

# Location Template Matching (LTM) 방법에 사용되는 유사성 척도들의 비교 연구

## Comparative Study on the Measures of Similarity for the Location Template Matching (LTM) Method

신기홍†  
Kihong Shin

**Key Words** : Measure of similarity (유사성 척도), Correlation coefficient (상관계수), Frequency Response Assurance Criterion (FRAC), Group delay (그룹지연), Location Template Matching (LTM)

### ABSTRACT

The location template matching (LTM) method is a technique of identifying an impact location on a structure, and requires a certain measure of similarity between two time signals. In general, the correlation coefficient is widely used as the measure of similarity, while the group delay based method is recently proposed to improve the accuracy of the impact localization. Another possible measure is the frequency response assurance criterion (FRAC), though this has not been applied yet. In this paper, these three different measures of similarity are examined comparatively by using experimental data in order to understand the properties of these measures of similarity. The comparative study shows that the correlation coefficient and the FRAC give almost the same information while the group delay based method gives the shape oriented information that is best suitable for the location template matching method.

### 1. 서 론

대부분의 공학적인 구조물 또는 장치들은 충격이 가해지면 그에 따른 진동이 발생하게 된다. 이러한 충격에 의한 진동을 저감시키거나, 또는 반대로 충격에 의한 진동을 이용하는 다양한 공학적인 문제에서 충격의 위치를 정확하게 파악하는 것은 매우 중요한 과제이며 그 동안 많은 방법들이 개발되었다<sup>(1-6)</sup>. 그 중에서 LTM (Location Template Matching) 방법은 구조물의 이상 진단 뿐만 아니라, 대형 터치스크린과 같은 HCI (Human-Computer Interface) 장치들에 적용하기 매우 적합한 방법으로 최근 활발한 연구가 이루어져 왔다<sup>(5-11)</sup>.

LTM 방법은 소프트웨어와 하드웨어의 구성이 매우 간편하게 이루어질 수 있는 장점이 있으나, 충격

위치를 구분 할 수 있는 공간해상도를 일정 수준 이상 높일 수 없는 것이 최근까지 가장 큰 단점이었다. 특히, 유사성 척도로서 상관계수 (correlation coefficient)를 이용하는 LTM 방법의 최대 공간해상도는 평판 구조물의 경우 약 4cm 정도로 알려져 있으며, 이를 높이기 위하여 다양한 신호처리 기법들이 응용되어 왔으나<sup>(7-10)</sup> 근본적인 대책은 되지 못하고 4cm 이하의 공간해상도에서 충격위치 파악의 성공률을 다소 향상시키는 데 그치고 있다. 최근, Shin<sup>(11)</sup> 등은 그룹지연(group delay)을 유사성 척도로서 이용한 LTM 방법을 사용하여 1cm의 공간해상도에서도 100%의 충격위치 파악 성공률을 얻을 수 있음을 실험적으로 검증하여 대형의 HCI 장치들의 실질적인 구현에 새로운 전기를 가져왔다.

Shin 등은 비록 LTM 방법에 그룹지연이 매우 적합함을 보여주었으나 그룹지연이 유사성 척도로서 가지는 물리적인 의미가 명확하게 정의되지 않았으며, 특히 상관계수와 같은 다른 유사성 척도에 비교하여 어느 정도의 상대적인 변별력을 가지는지에 대

† 교신저자; 정회원, 안동대학교 기계자동차공학과  
E-mail : kshin@anu.ac.kr  
Tel : 054-820-5885, Fax : 054-820-5044

한 구체적인 정량적인 연구는 이루어지지 않았다.

따라서 이 논문에서는 그룹지연이 유사성 척도로써 가지는 물리적인 의미를 명확하게 재 정립하고 변별도(discriminability)를 새롭게 정의하여 다른 유사성 척도들과의 정량적인 상대 비교를 수행하였다. 상대 비교의 대상으로서 시간영역에서 이루어지는 상관계수뿐만 아니라 주파수영역에서 이루어지는 FRAC (Frequency Response Assurance Criterion)을 이용한 결과를 함께 비교하여, 유사성 척도 관점에서 세 가지 방법들의 특징을 명확하게 나타내었다. 그 결과, 응용 대상에 따라서 어떠한 유사성 척도가 사용되어야 하는지를 명확하게 하였고, LTM 방법과 같이 두 데이터 사이의 모양 구분이 중요한 경우에는 그룹지연을 이용하는 것이 가장 좋은 방법이 될 수 있음을 보였다.

