

# 대량생산용 음향방출제품의 돌출음 평가장비 개발

## Development of the evaluation equipment for the prominent discrete tone radiated by acoustic emission products in mass production

이 용 관† · 김 선\*

Lee Yong Kwan, Kim Sun

**Key Words** : Prominent Discrete Tone, HDD, ECMA 74, Coherent Power Spectrum, Anechoic chamber**ABSTRACT**

In-process evaluation equipment for the prominent discrete tone (PDT) emitted by small motors or actuators such as HDD(Hard Disk Driver), ODD(Optical Disk Driver) or linear motors has been developed and estimated on the basis of Prominence Ratio (PR) method in ECMA 74. Correlation of the evaluation equipment was performed in comparison with the method by ECMA 74 in anechoic chamber. Coherent function between two systems was applied in order to compensate traceability of ECMA 74 in anechoic chamber. Usability of the developed system with estimated Gage R&R shall be approved with real samples in the mass production line.

**기 호 설 명** $f_i$  : 관심 주파수 $X_n$  : 마스킹 소음의 평균자승 값 $\gamma_{jb}(f)$  = 두 공간의 출력 코히어런스 $G_{bb\_A}(f)$  = 대체공간에서 측정된 A의 출력 스펙트럼 $H_{ij}$  = 무향실내의 점음원  $i$ 로부터 측정점  $j$ 까지의 전달함수 $H_{ab}$  = 대체 공간내의 점음원  $a$  으로부터 측정점  $b$ 까지의 전달함수 $G_{jb}(f)$  = 대체공간과 무향실의 교차 스펙트럼 $G_w(f)$  = 무향실의 출력신호와 선형적으로 가장 일치하는 대체공간의 출력신호 자기 스펙트럼 $L_p$  = 음압레벨 $L_w$  = 음향과워레벨 $Q$  = 방향계수 $r$  = 음원에서 수음자까지의 거리 $R$  = 공간 상수( $m^2$ ),  $R = \frac{\bar{\alpha}s}{1-\bar{\alpha}}$ , 여기서  $s$  는 공간의 표면적**1. 서 론**

일반적으로 소형 IT제품에 사용되는 저장장치용 모터의 소음은 그리 크지는 않으나, 집중을 요하는 작업을 하고 있는 사용자에게는 방해의 요소가 되고, 장시간 노출 시 피로를 배가시키는 결과를 가져오게 한다. 이로 인해 생산자는 제품에 대한 소음규제를 공정에서부터 관리하고 있지만, 대량으로 생산되는 전체제품에 대해서 전수검사를 실시하는 것은 생산라인 및 제조공장의 소음으로 인하여 쉽지 않을 뿐만 아니라, 기술자들의 시간 및 테스트 비용이 많이 요구되는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점으로 인해 제품의 제조합격여부에 대한 평가로 인해 손실비용이 크고, 고객 클레임의 원인이 되기도 한다. 본 논문에서는 이러한 소형IT제품의 소음에

† 교신저자; 정회원, 삼성전기(주) 생산기술연구소

E-mail : ivan.lee@samsung.com

Tel : 031-300-4646, Fax : 031-300-7900 (0710#)

\* 삼성전기(주) 생산기술연구소

대한 라인 내 평가에 대해서 논의하고, 특히, 무향실에서만 진행되던 돌출음 평가를 라인 내에서 평가할 수 있는 장비를 개발함으로써 평가를 간소화할 수 있음을 보여주기로 한다.

## 2. 돌출음 평가방법 및 제품응용

### 2.1 평가방법

돌출음(Prominent Discrete Tone)은 IT제품뿐만 아니라, 운전중인 모든 제품에서 발생하는 순음을 총칭해서 지칭하는 것인데, 이러한 순음은 인간의 감각기관중의 하나인 귀에 거슬리는 음으로 알려져 있다. 이러한 불편함을 최소화하기 위하여 ISO에서는 상세 알고리즘 및 측정방법을 여러 차례의 개정을 통하여 ECMA-74<sup>(1)</sup>에 규정함으로써 고객을 제품사용으로부터 불편하지 않도록 보호하고 있다. PDT 측정과 관련된 문제는 제품의 사양만족을 떠나 제품의 품질과 직접적인 연관이 있으며, 공정 내 검출이 되지 않을 경우 고객신뢰 하락, 제품공급중단 및 재평가 인증을 위한 많은 시간이 소요되며, 이로 인해 제품경쟁력의 저하를 가져오는 중요한 원인 중에 하나라고 볼 수 있다.

