

디지털 신호처리 기법을 이용한 맥동연소기의 소음원 규명에 관한 연구

(Noise Source Identification of a Pulse Combustion Burner by Digital Signal Processing Techniques)

오 송 척 기*, 조 정 길**, 이 관 수***, 오 재 응****
(Song Chuck Gee, Cho Jung Gil, Lee Kwan Soo, Oh Jae Eung)

1. 서 론

맥동 연소기는 기존의 연속 연소식 연소기에 비하여 높은 열효율, 소형화, 연소과정의 개선, 시동후 점화플러그 및 송풍팬의 불필요, 자력 배기와 장시간 안전 운전등의 장점들로 인하여 최근 연구대상으로서 주목을 받고 있다. 맥동연소 현상은 1800 년경부터 알려졌음에도 불구하고 기본적인 연소메카니즘 및 기본동작 원리에 대한 이해의 부족 및 복잡성, 장치설계의 기존의 미비점 및 높은 소음등으로 인하여 종래의 연구는 거의 실험을 통하여 이루어 졌으며 이러한 것들이 현재까지도 맥동 연소기의 발전에 걸림돌이 되고 있다.^[1] 맥동 연소기가 산업용 및 가정용 열기기로 사용되기 위하여 진동과 소음의 감소에 대한 엄격한 요구를 만족하지 않으면 안된다. 따라서, 그에 대한 효과적인 방지설계를 하기위하여 진동원과 소음원이 어느 부위에서 전달되어 오는지를 파악하는 것이 중요하다.

맥동연소기의 개발 및 개량은 시작실험의 반복에 의존하지만 경비절감을 위해서는 설계단계에서 진동과 소음을 가능한 정확하게 예측할 필요가 있다. 이와같이 맥동연소기의 소음은 연소실내의 혼합공기의 연소에 의한 연소소음과 공기가 흡입될때 공기플래퍼의 진동이 소음으로 변화면서 발생하는 소음, 그리고 큰 압력을 갖는 연소가스가 배출되면서 배기실에서의 소음등으로 크게 구분지을 수 있다.^[2]

최근, 구조물의 동특성을 규명하기 위한 한 방법으로 주파수 분석에 의하여 소음원을 검출하는 방법이 꾸준히 개발되고 있는 추세이다.^[3] 이러한 관점에서 다차원 스펙트럼 해석법이 적용되어왔다. 종래에는 다차원 스펙트럼 해석법이 적용하는데 있어서 주파수 응답함수 (Frequency Response Function: FRF)법이 많이 이용되어 왔지만 이 방법은 각 진동 및 소음원간의 상관관계가 존재하지 않는 경우에 유효하다.

그러나, 실제 구조물은 그 진동 및 소음의 상태가 매우 복잡할 뿐만아니라 맥동연소기와 같이 하나의 구조물내에도 여러개의 진동 및 소음원이 존재하고 강한 상관관계가 존재할 때가 많으므로 이에 대한 계의 해석이 더욱 복잡해지고 어려워지는 경우가 많다. 따라서 주파수 응답함수 (FRF)법을 이용한 문제점을 개선하고 보다 정확한 해석을 하기위하여 최적 주파수 응답함수 (Optimal Frequency Response Function)법이 연구되고 있다.^{[4], [5], [6], [7], [8]}

본 연구에서는 맥동연소기의 소음원을 규명하기 위하여 종래에 사용되어온 주파수 응답함수법과 소음원간의 강한 상관관계가 존재하는 경우에 사용되는 기여도함수법을 이용하여 다차원 스펙트럼해석법에 의하여 입출력간의 기여관계를 규명하였다.

* 한양대학교 정밀기계과 대학원
** 한양대학교 기계공학과 대학원
*** 한양대학교 기계공학과 교수
**** 한양대학교 정밀기계과 교수

2. 이 론

2.1 맥동연소기의 기본원리

맥동연소는 기존의 연속연소 방식과는 달리 시동시만 제외하고 별도의 외부 전원 없이도 연료와 공기의 흡입, 폭발 및 배기가 자력으로 주기적인 재점화에 의해서 반복적으로 이루어지는 현상을 이용한 연소기를 「맥동연소기」라고 한다.

맥동연소가 자발적으로 반복되는 원리를 개략적으로 도시하면 Fig. 1 과 같다.

