

콤바인 전처리부의 소음 분석과 감소 방안

김호중 박영준 심성보 김경욱

Analysis and Reduction Method of Noise from Head of a Combine Harvester

H. J. Kim Y. J. Park S. B. Shim K. U. Kim

Abstract

This study was conducted to measure and analyze the noise from a combine head. The combine head, comprised of a cutting knife assembly, pick-up chains, horizontally conveying chains and vertically conveying chains, had an overall sound level of 101 dBA. The sound levels of each component were, respectively, 98.3 dBA for the cutting knife assembly, 88.9 dBA for the pick-up chains, 79.8 dBA for the horizontally conveying chains and 86.3 dBA for the vertically conveying chains, being equivalent to 54.4%, 18.4%, 6.5% and 13.7% of the overall head noise. The main cause of the head noise was considered the impacts that the joint of the cutting knife assembly made with frame when it oscillated. The impact sound was also generated when the chain lug collided with the chain case. To reduce these impact sound, anti-vibration rubbers were installed on the knife assembly joint and the chain cases. It reduced the head noise by 4 dBA but the overall noise level of the combine head was still high. In order to protect the combine operators more effectively from the noise, a safety cab needs to be installed on the combine.

Keywords : Noise of the combine head, Anti-vibration rubber

1. 서론

자가 및 위탁 수확 작업의 규모가 증가함에 따라 콤바인은 대형화, 고속화되고 있으며 작업 능률도 크게 향상되고 있다. 또한 콤바인 운전자의 일일 작업 시간도 증가되고 있으며 장시간 연속으로 작업하는 경우가 많다.

국내에서 개발된 콤바인은 대부분 안전캡이 없거나, 원래 안전캡이 없는 모델에 안전캡을 새로 설계하여 부착한 경우가 많다. 따라서 안전캡이 없는 콤바인의 경우에는, 운전자가 전처리부, 탈곡부 등에서 발생하는 심한 소음과 진동에 노출되고 있으며, 모래, 먼지, 볏짚 등이 운전석으로 유입되는 열악한 환경에서 운전하고 있다. 원래 안전캡이 없는 모델에 안전캡을 새로 설계하여 부착한 콤바인의 경우에도 안전캡의

방음 및 차음 기능이 떨어져, 처음부터 안전캡을 고려하여 설계한 수입 모델에서보다 운전 환경이 열악한 상태이다. 따라서 국산 콤바인에 대한 소음 및 진동 문제 해결과 운전석 환경 개선은 콤바인 생산업체가 당면한 과제 중의 하나이다.

콤바인은 전처리부, 예취부, 탈곡부, 주행부로 구성되어 있으며, 각 부분에서는 특정한 소음이 발생한다. 따라서, 콤바인 운전자에게 전달되는 소음을 줄이기 위해서는 각 부위에서 발생하는 소음의 특성과 그 원인을 구명하고, 소음이 운전석으로 전달되는 경로를 파악하여야 한다. Choe와 Inoue(2001)도 콤바인의 소음은 다수의 주파수 성분으로 구성되어 있다고 하였으나 각 주파수 성분에 대한 구체적인 특성을 구명하지는 못하였다.

본 연구에서는 콤바인의 전처리부를 구성하는 각 부분의

소음을 측정, 분석하여 그 원인을 구명하고, 전처리부 소음에 대한 방진 대책을 제시하였다.

2. 재료 및 방법

가. 시험 콤바인

본 연구에서 연구 대상으로 한 콤바인은 국내 T사에서 제작한 68 ps급 콤바인이며, 그 제원은 표 1에서와 같다.

Table 1 Specifications of the combine harvester tested for noise measurements

Items	Specifications
Model	HU7000G
Rated power / speed	68 ps / 2,600 rpm
No. of cutting row	5
Cutting width	1,700 mm
Maximum speed of cutting knife	1.5 m/s

나. 소음 측정

전처리부의 소음 수준과 원인을 구명하기 위하여 예취칼날, 걷어올림 장치 및 벼이송 체인으로 구성된 실험용 전처리부를 제작하여 실내 실험실에 설치하였다. 전처리부는 전동기로서 실제 수확 작업할 때와 같은 속도로 구동하였다. 그림 1은 실내 실험실에 설치된 실험용 전처리부를 나타낸 것이다.

