

외팔 보를 이용한 Location Template Matching 방법을 적용함에 있어서 격자간격의 영향 분석

Analysis of the Effect of the Grid Spacing on the Application of the Location Template Matching Method Using a Cantilever Beam

신 기 홍[†]
Kihong Shin

(Received June 25, 2016 ; Revised August 25, 2016 ; Accepted September 2, 2016)

Key Words : Correlation Coefficient(상관계수), Group Delay(그룹지연), Grid Spacing(격자 간격), Similarity Measure(유사성 척도), Location Template Matching(LTM; 위치 템플릿 매칭)

ABSTRACT

Measuring similarity between two signals is a key element of the location template matching (LTM) method which is one of impact source localization technique. As a measure of similarity, the correlation coefficient is most widely used, and the group delay based method is recently proposed to improve the accuracy of finding the impact source. In practice, the LTM method assumes that the similarity between two signals decreases as the distance between two corresponding impact points increases, where the distance between two neighboring impact points defines the grid spacing. In this paper, it is shown that this assumption is not always true but the correlation coefficients fluctuate forming a main robe and many side robes as the distance between two neighboring impact points increases. On the other hand, the standard deviation of group delay sharply increases with a small increase of the grid spacing. These are demonstrated by using a simple cantilever beam. Based on these findings, an optimal way of implementing the LTM method may be suggested by combining the correlation coefficient and the group delay based approaches.

1. 서 론

구조물에 충격이 가해질 때 그 충격으로 인하여 발생하는 진동 신호를 분석하여 충격이 가해진 위치를 파악하는 한 방법으로서 LTM(location template matching) 방법이 있다^(1,2). LTM 방법은 이론이 단순하고 응용 범위가 다양하기 때문에 구조물의 이상 진단 또는 대형 HCI(human-computer

interface) 시스템을 구현하기 위하여 많은 연구가 이루어져왔다⁽²⁻⁸⁾.

우선 참고문헌들에^(7,8) 기술된 LTM 방법에 대해서 간략히 언급하면 다음과 같다. 한 예로서 Fig. 1과 같이 많은 격자(grid)가 구성된 평판을 고려할 때, 격자의 교차점(p_1, p_2, \dots, p_n)을 충격 위치로 정의하고 각각의 위치에 충격을 가한 다음, 발생된 진동신호를 측정센서(measurement sensor)를 이용하여 수집하고 데이터베이스를 구축한다⁽⁹⁾.

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

A part of this paper was presented at the KSNVE 2016 Annual Spring Conference

‡ Recommended by Editor Gi-Woo Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

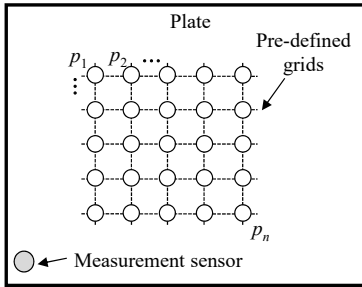


Fig. 1 A plate with pre-defined grids⁽⁹⁾

이 때 데이터베이스에 저장된 진동신호를 참고신호(reference signal)라고 하며, 구성된 데이터베이스를 위치 템플릿(location template)이라고 한다. 만약, 평판의 임의의 위치에 새로운 충격이 가해진다면, 이 때 발생한 진동신호를 측정하고 위치 템플릿에 저장된 참고신호들과 비교하여, 측정된 신호와 가장 유사한 참고신호를 찾아서 충격 위치를 파악하게 된다.

따라서, LTM 방법에서 가장 중요한 요소는 두 신호 사이의 비교를 위한 유사성 척도(similarity measure)를 적절히 사용하는 것이다. 대표적인 유사성 척도로서 상관계수(correlation coefficient)와 그룹지연(group delay)의 표준편차가 있으며⁽⁷⁾, 각각 식 (1)과 식 (2)로 표현된다.

