

# 부분기여도함수를 이용한 전술차량 소음원 분석

## Noise-source Analysis of Tactical Vehicle Using Partial Coherence Function

박 성 호<sup>†</sup> · 이 경 현\* · 한 형 석\* · 전 수 홍\*

Sungho Park, Kyunghyun Lee, HyungSuk Han and Soohong Jeon

(Received July 27, 2016 ; Revised November 17, 2016 ; Accepted November 17, 2016)

**Key Words :** Partial Coherence Function(부분기여도함수), Residual Spectrum(잔차 스펙트럼), Structureborne Noise(구조소음), Noise-source Analysis(소음원 분석)

### ABSTRACT

In this paper noise source and transfer path of tactical vehicle are analyzed with partial coherence function and spectrum analysis. Engine, transmission, structure panel and aerodynamic are main source of cabin noise. To reduce cabin noise, identifying transfer path of sources and analyzing their contribution is important. With modeling of transfer path and partial coherence function, transfer path and principal noise source can be identified. Engine/transmission and structural resonance are principal source of low frequency noise and by adding stiffener and sound absorbing material, resonance of vibration and inflow air problem can be solved.

### 1. 서 론

다목적 전술차량은 탄약운반 혹은 다련장 발사 대 등 다양한 용도로 활용이 가능한 차량이다. 전술차량은 일반 승용차에 비하여 엔진출력이 크며, 실내소음에 대한 관심이 비교적 적었다. 그러나 트럭과 같은 차량에서 실내 소음이 90 dB를 초과하는 경우<sup>(1)</sup>도 많으며 탑승자의 의사소통을 방해할 뿐만 아니라 피로누적 및 청력손상을 유발하게 된다. 현재 전술차량에 탑승하는 운전자로부터 실내소음에 대한 불만 및 개선요구가 급격히 증가하고 있으며, 문제를 해결하기 위하여 정확한 소음원 및 소음의 전달경로를 파악하고자 한다.

트럭과 같은 대형 차량의 실내소음을 저감하고

자 하는 연구는 활발히 진행되어 왔다. 차량 실내 구조에 대한 유한요소 해석을 통하여 실내 음장 해석 및 각각의 강판에 대한 기여도를 분석<sup>(1)</sup>, 실내소음을 저감하기 위한 댐핑요소, 흡음재 추가에 대한 성능 분석 연구<sup>(2)</sup>, 강판의 무게와 소음을 줄이기 위한 형상설계 연구<sup>(3)</sup>, 실내소음에 대한 특성 및 실내소음 예측<sup>(4)</sup>과 관련된 연구가 수행되었지만, 여러 가진원간의 상관관계, 구조소음 전달 경로 및 기여도에 대한 연구가 부족하다. 또한 차량이 아닌 증발기<sup>(5)</sup>에 대하여 부분기여도 함수를 활용한 소음원 분석의 연구가 수행된 바 있으며, 이 방법을 전술차량에 적용하여 구조소음의 원인으로 추정되는 소음원의 기여도 및 전달경로를 분석해 보고자 한다. 부분기여도 함수를 적용하면 보다 정확한 소음의 원인을 찾고 이에 적절한 대처방안

<sup>†</sup> Corresponding Author; Member, DTaQ  
E-mail: sungho88@dtaq.re.kr

\* Member, DTaQ

# A part of this paper was presented at the KSNVE 2015 Annual Autumn Conference

‡ Recommended by Editor Jae Hung Han

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

마련이 가능하다.

## 2. 소음 전달경로 분석

### 2.1 소음분석 계측조건 및 가진원 추정

전술차량의 실내소음 계측은 타원형 시험 트랙 20 km/h, 50 km/h, 70 km/h의 속력으로 주행하며, 양압장치(화생방 상황에서 외부 공기차단 역할)의 가동여부를 달리하여 계측을 수행하였다. 운전석(Y1) 및 보조석(Y2)에 마이크로폰을 각각 설치하였으며, 사람이 느끼는 소음을 평가하기 위하여 A-weighting을 적용한 계측결과는 Figs. 2, 3과 같다.

