

부분방전 신호와 잡음의 분리

(Separation of Partial Discharge Signals and Noise)

이승환* · 유치형** · 정찬수*** · 김재철*** · 이상철**** · 정양웅*****

(Seung-Whan Lee · Chi-Hyung You · Chan-Soo Chung · Jae-Chul Kim · Sang-Chul Lee · Yang - Woong Jeong)

요 약

전력용 변압기의 절연 열화를 탐지하기 위한 연구가 오래 전부터 연구되어 왔으며 절연유에 함유된 연소성 가스분석 기술이 주로 활용되고 있다. 최근들어 고압 대용량화에 따른 사고 과급효과가 커지게 되면서 on-line 탐지 시스템의 필요성이 대두되면서 부분방전 신호 검출법이 연구되기 시작하였다. 본 연구는 부분방전 신호 검출법 중에서 탐촉자의 탈착이 용이한 초음파 신호 측정법에서 가장 큰 문제점인 잡음신호 분리를 위한 연구이다. 신호원의 개수와 위치를 측정할 수 있으므로 측정된 초음파 신호가 부분방전에 의한 것인지 외부 잡음인지를 구별할 수 있으며 변압기의 절연열화 판단에 한층 신뢰성을 향상시킬 수 있게 되었다.

Abstract

The research for detecting of insulating deterioration in transformer has been studied from long ago and the analysis method of combustible gas which is included in insulating oil has been used. Recently the spreading effect of the accident is larger than before because of high voltage and large capacity, so on-line detecting system is needed and the study for the estimation of partial discharge signals location has begun. This thesis is the study for the separating noise signal that is the greatest problem in ultrasonic signal measurement which is one of the method of estimation of partial discharge signals location. Because we can measure the number and location of signal, it is possible to distinguish between the signal of partial discharge and the external noise. Therefore, we can devolop the credibility of detecting of insulating deterioration in transformer.

1. 서 론

전력용 변압기의 절연 열화 상태를 진단하기 위해

- *정회원 : 숭실대학교 전기공학과 박사과정
 - **정회원 : 숭실전자계산원 교수
 - ***정회원 : 숭실대학교 전기공학과 교수
 - ****정회원 : 동서울대학교 전기공학과 교수
 - *****정회원 : 서해대학 전자계산과 교수
- 접수일자 : 1998. 2. 5

서 부분방전 신호의 크기와 발생빈도의 경향을 추적 하는 연구가 진행되어 왔다. 그런데 변압기의 특성상 부분방전 신호를 탐지하기 위하여 변압기 내부에 센서를 설치하는 것은 또 다른 절연사고의 원인이 될 수 있으므로 외부에서 이를 탐지하는 방법이 강구되어야 한다. 외부에서 부분방전신호를 탐지하는 방법으로 초음파 측정법이 많이 사용되고 있으며, 이때 외부잡음의 유입으로 인해 절연열화 상태진단의 신뢰도가 떨어지는 약점이 있다. 이를 극복하기 위하여

두 개의 센서에 탐지된 초음파 신호의 상호상관 관계를 이용하여 부분방전 발생위치를 추정함으로써 [1-8] 초음파 센서에 탐지된 신호가 부분방전에 의한 것인지 아니면 변압기 외부에서 발생한 잡음에 의한 것인지를 구분하려는 노력이 있었으나 신호원이 하나인 경우에만 사용할 수 있는 제약이 있다. 그러나 부분방전 신호원이 두 개 이상인 경우가 많고 특히 절연 열화가 진행되면 부분방전 신호원은 두 개 이상일 수 있다. 그러므로 초음파 센서에 탐지된 신호가 부분방전에 의한 것인지 아니면 변압기 외부에서 발생한 잡음에 의한 것인지를 구분하려면 다수 개 부분방전 신호원이 있을 경우에 대한 대책이 요구된다. 따라서 본 논문에서는 부분방전 신호원이 두 개 이상일 때에도 부분방전 신호원의 위치 추정이 가능한 방향각(Direction of arrival) 추정방법을 도입하였다. 방향각추정 방법[9]은 신호원이 센서에 유입되는 신호가 평면파(Plane Wave)라는 가정하에 신호원이 서로 다른 위치에 배열한 센서까지 전파하는데 필요한 상대 지연시간을 이용하여 부분방전 신호원의 위치를 추정한다. 방향각 추정 방법은 부분방전 신호원의 위치를 추정하기 위해 먼저 부분방전 신호원의 갯수를 결정한다. 신호원의 갯수는 센서에서 측정된 신호의 자기상관 행렬을 구성하여 자기상관 행렬의 고유치중 기준값인 잡음 전력값보다 큰 고유치의 개수를 신호원의 갯수로 결정한다. 결정한 신호원들의 위치를 추정하기 위한 방향각 추정은 SB(Sequential Beamforming)알고리즘을 사용한다.

다수개 부분방전 신호원의 위치 추정을 방향각추정 방법으로 할 수 있음을 모의 실험으로 확인한다. 모의실험은 변압기내 부분방전 신호원 두 개를 다음 세 가지로 분류하여 발생시켜서 한다. 첫째 주파수 대역이 같은 두 개의 부분방전 신호원이 동시에 발생할 때이다. 둘째 두 개의 부분방전 신호원이 주파수 대역은 같으나 발생 시간차이가 있을 때이다. 셋째 주파수 대역이 유사한 두 개의 부분방전 신호원이 동시에 발생할 때이다. 이는 실변압기내 발생하는 다수개 부분방전 신호원들이 위 세 가지 관계가 있을 수 있으므로 이를 모의하기 위함이다.

