

시장에서 국산 트랙터의 기술 경쟁력 제고가 요청됨에 따라 소음은 시급히 해결해야 할 과제의 하나로 대두되고 있다.

본 연구는 국내에서 생산되고 있는 농용 트랙터 중에서 비교적 소음 수준이 높은 것으로 알려지고 있는 GT452D를 대상으로 하여 안전캡 내부의 음압과 음향 강도를 측정하고 이를 분석하여 캡의 내부 소음 수준을 구명할 목적으로 수행되었다.

2. 연구사

笈田(1983) 등은 견인 상태와 정지 상태에서 각각 트랙터의 캡 진동과 캡 내부의 소음 수준을 측정하였다. 그 결과에 의하면 정지, 무부하 주행, 부하 주행 상태에서 캡 내부의 소음 수준에는 큰 차이가 없었으며, 주행시에는 변속 기어, 차동 기어 등 기어에 의한 소음과 타이어의 리그 형상, 노면 요철에 의한 진동 때문에 저주파 영역의 소음 수준이 높아지며, 견인력이 증가하면 기관 폭발음에 의한 고주파 영역의 소음 수준이 증가한다고 하였다. 또한, 정지 상태에서 기관 속도가 1,000rpm일 때 소음 수준은 캡을 장착하였을 때 가 장착하지 않았을 때보다 3.5dB(A)가 더 높았으며, 100Hz 이하에서는 반대로 캡을 장착하지 않았을 때가 장착하였을 때보다 높았다고 보고하였다.

Carletti(1991) 등은 로더의 캡 내부로 전달되는 소음의 소음원을 구명하기 위하여 음향 강도법을 이용한 바 있으며, Shiyon(1990) 등은 캡 내부의 소음 분포를 구명하기 위하여 50개 지점에서 소음의 음압 수준을 측정한 바 있다. 로더의 경우, 운전자 위치에서 감지되는 소음은 주로 기관과 변속기에 의하여 발생되며, 유압 펌프, 토크 컨버터, 배기관, 공기 여과기, 콘트롤 밸브의 영향을 받는다고 하였다. 또한, 소음의 주파수 대역은 100~5,000Hz라고 하였으며 운전자 위치에서 소음 수준은 캡의 문이 닫혀 있을 때가 열려 있을 때보다 1~3dB(A) 더 높았다고 하였다. 이

는 캡의 틈새나 구멍을 통하여 소음이 캡 내부로 전파되고 그 내부에서 잔향이 이루어지기 때문인 것으로 분석하였다.

3. 소음 측정

가. 캡 내부의 소음 형태

캡 내부의 소음은 전달 방식에 따라 공기 기인 소음과 구조 기인 소음으로 나눌 수 있다. 엔진을 음원으로 하여 엔진부에서 방사된 소음은 기관 실과 노면 등에 반사된 후 대시(dash) 판넬이나 바닥면을 통하여 차실 내부로 전달된다. 이를 공기 기인 소음이라고 한다. 구조 기인 소음은 기관의 진동이 동력 전달계, 차량 몸체를 통하여 차량의 내부 공간을 싸고 있는 판넬부로 전달되어 판넬재의 진동과 음향 방사 특성에 의하여 발생하는 소음을 말한다.

또한 소음은, 발생 부위에 따라서 기관 소음, 흡배기 소음, 구동계 소음, 타이어 소음 등으로 나눌 수 있다.

나. 시험 트랙터

본 연구에서 시험 트랙터로 사용한 모델은 국내에서 비교적 소음 수준이 높은 것으로 알려지고 있는 GT452D이었다. 이 트랙터는 수냉 4기통, 배기량 2,505cc, 최대 출력 33.1kW/2,600rpm, 압축비 22:1인 디젤 기관을 탑재한 4륜 구동형이다. 안전캡은 H사가 제작한 것으로서, 앞부분은 경질 고무와 볼트로써 변속기 케이스와 연결되어 있으며 뒷부분은 후차축부의 서브 랜다에 부착되어 있다. 캡 바닥과 변속기 표면 사이에는 약 3cm 높이의 공간이 형성되어 있으며 전후, 좌우는 창으로 되어 있다. 안전캡의 외형 치수는 길이 1.45m, 폭 1.02m, 높이 1.55m이었다.

다. 소음 측정 조건

소음은 다음과 같은 상태에서 측정하였다.

