 계측시스템에 연결한다. 상용주파 전압(60Hz)는, 노이즈 제거 트랜스를 설치후 실험용 변압기(60kV)에 의해 전압을 상승하며 실험 스페이스에 인가한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1. 결합 스페이스의 부분방전 모의 실험

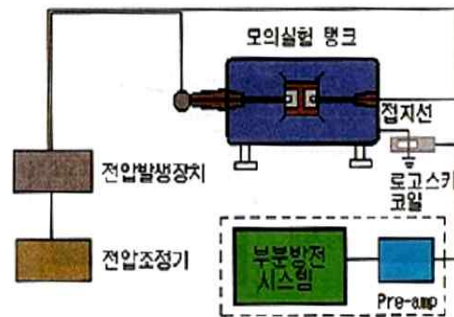
실험에 사용되는 스페이스는 Fig. 1 및 Table 1에 나타낸다. 형태로 가능한 외경 52mm, 높이40mm의 사각형과 상하 알루미늄 전극이 필요하다.



(a) Model Spacer

Table 1. The model of experimental component

종 류	기 준	갭 길이	모 의 결 합
㉠ 무 결합 품	A	2.5	-
	B	4	-
	C	8	-
㉡ 박리 결합 품	D	2.5	박리 두께 t = 0.1mm
	E	2.5	박리 두께 t = 0.2mm
	F	2.5	박리 두께 t = 0.5mm
㉢ 보이드 결합 품	G	2.5	보이드 두께 1mm, 보이드 지름 $\Phi = 2$ mm
	H	2.5	보이드 두께 1mm, 보이드 지름 $\Phi = 5$ mm



(b) Experimental devices of spacer defects

Fig. 1. Experimental devices.

재질은 알루미늄 충진의 에폭싱 수지제. (a)는 무결합 품이고, 갭 길이 d는 2.5~8mm이다. (b) 및 (c)는 스페이스의 내부결합을 만들어서 판단의 형태에 모의실험을 했으며 전극면 박리 및 보이드를 인공적으로 부가된다. 더욱, 알루미늄 전극의 표면은 샌드프라스트 처리를 실시한다.

전극면 박리는 단방의 알루미늄 투입 전극에 난형제를 소표하여, d 에폭싱 주형후에 전극을 소정의 수법에 작성하여 되며, 박리 두께t는 X선투과 기구로 확인한다. 보이드 결합은 에폭싱 주형후에 단방의 투입전극은 인출하여 내부가공을 가한다. 이것은 스페이스 모델은 그림 1에 표시하며 직경 90mm의 평판 전극간 볼트로 고

공기중과 SF<sub>6</sub> 가스중의 부분방전 전류파형을 기초로 실험연구 하였다. 표2와 그림 1에 본 실험에 사용된 장치의 설비 개요를 나타내며 시료와 침금속(Cu선 : 직경 0.5[mm], 길이 120[mm])를 사용한다. 전류파형 측정센서(CT)는 중심(단형)전극과 접지측 전극의 내부표면간 임피던스를 고려하여 계측기의 입력 임피던스와 동일하게 50[Ω]으로 설정한다. 또, 고주파 센서는 접지측 전극 즉 탱크외부 표면에 설치한다. 전류파형센서와 초음파 음향 센서는 측정계의 동축케이블 동축형 병렬저항(50[Ω])이 사용되고 시료단에서 계측기를 통해 오실로스코프로 연결되므로 전체적으로 임피던스는 50[Ω]으로 설정한다.

Table 2. Experimental condition

번호	조 건 (공기중)	
1	고전압 도체상의 이물	고전압 도체선단에 침상금속 (Al선, 0.25 $\phi$ -10mm)을 부착
2	탱크상의 이물	No.1과 같이 탱크내 표면에 침상 금속 (Al선, 0.25 $\phi$ -20mm)을 부착
3	유동 이물	No.1과 같이 탱크내 표면에 침상 금속 (Al선, 0.25 $\phi$ -10mm)을 부착
4	스페이서 곡면 부착 이물	스페이서 곡면에 침상금속 부착
5	스페이서중 보이드(고압측)	스페이서에 보이드(약 1 $\phi$ )부착

