

## 2-for 1 연사기 소음원 규명에 관한 연구

임 병덕, 최 정현  
영남대학교 기계공학부

### Source Identification of the Spindle Noise of a 2-for-1 Twisting Machine

Byoung-Duk Lim, Joung-Hyun Choi  
School of Mechanical Engineering, Yeungnam University

#### 1. 머리말

연사기는 장섬유가 천연섬유와 유사한 섬유의 성질을 갖도록 하거나 면사, 모사 등의 단섬유사의 인장강도를 높여주기 위해서 실을 꼬아주는 기계를 가리키며 여러 가지의 연사기 가운데 생산성이 높은 2-for-1 연사기가 널리 사용되고 있다. 2-for-1 연사기는 고정된 급사 보빈과 이것을 관통하는 중공스핀들, 실이 통과하는 구멍(yarn guide)을 가진 디스크와 실을 감는 장치 등으로 구성되어 있다. 고정된 보빈에서 풀려 나온 실이 스핀들을 거쳐 회전하는 yarn guide를 통과하면서 실이 한 번 꼬이고 yarn guide를 빠져나온 실이 감기면서 다시 꼬이므로 1회전당 2회 꼬이게 되어 2-for-1 이라는 이름이 붙여졌다.[1] 2-for-1 연사기의 스핀들은 대개 10,000-15,000rpm으로 회전하며 고속으로 올라갈수록 생산성이 증대되기 때문에 고속화를 위한 노력이 계속되고 있으나 고속화를 가로막는 중요한 애로기술의 하나가 소음, 진동저감기술이다. 본 연구에서는 스핀들 32개 라리로 특별제작된 2-for-1 연사기에서 가장 중요한 소음으로 인식되고 있는 스핀들 소음의 소음원인을 규명하고자 하였다. 소음원인의 분석에는 다중입력/단일출력(MISO) 모형을 이용한 신호 해석법을 사용하였다.

#### 2. 부분 기여도 함수(PCF) 기법

MISO모형을 이용하는 소음/진동원 규명법은 측정된 입력들 사이의 상호상관 정도에 따라 주파수 응답함수(FRF)를 이용하는 방법과 부분 기여도 함수(PCF)를 이용하는 방법으로 크게 나눌 수 있다. 그러나 후자의 경우에 있어 상호상관이 존재하는 입력들 사이의 원인-효과관계, 즉 우선순위를 알고 있다는 가정하에서만 올바른 소음/진동원의 규명이 가능하게 된다.

입력들 사이에 서로 상관관계가 존재하는 경우, 그림 1의 MISO모형에서 입력들 사이의 우선순위를  $x_1(t), x_2(t), \dots, x_q(t)$  순으로 둔다고 가정하면 그림 1의 MISO 모형에 대해 상관관계가 존재하는 입력으로 구성된 모형은 그림 1과 같이 상관관계를 제거한 모형으로 재구성할 수 있다.[2] 출력신호  $Y(\omega)$ 를  $(q+1)$ 번째 신호인  $X_{(q+1)}(\omega)$ 라 하고, 잡음  $N(\omega)$ 를 출력신호에서  $q$ 개의 입력들의 선형성분을 제거한 신호 즉,  $N(\omega) = X_{(q+1)} \cdot e_i(\omega)$  라 하면 출력  $Y(\omega)$ 는 다음과 같이 된다.

$$X_{(q+1)}(\omega) = \sum_{i=1}^q L_{X_{(q+1)}}(\omega) \cdot X_{i, (i-1)}(\omega) + X_{(q+1)} \cdot e_i(\omega) \quad \dots (1)$$