2. 센서에서 측정된 신호의 모형

변압기 외벽의 서로 다른 위치에 부착한 p 개 센

서의 좌표를 $S_m = (x_m, y_m, z_m)$, $m = 1 \dots p$ 라 하면 부분방전 신호원이 발생했을 때 방사된 단일 신호원은 식 (1) 처럼 신호원이 센서까지 도달하는데 필요한 상대 지연시간을 이용해 이상적으로 모형화한다.

$$\mathbf{x}_{ideal}(t) = \begin{bmatrix} f(t - \tau_1(\theta)) \\ f(t - \tau_2(\theta)) \\ \vdots \\ f(t - \tau_p(\theta)) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$\mathbf{x}_{ideal}(t)$ 는 그림 1 처럼 신호원 $f(t)$ 가 발생했을 때 신호원 발생 지점에서 서로 다른 위치에 부착한 p 개의 센서에 신호원이 직접 유입되고 외부 잡음이 센서에 혼입되지 않았다고 가정하고 센서에 측정된 신호의 모형이다. 식 (1)에서 $f(t - \tau_p(\theta))$ 는 부분방전 신호원 $f(t)$ 가 발생했을 때 p 번째 센서가 측정된 신호를 나타낸다. 식 (1)에서 $\tau_1(\theta), \dots, \tau_p(\theta)$ 는 그림 1에 나타난 것처럼 신호가 각 센서에 도착하는데 필요한 상대 지연시간이며, 부분방전 신호원의 방향각(Direction of arrival)을 추정하여 위치를 추정하는데 이용한다. $\tau_1(\theta), \dots, \tau_p(\theta)$ 는 식 (2)와 같이 부분방전 신호원 $f(t)$ 의 방향벡터인 θ 의 함수가 된다.

$$\theta = [\theta_1 \ \theta_2]^T \quad (2)$$

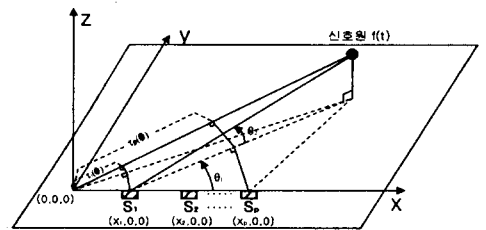


그림1. 원점을 기준으로 상대 지연시간 계산
Fig.1 Calculating relative delay time from origin

방향벡터인 θ 는 변압기 내부에 부분방전 신호원이 발생했을 때 그림 1에 나타난 것처럼 부분방전

신호원 위치를 결정하기 위해서는 방위각(Azimuth Angle) θ_1 과 고도각(Elevation Angle) θ_2 로 구성된다.

그림 1과 같이 센서를 x 축에 배열하면 상대 시간 지연 $\tau_m(\theta)$ 은 식 (3)와 같다.

$$\tau_m(\theta) = \frac{1}{v} x_m \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) \quad (3)$$

식 (3)에서 v 는 부분방전 신호원의 전파속도이다. 상대 시간지연은 초음파 신호가 신호원에서 원점까지 도달하는데 소요되는 시간과 각 센서까지 도달하는데 소요되는 시간과의 차이이다. 즉, 그림 1에서 $\tau_1(\theta)$ 는 신호원 $f(t)$ 가 센서 S1에 전파되는데 소요되는 시간과 원점까지 전파되는데 소요되는 시간과의 차이이다.

$x_{ideal}(t)$ 를 푸리에 변환을 함으로서 식 (4)처럼 표현할 수 있다.

$$x_{ideal}(\omega) = f(\omega) s(\omega, \theta) \quad (4)$$

식 (4)에서 $f(\omega) = \mathcal{F}\{f(t)\}$ 이다. 센서에서 측정된 신호 $x_{ideal}(t)$ 로는 신호원이 코히어런스(Coherency) 되었거나 외부 잡음이 혼입될 경우 신호원 갯수를 명확하게 결정할 수 없으므로 코히어런스가 되지 않고 잡음의 영향이 적은 주파수에서 신호원 수를 결정하기 위하여 $x_{ideal}(t)$ 를 푸리에 변환을 한다.

식 (4)에서 $s(\omega, \theta)$ 는 조정벡터(Steering Vector)로서 식 (5)처럼 $p \times 1$ 벡터로 표현된다.

$$s(\omega, \theta) = \begin{bmatrix} \exp(-j\omega \tau_1(\theta)) \\ \vdots \\ \exp(-j\omega \tau_p(\theta)) \end{bmatrix} \quad (5)$$

식 (4)의 모형을 다수개 신호원 경우로 확장하는 것은 간단하다. 즉, 방향벡터 θ_n 과 신호원 $f_n(t)$ 가 q 개 있을 경우($1 \leq n \leq q$), q 개의 신호를 합하여 식 (6)처럼 표현할 수 있다. 식 (6)에서 잡음항을 추가시킨 것은 현실적으로는 여러 요인에 의해 식 (4)와 같이 모형화되지 않기 때문에 이러한 오차를 고려하기 위해서이다.

$$\begin{aligned} x(\omega) &= \sum_{n=1}^q f_n(\omega) s_n(\omega, \theta) + \eta(\omega) \\ &= S(\omega, \theta_c) f(\omega) + \eta(\omega) \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)에서 $f(\omega)$ 는 $q \times 1$ 벡터로 신호원을 푸리에 변환 $f_n(\omega) = \mathcal{F}\{f_n(t)\}$ 하여 얻고 $\eta(\omega)$ 는 센서에 혼입된 잡음으로 $p \times 1$ 벡터이다.

$S(\omega, \theta_c)$ 는 $p \times q$ 합성조정행렬(Composite steering matrix)로서 각각의 신호원에 관계된 q 개의 조정벡터 열로 식 (7)처럼 구성된다.

$$S(\omega, \theta_c) = [s_{1(\omega, \theta_1)} : s_{2(\omega, \theta_2)} : \dots : s_{n(\omega, \theta_q)}] \quad (7)$$

합성조정행렬 $S(\omega, \theta_c)$ 는 신호원이 센서에 유입되는 상대 지연시간을 반영한 것으로 다중 신호원의 위치추정 문제를 해결하는데 사용한다. 센서의 위치와 상대지연시간요소로 구성된 $S(\omega, \theta_c)$ 은 특이행렬(Singular matrix)이 아니라고 가정한다.