소음은 KS B ISO 11094에 따라 측정하였다(한국산업규격, 2004). 즉, 소음 측정을 위한 반구면의 반지름은 콤바인의 예취폭(1.7 m)을 고려하여 4 m로 하였으며, 2개의 마이크를 그림 2에서와 같이 1.5 m 높이로 2곳에 설치하였다. 전

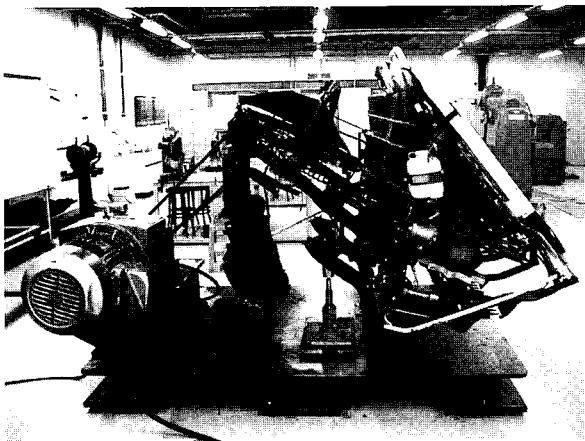
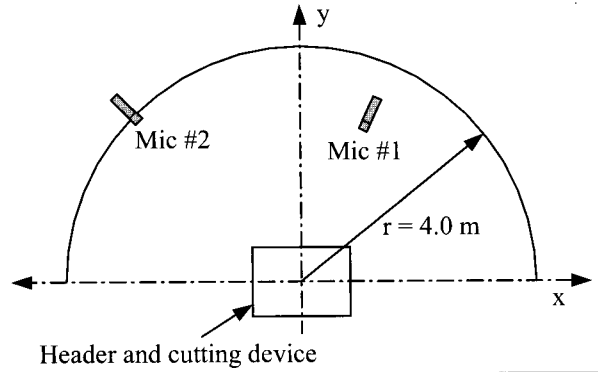


Fig. 1 A view of the experimental combine head installed in the indoor lab.



	x (m)	y (m)	z (m)
Mic #1	1.08	2.6	1.5
Mic #2	-2.8	2.8	1.5

Fig. 2 Locations of the microphones for noise measurements.

처리부의 구동 속도는 실제 예취 작업에서와 같은 속도인 1,840 rpm으로 하였다. 소음 측정시 실험실의 암소음은 55.9 dBA이었다.

전처리부는 그림 3에서와 같이 1개의 예취칼날, 5개의 걷어올림 체인, 4개의 횡이송 체인, 7개의 종이송 체인으로 구성되어 있다. 따라서 이를 구분하여 총 17개 부분에 대한 소음을 측정하였다. 각 부분에 대한 소음은 해당 체인만을 구동하고 다른 부분의 체인은 분리한 상태에서 측정하였다. 또한 전처리부 전체의 소음은 모든 부분을 구동한 상태에서 측정하였다.

측정한 마이크로폰 신호는 증폭기를 통하여 테이프 레코드에 저장하였다. 증폭기와 테이프 레코드의 작동 범위는 마이크로폰의 감도를 고려하여 설정하였으며, 측정은 각 부분을 충분히 가동한 후 30초 동안 실시하였다. 마이크로폰은 제조업자의 지침에 따라 측정할 때마다 보정하였다.

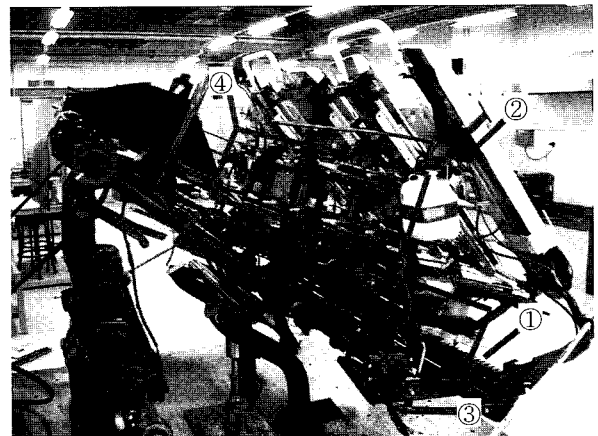


Fig. 3 Components of the combine head for noise measurements.

