

Location Template Matching(LTM) 방법을 적용함에 있어서 진동 모드 수의 영향

The Effect of the Number of Vibration Modes on the Application of the Location Template Matching(LTM) Method

신 기 홍[†]
Kihong Shin

(Received January 12, 2016 ; February 15, 2016 ; Accepted February 15, 2016)

Key Words : Correlation Coefficient(상관계수), Group Delay(그룹지연), Vibration Modes(진동 모드), Sampling Rate(샘플링 주파수), Location Template Matching(LTM)

ABSTRACT

The location template matching (LTM) method is a technique of identifying an impact location on a structure, and is often applied to structural health monitoring and large scale human-computer interface (HCI) systems. The LTM method utilizes a certain measure of similarity between two time signals. The correlation coefficient is most widely used for this purpose, and the group delay based method is recently proposed to improve the accuracy of finding the best matching pair of signals. In practice, one of key essential consideration for implementing the LTM method is to guarantee that a sufficient number of vibration modes must be contained in the measured signal, and yet the lower sampling rate is needed for a real-time implementation. In this paper, the properties of correlation coefficient and group delay with respect to the number of vibration modes are investigated. A few important results are obtained through extensive computer simulations and experiments. If the number of vibration modes contained in the measured signal is more than four it is sufficient for the correlation based LTM method, while the group delay based LTM method requires smaller number of vibration modes.

1. 서 론

LTM(location template matching) 방법은 어떠한 구조물 또는 장치에 충격이 가해질 때 발생하는 진동 신호를 이용하여 충격 위치를 파악하는 기술로서, 기계 및 구조물의 이상 진단에 응용될 수 있다⁽¹⁾. 특히 최근에는 손가락 등에 의한 충격 신호를 이용하여

대형 터치스크린과 같은 HCI(human-computer interface) 장치에 적용하기 위하여 활발한 연구가 이루어져 왔다⁽²⁻⁹⁾.

LTM 방법은 이론이 간단하여 쉽게 사용될 수 있고, 한 개의 진동 측정 센서만 필요하며 구조물에 대한 자세한 동적 특성 정보가 필요하지 않다는 큰 장점을 가지고 있다.

LTM 방법의 원리는 매우 간단한 데, 예를 들어

[†] Corresponding Author; Member, Department of Mechanical & Automotive Engineering, Andong National University
E-mail : kshin@anu.ac.kr

[‡] Recommended by Editor Gi-Woo Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

서 설명하면 다음과 같다. Fig. 1과 같이 평판 위에 많은 격자(grid)를 구성하고 격자의 교차점(p_1, p_2, p_n)에 임의의 충격을 가한 다음, 충격에 의해 발생한 진동신호를 측정센서(measurement sensor)를 통하여 수집한 다음 데이터베이스를 구축한다. 이 때 데이터베이스에 저장된 진동신호를 참고신호(reference signal)라고 하며, 각각의 참고신호들은 충격 위치, 즉 격자의 교차점에 대응되도록 데이터베이스를 구성한다. 이렇게 구성된 데이터베이스를 위치 템플릿(location template)이라고 한다. 이 후, 평판의 임의의 위치에 새로운 충격이 가해질 때, 새롭게 측정된 진동신호(즉, 측정신호)를 데이터베이스에 저장된 참고신호들과 비교하여, 측정신호와 가장 유사한 참고신호를 찾아서 충격 위치를 파악하는 것이 LTM 방법이다.

LTM 방법에서 가장 중요한 것은 측정신호와 참고신호들 사이의 비교를 위한 유사성 척도(similarity measure)이다. 가장 많이 사용되는 유사성 척도는 시간영역에서 계산이 이루어지는 식 (1)로 표현되는 상관계수(correlation coefficient)이다.

$$\rho_{xy} = \frac{\text{Cov}(x,y)}{\sigma_x \sigma_y} \tag{1}$$

여기서, x 와 y 는 비교 대상인 진동 신호이고, $\text{Cov}(x, y)$ 는 두 진동 신호의 공분산(covariance), σ_x 와 σ_y 는 각 신호의 표준편차이다. 상관계수 ρ_{xy} 는 -1과 1 사이의 값을 가지며 두 신호 사이의 선형적인 연관성을 나타낸다⁽¹⁰⁾. 상관계수의 절댓값이 1에