식 (7)에서 합성방향벡터 θ_c 는 식 (8)과 같이 각 신호원의 방향벡터로 구성된다.

$$\begin{aligned} \theta_c &= [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q] \\ &= \begin{bmatrix} \theta_{11} & \theta_{12} & \dots & \theta_{1q} \\ \theta_{21} & \theta_{22} & \dots & \theta_{2q} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)에서 θ_1 은 신호원 1의 방위각 θ_{11} 과 고도각 θ_{21} 로 구성되는 방향벡터, θ_2 는 신호원 2의 방위각 θ_{12} 과 고도각 θ_{22} 로 구성되는 방향벡터, θ_q 는 신호원 q 의 방위각 θ_{1q} 과 고도각 θ_{2q} 로 구성되는 방향벡터이다. 센서에서 측정된 신호를 모형화한

$x(\omega)$ 는 다수개 신호원의 갯수를 결정하고 위치를 추정할 때 사용한다. $x(\omega)$ 가 다수개 신호원의 신호를 잘 모형화한 것이라면, 부분방전 신호원의 위치를 결정하기 위해서는 식(6)을 만족하도록 합성조정행렬 $S(\omega, \theta_c)$ 를 구성하는 합성방향벡터 θ_c 를 추정하면 된다. 즉, 센서에서 측정된 신호를 모형화한 식 (6)을 이용하여 식 (9)로 표현한 오차벡터(

Error Vector)를 최소화 하도록 하는 합성방향벡터 θ_c 를 찾으면 된다.

$$\epsilon(\theta_c, \omega, f(\omega)) = \mathbf{x}(\omega) - \mathbf{S}(\omega, \theta_c) \mathbf{f}(\omega) \quad (9)$$

3 신호원 갯수 추정

식 (9)를 최소화하는 방향벡터를 추정하기 위해서는 먼저 신호원 갯수를 결정해야 한다. 신호원 갯수를 결정하기 위하여 식 (10)처럼 자기 상관행렬을 구성하였다. 여기서, $\mathbf{S}(\omega, \theta_c)$ 는 $p \times q$ 합성조정행렬이고, $q \times q$ 행렬인 $\mathbf{C}_f(\omega)$ 은 식 (11)와 같이 정의되고, $p \times p$ 행렬인 $\mathbf{C}_\eta(\omega)$ 는 식 (12)와 같이 정의된다.

$$\mathbf{C}_f(\omega) = E[\mathbf{f}(\omega) \mathbf{f}(\omega)^H] \quad (11)$$

$$\mathbf{C}_\eta(\omega) = \sigma(\omega)^{-2} E[\boldsymbol{\eta}(\omega) \boldsymbol{\eta}(\omega)^H] \quad (12)$$

식 (12)에서 $\sigma(\omega)^{-2}$ 은 잡음 전력값이다. 식 (10)으로 구성된 $\mathbf{C}_x(\omega)$ 의 고유치는 이산주파수 ω_k 에서 식 (13)으로 구한다.

$$\mathbf{C}_x(\omega_k) \mathbf{e}_m(\omega_k) = \lambda_m(\omega_k) \mathbf{C}_\eta(\omega_k) \mathbf{e}_m(\omega_k) \quad (13)$$

$$m = 1, 2, \dots, p$$

$$k = 1, 2, \dots, N$$

식 (13)에서 $\mathbf{C}_x(\omega_k)$ 행렬의 고유치값은 양의실수이며 식 (14)처럼 순서를 정할 수 있다.

$$\lambda_m(\omega_k) \geq \lambda_{m+1}(\omega_k) \geq \dots \geq \lambda_{m+p}(\omega_k) \geq 0 \quad (14)$$

신호원 갯수를 q , 센서의 수를 p , $p > q$, $p \times q$ 합성 조정행렬 $\mathbf{S}(\omega_k, \theta_c)$ 의 계수는 q 이고, $q \times q$ 행렬 $\mathbf{C}_f(\omega_k)$ 의 차수를 $r(\leq q)$ 이라 하면 고유치중 $p-r$ 개는 $\sigma(\omega_k)^2$ 과 같거나 작고,

r 개는 $\sigma(\omega_k)^2$ 보다 크다. 그러므로 식 (15)와 같이 표현할 수 있다.

$$\lambda_1(\omega_k) \geq \dots \geq \lambda_r(\omega_k) > \sigma(\omega_k)^2 \geq \lambda_{r+1}(\omega_k) \geq \dots \geq \lambda_p(\omega_k) \quad (15)$$

$\mathbf{C}_x(\omega_k)$ 의 고유치 중 식 (15)을 만족하는 $\lambda_r(\omega_k)$ 을 결정한 다음 식 (16)처럼 각 $\omega_k(k=1, \dots, N)$ 에서 구한 $\lambda_r(\omega_k)$ 값중 가장 큰 값을 신호원 갯수 \hat{q} 로 결정한다.

$$\hat{q} = \max[r(\omega_1), r(\omega_2), \dots, r(\omega_N)] \quad (16)$$

식 (16)에서 $\lambda_r(\omega_k)$ 을 구할 때 사용하는 기준값 $\sigma(\omega_k)^2$ 을 구하기 위해 $\mathbf{C}_\eta(\omega_k)$ 을 구성한다. 이때 $\mathbf{C}_\eta(\omega_k)$ 는 식 (17)를 만족해야 한다.

$$\text{tr}(\mathbf{C}_\eta(\omega_k)) = p \quad (17)$$

식 (17)에서 $\text{tr}(\cdot)$ 은 트레이스(Trace), p 는 센서 갯수이다. 따라서 식 (12)를 만족 하도록 하는 $\sigma(\omega_k)^2$ 은 식 (18)로 구할 수 있다.

$$\sigma(\omega_k)^2 = \frac{\sum_{i=1}^p \eta_{ii}(\omega_k)}{p} \quad (18)$$

식 (19)에서 η_{ii} 는 $\mathbf{C}_\eta(\omega_k)$ 의 대각원소(Diagonal component)이다.