다. 소음 분석

두 개의 마이크로폰으로 측정된 소음 신호를 비교하여 데이터 상태가 우수한 신호를 이용하여 그림 4의 순서에 따라 분석하였다. 저장된 데이터는 신호 분석기의 필터링, A/D 변환, FFT 기능을 이용하여 12.8 kHz 범위에서 FFT 분석을 실시하였다. 필터링은 차단 주파수가 22.4 Hz인 하이패스 필터로 하였으며, 시간과 주파수에 대한 샘플링은 $\Delta t = 30.5 \mu s$, $\Delta f = 2 \text{ Hz}$ 로 하였다.

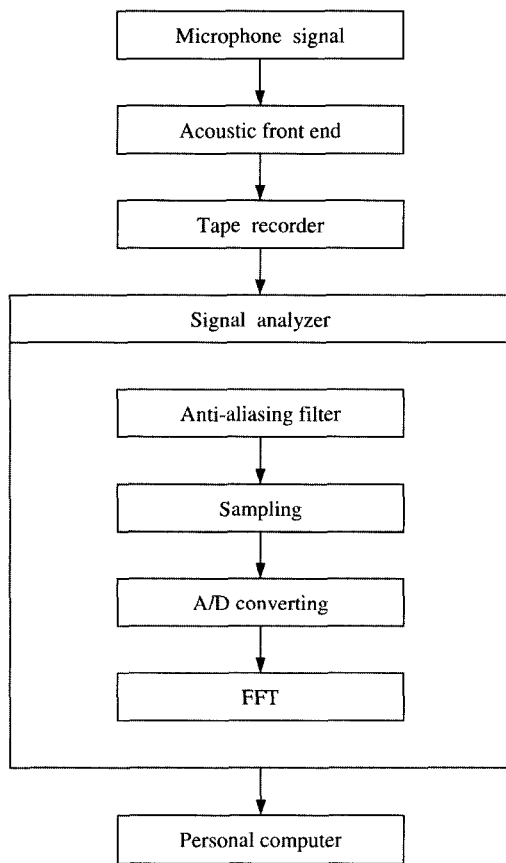


Fig. 4 Block diagram of noise analysis.

소음 측정과 분석에 사용된 장비는 마이크로폰, 신호 증폭기, 테이프 레코더, 신호 분석기이며 각 장비의 제원은 표 2와 같다.

라. 소음원의 소음 비중

실험용 전처리부의 전체 소음은 4개의 소음원 즉, 예취칼 날, 걷어올림 체인, 횡이송 체인 및 종이송 체인에서 발생하는 소음과 이들을 구동하기 위한 기어 전동 장치와 모터에서 발생하는 소음으로 구성되어 있다. 측정된 예취칼날, 걷어올림 체인, 횡이송 체인 및 종이송 체인의 소음은 기어 장치와 모터에서 발생하는 소음이 포함되어 있으므로 순수한 예취칼

Table 2 Specifications of equipments used for measurements and analysis of noise

Equipment	Model	Specifications
Signal analyzer	B&K 3560 (Denmark)	4 ch. signal analyzer 50 to 6,400 line FFT 25 kHz input module Generator and sampling module 25 kHz zoom processor
Microphone	B&K 4190 (Denmark)	Sensitivity: 50 mV/Pa Freq. Range: 1~20 kHz
Tape recorder	Sony PC208Ax (Japan)	Freq. range: DC to 10 kHz in 8 ch. 16 bit quantization
Acoustic front end	B&K 5968 (Denmark)	Gain: 0, 20, 40 dB ilter: A-weighting or Linear Freq. range: 0.5~20 kHz

날, 걷어올림 체인, 횡이송 체인 및 종이송 체인의 소음은 다음 식을 이용하여 구하였다(한국산업규격, 2004).

$$S = 20 \log_{10} \left(\sum_1^n 10^{\frac{s_n}{20}} - n 10^{\frac{s}{20}} \right) \quad (1)$$