## 2. 2장 제목

LTM 방법은 구조물에 가해진 충격의 위치를 검출하는 여러 가지 방법들 중 한가지이며, 원리는 매우 간단하다. 예로서 Fig. 1과 같이 평판 위에 많은 격자(grid)를 구성하고 격자의 교차점( $p_1, p_2, \dots, p_n$ )에 임의의 충격을 가한 다음, 충격에 의해 발생한 진동신호를 측정센서(measurement sensor)를 통하여 수집한 다음 데이터베이스(DB)화 한다. 이 때 DB에 저장된 진동신호들을  $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ 라 두어 각각의 신호들이 충격 위치, 즉 격자의 교차점에 대응되도록 하여 위치 템플릿(location template)을 구성한다. 이후, 평판의 임의의 위치에 새로운 충격이 가해지고 이 때 측정된 진동신호를  $y(t)$ 라고 하면, DB에 저장된 신호들( $x_i(t)$ ) 중  $y(t)$ 와 가장 유사한 진동신호를 찾아서 충격 위치를 검출하는 것이 LTM 방법이다.

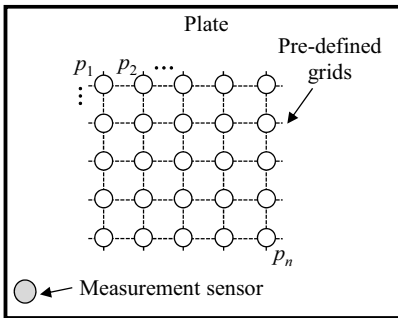


Fig. 1 Pre-defined grids on a plate

따라서 LTM 방법에서 가장 중요한 것은  $x_i(t)$ 와

$y(t)$  사이의 유사성을 나타내기 위하여 어떠한 척도를 이용하는 가이며, 사용되는 유사성 척도에 따라서 공간해상도(즉, 격자간격의 조밀성)가 결정될 수 있다. 그 동안 가장 많이 사용된 유사성 척도는 상관계수 (correlation coefficient)이며, 대형 평판의 경우 재질은 큰 영향이 없으며 약 4cm 이상의 격자간격에서 100%의 충격 위치 파악 성공률을 가진다.

상관계수는 시간영역에서 계산되지만, 이를 주파수영역으로 확장하면 FRAC (Frequency Response Assurance Criterion)을 사용할 수도 있다. FRAC은 두 주파수응답함수의 상관성을 나타내는 지표로서 구조해석 분야에서 많이 사용되어 왔으나 LTM 방법에 적용된 사례는 아직까지 없다. 이 절에서는 이 두 가지 방법과 그룹지연을 이용한 유사성 척도에 대하여 간략하게 기술하고자 한다.

### 2.1 유사성 척도로서의 상관계수

위치 템플릿에 저장된 신호  $x_i(t)$ 와 새로운 충격에 의하여 발생한 신호  $y(t)$  사이의 상관계수는 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\rho_{x_i, y} = \frac{\text{Cov}(x_i, y)}{\sigma_{x_i} \sigma_y} \quad (1)$$

여기서,  $\text{Cov}(x_i, y)$ 는 공분산(covariance)이고  $\sigma_{x_i}$ 와  $\sigma_y$ 는 각 신호의 표준편차이다. 상관계수  $\rho_{x_i, y}$ 는 -1과 1 사이의 값을 가지며 두 신호 사이의 선형적인 연관성을 나타낸다<sup>(12)</sup>. 상관계수의 절대값이 1에 가까울수록 두 신호 사이의 선형적인 관계가 크고, 0에 가까울수록 상관성이 떨어진다고 볼 수 있다.

따라서, LTM 방법에서는 충격 응답 신호  $y(t)$ 를 위치 템플릿에 저장된 모든 신호들과 비교하여 상관계수의 절대값이 가장 큰 경우를 찾아내어 위치를 파악하게 된다.