전술차량 캐빈 내부의 실내소음은 속력이 증가할수록 소음레벨이 증가하였다. 250 Hz 미만의 주파수 범위에서 피크값의 주파수가 변동하였으나, 250 Hz 이상의 주파수 범위에서는 전반적으로 증가하는 경향을 보여주었다. 전술차량에서 양압장치를 작동시키면 외부 공기유입이 차단됨에 따라 고주파 소음이 저감되었다. 속력이 증가할수록 소음의 크기는 증가하였지만 50 km/h 이상의 속력에서는 소음레벨의 증가가 미비하였다.

전술차량 캐빈 내부의 소음원은 디젤엔진, 파워트레인, 배기장치 및 유체소음으로 추정된다. 전술차량 캐빈 내부 소음에 대한 전달 경로는 아래와 같이 추정할 수 있다.

- 1) 디젤엔진 및 파워트레인 진동이 마운트를 통해 캐빈을 구성하는 강판에 구조소음의 형태로 전달되고 강판의 진동을 통한 소음 유발
- 2) 디젤엔진 및 파워트레인이서 발생하는 공기소음이 운전석 및 보조석에 직접 전달
- 3) 배기장치에서 발생하는 공기소음이 직접 전달
- 4) 외부 바람 등에 의한 잡음이 직접 전달



Fig. 1 Driver's seat in cabin and tactical vehicle

250 Hz 미만의 저주파 영역 소음은 디젤엔진/파워트레인 및 구조물 공진이 전달경로 1)과 같이 구조소음의 형태로 전달될 것으로 예측하며, 250 Hz 이상의 고주파의 경우 전달경로 2), 3), 4)와 같은 형태로 전달되었을 것이라고 예측한다. 각 주파수 범위에서 어떤 소음원의 기여도가 높은지를 판단하기 위하여 운전석에서 계측한 마이크로폰 신호와 각각의 가진원에서 계측된 가속도 신호 사이의 상관관계를 부분기여도 함수를 통해 분석해보고자 한다.

소음원 계측에서 마이크로폰은 바람 및 다른 구성요소의 소음에 영향을 받기 때문에 소음원의 고유 특성만을 계측하기 위하여 가속도 센서를 부착하여 계측을 수행하였으며, 운전석에서는 운전자의 소음 인지 평가를 위하여 마이크로폰을 설치하였다.

자체적인 소음을 발생시키는 디젤엔진(X1), 배기장치(X2), 파워트레인(X3)에 각각 1개의 가속도 센서를 부착하였다. 구조소음이 전달되는 캐빈 내부 강판의 경우 후면부(X4, X5, X6)에는 왼쪽, 가운데,

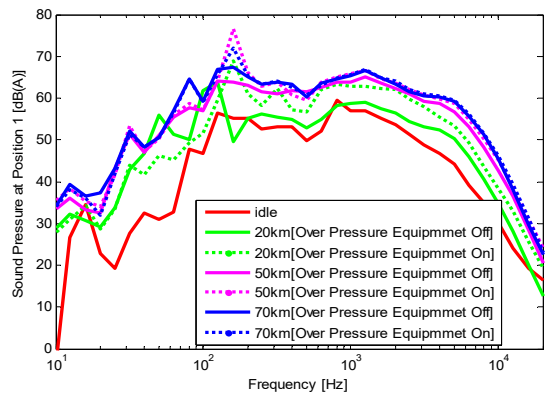


Fig. 2 1/3 Octave band SPL at driver seat (Y1)