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

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

여기서, x 와 y 는 비교 대상인 진동 신호, $\text{Cov}(x, y)$ 는 두 진동 신호의 공분산(covariance), σ_x 와 σ_y 는 각 신호의 표준편차, X 와 Y 는 주파수 변환된 진동 신호, $\tau_{XY}(f)$ 는 X 와 Y 사이의 가상 FRF(fictitious FRF)^(7,8)의 그룹지연, σ_{XY} 는 그룹지연의 표준편차이다.

상관계수 ρ_{xy} 는 -1과 1 사이의 값을 가지며 두 신호 사이의 선형적인 연관성을 나타내는 데⁽¹⁰⁾, 상관계수의 절댓값이 1에 가까울수록 두 신호 사이의 유사성이 크고 0에 가까울수록 유사성이 작음을 의미한다. 이에 반해, 그룹지연의 표준편차 σ_{XY} 는 반대의 특성을 나타내는 데, 0에 가까울수록 유사성이 크며, 유사성이 떨어질수록 커지는 값을 갖게 된다.

이러한 LTM 방법의 실용화를 위해서는 사용되는 유사성 척도들의 특성을 명확하게 파악하는 것이 매우 중요하다. 예로서, Fig. 1의 격자 간격이 좁은 경우에는 상관계수를 이용한 LTM방법은 정확성이 크게 떨어지지만, 그룹지연을 이용한 LTM방법은 매우 정확한 충격 위치 검출이 가능함을 보였다^(7,8). 또한 두 유사성 척도들을 적용함에 있어서 효율적인 실시간 계산을 위한 최적 샘플링 주파수를 설정하는 방안에 대해서도 정립되었다⁽⁹⁾.

그러나 LTM 방법을 적용함에 있어서 근본적으로 ‘참고신호와 측정신호에 해당하는 두 충격 지점 사이의 거리가 멀수록 유사성이 떨어진다’는 가정을 전제로 하고 있다. 이러한 가정은 개념적으로 당연할 것으로 판단될 수 있으나 실질적인 검증은 이루어지지 않았다. 즉, 격자간격(인접한 두 충격 가진점 사이의 거리) 변화에 따라서 유사성 척도 값들이 어떻게 변화하는 지를 파악하는 것이 필수적임에도 불구하고 이러한 연구는 간과되어왔으며, 상관계수의 특성에 대한 연구⁽¹¹⁾ 외에는 전무한 실정이다.

LTM 방법을 적용함에 있어서 격자간격의 영향을 분석하는 것이 중요한 이유는, 상관계수와 그룹지연의 표준편차 값들이 어떻게 변화하는 지에 대한 분석이 이루어져야만 특정한 유사성 척도를 사용하는 LTM 방법에 가장 적합한 격자간격을 알 수 있기 때문이다. 따라서 이 논문은 두 가진점 사이의 거리 변화에 따른 상관계수와 그룹지연의 특성 변화를 관찰하여 LTM 방법을 효율적으로 적용할 수 있는 방안을 제시하고자 한다. 이를 위하여 시뮬레이션과 실험이 용이하고 참고문헌의 결과와⁽⁹⁾ 비교가 가능한 외팔 보 모델을 이용하였다.

2. 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 격자간격에 따른 상관계수와 그룹지연의 변화

2.1 외팔 보 모델

이 절에서는 참고문헌⁽⁹⁾에서 사용된 동일한 외팔 보 모델을 바탕으로, 컴퓨터 시뮬레이션에 사용된 진동신호들에 대하여 기술하였다. Fig. 2와 같이 300 mm × 30 mm × 5 mm 크기를 가진 외팔 보의 고정단에서 1 mm 떨어진 곳부터 1 mm간격으로 299 mm 떨어진 곳까지 총 299 지점들을 충격 위치로 선정하고, 자유단에서 10 mm 떨어진 곳을 응답 위치로

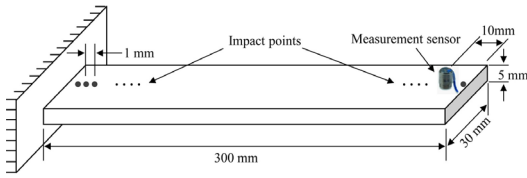


Fig. 2 A cantilever beam model for computer simulation

선정하였다. 이 때 외팔 보의 밀도는 1299 kg/m^3 , 탄성계수는 $2 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, 손실계수(loss factor)는 0.01로 두었다.