$X_{i, (i-1)}(\omega)$ 는 입력  $X_i(\omega)$ 에서  $X_1(\omega)$ 로부터  $X_{(i-1)}(\omega)$ 까지의 선형성분을 제거한 신호를 의미하며  $L_{ij}(\omega)$  ( $i < j$ )는  $X_j(\omega)$ 의  $X_{i, (i-1)}(\omega)$ 에 대한 선형관계를 나타내는 상변수선형계이다.  $j > r$ 를 만족하는  $j$ 번째 신호  $X_j(\omega)$ 에 대해  $X_{j, r}(\omega)$ 는  $X_{j, (r-1)}(\omega)$ 와  $L_{jr}(\omega)$ 로부터 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$X_{j, r}(\omega) = X_{j, (r-1)}(\omega) - L_{jr}(\omega) \cdot X_{r, (r-1)}(\omega) \quad \dots (2)$$

한편 잔여신호  $X_{j, r}(\omega)$  ( $j > r$ )에 대한 스펙트럼 즉, 잔여 자기 스펙트럼은 다음과 같이 표현되며,

$$G_{j, r}(\omega) = G_{j, (r-1)}(\omega) - L_{jr}(\omega) \cdot G_{ir, (r-1)}(\omega) \quad \dots (3)$$

$$G_{j, (i-1)}(\omega) = L_{ij}(\omega) \cdot G_{ii, (i-1)}(\omega) \quad \dots (4)$$

여기에 다음의 성질이 사용되었다.

$$E[X_{i, (i-1)}^*(\omega) \cdot X_{j, (j-1)}(\omega)] = 0 \text{ for } i \neq j$$

$$E[X_{i, (i-1)}^*(\omega) \cdot N(\omega)] = 0 \text{ for all } i$$

이로부터  $L_{ij}(\omega)$ 는 앞에서 구한 잔여 스펙트럼들을 이용함으로써 계산이 가능하다. 입력들 사이의 최적 선형계  $L_{jr}(\omega)$ 는 식4에서  $i, j(j>r)$ 를 대입함으로써 다음과 같이 구할 수 있다.

$$L_{jr}(\omega) = \frac{G_{jr, (r-1)}(\omega)}{G_{rr, (r-1)}(\omega)} \quad \dots (5)$$

입력들 사이의 상호상관이 없는 경우, 선형계  $L_{ij}(\omega)$ 를 통과하는 입력  $X_{i, (i-1)}(\omega)$ 와 출력은 다음과 같은 관계를 만족하게 된다.

$$|L_{ij}(\omega)|^2 \cdot G_{ii, (i-1)}(\omega) = \gamma_{ij, (i-1)}^2(\omega) \cdot G_{jj, (i-1)}(\omega) \quad \dots (6)$$

여기서  $\gamma_{ij, (i-1)}^2(\omega)$ 는 입력  $X_{i, (i-1)}(\omega)$ 와 출력  $Y_{j, (i-1)}(\omega)$ 사이의 부분 기여도 함수로서  $L_{ij}(\omega)$ 대신 식4을 대입하면 다음과 같은 관계들 얻게 된다.

$$\gamma_{ij, (i-1)}^2(\omega) = \frac{|G_{j, (i-1)}(\omega)|^2}{G_{ii, (i-1)}(\omega) \cdot G_{jj, (i-1)}(\omega)} \quad \dots (7)$$

이들로부터  $i$  번째 잔여신호  $X_{i, (i-1)}(\omega)$ 가 출력에 차지하는 파워의 양을 나타내는 부분 기여 출력 스펙트럼은 다음과 같이 표현된다.

$$G_{y, i, (i-1)}(\omega) = \gamma_{ij, (i-1)}^2(\omega) \cdot G_{jj, (i-1)}(\omega) = |L_{ij}(\omega)|^2 \cdot G_{ii, (i-1)}(\omega) \quad \dots (8)$$

이 부분 기여 출력 스펙트럼을 관심 있는 주파수 영역에서

비교해 봄으로써 출력에 비중을 많이 차지하는 입력을 파악할 수가 있다.

### 3. 실험 장치 및 방법

연사기는 크게 원동부(모터, 기어, 벨트)와 권취부(스핀들, 베어링)로 나눌 수 있다. 실험에 사용된 연사기의 제원과 구조를 표1에 요약하였다.