Fig.1 Operating principles of a pulse combustion burner

(a) 초기 상태 (starting phase)

처음 시동시 가스와 공기는 송풍기 또는 가압원 (pressure source) 으로부터 연료 및 공기밸브를 통하여 연소실로 흡입되어 가스 - 공기 혼합기체를 형성한 후 점화 플러그에 의해 점화된다.

(b) 배기 상태 (exhaust phase)

연소가 일어나면 연소실의 압력과 온도가 급격히 상승되므로 연료 및 공기밸브가 닫혀져 새로운 가스와 공기가 들어오는 것을 막는 동시에 연소실내부의 연소가스가 도관을 통하여 자력으로 배출된다.

(c) 흡입 상태 (intake phase)

배기가스의 관성으로 인하여 연소실 내부가 진공상태가 되므로 연료 및 공기밸브가 닫혀져 새로운 가스와 공기가 자동적으로 연소실로 유입되고 그와 동시에 배기가스의 일부가 연소실로 역류하여 새로운 혼합기를 점화시키고, (b), (c) 과정을 반복한다. 따라서 송풍기와 점화장치 는 시동시에만 필요하고 기존의 연소기와는 달리 강제 흡, 배기장치가 불필요하다.

(b), (c) 의 과정을 반복하며 연소가스의 폭발에 의한 연소실내에 폭발음이 발생하며, 공기플래퍼를 통하여 유입되는 공기의 양을 조절하기 위하여 공기플래퍼가 개폐되면서 진동이 발생하여 이 진동이 소음으로 변화되고, 배기가스가 도관을 통하여 배출되면서 큰 압력을 갖는 배기가스가 배출되면서 소음을 발생시키게 된다.

2.3 3 입력에 대한 단일출력의 기여관계

Fig. 2 Model of three inputs / single output system for a pulse combustion burner

Fig. 2 (a) 는 입력간에 상관관계가 있고 상호 종속적일 경우의 입출력 관계 모델이며 실제로 기계계의 진동형태는 매우 복잡하므로 일반적으로 입력간의 상관관계가 존재하는 경우가 많기때문에 정확한 소음원을 검출하기 위하여

본 연구에서는 입력간에 상관관계가 존재하는 경우를 고려하여 이론적 고찰을 수행하였다. Fig. 2 (a)의 경우에 입력간 상관관계가 존재한다고 가정하면 출력 스펙트럼은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 H_{iy}^*(f) H_{iy}(f) S_{ij}(f) + S_{nn}(f) \quad (1)$$

여기서 $H_{iy}(f)$ 는 i 번째 입력이 출력에 기여하는 전달함수를 나타내며, $S_{ij}(f)$ 는 입력 $x_i(t)$ 와 $x_j(t)$ 간의 상호 파워 스펙트럼을 나타낸다.

또한 $H_{iy}^*(f)$ 는 전달함수 $H_{iy}(f)$ 의 공역복소수를 나타내며 $S_{nn}(f)$ 는 잡음 $n(t)$ 의 파워 스펙트럼을 나타내고 있다. 한편 식 (1)에서 입력간의 상관관계가 없는 경우의 출력 스펙트럼은

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^3 |H_{iy}(f)|^2 S_{ii}(f) + S_{nn}(f) \quad (2)$$

로 나타내며, 본 논문에서는 식 (1), (2)를 FRF (Frequency response function)이라 부른다. 다차원 스펙트럼해석을 이용하여 입력간 혹은 입출력간의 관계로부터 상관성분을 제거하기 위해서는 잔차 스펙트럼 (Residual spectrum) 방법을 이용하게 된다. 예를 들어서, 1차적인 잔차 스펙트럼은 다음과 같은 식에 의해서 얻어진다.

$$S_{ii,1} = S_{ii}(f) - |L_{1i}(f)|^2 S_{ii}(f) \quad (i = 2, 3, y) \quad (3)$$

$$S_{ij,1} = S_{ij}(f) - L_{1j}(f) S_{ii}(f) \quad (i = 2, 3 ; j = y) \quad (4)$$

여기서 $L_{1i}(f)$ 는 입력간 및 입출력간의 상관성분을 제거시킨 경우의 입력간 및 입출력간의 최적 전달함수이다. [Fig. 2 (b) 참조] 마찬가지로 2차적인 잔차 스펙트럼은 예를 들어 $x_3(t)$ 에 대하여 구하면 입력 $x_1(t)$ 와 $x_2(t)$ 의 선형적인 영향을 제거함으로써 다음 식과 같이 된다.