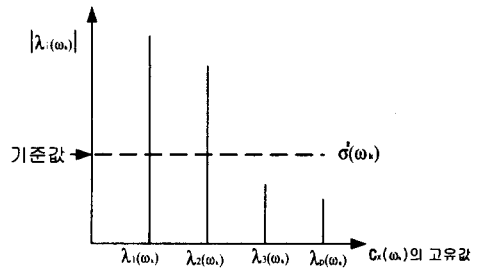


그림 2 신호원 갯수 추정
Fig. 2 Estimation of source number

$$\mathbf{C}_x(\omega) = E[\mathbf{x}(\omega) \mathbf{x}(\omega)^H] = \mathbf{S}(\omega, \theta_c) \mathbf{C}_f(\omega) \mathbf{S}(\omega, \theta_c)^H + \sigma(\omega)^2 \mathbf{C}_\eta(\omega) \quad (10)$$

$$[\mathbf{S}(\omega_k, \theta_c) \mathbf{C}_f(\omega_k) \mathbf{S}^H(\omega_k, \theta_c) \mathbf{e}_m(\omega_k)] + \sigma^2(\omega_k) \mathbf{C}_\eta(\omega_k) \mathbf{e}_m(\omega_k) = \lambda_m(\omega_k) \mathbf{C}_\eta(\omega_k) \mathbf{e}_m(\omega_k) \quad (19)$$

$$(\lambda_m(\omega_k) - \sigma^2(\omega_k)) \mathbf{C}_\eta(\omega_k) \mathbf{e}_m(\omega_k) = \mathbf{S}(\omega_k, \theta_c) \mathbf{C}_f(\omega_k) \mathbf{S}^H(\omega_k, \theta_c) \mathbf{e}_m(\omega_k) \quad (20)$$

4 신호원 위치 추정

오차벡터 식 (9)는 합성방향벡터 θ_c 와 ω 의 합수였다. 식 (9)는 자기상관 행렬 $C_x(\omega_k)$ 를 고유공간 분석하여 구한 고유값과 고유벡터를 이용하여 다른 형태의 함수를 만들 수 있다. 식 (13)은 식 (10)을 이용하여 식 (19)와 같이 표현할 수 있다. 식 (19)을 식 (20)처럼 표현할 수 있다. 이때 $m=1, \dots, p$ 식 (15)에서 $\lambda_r(\omega_k)$ 까지의 고유값에 관계된 고유벡터를 신호원 고유벡터라고 하고 $\sigma^2(\omega_k)$ 값에 해당하는 고유벡터를 잡음 고유벡터라 하면 잡음 고유벡터는 식 (21)을 만족한다.

$$C_x(\omega_k) e_m(\omega_k) = \sigma^2(\omega_k) C_\eta(\omega_k) e_m(\omega_k) \quad m=r+1, \dots, p \quad (21)$$

식 (10)을 식 (21)에 대입하면 식 (22)를 얻을 수 있다. 식 (22)을 만족하기 위해서는 식 (23)을 만족해야 한다.

$$S(\omega_k, \theta_c) C_f(\omega_k) S^H(\omega_k, \theta_c) e_m(\omega_k) = 0 \quad m=r+1, \dots, p \quad (23)$$

식 (23)을 만족하기 위해서는 식 (24)를 만족해야 한다.

$$S^H(\omega_k, \theta_c) e_m(\omega_k) = 0 \quad m=r+1, \dots, p \quad (24)$$

잡음 고유벡터는 신호원의 방향벡터와 직교하므로 $q \times 1$ 벡터 $C_f(\omega_k) S^H(\omega_k, \theta_c) e_m(\omega_k)$ 는 잡음 고유벡터에 대해서는 0 값을 가진다. 그러므로 신호원 고유벡터에 대해서만 식 (20)를 만족한다. 식 (20)에서 $C_\eta(\omega_k) e_m(\omega_k)$ 은 $S(\omega_k)$ 의 열공간에 있으므로 식 (25)과 같이 표현할 수 있다. 식 (25)에서

$$(S^H(\omega_k, \theta_c) S(\omega_k, \theta_c))^{-1} S^H(\omega_k, \theta_c)$$

$S^\dagger(\omega_k, \theta_c)$ 이므로 식 (26)과 같이 표현된다.

$$[I - S(\omega_k, \theta_c) S^\dagger(\omega_k, \theta_c)] \cdot C_\eta(\omega_k) e_m = 0 \quad m=1, \dots, p \quad (26)$$

식 (26)에서 $1 \leq m \leq r$ 이다. 신호원 고유벡터에 대해서 식 (26)을 만족하는 방향벡터 θ_c 를 구하기 위해서 식 (27)과 같은 평가함수가 최소가 되도록 할 때의 θ_c 를 찾는다.

$$J(\theta_c) = \sum_{k=1}^s \sum_{m=1}^r \|[I - S(\omega_k, \theta_c) S^\dagger(\omega_k, \theta_c)] \cdot C_\eta(\omega_k) e_m(\omega_k)\|^2 \quad (27)$$

식 (27)에서 $1 \leq k \leq s, 1 \leq m \leq r$ 이고 r 은 각 주파수에서 구성한 자기 상관행렬의 고유치값 중 $\sigma(\omega_k)^2$ 값 보다 큰 고유치 개수이다. 식 (27)를 최소화하는 신호원들의 방향벡터 θ_c 를 추정하기 위하여 SB(Sequential Beamforming)알고리즘을 사용하였다. SB알고리즘은 식 (27)를 최소화하는 방향벡터 θ_c 를 순차적으로 찾는 방법으로 식(28)처럼 표현된다.

$$J_1(\theta) = \sum_{k=1}^s \sum_{m=1}^r \|[I - P_1(\omega_k, \theta)] \cdot C_\eta(\omega_k) e_m(\omega_k)\|^2 \quad (28)$$

식 (28)에서 직교 방사연산자 $P_1(\omega_k, \theta)$ 는 식 (29)와 같이 정의된다.

$$P_1(\omega_k, \theta) = \frac{1}{p} s_1(\omega_k, \theta) s_1^H(\omega_k, \theta) \quad (29)$$

먼저 식 (29)을 최소화하는 θ_1 을 추정하고 θ_2 는 식 (30)으로 정의되는 표현함수를 최소화하도록 결정한다.

$$J_2(\theta) = \sum_{k=1}^s \sum_{m=1}^r \|[I - P_2(\omega_k, \theta_1, \theta)] \cdot C_\eta(\omega_k) e_m(\omega_k)\|^2 \quad (30)$$