표1. 실험용장치( 연사기 )의 제원 및 구조

1	측정스핀들 회전 수	1번 스핀들 10390 rpm	2~7번 스핀들 10380 rpm	8번 스핀들 10370 rpm
	2	모 터 1760 rpm , 3상 유도 전동기		
3	스핀들 베어링	상단16스핀들 : 저널베어링 하단16스핀들 : 니들베어링		
4	벨 트	전장 : 6.2m ; 총질량 : 470g 벨트 단위길이당 질량 : 0.0758 (kg/m)		
5	스핀들	간격	갯수	회 전 수
		23 cm	16추	10k~20k rpm
				구동 방식 평벨트 구동

연사기에서 발생하는 소음의 분포를 파악하고 주소음원으로 고려해야 할 부위를 선정하기 위해서 연사기를 정상가동 시킨 후 바닥에서 1m 높이의 여러 위치에서 1/3 octave 대역별로 연사기 소음을 측정하였다. 그림 2는 소음분포 측정의 한 결과를 보여주며 스핀들과 모터 그리고 기어박스 부근에서 음압레벨이 높음을 나타내고 있다. 따라서 이들을 주요한 소음원이라 볼 수 있으므로 주소음원으로 의심될 수 있는 측정 대상 부위에서 측정된 진동신호를 신호분석기로 분석하였다. 입력 신호로는 가진원인 모터와 약10000 - 15000rpm으로 회전하고 있는 스핀들진동을 취하였다. 모터 진동은 X축 방향과 Y축 방향에 대해 가속도계를 사용하여 측정하였고, 또한 풀리의 진동과 스핀들의 진동측정을 위하여 변위센서를 사용하였다. 스핀들진동은 벨트와 접촉하고 있으므로 측정 방향을 자유롭게 선정할 수가 없어서 각 스핀들의 벨트접촉면에 대하여 45도 각도로 설치하여 측정하였다.

스핀들의 경우 스핀들이 8개씩 양쪽으로 대칭적으로 배열되어 있으며 테이프 레코더의 채널이 8채널로 제한되어 4개씩 분류하여 절반씩 측정하였다. 측정된 신호는 테이프 레코더에 기록하여 FFF 및 A/D변환기를 거친 후 PC로 분석하였다. 소음의 주파수 분포가 주로 3kHz이하에 집중되어 있으므로 신호처리과정에서 샘플링주파수는 6.4kHz로 하였으며 1벌의 DATA 갯수는 10240, 앙상블평균은 20번을 취하였다. 정확한 측정을 위하여 정상상태에서 측정할 수 있도록 유의하였으며, 반복 측정하여 최적의 데이터를 선택하였다. 주소음원에 근접한 위치에서 소음을 측정하여 각각의 소음을 단위 출력으로 하는 MISO모형을 적용하였다.

### 4. 분석 결과 및 고찰

측정점의 각 위치에서 소음원의 구성을 파악하기 위하여 측정된 음압을 1/3옥타브 대역에서 A-정감보정된 소음레벨을 측정하였다. 그림3에 몇 측정에서 1/3옥타브로 측정한

소음레벨을 보였다. 대부분의 측정점에서 1250Hz 대역과 1600Hz 대역의 소음레벨이 가장 크게 나타났다.

또한, 각 위치에서 출력신호의 크기와 피크들이 전체 소음에서 차지하는 정도를 알기 위하여 위치별 소음도와 전체 소음파위에 대하여 피크가 차지하는 파위의 백분율을 아래 표2와 표3에 각각 나타내었다.