$$S_{33,2} = S_{33,1}(f) - |L_{23}(f)|^2 S_{22,1}(f) \quad (5)$$

$$S_{yy,2} = S_{yy,1}(f) - |L_{2y}(f)|^2 S_{22,1}(f) \quad (6)$$

$$S_{3y,2} = S_{3y,1}(f) - L_{2y}(f) S_{32,1}(f) \quad (7)$$

여기서 $L_{2y}(f)$ 는 입력 $x_2(t)$ 와 출력사이의 최적 전달함수이다. 한편 입력간 및 입출력간의 기여 관계를 나타내는 일반 기여도함수 (Ordinary coherence function)는

$$\gamma^2_{ij} = \frac{|S_{ij}(f)|^2}{S_{ii}(f) S_{jj}(f)} \quad (8)$$

$$\gamma^2_{iy} = \frac{|S_{ij}(f)|^2}{S_{ii}(f) S_{yy}(f)}$$

$$(i = 1, 2, 3 ; j = 1, 2, 3 ; i \neq j)$$

으로 정의되며, 이러한 관계식을 이용하여 다입력계에 적용하면 잔차과정에 의하여 각 입력원의 순수 기여도를 나타낸 부분 기여도 함수 (Partial Coherence Function : PCF) 를 $x_3(t)$ 에 대하여 구하면

$$\gamma^2_{3y,2} = \frac{|S_{yy,2}(f)|^2}{S_{33,2}(f) S_{yy,2}(f)} \quad (9)$$

로 되며 이 식을 이용하여 입력간 및 입출력간의 상관성분을 제거하여 계산된 다중기여도 함수 (Multiple Coherence Function : MCF) 는 다음과 같이 된다.

$$\gamma^2_{y;1,2}(f) = 1 - \{1 - \gamma^2_{1y}(f)\} \{1 - \gamma^2_{2y,1}(f)\} / \{1 - \gamma^2_{3y,1,2}(f)\} \quad (10)$$

실제로 진동원을 검출하려면 입력원의 출력에 대한 순수한 기여량을 계산할 필요가 있으므로 실측에 의한 출력 스펙트럼과 기여도 함수와의 음인 기여 출력스펙트럼 (Coherent output spectrum)을 이용하게 된다. 예를 들어 3 입력 $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$ 가 출력에 기여하는 순수한 기여량을 나타내는 기여출력 스펙트럼은 각각 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \gamma^2_{1y,2,3}(f) \cdot S_{yy,2,3}(f) \\ \gamma^2_{2y,1,3}(f) \cdot S_{yy,1,3}(f) \\ \gamma^2_{3y,1,2}(f) \cdot S_{yy,1,2}(f) \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)의 기여출력 스펙트럼은 입력신호와 출력신호를 측정할 때 S/N 비가 높으면 높을수록 실제의 출력계의 출력 스펙트럼과 같이 잘 일치한다.

식 (11)을 이용하여 전주파수 영역에 걸친 각 진동원의 기여관계를 파악하기 위하여 기여출력 스펙트럼의 총레벨 (overall level)을 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \int_0^f \gamma^2_{1y,2,3}(f) \cdot S_{yy,2,3}(f) \\ \int_0^f \gamma^2_{2y,1,3}(f) \cdot S_{yy,1,3}(f) \\ \int_0^f \gamma^2_{3y,1,2}(f) \cdot S_{yy,1,2}(f) \end{aligned}$$

식 (12)으로부터 누적된 레벨에 대해서 대수합을 구하면 총레벨이 된다. 다입력계의 기본개념은 다음과 같은 가정을 갖는다.

- 1) 어떠한 입력간의 일반 기여도 함수가 1 이 되어서는 안된다. 만약 1 이라면 2 개의 입력중 1 개는 모델에서 제거되어야 한다.
- 2) 어떠한 입력과 전체 출력사이에 일반 기여도 함수가 1 이 되어서는 안된다. 만약 1 이라면 기타 입력들은 출력에 영향을 미치지 않으므로 단일 입력계가 되어야 한다.
- 3) 어떠한 입력과 다른 나머지 입력들과의 다중기여도 함수가 1 이 되어서는 안된다. 만약 1 이라면 그 입력은 모델에서 제외되어야 한다.
- 4) 출력과 입력들과의 다중 기여도 함수가 충분히 커야 한다. 그렇지 못할 경우 아직 미고려된 입력이 있다는 것을 뜻한다. 실제적으로 대략 0.5 이상을 기준으로 설정한다.