- 1) 트랙터의 벨러스트는 없는 상태로 하였다.
- 2) 측정 지역은 조용하고 개방된 지역으로서 소음 수준은 트랙터 소음 수준보다 10dB(A) 이상 낮은 지역으로 하였다.
- 3) 트랙터는 그림 1에서와 같이 구동축이 회전할 때 변속기에서 발생하는 소음을 포함할 수 있도록 전후 차축의 좌우를 통나무로 받쳐 구동축이 지면으로부터 10cm 정도 떨어지게 하였다.

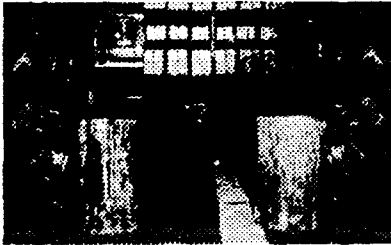


Fig. 1. Supports of tractor body.

- 4) 측정은 쾌청한 날씨에 바람이 없을 때 실시하였다.
- 5) 캡의 문과 창문은 모두 닫은 상태에서 측정하였다.
- 6) 측정시 변속 단수는 최고 주행 속도(20km/h)의 3/5에 가까운 속도인 고속 3단으로 하였으며 구동은 4륜 구동으로 하였다.
- 7) 기관 속도는 정격 회전 속도인 2,600rpm을 유지하였다.
- 8) PTO축은 정지 상태로 하였다.
- 9) 노면은 평탄한 아스팔트로 하였다.
- 10) 운전자가 탑승한 상태에서 측정하였다.

라. 소음 수준

음압 수준은 음압을 측정하여 기준 음압에 대한 데시벨로 나타내었으며, 다음 식으로 계산하였다.

$$SPL = 20 \log_{10} \frac{P}{P_{ref}}$$

여기서

SPL = 음압 수준, dB

P = 측정 음압, Pa

P_{ref} = 기준 음압, 20×10^{-6} Pa

측정 주파수 대역은 20~20,000Hz까지 1/3 옥타브 밴드로 하였으며, 주파수 보정은 A-보정(A-weighting)으로 하였다. 1회 측정값은 50회의 앙상블을 평균(ensemble averaging)한 값으로 하였다. 측정치는 FFT 분석기의 3.5인치 디스켓에 저장하였다. 장비는 측정을 시작하고 마칠 때마다 교정기로써 교정하였다. 그림 2는 음압 측정에 사용된 장비의 구성도이다.

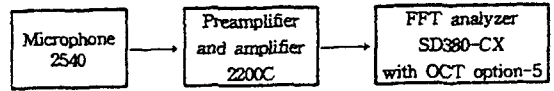


Fig. 2. Data acquisition system for sound pressure measurement.

운전자 위치 소음은 OECD 코드 5의 안전 프레임(ROPS) 내부 소음 측정 방법에 따라 측정하였다. OECD 방법은 그림 3에서와 같이 운전석 기준점(seat reference point)으로부터 옆으로 250mm, 위로 790mm, 트랙터의 앞쪽으로 150mm 떨어진 지점에서 마이크로폰이 트랙터의 전방을 향하도록 한 후 측정한다. 이 때 옆쪽은 왼쪽 또는 오른쪽 중에서 소음 수준이 높은 쪽으로 하였다.

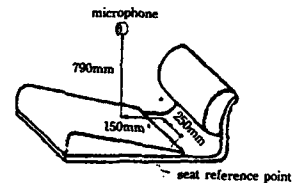


Fig. 3. Position of microphone for cab noise measurement.

캡 내부의 음압과 음향 강도를 측정할 평면을 결정하기 위하여 그림 4에서와 같이 계기판 위 ①, 운전자 앞면 아래 부분②, 발판③, 장판지부④, 좌석 아래⑤, 좌석 뒷판넬⑥, 천장⑦, 앞 유리창⑧, 왼쪽 문⑨, 오른쪽 문⑩, 왼쪽 유리창⑪, 오른쪽 유리창⑫, 뒷유리창⑬, 모두 13개 표면의 중심에서 각 평면과 수직인 방향으로 8cm 떨어

진 지점에서 캡 바깥을 향하도록 마이크론을 설치하여 음압을 측정하였다.