### 2.2 유사성 척도로서의 FRAC

FRAC (Frequency Response Assurance Criterion)은 구조해석 및 모드해석 분야에서 해석 FRF (Frequency Response Function)와 실험 FRF 사이의 상관성 (correlation)을 나타내는 척도로서 사용되어 왔으며, 주파수 데이터 사이의 유사성을 나타내는 지표로서의 의미를 갖기 때문에 LTM 방법에 직접 응용될 수 있다. 즉, 위치 템플릿에 저장된 신호  $x_i(t)$ 와 새로운 충격에 의하여 발생한 신호  $y(t)$ 를 각각  $X_i(f)$ 와  $Y(f)$ 의 주파수 영역 신호들로 푸리에 변환하고 두 신호 사이의 FRAC값을 유사성 척도로 사용한다.

이 때 FRAC은 다음과 같이 정의된다<sup>(13-14)</sup>.

$$FRAC = \frac{\left| \sum_{f=f_1}^{f_2} X_i(f)Y^*(f) \right|^2}{\sum_{f=f_1}^{f_2} X_i(f)X_i^*(f) \sum_{f=f_1}^{f_2} Y(f)Y^*(f)} \quad (2)$$

여기서,  $f_1$ 과  $f_2$ 는 FRAC값이 계산되는 하한주파수와 상한주파수를 각각 나타낸다. 식(2)는 상관계수를 나타내는 식(1)과 매우 유사한 형태를 가지고 있는데, 이는 상관계수를 복소수 데이터로 확장한 개념으로 이해될 수 있다. FRAC값은 0과 1사이의 값을 가지며 1에 가까울수록 두 복소수 데이터의 상관도가 큼을 나타낸다.

따라서, LTM 방법에서는 위치 템플릿에 주파수 변환된 신호들을 저장하고, 이들 신호와 주파수 변환된 충격 응답 신호  $Y(f)$  사이의 FRAC값이 가장 큰 경우를 찾아내어 위치를 파악하게 된다. 이 때, 시간영역에서 상관계수를 이용할 때와는 달리 원하는 주파수 범위를 적절하게 조절할 수 있다는 장점이 있다.

### 2.3 유사성 척도로서의 그룹지연

이 절에서는 Shin<sup>(11)</sup> 등이 그룹지연(group delay)을 유사성 척도로서 이용한 방법에 대해서 간단히 요약한다. FRAC의 경우와 마찬가지로 주파수 영역에서 이루어지는 방법이지만, 위치 템플릿에 저장된 데이터  $X(f)$ 와 새롭게 측정된 데이터  $Y(f)$  사이에 가상의 인과관계가 있다고 가정하여 식(3)과 같이 표현되는 가상 FRF,  $H(f)$ 를 활용한다는 점에서 매우 독특한 방법이다.

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X_i(f)} = |H(f)|e^{j\arg H(f)} \quad (3)$$

가상 FRF의 크기  $|H(f)|$ 는 두 데이터 사이의 크기 유사성 정보를 나타내고, 위상  $\arg H(f)$ 는 두 데이터 사이의 모양 유사성 정보를 나타낸다고 볼 수 있다. 특히, LTM 방법에서는 모양 유사성 정보가 매우 유용하게 사용될 수 있는데, 이는 충격을 가할 때 마다 충격 응답의 크기는 달라질 수 있지만 충격응답의 모양은 충격위치가 같다면 크게 다르지 않기 때문이다. 즉, 두 데이터의 충격위치가 멀어질수록 주파수축상의 위상변동이 심하게 일어나며, 같은 충격 위치에서의 응답인 경우는 위상변동이 일어나지 않기 때문이다.

모양 유사성 정보를 정량화하기 위해서 식(4)와 같

이 그룹지연을 계산한 다음 식(5)와 같이 주파수축상에서의 그룹지연의 표준편차  $\sigma_{x,y}$  를 구한다. 이 때, 상관계수와 FRAC과는 다르게 표준편차  $\sigma_{x,y}$  는 두 데이터 사이의 모양이 같은 경우 0의 값을 가지고 모양이 달라질수록 그 값은 점점 커지게 된다.

$$\tau_{x,y}(f) = -\frac{1}{2\pi} \frac{d \arg H(f)}{df} \quad (4)$$

$$\sigma_{x,y} = \sqrt{E[(\tau_{x,y}(f))^2]} \quad (5)$$

따라서, LTM 방법에서는 위치 템플릿에 저장된 신호들과 새롭게 측정된 충격 응답 신호 사이의 그룹지연의 표준편차들을 비교하여 가장 작은 경우를 찾아내어 위치를 파악하게 된다.