표2. Overall Sound Pressure Level (높이 1 m)

거리 위치	0 m	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m
3	77.0	74.0	72.5	73.0	71.3	71.0
5	80.0	76.5	74.3	73.7	73.6	73.0
7	90.0	78.2	75.6	73.9	73.0	72.5
12	83.7	75.3	74.2	73.5	72.8	72.0

표3. 전체소음파위에 대한 피크가 차지하는 비율

위 치	모터 앞	스핀들 앞	기어 앞
피크치의 비율	92	93.5	91.8

높이 1M 스핀들 1,2,3,4

위 치	모터 앞	스핀들 앞	기어 앞
피크치의 비율	94.3	91.8	86.3

높이 1M 스핀들 5,6,7,8

입력신호의 자기스펙트럼 (그림 4)을 살펴보면 모터의 Auto-spectrum이 전체소음 스펙트럼의 피크와 거의 일치함을 알 수 있다. 또한 풀리의 스펙트럼과 각 스핀들의 스펙트럼이 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.이 같은 결과로부터 스핀들의 진동과 풀리의 진동이 상호 강한 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

관심주파수에서의 다중기여도 함수가 그림6에 보이듯이 전체적으로 최소 0.5 이상으로 크게 나타나며, 특히 출력 성분의 피크가 존재하는 360 Hz와 960 Hz, 1080 Hz, 1208 Hz부근(그림 5)에서 크게 나타나므로 MISO모형을 적용함에 있어서 입력신호의 선택이 적절함을 알 수 있다.

실험결과로부터 입력들 간의 기여도함수가 상당히 크게 나타남을 알 수 있었다. 모터의 x축 진동과 y축 진동은 동일한 진동원으로 간주할 수 있다. 모터와 풀리의 기여도함수에서 보여지는 바와 같이 두 진동신호 사이에 상당한 인과관계가 있음을 알 수 있다. 모터와 각 스핀들과의 기여도함수나 풀리와 각 스핀들 사이의 기여도함수 역시 상당한 상관관계를 보이고 있으며 주지할 만한 사실은 스핀들 5, 6번으로 가면 다소 작아진다는 것인데 이는 장력의 영향인 것으로 판단된다. 또한, 표2의 소음도 측정치에서 연사기 바로 외측상(0m)에서의 소음도와 1m에서의 소음도의 차이가 12dB정도로서 연사기 외측으로부터 스핀들까지의 거리가 6~8cm 임을 고려하면 선음원의 거리 감쇠에 해당하는 차이를 보인다는 점에서 한 줄로 배열된 스핀들들이 하나의 선음원으로 작용하고 있음을 알 수 있다.

위의 결과를 토대로 모터, 풀리 및 스핀들의 진동을 입력으로 하였을 경우, MISO모형을 적용하여 그림8과 같이 각 입력에 대한 기여출력 스펙트럼을 구하였다. 각각의 기여출력 스펙트럼을 살펴보면 특히 소음레벨이 가장 높은 360 Hz, 1080 Hz의 소음은 다중기여도함수값이 0.8 정도로(그림 6) 선택한 입력들로 충분히 출력을 예측할 수 있다. 비

록 1600 Hz 부근의 기여도 함수가 0.4 정도로 다소 불충분 하지만 선택한 입력들 가운데 모터의 y축진동에 의해 가장 크게 나타남을 알 수 있다. 360 Hz의 저주파수와 1250 Hz 대역을 포함하는 960 Hz - 1600 Hz 주변의 소음 역시 모터가 주된 소음원임을 알 수 있다. 전체 소음레벨이 스피들 부 앞에서 가장 크게 나타나는 것은 모터의 진동이 각스핀들을 가진하여 소음을 발생하며 스피들 간의 기여도함수가 비교적 작은 것으로 보아 각 스피들이 독립적으로 출력소음에 기여하기 때문이라고 생각할 수 있다.