돌출음을 평가하는 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 협대역 소음 피크치를 측정하여 주위 음과의 차이를 이용하는 TNR(Tone-to-Noise Ratio)법과 소음 피크치를 기준으로 임계밴드(Critical Band)를 설정하여 하위와 상위 임계밴드와의 차이로 평가하는 PR(Prominence Ratio)법이 그것이다. 두 평가방법에 대한 기준<sup>(1~2)</sup>은 다음과 같다.

1) TNR(Tone-to-Noise Ratio)법:

$$\Delta L_T = 10 \lg(X_i / X_n) \quad \text{에서,} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\Delta L_T \geq 8 \text{ dB} \quad \text{for } f_i \geq 1 \text{ KHz}$$

$$\Delta L_T \geq 8.0 + 8.33 \times \lg(1000 / f_i) \text{ dB} \quad \text{for } f_i < 1 \text{ KHz}$$

2) PR(Prominence Ratio)법

$$\Delta L_T = 10 \lg \left( \frac{X_M}{(X_L + X_U) \times 0.5} \right) \quad \text{for } f_i > 171.4 \text{ Hz}$$

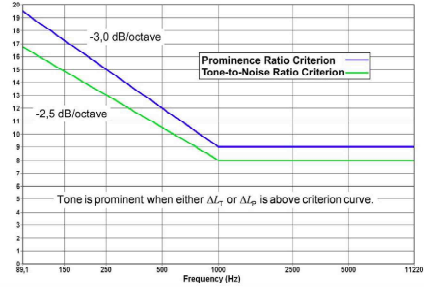
$$\Delta L_T = 10 \lg \left( \frac{X_M}{\{[X_L \times (100 / \Delta f_L)] + X_U\} \times 0.5} \right) \quad \text{for } f_i \leq 171.4 \text{ Hz}$$

에서, (Eq. 2)

$$\Delta L_T \geq 9 \text{ dB} \quad \text{for } f_i \geq 1 \text{ KHz}$$

$$\Delta L_T \geq 9.0 + 10 \times \lg(1000 / f_i) \text{ dB} \quad \text{for } f_i < 1 \text{ KHz}$$

위의 두 가지 방법을 통한 주파수에 따른 돌출음 그래프는 Fig. 2.1과 같다.

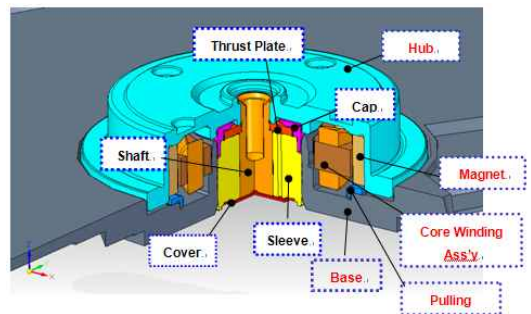


<Fig. 2.1> TNR (Eq.1) 과 PR (Eq.2) 의 주파수에 따른 돌출음 평가기준

본 논문에서는 위의 방법 중 PR법을 이용한 음향검출알고리즘을 적용하였고, 측정대상품은 HDD 용 구동모터를 선정하였으며, ECMA74의 적용방법과 개발된 장비와의 상관성 분석을 통하여 그 유용성을 확인하기로 한다.

### 2.2 제품 응용

HDD모터는 ODD모터와 달리 노트북이나 데스크탑 컴퓨터에 장착되어 대용량 데이터를 주고받는 장치로써, 미디어가 공장에서 생산된 제품에 장착된 상태에서 고정되어 사용된다는 특징이 있다. 또한, 선 속도가 일정한 ODD와는 달리 HDD는 회전 각속도가 데이터의 읽고 쓰는 것에 상관없이 일정하다. 하드디스크의 외경이 광디스크의 외경의 절반 정도에 해당하여 광디스크에서 발생하는 문제점들(고속에서 디스크 진동, flutter 등)이 ODD에 비해서 상대적으로 크지 않다. <Fig. 2.2>는 HDD 모터의 일반적인 구조를 보여주고 있다.

