

엔진 직결형 트랙터 PTO 전동라인의 치타음 특성 분석

Characteristics Analysis of Gear Rattle Noise for Engine Direct-engaged PTO Driveline of Tractor

박영준*
정희원
Y. J. Park

김경옥*
정희원
K. U. Kim

1. 서론

농용 트랙터에서 발생하는 소음과 진동은 대부분 불규칙적인 지면 가진과 구동계의 토크 변동에 의하여 발생된다. 그 중에서도 엔진과 구동계(변속기와 PTO 전동라인)는 진동과 소음의 주요한 발생원이다. 엔진의 경우 직접적인 발생원으로서 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 구동계 또한 그 비중이 크다. 구동계의 소음과 진동은 엔진의 토크 변동이 그 원인이 된다. 자동 변속기를 장착한 구동계의 경우에는 유체를 통하여 토크 변동의 영향을 대부분 흡수하고 있다. 그러나 트랙터의 경우에는 대부분 수동 변속기를 장착한 구동계를 채택하고 있기 때문에 토크 변동의 영향이 크다. 수동 변속기를 장착한 구동계에서는 엔진의 토크 변동이 구동계 내부의 전동 기어들로 직접 전달되고 있다. 토크 변동은 그 주파수가 전동라인 시스템이 가지는 고유 진동수에 접근할 때 공진을 일으킬 수 있으며, 특히 기어에 작용하는 토크 변동은 맞물린 기어와 연속적인 충격을 야기하여 심한 소음과 진동을 일으킨다. 이러한 소음을 기어의 치타음(rattle noise)이라고 한다.

엔진 직결형 PTO 전동라인은 상시물림 기어 방식을 사용하며, 엔진의 토크 변동이 클러치에 의하여 흡수되지 않고 바로 PTO축과 연결된 기어로 전달되기 때문에 엔진의 토크 변동은 무부하 상태에 있는 PTO 전동라인의 기어를 공회전하게 만든다. 무부하 공회전 상태에서 감속비가 큰 기어들은 치타음을 야기한다. PTO 전동라인에서 주기적으로 발생하는

치타음은 트랙터 운전자에게 심리적으로 불안감을 주며, 작업 정도와 생산성을 저하시킨다. 또한, 최근에는 PTO 치타음에 대한 트랙터 사용자들의 불만과 이에 대한 해결 요구가 증가하고 있는 실정이다.

본 연구는 엔진 직결형 PTO 전동라인에서 발생하는 치타음의 특성을 분석하여 치타음 문제가 되는 이유를 파악하고, 타 기종 트랙터 PTO 전동라인의 소음 수준과 비교 분석하고자 하였다.

2. 기어 치타음(gear rattle noise)

전동라인에서 발생하는 치타음은 엔진에서 전달되는 전동 토크의 변동이 원인이 되어 기어의 이와 이 사이에서 충돌이 발생하는 현상이다. 전동라인으로 전달된 토크 변동이 각 부품에 주기적인 각가속도를 발생시키고, 이러한 각가속도는 기어 이 또는 스플라인에 상대 운동을 유발하여 충돌을 발생시킨다. 이러한 충돌은 전동라인 소음과 진동의 원인이 되고 있다.

가. 기어의 충돌 발생 모델

기어의 충돌은 한 쌍의 기어로 모델링하였을 때, 기어 이의 맞물림에서 분리, 충돌의 반복에 의하여 발생한다. 그림 1은 기어 이의 맞물림, 분리, 충돌에 대한 모델을 보여준다.

전동라인의 구동 기어와 피동 기어가 무부하 상태로 맞물려 회전할 때 엔진의 토크 변동에 의하여 구동 기어의 회전속도가 변하게 된다. 엔진의 회전속도가 가속되는 순간에는 그림 1의 (a)와 같이 구동 기어의 회전속도가 증가하

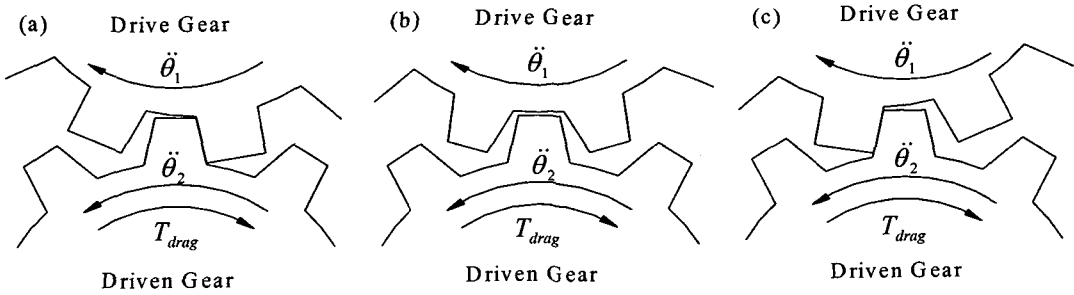


Fig. 1 Meshing gears, (a) gears in contact on the driving side (b) gears separated (c) gears in contact on the driven side.