여기서 n = 소음원의 체인 수
 s_n = 체인의 소음 수준, dBA
 S = 소음원의 소음 수준, dBA
 s = 기어 장치와 모터만의 소음 수준, dBA

실제 측정된 기어 장치와 모터만의 소음 수준은 80.4 dBA 이었다. 전처리부 전체의 소음 수준은 각 소음원의 소음 수준과 기어 장치와 모터만의 소음 수준을 이용하여 다음 식으로 구하였다.

$$S_T = 20 \log_{10} \left(\sum_1^k 10^{\frac{S_k}{20}} + 10^{\frac{s}{20}} \right) \quad (2)$$

여기서 k = 소음원의 수
 S_T = 전처리부 전체의 소음 수준, dBA
 S_k = k 번째 소음원의 소음 수준, dBA

k 번째 소음원의 소음 수준을 음압, P_k 로 표현하면,

$$P_k = \frac{20}{10^6} \times 10^{\frac{S_k}{20}} \quad (3)$$

가 된다. 전처리부 전체의 소음에서 각 소음원의 소음이 차지하는 비중은 다음 식을 이용하여 구하였다.

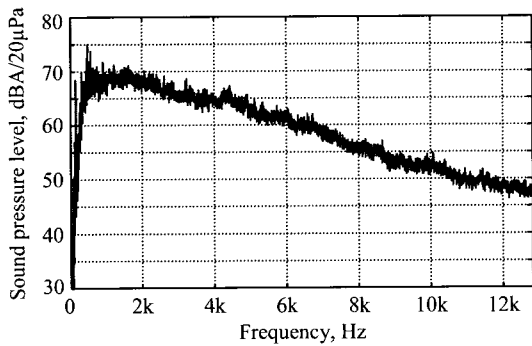
$$\text{비중 (\%)} = \frac{P_k}{P + \sum_1^k P_k} \times 100 \quad (4)$$

여기서 P 는 기어 장치와 모터만에 의한 소음 수준의 음압이며, 실제 측정된 소음으로부터 구한 기어 장치와 모터에 의한 음압은 $P = 0.2094 \text{ Pa}$ 이었다.

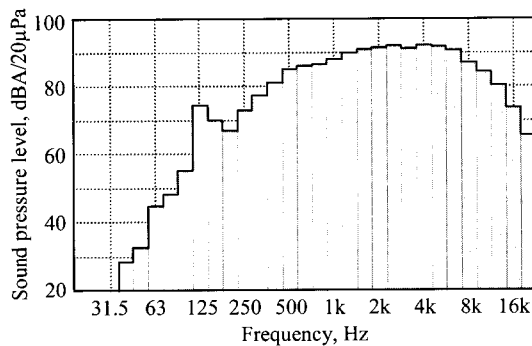
3. 결과 및 고찰

가. 전처리부의 전체 소음 수준

그림 5는 실제 측정된 전처리부 전체의 소음 수준을 주파수 영역과 1/3 옥타브 주파수 영역으로 분석한 결과이다. 전체 소음 수준은 101 dBA이었으며, 피크 음압 수준은 1 kHz 주위에서 70 dBA이었다. 주파수가 증가할수록 음압 수준은 감소하였다.



(a) Frequency analysis



(b) 1/3 octave analysis

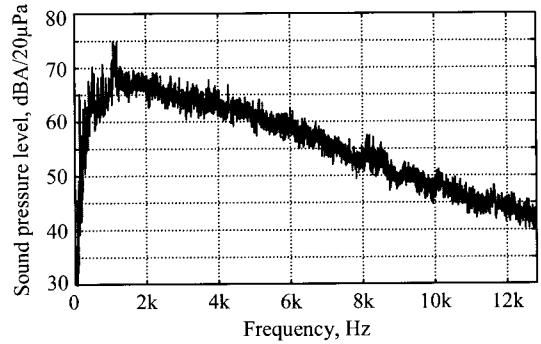
Fig. 5 Sound level of the combine head noise.