### 3. 변별도 및 실험데이터 비교 분석

이 절에서는 앞에서 제시된 세 가지 유사성 척도들의 성능을 실험데이터 분석을 통하여 정량적으로 비교하여 LTM 방법에 가장 적합한 척도를 제시하고자 한다.

실험 장치와 데이터는 Shin<sup>(11)</sup> 등이 사용한 것과 동일하지만, 이 연구에서는 세 가지 유사성 척도들에 대한 보다 더 객관적인 비교를 위하여 동일한 주파수 대역에서 계산 되도록 적절한 후 처리가 이루어 졌다. Fig. 2는 실험 장치를 나타낸 것으로, 1200mm × 1200mm × 10mm의 알루미늄 평판 위에 1cm 간격의 3×3 격자를 구성하여 총 9개의 교차점에 충격을 가하고 피에조 센서(Fuji c-6H)를 통하여 진동 응답을 측정하였다.

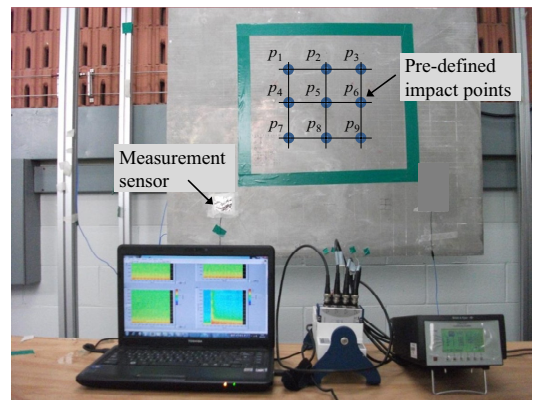


Fig. 2 Experimental setup

먼저 각 교차점  $p_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 9$ )에 대응하는 충격 응답 신호  $x_i(t)$ 를 위치 템플릿 DB에 저장한 다음, 동일한 교차점에 새로운 충격을 가하여 측정된 신호  $y_i(t)$ 를 세 가지 유사성 척도들에 따라서 위치 템플릿에 저장된 모든 신호들과 비교하였다. 여기서, 첨자  $i$ 는 교차점을 의미하기 때문에 물리적으로  $y_i(t)$ 는  $x_1(t), x_2(t), \dots, x_9(t)$  중에서  $x_i(t)$ 와 가장 유사함을 미리 알 수 있으며, 이는 다른 경우도 마찬가지이다. 즉,  $y_2(t), y_3(t), \dots, y_9(t)$ 는 각각  $x_2(t), x_3(t), \dots, x_9(t)$ 와 가장 유사하게 나타나야 할 것이다.

측정에 사용된 샘플링 주파수는 20kHz이고 측정된 신호의 전분부 1초의 데이터를 사용하였으며, 예로서 Fig. 3(a)에 신호  $x_1(t)$ 를 나타내었다. 이 신호의 주파수 스펙트럼을 Fig. 3(b)에 나타내었으며 2kHz 이상의 성분은 거의 나타나지 않음을 알 수 있다. 따라서, 세 가지 유사성 척도의 비교가 동일한 주파수 대역에서 이루어지도록 2kHz의 차단 주파수(cut-off frequency)를 갖는 저역통과 필터(low-pass filter)를 거친 신호들을 이용하였다.