2.2. 구대구 부분방전 모의 실험

모의 실험설비 구성도는 photo 1과 같이 구대구 모델에 교류전압을 인가하며 방전 갭을 최대 4[mm]에서 최소 2.5[mm]까지 줄여가면서 교류전압(AC)을 인가하며 발생하는 방전량과 초음파 변화를 측정한다. 이때 방전 갭은 전계가 강해지면서 충돌전리현상에 의한 불꽃방전이 일어나며 전압을 상승시키고 갭 간격을 줄이면 아크방전(기중절연 파괴)현상이 일어난다. 부분방전량과 파형은 접지선에 부착한 로그스키 코일과 RF CT를 통하여 검출하며 실험 탱크 표면에 부착한 초음파 센서에 의해 음향신호를 검출한다.

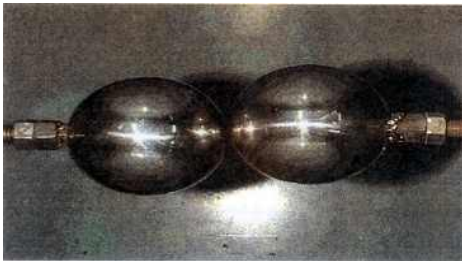


Photo 1. The electrodes of discharge Experimental devices for Sphere-Sphere.

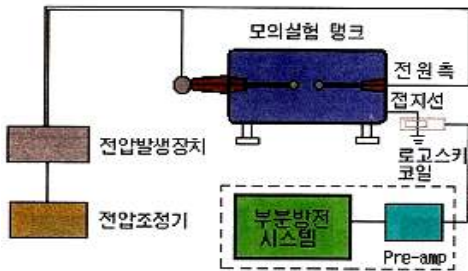


Fig. 2. The structure of discharge Experimental devices for Sphere-Sphere.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 무결함 스페이서의 부분방전

무결함 스페이서의 부분방전의 검출감도는 아주 미약하므로 10~20[pC] (1~2 $\times 10^{-11}$ [Coulomb])이다. 무결함 스페이서는 절연과피의 예비현상과 부분방전이 발생하여 전로과피에 이르는 요인을 발견하기가 어려웠다.

실험에서 부분방전의 검출감도는 10~20 [pC]로 나타나며, 검출감도이하 부분방전의 발생에 관해서는 불명확하다. 특히 무결함 스페이서에 1[pC]이하의 미약한 부분방전이 발생하며 파괴값전에 부분방전량의 급격히 증가되는 것을 알 수 있다. 그러나 현장에서 1[pC]이하의 미약한 부분방전량을 검출하는 것은 현재는 진단장비의 감도상 어려움이 있다.

3.2. 박리 및 보이드결함 스페이서에서의 부분방전

전극면 박리·보이드 결함이 있는 스페이서는 전압이 인가되면서 부분방전이 발생되고 내부열화의 진전에서부터 전로과피에 이르게 된다. 특히, 부분방전의 발생에서 파괴에 이르는 시간은 본실험에 사용한 비교적 큰 결함품의 경우 실제의 기기 사용전계는 100시간 정도의 시간이 걸리고 내부진단에 필요한 검출 시간은 더 많은 시간을 요할 것으로 생각된다. 표3과 같이 결함 스페이서는 부분방전의 발생에서 파괴에 이르는 상태를 방전전하량의 변화로 나타내며 대략 크기는 최대치에 2,900[pC]이고, 평균치의 최대방전량이 470 [pC] 이상이 된다.

Table 3. Discharge amount of deficient devices

종 류	결함	인가전계E[kV/mm]			
		10	12	18	24
박리 결함	0.1mm	-	~2,300 ~ 240	~1,500 ~ 300	~2,000 ~ 240
	0.2mm	-	~2,300 ~ 250	~2,900 ~ 470	~2,300 ~ 270
	0.5mm	-	~1,100 ~ 300	~1,200 ~ 260	~1,000 ~ 200
보이드 결함	2mm( $\phi$ )	~1,900 ~ 800	-	-	-
	5mm( $\phi$ )	~3,500 ~1,650	-	-	-

현재 부분방전 검출센서는 현장에서 검출감도는 외부잡음을 제거하는 필터를 개발하면 결합 스페이스에서의 검출은 원리적으로 가능하다고 판단된다.