게 되어 구동 기어 이의 앞면과 피동 기어 이의 뒷면이 충돌하게 된다. 따라서 충돌에 의하여 일시적으로 피동 기어의 회전속도가 증가하게 되고 구동 기어의 회전속도는 감소하게 된다. 이 과정에서 아주 짧은 시간 동안 구동 기어와 피동 기어가 분리되어 서로 접촉하지 않는 (b)과 같은 상태로 회전한다. 그러나 엔진 회전속도의 가속에 의하여 구동 기어의 회전속도가 피동 기어의 회전속도보다 크게 되어 기어들 사이에 다시 충돌이 발생하게 된다.

엔진의 회전속도가 감속되는 순간에는 구동 기어의 회전속도가 감소하게 되어 그림 1의 (c)와 같이 구동 기어 이의 뒷면과 피동 기어 이의 앞면이 충돌하게 된다. 이때 일시적으로 구동 기어의 회전속도가 증가하게 되고 피동 기어의 회전속도는 감소하게 된다. 그리고 이 과정에서 아주 짧은 시간 동안 구동 기어와 피동 기어가 분리되어 서로 접촉하지 않은 상태로 회전하게 된다. 분리 후에는 증가된 구동 기어의 회전속도에 의하여 구동 기어의 앞면과 피동 기어의 뒷면이 충돌하게 된다. 그리고 위와 같은 과정이 반복적으로 발생한다.

나. 기어 충돌의 발생 조건

기어 충돌의 발생 조건은 토크 변동에 의하여 기어에 작용하는 관성 토크와 기어가 가지는 저항 토크의 크기에 의해 결정된다. 기어 충돌은 기어에 작용하는 관성 토크가 기어가 가지는 저항 토크보다 클 때 시작되며, 이러한

기어 이의 충돌로 기어 치타음이 발생한다. 식 1은 치타음 발생의 판별 기준을 제시하고 있다.

$$\frac{T_{drag}}{I \frac{d^2\theta}{dt^2}} < 1 \quad (1)$$

여기서, T_{drag} = 피동기어의 저항 토크, N.m,

I = 피동기어의 질량관성모멘트, $kg.m^2$,

θ = 피동기어의 각변위, rad

3. 재료 및 방법

가. 시험 트랙터

PTO 전동라인의 치타음을 측정하기 위하여 본 연구에서 사용한 트랙터는 국내 T사에서 제작한 50 ps급 트랙터로서, 그 제원은 표 1에 서와 같다.

Table 1 Specifications of tractor used for evaluation of rattle noise

Items	Specifications
Model	T502
Rated power/speed	41 ps diesel/2,500 rpm
Displacement	2,911 cc
Transmission gears	Forward 12 Backward 12
PTO speed	561, 760 rpm

나. PTO 전동라인의 치타음 측정

트랙터 PTO 전동라인의 치타음에 관련된 신호 측정과 신호 처리 절차는 그림 2와 같다. 계측과 신호 처리에 사용된 장비는 마이크로폰, 신호 증폭기(charge amplifier), 테이프 레코더(tape recorder), 신호 분석기(signal analyzer)이며 각 장비의 제원은 표 2와 같다.

치타음이 주로 발생하는 공회전 상태의 엔진 회전수(880 rpm)를 기본으로 시험하였으며, 엔진 회전수와 치타음의 관계를 구명하기 위하여 엔진 회전수를 880, 1000, 1300, 1600 rpm 4단계로 구분하여 시험하였다. 또한, 각 엔진 회전수에서 PTO 클러치를 이용하여 PTO 클러치 단속, 중립, 561 rpm, 760 rpm 4단계로 구분하여 시험하였다. 총 16회의 시험이 시행되었다.