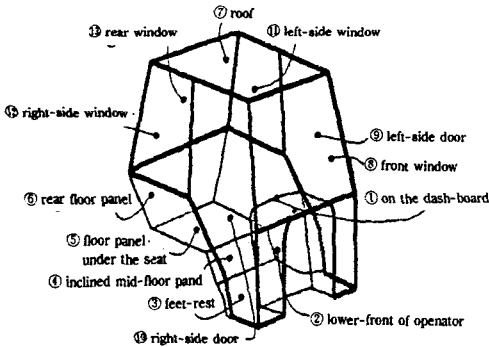


Fig. 4. Sound pressure measurement points inside the cab.

측정 주파수 대역은, 운전자 위치 소음을 Flat-weighting 1/3 옥타브 밴드로 분석하였을 때 소음 수준이 90dB(A) 이상인, 25~500Hz까지로 하였다. 측정은 좌석을 떼어 내고 실시하였다.

마. 음향 강도 수준

음향 강도 수준은 음향 강도를 측정하여 기준 음향 강도에 대한 데시벨로써 나타내었으며, 다음 식에서와 같이 계산하였다.

$$L_I = 10 \log_{10} \frac{I}{I_{ref}}$$

여기서

L_I = 음향 강도 수준, dB

I = 측정 음향 강도, watts/m²

I_{ref} = 기준 음향 강도, 10⁻¹² watts/m²

측정할 표면으로부터 8cm 떨어진 위치에서 측정면과 평행한 가상면을 설정하고, 이 가상면을 가는 실로써 10×10cm인 격자점으로 나누어 각 격자점에서 세 직교 방향으로 음향 강도를 측정하였다. 측정 주파수 대역은, 운전자 위치 소음을 Flat-weighting 1/3 옥타브 밴드로 분석하였을 때 소음 수준이 90dB(A) 이상인, 31.5~500Hz로 하였다. FFT 분석기의 2개 채널을 이용하여 두 마이크로폰으로 입력된 소음 신호의

파워 스펙트럼 밀도 함수와 상호 스펙트럼 밀도 함수를 구하여 분석기의 3.5인치 디스켓에 저장하였다. 음향 강도 측정 프로브의 두 마이크로폰 사이는 측정하고자 하는 주파수 대역에서 최대 오차가 1dB(A) 이하가 되도록 50mm로 하였다. 그림 5는 운전자 장판지부의 가상면에 표시한 격자를 나타낸 것이다. 이 때 공기의 밀도는 1.21 kg/m³이었으며 음속은 캡 내부의 온도가 약 30℃이었기 때문에 350m/s로 하였다. 측정 장비는 측정을 시작하고 마칠 때마다 교정기로서 재교정하여 사용하였다. 음향 강도를 측정하고 분석하는 데 사용한 장비의 구성은 그림 6과 같다.

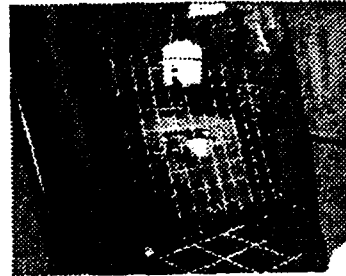


Fig. 5. Grid setting on the inclined mid-floor panel.

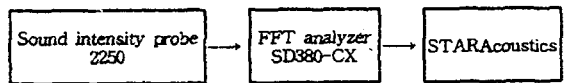


Fig. 6. Measurement and analysis of sound intensity.

음향 강도를 측정된 평면은 소음 수준이 92dB(A) 이상인 4개의 평면 즉, 발판③, 장판지부④, 좌석 아래⑤, 좌석 뒷판넬⑥과 계기판 위①, 운전자 앞면 아래 부분②를 추가로 포함하여 모두 6개의 평면으로 하였다.

4. 소음 분석 및 고찰

가. 운전자 위치 소음

운전자 위치에서 측정된 음압을 1/3 옥타브

밴드로 분석한 결과는 그림 7과 그림 8에서와 같다. 그림 7은 flat-weighting한 결과이며, 그림 8은 A-보정(A-weighting)한 결과이다.

그림 7에서 보는 바와 같이 중심 주파수가 40, 80, 160, 250, 315Hz일 때 음압 수준이 다른 주파수에 비하여 상대적으로 높았다. 이 주파수 중 40, 80Hz는 4실린더 4행정 기관의 회전 주파수 43.3Hz와 폭발 주파수인 86.7Hz에 의한 영향인 것으로 판단된다.

