

원전 이차계통 파이프 감육상태 분석을 위한 적응 콘-커널 시간-주파수 분포함수

論 文

55D-3-7

Adaptive Cone-Kernel Time-Frequency Distribution for Analyzing the Pipe-Thinning in the Secondary Systems of NPP

李喆權* · 金楨宅* · 李相禎**

(Cheol-Kwon Lee · Jung-Taek Kim · Sang-Jeong Lee)

Abstract - The secondary system of nuclear power plants consists of sophisticated piping systems operating in very aggressive erosion and corrosion environments, which make a piping system vulnerable to the wear and degradation due to the several chemical components and high flow rate (~10 m/sec) of the coolant. To monitor the wear and degradation on a pipe, the vibration signals are measured from the pipe with an accelerometer. For analyzing the vibration signal the time-frequency analysis (TFA) is used, which is known to be effective for the analysis of time-varying or transient signals. To reduce the interferences (cross-terms) due to the bilinear structure of the time-frequency distribution, an adaptive cone-kernel distribution (ACKD) is proposed. The cone length of ACKD to determine the characteristics of distribution is optimally selected through an adaptive algorithm using the normalized Shannon's entropy. And the ACKD's are compared with the results of other analyses based on the Fourier Transform (FT) and other TFA's. The ACKD shows a better signature for the wear/degradation within a pipe and provides the additional information in relation to the time that any analysis based on the conventional FT can not provide.

Key Words : 파이프 감육상태 분석, 진동신호 해석, 시간-주파수 해석, 적응 콘-커널 분포함수, Shannon의 엔트로피

1. 서 론

원전 이차계통의 파이프 내부는 유체에 포함된 화학적 성분과 고온 및 고압의 유속으로 인하여 부식과 마모가 항상 발생하며, 이로 인한 파이프의 감육은 발전소의 사고와 직결된다. 따라서 원전의 안전을 확보하고 발전소 정지 없이 운영을 효율적으로 계속하기 위해서는 이에 대한 상태감시가 필수적이다. 현재 원전에는 운전중 감시장치가 설치되지 않아 핵연료교체 및 정비를 위한 정기보수기간 중에 계획된 예방정비계획에 따라 의심되는 파이프에 대해 초음파 측정장치 등의 비파괴 측정장치를 이용하여 감육상태를 측정하고 감육이 크다고 판단되면 이 부분을 교체하는 실정이다. 오랜 운전이력을 가진 원전이 점차 증가함에 따라 파이프 감육에 따른 사고의 가능성이 점차 증가하고 있으며, 이로 인한 원전사고 또는 운전정지 회수가 증가할 것으로 예상된다. 현재 파이프 감육상태 감시를 위하여 화학적 반응속도를 기반으로 하는 프로세스 모델을 이용한 상태감시 프로그램개발, 파이프 감육크기에 따른 파이프의 전기저항변화 측정 등 다양한 연구가 진행중이다[1]. 이러한 연구들은 복잡한 원전의 모델링 오차를 가지거나 능동소자 측정기기를 사

용함에 따라 시스템을 복잡하게 하므로 운전중 감시 및 유지보수가 어렵다.

본 논문에서는 원전의 환경을 고려하여 설치가 비교적 간단하고 가혹한 환경조건에 잘 견디는 수동소자센서인 가속도계를 사용하여 파이프의 감육으로 인한 두께변화를 진동신호로 측정하였다. 측정된 진동신호를 푸리에 변환(Fourier transform)을 기반으로 하는 여러 주파수 해석법으로 분석하였으나 감육정도를 예측하기에는 부족하였다. 이에 따라 시변신호나 과도신호 등 비정상 신호해석에 유용하며, 잡음이나 음향신호 해석에 많이 사용되고 있는 시간-주파수 해석을 이용하였다[2][3]. 시간-주파수 해석(time-frequency analysis)은 임의의 신호를 시간-주파수영역에서 에너지밀도함수로 표현하여 신호의 주파수성분에 대한 정보와 시간정보를 동시에 제공한다. 위그너-빌 분포함수(Wigner-Ville Distribution, WVD)가 발표된 이후로 이변수(bilinear) 함수로 표현되는 WVD에서 나타나는 간섭신호를 축소 또는 제거하기 위한 연구가 시간-주파수 해석 분야의 핵심이었으며 [4], WVD를 일반화한 Cohen의 일반형 시간-주파수 분포함수(generalized time-frequency distribution)의 특성을 결정하는 커널설계가 주로 연구되었다[5]. 커널설계는 해석하고자 하는 신호 전체에 대해 하나의 커널함수를 적용하는 고정 커널 방식과 전체 신호에 대해 매 순간 최적의 커널함수를 계산하는 적응 커널 방식이 있다. 후자의 경우 정확성이 개선된다는 장점이 있으나 계산량 또는 계산시간이 많아진다. 본 논문에서는 커널함수로는 콘-커널 함수를 사용하였으며, 최적의 콘-커널 길이를 결정하기 위하여 적응 알고리즘을 채택하고, 성능지수로서 정규화된 Shannon의 엔트로피

† 교신저자, 正 會 員 : 韓國原子力研究所 責任研究員

E-mail : cklee1@kaeri.re.kr

* 正 會 員 : 韓國原子力研究所 責任研究員

** 正 會 員 : 忠南大 工大 電子工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2005年 12月 15日

最終完了 : 2006年 1月 19日

(entropy)를 사용하였다. 감육된 파이프 상에서 측정된 진동 신호를 제안된 커널함수를 사용하여 계산한 적응 콘-커널 분포함수(adaptive cone-kernel distribution, ACKD)와 고정 커널 분포함수 계산결과를 비교한 결과 ACKD에서 정확성이 개선됨을 확인할 수 있었다. 따라서 개발된 알고리즘은 원전 이차계통의 파이프 감육상태 감시장치에 적용 가능함을 보여준다.