보이드 결합 스페이스에서는 비교적 적은 영역에 부분방전이 집중되는 경우에는 열화의 진전에 비해 방전전하량(q)와 발생위상각(φ)의 관계(φ-q분포패턴)에 변화가 있으며 즉 전로과피의 진단계로는 부분방전 전하량의 급증으로 결국에는 φ-q분포의 왜도(Sφ), 정(+), 부(-)펄스와 함께 정(+에서 부(-)의 값으로 이동한다. 따라서 φ-q분포의 측정에서 열화정도를 정량적으로 판정할 수 있다. 이상의 결과에서 사용하는 스페이스와 조건에 따라서 검토할 필요가 있으며 스페이스의 내부이상은 부분방전 검출로 진단이 가하다.

**3.3. 구대구 모델에서의 부분방전**

구대구 방전실험에서는 전압인가 직후에는 부분방전 현상은 나타나지 않지만 Table 3에서 보면 20~60[kV] 이상 전압을 상승후 부터 방전량의 증가로 이어진다.

이때 방전량은 1,500~9,000[pC]정도 발생되고, 절연과피로 진전되는 현상이 나타난다. 이러한 현상은 현장측정치와 비교할 때 측정데이터 값은 외부노이즈의 영향으로 수백[pC]정도 오차를 발생하지만 방전이 발생할 때의 위상에 따른 파형과 방전량 발생빈도는 유사함을 발견할 수가 있었다.

**Table 4. Discharg amount of sphere electrodes**

구 분	부분방전 스펙트럼 측정 [pC]					
	10[kV]	20[kV]	30[kV]	40[kV]	45[kV]	50[kV]
2.0[cm]	103	210	1080	2312	4200	6500
2.5[cm]	88	170	750	1500	2673	5300
3.0[cm]	72	150	430	1300	2486	4700
3.5[cm]	65	115	180	800	1729	3500
4.0[cm]	32	90	150	300	1500	2500

**4. 신경망을 이용한 부분방전 모델링**

신경망 모델은 스페이스와 구전극에 대해 설계되었으며, 스페이스의 경우에는 박리결합과

보이드결합의 두가지 종류에 대해 설계되었다. 신경망 모델이 설계된 스페이스의 모델은 표 5와 같다.

**Table 5. The device model is designed of Neural Network**

종 류	모 의 결 합	인가전계
박리결합	박리두께 = 0.1[mm]	12[kV]
	박리두께 = 0.2[mm]	18[kV]
	박리두께 = 0.5[mm]	24[kV]
보이드결합	보이드 지름 = 2[mm] 보이드 지름 = 5[mm]	10[kV]

신경망 모델이 설계된 구전극의 모델은 Table 6과 같다.

**Table 6. The device of Spere electrodes designed of Neural Network**

구전극거리	인가전계
2.0[cm]	10[kV]
2.5[cm]	20[kV]
3.0[cm]	30[kV]
3.5[cm]	40[kV]
3.5[cm]	45[kV]
4.0[cm]	50[kV]

**4.1. 스페이스 박리결합에 대한 신경망 모델**

스페이스 박리형에 대해 각 조건별로 얻은 방전전하량은 Table 7과 같다.

**Table 7. The discharge amount of exfoliation devices**

종 류	결합[mm] 박리두께	인가전계 [KV]		
		12	18	24
박리결합	0.1	2,300	1,500	2,000
	0.2	2,300	2,900	2,300
	0.5	1,100	1,200	1,000

스페이스 박리형에 대한 신경망 모델은 2입력(박리두께, 인가전계), 1출력(방전전하량) 및 중간층 1개, 중간층의 유닛(Unit)은 13개로 설계하였으며, 각 유닛에서의 응답함수는 시그모이드(Sigmild) 함수인

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

를 사용하였다. Table 7에 따라 학습데이터는

(0.1, 12, 2,300)  
 (0.1, 18, 1,500)  
 (0.1, 24, 2,000)  
 (0.2, 12, 2,300)  
 (0.2, 18, 2,900)  
 (0.2, 24, 2,300)  
 (0.5, 12, 1,100)  
 (0.5, 18, 1,200)  
 (0.5, 24, 1,000)

의 9개 조합을 사용하였다.

상기 데이터를 이용하여 학습한 결과는 Table 8과 같다.

