진동 및 제어 부문 특별세션

트랙터 운전실의 소음 저감에 관한 연구

김원진^{a*}, 은명우^a

Noise Reduction in Tractor Cabin

Wonjin Kim^{a*}, Myoungwoo Eun^a^a Department of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung University, 2800 Dalgubeoldaero, Dalseo-Gu, Daegu, 704-701, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	30	June	2014
Revised	28	July	2014
Accepted	28	July	2014

Keywords:

Experimental method
Noise source
Tractor cabin
Window method
Contribution of transmission the noise

ABSTRACT

This study focused on identifying the major noise source in a tractor cabin using experimental methods. The noise levels in a tractor cabin for different engine revolution speeds were analyzed to identify the noise source. The results showed that the power steering unit (PSU) was the major noise source in a tractor cabin. The PSU was moved to the outside from the inside of the cabin in order to reduce the noise in the tractor cabin. As a result, the noise levels on the left and right sides of the operator in the tractor cabin were reduced by 6.8 and 3.9 dB, respectively. Finally, the window method was introduced to evaluate the contribution of the transmission noise. The orders of significance in the tractor noise were the front, bottom, and left area, successively.

1. 서론

기계 산업이 발전하면서 트랙터의 대형화 및 대량생산이 이루어지고 있으며, 해외 농기업체들과 수출 경쟁을 할 만큼 트랙터 산업이 발전하고 있다. 최근 트랙터는 방사소음과 운전석 내부의 저소음과 저진동 실현에 대한 요구가 높아지고 있는 추세이다. 대형 트랙터를 장기간 운전함으로써 운전자는 심한 진동과 소음 등 유해한 작업 환경에 노출되며, 이는 장기적으로 신체 이상 혹은 건강상의 문제로 이어질 수 있다. 또한 운전자가 장기간 높은 수준의 소음에 노출되면 청력 손실이 일어나며, 생리적, 심리적 영향으로 작업능률도 저하된다.

트랙터 소음으로 인한 운전자의 작업능률 저하와 안전 문제를 위해 트랙터를 설계할 때에는 소음에 대한 안전대책을 강구하여야 한다. 그리고 해외 농기시장에서는 트랙터의 운전실 내부 소음수준을

80 dB 이하로 관리하고 있다. 그러나 국내에서 사용되고 있는 트랙터는 대부분 85 dB를 초과하고 있는 실정이다^[1]. 운전자의 작업능률 저하, 안전 문제뿐만 아니라 해외 농기 시장에서 국산 트랙터의 기술 경쟁력 향상을 위해 소음은 시급히 해결해야 할 과제이다.

가장 효과적인 소음저감 방법은 소음원의 파워레벨을 저감시키는 것이다. 트랙터의 경우에도 주 소음원인 엔진의 소음을 저감시킴으로써 최대의 효과를 얻을 수 있다. 그러나 이미 양산되고 있는 트랙터에서 엔진을 저소음 엔진으로 교체하거나, 트랙터 제조업체에서 엔진의 저소음 기술을 개발하는 데는 기술적, 경제적으로 한계가 있다. 따라서 기존 트랙터에 대한 소음저감 대책은 트랙터의 기본 구조를 변경하지 않는 범위에서 효과적으로 수립되어야 한다.

본 연구에서는 국내에서 생산되고 있는 트랙터 중에서 비교적 소음 수준이 높은 것으로 알려지고 있는 90 kW급 트랙터를 대상

* Corresponding author. Tel.: +82-53-580-5265

Fax: +82-53-580-5165

E-mail address: wjkim@kmu.ac.kr (Won Jin Kim).

으로 운전실 내부 소음을 분석하고, 그 결과에 따라 소음저감 대책을 수립하고자 한다.

2. 캐빈 실내소음 특성 분석

2.1 캐빈 내의 운전자 수음점 기준 소음레벨 분석

트랙터의 정확한 운전자 소음 특성을 규명하기 위해 Fig. 1과 같이 반 무향실에서 소음을 측정하였다^[2]. 소음 측정방법은 Fig. 2와 같이 운전자의 수음점을 기준으로 제작된 헬멧을 착용하고 좌, 우측 소음을 동시에 측정하였다^[3]. 트랙터는 공회전 상태(920 rpm)에서 최고출력(2328 rpm)까지 서서히 출력을 높이면서 20 rpm 간격으로 트랙터의 엔진회전수 변경에 따른 총합 소음레벨을 측정하였다. 측정 결과는 Fig. 3과 같으며, 엔진 회전수에 따른 트랙터의 좌, 우측 총합 소음레벨의 최대값은 좌측 2237 rpm에서 85.4 dB, 우측 1968 rpm에서 87.1 dB로 평가되었다. 이러한 좌,

우측 총합 소음레벨을 저감하기 위하여 소음원의 위치를 규명하고, 소음저감을 위한 대책이 필요하다.