## 5. 입력들 사이의 우선 순위 결정

본 실험의 경우 특히, 상관관계가 크게 나타나는 170Hz 주변과 1.5kHz 주변의 신호에 대하여 모터와 스피들1의 신호 가운데 어느 신호가 진동의 주된 발생원인지를 판단하기 위하여 먼저, 모터신호를 입력으로 하는 전달함수  $H(w)$ 와 스피들신호를 입력으로 하는 전달함수  $H'(w)$ 를 구하였다. 스피들1을 선택한 것은 8개의 스피들 가운데 모터로부터 첫 번째 자리에 위치하고 있는 스피들1이 모터와의 상관관계가 가장 크게 나타나기 때문이다. 각 신호에서 관심 주파수 대역의 성분만을 남기고 나머지 성분은 제거한 뒤 전달함수를 구하였는데, 올바른 전달함수를 구하기 위해서는 사용한 필터가 신호들의 위상에 가능한 한 영향을 적게 주는 것이 필요하므로 FIR 필터 (Finite Impulse Response digital filter)를 사용하였다.

각각의 소음성분 대역별로 필터링 된 전달함수는 z변환된 전달함수로 바꾸어 z영역에서의 극점과 영점을 조사함으로써 인과관계를 계산하고자 하였다. 주파수영역에서의 전달함수는 곡선마춤 방법에 의해 z영역의 분수다항식으로 나타낼 수 있다. 주파수 응답함수  $H(w)$ 를 z영역의 유리함수로 표현하고자 할 때 곡선마춤의 차수는 일의적으로 결정되는 것이 아니므로 본 연구에서는 다항식의 차수(즉 극점과 영점의 갯수)를 여러 단계로 변화시키면서 근사화된 z 변환표현식이 단위원상에서 원래의 전달함수와 근접한 정도로써 적절한 차수를 선정하였다. 전달함수와 비교할 때 유의할 것은 흔히 진폭전달함수를 비교하기 쉬운데 이 경우 큰 값을 갖고 있는 피크부근은 잘 맞출 수 있지만 골(dip)부분은 오차가 발생할 수 있다. 또한 진폭전달함수와 위상전달함수를 모두 비교하여야 하는데 신호복원에 있어서 정확한 위상전달함수의 중요성은 Lim과 Oppenheim[4] 및 Lyon[5] 등 이미 언급한 바 있다.  $H(w)$ 의 z영역표현

$\bar{H}(z)$ 라 하면  $\bar{H}(e^{jw})$ 는  $\bar{H}(z)$ 의 주파수 영역표현이다. 따라서 제곱오차  $\int_0^{\omega} |H(w) - \bar{H}(e^{jw})|^2 dw$ 를 최소화하는 유리함수  $\bar{H}(z)$ 를 찾는 것이 일반적인 방법이다. 그러나 제곱오차를 최소화하는 경우에는 주파수 응답함수의 피크부분의 오차가 크게 기여하고 골(dip)부분의 오차는 기여도가 작으므로 극점의 위치는 비교적 정확히 추정되나 영점의 위치가 부정확해진다. 본 연구에서는 이러한 난점을 극복하기 위해 가중제곱오차합을 다음과 같이 정의하였다.

$$\int_0^{\omega} |\bar{H}(w) - H(e^{jw})|^2 W(w) dw$$

극점의 갯수  $n_a$ 는 가중제곱오차합을 최소화하는 차수로 결정하였다. 가중치함수  $W(w)$ 로는  $|\bar{H}(w)|^{-2}$ 를 사용하였는데 이는 영점과 극점에 동일한 가중치를 부여하는 것으로서 사실상 주파수 전달함수의 위상정보만 가지고 제곱오차합을 계산토록 한 것이다. 전달함수로부터 모든 극점이 단위 원 내에 있으면(즉 극점 p의 대수크기  $\log(\text{mag}(p))$ 가 음이

면) 이러한 계가 실제를 잘 반영하는 것으로 볼 수 있으며 이로부터 주원인과 종속적인 원인을 분별할 수 있다. 이 방법에서 유의할 것은 계산된 극점 가운데 실제 주파수에 해당되는 극점이 포함되어 있는지와 그에 해당되는 주파수성분의 크기, 즉 residue를 극점크기의 대수(log값)으로 나눈 값이 다른 성분에 비해 충분히 큰가를 확인해야 한다는 것이다.