(30)에서 $P_2(\omega_k, \theta_1, \theta)$ 는 식 (31)과 같고, 이

$$[S(\omega_k, \theta_c) C_f(\omega_k) S^H(\omega_k, \theta_c) e_m(\omega_k)] + \sigma^2(\omega_k) C_\eta(\omega_k) e_m(\omega_k) = \sigma^2(\omega_k) C_\eta(\omega_k) e_m(\omega_k) \quad (22)$$

$$C_\eta(\omega_k) e_m(\omega_k) = S(\omega_k, \theta_c) (S^H(\omega_k, \theta_c) S(\omega_k, \theta_c))^{-1} \cdot S^H(\omega_k, \theta_c) C_f(\omega_k) e_m(\omega_k) \quad (25)$$

$$P_n(\omega_k, \theta_1, \dots, \theta_{n-1}, \theta) = P_{n-1}(\omega_k, \theta_1, \dots, \theta_{n-1}) + \frac{\tilde{s}_n(\omega_k, \theta) \tilde{s}_n^H(\omega_k, \theta)}{\tilde{s}_n(\omega_k, \theta) \tilde{s}_n^H(\omega_k, \theta)} \quad (34)$$

부분방전 신호와 잡음의 분리

때 $\tilde{s}_2(\omega_k, \theta)$ 는 식 (32)와 같이 정의된다.

$$P_2(\omega_k, \theta_1, \theta) = P_1(\omega_k, \theta_1) + \frac{\tilde{s}_2(\omega_k, \theta) \tilde{s}_2^*(\omega_k, \theta)}{\tilde{s}_2(\omega_k, \theta) \tilde{s}_2^*(\omega_k, \theta)} \quad (31)$$

$$\tilde{s}_2(\omega_k, \theta) = [I - P_1(\omega_k, \theta_1)] s_2(\omega_k, \theta) \quad (32)$$

이와 같이 반복계산을 함으로써 θ 를 추정하게 되며 n단계에서 평가함수 $J_n(\theta)$ 는 식 (33)과 같다.

$$J_n(\theta) = \sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^M \| [I - P_n(\omega_k, \theta_1, \dots, \theta_{n-1}, \theta)] \cdot C_n(\omega_k) e_m(\omega_k) \|^2 \quad (33)$$

식 (33)에서 $P_n(\omega_k, \theta_1, \dots, \theta_{n-1}, \theta)$ 는 식 (34)와 같다. 식(34)에서 $\tilde{s}_n(\omega_k, \theta)$ 는 식(35)와 같다.

$$\tilde{s}_n(\omega_k, \theta) = [I - P_{n-1}(\omega_k, \theta_1, \dots, \theta_{n-1})] s_n(\omega_k, \theta) \quad (35)$$

식(33)을 사용하여 식 (27)로 정의된 평가함수값이 미리 설정한 값 이하로 줄어들거나 어떤 값으로 수렴할 때까지 반복 계산한다.

5. 모의실험 조건 및 결과

5.1 모의실험 조건

모의실험에서 사용한 모형 변압기 크기는 그림 3과 같다. 실변압기 내부에 발생한 부분방전 신호원은 주파수 대역이 백색 잡음과 유사한 신호이나 외부 잡음의 영향이 작은 주파수 대역을 사용하기 위하여 부분방전 신호원은 식 (36)을 사용하여 만들었다.

$$f(t) = \sum_i \sin(\omega_i t) \quad i = 150[\text{kHz}] \sim 155[\text{kHz}] \quad (36)$$

부분방전 신호원 발생은 편의상 2차원으로 하였다. 즉, 고도각 $\theta_2 = 0$ 이다.

변압기내 부분방전 신호원이 발생위치를 표 1과 같이하였다. 또 부분방전 신호원이 변압기 내부에 발생할 때 다음과 같은 세가지 관계를 가질 수 있다.

첫째는 두 개의 부분방전 신호원이 식 (37)과 같은 관계이다.

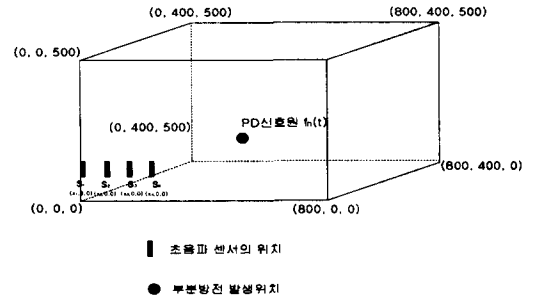


그림 3 모형변압기
Fig. 3 Model Transformer

$$f_1(t) = f_2(t) \quad (37)$$

식 (37)에서 $f_1(t)$ 는 부분방전 신호원1, $f_2(t)$ 는 부분방전 신호원2 이며 변압기내 발생한 두 개의 부분방전 신호원이 주파수 대역도 같고 발생시점이 같은 경우이다.

둘째는 두 개의 부분방전 신호원이 식 (38)과 같은 관계이다.

$$f_1(t) = f_2(t - \tau) \quad (38)$$

식 (38)은 부분방전 신호원 $f_1(t)$ 가 발생한 후 $\tau = 0.000125$ 초(위상차 2.70°) 후에 부분방전 신호원 $f_2(t)$ 가 발생한 경우이다.

표 1. 부분방전 신호원 위치
Table 1. Location of the PD source

신호원 위치		신호원 좌표 (x[mm], y[mm])		신호원간의 직선거리 [mm]
신호원1	신호원2	신호원1	신호원2	
20°	30°	600, 219	600, 347	128.0
30°	40°	600, 347	450, 378	153.2
40°	50°	450, 378	300, 358	151.3
60°	70°	210, 364	140, 385	73.1
70°	80°	140, 385	60, 340	91.8

셋째는 두 개의 부분방전 신호원이 식 (39)와 같은 관계이다.

$$f_1(t) = \sum_i \sin(\omega_i t) \quad i = 150[\text{kHz}] \sim 155[\text{kHz}]$$

$$f_2(t) = \sum_i \sin(\omega_i t) \quad i = 151[\text{kHz}] \sim 156[\text{kHz}]$$
(39)

식 (39)는 부분방전 신호원 $f_1(t)$ 와 부분방전 신호원 $f_2(t)$ 가 동시에 발생하며 부분방전 신호원의 주파수 대역은 유사한 경우이다. 식 (36)으로 만든 부분방전 신호원이 변압기 내부에 발생할 때 식 (37)부터 식 (39)와 같은 관계를 갖도록 하여 표 1에 표시한 위치에 부분방전 신호원을 발생시켜 방향각을 추정하였다.