외팔 보의 임펄스 응답함수는 다음의 식 (3)과 같이 근사화 될 수 있다⁽¹²⁾.

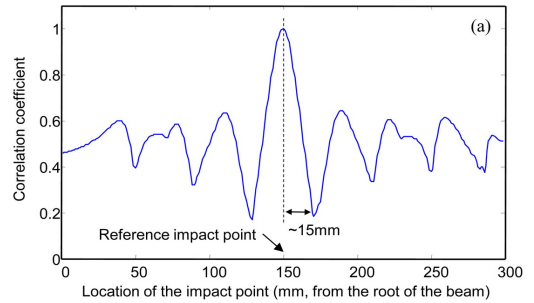
$$g(t) \approx \sum_{n=1}^N \frac{\phi_n(x_s)\phi_n(x_a)}{M_n\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t \quad (3)$$

여기서 M_n 은 모달 질량, ζ 는 감쇠비, $\phi_n(x)$ 는 모드 형상 함수이며, N 은 진동 모드의 수를 나타낸다. 참고문헌의⁽⁹⁾ 결과를 바탕으로 충분한 진동 모드의 수가 확보되도록 $N=9$ 로 설정하고, 각 가진점들에 대하여 식 (3)을 이용하여 총 299개의 임펄스 응답 신호를 생성하였으며, 이들 신호들 사이의 상관계수와 그룹지연의 특성을 분석하였다.

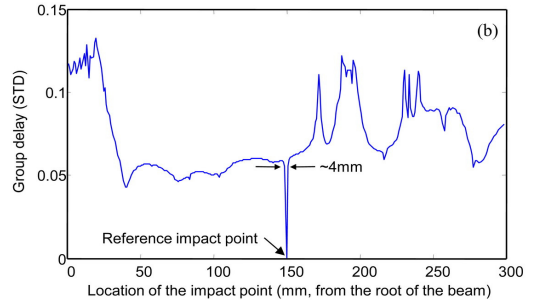
2.2 격자간격의 영향

앞의 1절에서 기술한 바와 같이 LTM 방법에 있어서 최적의 격자간격(즉, 두 가진 점 사이의 거리)은 매우 중요한 요소이며, 격자간격이 커질수록 그에 해당하는 유사성은 떨어진다는 가정을 바탕으로 하고 있다. 만약 격자 간격을 너무 크게 설정하는 경우에는 LTM방법의 유용성이 떨어지게 되며, 반대로 격자간격이 너무 작은 경우에는 해당되는 두 임펄스 응답신호 사이의 유사성이 매우 커져 정확한 충격 위치 파악이 어렵게 된다.

격자 간격이 좁은 경우에도 비교적 정확한 충격 위치 검출이 가능한 그룹지연을 이용한 방법^(7,8) 대형 HCI 시스템을 구현하는 경우에 문제가 될 수 있다. 그 이유는 구조물이 커짐에 따라서 구성되어야 할 참고신호들의 수가 너무 많아져서 실시간 구현이 어려울 수 있기 때문이다. 또한, 충격이 항상 격자의 교차점에 일어나지 않고 약간의 오차를 가지고 일어날 수 있는 데, 이 경우에는 실제 충격이 일



(a) Correlation coefficient



(b) Standard deviation of group delay

Fig. 3 Similarity measures for the reference impact point at 150 mm from the fixed end of the beam

어난 점에서 가장 가까운 격자 교차점이 검출되도록 해야 한다. 즉, 이전 논문들에서는^(7,8) 충격 위치가 항상 교차점에서 일어난다는 가정을 둔 결과를 나타내고 있는데, 이는 충격 위치의 오차는 고려하지 않았음을 나타낸다.