2.2 운전자 소음의 주요 주파수 성분 및 소음원 분석

Fig. 4와 5는 최대 총합 소음레벨을 가지는 회전수의 소음 스펙트럼을 분석한 결과이다. Fig. 4는 2237 rpm에서 좌측 수음점의 소음 스펙트럼이고 Fig. 5는 1968 rpm에서 우측 수음점의 소음 스펙트럼이다. 주요 주파수 영역은 좌, 우측 모두 250 ~ 500 Hz 이다. Fig. 6과 7은 소음 스펙트럼을 엔진 회전수에 따른 Noise color map으로 나타낸 것이다. 좌, 우측 수음점 모두 기본 엔진회전수의 12차와 24차의 조화성분에서 소음레벨이 가장 높았다. 회전체에서는 order 성분의 소음이 발생하는데 이러한 소음원들은 엔진, Pump, 기어가 부딪히는 소리가 있다. 트랙터의 12차, 24차에 해당하는 주요 주파수 성분들은 PSU의 잇수가 12개인 기어의 맞물림 진동에 의해 발생되었다. PSU는 운전자의 핸들 조작의 안정성 및 조향성의 유익을 위해 개발된 유압식 조향장치로 주로 방

Fig. 1 Hemi-anechoic room

Fig. 2 Measuring equipment and measurement

Fig. 3 The noise overall level of the left and right receiver by rpm

Fig. 4 The noise spectrum in the left receiver (2237 rpm)

Fig. 5 The noise spectrum in the right receiver (1968 rpm)

Fig. 6 Noise color map in the left receiver

Fig. 7 Noise color map in the left receiver

항 및 위치 제어가 필요한 산업차량, 건설 중장비 및 농업기계 등에 사용되며, 높은 소음을 유발시키는 것으로 알려져 있다. 따라서 운전자 소음을 저감하기 위해 우선적으로 PSU를 캐빈의 외부로 이동하였다. PSU를 캐빈의 외부로 이동에 의해 PSU에 연결되는 선들이 길어지지만, 트랙터 조향에는 문제가 없으므로 PSU를 캐빈의 외부로 이동하였다.

3. 실험

3.1 PSU 외부 이동 상태에서의 운전자 소음 분석

운전자 소음에 가장 큰 영향을 주는 소음원이 PSU라고 판단하여 PSU를 캐빈 외부로 이동한 상태에서 운전자 소음레벨의 변화를 확인하였다. Fig. 8은 기존 캐빈 내에 위치하였던 PSU가 외부로 이동한 그림이다. Table 1은 PSU 위치 이동 전/후의 총합 소음레벨의 최대값과 주요 주파수 영역을 정리한 것이고, Fig. 9와 10

Fig. 8 Change of PSU location

Table 1 Comparison of maximum value of the noise level and the main frequency domain of before and after movement of PSU

Sound receiver	PSU position	engine speed (rpm)	SPL (dB)	dominant band (Hz)
left	inside	2237	87.1	250 ~ 500
	outside	2296	80.3	400 ~ 800
right	inside	1968	85.4	250 ~ 500
	outside	2263	81.5	400 ~ 800

은 PSU 위치 이동 후 최대 총합 소음레벨을 가지는 회전수의 소음 스펙트럼이다. Fig. 9는 좌측 2296 rpm에서의 소음 스펙트럼이고 Fig. 10은 우측 2263 rpm에서의 소음 스펙트럼이다. Fig. 11에서 PSU 외부 이동 상태에서는 대체적으로 좌, 우측의 회전수별 소음레벨이 유사하였으며, 소음이 가장 크게 발생하는 경우와 비교하여 좌측에서는 6.8 dB, 우측에서는 3.9 dB가 저감되었다. 또한 운전자 좌, 우측의 주요 주파수 영역은 기존 250 ~ 500 Hz에서 400 ~ 800 Hz로 변경되었다. 3 dB의 소음 저감은 인간이 소음을 들을 때, 2배로 저감되어 듣게 된다. 3.9 dB와 6.8 dB의 저감은 운전자에게 소음이 많이 저감되었다고 느낄 수 있는 수치이다.