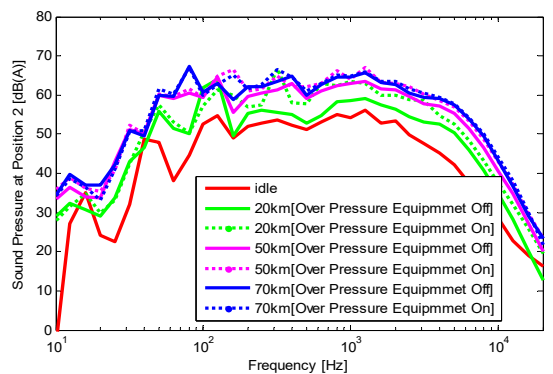


Fig. 3 1/3 Octave band SPL at passenger seat (Y2)

오른쪽으로 구분하여 3개의 가속도 센서를 부착하였으며, 하부(X7, X8)에는 운전석 및 보조석에 가속도 센서를 부착하였다.

**2.2 부분기여도 함수**

캐빈 내부의 실내소음은 여러 소음원의 복합적인 영향을 통해 나타난다. 이러한 시스템에서 특정 성분에 대한 영향력을 검출하거나 전달경로와 관련된 상관관계를 분석하기 위하여 부분기여도함수(partial coherence function)를 적용할 수 있다.

임의의 두 신호  $x_1, x_2$ 가 부분적으로 연관(partially correlated)되어 있다면  $x_2$ 는  $x_1$ 와 연관된 성분인  $x_{2:1}$ 과 연관되지 않은 잔차 입력(conditioned input)  $x_{2:1}$ 로 구분할 수 있다. 다중입력/단일출력 시스템에서 입력과 출력간의 상호관계는 아래의 관계식을 만족한다.

$$y(t) = \sum_{i=1}^q x_i^T(\tau) h_i(\tau) d\tau + n(t) \tag{1}$$

$$G_{yy}(f) = \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^q H_i^*(f) H_j(f) G_{ij}(f) + G_{nn}(f) \tag{2}$$

$$\gamma_{ij}^2(f) = |G_{ij}(f)|^2 / (G_{ii}(f) G_{jj}(f)) \tag{3}$$

여기서  $x_i, h_i$ 는 각각의 입력신호 및 전달함수,  $y$ 는 출력신호,  $n$ 는 잡음을 의미하며,  $G_{ij}(f)$ 는 신호  $i$ 와 신호  $j$ 사이의 상호스펙트럼,  $\gamma_{ij}$ 는 상호스펙트럼의 기여도 함수를 나타낸다.

$$x_{2:1} = x_2 - x_{2:1} = x_2 - L_{12}x_1 = x_2 - (G_{12}/G_{11})x_1 \tag{4}$$

$$G_{22:1} = G_{22}(1 - \gamma_{12}^2) \tag{5}$$

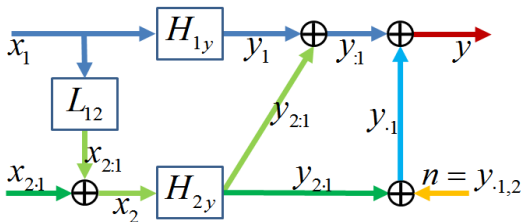


Fig. 4 Diagram of conditioned spectral analysis

$$G_{yy-1} = G_{yy}(1 - \gamma_{1y}^2) \tag{6}$$

$$G_{2y-1} = G_{2y} - (G_{1y}/G_{11})G_{21} \tag{7}$$

식 (5)~(7)에서와 같이 특정 상관관계가 제외된 스펙트럼을 잔차 스펙트럼(conditioned spectrum)이라 하며 상관관계에 대한 흐름도는 Fig. 4와 같다. 마지막으로 임의의 신호가 분리된 전달함수에 대하여 부분기여도함수(partial coherence function)은 다음과 같다.

$$\gamma_{2y-1}^2 = \frac{|G_{2y-1}|^2}{G_{22:1} G_{yy-1}} = \frac{|G_{2y}G_{11} - G_{1y}G_{21}|^2}{G_{11}^2 G_{22} G_{yy} (1 - \gamma_{12}^2)(1 - \gamma_{1y}^2)} \tag{8}$$