**Table 8. Designed weights of Neural Network**

		하중계수들(13개 유닛)
입력층 → 중간층	박리두께 → 중간층	(-13.46), (6.92), (-6.75), (3.63), (-9.06), (4.70), (79.53), (458.15), (140.12), (-74.58), (0.39), (1.87), (14.80)
	인가전계 → 중간층	(-72.17), (35.76), (-1254.89), (9.44), (-3.60), (5.24), (52.99), (1295.32), (56.90), (-47.99), (0.46), (6.50), (18.02)
중간층 → 출력층		(-13.25), (-28.60), (-33.79), (1.12), (-8.23), (3.67), (-1.62), (-23.33), (2.23), (-1.75), (11.69), (15.38), (10.67)

※ 39000회 학습, 평균 1.20% 에러율

**4.2. 스페이스 보이드결함에 대한 신경망 모델**

스페이스 보이드 결함에 대해 각 조건별로 얻은 방전전하량은 Table 9와 같다.

**Table 9. The discharge amount of void deficient**

종 류	결함[mm] 박리두께	인가전계 [KV]
		10
보이드 결함	2	1,900
	5	3,500

스페이스 보이드형에 대한 신경망 모델은 2 입력(박리두께, 인가전계), 1출력(방전전하량) 및 중간층 1개, 중간층의 유닛은 6개로 설계하였으며, 각 유닛에서의 응답함수는 앞과 동일하게 시그모이드(Sigmild) 함수를 사용하였다.

Table 7에 따라 학습데이터는

(2, 10, 1,900)  
 (5, 10, 3,500)

의 2개 조합을 사용하였다. 상기 데이터를 이용하여 학습한 결과는 Table 10과 같다.

**Table 10. Designed weights of Neural Network**

		하중계수들(6개 유닛)
입력층 → 중간층	박리두께 →중간층	(1.147), (2.696), (-0.897), (1.877), (2.156), (0.999)
	인가전계 →중간층	(2.935), (2.446), (-154.373), (-10.231), (0.945),(1.513)
중간층 → 출력층		(1.375), (3.218), (39.877), (6.301), (2.506), (2.871)

※ 15000회 학습, 평균 0.66% 에러율

**4.3. 구전극모델에 대한 신경망 모델**

구전극모델에 대해 각 조건별로 얻은 방전전하량은 Table 11과 같다.

**Table 11. The discharge amount of sphere electrodes model[pC]**

종 류	구전극 거리[cm]	인가전계 [kV]					
		10	20	30	40	45	50
구 전 극	2	103	210	1080	2312	4200	6500
	2.5	88	170	750	1500	2673	5300
	3	72	150	430	1300	2486	4700
	3.5	65	115	180	800	1729	3500
	4	32	90	150	300	1500	2500

구전극모델에 대한 신경망 모델은 2입력(구전극거리, 인가전계), 1출력(방전전하량) 및 중간층 1개, 중간층의 유닛은 16, 15, 16개로 설계하였으며, 각 유닛에서의 응답함수는 앞과 동일하게 시그모이드(Sigmild) 함수를 사용하였다. Table 11에 따라 학습데이터는

(2, 10, 103) (2, 20, 1080) (2, 45, 4200)  
 (2.5, 10, 88) (2.5, 30, 750) (2.5, 45, 2673)  
 (3, 10, 72) (3, 30, 430) (3, 45, 2486)  
 (3.5, 10, 65) (3.5, 30, 180) (3.5, 45, 1729)  
 (4, 10, 32) (4, 30, 150) (4, 45, 1500)  
 (2, 20, 213) (2, 40, 2312) (2, 50, 6500)

(2.5, 20, 170) (2.5, 40, 1500) (2.5, 50, 5300)  
 (3, 20, 150) (3, 40, 1300) (3, 50, 4700)  
 (3.5, 20, 115) (3.5, 40, 800) (3.5, 50, 3500)  
 (4, 20, 90) (4, 40, 300) (4, 50, 2500)

의 30개 조합을 사용하였다. 상기 데이터를 이용하여 학습한 결과는 Table 12와 같다.