Fig. 12와 13은 PSU 위치 이동 후 좌, 우측 소음 스펙트럼을 엔진 회전수에 따른 Noise color map으로 나타낸 것이다. PSU 위치 이동 후 소음레벨이 높은 12차와 24차 조화 주파수에서 소음저감을 확인할 수 있다. 이상의 결과에서 PSU 이동 후 트랙터의 소음저감 효과를 검증하였다.

Fig. 9 The noise spectrum of the left receiver after relocating PSU (2296 rpm)

Fig. 10 The noise spectrum of the right receiver after relocating PSU (2263 rpm)

Fig. 11 The noise level of the left and right receiver by rpm after relocating PSU

Fig. 12 Noise color map in the left receiver after relocating PSU

Fig. 13 Noise color map in the right receiver after relocating PSU

3.2 운전자 소음의 기여도 평가

앞에서 주요 소음원인 PSU의 위치 이동을 통하여 운전자 소음 레벨을 저감할 수 있었다. 캐빈 내 소음레벨을 추가적으로 저감하기 위해서는 주요 소음 기여도를 파악하는 것이 중요하다. 이 절에서는 운전자 소음의 기여도 평가를 실시하고 외부소음이 유입되는 틸트 및 부품을 분석하여 효과적인 소음저감 방안을 제시하고자 한다^[4]. 운전자 소음의 기여도 평가방법은 윈도우 메소드(window method)를 사용하였다. 이 방법은 각 음원을 1 개의 창으로 설정하고, 각각의 창이 실내 소음에 어느 정도의 영향을 주는지를 분석할 때 사용한다. 본 실험에서는 캐빈 내부에 상, 하, 전, 후, 좌, 우 6면에 흡음재와 차음재로 구성된 차단벽을 설치하고, 한면씩 차단벽을 제거하면서 소음레벨 및 주요 주파수 영역이 어떻게 변화하는지를 분석하였다. Fig. 14는 캐빈 내 차음재 및 흡음재를 설치한 모습이다. 측정장소는 조용하고 개방된 지역으로 암소음이 트랙터 소음 수준보다 10 dB 이상 낮은 지역이며^[5], 측정 시 트랙터는 엔진 최대 출력 상태인 2328 rpm을 유지하였다. 차음재는 소음의 기밀성을 증대하기 위해 투과손실이 높은 10 mm 두께의 PVC (poly vinyl chloride)를 사용하였다. 흡음재는 흡음률이 높은 50 mm 두께의 폴리에스터를 사용하였고, 밀도를 높이기 위해 흡음재를 압축하여 캐빈 내의 빈 공간에 충전하였다. 측정주파수는 2 kHz, 1/3 옥타브 밴드는 20 kHz까지 측정하였다. 마이크로폰은 운전석에서 높이 70 cm인 지점에서 트랙터의 전방을 지향하여 측정하였고, 그 결과는 Fig. 15에 나타내었다. 결과에서 총합 소음레

Fig. 14 The installation of PVC sound insulation and sound absorbing materials in the tractor operating room

(a) Noise spectrum

(b) 1/3 Octave band

Fig. 15 Noise spectrum and 1/3 octave band after relocating PSU

벨은 81.0 dB이고, 소음 스펙트럼의 피크성분은 엔진의 폭발 주파수(19.4 Hz)와 회전 주파수(38.8 Hz)의 조화성분이었다. 그리고 1/3 옥타브 밴드에서는 1 kHz 이하 영역에서 소음레벨이 우세한 것을 확인하였다.

윈도우 메소드에 의한 운전자 소음의 기여도 평가 결과는 Table 2에 나타내었다. 모든 면을 차단하였을 때의 총합 소음레벨은 74.4 dB로 기존 상태에서 6.7 dB 저감되었다. 오른쪽 차단벽을 개방했을 경우의 총합 소음레벨은 74.8 dB로 모두 차단했을 경우보다 0.4 dB 증가하였다. 뒷면을 개방했을 경우는 73.5 dB로 오른쪽 차단벽을 개방했을 경우보다 1.3 dB 감소하였다. 좌측, 아랫면, 앞면을 개방했을 경우에는 74.2, 75.4, 79.4 dB로 이전에 개방했을 경우보다, 0.7, 1.2, 4.0 dB 증가하였다. 뒷면을 개방했을 경우는 78.9 dB로 앞면을 개방했을 경우보다 0.5 dB 감소하였다.