가까울수록 두 신호 사이의 유사성이 크고, 0에 가까울수록 유사성이 떨어진다고 볼 수 있다. 그러나, 상관계수를 이용한 LTM방법은, Fig. 1을 참고할 때, 격자 간격이 좁은 경우 정확성이 크게 떨어지는 단점이 있다. 즉, 인접한 충격 위치 사이의 거리가 가까울수록 해당 진동 신호들 사이의 상관계수가 1에 가까워져 정확한 구분이 불가능하게 된다.

$$\sigma_{XY} = \sqrt{E[(\tau_{XY}(f))^2]} \tag{2}$$

여기서, X 와 Y 는 주파수 변환된 진동 신호이고, $\tau_{XY}(f)$ 는 X 와 Y 사이의 가상 FRF(fictitious FRF)^(8,9)의 그룹지연, σ_{XY} 는 그룹지연의 표준편차이다. 그룹지연을 이용한 유사성 척도는 상관계수와 반대로, σ_{XY} 가 0에 가까울수록 유사성이 크며, 유사성이 떨어질수록 그 값은 커지게 된다. 그룹지연을 이용한 LTM 방법은 격자 간격이 아주 좁은 경우에도 정확한 충격 위치 검출이 가능함을 보였다^(8,9).

지금까지의 연구에서는, LTM 방법의 정확성을 향상시키는 데 초점이 이루어졌으나, 보다 효율적이고 실시간으로 적용이 가능한 HCI 장치를 구현하기 위해서는 몇 가지 해결해야 할 점들이 있으며 그 중 하나는 샘플링 주파수(sampling rate)를 설정하는 기준이다. 높은 샘플링 주파수는 원하지 않는 고주파 잡음을 포함하게 되어 계산 오류를 일으킬 수 있으며 데이터 개수의 증가로 인하여 빠른 실시간 계산이 어려워 질 수 있다. 따라서 가능한 낮은 샘플링 주파수를 사용하면 효과적이지만 그 기준은 정립되어 있지 않다.

샘플링 주파수는 측정된 신호에 포함된 진동 모드의 수와 직접적인 관계가 있다. 즉, 높은 샘플링 주파수는 측정된 신호에 고차 모드들을 포함하여 많은 진동 모드가 포함되어 있다는 의미이며, 낮은 샘플링 주파수는 반대의 의미를 나타낸다. 따라서 샘플링 주파수는 시행착오를 통하여 직접 설정하기 보다, LTM 방법에 적합한 진동 모드의 수를 파악한 다음 그에 맞추어 샘플링 주파수를 구하는 것이 합리적이다. 따라서 본 논문은 측정된 신호에 포함되어 있는 진동 모드의 수가 상관계수와 그룹지연에 미치는 영향을 파악하여 샘플링 주파수를 설정하는 방안을 제시하고자 한다. 이를 위하여 복잡한 구조물 보다는 이론적인 해석이 용이하고, 시뮬레이션과

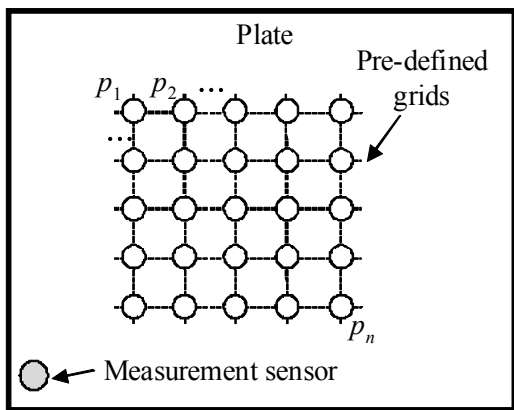


Fig. 1 A plate with pre-defined grids

실험이 편리한 외팔 보 모델을 이용하였다.