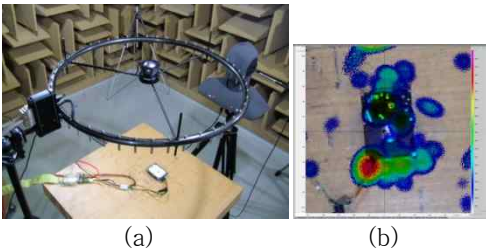


<Fig. 2.2> HDD의 일반적인 모터 구조

### 3. HDD 모터의 PR 음향 특징

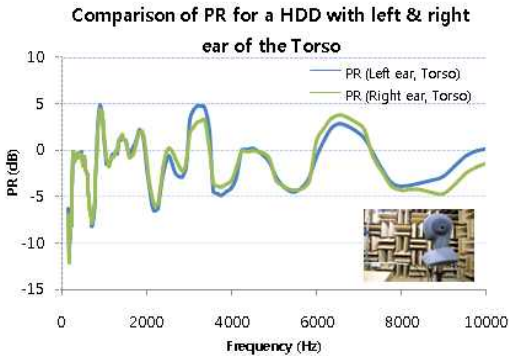
#### 3.1 Torso평가 시 PR음향

HDD는 모터를 기준으로 좌우가 비대칭구조로 되어있어서 Torso에서 측정된 음압레벨의 좌우 값에 차이가 있는데, HDD 제조사는 ECMA 74의 기준에 따라, Torso에서 측정된 PR값 중 큰 것을 기준으로 불량품과 양품을 판정한다. <Fig. 3.1>은 HDD에서 발생하는 음이 Torso의 어느 쪽으로 크게 전파되는 지를 확인하기 위하여 음향카메라 (Acoustic Camera)를 이용한 음향강도 실험을 보여주고 있는데, 음향카메라를 제외하면 ECMA 74의 PR측정실험과 동일하다.



<Fig. 3.1> HDD 음압분포 측정실험 장치 및 음압분포 측정결과 (a)실험장치, (b) 측정결과

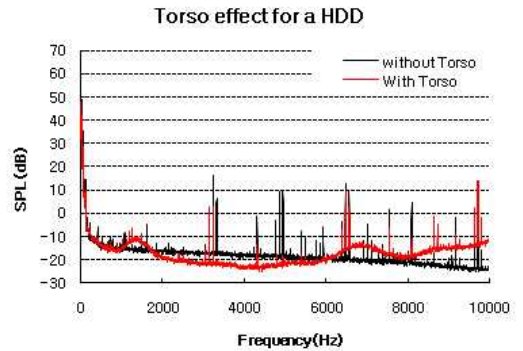
실험을 통하여 확인된 결과, 예측했던 것과 같이 모터가 장착되어있는 쪽에서 음압이 상대적으로 높게 나타났고, 이는 Torso의 왼쪽귀가 더 음압이 높을 것으로 예상할 수 있으며, 실제 PR 값을 측정해보면, <Fig. 3.2>와 같이 왼쪽 귀 쪽에서 PR값이 높게 나타난다.



<Fig. 3.2> Torso 양쪽귀의 PR값 차이

### 3.2 Torso의 유무에 따른 스펙트럼 차이

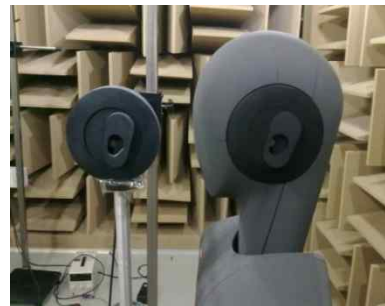
공정 내에서 사용할 수 있는 장비의 설계 시 Torso를 고려해야 하는 문제를 확인하기 위하여 Torso의 유무에 따른 PR값과 주파수 특성을 비교하였다. <Fig.3.3>은 Torso의 유무에 따른 주파수특성을 보인 것이다. Torso가 없는 상태에서는 Torso의 Filter 특성과, 얼굴 및 귀의 효과가 없는 상태이므로 HDD에서 발생된 음의 순수 음향레벨이다. 다만 마이크로폰은 Torso내의 왼쪽 귀에 설치된 것과 같은 방향으로 일치 시켰다.