**2.3 실내소음 전달경로 및 기여도 분석**

캐빈 내부의 실내소음은 앞 절에서 가진원을 추정한 바와 같이 디젤엔진/파워트레인 및 구조물 공진에 의한 소음과 배기장치/외부공기에 의한 소음으로 구분할 수 있다. 일반적으로 차량 내부 실내소음에서 디젤엔진/파워트레인 및 구조물 공진과 관련된 소음은 저주파 소음과 연관이 높으며, 외부공기에 의한 소음은 고주파 소음과 연관이 높다고 알려져 있다. 스펙트럼 상관관계 분석 결과 배기장치 진동과 캐빈 내부 실내소음은 연관성이 낮아 가진원 분석 대상에서 제외하였다. 전술차량의 운전조건에 따라 디젤엔진/파워트레인의 가진 주파수가 바뀌기 때문에 모든 가진 주파수에서 시험을 수행하는 것이 적합하나, 시험 수행의 제약으로 인하여 특정 속력에 한하여 시험이 수행되었다. 이 분석에서는 소음이 가장 크게 측정되었던 70 km/h 속력, 양압장치가 작동하지 않는 주행조건에 대한 소음을 분석한다.

디젤엔진/파워트레인에서 발생한 진동은 전술차량의 캐빈을 구성하는 판넬로 전달되어 구조소음을 유발하거나 공기소음의 형태로 직접 전달될 수 있으며 디젤엔진/파워트레인의 구동주파수에서 소음이 발생한다. 판넬의 고유진동수와 디젤엔진/파워트레인에서 발생한 진동의 주파수가 일치한다면 구조공진이 발생하여 큰 소음을 유발할 수 있다.

디젤엔진/파워트레인의 실내소음 스펙트럼 분석은 Figs. 5, 6과 같다. 디젤엔진/파워트레인은 구조적으

로 연결되어 함께 동작하며 실내소음에 유사한 기여도 특성을 나타내기 때문에 동일한 하나의 가진원으로 판단할 수 있다. 디젤엔진/파워트레인은 실내소음 중 76 Hz에서 높은 상관관계를 나타내고 있다. 후면부 판넬 및 하부 판넬에 대한 실내소음 스펙트럼 분석은 Figs. 7, 8과 같으며 약 76 Hz에서의 피크점이 디젤엔진/파워트레인과 동일하게 높은 상관

관계를 나타낸다. 따라서 디젤엔진/파워트레인은 해당주파수에서 구조소음의 형태로 판넬을 통해 전달되어 실내소음을 유발하였다고 판단된다.

후면부 판넬 및 하부 판넬에서는 보조석에서 디젤엔진/파워트레인에서 나타나지 않은 두 개의 피크점이 더 존재하였으며 이는 보조석 근처의 구조물의 공진에 의한 구조소음이 발생하였다고 판단할 수 있다. 디젤엔진/파워트레인 및 판넬과 관련된 소음은 각각의 가진원이 연관되어 있기 때문에 일반 기여도 함수를 활용하는데 제한이 있다. 상호연관된 신호에 대하여 전달경로 및 소음원별 기여도를 분석하기 위하여 부분기여도 함수를 활용하고자 한다. 앞에서 정리한 부분기여도 함수에서는 서로 상관된 두 신호

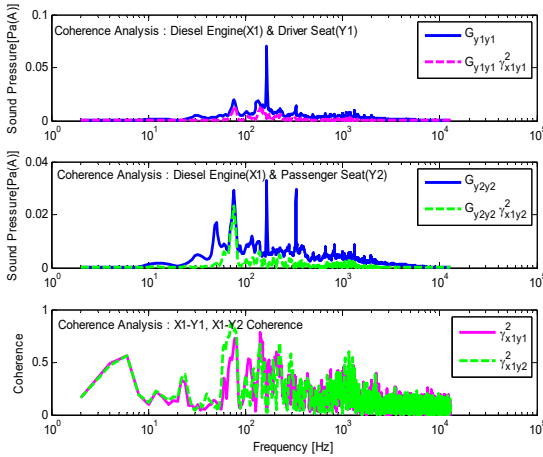


Fig. 5 Spectral analysis of diesel engine (Y1,Y2)