2. 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 진동 모드 수에 따른 상관계수와 그룹지연의 변화

2.1 외팔 보 모델

이 절에서는 이론적인 외팔 보 모델을 바탕으로, 컴퓨터 시뮬레이션에 사용된 진동신호들에 대하여 기술하였다. Fig. 2와 같이 300 mm × 30 mm × 10 mm 크기를 가진 외팔 보의 고정단에서 30 mm 떨어진 곳 (p1), 130 mm 떨어진 곳 (p2), 180 mm 떨어진 곳 (p3)을 충격 위치로 선정하고, 자유단에서 10 mm 떨어진 곳을 응답 위치로 선정하였다. 이 때 외팔 보의 밀도는 1299 kg/m³, 탄성계수는 2×10⁹ N/m², 손실계수(loss factor)는 0.01로 두었다.

외팔 보의 임펄스 응답함수와 주파수 응답함수는 각각 식 (3)과 식 (4)로 근사화 될 수 있다⁽¹¹⁾.

$$g(t) \approx \sum_{n=1}^N \frac{\phi_n(x_s)\phi_n(x_a)}{M_n\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t \quad (3)$$

$$G(j\omega) \approx \sum_{n=1}^N \frac{\phi_n(x_s)\phi_n(x_a)}{M_n[(\omega_n^2 - \omega^2) + j2\zeta\omega_n\omega]} \quad (4)$$

여기서 M_n 은 모달 질량, ζ 는 감쇠비, $\phi_n(x)$ 는 모드 형상 함수이며, N 은 진동 모드의 수를 나타낸다. 위 식들을 이용하여, 진동 모드 수를 $N=1$ 부터 $N=9$ 까지 변화시키면서, 가진점들(p1, p2, p3)에 대한 임펄스 응답 신호와 주파수 응답 신호를 생성하였다. 예로서, 가진점 p1에서 $N=9$ 인 경우에 대해서 Fig. 3에 나타내었다.

2.2 진동 모드 수의 영향

앞의 1절에서 기술한 바와 같이 LTM 방법을 효

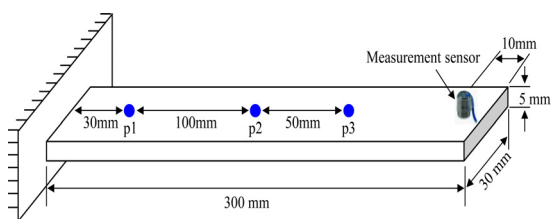


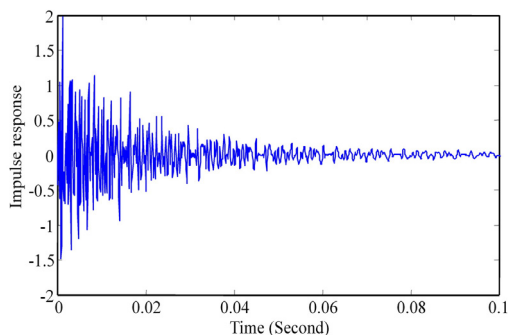
Fig. 2 A cantilever beam model

율적으로 적용하기 위해서는 가능한 적은 수의 진동 모드만 포함되도록 낮은 샘플링 주파수를 설정하여야 한다. 그러나 응답 신호에 포함된 진동 모드의 수가 너무 적은 경우, 서로 다른 충격 가진점들에 대한 응답이 모두 비슷하게 나타나 충격 위치의 구분이 불가능해 질 수 있다. 예로서 단 하나의 진동 모드만 포함할 경우, 임의의 두 충격 위치에서의 임펄스 응답 함수는 각각 식 (5)와 식 (6)으로 표현할 수 있다.

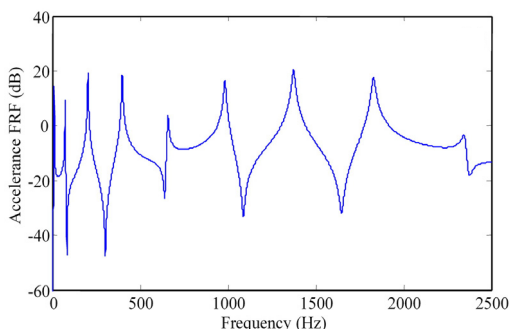
$$g_1(t) \approx A_1 e^{-\zeta\omega_1 t} \sin \omega_1 \sqrt{1-\zeta^2} t \quad (5)$$

$$g_2(t) \approx A_2 e^{-\zeta\omega_2 t} \sin \omega_2 \sqrt{1-\zeta^2} t \quad (6)$$

이 경우, 식 (1)에 의한 상관계수를 계산하면 식(7)과 같이 항상 1이 된다. 즉, 외팔 보 상의 두 충격 위치가 아무리 멀리 떨어져 있더라도 상관계수 값은 항상 1이 되어 충격 위치의 구별이 불가능하다.