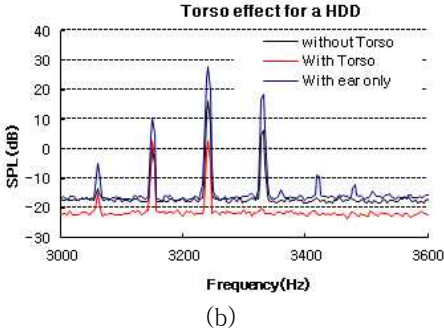
<Fig. 3.3> Torso의 유무에 따른 스펙트럼 차이

<Fig.3.3>과 같은 주파수 특성의 차이는 2장에서 수치적으로 계산한 PR값에 직접적으로 영향을 미칠 수 있기 때문에 PR값의 크기도 이에 비례하여 달라질 수 있음을 예상할 수 있다.

특히 PR값에 가장 큰 영향을 미치는 3KHz대역에서의 차이는 제품 사양기준에 절대적인 영향을 미치므로 관심을 가질 필요가 있다. Torso의 특성이 중요한 영향을 미친다고 해서 Torso 전체를 구매하는 것이 비용적인 측면에서 무리가 있을 수 있음으로 마이크로폰에 더 영향을 미칠 것으로 예상되는 왼쪽 귀를 <Fig. 3.4>와 같이 제작하여 귀의 유무에 따른 주파수 특성을 비교하였다.



(a)



<Fig. 3.4> Torso 및 귀의 유무에 따른 음압레벨 차이 (a)측정사진, (b) 측정결과 (3KHz ~ 3.6KHz)

### 3. 공정내 PR 검출 장치 개발

2장의 무향실 및 Torso의 음향특성을 보면, Torso의 유무와 Torso가 내장한 필터의 영향에 따라서 측정대상물의 주파수 응답특성이 큰 차이를 보이고 있는데, 이는 결국 PR값이 측정조건에 따라서 전혀 다르게 나올 수 있는 상황이고, 이는 결국 Torso를 구비한 형태가 아니면 PR값을 정확하게 예측하기 쉽지 않음을 알 수 있다. 하지만, 현실적으로는 고가일 뿐 아니라, Torso를 장착한 무향실을 구비하는 것이 쉽지 않고, 전 제품을 무향실에서 양산검증을 하는 것도 현실적으로 불가능하다. 따라서, 다른 대체음향측정장치를 사용하는 것이 가능한 지를 검토하기로 한다.

#### 3.1 Coherent Output Spectrum

무향실 내의  $i$  위치에서 source가 위치하고  $j$  위치에서 음압을 측정할 경우, 자기스펙트럼 (Autosepectrum)을 각각  $G_{ii}$ ,  $G_{jj}$ , 교반스펙트럼 (Cross spectrum)을  $G_{ij}$ 라고 하고, 대체공간내의  $a$  위치에 음원이 존재하고,  $b$  위치에서 측정할 경우 자기스펙트럼을 각각  $G_{aa}$ ,  $G_{bb}$ , 교반스펙트럼을  $G_{ab}$ 라고 하면, 대체 공간에서 측정한 A제품에 대한 무향실의 Coherent output power spectrum  $G_{jj\_A}(f)$ 는 (식 3.1)과 같다.<sup>(3)</sup>

$$G_{jj\_A}(f) = \gamma_{jb}^2(f) \cdot G_{bb\_A}(f) = \frac{H_{ij}}{H_{ab}} \cdot G_{bb\_A}(f) = \frac{|G_{jb}(f)|^2}{G_{jj}(f) \cdot G_{bb}(f)} \cdot G_{bb\_A}(f)$$

$$= \frac{G_{ij}(f) \cdot G_{ia}(f)}{G_{jj}(f) \cdot G_{bb}(f)} \cdot G_{bb\_A}(f) = \frac{G_{ia}(f)}{G_{bb}(f)} \cdot G_{bb\_A}(f)$$

(식 3.1)

즉, 대체공간에서 측정한 출력신호를 이용하여

무향실에서의 신호를 예측할 수 있다는 것인데, 그 전제조건은 두 공간상의 Correlation이 높을 수록 신호의 예측 성이 높다는 것을 의미한다.