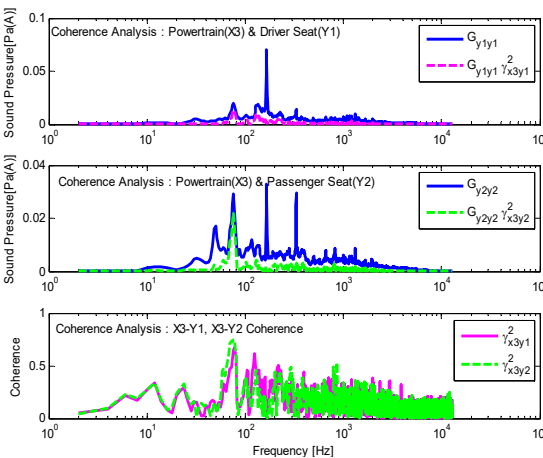


Fig. 6 Spectral analysis of powertrain (Y1,Y2)

Table 1 Inputs of partial coherence analysis

Case	$x_1$	$x_2$
Case 1	$x_1$ : diesel engine	$x_2$ : rear panel
Case 2	$x_1$ : rear panel	$x_2$ : bottom panel
Case 3	$x_1$ : bottom panel	$x_2$ : rear panel

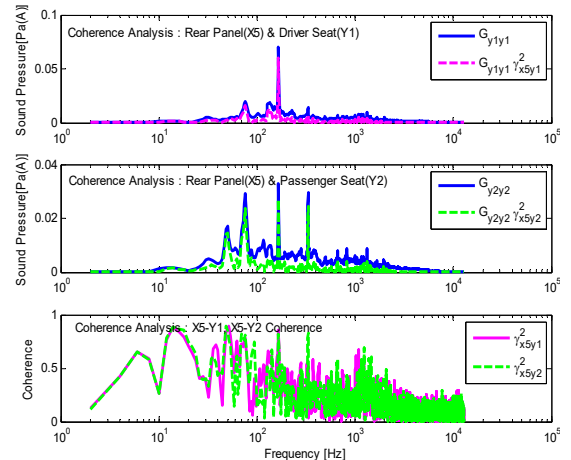


Fig. 7 Spectral analysis of rear panel (Y1,Y2)

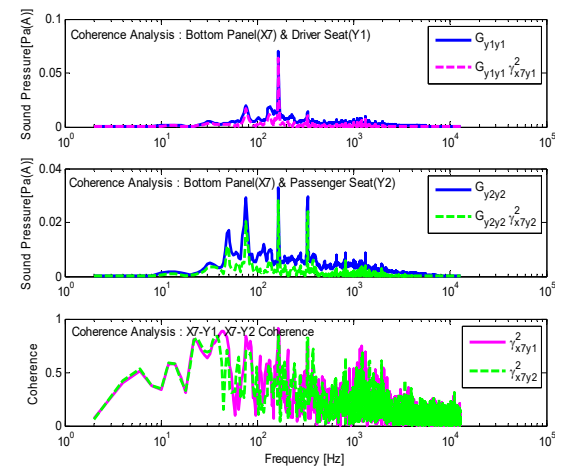


Fig. 8 Spectral analysis of bottom panel (Y1,Y2)

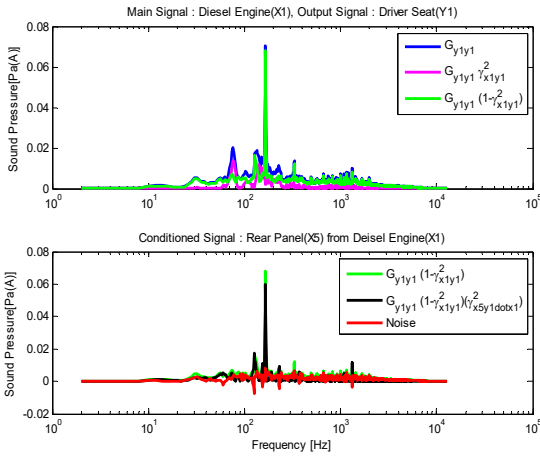


Fig. 9 Partial coherence analysis of Y1 (Case 1)