3. 실험

3.1 실험장치 및 방법

본 실험에서는 맥동연소기가 가동될때 각 요소에서 방사하여 소음이되는 진동과 소음과의 기여관계를 해석하기 위하여 Fig. 3에 나타내었다. 비교적 높은 진동 및 소음을 나타내는 연소기의 연소실, 공기플래퍼, 그리고 배기부에 각각 압력 게이지 (PCB Model 112A21), 가속도계 (RION PV-90A), 그리고 마이크로폰 (RION Sound level meter NL-10A)을 부착시켜 진동과 소음 (입력원)을 측정하고 동시에 연소기로부터 원거리인 1.5 m 떨어진 곳에서 마이크로폰 (RION Sound level meter NL-10A)을 이용하여 음압 (출력)을 측정하였다.

본 연구에서는 다차원 스펙트럼해석을 적용하여 소음원을 규명하기 위하여 Fig. 4와 같은 계통도에 의하여 실험을 실시하였다.

Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig. 4 3-input, 1-output model for a pulse combustion burner

3.2 데이터의 처리순서

본 연구에서 사용된 가속도계, 압력게이지, 그리고 마이크로폰에 의하여 얻어진 신호를 동기화시켜 이를 4 채널 A/D 변환기를 이용해서 디지털화하여 마이크로 컴퓨터에 입력시켜 데이터를 처리하였다.

데이터의 처리는 입출력의 스펙트럼을 마이크로 컴퓨터로 계산한 후 각 입력간 및 입출력간의 일반기여도 함수, 다중기여도 함수, 그리고 잔차 스펙트럼을 계산하였다. 또 각 입력원의 출력에의 기여관계를 전 주파수영역에서 적분한 레벨 및 총레벨에 의하여 소음원의 기여순서를 결정하도록 하였다.

Fig. 5 Flow chart for multi-dimensional spectral analysis

4. 결과 및 고찰

4-1. 다입력계의 상관성 검토

다차원 스펙트럼해석의 이론적인 가정에서 가장 중요하다고 생각되는 입력간의 상관(γ^2_{ij})과 입출력간의 상관(γ^2_{1y}) 관계를 검토 해야할 필요가 있다. 특히 입력간의 일반 기여도함수 (γ^2_{ij})는 임의의 입력 $x_i(t)$ 와 $x_j(t)$ 가 독립적인가 혹은 상호간에 상관관계가 존재하는가를 판단하는데 매우 중요하다.

3 입력계의 입력간의 상관관계는 Fig. 6과 Table 1에 보이는 바와 같이 상당히 높은 값을 가지므로 이것으로 보아 입력간에 상관성이 존재함을 알 수 있다. 본 연구에서는 Table 1에 나타난 바와 같이 일반 기여도함수가 전 주파수영역에서 평균 0.5 이상의 높은 값을 나타내고 있는 것으로 보아 입력간에 강한 상관관계를 갖기때문에 다차원 스펙트럼해석이 적용이 가능하다는 것을 알 수 있다. 한편 다중 기여도함수가 낮은 값을 갖는 경우 다입력 관계로 해석할 때에 계이 비선형적인 요소에 의한 영향이 크거나 혹은 실제로 존재하는 다른 입력원이 무시된 것으로 생각할 수 있다. Fig. 7을 살펴보면 Fig. 7 (a), (b), (c)는 입력부위의 스펙트럼을 나타내고 있으며 Fig. 7 (d)는 출력

부위의 스펙트럼을 나타내고 있다. 그러나 본 연구에서는 Fig. 7 (d)에 나타난 방사음의 가장 큰 피크치의 주파수별 순서로 나타난 다중 기여도함수는 Table 2의 γ^2_{yx} 항에 나타난 바와 같이 대부분의 피크 주파수에서 높은 값을 나타내고 있는 것으로 보아 본 연구에 다차원 스펙트럼해석을 적용하는 것이 유효하리라 생각된다.