나. 소음원의 소음 수준

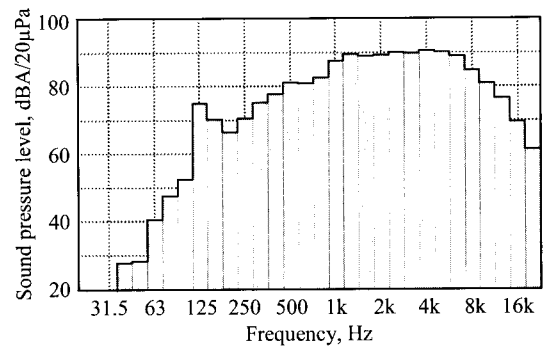
1) 예취칼날

예취칼날의 소음은 걷어올림 체인, 황이송 체인, 종이송 체인을 모두 제거하고 예취칼날만을 작동시킨 후 측정하였다. 그

림 6에서와 같이 예취칼날 부분의 소음 수준은 99.3 dBA이었으며, 주파수 분포는 전처리부 전체의 주파수 분포와 유사하였다. 기어 장치와 모터에 의한 소음을 제거한 순수한 예취칼날만의 소음 수준은 98.3 dBA이었으며, 식 (4)로써 구한, 전처리부 전체의 소음에서 예취칼날의 소음이 차지하는 비중은 54.4%이었다.



(a) Frequency analysis



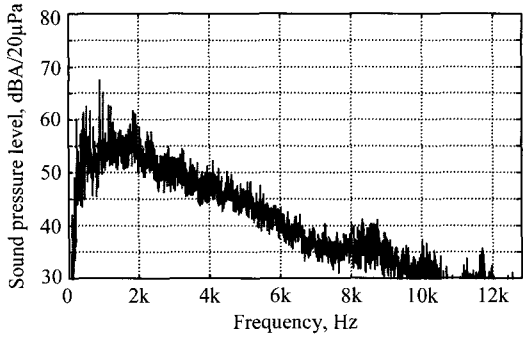
(b) 1/3 octave analysis

Fig. 6 Sound level of the cutting knife noise.

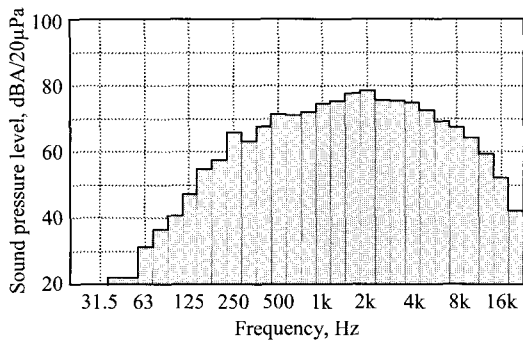
2) 걷어올림 체인

걷어올림 체인을 1개씩 작동시키며 측정된 5개 걷어올림 체인의 소음 수준은 각각 82.0, 84.2, 85.7, 83.3 및 84.8 dBA이었다. 걷어올림 체인 5개를 모두 작동시켰을 때 전체의 소음 수준은 식 (1)로부터 88.9 dBA이었으며, 전처리부 전체의 소음에서 걷어올림 체인이 차지하는 소음의 비중은 18.4%이었다.

그림 7은 1개의 걷어올림 체인만을 작동시켰을 때 측정된 소음의 분석 결과를 나타낸 것이다. 피크 소음 수준은 1 kHz 부근에서 55 dBA 정도이었으며, 소음 수준이 높은 주파수 범위는 1~4 kHz 대역이었다. 예취칼날의 소음과 비교하면 모든 주파수에서 소음 수준이 약 5 dBA 정도 낮았다. 그러나 걷어올림 체인의 소음에서도 주파수 분포는 예취칼날과 전처리부 전체의 주파수 분포와 유사하였다.