(a) Impulse response



(b) Magnitude spectrum

Fig. 3 Generated signal corresponding to the impact point p1

$$\begin{aligned} \rho_{xy} &= \frac{Cov(x,y)}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{E[g_1(t)g_2(t)]}{\sqrt{E[g_1^2(t)]E[g_2^2(t)]}} \\ &= \frac{A_1 A_2 E \left[e^{-\zeta \omega_n t} \sin \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t \right]}{A_1 A_2 E \left[e^{-\zeta \omega_n t} \sin \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t \right]} = 1 \end{aligned} \quad (7)$$

주파수 응답을 이용하는 그룹지연의 경우도 마찬가지로, 한 개의 진동 모드만 포함하는 경우, 임의의 두 가진점에서 주파수 응답 함수는 식 (8)과 식 (9)로 각각 표현되며, 식 (2)에 의한 그룹지연의 표준편차를 계산하면^(8,9) 식 (10)과 같이 항상 0이 되어 충격 위치의 구별이 불가능하다.

$$G_1(f) \approx \frac{A_1}{(\omega_n^2 - \omega^2) + j2\zeta\omega_n\omega} \quad (8)$$

$$G_2(f) \approx \frac{A_2}{(\omega_n^2 - \omega^2) + j2\zeta\omega_n\omega} \quad (9)$$

$$\sigma_{G_1 G_2} = \sqrt{E[(\tau_{G_1 G_2}(f))^2]} = 0 \quad (10)$$

이상의 결과는 LTM방법에서 샘플링 주파수는 적절한 수의 진동 모드를 포함하도록 설정되어야 함을 의미한다. 진동 모드의 수가 증가함에 따라 식 (7) 및 식 (10)과 같은 이론적인 분석은 거의 불가능하다. 따라서 이 논문에서는 2.1절에서 기술된 방법으로 진동 모드 수를 변경시키면서 임펄스 응답 신호들을 생성한 다음 수치 해석적으로 식 (1)과 식 (2)를 적용하여 분석하였다.

우선, 충격 위치가 p1과 p2인 경우의 두 임펄스 응답 신호 사이의 상관계수와 그룹지연을 고찰하고자 한다. 일반적으로 LTM 방법에서 두 가진점 사이의 거리가 충분히 큰 경우에 상관계수는 0.9 이하, 그룹지연의 표준편차는 0.1 이상을 가진다⁽⁹⁾. 두 가진점 p1과 p2 사이의 거리는 100 mm로서 외팔보 전체 크기의 1/3에 해당되며 멀리 떨어져 있다. 따라서 두 임펄스 응답 신호들 사이의 상관계수는 0.9 이하, 그룹지연은 0.1 이상을 가져야만 LTM 방법에 의한 충격 위치 파악이 가능하게 된다.

두 가진점 p1과 p2에 대하여 진동 모드의 수를 1에서 9까지 변화함에 따른 상관계수와 그룹지연의 표준편차를 Fig. 4(a)와 4(b)에 각각 나타내었다. 이

그림에서, 진동 모드의 수가 1개인 경우는 상관계수는 1 그리고 그룹지연의 표준편차는 0임을 알 수 있고, 진동 모드의 수가 4개 이상에서 상관계수는 0.9보다 두드러지게 작으며, 그룹지연의 경우는 3개 이상에서 0.1보다 확연히 큼을 알 수 있다. 즉, 상관계수를 이용하는 LTM 방법을 적용할 때는 진동 모드의 수가 4개 이상 포함되도록 샘플링 주파수를 설정하면 되고, 그룹지연을 이용하는 LTM 방법의 경우에는 3개 이상 포함되면 충분하다는 의미이다.

시뮬레이션의 경우와는 다르게, 실험 데이터를 이용하는 경우에는 먼저 Fig. 7에 나타낸 것과 같이 충분한 진동 모드가 확보된 데이터를 수집한 다음, 적절한 저역 통과 필터(low-pass filter)를 사용하여 필터를 통과한 신호는 정해진 주파수 범위 내의 진동 모드들만 나타나도록 하였다.