다음은 본 연구에서 각 입력원의 출력에 대한 부분 기여도함수를 방사음의 출력스펙트럼의 현저한 피크 주파수 순서별로 나타내면 Table 2와 같다. 예를들어서 59 Hz 부근의 기여도는 공기플래퍼 밸브부위 그리고 배기부 부위의 순서로 크기가 크나 연소실에서는 거의 기여하지 않고 있음을 보여주고 있으며 123 Hz 부근의 기여도는 배기부 부위의 기여가 가장크고 연소실과 공기플래퍼 밸브부위의 기여도는 비슷하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이와같이 기여도함수법에 의해 맥동 연소기로부터 방사되는 소음의 기여관계를 알게 됨으로써 맥동 연소기의 각 요소부의 중요한 피크 주파수를 검출할 수 있다고 생각된다.

Table 1 Values of averaged ordinary coherence function

γ^2_{12}	γ^2_{13}	γ^2_{1y}	γ^2_{23}	γ^2_{2y}	γ^2_{3y}
0.506	0.525	0.526	0.504	0.511	0.493

Table 2 Value of partial coherence function at each resonant frequency

Freq.	$\gamma^2_{1y, 23}$	$\gamma^2_{2y, 13}$	$\gamma^2_{3y, 12}$	$\gamma^2_{y, x}$
59	0.408	0.071	0.504	0.902
123	0.850	0.484	0.550	0.977
179	0.666	0.243	0.578	0.954
183	0.561	0.184	0.467	0.653
201	0.686	0.418	0.570	0.818
239	0.874	0.783	0.512	0.933
225	0.368	0.112	0.643	0.658

Fig. 6 Ordinary coherence function

4-2. 각 입력원과 출력의 기여관계

Fig. 7은 맥동 연소기를 정상상태의 운전조건 (연소실의 벽의 온도와 내부압력이 변하지 않는 상태)에 이르렀을때 측정된 각 요소부의 응답과 연소기 전방 1.5 m 지점에서 방사음에 대한 파워 스펙트럼의 형상을 나타내고 있다.

이와같이 입력과 출력의 파워스펙트럼의 형상만으로는 입력원의 출력에 대한 기여도를 정확하게 판단하기 어렵기 때문에 입출력간의 상관관계를 간차시켜 계산한 부분 기여도함수를 Fig. 8에 나타내었다. 각 피크 주파수에서 입력이 출력에 기여한 정량적인 평가를 기여도 함수법에 의하여 얻은 결과는 실측에 의하여 얻어진 결과와

비교하여 보면 Fig. 9 와 같이 전 주파수 영역에서 거의 일치하고 있지만 실측치가 약간 더 높은 값을 가지고 있음을 알 수 있다. 또한 FRF 법의 식 (1) 에 의하여 얻은 결과는 실측치보다 높은 경향을 나타내고 있는 것을 보여준다.

즉, 입력간에 상관관계가 존재함에도 불구하고 상관관계가 없다고 가정 한 식 (2) 를 이용한 FRF 법은 입력간에 상관이 강하게 존재하는 경우에 적용하는 것은 문제가 있는 것으로 생각된다.

다음은 기어 파워스펙트럼을 전 주파수 영역에 걸쳐서 적분시킨 오버올 레벨 값을 Fig. 10 에 나타내고 있다. 그림에서 나타난 바와같이 각 입력원의 출력에의 기여순위는 배기실, 연소실 그리고 공기 플레퍼벨브 부위의 순서임을 알 수 있다.

즉, 각 입력원 사이의 상관성을 고려하여 계산한 기여 출력스펙트럼을 적분함으로써 각 소음원의 기여순위를 보다 쉽게 결정할 수 있음을 알 수 있다. 한편 전 주파수 영역에서 적분하여 내수합을 계산한 총레벨을 Table 3 에 나타내었다. Table 3 에 나타난 바와 같이 3 입력을 고려한 경우 실측치보다 약간 낮은 출력 스펙트럼을 나타내고 있는데, 이는 연소 소음 이외에 공기와 가스가 흡입되어 발생하는 소음과 도관의 진동이 소음으로 전파되는 등 여러 다른 입력원이 존재할 가능성이 있음을 알 수 있다.