위와 같은 정보에 근거를 두고, 관심 주파수 영역인 100Hz에서 400Hz사이 대역의 신호를 사용하여 모터신호를 입력으로, 스피들신호를 출력으로 가정하였을 때의 전달함수에서는 극점의 대수크기[ $\log(\text{mag}(p))$ ]가 모두 음의 값이었으며 실제 주파수의 피크가 존재하는 주파수에서 전달함수의 크기가 큰 값을 가졌다. 이로부터 이 전달함수는 물리적으로 구현가능하며 가정된 입,출력관계가 인과관계의 순서에 따라 설정된 것임을 알 수 있다.

한편, 스피들신호를 입력으로 모터신호를 출력으로 가정한 경우의 전달함수에서는 필터링되기전의 실제 주파수에서와 같이 피크가 존재하는 주파수에서 큰 전달함수의 크기를 나타내나 극점의 대수크기[ $\log(\text{mag}(p))$ ]가 양의 값을 가졌다. 위의 결과로 알 수 있는 것은 모터를 입력으로 가정한 경우의 전달함수는 causal한(실현 가능한) 시스템이지만, 스피들을 입력으로한 경우의 전달함수는 non-causal한 즉, 시간의 순방향에서는 실현 불가능한 시스템이라고 판단할 수 있다. 따라서 170Hz 영역에서의 모터와 스피들 사이의 높은 기여도 함수는 소음원인 모터의 신호가 스피들신호에 영향을 줌으로서 발생한 것으로 판단할 수 있다.

앞에서와 같은 방법으로 1kHz - 1.8kHz에서도 모터신호가 스피들신호에 영향을 주고 있는 것으로 판단할 수가 있다.

그림8은 모터의 X방향 진동을 입력으로 했을 때의 부분기여도 함수를 보여준다.  $G_{z,11}$  이하의 부분기여도가 대체로 아주 작다는 것으로부터 모터 진동이 주소음원임을 쉽게 알 수 있다. 스피들의 부분기여도 함수가 전체적으로 작게 나타나는 것은 스피들진동이 스피들 회전에 의해 발생된 진동이 아니라 모터의 가진에 의한 것임을 보여주는 것이다.

위의 결과를 종합하여 볼 때, 스피들 진동의 주 원인은 모터의 진동이 스피들로 전달됨으로써 스피들이 진동하고, 이러한 스피들의 진동은 다시 연사기 소음의 주원인으로 작용하고 있다고 판단할 수 있다.

## 6. 결론

2-for-1 연사기의 스피들 소음원을 규명하기 위해 다입력-단일출력 모델을 사용하였다. 주소음원으로 고려해야 할 입력을 찾기 위해 연사기 외부의 소음분포를 측정된 결과 모터, 풀리, 및 스피들의 진동신호를 입력신호로 선정하였다. 부분기여도 함수(그림 7)를 조사하여 이들 진동이 주요 소음원임을 밝혔다.

입력신호 상호 간에도 강한 상관성이 나타나므로 1차적인 원인을 밝히기 위해 두 신호 사이의 주파수 응답을 z-영역에서의 응답으로 변환한 후에 극점분포로써 인과성을 사하였다

해석결과 소음레벨이 가장 높은 1kHz-1.8kHz 대역에서 스피들소음의 주요원인은 모터에서 기인하는 것으로 나타났으며 풀리와 벨트 등을 통해 스피들에 전달되는 모터진동을 적절히 차단시키면 스피들 소음을 저감시킬 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고 문헌

1. 윤상혁, "연사기계 기술의 현황과 발전전망", (대한기계학회지 35권 1호, 1995)
2. J.S.Bendat and A.G.Piersol, "Engineering Application of Correlation and Spectral Analysis" ( Wiley, New York, 1980 ).
3. 박정석, "MISO모형을 이용한 소음/진동원 규명법과 우선 순위 결정에 관한 연구", 한국과학기술원 박사학위논문, 1992
4. J.S.Lim and A.V.Oppenheim, "Advanced Topics in Signal Processing", Prentice-Hall, 1988
5. R.H.Lyon, "Machinery Noise and Diagnostics", Butterworth Heinemann, 1987