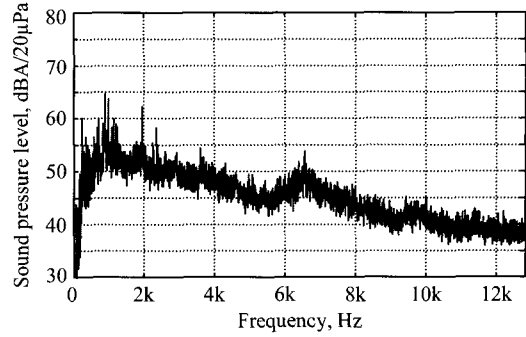


(a) Frequency analysis

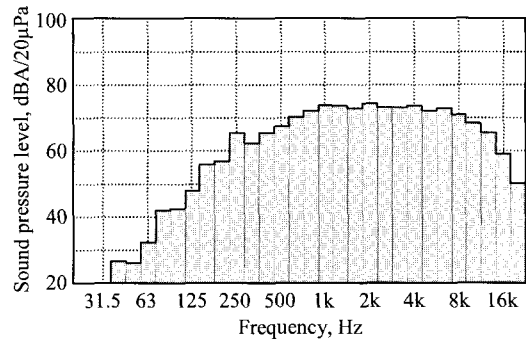


(b) 1/3 octave analysis

Fig. 7 Sound level of a single pick-up chain noise.



(a) Frequency analysis



(b) 1/3 octave analysis

Fig. 8 Sound level of a single horizontally conveying chain noise.

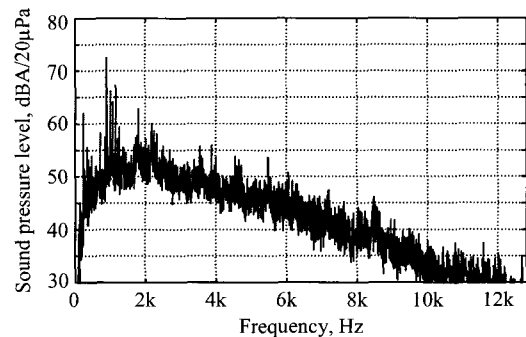
3) 횡이송 체인

4개의 횡이송 체인에 대한 측정 소음 수준은 각각 84.0, 81.6, 81.8 및 81.2 dBA이었다. 4개의 횡이송 체인이 모두 동시에 작동할 때 순수한 횡이송 체인의 전체 소음 수준은 79.8 dBA이었으며, 전처리부 전체 소음에서 횡이송 체인의 소음이 차지하는 비중은 6.5%이었다. 그림 8은 1개의 횡이송 체인만을 작동시켰을 때 측정된 소음의 주파수 분석 결과를 나타낸 것이다.

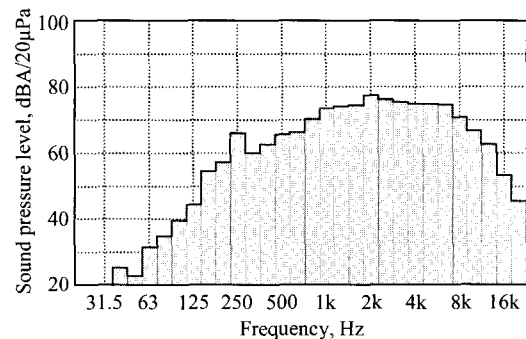
4) 종이송 체인

측정한 7개의 종이송 체인의 소음 수준은 각각 85.2, 81.2, 80.8, 81.0, 81.6, 81.9 및 84.9 dBA이었으며, 7개의 종이송 체인을 모두 동시에 작동시켰을 때 식 (1)로써 구한 순수한 종이송 체인만의 전체 소음 수준은 86.3 dBA이었다. 또한, 전처리부 전체 소음에서 종이송 체인의 소음이 차지하는 비중은 13.7%이었다. 그림 9는 1개의 종이송 체인만을 작동시켰을 때 측정된 소음의 주파수 분석 결과를 나타낸 것이다.

이상의 분석 결과에 의하면, 전처리부에서 발생하는 소음의 주파수 분포는 각 소음원의 주파수 분포와 유사하였으며, 높은 음압 수준은 모두 1~4 kHz 주파수 대역에서 나타났다. 전처리부 소음에 가장 큰 영향을 미치는 부분은 예취칼날 부



(a) Frequency analysis



(b) 1/3 octave analysis

Fig. 9 Sound level of a single vertically conveying chain noise.

분이었으며, 다음으로 걷어올림 체인, 종이송 체인, 횡이송 체인 순이었다.