**Table 12. Designed weights of Neural Network**  
**a) For distances less than 20[cm] of Sphere electrodes**

		하중계수들 (16개 유닛)
입력층 → 중간층	박리두께 → 중간층	(-4.13), (2.65), (3.17), (3.22), (-20.11), (19.68), (5.38), (4.62), (-73.81), (-0.91), (2.55), (14.79), (2.92), (-175.91), (4.35), (1.66)
	인가전계 → 중간층	(330.62), (-0.91), (1.33), (-5.90), (-134.42), (6.13), (-11.93), (3.04), (-70.80), (-6.73), (2.61), (9.75), (2.11), (-551.24), (11.09), (2.84)
중간층→출력층		(-16.28), (5.84), (4.65), (7.98), (10.08), (6.09), (1.99), (0.14), (-21.70), (1.65), (4.55), (4.61), (6.35), (-8.08), (1.05), (2.21)

※ 30000회 학습, 평균 2.36% 에러율

**b) Sphere electrode distance from 20[cm] to 40[cm]**

		하중계수들(15개 유닛)
입력층 → 중간층	박리두께 → 중간층	(-40.23), (12.23), (-7.09), (2.36), (-6.49), (1.45), (1.87), (4.01), (13.29), (2.32), (-41.50), (-823.85), (0.83), (2.26), (2.99)
	인가전계 → 중간층	(-171.49), (38.42), (-1264.00), (0.74), (-775.05), (1.38), (-1.42), (-10.89), (71.54), (-0.47), (-89.43), (-3228.60), (2.23), (2.59), (1.69)
중간층→출력층		(3.98), (4.05), (44.13), (1.25), (-29.71), (-0.07), (1.93), (3.14), (10.66), (1.70), (10.16), (-50.66), (4.46), (1.00), (3.26)

※ 45000회 학습, 평균 2.64% 에러율

**c) Sphere electrode distance from 40[cm] to 50[cm]**

		하중계수들(16개 유닛)
입력층 → 중간층	박리두께 → 중간층	(-12.27), (3.74), (3.16), (-236.78), (47.62), (18.48), (-190.90), (-13.30), (7.31), (-46.05), (5.79), (1.65), (7.20), (-107.07), (-381.91), (-143.72)
	인가전계 → 중간층	(-2712.61), (0.03), (0.83), (-280.79), (60.57), (25.16), (-861.85), (-121.03), (19.76), (-59.49), (19.47), (-5.59), (13.21), (-546.95), (-750.03), (-702.26)
중간층 → 출력층		(-14.52), (3.44), (16.59), (-6.53), (15.55), (7.70), (-6.83), (5.38), (15.51), (0.70), (3.80), (1.07), (-1.06), (-0.72), (-32.73), (-0.48)

※ 54000회 학습, 평균 2.26% 에러율

## 5. 결 론

본 논문에서는 인간의 뇌 구조를 이용하여 모델링된 알고리즘으로 패턴 인식(숫자인식)을 이용하여 스페이스와 구전극에 대하여 설계하였으며, 스페이스는 박리결함과 보이드결함 두 가지 종류와 구전극거리 변화에 대해 설계하여 각 결함별로 발생하는 방전전하량을 추론할 수 있는 신경망 모델을 개발하였다.

본 신경망 모델을 이용하면 데이터에 주어지지 않은 결함이 발생했을 때, 발생할 수 있는 방전전하량을 추론할 수 있는 장점이 있다. 따라서 GIS 시스템 및 수변전설비의 안전상태를 진단할 수 있는 유용한 도구로 활용 될 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

- 1) Toshio Suzuki, "Future Power System & Challenges in Electric Power Engineering", 8th International Symposium on High Voltage Engineering, Yokohama, Japan, August 23-27, (1993)
- 2) 土森紀之, 長澤隆土, "21세기의 전력에너지 - 轉送技術Ⅲ・系統成・運用の高速化", 電學誌, Vol. 112, No. 8, pp592-596, (1992)
- 3) 財團法人電力中央研究所, 電力輸送技術の長期研究ビジョンを定"電中研ニュース, No. 213, 平成 3-12.
- 4) 김현숙, 김소윤, "미래를 준비하는 신경망 컴퓨터", 크라운출판사, (1994)
- 5) 한학용, "패턴인식개론", 한빛미디어, (2005)
- 6) 오성권, "프로그래밍에 의한 컴퓨터 지능", 내하출판사, (2002)
- 7) R.J.Meats : 3rd Int. Conf., "Gas Discharge", London, Sep, (1974)

(접수:2011.04.28, 수정:2011.06.15, 게재확정:2011.08.24)