음향 강도는 이 주파수를 포함한 500Hz의 범위에서 측정하였다. 그 이유는 캡 내부 구조물의 진동에 의한 소음은 이 주파수 대역에 충분히 포함될 수 있으며, 또한 공기 기인 소음의 경로를 구명하는 데에도 충분한 범위의 주파수 대역으로 판단되었기 때문이었다.

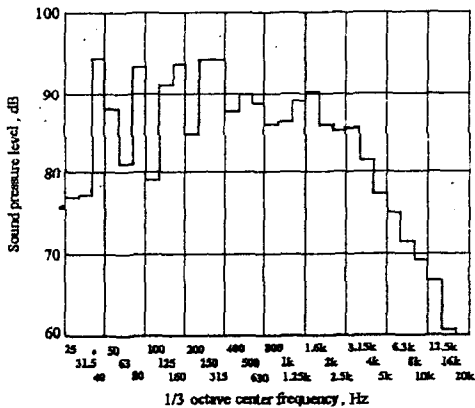


Fig. 7. 1/3 octave band sound pressure level at the operator position (Flat-weighted).

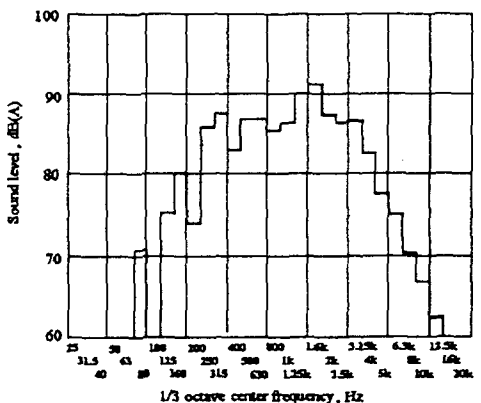


Fig. 8. 1/3 octave band sound level at the operator position (A-weighted).

A-보정(A-weighting)한 소음을 분석한 결과에 의하면, 소음은 주로 1~2kHz의 주파수 범위에서 높고, 운전자 위치 소음 수준은 98.6dB(A)이었다.

나. 안전캡 내부 소음

안전캡 내부의 소음 수준은 표 3에서와 같이 트랙터의 전면을 바라볼 때 왼쪽보다는 오른쪽 부분에서 높았으며, 바닥 부분에서 특히 높았다. 소음 수준은 대시 보드의 89dB(A)에서부터 좌석 아래 판넬의 96dB(A)의 범위이었으며 특히, 발판③, 장판지부④, 좌석 아래⑤, 좌석 뒷판넬⑥의 소음 수준이 다른 부위보다 상대적으로 높았다. 이 부분의 소음 수준은 모두 92dB(A) 이상이었다.

Table 3. Sound level at the surfaces inside the cab in a range 25~500Hz

Surface		dB(A)
On the dash board	①	89.0
Feet-rest	③	95.2
Inclined mid-floor panel	④	94.2
Floor panel under the seat	⑤	96.0
Rear floor panel	⑥	94.8
Roof	⑦	91.9
Front window	⑧	92.4
Left-side door	⑨	90.4
Right-side door	⑩	91.9
Left-side window	⑪	90.5
Right-side window	⑫	91.3
Rear window	⑬	90.0

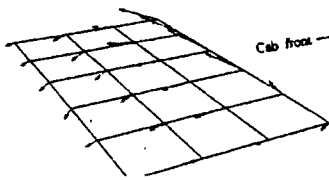
다. 음향 강도

FFT 분석기의 디스켓에 저장된 소음 신호의 파워 스펙트럼 밀도 함수와 상호 스펙트럼 밀도 함수를 음향 분석용 소프트웨어 STARAcoustics에 입력하여 분석하였다. 음향 강도 벡터는 STARAcoustics를 이용하여 A-보정, 1/3 옥타브 밴드로 분석한 결과이다. 그러나, 본 논문에서

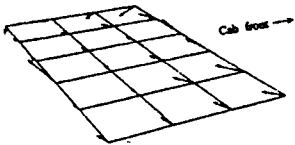
제시한 음향 강도 벡터는 그 크기가 크고 소음이 캡 안쪽으로 방사되는 주파수 대역의 것으로 제한하였다. 아래의 음향 강도 벡터도에서 C.F.는 주파수 대역의 중심 주파수를 나타내며, Max.는 해당 주파수 대역에서 최대 음향 강도 수준을 나타낸 것이다.