트랙터 PTO측에 설치한 마이크로폰의 신호는 증폭기를 통하여 테이프 레코더에 전압 신호로 저장되며 신호 분석기의 필터링, A/D 변환, FFT 기능을 이용하여 주파수 분석을 수행하였다. 증폭기와 테이프 레코더의 작동 범위는

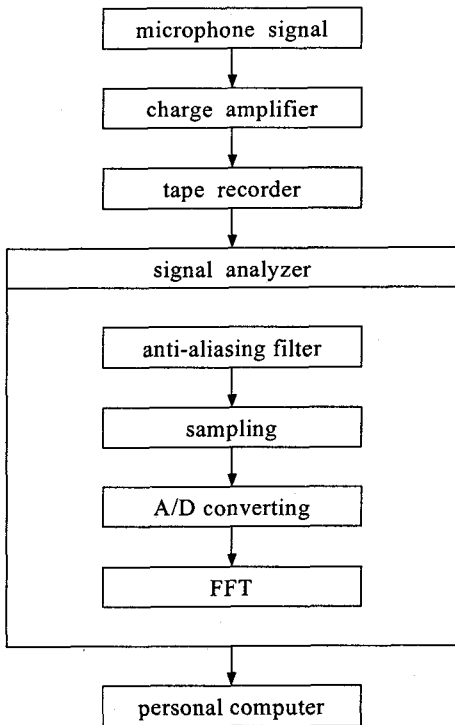


Fig. 2 Block diagram of signal processing.

Table 2 Specifications of equipment to be used for measurement and analysis

Equipment	Specifications
Signal analyzer	4ch. signal analyzer 50 to 6400 line FFT 25 kHz input module Generator and sampling module 25 kHz zoom processor
Microphone	Sensitivity: 50 mV/Pa Freq. Range: 1 ~ 20 kHz
Tape recorder	Freq. range: DC to 10 kHz in 8ch 16 bit quantization
Acoustic front end	Gain: 0, 20, 40 dB Filter: A-weighting or Linear Freq. range: 0.5 Hz ~ 20 kHz

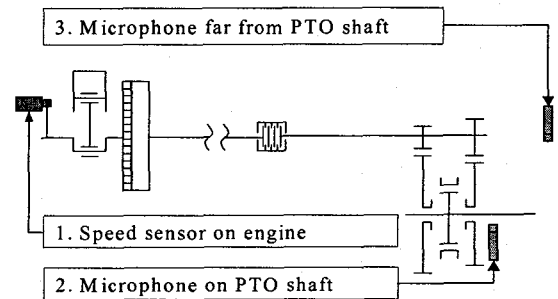


Fig. 3 Microphones and speed sensor mounted on test tractor.

마이크로폰의 감도를 고려하여 설정하였고, 저장된 데이터는 신호 분석기를 이용하여 3.2 kHz까지의 범위에서 FFT 분석을 하였다. 데이터 측정 시간은 30초, 샘플링(sampling rate)은 $\Delta t = 61 \mu s$, $\Delta f = 0.5 Hz$ 로 하였으며 필터링 주파수 밴드는 하이패스필터(high pass filter, 22.4 Hz)를 사용하였다. 마이크로폰의 보정은 측정 전후에 모두 실시하였다. 그림 3은 마이크로폰이 설치된 위치를 나타내었다. 2개의 마이크로폰을 이용하였으며, 하나는 PTO측에서 1 cm 떨어진 곳에 설치하였고, 다른 하나는 PTO측에서 1 m, 높이는 1.6 m 떨어진 곳에 설치하였다. PTO측에 근접한 곳에 위치한 마이크로폰은 기어쌍에

서 발생하는 치타음 신호의 특성을 분석하기 위한 것이고, 1 m 떨어진 곳에 위치한 마이크로폰은 치타음의 소음 수준을 평가하기 위한 것이다. 측정시 엔진의 회전속도에 대한 정보를 얻기 위하여 타코미터를 이용하였으며, 엔진의 크랭크축에서의 회전속도를 동시에 측정하였다.

4. 결과 및 분석

가. 시간 및 주파수 영역 분석

그림 4는 엔진의 회전속도가 공회전 상태인 880 rpm 일 때, PTO 클러치를 단속하였을 때(a)와 연결하였을 때(b) 측정된 시간 영역에서의 치타음이다. PTO 전동라인의 치타음은 엔진의 공회전 상태에서 가장 크게 나타나므로 공회전 상태를 중심으로 분석하였다. 그림 4(b)에서 엔진의 폭발이 일어난 이후에 치타음이 나타나는 것을 알 수 있으며, 치타음의 피크는 최대 28.5 Pa이었다. 시간 영역에서의 치타음 분석을 통하여 치타음은 음압 피크들의 주기가 0.045(1/22) 초로 엔진의 폭발 주파수 22Hz와 연관이 있으며 주기성을 갖는다는 것을 알 수 있다.