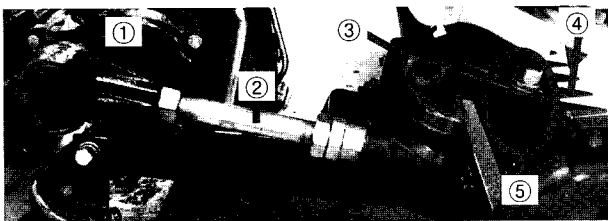
다. 소음 감소 방안

Fukushima 등(2006)은 예취칼날 구동 장치에서 진동이 발생한다고 하였다. 조인트 부분에서 링크 암의 끝부분은 예취칼날의 U자형 홈사이의 공간에 위치하여 예취칼날에 동력을 전달한다. 예취칼날은 링크 암의 끝부분에 의해 빠른 속도로 작동하기 때문에 이 공간은 압축 변형을 받는다. 따라서 이 부위에서 충돌에 의한 진동이 발생하는 것이다. 또한, 걸어올림 체인, 횡이송 체인, 종이송 체인의 소음은 대부분 체인에 부착된 러그가 체인 케이스와 충돌할 때 발생하는 것으로 판단된다. 이는 Sasao와 Iwasa(1993)의 연구에서도 확인된 바 있다.

예취칼날의 소음을 줄이기 위하여 그림 10에서와 같이 예취칼날 구동 장치의 조인트 부분에 충격력을 흡수할 수 있는 원형 방진 고무를 설치하였다. 체인에 부착된 돌기가 체인 케이스와 충돌할 때 발생하는 소음을 줄이기 위해서는 걸어올림 체인에 5개, 종이송 체인에 6개의 방진 고무 패드를 설치하였다. 그림 11은 조인트와 돌기의 충돌 부분에 설치한 방진 고무를 나타낸 것이다. 원형 방진 고무는 천연 고무로서 비중은 0.92, 경도는 BNH 60이었으며, 방진 고무 패드의 재질은 네오플렌으로 비중은 1.15, 경도는 BNH 60이었다.

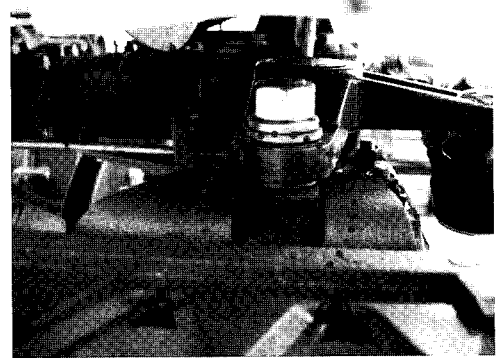
그림 12는 전처리부의 전체 소음 수준을 방진 고무를 설치하였을 때와 설치하지 않았을 때를 비교하여 나타낸 것이다. 방진 고무를 설치하지 않았을 때의 소음 수준은 101 dBA이었으나, 설치한 후에는 97 dBA로서 4 dBA 감소하였다. 즉, 조인트 부분과 체인에 부착된 돌기에 간단한 방진 고무를 설치함으로써 4 dBA 정도의 소음을 줄일 수 있었다.

그러나 97 dBA는 여전히 높은 소음 수준으로서 이를 더욱 줄이기 위해서는 체인의 정밀도를 개선하여야 하며, 체인 케이스 내부에 흡음재를 부착하여 러그와 체인 케이스의 충돌음을 감소시켜야 한다. 또한, 직각으로 교차하고 있는 예취칼날 구동 장치의 크랭크와 로커암의 회전 평면을 일산 콤바인에서와 같이 동일한 평면이 되도록 크랭크의 위치를 변경한다면 예취칼날의 진동을 좀더 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 크랭크암에도 균형추를 부착하여 소음의 원인이 되는 동적 불균형을 줄여야 할 것으로 판단된다(Chung 등, 1994). 보다



① crank ② pitman ③ link arm ④ knife ⑤ joint part

Fig. 10 Knife driving section of a combine harvester.