2. 본 론

2.1 진동신호 취득

파이프 감육상태에 대한 진동신호를 취득하기 위하여 온도는 150°C, 압력은 약 20bar인 운전조건을 갖는 원전 이차계통과 유사한 환경으로 그림 1과 같이 실험장치를 구성하였다. 실험장치에 설치된 충전펌프와 순환펌프가 파이프 상의 진동신호에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 플렉시블 호스를 사용하여 이들을 격리하였다[6]. 진동신호를 측정하는 가속도계는 유한요소법(finite element method) 분석결과를 반영하여 파이프의 굴곡부분에 설치하므로써 감육에 의한 진동신호 측정을 용이하게 하였다.

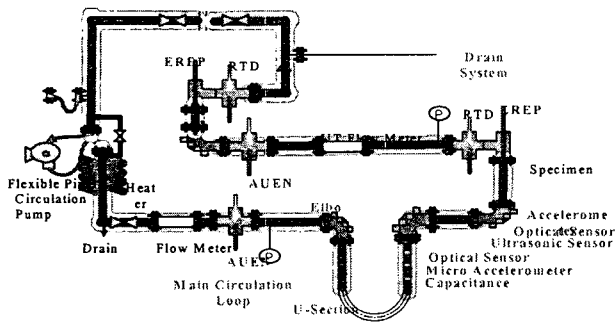
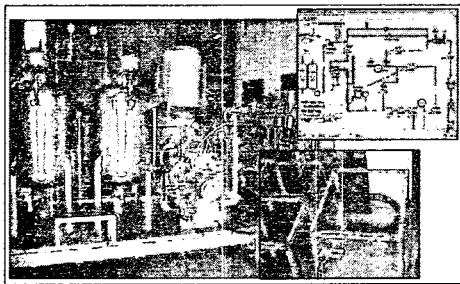
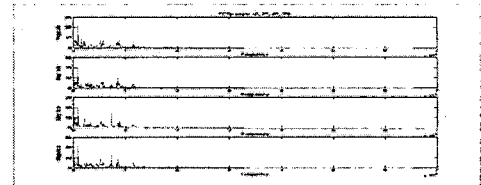


그림 1 파이프 감육에 의한 진동신호 측정을 위한 실험장치
Fig. 1 Test loop for measuring the vibration signal

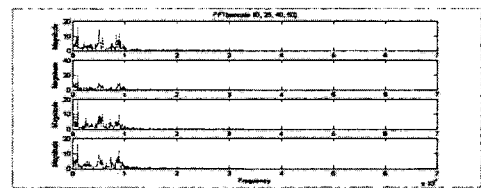
2.2 주파수 해석

진동신호 측정을 위하여 3축 가속도계를 사용하였으며, 신호취득 샘플링 주기는 20 KHz이었다. 취득된 진동신호는 푸리에 변환, MUSIC(multiple signal classification) 및 자기회귀법(auto-regressive method)으로 분석하였다. 분석결과인 그림 2와 그림 3에 의하면 파이프의 감육이 발생함에 따라 정상상태에서 발생한 특성주파수들의 진폭이 약간 증가

하고 동시에 적은 크기의 주파수 변이가 관찰되었다[7]. 그러나 뚜렷한 새로운 주파수 성분은 발생하지 않았으며, 이는 파이프 감육을 예측하여 실제 원전 운전의 의사결정에 영향을 주기에는 충분치 않다. 따라서 새로운 방식의 신호해석이 필요하였다[8].



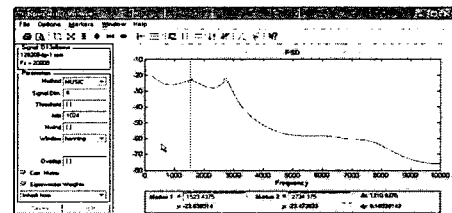
(a) 감육상태(pipe thinning)



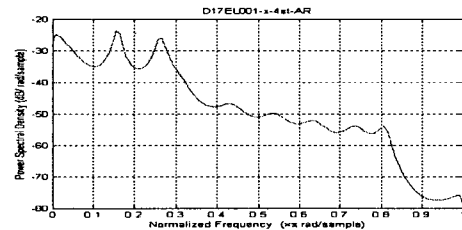
(b) 정상상태(normal)

그림 2 주파수 스펙트럼

Fig. 2 Frequency spectrum



(a) MUSIC



(b) 자기회귀법(auto-regressive method)

그림 3 감육상태 신호 해석결과

Fig. 3 Signal analyses for the condition of pipe thinning

2.3 시간-주파수 분포함수

2.3.1 시간-주파수 분포함수의 일반형

Cohen의 시간-주파수 분포함수의 일반형은 식(1)과 같다 [5]

$$C_x(t, \alpha, \phi) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \phi(\xi, \tau) x(u + \frac{\tau}{2}) x^*(u - \frac{\tau}{2}) e^{-j(\xi + \alpha\tau - \xi\tau)} d\tau d\tau d\xi \quad (1)$$

식(1)에서 x 는 해석신호(analytic signal)이다. 이는 실수(real)신호 x_s 로부터 신호의 전체 에너지는 변하지 않으면서 부(-)의 주파수성분을 제거한 신호이며 표현식은 식(2)와 같다.