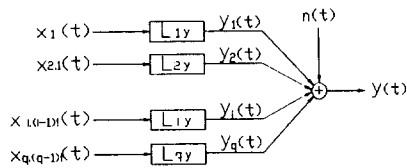
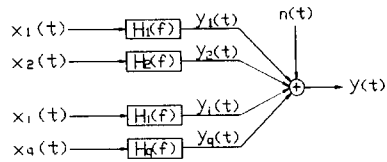


fig.1 다중입력 / 단일출력 모형

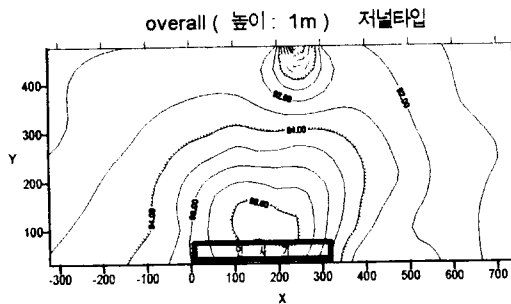


fig.2 위치별 소음도

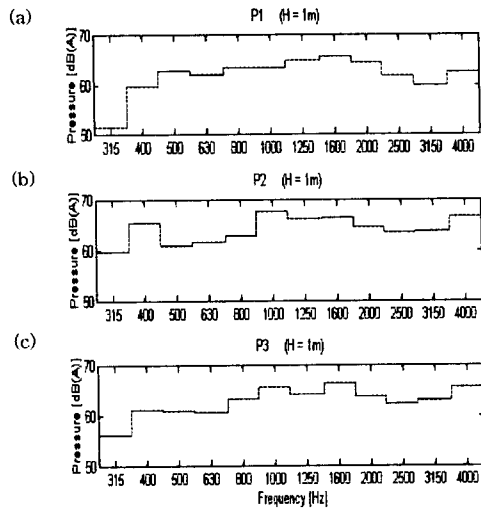


fig.3 1m 높이의 여러 지점에서 측정된 1/3 옥타브 밴드 대역 소음레벨

- (a) 모터 앞부분에서 측정
- (b) 스펀들 앞부분에서 측정
- (c) 기어 앞부분에서 측정

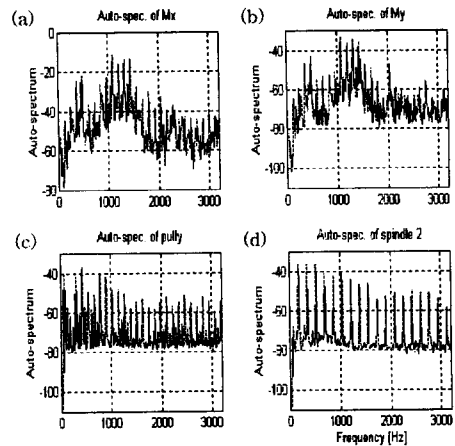


fig.4 각 입력신호의 자기스펙트럼

- (a) 모터 X방향 진동의 자기스펙트럼
- (b) 모터 Y방향 진동의 자기스펙트럼
- (c) 풀리의 자기스펙트럼
- (d) 모터에서 2번째 위치한 스펀들의 자기스펙트럼