먼저, 서로 100 mm 떨어진 두 가진점 p1과 p2에 대하여 진동 모드의 수를 1에서 9까지 변화함에 따른 상관계수와 그룹지연의 표준편차를 Fig. 8(a)와 8(b)에 각각 나타내었다. 시뮬레이션 결과와는 달리,

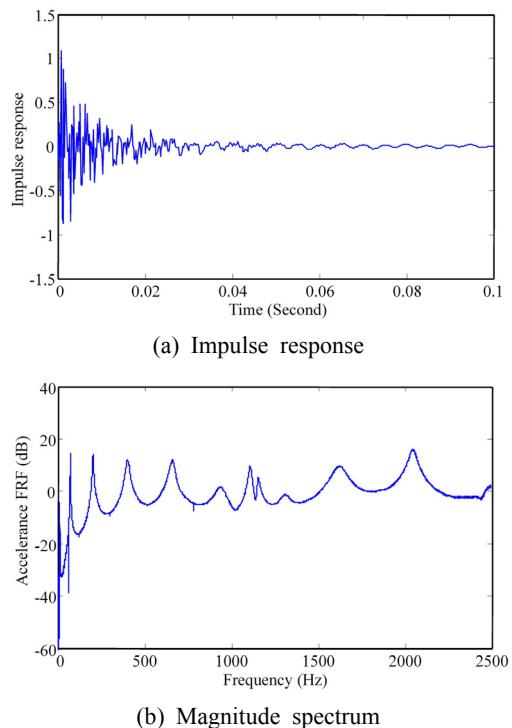
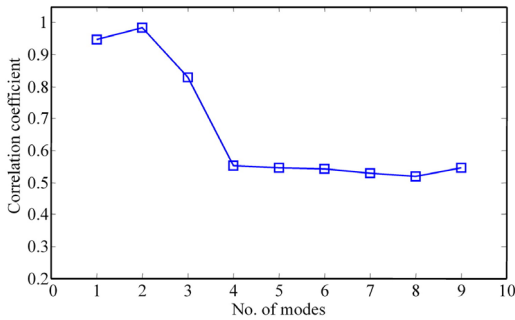
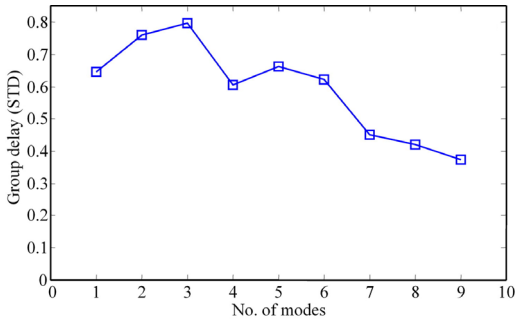


Fig. 7 Measured signal corresponding to the impact point p1

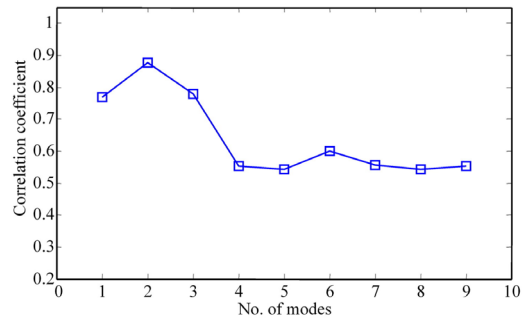


(a) Correlation coefficient

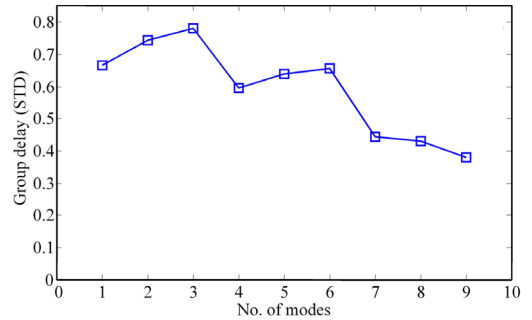


(b) Standard deviation of group delay

Fig. 8 The effect of number of vibration modes between signals corresponding to p1 and p2