$$X(f) = 2X_s(f), \quad f > 0$$

$$X_s(f), \quad f = 0$$

$$0, \quad f < 0$$
(2)

식(2)에서 $X_s(f)$ 는 $x_s(t)$ 의 푸리에 변환 결과이다. 실제로 이를 계산하기 위해서는 힐버트 변환식(Hilbert transform)을 이용하여 식(3)으로부터 계산한다.

$$x(t) = x_s(t) + j\hat{x}(t),$$

여기서 $\hat{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int \frac{x_s(\tau)}{t-\tau} d\tau$: $x_s(\cdot)$ 의 힐버트 변환 (3)

식(1)에서 x^* 는 x 의 복소공액이며, ϕ 는 커널함수이다. 만약 식(1)에서 커널함수 $\phi(\xi, \tau)=1$ 이면, 식(4)의 WVD가 된다.

$$C_x(t, f; WVD) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t + \frac{\tau}{2}) x^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{-j2\pi f\tau} d\tau$$
(4)

식(4)에서 f 는 주파수, t 는 시간, τ 는 시간지연을 나타낸다. 시간-주파수 분포함수인 short-time Fourier transform (STFT)과 웨이브렛(wavelet) 변환은 해석신호와 기본함수(basis function)와의 상관도를 나타내는 선형함수인 반면, WVD는 시간-주파수 영역에서 신호의 에너지밀도 함수로 표현되는 이변수 함수(bilinear function)이다. WVD는 신호 해석에 유용한 표 1의 여러 수학적 성질들을 가진다[9] 점에서 많이 응용되며, Cohen의 일반형은 WVD와 커널함수의 콘볼루션으로 계산된다.

WVD는 단일 주파수 성분을 갖는 신호해석에 매우 적합하다. 그러나 대부분의 실제 신호는 2개 이상의 주파수성분을 갖는 복합신호이며, 이 경우 WVD는 일반적으로 이변수 함수가 갖는 신호고유의 주파수성분 간에 발생하는 간섭신

표 1 WVD의 수학적 성질

Table 1 Properties of WVD

성질	관계식
Time Marginal	$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} WVD_s(t, \omega) d\omega = s(t) ^2$
Frequency Marginal	$\int_{-\infty}^{\infty} WVD_s(t, \omega) dt = S(\omega) ^2$
Instantaneous Frequency	$\langle \omega \rangle_t = \frac{1}{2\pi s(t) ^2} \int_{-\infty}^{\infty} \omega WVD_s(t, \omega) d\omega$
Group (Time) Delay	$\langle t \rangle_\omega = \frac{1}{ S(\omega) ^2} \int_{-\infty}^{\infty} t WVD_s(t, \omega) dt$
Time Shift Invariant	if $s_0 = s(t-t_0)$, then $WVD_{s_0}(t, \omega) = WVD_s(t-t_0, \omega)$
Frequency Shift Invariant	if $s_0 = s(t)e^{j\omega_0 t}$, then $WVD_{s_0}(t, \omega) = WVD_s(t, \omega - \omega_0)$
Time Support	$WVD_s(t, \omega) = 0$ for t outside (t_1, t_2) if $s(t)$ is zero outside (t_1, t_2)
Frequency Support	$WVD_s(t, \omega) = 0$ for ω outside (ω_1, ω_2) if $S(\omega)$ is zero outside (ω_1, ω_2)
Reality	$WVD_s(t, \omega) = WVD_s^*(t, \omega)$, $WVD_{s,g}(t, \omega) = WVD_{g,s}^*(t, \omega)$

호를 발생하여 신호해석을 매우 어렵게 한다. 이는 WVD의 가장 큰 단점으로 신호해석 분야에서 적용되기 위해서는 간섭신호는 제거되어야 한다. 시간-주파수 분포함수에서 나타나는 간섭신호를 제거 또는 감소하는 일반적인 방법 중 하나는, 식(1)의 Cohen의 일반형에서 커널함수를 적용하는 것이다. 커널함수는 해석되는 신호에 따라 달라지며 모든 신호에 적용가능한 커널함수는 존재하지 않는다. 커널함수를 이용하여 표현되는 시간-주파수 분포함수는 일반적으로 WVD가 가지는 한계(marginals)나 유한구간(finite support)과 같은 성질들을 유지하지 못하게 된다. 현재까지 표 2와 같이 많은 커널함수가 발표되었으며, Choi-Williams가 제안한 지수형 커널함수와 Zao, Atlas, Marks가 제안한 콘-커널이 가장 많이 언급된다[10][11]. Choi-Williams 분포함수(CWD)는 간섭신호를 대부분 감소하면서 시간-주파수 분포함수의 성질을 대부분 유지한다는 장점이 있다.

표 2 대표적 커널함수

Table 2 Typical kernel function

시간-주파수 분포함수	커널함수 $\phi(\theta, \tau)$
Cohen의 일반형	$\phi(\theta, \tau)$
Wigner-Ville distribution	1
Choi-Williams distribution	$e^{-\theta^2 \tau^2 / \sigma}$
Cone-kernel distribution	$g(\tau) \left \frac{\sin(\alpha \theta \tau)}{\alpha \theta \tau} \right $
Born-Jordan distribution	$\sin(\frac{1}{2} \theta \tau) / \frac{1}{2} \theta \tau$
Page distribution	$e^{j\theta \tau }$
Margenau-Hill distribution	$\cos \frac{1}{2} \theta \tau$

2.3.2 콘-커널 분포함수 (CKD)

지금까지 알려진 커널함수 중에서 시간-주파수 분포함수의 유용한 성질들을 모두 가지고 있으면서 동시에 간섭신호도 제거할 수 있는 커널함수는 발견되지 않았다. 이들들 간에 타협(tradeoff)이 존재함을 의미하며, 따라서 간섭신호를 제거하기 위해서는 한계나 유한구간 등과 같은 일부 성질들을 잃게 된다. 커널함수는 분포함수에서 평탄효과(smoothing)로 나타나며 간섭신호를 과도하게 제거하고자 하면 신호 고유의 성분에도 영향을 미치게 되므로 커널설계는 이를 고려하여야 한다.