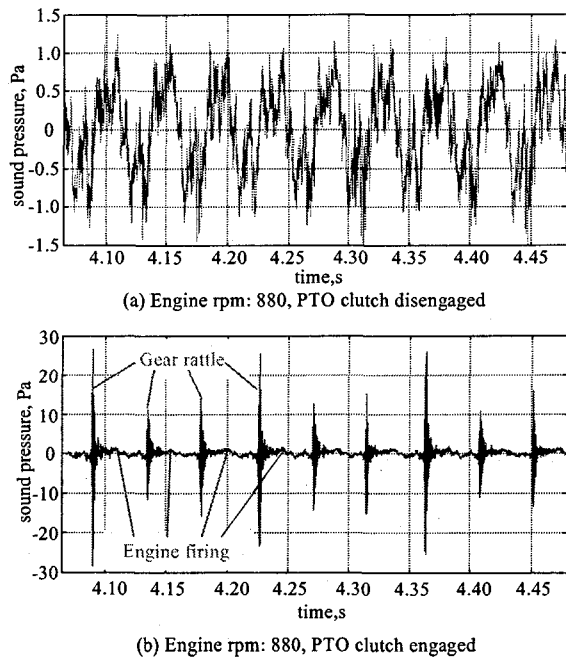


Fig. 4 Rattle noise of PTO at time domain.

즉, 엔진이 폭발할 때마다 PTO 전동라인의 기어들이 크게 충돌을 하는 것이다. 그림 5는 그림 4의 시간 영역에서의 치타음을 주파수 분석한 결과이다. 시간 영역에서의 분석에서와 마찬가지로 PTO 클러치를 연결하여 PTO 전동라인을 구동시켰을 때에는 PTO 클러치를 단속시켜 PTO 전동라인을 정지시켰을 때 나타나지 않던 1.4 kHz 근방의 소음이 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

이상에서 알 수 있듯이 치타음의 주원인은 엔진의 폭발로 인하여 짧은 시간(0.004초)에 구동 기어와 무부하 상태의 피동 기어의 충돌에 의한 것으로 판단된다.

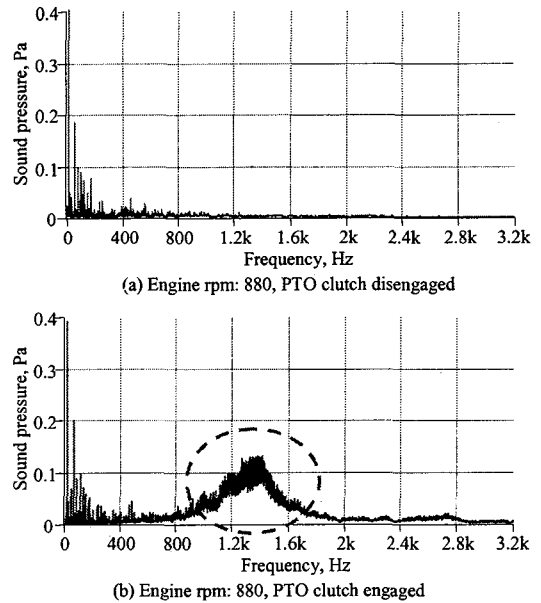


Fig 5 Rattle noise of PTO at frequency domain.

나. PTO 전동라인 치타음의 소음 수준

트랙터 PTO 전동라인의 치타음에 대한 1/3 옥타브 분석 결과는 그림 6과 7에서와 같다. 그림 6은 마이크로폰을 PTO축에서 1 cm 떨어진 곳에서 측정한 그래프이고, 그림 7은 마이크로폰을 PTO축에서 1 m, 높이 1.6 m 떨어진 곳에서 측정한 그래프이다. 두 위치에서 측정한 치타음의 소음 수준을 음압 레벨(SPL, sound pressure level)로 나타내면, 마이크로폰

을 PTO축에 1 cm 떨어진 곳에서 측정한 음압은 102 dB(A)이고, PTO축에서 1 m, 높이 1.6 m 떨어진 곳에서 측정한 음압은 72.4 dB(A)이었다. 이 때 암소음은 54.6 dB(A)이었다.