실제 변압기 외벽에 부착한 초음파 센서로 부분방전 신호를 측정할 경우 전력용 변압기 내부에 발생하는 부분방전 신호는 매질에 따라 특성이 바뀌므로 센서에서 측정된 부분방전 신호를 만들 때는 부분방전 신호의 경계조건을 고려해야 한다. 전력용 변압기 내부에 고려할 경계면은 변압기 외벽과 절연유면이다. 즉, 5개의 변압기 외벽과 절연유면을 6면체로 간주하고 경계조건을 고려하기 위하여 동일 거리상에 영상 신호원을 만든다. 전력용 변압기 6면중 5면은 변압기 외함이고 상층부면은 절연유면이다. 그러므로 전력용 변압기 내부에 부분방전 신호원 $f_n(t)$ 가 발생했을 때 경계면인 변압기 외벽에 대해서는 그림 4처럼 영상 신호원(신호원1-1, 신호원1-2, 신호원1-3, 신호원1-4, 신호원1-5)이 다섯개 있고 경계면인 절연유면에 대해서는 그림 5에 나타난 것처럼 신호원1-5 한개가 있다. 따라서 변압기 내부에 부분방전 신호원이 한 개 발생하면 영상 신호원 6개가 존재하므로 부분방전 신호원 $f_n(t)$ 까지 포함해서 부분방전 신호원 $f_n(t)$ 에 대해 각 센서 $S_i(i = 1, \dots, p)$ 에

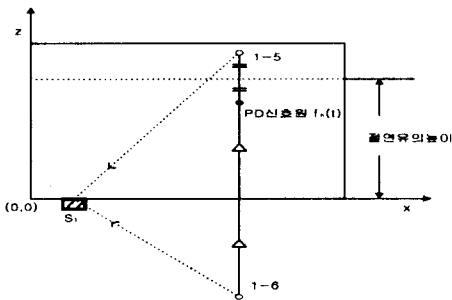


그림 4 위에서 본 영상 발생원 위치도
Fig. 4 Top projection diagram of image source

서 측정된 신호는 식 (40)을 사용하여 모형화 해야한다10).

$$x(t) = \sum_{i=1}^7 \alpha_i \beta_i f(t - \tau_i(\theta)) + \eta(t) \quad (40)$$

식 (40)에서 α_i 는 부분방전 신호원 $f_n(t)$ 가 변압기 외벽에 부착한 초음파 센서로 유입될 때 거리에 따른 감쇄상수1) 이고 β_i 는 경계면에서의 반사계수 1)이다. $\tau_i(\theta)$ 는 부분방전 신호원 $f(t)$ 와 영상 신호원이 센서에 도착하는데 필요한 지연시간 이고 $\eta(t)$ 는 변압기 외벽에 부착한 초음파 센서에 혼입되는 가우시안 백색 잡음이다. 만약 변압기 내부에 부분방전 신호원 $f_1(t)$, $f_2(t)$ 가 발생했을 때 각 센서 $S_i(i = 1, \dots, p)$ 에서 측정된 신호는 식 (41)을 사용하여 모형화 해야한다10).

$$x(t) = \sum_{i=1}^7 \alpha_i \beta_i f_1(t - \tau_i(\theta)) + \eta(t)$$

$$+ \sum_{i=1}^7 \alpha_i \beta_i f_2(t - \tau_i(\theta)) + \eta(t) \quad (41)$$

식 (41)에서 α_i 는 부분방전 신호원 $f_1(t)$ 가 센서에 유입될 때 거리에 따른 감쇄상수 이고 β_i 는 경계면에서의 반사계수이다. α_j 는 부분방전 신호원 $f_2(t)$ 가 센서에 유입될 때 거리에 따른 감쇄상수 이고 β_j 는 경계면에서의 반사계수이다. $\tau_i(\theta)$ 는 부분방전 신호원 $f_1(t)$ 와 부분방전 신호원 $f_1(t)$ 에 해당되는 영상 신호원들이 센서에 도착하는데 필요한 지연시간 이고 $\tau_j(\theta)$ 는 부분방전 신호원 $f_2(t)$ 와 부분방전 신호원 $f_2(t)$ 에 해당되는 영상 신호원

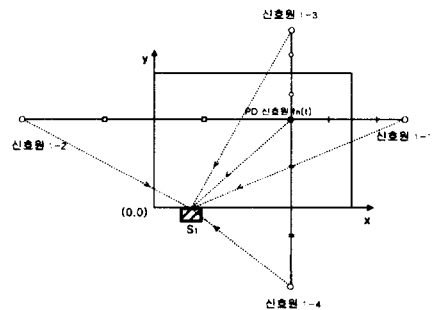


그림 5 옆면에서 본 영상 발생원 위치도
Fig. 5 Side projection diagram of image source

부분방전 신호와 잡음의 분리

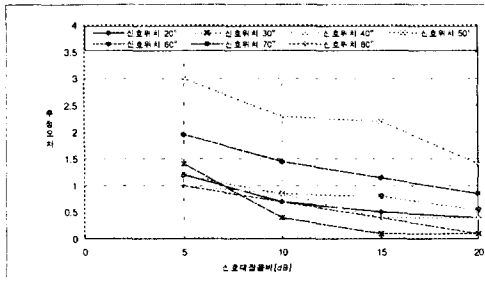


그림 6. 주파수 대역이 같은 두 개의 부분방전 신호원 발생 위치는 서로 떨어지고 발생하는 시간차이가 없는 경우 신호 대 잡음비에 따른 추정오차
Fig. 6. DOA estimation error according to SNR when the location between each PD are distant and two PD sources have same frequency bandwidth and have no time delay.

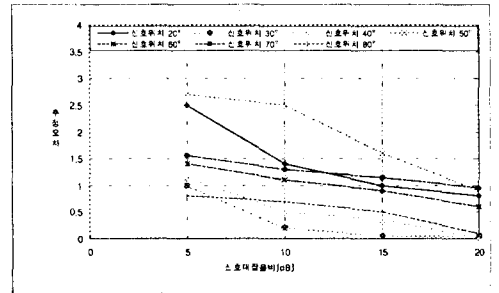


그림 7. 주파수 대역이 같은 두 개의 부분방전 신호원 발생 위치는 서로 떨어지고 발생하는 시간차이가 있는 경우 신호 대 잡음비에 따른 추정오차
Fig. 7. The estimation error according to the angle of PD signal when two PD sources have same frequency bandwidth and have time delay.