알려진 커널함수들 중 콘-커널은 CWD의 지수함수와 더불어 가장 많이 연구되고 있다. 이는 간섭신호를 효과적으로 감소하면서 동시에 많은 시간-주파수 분포함수 성질들을 지니고 있기 때문이다. CKD는 시간구간(time support) 성질을 만족하면서 측방억제(lateral inhibition)을 이용하여 신호 주파수에 근접한 주파수 성분에 페널티(penalty)를 부과함으로써 신호의 주파수 분해능을 개선하는 분포함수이다[10]. 식(1)의 Cohen의 일반형을 에 대해 푸리에 변환하면 식(5)와 같이 된다.

$$C_x(t, f; \phi) = \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \phi(t-u, \tau) x(u+\frac{\tau}{2}) x^*(u-\frac{\tau}{2}) e^{-j2\pi f\tau} du d\tau \quad (5)$$

시간-시간지연요소(t-) 영역에서 표현되는 콘-커널 함수는 식(6)과 같다.

$$\phi(t, \tau) = \begin{cases} g(\tau) & |\tau| \geq a |t| \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

식(6)에서 a는 콘의 경계를 결정하는 변수로 콘의 기울기를 결정한다. a의 범위는 2<a 이지만, 일반적으로 유한구간 성질에 따라 2로 설정한다[11]. 콘-커널 함수인 g(t)는 주파수 해석에서 사용되는 창(window)함수의 일종으로 주파수 누설을 방지할 수 있다면 임의로 설계 가능하다. 식(6)의 콘-커널 함수는 식(1)의 주파수-시간 지연요소(-)에서는 $\phi(\xi, \tau) = g(\tau)|\tau|\text{sinc}(\pi\xi\tau)$ 로 표현된다. 구현에 사용되는 CKD의 이산형(discrete form)은 식(7)과 같다.

$$C_x(n, f; CKD) = \sum_{k=-T}^T g(k) \sum_{p=-M}^M x(n+p+k) x^*(n+p-k) e^{-j2\pi f k} \quad (7)$$

식(7)에서 주파수변수 f는 이산화되지 않았으나 푸리에 변환 과정에 따라 계산되며, 이산화 과정에서 계수인자(scaling factor) 2는 계산식의 단순화를 위해 고려치 않았다. 이 식은 콘의 길이 T에 따라 시간 및 주파수 영역에서의 분해능이 결정되며, 이들 간에는 타협이 존재한다. 콘-커널 함수의 특성을 살펴보기 위하여 그림 4와 같이 임의의 시험신호를 생성하였다. 시험신호는 t=56과 60 초에서 두 개의 임펄스, t=108~148초 사이에 하나의 급작(burst) 신호, t=200~300초 사이에 두 개의 chirp 신호, t=350~400초 사이에 두 개의 주파수 성분을 갖는 정현파로 구성하였다.

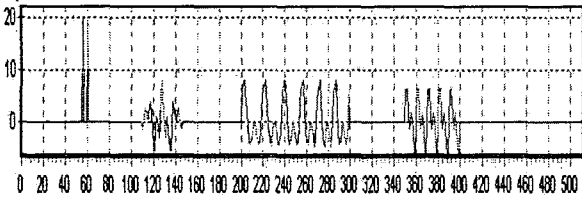


그림 4 시험신호
Fig. 4 Test signal

그림 5는 STFT, CWD와 콘의 길이 변화에 따른 CKD를 나타낸다. STFT에 사용된 창함수의 길이는 64이며, STFT의 특성상 간섭신호는 나타나지 않지만 시간 및 주파수 분해능이 아주 좋지 않음을 알 수 있다. CWD는 커널의 크기를 결정하는 변수를 $\sigma = 20,000$ 으로 최적화된 결과이나 간섭신호가 존재함을 알 수 있다. CKD는 콘-커널 함수로서 가우시안(gaussian) 함수를 사용하였으며, 콘-커널 함수의 길이를 16, 32, 64로 변화시키면서 계산하였다. 그림 5(c)-(e)에서 처럼 콘의 길이가 짧을수록 시간축(가로축) 방향의 분해능이 좋아진다. 그러나 주파수축(세로축) 방향으로 는 반대 현상이 일어난다. 결과적으로 T=32일 때 최적의 분포함수가 됨을 알 수 있다.