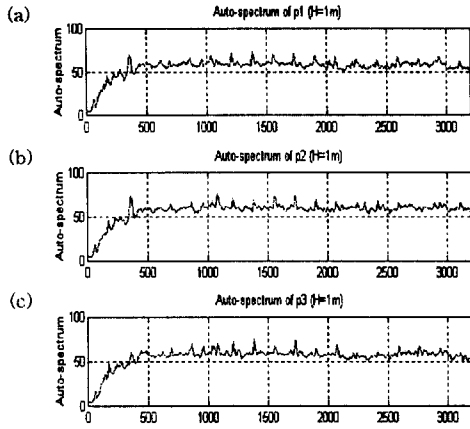


fig.5 출력신호의 자기스펙트럼

- (a) 모터 앞부분에서 측정된 출력신호의 자기스펙트럼
- (b) 스피들 앞부분에서 측정된 출력신호의 자기스펙트럼
- (c) 기어 앞부분에서 측정된 출력신호의 자기스펙트럼

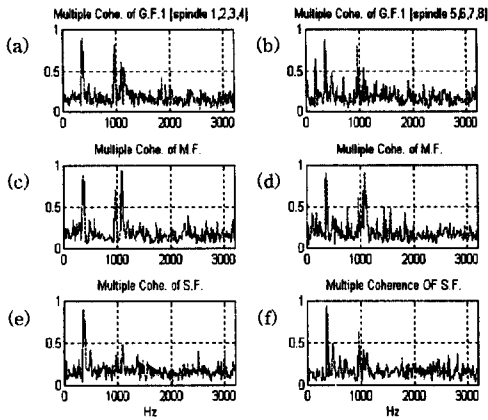


fig.6 다중기여도 함수 (높이 : 1m)

- (a)(c)(e) 스피들 1,2,3,4를 선택했을 경우
- (b)(d)(f) 스피들 5,6,7,8을 선택했을 경우
- (a)(b) 기어 앞부분에서의 다중기여도 함수
- (c)(d) 모터 앞부분에서의 다중기여도 함수
- (e)(f) 스피들 앞부분에서의 다중기여도 함수

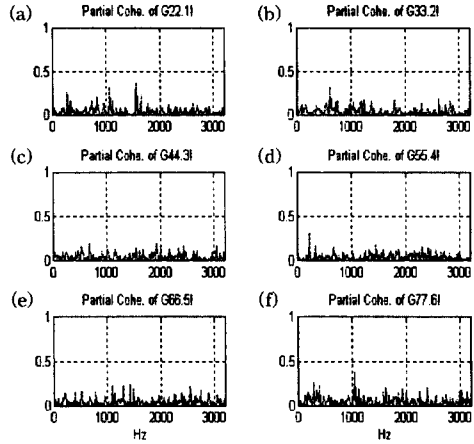


fig.7 부분기여도 함수 (스핀들 1,2,3,4를 선택)

- (a) 모터 X방향의 영향을 제거한 부분기여도 함수
- (b) 모터(X,Y)방향의 영향을 제거한 부분기여도 함수
- (c) 모터(X,Y), 풀리의 영향을 제거한 부분기여도 함수
- (d) 모터(X,Y), 풀리, 스피들1의 영향을 제거한 부분기여도 함수
- (e) 모터(X,Y), 풀리, 스피들(1,2)의 영향을 제거한 부분기여도 함수
- (f) 모터(X,Y), 풀리, 스피들(1,2,3)의 영향을 제거한 부분기여도 함수

▣ 스피들 앞부분 높이 1m에서 출력스펙트럼 선택

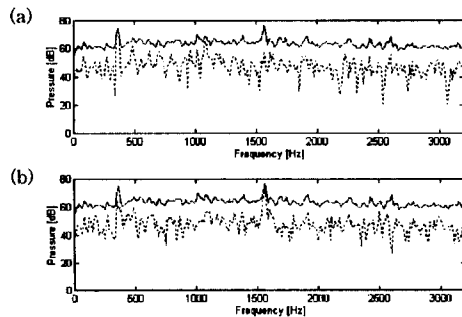


fig.8 스피들 앞부분 높이 1M

- (a) Mx(모터의 X방향 진동)의 기여출력 스펙트럼,
- (b) My(모터의 Y방향 진동)의 기여출력 스펙트럼