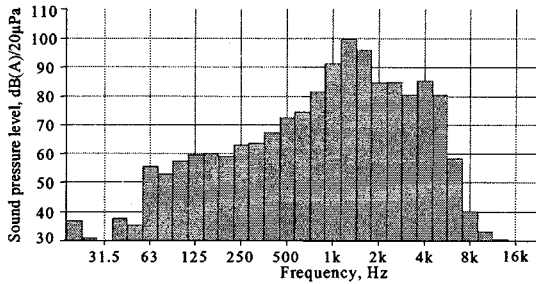


Fig. 6 1/3 octave frequency analysis when microphone was installed near PTO shaft.

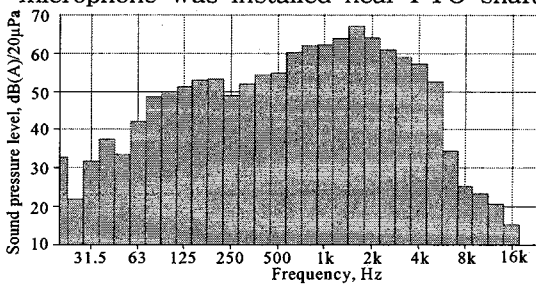


Fig. 7 1/3 octave frequency analysis when microphone was installed far from PTO shaft.

다. 타 기종과의 치타음 비교

시험 트랙터(T 모델)의 PTO 전동라인에 대한 치타음의 음압의 수준을 상대적으로 평가하기 위하여 다른 기종 트랙터의 PTO 전동라인 치타음과 비교하였다.

비교 대상으로는 독일 S사의 D 모델과 일본 K사의 G 모델을 선정하였다. D 모델은 출력 70마력, 정격 회전수 2350 rpm의 디젤 엔진을 장착한 것으로서 PTO 변속은 3단(540, 750, 1000 rpm)으로 시험 트랙터와 같은 PTO 전동라인으로 구성되어 있고 PTO 전동라인에서 치타음이 크게 발생하는 모델이다. 또한, G 모델은 출력 56마력, 정격 회전수 2200 rpm의 디젤 엔진을 장착한 것으로서 PTO 변속은 4

단(567, 799, 1130, 역 449 rpm)으로 시험 트랙터의 PTO 전동라인과 구성이 다르며 PTO 전동라인에서 치타음이 작게 발생하는 모델이다. 시험은 D 모델의 경우 680 rpm에서 무부하로, G 모델의 경우 780 rpm에서 무부하 상태에서 진행하였다.

그림 8과 9는 각각 비교 대상인 D 모델과 G 모델의 PTO축에서 1 cm 떨어진 곳에서 측정한 PTO 전동라인의 치타음의 시간영역 그래프이다. D 모델(그림 8)의 경우 치타음의 피크값은 최대 8 Pa이고, 시험 트랙터(T 모델)에서와 마찬가지로 시간에 대한 음압을 살펴보면 음압의 피크들의 주기가 0.045(1/22) 초로 엔진의 폭발 주파수 22.4 Hz와 일치하며 엔진이 폭발할 때마다 기어쌍에서 충돌이 일어난다는 것을 알 수 있다.

반면, G 모델의 경우 그림 9에서 시간에 대한 음압을 살펴보면, 대부분이 엔진에 의한 음압이며 치타음에 의한 성분은 거의 존재하지 않음을 알 수 있다.

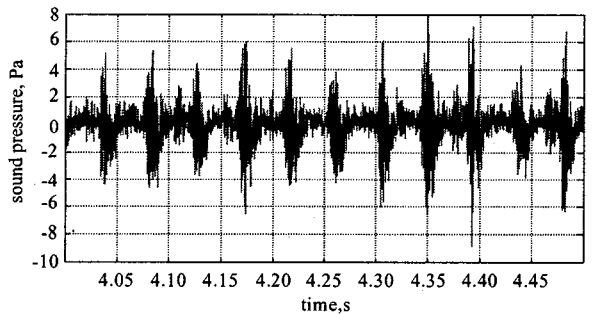


Fig. 13 Rattle noise of D model at time domain.

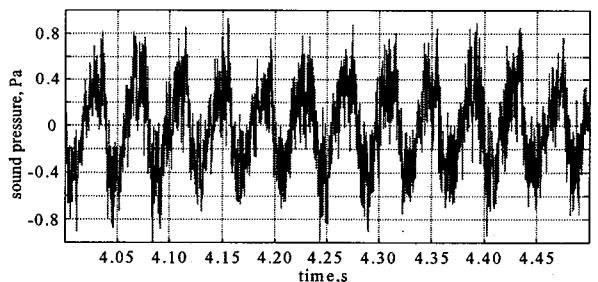


Fig. 14 Rattle noise of G model at time domain.