2.4 적응 콘-커널 시간-주파수 분포함수 (ACKD) 제안

앞서의 CKD는 해석되는 신호 전체에 대해 하나의 커널 함수를 설계하여 시간주파수 분포함수를 구하는 고정 커널 방식으로 계산한다. 본 논문에서 제안되는 콘-커널은 매 순

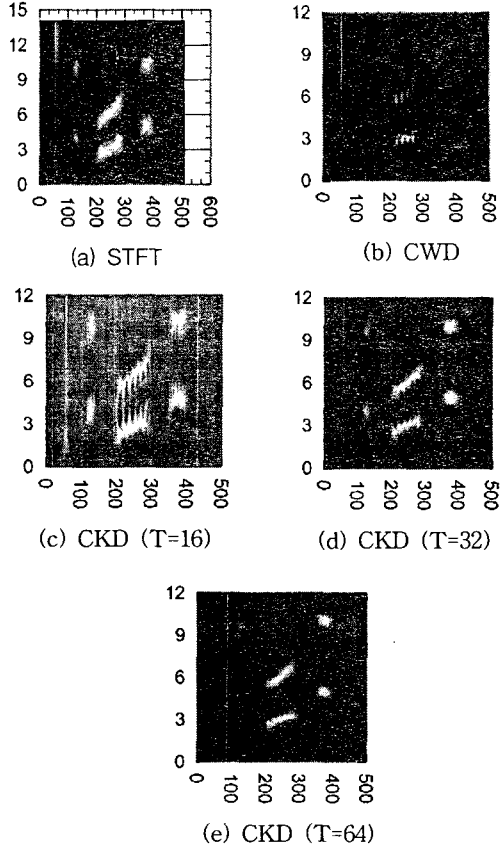


그림 5 시험신호의 시간-주파수 분포함수
Fig. 5 Time-frequency distributions for test signal

간마다 커널함수를 계산하여 시간-주파수 분포함수를 구하는 적응 커널 방식으로, 결국은 매 순간마다 콘-커널 함수의 길이를 최적화하므로써 최적의 시간-주파수 분포함수를 구한다. 콘-커널 함수 길이를 최적화하기 위하여 적응 알고리즘의 성능지수(performance index)로서 최대 에너지 값을 사용하는 방법[12], 시간-주파수 분포함수의 첨예도(kurtosis)를 사용하는 방법[13], 엔트로피를 사용하는 방법[14] 등이 발표되었다. 이러한 방법들은 어느 한 임의의 시간에서 최적의 콘-커널 함수 길이를 구하기 위하여 임의의 시간을 전후로 하는 시간 데이터를 입력으로 사용하여 성능지수를 최소 혹은 최대로 만족하는 구간으로부터 최적의 콘-커널 함수의 길이를 선정하였다. 참고논문[12][13]에서는 임의시간 전후의 데이터의 길이는 사전에 적절하게 설정하여 주거나 또는 모든 데이터 구간으로 설정하였다. 이러한 방법은 성능 지수와 각 임의 시점에서 연산하여야 할 시간 데이터 길이를 정해주기만 하면 최적의 콘-커널의 길이를 시간신호 형태에 따라서 자동적으로 변환시켜 준다는 잇점이 있다. 그러나 임의시간 데이터 외에 전후 시간 데이터를 사용하여 매 순간 위치마다 콘-커널의 길이를 변화시켜 가

면서 그 결과를 성능지수에 입력하여 최적의 콘-커널의 길이를 구하기 때문에, 계산량이 많고 주어진 모든 데이터에 대한 최적의 콘-커널 길이를 구하는 데에는 긴 시간이 필요하다. 따라서 계산시간을 줄이기 위하여 참고문헌[12]에서는 자기회귀(recursive) 기법과 정규화에 사용되는 콘-커널 가중치를 근사화시킨 연산 알고리즘을 제시하고 있다.

본 논문에서는 비교적 적은 연산량으로 적합한 시간-주파수 분석 결과를 얻기 위하여 정규화된 Shannon 엔트로피를 이용한 적응 콘-커널을 설계하였다. 본 논문의 ACKD는 임의시간 전후의 데이터는 활용하지 않고 임의시간의 데이터만 사용하여 최적의 콘-커널 길이를 구한다. 그러므로 어느 한 순간 위치에 대한 최적의 콘-커널 길이만을 구하기 때문에 계산량을 기존의 논문에서 제시한 방법보다는 현저하게 줄일 수 있다. 식(7)의 CKD는 콘-커널의 길이 T가 정해져 있는 경우, 분포함수 크기 C_x 의 값은 고정된 시간 n에 대하여 데이터 개수만큼의 주파수 변환값이 C_x 에 할당된다. 임의의 시간 n에 대하여 T를 변화시키면서 식(7)의 CKD를 구하면 T에 대한 CKD의 계산 데이터, 즉, 주파수 변환 데이터가 구해진다. T가 변화하면서 최적의 값에 이르게 되면 그 때의 주파수 변환값은 최상의 정보를 얻게 되고 이는 또한 식(8)과 같은 정규화된 Shannon 엔트로피를 최소화하거나 매우 감소시키게 될 것이다.

$$E(T, n) = \sum_{m=0}^{M-1} f_N(m, n; T) \ln \frac{1}{f_N(m, n; T)} \quad (8)$$

식(8)에서 n은 어느 시간 시점, m은 주파수 결과 값을 가리키는 지표(index), M은 주파수 변환 데이터 개수를 나타낸다. 식(8)의 f_N 은 식 (9)와 같이 정의된다.

$$f_N(m, n; T) = \frac{[C_x^R(n, m; T)]^2 + [C_x^I(n, m; T)]^2}{\sum_{m=0}^{M-1} \{ [C_x^R(n, m; T)]^2 + [C_x^I(n, m; T)]^2 \}} \quad (9)$$