이 절에서는 이러한 상황을 고려하여 실질적인 HCI 시스템의 구현이 가능하도록, 두 충격 가진점 사이의 거리에 따른 상관계수와 그룹지연의 특성을 분석하고자 한다. 이를 위하여, 외팔보 상에 특정한 참고 가진점(reference impact point)을 정한 다음, 그 점에서의 임펄스 응답신호와 다른 가진점에 상응하는 임펄스 응답신호 사이의 유사성을 수치해석적으로 식 (1)과 식 (2)를 적용하여 분석하였다.

우선, 참고 가진점이 외팔보 고정단에서 150 mm 인 경우에 대하여, 기준 임펄스 응답 신호와 다른 모든 가진점에 대응되는 임펄스 응답신호들과의 상관계수와 그룹지연의 표준편차를 Fig. 3(a)와 3(b)에 각각 나타내었다. 이 그림에서, 격자간격이 커지면서 (즉, 두 가진점 사이의 거리가 멀수록), 전체적인 관점에서의 상관계수는 떨어지는 경향을 보이지만, 상

관계수가 단조롭게 감소하는 것이 아니라, 참고 가진점에서 상관계수 값이 1이며 이 점에서 메인로브(main robe)를 형성하고 거리가 증가함에 따라 많은 사이드로브(side robe)를 형성하면서 반복적인 증감의 현상을 나타내고 있다. 반면에, 그룹지연은 두 가진점이 매우 인접한 경우 아주 작은 값을 보이지만 조금만 떨어져도 그 값이 크게 증가하고 있으며, 증가하는 형태도 상관계수와는 달리 매우 불규칙적인 값을 보이고 있다.

특히, 상관계수의 경우, 최댓값 부근이 매우 완만한 특성을 보이고 있는데, 이는 상관계수의 최댓값과 인접한 값들의 차가 매우 작아서 격자간격이 작은 경우에 상관계수를 이용할 경우 충격위치 파악의 오차가 크게 발생할 수 있음을 나타낸다. 따라서 충분한 격자간격이 유지되어야만 상관계수를 이용할 수 있다. 그러나 격자 간격이 너무 커서 사이드로브의 영향을 받게 되는 경우에는 참고 가진점에서 훨씬 멀리 떨어진 곳에 해당되는 상관계수 값이 상대적으로 거리가 가까운 곳 보다 더 큰 값을 가지게 되어 충격이 일어난 가장 가까운 교차점이 검출되지 않게 될 수도 있다. 따라서, 사이드로브의 영향을 받지 않는 범위인 30 mm 이내에서 격자 간격을 설정해야 하며, 이 외팔보 시뮬레이션의 경우 메인로브 폭의 절반에 해당하는 15 mm 부근이 두 신호들 사이의 상관계수가 가장 낮기 때문에 충격 위치의 오차를 최소화 시킬 수 있는 최적의 격자간격으로 볼 수 있다. 이는 외팔보 전체 크기의 1/20에 해당된다.

그룹지연의 경우, 최솟값 부근이 매우 뾰족한 특성을 보이고 있는데, 이는 그룹지연의 최솟값과 인접한 값들의 차가 매우 커서 격자간격이 매우 좁은 경우에는 그룹지연을 이용하면 충격위치를 잘 파악할 수 있음을 나타낸다. 매우 조밀한 격자간격이 큰 장점이 될 수 있지만, 격자간격이 비교적 큰 경우에는 충격위치의 오차를 고려할 때 오히려 충격위치 파악에 오류가 나타날 가능성이 있다. 따라서 그룹지연은 격자간격을 매우 조밀하게 하여 사용해야만 함을 나타내고 있다. 즉, Fig. 3(b)에서 뾰족한 부분의 폭이 약 4 mm인 것을 감안할 때, 그룹지연의 표준편차를 LTM 방법에 적용하는 경우에는, 격자의 교차점을 기준으로 ± 2 mm 이내에 실제 충격이 일어나야만 충격 위치와 가장 가까운 격자 교차점을