Table 3 overall level contributions estimated by coherence function approach for a pulse combustion burner

Items Approach	Contribution measured output (dB)	(dB)
Measured power output		45.26
Coherent	$\int \gamma^2_{y:x} S_{yy} df$	42.2
	$\int \gamma^2_{1y} S_{yy} df$	40.06
	$\int \gamma^2_{2y} S_{yy} df$	37.65
Output	$\int \gamma^2_{1y,2,3} S_{yy,2,3} df$	34.61
	$\int \gamma^2_{2y,1,3} S_{yy,1,3} df$	31.77
Spectrum	$\int \gamma^2_{3y,1,2} S_{yy,1,2} df$	27.25

Fig. 7 Power spectral densities of vibration and sound pressure measured at a pulse combustion burner

Fig. 8 Partial coherence function

Fig. 9 Comparisons between FRF approach and coherence function approach

Fig. 10 Comparisons of integrated energy contribution to the coherent output power spectrum

4-3. 진동의 전달특성 및 차단효과 (Shield Effect)

각 입력원의 출력에 대한 전달특성 즉 차단 효과는 FRF법의 식 (1)을 계산할 때, 전달경로를 해석적으로 제거함으로써 예측하는 것이 가능하다. Fig. 11 은 전 주파수 영역에서의 차단효과를 나타낸 것이다. 예를들어 배기부의 소음 전달경로가 차단되었을 때 ($H_1 = 0$), 연소실의 진동의 전달경로가 차단되었을 때 ($H_2 = 0$), 공기 플레퍼 벨브의 진동의 전달경로가 차단되었을 때 ($H_3 = 0$)의 순으로 나타나고 있다. 이와같은 결과는 총레벨이 가장 크게 떨어지는 즉, 배기부에서 가장 큰 기여를 하고 있음을 의미한다.

한편, FRF 법에 의해서 얻어진 총레벨 값과 실측된 결과를 비교해보면 Table 4 와 같다. Table 4 에서보면 배기부의 소음 전달경로가 차단되었을 때 ($H_1 = 0$) 가장 크게 레벨이 낮아짐을 보여주고 있다.

총 레벨이 44.2 dB 로 다른 두 개의 입력원인 연소실의 진동 ($H_2 = 0$), 공기 플레퍼 벨브의 진동 ($H_3 = 0$)의 전달경로를 차단할 때의 총레벨 45.72 dB, 49.51 dB 보다 낮은 값을 가짐을 알 수 있다. 따라서 어느 소음원이 가장 크게 기여하고 있는가를 해석적으로 규명함으로써 전달경로의 차단효과를 쉽게 알 수 있다. 또한 Table 4 에서 A, B, C 는 세개의 입력중에서 두개의 입력을 동시에 차단시켰을 때의 총 레벨값을 나타낸다. 즉, FRF 법을 이용하여 각 입력이 출력에 전달되는 경로의 유효한 차단효과를 해석적으로 규명이 가능함을 알았다. 따라서 본 실험에서 사용된 맥동연소기의 경우에는 배기부의 전달경로를 차단하는 것이 소음을 감소시키는 데 매우 효과적임을 알 수 있다. 또한 배기부에 silencer 를 부착시켜 소음을 저감시키는 것이 중요하리라 생각된다.

Table 4 Comparison of integrated level contributions estimated by the FRF approach and by the coherence function approach for the pulse combustion burner

Items Approach	Contribution measured output (dB)	(dB)
Frequency response function (dB)	$A = \int H_1 ^2 S_{11}(f) df$	46.96
	$B = \int H_2 ^2 S_{22}(f) df$	28.9
	$C = \int H_3 ^2 S_{33}(f) df$	19.11
function (dB)	$\int D (H_3 = 0) df$	49.51
	$\int E (H_2 = 0) df$	45.72
	$\int F (H_1 = 0) df$	44.20

여기서,

$$D = H_1 H_1^* S_{11} + H_2 H_2^* S_{22} + H_1^* H_2 S_{12} + H_2^* H_1 S_{21}$$

$$E = H_1 H_1^* S_{11} + H_3 H_3^* S_{33} + H_1^* H_3 S_{13} + H_3^* H_1 S_{31}$$

$$F = H_2 H_2^* S_{22} + H_3 H_3^* S_{33} + H_2 H_3^* S_{23} + H_3 H_2^* S_{32}$$

Fig. 11 Comparisons of integrated FRF by shield effect

5. 결 론

맥동연소기의 소음저감대책을 세우는 경우 중요한 것은 각 소음원의 기여관계 및 전달특성을 파악하여 소음원을 검출하는 것이다. 이상의 실험에서 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 입력간에 강한 상관관계가 존재하는 경우에 소음원을 검출하기 위하여는 다차원 스펙트럼 해석법을 이용하는 것이 유효하다는 것을 검증하였다.
- (2) 본 실험에서 사용된 맥동연소기로부터 방사되는 소음원의 기여순위는 총래벨에 대하여 배기부, 연소실 그리고 공기필러퍼 부위의 순서임을 알 수 있었다.
- (3) 기여도합수법을 이용하여 소음원으로 간주되는 맥동연소기의 각 요소부의 피크 주파수를 검출하여 각 모드별 기여순위를 결정할 수 있었다.
- (4) 각 소음원의 방사음에 대한 기여관계를 이용하여 맥동연소기로부터 방사되는 소음을 감소시키기 위해서 식 (1)의 FRF 법을 이용하여 배기부의 소음에 대한 전달경로를 차단시키는 것이 가장 효과적임을 알았다.