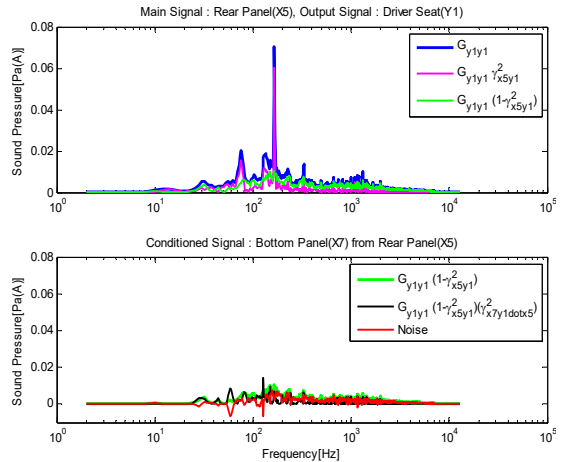


Fig. 10 Partial coherence analysis of Y1 (Case 2)

에서 하나의 상관된 성분을 모두 제거한 잔차 입력 신호를 분석하게 된다. 두 신호에서 어떠한 성분이 제거된 잔차 신호를 분석하는지에 따라 물리적인 의미와 전달경로에 대한 해석이 달라진다.

이 연구에서는 Table 1과 같은 세 가지 경우에 대하여 부분기여도 분석을 수행하고자 한다. Case 1에서는 후면부 판넬에서 디젤엔진/파워트레인과 연관된 성분이 제거된 잔차신호에 대하여 분석을 수행하였으며 그 결과는 Fig. 9 및 Fig. 12와 같다. 실내소음 중 76 Hz 성분의 경우 디젤엔진/파워트레인과 연관성이 높으며 이를 제외한 잔차 신호는 매우 작기 때문에 해당 주파수는 구동원에서 전달된 구조소음이라고 판단할 수 있다.

실내소음에서 운전석 위치에서는 166 Hz, 보조석의 위치에서는 50 Hz, 166 Hz, 332 Hz 성분의 소음이 추가적으로 존재한다. 해당 성분의 경우 구동원과 연관된 성분이 적기 때문에 캐빈의 구조 공진으로 판단할 수 있다. 166 Hz의 경우 운전석과 보조석에서 공통적으로 나타났으나 50 Hz 및 332 Hz 성분은 보조석에서만 크게 존재함에 따라 50 Hz 및 332 Hz 성분은 보조석 근처 판넬의 공진이라 판단된다.

Case 2 및 Case 3에서는 후면부 판넬과 하부 판넬을 각각의 가진원으로 설정하여 두 개의 판넬이 연관된 성분을 제외한 각각의 잔차 입력을 분석하였으며 그 결과는 Fig. 10~14와 같다. 잔차 분석 결과 후면부 판넬과 하부 판넬은 하나의 강제임에 따라 가진원을 구분하기에 적합하지 않다.

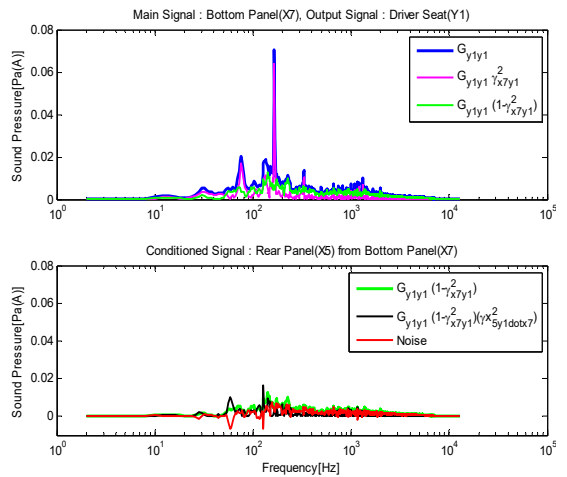


Fig. 11 Partial coherence analysis of Y1 (Case 3)