#### 3.2 양산용 샘플모델에 대한 Cavity 설계

일반적으로 소형IT제품의 경우, 고속회전 시 자석의 극 수와 슬롯 수에 의하여 발생하는 코깅주파수(Cogging frequency)음이 문제가 되는데 그 영역은 보통 수 KHz에 해당한다. HDD의 경우에는 회전수의 36x 성분에 해당하는 3.24KHz로 비교적 높은 음역대이기 때문에 무향실과 같은 큰 규모의 공간이 아니라도 관심영역대에 있는 음의 흡수가 가능할 수 있는 구조를 설계할 수 있겠다. 일반적으로 무향실의 크기는 소리의 속도를 과장으로 나누어 유효 Cut-off 주파수를 구할 수 있는데, 1 입방미터짜리 간이 무향상자를 제작하게 되면 340Hz 이상이 이론적으로 유용하다는 것인데, 내부 차음재를 충분히 고려한다고 하더라도 1KHz 이상은 충분히 음을 흡수 할 수 있는 구조를 설계할 수 있다는 것이다. 이를 토대로 <Fig. 3.5>와 같이 간이 무향상자를 제작하였고 Torso의 왼쪽 귀 형상도 함께 제작하였다..



<Fig. 3.5> Torso의 왼쪽귀 형상을 포함한 간이 무향상자형 PR측정장치

장비에 대한 제원은 <Table 3.1>과 같다.

<Table 3.1> 대체음향측정장치 주요 제원

| Type                  | Content   |
|-----------------------|---|
| Dimensions (L×W×H)    | Size (mm) : 1000 X 1000 X 1000<br>Interior cavity (mm) : 700 X 700 X 700    |
| Wall Structure        | Multilayer with absorbing material (Polyester thickness 50mm)               |
| Effective Freq. Range | 1 kHz to 20 kHz   |
| Background Noise      | 25 dB to 30 dB  |
| Accessories           | Lighting : LED lamp,<br>4 X Power plugs and sockets .<br>8 X BNC Connectors |
| Weight                | 870 kg  |

$L_w$ 의 음향파위레벨을 가진 제품을  $r$  만큼 떨어진 위치에서 음압레벨을 측정할 경우에 아래와 같이 표현할 수 있다.<sup>(4)</sup>

$$L_p = L_w + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) + 10 \text{ dB} \quad (\text{식 4.2})$$

HDD의 무향실내 측정음압을  $L_{p1}$ , 대체 음향 장치에서의 측정음압을  $L_{p2}$  라고 한다면, 음원이 같으므로 두 측정법에 대한 음압차이는,

$$L_{p1} - L_{p2} = 10 \log \left( \frac{Q_1}{4\pi r_1^2} + \frac{4}{R_1} \right) - 10 \log \left( \frac{Q_2}{4\pi r_2^2} + \frac{4}{R_2} \right) = 10 \log \left[ \frac{\frac{Q_1}{4\pi r_1^2}}{\frac{Q_2}{4\pi r_2^2} + \frac{4}{R_2}} \right]$$

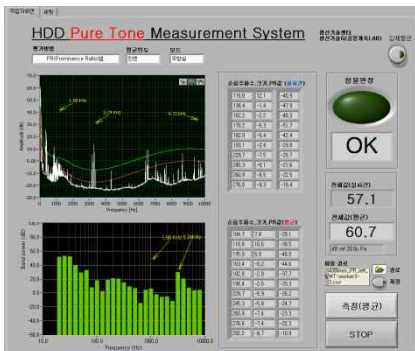
(식 4.3)

이고, 여기서  $R_1 = \text{inf}$ . (무향실조건) 이다.

(식 4.3)에서 두 측정법에 의한 음압레벨 차이는 음원과 측정점까지의 거리, 음의 방향성, 그리고 대체음향장치의 공간상수(Room constant)와 관련이 있다.