들이 센서에 도착하는데 필요한 지연시간이다. 부분방전 신호원이 변압기 내부에 발생했을 때 각 센서에서 측정된 신호는 식 (41)을 사용하여 모형화하면 된다. 센서 위치에 따라 식 (41)에 있는 α_i , β_i , α_j , β_j , $\tau_i(\theta)$, $\tau_j(\theta)$ 값은 같거나 다르다.

본 논문에서는 그림 3에 표시한 것처럼 변압기 외벽에 부착한 센서는 4개로 했으며 센서 위치는 다음과 같다.

- 센서S1 위치 (0,10[mm])
- 센서S2 위치 (0,20[mm])
- 센서S3 위치 (0,30[mm])
- 센서S4 위치 (0,40[mm])

센서간격이 좁을수록 평면파 조건을 만족시켜 부분방전 신호원의 위치를 정확하게 추정할 수 있으나 현실적으로 센서간격이 10[mm]미만인 경우에는 제작이 불가능하기 때문에 제작이 가능한 간격을 사용하여 모의실험 했다. 만약 제작이 가능한 간격 10[mm]가 변압기에서 평면파 조건을 만족하지 않는 간격이면 이로 인해 부분방전 신호원의 위치를 추정할 때 추정오차가 있을 수 있다.

각 센서에서 측정된 신호는 식 (41)을 사용하여 만들었으며 신호 대 잡음비는 5[dB], 10[dB], 15[dB], 20[dB]로 하여 각 센서에서 측정된 신호로 부분방전 신호원의 위치를 추정하였다. 각 센서에서 측정된 신호는 샘플링 주파수를 2500[kHz]로 하여 표본화하였다.

L 은 1024로 하였으며, Q 는 4로 하였다. 그러므로 N 은 256이 된다.

5.2 모의실험 결과

그림 6은 주파수 대역이 같은 두 개의 부분방전 신호원의 발생 위치는 서로 떨어지고 발생하는 시간 차이가 없는 경우 신호 대 잡음비에 추정오차를 나타 내었다. 이 경우 신호 대 잡음비가 5[dB]이고 두 개의 부분방전 신호원 발생 방향각이 (40°, 50°)일 때 부분방전 신호원 발생 방향각 50°에 대한 평균값이 47°로 가장 큰 오차(3°)를 보였다. 부분방전 신호원 방향각 50°에 대한 추정오차 3°을 변압기의 한 변의 길이를 2[m]로 가정할 경우 최대 위치 추정 오차는 $2000 \tan(3^\circ) = 104.8[\text{mm}]$ 이므로 부분방전 신호원이 내부인지 외부인지 구분 하는 데는 충분한 정밀도를 갖고 있음을 확인할 수 있었다.

그림 7은 주파수 대역이 같은 두 개의 부분방전 신호원의 발생 위치는 서로 떨어지고 발생하는 시간 차이가 있을 때, 한 개가 먼저 발생하고 $t=0.000125$ 초(위상각 차이 2.7°) 후에 다른 한 개가 발생한 경우 신호 대 잡음비에 대한 추정 오차를 나타내었다. 이 경우 신호 대 잡음비가 5[dB]이고 두 개의 부분방전 신호원 발생 방향각이 (40°, 50°)일 때 부분방전 신호원 발생 방향각 50°에 대한 평균값이 47.5°로 가장 큰 오차(2.5°)를 보였다. 부분방전 신호

원 방향각 50° 에 대한 추정오차 2.5° 을 변압기의 한 변의 길이를 2[m]로 가정할 경우 최대 위치 추정 오차는 $2000\tan(2.5^\circ) = 87[\text{mm}]$ 이므로 부분방전 신호원이 내부인지 외부인지 구분 하는데는 충분한 정밀도를 갖고 있음을 확인할 수 있었다.

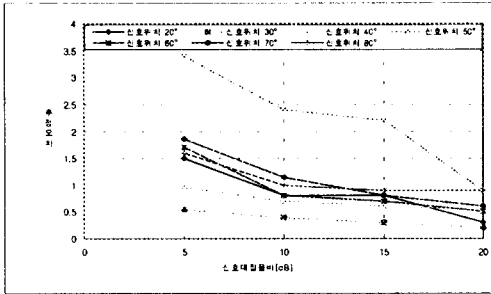


그림 8. 주파수 대역이 유사하고 두 개의 부분방전 신호원 발생 위치는 서로 떨어지고 발생하는 시간차이가 없는 경우 신호 대 잡음비에 따른 추정오차

Fig. 8. DOA estimation error according to SNR when the location between each PD are distant and two PD sources have similar frequency bandwidth and have no time delay.

그림 8은 주파수 대역이 유사한 두 개의 부분방전 신호원이 변압기내 떨어져 동시에 발생한 경우 신호 대 잡음비에 대한 추정 오차를 나타내었다. 이 경우 신호 대 잡음비가 5[db]이고 두 개의 부분방전 신호원 발생 방향각이 (40°, 50°)일 때 부분방전 신호원 발생 방향각 50° 에 대한 평균값이 46.6° 로 가장 큰 오차(3.4°)를 보였다. 부분방전 신호원 방향각 50° 에 대한 추정오차 3.4° 를 변압기의 한 변의 길이를 2[m]로 가정할 경우 최대 위치 추정 오차는 $2000\tan(3.4^\circ) = 118.9[\text{mm}]$ 이므로 부분방전 신호원이 내부인지 외부인지 구분 하는데는 충분한 정밀도를 갖고 있음을 확인할 수 있었다

6. 결론

전력용 변압기의 절연 열화 상태를 진단하기 위해서 부분방전 신호의 크기와 발생빈도의 경향을 추적하는 연구가 진행되어 왔다. 그런데 변압기의 특성상 부분방전 신호를 탐지하기 위하여 변압기 내부에 센서를 설치하는 것은 또 다른 절연사고의 원인이 될