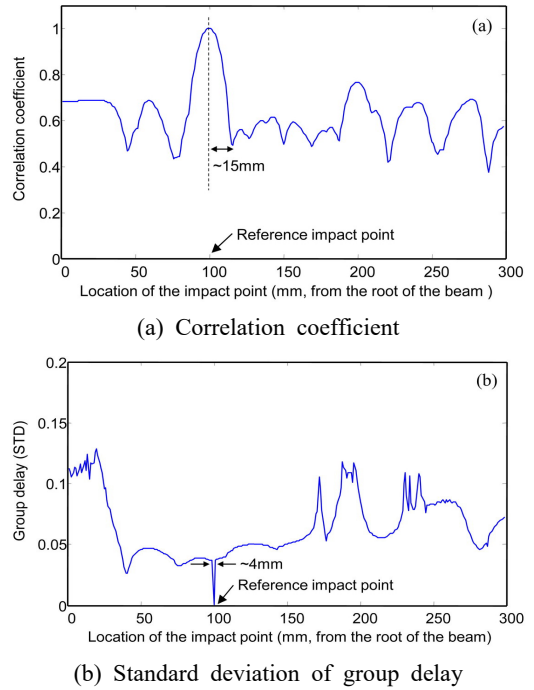


Fig. 4 Similarity measures for the reference impact point at 100 mm from the fixed end of the beam

검출할 수 있을 의미한다. 따라서 이 경우에는 격자 간격을 약 4 mm 이내로 설정해야 함을 나타내고 있다.

다음으로, 위 결과를 재확인 하고자 참고 가진점이 외팔보 고정단에서 100 mm인 경우에 대한 결과를 Fig. 4(a)와 4(b)에 각각 나타내었다. 전체적으로 Fig. 3에 나타낸 결과와 매우 비슷함을 알 수 있다. 즉, 상관계수의 경우 최적 격자간격은 15 mm (외팔보 크기의 1/20)이고 그룹지연의 경우 4 mm (외팔보 크기의 1/75) 이내로 설정하여야 함을 나타낸다.

3. 실험데이터를 이용한 검증

이 절에서는 2절의 시뮬레이션 결과를 검증하기 위하여 이론적 외팔 보 모델과 동일한 수치와 유사한 물성치를 가진 플라스틱 외팔 보를 구성하고, Fig. 5와 같이 미니어처 임팩트 해머를 이용하여 실험을 수행하였다. 그러나 시뮬레이션과는 달리 실험이 가능한 최소의 간격인 5 mm 간격으로 충격위치를

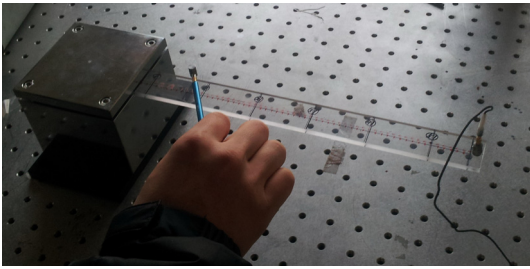


Fig. 5 Experiments with a miniature impact hammer

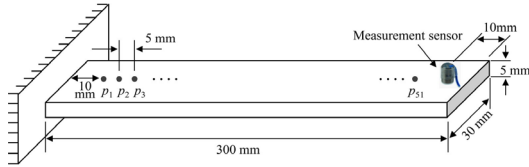
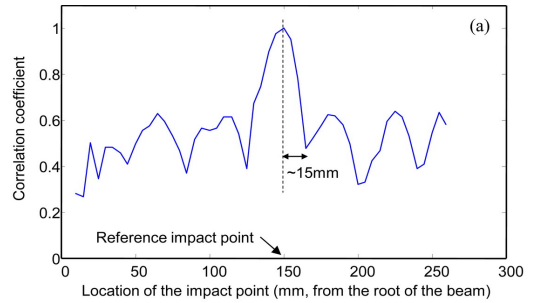