(1) 계기판 윗부분

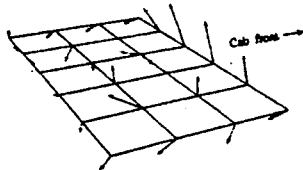
계기판 윗부분에 대한 음향 강도 수준은 그림 9에서와 같다.



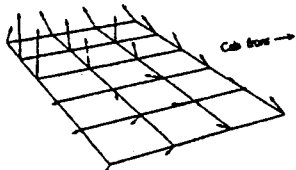
C.F. 80Hz
Max. 88.9dB(A)



C.F. 100Hz
Max. 76.7dB(A)



C.F. 125Hz
Max. 84.1dB(A)



C.F. 315Hz
Max. 92.1dB(A)

Fig. 9. Sound intensity levels on the plane of dash board.

중심 주파수가 80, 125, 315Hz인 대역의 음향 강도가 100Hz인 경우보다 크고, 중심 주파수가

80, 125Hz인 대역에서는 계기판 앞쪽의 음향 강도가 상대적으로 크다. 이는 기관 후부의 연료통과 연료통을 싸고 있는 계기판 앞 판넬의 진동 또는 기관에서 연료통쪽으로 뚫려 있는 개구부를 통하여 전달된 소음 때문인 것으로 판단된다. 특히, 중심 주파수가 315Hz일 때 왼쪽 부분에서 음향 강도가 큰 것은 캡 왼쪽 아래의 모서리를 통하여 들어 오는 공기 기인 소음 때문인 것으로 판단된다.

계기판 윗부분의 최대 음향 강도 수준은 중심 주파수가 315Hz일 때 92.1dB(A)이었다.

(2) 운전자 앞면 아래 부분

운전자 앞면 아래쪽은 스티어링 핸들, 브레이크 페달, 클러치 페달, 변속기 레버가 있는 부분이다. 이 평면에 대한 음향 강도 수준은 그림 10에서와 같다.

캡 앞쪽 아래 부분에서 캡 중심을 향하여 중심 주파수가 100, 200, 315Hz인 소음이 전파되고 있으며, 계기판 양옆에서는 중심 주파수가 40Hz인 소음이 방사되고 있다. 중심 주파수가 400, 500Hz인 경우에는 변속기 레버 부근과 바닥 부분에서 음향 강도가 상대적으로 높았으며, 조향 핸들 부근에서는 중심 주파수가 500Hz인 소음이 방사되고 있다. 조향 핸들부의 소음은 조향계를 통하여 전달된 진동이 원인인 것으로 판단된다. 캡 앞쪽 아래 부분은 캡이 완전히 밀봉되지 않았기 때문에 엔진부의 소음이 공기를 통하여 전달되는 공기 기인 소음으로 판단된다. 운전자의 오른쪽 부위에서 중심 주파수가 40, 125, 160, 250Hz인 소음의 음향 강도가 높은 것은 오른쪽 외부에 부착되어 있는 소음기의 영향 때문인 것으로 판단된다.

운전자 앞면 아래 부분에서 최대 음향 강도 수준은 160Hz와 500Hz에서 94dB(A) 정도이었다.

(3) 운전자 발판 부분

운전자 발판의 아래쪽은 변속기 케이스와 가까운 부분이다. 이 부분에 대한 음향 강도 수준은 그림 11에서와 같다.

농용 트랙터의 안전캡 내부 소음 감소에 관한 연구(I)