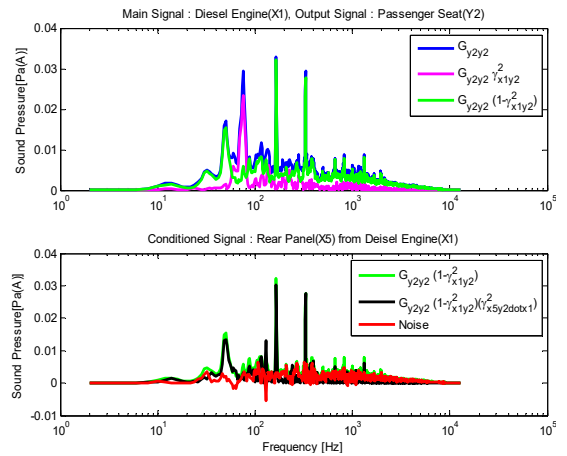


Fig. 12 Partial coherence analysis of Y2 (Case 1)

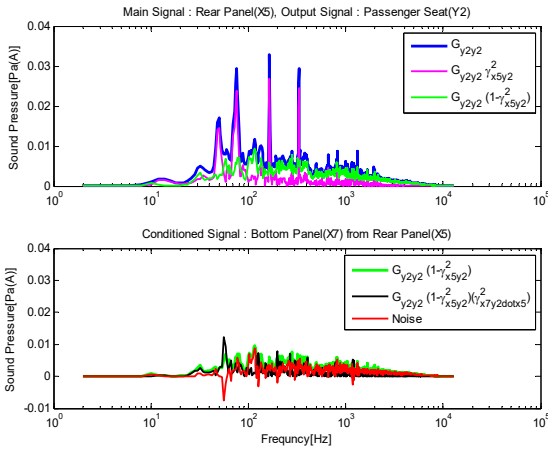


Fig. 13 Partial coherence analysis of Y2 (Case 2)

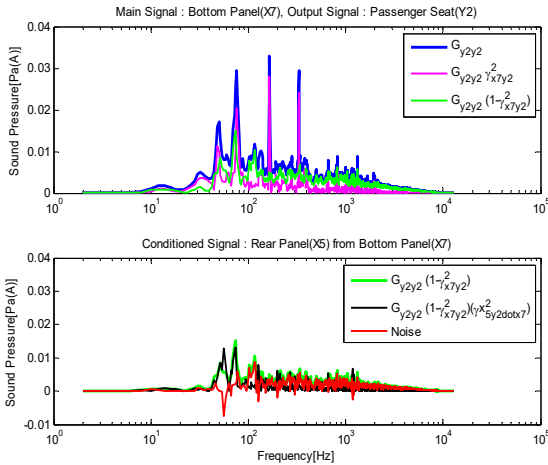


Fig. 14 Partial coherence analysis of Y2 (Case 3)

### 3. 결론

전술차량 캐빈 내부의 실내소음은 다양한 가진원에 의하여 영향을 받는다. 일반적으로 캐빈 내부 소음은 300 Hz 미만의 저주파소음과 400 Hz 이상의 공기소음(풍절음, 흡출음, 뿔소음 등)으로 구분된다. 캐빈 저주파 실내소음은 구동부에서 전달된 구조소음과 캐빈에서 공진으로 인해 발생하는 구조소음으로 구분할 수 있다. 이 연구에서는 저주파 실내소음의 원인을 구분하기 위하여 전달경로 및 부분기여도 분석을 수행하였다. 시험조건에 따라 20 km/h, 50 km/h, 70 km/h의 속도 및 화생방장치의 작동유무를 달리하였으며, 엔진/과워트레인, 캐빈 내부 판넬에는

가속도계를 부착하고 운전석과 보조석의 위치에 마이크로폰을 설치하였다. 가진원의 주파수는 속력에 따라 달라지므로 전달경로 분석에서는 70 km/h 조건에 대하여 부분기여도 분석을 수행하였다.