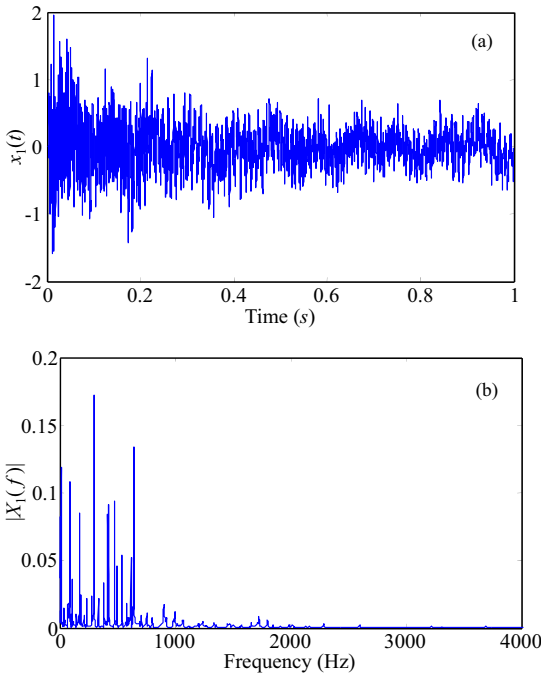


Fig. 3 Sample data: (a) time signal, (b) corresponding magnitude spectrum

총 9개의 충격위치에 대응되는 각각의 측정된 신호  $y_i(t)$ 는 위치 템플릿에 저장된 모든 신호들  $x_i(t)$ ,

$x_2(t), \dots, x_9(t)$ 과 비교하였으며 식(1), 식(2) 그리고 식 (5)로 표현되는 세 가지 척도들의 값들을 각각 Table1, Table2 그리고 Table3에 나타내었다.

Table1 Correlation coefficients

Signal	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_6$	$y_7$	$y_8$	$y_9$
$x_1$	0.9535	0.9639	0.9419	0.9584	0.9777	0.9342	0.9306	0.9396	0.8879
$x_2$	0.9658	0.9848	0.9654	0.9586	0.9885	0.9643	0.9453	0.9594	0.9308
$x_3$	0.9607	0.9729	0.9848	0.9646	0.9668	0.9645	0.9494	0.9549	0.9289
$x_4$	0.9542	0.9579	0.9474	0.9610	0.9647	0.9518	0.9546	0.9690	0.9283
$x_5$	0.9624	0.9703	0.9783	0.9739	0.9702	0.9705	0.9623	0.9761	0.9454
$x_6$	0.9555	0.9790	0.9738	0.9595	0.9843	0.9814	0.9506	0.9701	0.9583
$x_7$	0.9728	0.9516	0.9601	0.9706	0.9472	0.9459	0.9851	0.9652	0.9411
$x_8$	0.9522	0.9742	0.9604	0.9616	0.9774	0.9769	0.9608	0.9788	0.9639
$x_9$	0.9470	0.9684	0.9659	0.9573	0.9644	0.9860	0.9602	0.9839	0.9790

Table2 FRAC values

Signal	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_6$	$y_7$	$y_8$	$y_9$
$x_1$	0.9178	0.9263	0.8852	0.9162	0.9548	0.8564	0.8471	0.8689	0.7459
$x_2$	0.9460	0.9594	0.9241	0.9087	0.9715	0.9062	0.8685	0.9004	0.8129
$x_3$	0.9314	0.9402	0.9625	0.9199	0.9415	0.9137	0.8784	0.8981	0.8154
$x_4$	0.9141	0.9177	0.8977	0.9255	0.9379	0.9069	0.9040	0.9400	0.8414
$x_5$	0.9256	0.9417	0.9571	0.9500	0.9520	0.9444	0.9205	0.9543	0.8754
$x_6$	0.9194	0.9588	0.9483	0.9223	0.9752	0.9554	0.8938	0.9378	0.8849
$x_7$	0.9387	0.9094	0.9226	0.9421	0.9112	0.8954	0.9671	0.9350	0.8683
$x_8$	0.9072	0.9498	0.9223	0.9257	0.9624	0.9498	0.9153	0.9571	0.9008
$x_9$	0.8826	0.9336	0.9305	0.9193	0.9310	0.9741	0.9221	0.9706	0.9516