식(9)에서 C_x^R 은 C_x 의 실수값을 의미하고 C_x^I 는 허수값을 나타낸다. 따라서 식(8)의 값이 최소이거나 급격한 감소를 나타내는 경우의 T를 최적의 콘-커널 길이로 정한다. 실제로 T를 1부터 점차 증가시켜 가면서 엔트로피의 값을 구하면 값이 T의 길이가 증가할수록 궁극적으로는 감소한다. 그림 6과 그림 7은 T가 변할 때 그림 4의 시험신호에 대한 엔트로피 값이다. 그림 6은 콘-길이의 최대 범위를 100으로 설정하고 시험신호의 56번째(n=56)의 데이터(펄스 파형)에

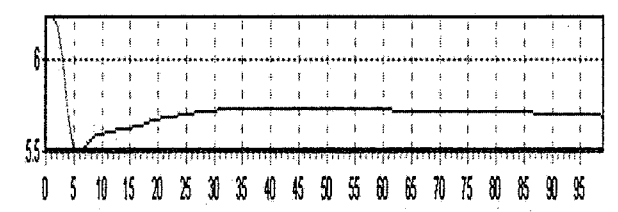


그림 6. 시간 n=56에서 콘-커널 길이 T를 1에서 100까지 변화시킬 때 엔트로피

Fig. 6 Entropy with increase in the cone-kernel length (T) from 1 to 100 at time n=56

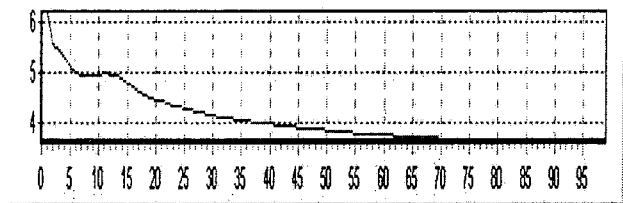


그림 7. 시간 n=240에서 콘-커널 길이 T를 1에서 100까지 변화시킬 때 엔트로피

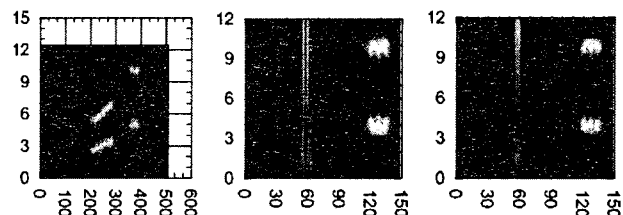
Fig. 7 Entropy with increase in the cone-kernel length (T) from 1 to 100 at time n=240

대한 엔트로피를 식(8)을 이용하여 구했을 때의 결과로서 T=5에서 최소의 엔트로피 값을 나타내고 있다. 그러나 그림 7은 시험신호의 240번째(n=240) 데이터(chirp 신호)에 대한 엔트로피 값으로 그림 6과는 달리 T가 증가해 갈수록 엔트로피가 서서히 감소하는 것을 볼 수가 있다.

따라서 본 논문에서는 엔트로피에 설정치를 부과하여 엔트로피 값이 설정치 이하로 떨어지는 시점을 최적의 콘-커널 길이로 선정하였다. 그림 8(a)는 그림 4의 시험신호에 대한 ACKD 결과이다. 이 계산에서 엔트로피 설정치는 식 (10)과 같다.

$$E_{threshold} = E_{min} + \alpha(E_{max} - E_{min}) \quad (10)$$

식(10)에서는 $\alpha=0.15$ 를 사용하였으며 이는 경험을 근거로 하였다. 따라서 엔트로피가 최대값으로부터 설정치에 도달했을 때의 콘-커널 길이를 최적의 콘-커널 길이로 선정하였다. 그림 8(b)와 그림 8(c)는 두 개의 펄스 파형의 결과를 상세히 보기 위하여 그림 8(a)의 ACKD와 그림 5(d)의 CKD의 일부 데이터 샘플 구간, 즉, [0~150] 샘플구간에 대한 신호 변환 결과를 확대하여 표시한 것이다. 그림 8(b)와 그림 8(c)로부터 두 개의 펄스에 대한 분포함수에서 CKD의 경우는 두 펄스를 구분하기가 힘들으나 ACKD에서는 잘 구분됨을 확인할 수 있다. 그림 9는 적응 알고리즘에서 매 샘플의 위치마다 선정된 콘-커널의 길이를 나타내고 있다. 또한 본 논문에서 제안한 적응 콘-커널 분포함수의 계산량은 $O(MN \log N)$ 으로 참고문헌[12]의 알고리즘과 같으나 일반적인 적응 콘-커널 분포함수의 계산량 $O(MN^2 \log N)$ 보다 적음을 알 수 있다. 여기서 M은 데이터 수, N은 FFT 수이다.



(a) ACKD (전체) (b) ACKD (0~150초) (c) CKD (0~150초)

그림 8 시험신호의 ACKD
Fig. 8 ACKD's for test signal

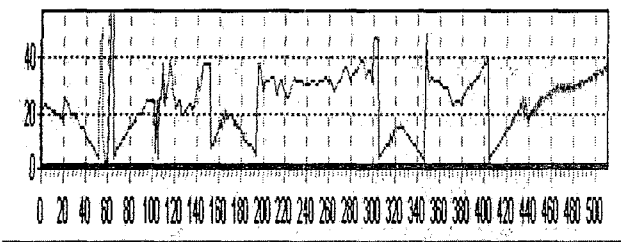


그림 9 시험신호에 대한 콘-커널 함수의 길이 변화
 Fig. 9 Variation of the cone-kernel length for test signal

2.5 진동신호 데이터의 ACKD 계산

실험장치로부터 측정된 진동신호에 대한 STFT, CKD와 ACKD를 계산한 결과가 그림 10이다. STFT은 분포함수의 분해능은 좋지 않지만 간섭신호가 없다는 점에서 비교를 위한 참조기준으로 사용된다. 그림 10(b)~그림 10(e)를 비교한 결과, 본 논문에서 제안한 적응 콘-커널 함수를 사용하는 ACKD가 CKD보다 분해능이 좋고 또한 간섭신호도 적게 나타남을 알 수 있었다. 그림 11은 ACKD 계산시 선정된 콘-커널함수의 길이 변화를 나타낸다.