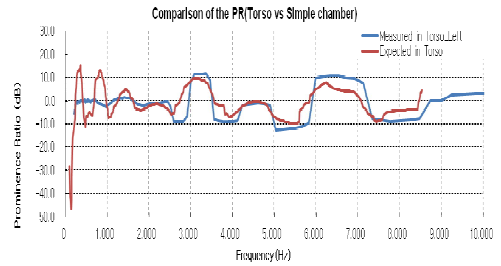
(식 4.3)의 음압레벨 관계식을 토대로 측정되는 음압레벨 값은 PR관계식인, (식1)과 (식2)를 결정하는 중요한 요소이고, 결국 음원으로부터의 거리, 음의 방향성, 그리고 내부 흡음력의 적절한 설계치가 대체공간과 무향실의 상관성을 결정짓는 요소라고 할 수 있겠다.

대체공간에서 음원으로부터 수음자까지의 거리와 방향성을 무향실과 일치 시키고, 두 공간내의 측정은 반사음과 Cavity 공간 크기에 따른 차이를 보상할 수 있도록 코히어런트 파워스펙트럼 (Coherent power spectrum) 관계식인 (식 3.1)을 적용하였으며, Toros의 음향 필터링을 모델링하여 알고리즘에 적용하여 응용프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램은 <Fig. 3.6>과 같다.



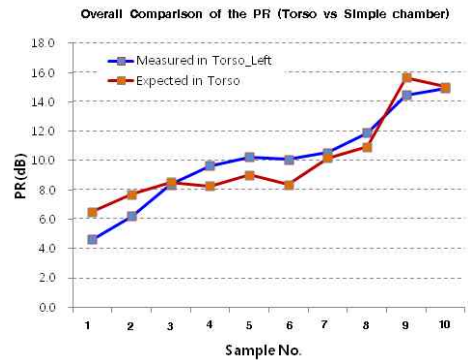
<Fig. 3.6> PR 측정프로그램 Main 화면

개발된 프로그램과 대체측정장치 및 귀 형태를 활용하여 예측한 PR그래프는 <Fig. 3.7>과 같다.



<Fig. 3.7> 대체음향측정장치에서 측정된 데이터를 기준으로 예측된 PR값과 실제 무향실 측정값

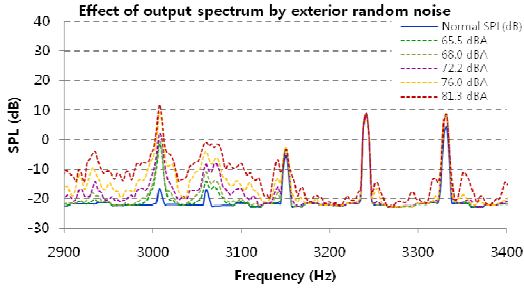
PR그래프에 있어서 다소 차이는 있지만 패턴이 실제 무향실과 상당부분 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 우리의 주요관심사인 모터회전의 36x 성분대역(3.24KHz) 에 대한 추가 10개의 샘플을 대체측정장치로 측정하여, <Fig. 3.8>과 같이 무향실에서 측정된 PR값과 비교하였다.



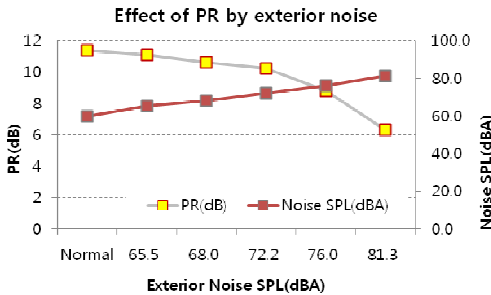
<Fig. 3.8> 여러 샘플에 대한 대체측정장치와 무향실에서 측정된 PR값 비교

무향실은 외부의 정숙한 환경을 유지한 상태에서 소음을 측정하므로 일반 공정내에서 소음을 측정하는 것보다 다소 유리하다. 개발된 대체측정장치가 일반 공정 내에서도 사용되기 위해서는 외부 소음에 따른 PR값의 변화가 어느 정도인지 파악할 필요가 있다. <Fig. 3.9>는 외부소음에 따른 HDD 측정음의 스펙트럼 변화를 표시한 것이고, <Fig. 3.10>은 이에 따른 관심영역의 최고값 PR의 변화를 표시한 것이다.