Table3 Standard deviations of group delays

Signal	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_6$	$y_7$	$y_8$	$y_9$
$x_1$	0.0185	0.0331	0.0438	0.0309	0.0359	0.0437	0.0391	0.0419	0.0470
$x_2$	0.0308	0.0153	0.0394	0.0342	0.0349	0.0407	0.0379	0.0440	0.0493
$x_3$	0.0409	0.0389	0.0259	0.0398	0.0356	0.0451	0.0379	0.0440	0.0526
$x_4$	0.0338	0.0368	0.0442	0.0291	0.0377	0.0457	0.0372	0.0418	0.0492
$x_5$	0.0397	0.0398	0.0370	0.0393	0.0204	0.0428	0.0308	0.0406	0.0477
$x_6$	0.0469	0.0471	0.0489	0.0488	0.0444	0.0225	0.0480	0.0400	0.0409
$x_7$	0.0349	0.0350	0.0361	0.0353	0.0281	0.0419	0.0173	0.0375	0.0448
$x_8$	0.0393	0.0428	0.0452	0.0408	0.0411	0.0351	0.0370	0.0221	0.0384
$x_9$	0.0448	0.0487	0.0517	0.0471	0.0485	0.0403	0.0463	0.0416	0.0186

Table1과 Table2은 각각 상관계수와 FRAC값들을 나타낸 것으로서, 가장 큰 값들을 볼드체로 나타내었으며 충격위치를 정확하게 파악한 경우를 밑줄로 나타내었다. 이 표들에서, 두 가지 척도들 모두 총 9개 중에서 4개의 경우만 충격위치가 제대로 검출된

것을 알 수 있다. 또한 상대적인 비교를 위하여 두 번째로 큰 값들을 이탤릭체로 표현하였는데 가장 큰 값들과의 차이가 매우 작아서 변별력이 떨어질 수 있음을 알 수 있다.

특히 상관계수와 FRAC에 의한 결과가 매우 유사함을 알 수 있는데, 이는 두 척도 모두 동일한 물리적 의미를 가지고 있다는 것을 나타내며 상관계수는 시간 영역에서 나타내는 반면에 FRAC은 주파수 영역에서 나타내는 차이만 있음을 간접적으로 알 수 있다. 즉, 동일한 주파수 대역에서 비교하는 경우 두 가지 척도는 유사한 결과를 나타낼 수 있다.

**Table3**은 그룹지연의 표준편차를 나타낸 것으로서, 가장 작은 값들을 볼드체로 나타내었고 그 중에서 충격위치를 정확하게 파악한 경우를 밑줄로 나타내었으며 두 번째로 작은 값들을 이탤릭체로 나타내었다. 이 표에서는, 총 9개 모든 경우 충격위치를 정확하게 검출하였고, 가장 작은 값과 두 번째로 작은 값과의 차이가 매우 커서 변별력 또한 매우 우수함을 알 수 있다.

그룹지연을 이용한 척도가 상관계수 또는 FRAC 보다 우수한 이유는 식(3)에서 크기와 위상을 분리한 다음 신호의 모양에만 관련이 있는 위상 성분을 기초로 하고 있기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 충격을 가할 때 마다 충격의 크기가 달라질 수 있는 LTM 방법의 경우 신호의 크기 성분을 고려하지 않는 그룹지연 방법이 매우 적합함을 알 수 있다.

LTM 방법에 사용되는 세 가지 유사성 척도들의 변별력을 보다 객관적으로 비교하기 위하여 변별도(discriminability,  $D$ )를 아래와 같이 정의하였다. 상관계수 또는 FRAC의 경우는 식(6), 그리고 그룹지연을 이용한 방법은 식(7)과 같이 나타내었으며, 이 식들에 사용되는 값은 **Table1 ~ Table3**의 각각의 열을 기준으로 하여 계산된다.

$$D = \frac{\text{Largest value} - \text{2nd largest value}}{\text{Largest value}} \times 100 (\%) \quad (6)$$

$$D = \frac{|\text{Smallest value} - \text{2nd smallest value}|}{\text{Smallest value}} \times 100 (\%) \quad (7)$$

식(6)은 가장 큰 값과 두 번째로 큰 값의 상대적인 차이, 그리고 식(7)은 가장 작은 값과 두 번째로 작은 값의 상대적인 차이를 나타낸 것으로서, 변별도( $D$ )가 클수록 각각의 척도에 의하여 파악된 충격위치의 오류가 적으며, 반대로 변별도( $D$ )가 작을수록 충격위치 검출에 있어서 오류가 발생할 가능성이