세 개의 모델에 대하여 소음 수준을 음압 레벨로 비교하여 보면 표 3과 같다. 표 3에서 near은 마이크로폰을 PTO측에서 1 cm 떨어진 곳에서 측정한 음압 레벨이고, far는 PTO측에서 1 m, 높이 1.6 m 떨어진 곳에서 측정한 음압 레벨이며, background는 암소음의 음압 레벨이다. 1 m 떨어진 곳에서의 음압 레벨은 치타음뿐만 아니라 엔진에 의한 음압 성분이 상당 부분 포함되어 있기 때문에 직접적으로 비교하기는 무리가 있다고 판단된다. 그래서 엔진의 영향을 적게 받으며 PTO 전동라인의 치타음의 영향을 주로 나타낼 수 있는 1 cm 떨어진 곳에서의 음압 레벨을 치타음의 비교 대상으로 선정하였다. PTO 전동라인의 구성이 같은 T 모델과 D 모델의 소음 수준을 비교하여 보면 T 모델의 소음 수준이 D 모델의 것보다 7 dB(A)정도 높다. PTO 전동라인의 구성이 다른 G 모델과의 비교는 무의미할 것으로 판단된다.

Table 3 Comparison of SPL among three model

model	near, dB(A)	far, dB(A)	background, dB(A)
T	102	72.4	54.6
D	94.9	76.8	49.4
G	77.7	68.2	51.0

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 엔진 직결형 PTO 전동라인에서 발생하는 치타음의 특성을 분석하여 치타음이 문제가 되는 이유를 파악하였고, 타 기종 트랙터 PTO 전동라인의 소음 수준과 비교하여 평가하였다.

각 주파수의 순음에 대하여 같은 크기 레벨로 느껴지는 각 주파수별 음압레벨을 연결한 곡선을 등청감곡선(equal loudness contours)이라고 한다. 등청감곡선을 살펴보면, 사람의 귀에 가장 민감한 주파수대는 1 kHz에서 4 kHz 대역이라는 것을 알 수 있다. 즉, 이 주파수대에서 사람은 음압이 낮은 소리에도 쉽

게 자극을 받을 수 있다. 엔진 직결형 PTO 전동라인 치타음의 주요 주파수 성분은 1.4 kHz를 중심으로 1~2 kHz 사이이다. 또한 치타음이 엔진의 폭발 주파수를 주기로 반복되므로 트랙터 사용자들은 PTO 치타음에 대하여 무척 민감하게 반응하게 된다. PTO 전동라인의 구성이 같은 다른 기종과의 치타음 음압 레벨을 비교하여도 7 dB(A) 정도 높게 나타났다. 이는 트랙터 사용자의 작업 환경을 저해하는 심각한 원인이 될 수 있으며, 이러한 환경에서의 작업은 작업자의 신체 이상과 건강상의 문제를 야기할 수 있으며 작업자의 청력뿐만 아니라 작업 능력을 저하시키는 원인이 될 수 있다. 그러므로 PTO 전동라인에서 발생하는 치타음을 감소시키기 위한 방안 제시가 시급하다고 할 수 있다.

6. 참고 문헌

1. 류일훈, 김경욱. 2002. 동하중 모형을 이용한 트랙터 전동라인의 치타음 분석. 한국농업기계학회지. Vol.27(5): 371-380.
2. 박봉룡. 1994. 기어 래틀에 대한 주관적 평가 및 해석. 대우 자동차기보 1994년호: 119-129.
3. 유동호, 김경욱, 김재열. 1995. 농용 트랙터의 안전캡 내부 소음 감소에 관한 연구(I)-소음과 음향 강도 수준 분석. 한국농업기계학회지 Vol.20(2) : 117-126.
4. 이해승, 채창국. 2004. 주파수 영역과 시간 영역의 특성을 고려한 래틀 소음 평가. 한국자동차공학회 추계학술대회논문집: 969-974.
5. Bodden, M., and Heinrichs, R. 1999. Analysis of the time structure of gear rattle. inter-noise99: 1273-1278.
6. Drago, R. J. 1980. New approach for analyzing transmission noise. Journal of Machine Design November 1980 : 114-120
7. Weidner, G., and G.Lechner. 1991. Rattling vibrations in automotive transmissions. JSME International conference on motion and power transmissions Vol. 1: 37-42.