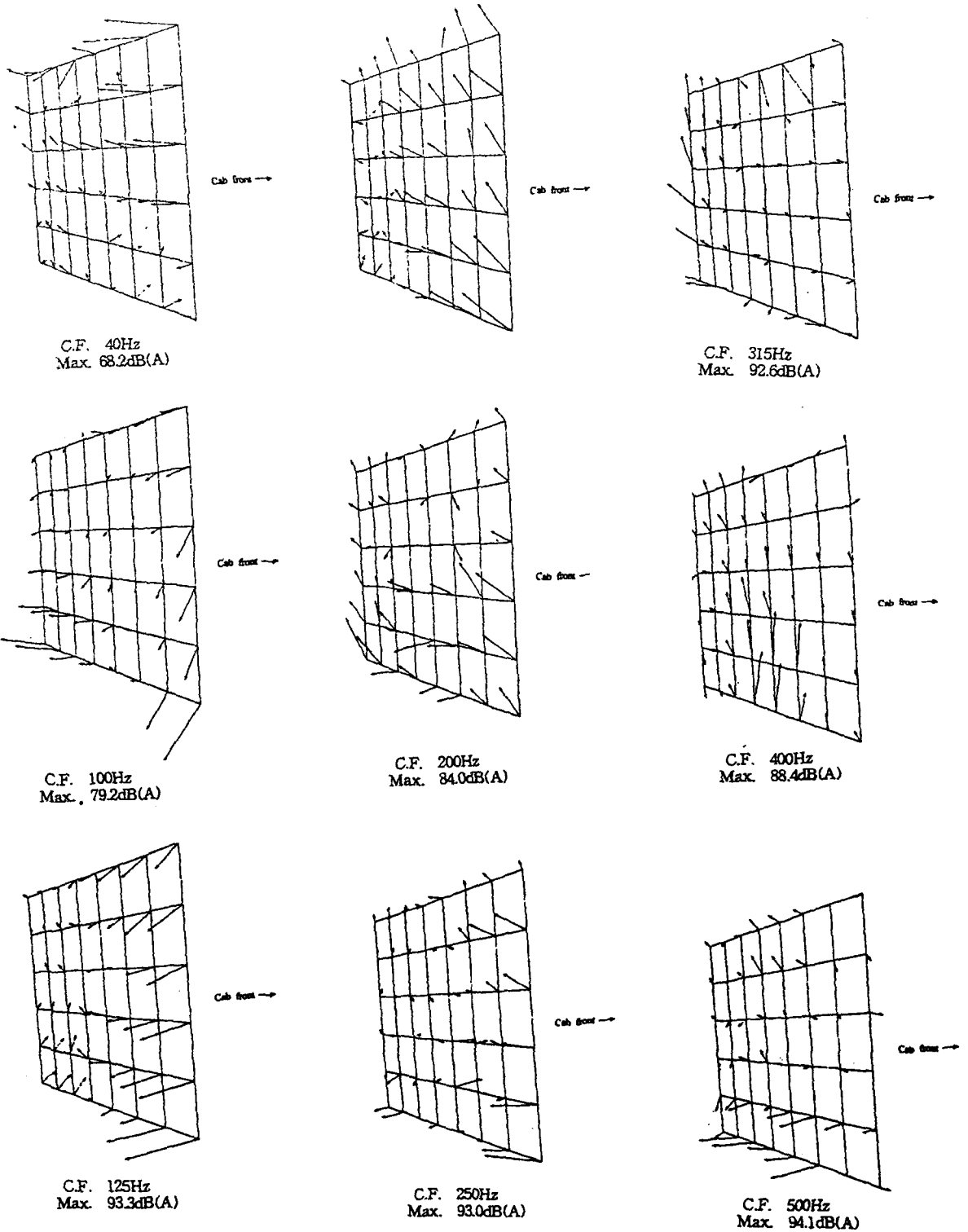


Fig. 10. Sound intensity levels on the plane of operator's lower front area.

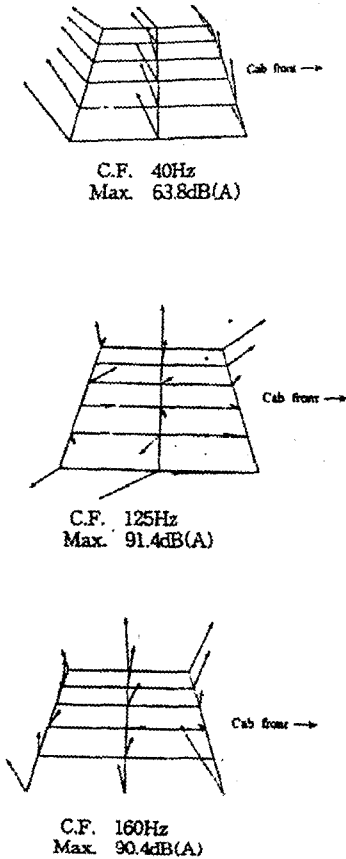


Fig. 11. Sound intensity levels on the plane of operator's feet rest.