Table 2 Noise contribution of the tractor operating room

Case	Condition	SPL (dB)	Difference (dB)
Case1	closing all side walls	74.4	-
Case2	opening only right side wall	74.8	+0.4
Case3	Case2 and opening upper side wall	73.5	-1.3
Case4	Case3 and opening left side wall	74.2	+0.7
Case5	Case4 and opening bottom side wall	75.4	+1.2
Case6	Case5 and opening front side wall	79.4	+4.0
Case7	Case6 and opening back side wall	78.9	-0.5

운전자 소음의 기여도는 앞면, 아랫면, 좌측면의 순이었다. 차단벽을 개방할 때마다 소음레벨이 가장 크게 증가한 경우에 소음 기여도가 가장 높다고 할 수 있다. 차단벽 개방에 따라 소음레벨이 감소하는 현상이 발생하는 이유는 차단벽에 의한 캐빈 내부 소음의 반사에 의한 것으로 소음이 증가하였다가 차단벽의 제거로 소음레벨이 저감된 것으로 판단된다. 윈도우 메소드의 결과에 의해 운전자 소음레벨을 줄이기 위해서는 전면 창문 두께를 더 보강하고, 문틈과 창문틈새를 적절히 밀폐하면 캐빈 내로 투과되는 소음을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 트랙터 작동 중 운전석에서 발생하는 소음을 대상으로 소음저감 방안 및 소음 전달경로를 파악하였다. 엔진의 회전수에 따른 주파수 분석을 통하여 주요 소음원을 규명하고, 주요 소음원인 PSU의 이동을 실시하였다. 트랙터 운전석의 소음저감 대책 수립을 위한 주요 연구 방법 및 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 트랙터의 정확한 운전자 소음 특성을 규명하기 위해 반무향실에서 소음을 측정하였다. 트랙터의 주요 주파수 영역은 250 ~ 500 Hz 영역이고, Noise color map을 통하여 12차와 24차의 조화 주파수 성분은 PSU 기어의 맞물림 진동에 의해 발생되었다.
- (2) 트랙터의 운전자 소음을 저감하기 위하여 PSU를 트랙터 내부

에서 외부로 이동하였고, PSU 이동 후 주파수 분석 및 총합 소음레벨을 측정하였다. 트랙터의 주요 주파수 영역은 400 ~ 800 Hz로 변경되었고, 총합 소음레벨은 좌측 80.3 dB, 우측 81.5 dB로 각각 6.8 dB, 3.9 dB 소음이 저감되었다.

- (3) 소음 전달경로 파악을 위하여 운전자 소음의 기여도 평가를 실시하였다. 평가방법은 윈도우 메소드를 사용하였고, 앞면, 아랫면, 좌측면의 순으로 소음기여도가 우세하였다. 운전자 소음레벨을 줄이기 위해서는 전면 창문 두께를 보강하고, 문틈과 창문틈새를 적절히 밀폐하면 캐빈 내로 투과되는 소음을 저감할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] Yoo, D. H., Kim, K. U., Kim, S. D., Kim, J. Y., 1995, A Case Study on Inside Noise Reduction of Agricultural Tractor Cab, KASE. 26-38.
- [2] Chun, D. H., 2000, Noise Reduction study in the Tractor Cab, KSNVE. 27 1461-1466.
- [3] KS ISO, 2003, Tractors and machinery for agriculture and forestry-Measurement of noise at the operator's position, KS ISO 5131, Korea.
- [4] Yun, J. H., 2013, Design Method to Reduce the Noise of the Machine Room of a Built-in Refrigerator, Master Thesis, Keimyung University, Republic of Korea.
- [5] Chung, I. R., 2012, Noise Vibration, Shin Kwang, Republic of Korea.
- [6] Koo, J. T., Kang, J. J., Jeong, W. B., Ahn, S. J., 2007, Measuring of Noise Character on Cogged Belt Using Order Tracking and Design of Belt Shape, KSNVE. 15 1049-1053.
- [7] Kim, C. H., Choi, D. W., 1995, A Study on the Noise Reduction of Cabin in the Excavator, KSNVE. 89-93.
- [8] Park, H. W., Moon, N. S., Jeong, B. S., Park, J. S., Kim, B. J., 2011, An Experimental Study for The Vibration Reduction of Agricultural Tractor, KSNVE. 749-753.
- [9] Bae, J. G., Joo, J. H., Lee, T. K., 2009, Experimental Study for Construction Equipment's Cabin Noise Control, KSNVE. 19 802-808.