(a) Correlation coefficient



(b) Standard deviation of group delay

Fig. 9 The effect of number of vibration modes between signals corresponding to p1 and p3

진동 모드의 수가 1개인 경우에 상관계수는 1보다 많이 작으며 그룹지연의 표준 편차도 매우 높은 값을 가진다. 이러한 현상의 이유는 저역 통과 필터를 사용하는 과정에서 신호의 왜곡 현상이 발생하고 또한 통과 대역 외의 진동 모드들이 완벽하게 사라지는 것이 아니고 저주파 영역에 고차모드들의 성분이 남아있기 때문이다. 그러나 Fig. 8(a)에 나타난 것과 같이 진동 모드의 수가 4개 이상인 경우, 상관계수 값은 거의 일정하면서 매우 낮은 값을 가짐을 알 수 있다. 이는 시뮬레이션 결과와 마찬가지로, 상관계수를 이용하는 LTM 방법을 적용할 때, 진동 모드의 수가 4개 이상 포함되도록 샘플링 주파수를 설정하면 충분하다는 의미이다.

그룹지연의 경우에는 오히려 진동 모드의 수가 적은 경우 그 값이 더 커지는 등, 단 1개의 진동 모드의 경우에도 기준 값인 0.1 보다 매우 크게 나타나고 있다. 이는 그룹지연을 이용하는 LTM 방법은 한 두 개의 진동 모드만 포함되도록 샘플링 주파수를 설정해도 가능하다는 의미를 가진다. 이러한 현상이 나타나는 이유는, 필터에 의한 왜곡 현상뿐만

아니라 필터를 통과 한 뒤에도 남아 있는 잔류 고차 모드 성분들이 위상 정보를 이용하는 그룹지연의 계산에 매우 큰 영향을 미치기 때문으로 판단된다.

다음으로, 충격 위치가 서로 150 mm 떨어진 p1과 p3인 경우에 대한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 전체적으로 Fig. 8의 결과와 유사하게, 상관계수를 이용하는 LTM 방법은 진동 모드의 수가 4개 이상 포함되도록 샘플링 주파수를 설정하면 충분하고, 그룹지연을 이용하는 경우에는 한 두 개의 진동 모드만 포함해도 LTM방법을 적용할 수 있음을 나타낸다.

4. 결 론

이 논문에서는 LTM 방법을 효율적이고 실시간으로 적용함에 있어서 반드시 고려해야 하는 샘플링 주파수를 설정하는 방법을 제시하였다. 샘플링 주파수와 직접적인 관련이 있는 진동 모드 수가 상관계수와 그룹지연에 미치는 영향을 분석한 다음, 이를 바탕으로 LTM 방법에 적합한 최소로 필요한 진동 모드의 수를 파악하였다.

이론적인 해석, 시뮬레이션 및 실험적 검증이 용이한 외팔 보 모델을 이용하여 분석하였으며, 시뮬레이션에 결과로서, 필요한 진동 모드의 수가 상관계수의 경우는 4개 이상, 그룹지연의 경우는 3개 이상이면 충분함을 보였다. 이는, 실제 구조물에 적용할 때는 간단한 실험에 의해서 4개 이상의 진동 모드를 포함하도록 샘플링 주파수를 설정하면 된다는 의미이기도 하다. 즉, 가능한 낮은 샘플링 주파수를 이용하여 원하지 않는 고주파 잡음이 포함되지 않고 데이터 개수를 줄여 빠른 실시간 계산이 이루어지도록 할 수 있다.

실험데이터를 이용한 결과는, 시뮬레이션 보다 적은 진동 모드의 수로도 가능함을 나타내고 있다. 본 실험에서는 상관계수의 경우는 3개 이상, 그룹지연의 경우는 1개 이상의 진동 모드만 있으면 충분함을 보여주었다. 이는 실험의 경우 설정된 주파수 범위 내에 아주 작은 크기지만 고차 모드의 영향이 남아있기 때문인데, LTM 방법을 적용함에 있어서는 샘플링 주파수를 더욱 낮게 설정할 수 있기 때문에 좋은 현상이라고 볼 수 있다.