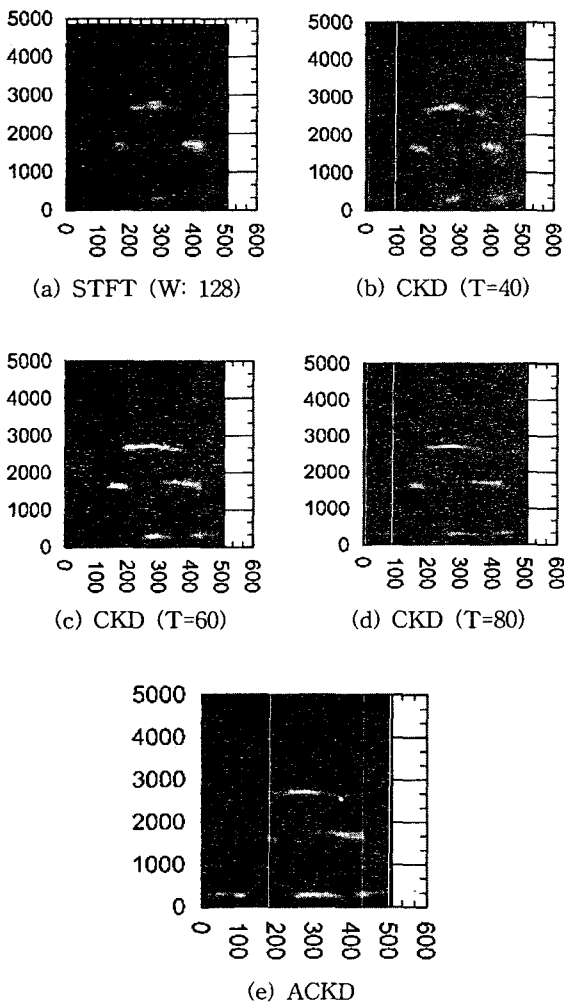


그림 10 진동신호의 STFT, CKD 및 ACKD
 Fig. 10 STFT, CKD and ACKD for vibration signal

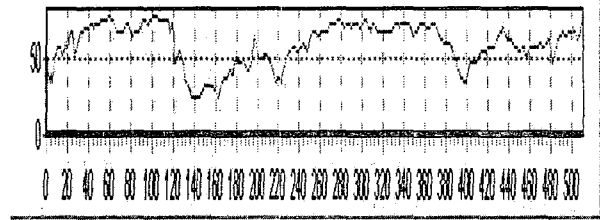


그림 11 진동신호에 대한 콘-커널 함수의 길이 변화
 Fig. 11 Variation of the cone-kernel length for vibration signal

2.6 진동신호 데이터 분석결과

시간-주파수 분포함수 계산에 앞서 측정된 신호데이터로부터 평균화(averaging)를 통해 직류성분을 제거하므로써 이로 인해 발생하는 간섭신호를 제거하였다. 본 논문에서 계산된 CKD 및 ACKD에 대한 정확성은 미국 National Instrument 사의 신호처리 도구를 사용하여 계산된 그림 12의 CKD와 비교하므로써 확인하였다. 그림 12로부터 정상상태의 파이프에 감옥이 발생하면 진동의 징후를 나타내는 신호의 특성주파수(0.5 KHz, 1.6 KHz, 2.7 KHz)에서 약간의 변이가 발생하고 특성주파수 별로 진폭이 변화함을 알 수 있다. 이들은 기존의 주파수 분석 결과와 일치한다. 그러나 이들로부터 파이프의 감옥정도를 예측하여 원전 운전계획에 수정을 가하기에는 불충분하다. 따라서 이에 대한 더 많은 정보가 필요하다. 시간-주파수 분포함수는 시간정보에 대한 추가정보를 제공한다는 점에서 유용한 해석도구로 적용 가능하다. 그림 12의 CKD로부터 파이프 감옥이 발생하면 각 특성주파수 진폭에서 파동(fluctuation)이 발생하며 감옥의 정도에 따라 파동의 피크 주기가 변함을 알 수 있다. 감옥의 정도와 시간-주파수 분포함수 상에 나타나는 특성주파수 별 파동의 피크의 주기 간의 정확한 관계는 실험과 병행하면서 계속 연구해야 할 부분이다.