6. 참고문헌

- (1) 오상현, 최병운, 임광열, "공기 밸브형 맥동연소기의 동적특성에 관한 실험적 연구", 대한기계학회논문집, Vol.11, No.5, pp.846~855, 1987
- (2) 정희중 "맥동연소식 온수기의 운전 및 열적 특성에 관한 실험적 연구", 석사학위논문, 한양대학교, 1989
- (3) J.S.Bendat and A.G.Piersol, "Engineering Application of Correlation and Spectral Analysis, John Wiley & Sons, 1980
- (4) 오재응, 서상현, 강명순, "가솔린 엔진의 소음원 검출에 대한 다차원 스펙트럼 해석의 응용", 대한기계학회논문집, Vol.10, No.4, pp.442~449, 1986
- (5) M.E.Wang and M.J.Crocker, "On the Application of Coherence Techniques for Source Identification in a Multi Noise Source Environment", J. Acoust. Soc. Am. Vol.74, No 3, pp.861~872, 1983
- (6) M.W. Trothewey and H.A.Evansen, "Identification of Noise Sources of Forge Hammers during Production : An Application of Residual Spectrum Techniques to Transients ", J. of Sound and Vib. Vol. 77(3), pp. 357~374, 1981
- (7) Stanley Barrett, " On the Use of Coherence Functions to Evaluate Sources of Dynamic Excitation", Shock Vibration Bulletin, 49 (1), pp. 43~58, 1979
- (8) G.H. William and J.S. Bendat, "Noise Source Identification Using Coherent Output Power Spectra ", Sound and Vibration, pp.15~24, August, 1975

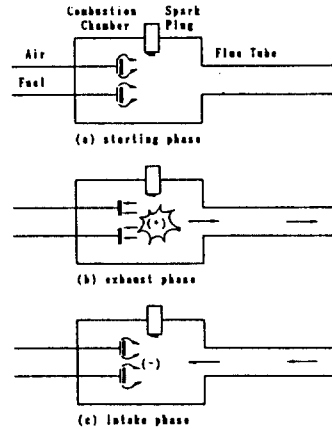
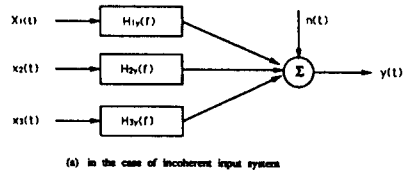
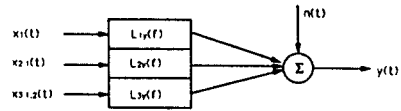