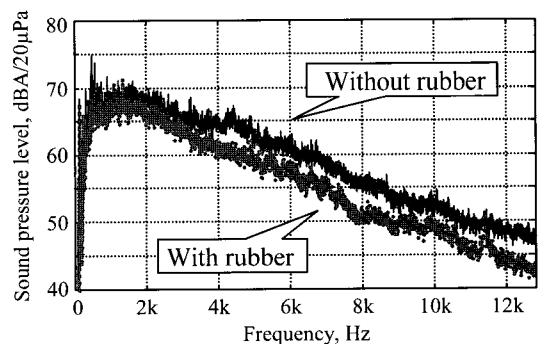


(a) Anti-vibration rubber installed on joint part

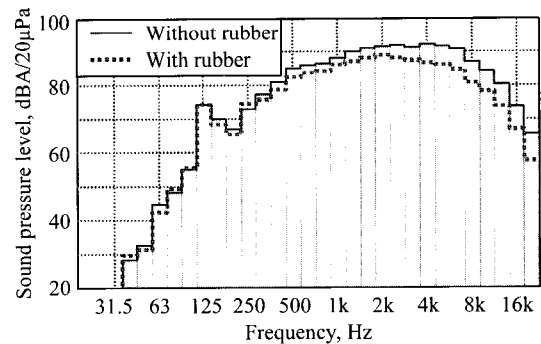


(b) Anti-vibration rubber installed on chain case

Fig. 11 Noise reduction method of the collision in the cutting device.



(a) Frequency analysis



(b) 1/3 octave analysis

Fig. 12 Noise reduction by anti-vibration rubber installed on the knife joint and chain lug.

근본적으로 전처리부의 소음으로부터 운전자를 보호하기 위해서는 콤바인에 안전캡을 설치하여 소음을 차단하여야 한다. 안전캡의 방음 및 차음 성능은 안전캡의 형상, 차체와의 연결 방식, 안전캡의 내부 재질 등에 따라서 달라지므로 이에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 콤바인 전처리부의 소음을 측정하고 이를 분석하여 소음의 주요 원인과 방진 대책을 구명하기 위하여 수행되었으며 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 전처리부의 전체 소음 수준은 101 dBA이었으며, 전처리부를 구성하는 예취칼날, 견어올림 체인, 횡이송 체인 및 종이송 체인의 소음 수준은 각각 98.3, 88.9, 79.8 및 86.3 dBA이었다.
- (2) 소음의 주요 원인은 예취칼날의 조인트 부분에서 발생하는 충돌음과 체인에 부착된 돌기와 체인 케이스가 충돌할 때 발생하는 충돌음인 것으로 판단되었다.
- (3) 이러한 충돌음을 줄이기 위한 방법으로 충돌 부위에 방진 고무를 설치하였다. 방진 고무에 의한 소음 감소는 4 dBA이었으나, 방진 고무를 설치한 후에도 전처리부의 소음 수준은 여전히 높았다.

향후 연구는 콤바인 전처리부의 소음을 보다 깊이 분석하고 이를 더욱 줄일 수 있는 방안을 제시해야 하며 근본적으로 소음을 감소시킬 수 있는 안전캡에 대한 논의를 해야 할 것이다.

참고문헌

1. Choe, J. S. and E. Inoue. 2001. A Study on the vibration characteristics of a head-feeding combine by spectral analysis. *Journal of the Korean Society for Agricultural Machinery* 26(1):11-20. (In Korean)
2. Chung, C. J., S. B. Lee and K. M. Noh. 1994. Dynamic characteristics of the reciprocating cutter-bar of combine harvester (I). *Journal of the Korean Society for Agricultural Machinery* 19(3):163-174. (In Korean)
3. Fukushima, T., E. Inoue, M. Mitsuoka, M. Matsui and T. Okayasu. 2006. Vibration characteristics and modeling of knife driving system of combine harvester (part 3) - A dynamic model of the knife driving system. *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery* 68(5):65-70.
4. Sasao, A. and M. Iwasa. 1993. Basic research on noise control of head-feeding type combine harvesters using sound intensity method. *Proceedings of the International Conference for Agricultural Machinery & Process Engineering*. October 19-22. Seoul, Korea. pp. 752-760.
5. 한국산업규격. 2004. KS A ISO 11094. 음향 - 잔디 깎기류의 방사 소음 시험 규격.