Fig. 6 Impact points for experiments

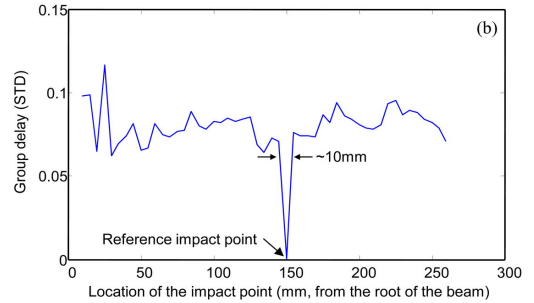
설정하였다. 즉, Fig. 6에 나타난 것과 같이 외팔 보의 고정단에서 10 mm 떨어진 곳(p_1)부터 5 mm간격으로 260 mm 떨어진 곳(p_{51})까지 총 51개의 가진점들에 대한 임펄스 응답 신호들을 구하였으며, 시뮬레이션 결과와 비교가 가능하도록 동일한 위치의 참고 가진점을 설정하였다.

먼저, 외팔 보의 고정단에서 150 mm인 가진점(p_{29})을 참고 가진점으로 설정하고, 이에 해당되는 임펄스 응답 신호와 모든 51개의 가진점에 대응되는 임펄스 응답신호들과의 상관계수와 그룹지연의 표준편차를 Fig. 7(a)와 7(b)에 각각 나타내었다. 실험 결과는 시뮬레이션 결과와 매우 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 즉, 참고 가진점에서 상관계수 값이 1이며 이 점을 기준으로 메인로브(main robe)가 나타나고 다른 가진점과의 거리가 증가함에 따라 사이드로브(side robe)를 형성하면서 반복적인 증감의 특성을 나타내고 있다. 그리고 그룹지연의 표준편차는 참고 가진점에서 0의 값을 가지고 거리가 조금만 증가하여도 그 값이 크게 증가한 다음 그 이상에서는 다소 불규칙적인 값을 보이고 있다.

또한, 상관계수를 이용하는 LTM 방법의 최적의 격자 간격은 시뮬레이션 결과와 같이 약 15 mm(외팔보 크기의 1/20)로 파악 되었으며, 그룹지연의 경우에는 뾰족한 부분의 폭이 약 10 mm(외팔보 크기의 1/30)이다. 특히, 그룹지연을 이용하는 경우에 실험 결과는 격자간격을 약 10 mm 이내로 설정해야



(a) Correlation coefficient



(b) Standard deviation of group delay

Fig. 7 Similarity measures for the reference impact point at 150 mm from the fixed end of the beam

바람직함을 나타내는데, 이는 비록 뾰족한 부분의 폭이 시뮬레이션의 경우보다 다소 넓지만 실험의 한계를 고려할 때 두 결과는 매우 유사하다고 볼 수 있다.

다음으로, 외팔 보의 고정단에서 100 mm인 가진점(p_{19})을 참고 가진점으로 설정한 경우에 대한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 전체적으로 Fig. 7의 결과와 유사하게, 상관계수를 이용하는 LTM 방법은 충격 위치의 오차를 고려할 때 최적의 격자 간격은 약 15 mm, 즉 외팔보 크기의 1/20 정도이며, 그룹지연을 이용하는 경우에는 약 10 mm 이내(외팔보 크기의 1/30)로 설정해야 함을 나타낸다.

이상의 시뮬레이션 및 실험 결과를 종합하면, LTM 방법을 실제 적용함에 있어서 격자 간격을 비교적 크게 설정하는 경우에는 상관계수를 이용하고 격자간격을 매우 조밀하게 적용해야 하는 상황에서는 그룹지연을 이용하는 것이 바람직하다. 또한 대형 HCI 시스템에서 조밀한 격자 간격이 요구되는 경우에는 구간을 나타내는 큰 격자를 구성하고 상관계수를 이용하여 어느 구간에 충격이 일어났는지 판