그림 11에서와 같이 중심 주파수가 40, 125, 160Hz인 소음이 바닥에서 캡 내부로 전파되고 있다. 이 소음은 캡의 방진 장치가 부실하여 차체의 진동이 캡으로 전달되어 발생하는 구조 기인 소음으로 판단된다. 최대 음향 강도 수준은 125Hz에서 91.4dB(A)이었다.

(4) 운전자 장딴지부

운전자 장딴지부는 주차 브레이크 레버와 PTO 레버가 부착되어 있는 부분으로서, 이 부분에 대한 음향 강도 수준은 그림 12에서와 같다.

이 부분에서는 중심 주파수가 125, 160Hz인 소음이 발판 위쪽 밀면으로부터 캡의 내부로 전파되고 있다. 이 소음도 캡의 방진이 부실하여 발생하는 구조 기인 소음으로 판단된다. 중심 주

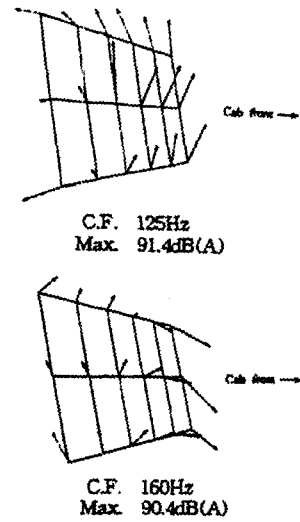


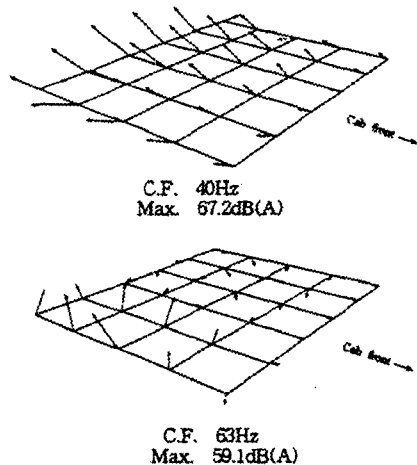
Fig. 12. Sound intensity levels on the plane below operator's calf (inclined mid-floor panel).

파수가 160Hz인 경우에는 PTO 레버가 부착되어 있는 부분에서 특히 음향 강도가 크다. 이 소음은 변속 장치에서 일어난 진동이 레버와 레버 덮개로 전파되어 발생한 소음으로 판단된다.

이 부분에서 최대 음향 강도 수준은 125Hz에서 91.4dB(A)이었다.

(5) 운전자 좌석 아래 부분

운전자의 좌석 아래 부분에 대한 음향 강도 수준은 그림 13에서와 같다.



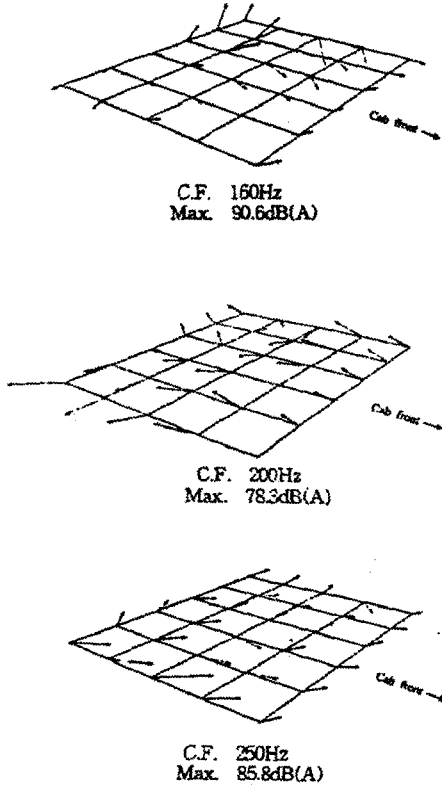


Fig. 13. Sound intensity levels on the plane below operator's seat.

운전자의 좌석 아래 부분에서는 중심 주파수가 40, 63, 160, 200, 250Hz인 소음이 바닥 표면으로부터 캡 내부로 전파되고 있다. 중심 주파수가 40Hz인 소음은 웬다 프레임의 부착점을 통하여 전달되는 진동에 의한 것으로 판단된다. 특히, 유압 제어 레버 부근에서 중심 주파수가 63Hz인 소음의 음향 강도가 큰 것은 레버가 있는 틈사이로 뒷바퀴의 구동음의 유입되기 때문인 것으로 판단된다.