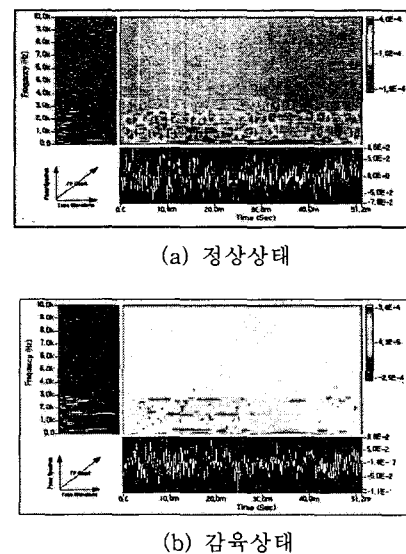


그림 12 진동신호에 대한 CKD (NI 사 신호처리 도구 사용)
 Fig. 12 CKD's for vibration signal (by NI SPT toolkit)

3. 결 론

원전에서 노후화된 파이프에서 감육으로 인한 사고나 운전정지를 방지하기 위해서는 프로세스에 영구적으로 부착된 센서로부터 파이프 감육을 운전중에 감시할 수 있는 시스템이 필요하다. 또한 원전의 환경을 고려했을 때 측정센서는 능동소자보다는 수동소자를 사용하는 것이 좋으며, 감시시스템의 결과를 운전계획에 반영하기 위해서는 신호해석 결과의 신뢰성과 정확성이 요구된다. 본 논문에서는 파이프 감육상태 감시를 위한 진동신호를 해석하기 위하여 적응 알고리즘을 이용한 콘-커널 함수를 제안하였다. WVD에서 나타나는 간섭신호를 제거하기 위하여 제안된 ACKD는 다른 시간-주파수 분포함수 계산결과 등과 비교했을 때 분해능이 좋고 계산시간이 짧으며 시변신호에 대한 추적성이 좋다는 결과를 보여주었다.

진동신호에 대한 ACKD 해석결과는 기존의 주파수 분석으로 찾을 수 있는 주파수 정보 외에 시간에 대한 정보를 제공하므로써 파이프 감육감시에 대한 ACKD의 신뢰도를 높여 준다. 따라서 본 연구결과는 파이프 감육상태 온-라인 감시시스템에 적용가능하며, 감육정도와 특성주파수 별 파동의 피크 주기와의 관계에 대한 정보가 제공된다면 제안된 ACKD의 신뢰도를 더 높일 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

[1] N. Y. Lee, et al., "Condition Monitoring of Flow-Accelerated Corrosion of a Simulated Low Alloy Steel Piping Elbow using Electrochemical and Vibration Sensors," SMIRT17, Prague, Czech Republic, Aug. 2003.

[2] T. J. Wahl and J. S. Bolton, "The Application of the Wigner Distribution to the Identification of Structure-Borne Noise Components," J. of Sound & Vibration, Vol. 163(1), pp.101-122, 1993.

[3] C.K. Lee et al, "Condition Monitoring of Check Valve Using Time-Frequency representation," in Proc. 11th Asia-Pacific Conf. Non-Destructive Testing, Jeju, Korea, Nov. 2003

[4] T. A. C. M. Claasen and W. F. G. Mecklenbrauker, "The Wigner Distribution - A Tool for Time Frequency Signal Analysis - Part I and Part II," Philips J. of Research, Vol. 35, pp.217-250, 276-300, 1980.

[5] L. Cohen, Time-Frequency Analysis, Prentice-Hall, 1995

[6] J.T. Kim et al, "Integrated Approach for on-line Condition Monitoring on Process Components and Piping," Proc. of ANDE 2005, Jeju, Nov., 2005

[7] S.H. Seong et al, "Vibration Analysis for Condition Monitoring on Piping Elbow Thinning," Proc. of ISOFIC 2005, Chungmu, Nov., 2005

[8] C.K. Lee, J.T. Kim and S.J. Lee, "Detection of a Vibration Caused by a Flow Accelerated Corrosion on the Pipes Using a Cone-Shaped Kernel Time-Frequency Distribution," Proc. of Korean Nuclear Society, Jeju, May, 2005

[9] Shie Qian, Time-Frequency and Wavelet Transform, Prentice-Hall PTR, 2002

[10] H. I. Choi and W. J. Williams, "Improved Time Frequency Representation of Multicomponent signals Using Exponential Kernels," IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol. 37(6), pp.862-871, 1989.

[11] Y. Zhao, L. E. Atlas, and R. J. Marks II, "The Use of Cone-shaped Kernels for Generalized Time-Frequency Representations of Nonstationary Signals," IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol. 38(7), pp.1084-1091, 1990.

[12] R. N. Czerwinski and D. L. Jones, "Adaptive Cone-Kernel Time-Frequency Analysis," IEEE Trans. on Signal Processing, Vol. 43(7), pp.1715-1719, 1995.

[13] D. L. Jones and T. W. Parks, "A High Resolution Data-adaptive Time-Frequency Representation," IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol. 38(12), pp.2127-2135, 1990.

[14] D.L. Jones and R.G. Baraniuk, "A Simple Scheme for Adapting Time-Frequency Representations," IEEE Trans. on Signal Processing, Vol. 42, pp.3530-3535, 1994.

저 자 소 개



이철권 (李喆權)

1957년 11월 21일생. 1980년 경북대 전자과 졸업. 1985년 동아대 대학원 전자과 석사. 1985년~현재 한국원자력연구소 근무
Tel : 042-868-8657, Fax : 042-868-8916
E-mail : cklee1@kaeri.re.kr



김정택 (金楨宅)

1959년 3월 14일생. 1984년 한양대 원자력공학과 졸업. 1986년 동 대학원 원자력공학과 석사. 1986년~현재 한국원자력연구소 근무
Tel : 042-868-2404, Fax : 042-868-8916
E-mail : jtkim@kaeri.re.kr



이상정 (李相禎)

1957년 8월 15일생. 1979년 서울대 전자과 졸업. 1981 동 대학원 전자과 석사. 1987 동 대학원 제어계측과 박사. 1988년~현재 충남대 전자과 교수
Tel : 042-821-6582, Fax : 042-823-4494
E-mail : eesjl@cslab.cnu.ac.kr