부분기여도 분석 결과 캐빈내부의 저주파 실내소음 중 76 Hz 성분의 경우 구동원에서 기인하였으며, 다른 성분의 경우 캐빈의 구조공진에 의해 소음이 발생하였다고 판단된다. 운전석/보조석에서 166 Hz 성분의 구조공진 소음이 공통적으로 나타났으며 보조석 주변의 공진으로 인하여 50 Hz, 332 Hz 성분의 구조공진 소음이 추가적으로 나타났다. 하부강판과 후면부 강판의 경우 모든 주파수 대역에서 잔차 신호가 낮게 나타나며 하나의 강체로 움직이기 때문에 신호를 분리할 수 없었다.

이 연구에서는 캐빈 내부 실내소음의 주파수별 가진원을 분석하였다. 해당 주파수의 소음을 저감하기 위하여 가진력의 크기 혹은 공진 판넬의 고유진동수를 재설정할 필요성이 있다. 고주파 소음은 일반적으로 공기소음과 연관성이 높기 때문에 사운드 카메라 등을 사용하여 공기유입 경로를 파악하고 이를 차단하는 추가적인 분석이 요구된다.

### 후 기

이 연구는 국방기술품질원 자체연구로 실시되었으며 군사보안상 문제가 없음을 확인함.

### References

- (1) Mohanty, A. R., St. Pierre, B. D. and Suruli-Narayanasami, P., 2000, Structure-borne Noise Reduction in a Truck Cab Interior Using Numerical Techniques, Applied Acoustics, Vol. 59, No. 1, pp. 1~17.
- (2) Castillo, M. S., 2001, Noise Control for Heavy Duty Trucks, a Systems Approach, SAE Technology Paper, 2001-01-1531.
- (3) Okubo, N., Okumura, Toi, T., 2009, Noise Reduction in Truck Cabin by Design Change of Floor Panel, Proceeding of the IMAC-XXVII.
- (4) Chen, S. M. and Wang, D. G., 2011, Interior Noise Prediction and Analysis of Heavy Commercial Vehicle Cab, Society of Automotive Engineering



International.

(5) Choi, K. S., Jeong, W. B., Han, H. S. and Kim, M. S., 2009, Noise-source Identification of Evaporator Using Partial Coherence Function, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 4, pp. 347~354.



**Sungho Park** received a B.S. in Mechanical Engineering from Hanyang University in 2010 and received a M.S. in Mechanical Engineering from KAIST in 2013. Mr. Park is currently a Researcher at Defense Agency for Technology and Quality, Busan, Korea.



**Kyunghyun Lee** received a B.S. and M.S. in Naval Architecture and Ocean Engineering from Seoul National University in 2008 and 2011 respectively. Mr. Lee is currently a Researcher at Defense Agency for Technology and Quality,

Busan, Korea.



**HyungSuk Han** received a B.S. in Production and Mechanical Engineering from Pusan National University in 1996. He then went on to receive his M.S. and Ph.D. degrees in Mechanical Engineering from Pusan National University in 1998 and 2007, respectively. Dr. Han is currently a Senior Researcher at Defense Agency for Technology and Quality, Busan, Korea.



**Soohong Jeon** received a B.S. in Production and Mechanical Engineering from Pusan National University in 2007. He then went on to receive his M.S. and Ph.D. degrees in Mechanical Engineering from Pusan National University in 2009 and 2014, respectively. Dr. Jeon is currently a Senior Researcher at Defense Agency for Technology and Quality, Busan, Korea.