<Fig. 3.9> 외부소음에 따른 HDD 측정음의 스펙트럼 변화



<Fig. 3.10> 외부소음에 따른 PR값 변화

그림에서 알 수 있듯이 외부소음 70dB 근처에서 PR값이 많이 변하고 그 이하에서는 완만하게 작아지는 것을 알 수 있다. PR값이 작아진다는 것은 외부소음에 의해서 HDD의 순음을 듣기가 힘들어 진다는 얘기이다.

생산공정 내에서는 제품의 합/불 판정이 중요하므로 실제 이러한 PR값을 그대로 장비스펙으로 사용하기보다는 순음의 Peak치를 무향실이나 정숙한 환경에서 측정된 PR값에 해당하는 음압레벨 (Sound Pressure Level)을 기준으로 하는 것이 바람직하다. 왜냐하면 순음성 Peak치는 외부오염에 대해서도 최고 Peak치만 오염되지 않으면 판정할 수 있으므로, 실제 <Fig. 3.10>의 외부오염보다 훨씬 높은 값에서도 판정이 가능하기 때문이다. 실제 개발된 대체음향장비도 음압레벨을 기준으로 평가가 가능하도록 설계되었다.

계측장비로서의 활용성을 검증하기 위하여 Gage R&R을 실시하였다. 6개의 샘플을 3인이 3회반복하여 측정된 Gage R&R 값이 <Table 3.2>에 나와 있다. 무향실과 같은 수준은 아니지만, 정확도, 반복정밀도, 그리고 제품에 대한 양불판정에는 비용을 고려하여 채택해도 무방한 것으로 판명되었다.

<Table 3.2> 대체음향장치에 대한 Gage R&R

| 평가 항목             | 평가 기준 |        |      | 평가결과  | 판정    |
|-------------------|-------|--------|------|-------|-------|
|                   | 만족    | 비용/중요  | 사용불가 |       |       |
| ± Contribution    | <1%   | 1-10%  | >10% | 1.24  | 비용/중요 |
| ± Study Variation | <10%  | 10-30% | >30% | 11.15 | 비용/중요 |
| Category          | >10   | 4-9    | <4   | 12    | 만족    |

## 4. 결 론

소형모터를 구동하여 미디어의 데이터를 처리하는 대량생산용 IT제품의 돌출음에 대한 평가방법을 검토하였다. 그 대상으로 HDD모터의 공정 내 돌출음의 검출방법에 대해서 논의 하였다. 무향실에서 사용되는 Torso의 유무에 따른 스펙트럼 차이를 관찰하였고, 이를 토대로 Torso의 형태를 고려한 대체음향측정장치를 무향상자 형으로 설계하였고 출력 코히어런스를 활용하여 두 공간상의 차이를 보상하는 알고리즘을 개발하였다. 무향실에서 측정해야 하는 제품에 대한 평가를 대체 음향측정장치를 통하여 제품의 합/불 판정을 내릴 수 있음을 보였고, 관련프로그램을 개발하였다. 상관성 검증을 통하여 대체 음향측정장치의 유용성을 보였고, 외부소음에 대한 평가를 통하여 외부노출소음 정도에 따른 한계치를 설정할 수 있었다. Gage R&R를 통하여 측정장치로서의 활용성을 평가 하였다.

## 참 고 문 헌

- (1) ECMA-74 10<sup>th</sup> Edition/December 2008, Annex D; ECMA International, Rue du Rhone 114, CH-1204 Geneva, Switzerland
- (2) L. Schmidt and D. Sagemuehl, 2008, Comparison of various procedures for the assessment of prominent discrete tones using a large number of sound samples, Proceedings of Acoustics '08, Paris, pp. 3453~3456
- (3) Julius S. Bendat and Allan G. Piersol, 1980, Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis, John Wiley & Sons Inc., New York.
- (4) J.D. Irwin and E.R. Graf, 1979, Industrial Noise and Vibration Control, Prentice-Hall Inc., New Jersey