운전자의 좌석 아래 부분에서 최대 음향 강도 수준은 160Hz에서 90.6dB(A)이었다.

(6) 운전자 좌석 뒷판넬 부분

운전자 좌석 뒷판넬 부분에 대한 음향 강도 수준은 그림 14에서와 같다.

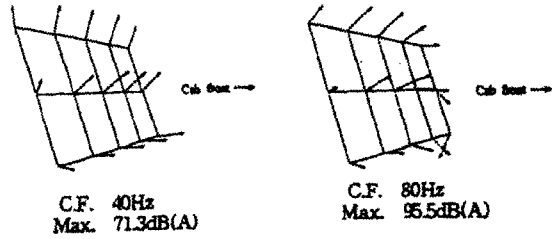


Fig. 14. Sound intensity levels on the plane of operator's rear panel.

이 부분에서 캡 내부로 방사되는 소음은 주로 중심 주파수가 40, 80Hz인 소음이었다. 이 소음은 웬다 프레임의 부착점에서 발생하는 진동이 그 원인으로 판단된다. 특히, 중심 주파수가 80Hz인 소음은 다른 주파수 대역에 비하여 음향 강도가 높은 것으로 나타났다.

이 부분에서 최대 음향 강도 수준은 80Hz에서 95.5dB(A)이었다.

5. 요약 및 결론

이 연구는 국내에서 비교적 소음 수준이 높은 것으로 알려진 GT452D 디젤 45마력 트랙터를 대상으로 하여 안전캡의 내부 소음을 감소시키기 위한 사례 연구로서 수행되었다. 캡 내부로 전달되는 소음의 크기와 방향을 구명하기 위하여, 운전자 위치 음압과 안전캡 내부의 6개 평면에 대한 음향 강도를 측정하고 분석하였다.

운전자 위치 소음 수준은 기관의 속도를 정격 속도인 2,600rpm으로 유지하였을 때 98.6dB(A)이었으며 이는 OSHA의 하루 4시간 소음 노출 한계를 초과하는 수준이었다. 운전자 위치 소음 수준에 큰 영향을 미치는 주파수 범위는 31.5-500Hz이었으며, 이 주파수 대역에서 1/3 옥타브 중심 주파수에 대한 소음 수준은 모두 90dB(A) 이상이었다.

운전자 위치 소음에 큰 영향을 미치는 주파수

범위 31.5-500Hz에서 1/3 옥타브 중심 주파수에 대한 안전캡 내부의 6개 평면 즉, 발판부, 장판지부, 좌석 아래, 좌석 뒷판넬 위, 계기판 위 및 운전자 앞면 아래 부분에 대한 음향 강도를 측정하여 분석하였다. 분석 결과에 의하면 안전캡 내부로 전파되는 주 소음은 발판부와 운전석 뒷판넬의 진동에 의하여 발생되는 구조 기인 소음과 운전자 앞면 아래 부분의 개구부로 전달되는 공기 기인 소음으로 구명되었다. 변속기 케이스에서 발생하는 소음도 운전석을 향하여 방사되고 있는 것으로 확인되었다.

발판부, 운전석 뒷판넬, 운전자 앞면 아래 부분의 최대 음향 강도 수준은 각각 125Hz에서 91.4dB(A), 80Hz에서 95.5dB(A), 160Hz와 500Hz에서는 각각 94.4 dB(A)이었다.

참 고 문 헌

1. 유동호. 1995. 농용 트랙터의 안전캡 내부 소

음 감소에 관한 연구. 석사학위 논문. 서울대학교 농업생명과학대학.

2. 笈田 昭, 田中 孝, 高橋 弘行. 1983. 트랙터 캡의防振と内部騒音輕減に關する研究(第1報). 日本農業機械學會誌 45(3): 297-302.
3. Carletti, E. and I. Vecchi. 1991. Intensity vector measurements outside cabs of earth-moving machines. Noise Control Engineering Journal 37(3): 109-114.
4. Hakimi, A. H. and R. P. Kachru. 1974. Noise reduction in tractor cabs by isolation mounting. Noise Control Engineering 3(2): 60-65.
5. Shiyan, C. and C. Chonghou. 1990. Case history: a study on the noise control for wheel loader. Noise Control Engineering Journal 35(3): 109-114.
6. Suggs, C. W. 1987. Noise characteristics of field equipment. ASAE Paper No. 87-1598.