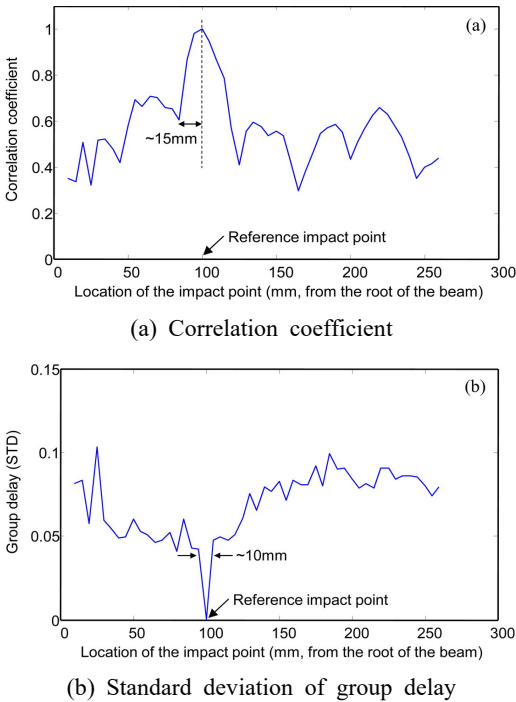


Fig. 8 Similarity measures for the reference impact point at 100 mm from the fixed end of the beam

악한 다음, 그 구간 내에서 정의된 세밀한 격자를 대상으로 그룹지연을 적용하는 조합 방식을 사용하면 유사성을 비교하는 데이터 수를 줄일 수 있기 때문에 실시간 구현에 도움이 될 것으로 판단된다.

4. 결 론

이 논문에서는 LTM 방법의 근본적인 가정인 두 충격 가진점 사이의 거리가 멀수록 유사성이 떨어진다는 통념이 항상 옳은 것이 아니고, 이와 관련된 유사성 척도들을 사용함에 있어서 많은 주의가 필요하다는 사실을 밝혀내었다. 상관계수의 경우 두 가진점 사이의 거리가 증가할수록 메인로브와 사이드 로브를 형성하면서 증감이 반복되는 형태를 나타내며, 그룹지연의 표준편차는 최솟값 부근에서 매우 뾰족한 특성을 가짐과 동시에 일정 거리 이상에서는 불규칙적인 값을 나타내고 있음을 보였다.

이러한 사실은 LTM 방법을 실용적으로 구현하고자 할 때 매우 중요하게 다루어져야 하는데, 실제 응용에서는 충격이 일어나는 지점과 미리 설정된 격

자의 교차점이 일치하지 않고 오차가 항상 있을 수 밖에 없기 때문이다. 이때에는 충격이 일어난 지점과 가장 가까운 격자의 교차점을 파악할 수 있어야 한다. 이를 위하여, 상관계수를 사용하는 경우에는 최적의 격자 간격이 설정될 수 있으며, 그룹지연을 사용하는 경우 격자 간격은 매우 조밀해야 함을 보였으며, 대형 HCI 시스템에서는 상관계수와 그룹지연을 조합하여 사용하는 것이 바람직함을 보였다.

비록, 이 논문의 결과는 외팔 보를 대상으로 한 것으로서 평판이나 3차원 구조물을 이용한 보다 실용적인 HCI 시스템에 직접 적용하기는 어렵지만 매우 중요한 의미를 나타내고 있다. 즉, 두 충격 지점 사이의 거리가 멀수록 유사성이 떨어진다는 가정이 성립되지 않기 때문에 LTM 방법을 실제 구현할 때는 그 이론의 단순함을 바탕으로 바로 적용하는 것이 아니라 해당 구조물에 대해서 이 논문에서 수행한 실험과 같이 격자 간격에 따른 상관계수와 그룹지연의 표준편차의 추이를 파악하는 충분한 사전 실험의 결과를 바탕으로 적절한 격자 간격을 설정해야 할 것이다.

후 기

이 논문은 2016학년도 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) 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.
- (3) 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.
- (4) 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.

(5) 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.

(6) 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.

(7) 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.

(8) 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.

(9) Shin, K., 2016, The Effect of the Number of Vibration Modes on the Application of the Location Template Matching (LTM) Method, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 26, No. 2, pp. 172~178.

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

(11) Shin, K., 2016, Correlation Analysis of Transient Vibration Signals for the Location Template Matching Method, International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering, Vol. 16, No. 3, pp. 1~7.

(12) 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.