수 있으므로 외부에서 이를 탐지하는 방법이 강구되어야 한다. 외부에서 부분방전신호를 탐지하는 방법으로 초음파 센서가 많이 사용되고 있으며, 이 때는 외부잡음의 유입으로 인해 절연열화 상태진단의 신뢰도가 떨어지는 약점이 있다. 이를 극복하기 위하여 두 개의 센서에 탐지된 초음파 신호의 상호상관 관계를 이용하여 부분방전 발생위치를 추정함으로써 초음파 센서에 탐지된 신호가 부분방전에 의한 것인지 아니면 변압기 외부에서 발생한 잡음에 의한 것인지를 구분하려는 노력이 있었으나 신호원이 하나인 경우에만 사용할 수 있는 제약이 있다. 본 논문에서는 신호원이 두 개 이상일 때에도 신호원의 위치 추정이 가능할 수 있는 방향각 추정기법을 도입하였다. 즉,

- I) 센서 배열을 사용하여 초음파 신호를 검출하였으며,
- II) 검출된 신호의 상관행렬을 구하고 그 고유값의 크기를 비교하여 신호원의 숫자를 찾을 수 있었으며,
- III) SB알고리즘을 사용하여 신호원의 방향각을 추정할 수 있었다.

본 논문의 방법을 확인하기 위한 방법으로 모의 실험을 하였으며, 이 때 실제의 신호와 유사하게 모의하기 위하여 반사파를 고려하였다.

또한 부분방전은 방전조건에 따라 발생하는 초음파 신호의 주파수 대역이 약간은 이동할 수 있으며, 절연 열화 정도에 따라 발생시간이 달라 질 수도 있으므로 이런 조건을 고려하여 모의 실험을 하였으며, 모의 실험 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) SNR이 5-20[db]범위에서 신호원이 하나일 때와 2개 일 때를 100% 정확히 알 수 있었다.
- 2) 신호원이 2개이면서, 주파수가 같고 시간 지연이 없는 경우에는 방향각이 (40°, 50°)이고 SNR이 5[db]일 때에 평균값이 (39°, 47°)로서 가장 큰 오차를 보였다.
- 3) 신호원이 2개이면서, 주파수는 같고, 시간지연이 2°인 경우에는 평균값의 최대오차가 2.5° 로서 (3)항의 경우보다 약간 작은 값을 보였으나 전체적으로 위의 2)항의 경우와 비슷한 경향을 보여서 시간지연이 방향각 추정에는 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있었다.
- 4) 신호원이 2개이면서 주파수 성분이 유사한 경우에도 위 2)항과 비슷한 경향을 보였다. 즉, 부분방전 발생조건이 다르면 이에 따른 초음파 신호의 주파수 성분이 약간 다를 수 있으나 방향각 추정에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있었다.
- 5) 이들을 종합하면 방향각이나 시간지연 및 주파수 성분은 방향각 추정에 큰 영향을 주지 않았으며 측정된 신호의 SNR은 비교적 많은 영향을 주었다.
- 6) 모의 실험 중에서 가장 큰 방향각 추정오차는 2.3° 로서, 변압기의 한 변의 크기를 2[m]로 가정할 경우 최대 위치 추정오차는 $2000\tan(2.3^\circ) = 118.8[\text{mm}]$ 되어 부분방전 신호원이 변압기 내부인지 외부인지를 구분하는데는 충분한 정밀도를 갖고 있다.

본 논문에서는 반사파까지 고려하는 세심한 배려를 하였으나 실제 실험 상황과는 다르므로 이를 뒷받침하는 실험 연구가 이어져야 할 것이다. 센서 제작의 어려움 때문에 이를 실현하지 못한 것이 아쉬움으로 남는다. 또한 신호원과 센서 배열간의 거리가 가까우므로 근접장 영향을 고려 해야하며 이를 위한 해석적 연구가 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 권동진, "초음파 경향분석에 의한 전력용 변압기의 예비 진단에 관한 연구", 숭실대학교 박사학위논문, 1995년 6월.
- [2] 정천수 외, "Rowgosi Coil과 초음파 센서를 이용한 변압기내 부분방전 탐지 및 위치검출", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 1990년 7월.
- [3] 광희로 외, "전력기기 예방진단 기술연구(관리과제)", 한국전력기술연구원, 1991년 3월.
- [4] 정천수 외, "개선된 초음파방법에 의한 변압기내 부분방전 위치검출", Journal of the Institute of Basic Science and the Industrial Technology Reserch Institute, Soongsil University, Vol 19, 1989.
- [5] 정천수 외, "상호상관법을 이용한 변압기내의 부분방전 위치추정", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 1992년 7월.
- [6] 정완섭 외, "초음파 측정에 의한 변압기내 부분방전 위치추정", 대한전기학회논문지, 제41권, 11호, pp. 1316- 1323, 1992년 11월.
- [7] 문영재, "상호 상관법을 이용한 변압기내의 부분방전 위치추정", 숭실대학교 석사학위논문, 1993년 2월.
- [8] 전력기기 예방진단 기술연구, 한국전력 기술연구원, 1991년 3월.
- [9] James A. Cadzow, "Multiple Source Location - The Signal Subspace Approach", IEEE Trans. on ASSP, Vol. ASSP-38, PP. 1110-1125, July 1990.
- [10] 박형준, "해밍창을 이용한 PD신호의 상호상관값의 정확도 개선", 숭실대학교 석사학위논문, 1993.

◇ 저자소개 ◇

이 승 환 (李承煥)

1969년 2월 25일생. 1996년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1998년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동대학원 박사과정

유 치 형 (柳治馨)

1965년 월 일생. 199년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 199년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 숭실전자계산원 교수

김 재 철 (金載哲)

1955년 7월 12일생. 1979년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1983년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 숭실대학교 전기공학과 교수

정 찬 수 (鄭讚壽)

1949년 8월 10일생. 1972년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1980년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 숭실대학교 전기공학과 교수.

이 상 철 (李相喆)

1952년 8월 13일생. 1977년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1981년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 숭실대학교 대학원 전기공학과

정 양 웅 (鄭良雄)

1956년 9월 6일 1981년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1984년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 서해대학 전자 계산과 교수