전체적으로는, 실제 HCI 장치 등에 응용하는 경우, 구조물의 진동 모드의 수가 4개 이상 포함되도록 샘플링 주파수를 설정하면 매우 안정적으로 LTM방법을 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 2절에서 언급한 바와 같이, 이러한 결과는 평판과 같이 보다 복잡한 구조물에서도 고차모드의 영향이 임펄스 응답 신호에 미치는 영향이 작다면 유사하게 나타날 것으로 예상되기 때문에 LTM 방법을 적용함에 있어서 유용한 가이드라인이 될 수 있다.

이상으로 이 논문에서는 LTM 방법에 적합한 샘플링 주파수를 설정하는 과정을 명확하게 하였으며, 또한 이를 바탕으로 보다 실용적인 HCI 장치들의 구현이 가능할 수 있을 것으로 기대된다.

마지막으로, LTM 방법의 실용화를 위해서는 두 충격 지점 사이의 거리에 따른 유사성 척도의 영향을 파악하여야 하는 데, 이는 향후 연구 주제이기도 하다.

후 기

이 논문은 2015학년도 안동대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

References

- (1) Ing, R. K., Quieffin, N., Catheline, S. and Fink, M., 2005, In Solid Localization of Finger Impacts Using Acoustic Time-reversal Process, Applied Physics Letters, Vol. 87, No. 20, pp. 204104.
- (2) Paradiso, J. A., Hsiao, K., Strickon, J., Lifton, J. and Adler, A., 2000, Sensor Systems for Interactive Surfaces, IBM Systems Journal. Vol. 39, No. 3&4, pp. 892~914.
- (3) Pham, D. T., Al-Kutubi, M., Ji, Z., Yang, M., Wang, Z. and Catheline, S., 2005, Tangible Acoustic Interface Approaches, Proceedings of IPROMS 2005 Virtual Conference, pp. 497~502.
- (4) Sulaiman, A., Poletkin, K. and Khong, A. W. H., 2010, Source Localization in the Presence of Dispersion for Next Generation Touch Interface, 2010 International Conference on Cyberworlds (CW), pp. 82~86.
- (5) Yap, X., Khong, A. W. H. and Gan, W. S., 2010, Localization of Acoustic Source on Solids: A Linear Predictive Coding based Algorithm for Location Template Matching, 2010 IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP), pp. 2490~2493.
- (6) Arun, K. R., Yap, X. and Khong, A. W. H., 2011, A Touch Interface Exploiting Time-Frequency Classification Using Zak Transform for Source Localization on Solids, IEEE Transactions on Multimedia, Vol. 13, No. 3, pp. 487~497.
- (7) Yang, H., Lee, S. K. and Shin, K., 2012, On the Practical Consideration of Source Localization Using the Location Template Matching (LTM) with Multiple Sensors, Applied Mechanics and Materials, Vol. 157-158, pp. 441~446.
- (8) Shin, K., Yang, H., Lee, S. K. and Lee, Y. S., 2013, Group Delay Based Location Template Matching Method for the Identification of the Impact Location on a Plate, Journal of Sound and Vibration, Vol. 332, No. 8, pp. 2111~2117.
- (9) Shin, K., 2014, Comparative Study on the Measures of Similarity for the Location Template Matching(LTM) Method, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 24,

No. 4, pp. 310~316.

(10) Shin, K. and Hammond, J. K., 2008, Fundamentals of Signal Processing for Sound and Vibration Engineers, Wiley, Chichester.

(11) Fahy, F. and Gardonio, P., 2007, Sound and Structural Vibration: Radiation, Transmission and Response, Second Edition, Academic Press, Oxford.



Kihong Shin graduated in Precision Mechanical Engineering from Hanyang University in 1989. After several years as an electric motor design and NVH engineer with Samsung Electro-Mechanics Co., he studied for his MSc at

Cranfield University, UK in 1992. His subject was the design of rotating machines with a speciality in noise and vibration. He then joined the ISVR in University of Southampton, UK and completed his Ph.D. on nonlinear vibration and signal processing in 1996. He is currently a Professor in the Department of Mechanical & Automotive engineering in Andong National University. He is a Subject Editor of the Journal of Sound and Vibration (2008 - date) and an Editor of the Mechanical Systems and Signal Processing (2008 - date). His main research interests include signal processing for sound and vibration applications, vibration isolation and vibration testing, and machinery condition monitoring.