커짐을 의미한다. 총 9개의 경우( $y_2(t), y_3(t), \dots, y_9(t)$ )에 대하여 세 가지 유사성 척도들의 변별도를 **Table4**에 요약하였는데, 여기서  $CC$ 는 상관계수,  $GD$ 는 그룹지연을 의미한다. 이 표에서, 상관계수 또는 FRAC의 경우는 변별도가 매우 떨어져 충격위치를 정확하게 검출한 경우( $y_2, y_3, y_7, y_9$ )에도 측정오차 또는 잡음 등에 의하여 잘못된 파악을 할 가능성이 매우 큼을 알 수 있다. 그러나 그룹지연을 이용한 척도는 변별도가 매우 커서 검출된 충격위치의 신뢰도가 매우 높음을 알 수 있다.

**Table4** Discriminability,  $D$  (%)

Method	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_6$	$y_7$	$y_8$	$y_9$
$CC$	0.72	0.59	0.66	0.34	0.42	0.47	2.32	0.51	1.54
$FRAC$	0.78	0.06	0.57	0.83	0.38	1.92	4.81	1.39	5.34
$GD$	67.09	116.34	39.11	6.41	37.59	56.15	78.46	70.01	106.58

#### 4. 결 론

이 논문에서는 LTM 방법에 사용될 수 있는 세 가지 유사성 척도들에 대해서 실험 데이터를 이용하여 그 성능을 비교 분석하였으며, 변별도( $D$ )를 새롭게 정의하여 서로 다른 유사성 척도들의 정량적인 상대비교를 하였다. 특히 시간영역에서 이루어지는 상관계수와 주파수영역에서 이루어지는 FRAC은 계산되는 영역만 다를 뿐 전체적으로는 유사한 결과를 나타내고 있음을 보였으며, 그룹지연을 이용한 유사성 척도는 이들 두 가지 척도와는 근본적으로 다른 시각에서 이해되어야 함을 알 수 있었다. 즉, 그룹지연의 경우 주파수 영역에서 계산이 이루어지는 것은 FRAC과 유사하지만 이 때문에 상대적으로 우수한 변별력을 가지는 것이 아니고, 보다 더 근본적인 이유로서 두 데이터 사이의 모양만 비교하고 크기를 고려하지 않기 때문임을 간접적으로 증명하였다.

실험데이터의 비교분석 결과, LTM 방법과 같이 두 데이터 사이의 각 주파수 성분의 크기 보다는 모양 구분이 중요한 경우에는 그룹지연을 이용하는 유사성 척도가 가장 좋은 방법이 될 수 있음을 변별도 분석을 통하여 보였다.

#### 후 기

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것

## 참 고 문 헌

- (1) Gaul, L. and Hurlbaeus, S., 1998, Identification of the impact location on a plate using wavelets, *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol. 12, pp.783~795.
- (2) 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, pp.204104.
- (3) Moon, Y. S., Lee, S. K. and Yang, H. G., 2011, Source Localization of Single Impact Based on Higher Order Time Frequency, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*. Vol. 21, No. 2, pp.129~136.
- (4) Moon, Y. S., Park, H. S., Lee, S. K., Shin K. and Lee, Y. S., 2011, Source Location of Multiple Impacts on the Plate Based on Pre-signal Processing, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*. Vol. 21, No. 3, pp.220~226.
- (5) Paradiso, J. A., Hsiao, K., Strickon, J., Lifton, J. and Adler, A., 2000, Sensor systems for interactive surfaces, *IBM Systems Journal*. Vol. 39, pp.892~914.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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, pp.487~497.
- (10) 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.
- (11) 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, pp.2111~2117.
- (12) Shin, K. and Hammond, J. K., 2008, *Fundamentals of signal processing for sound and vibration engineers*, Wiley, Chichester.
- (13) Zang, C., Grafe, H. and Imregun, M., 2001, Frequency-Domain Criteria for Correlating and Updating Dynamic Finite element Models, *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol. 15, No. 1, pp.139~155.
- (14) Allemang, R. J., 2003, The Modal Assurance Criterion - Twenty Years of Use and Abuse, *Sound and Vibration*. August 2003, pp.14~21.