Fig.1 Operating Principle of a Pulse Combustion Burner



(a) in the case of incoherent input system



(b) in the case of coherent input system

Fig.2 Model of three input / single output system

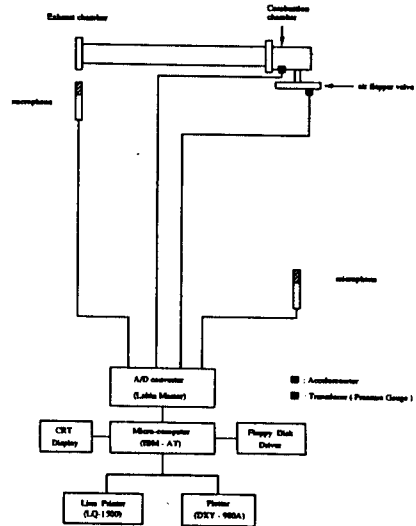


Fig.3 Schematic diagram of experimental apparatus

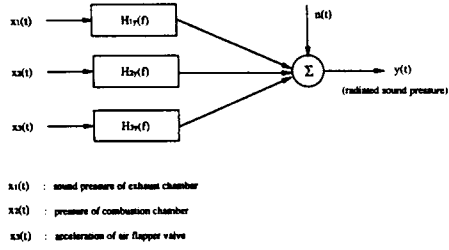


Fig.4 3-input, 1-output model for a pulse combustion burner

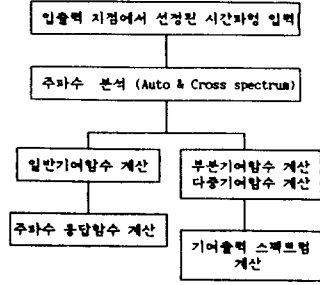


Fig. 5 Flow chart for multi-dimensional spectral analysis

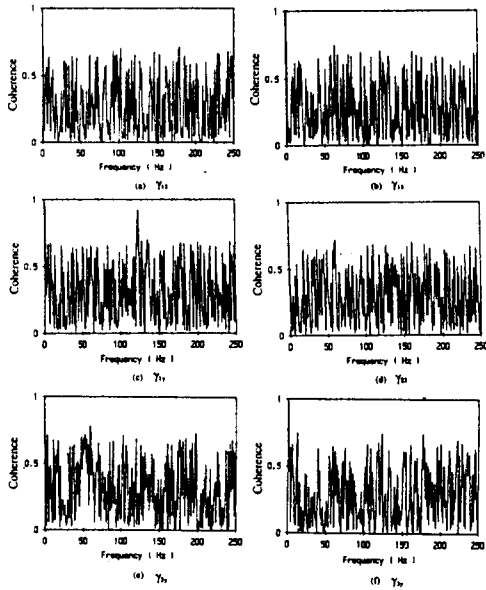


Fig.8 Ordinary coherence function

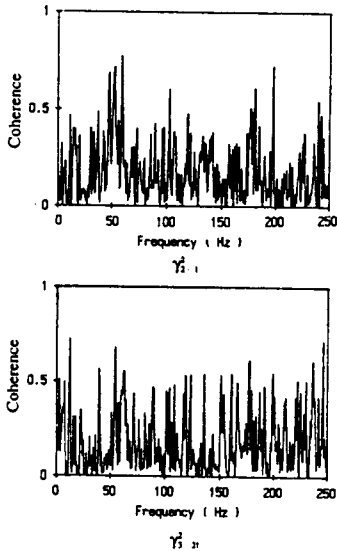
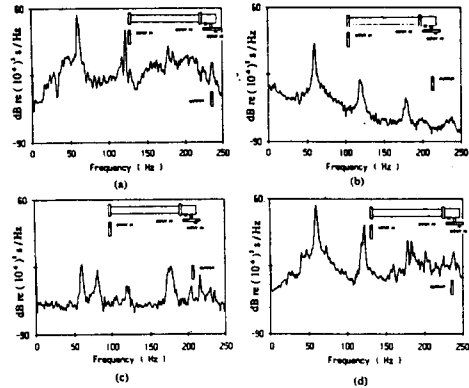


Fig.8 Partial coherence function



(a) Input #1 (Sound pressure of exhaust chamber)
 (b) Input #2 (Pressure of combustion chamber)
 (c) Input #3 (Acceleration of air flapper valve)
 (d) Output (Radiated sound pressure)

Fig.7 Power spectral densities of vibration and sound pressure measured at each part of a pulse combustion burner

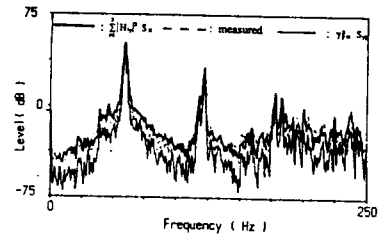


Fig.9 Comparisons between FRF approach and coherence function approach

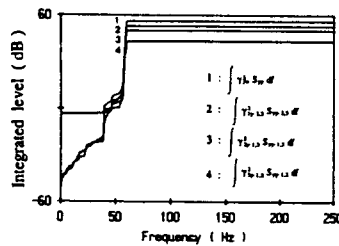


Fig.10 Comparisons of integrated energy contribution to the coherent output power spectrum

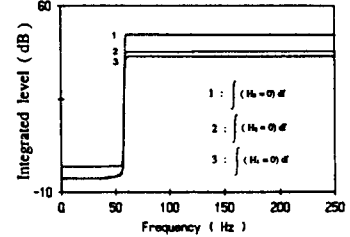


Fig.11 Comparisons of integrated FRF by shield effect