

테일 파이프 형상 개선을 통한 휠로더 캐빈 소음 저감 연구 Cabin Noise Reduction of Wheel Loader through the Shape Optimization of Tail-Pipe

고경은† · 주원호* · 김동해* · 배종국*

Kyung-Eun Ko, Won-Ho Joo, Dong-Hae Kim and Jong-Gug Bae

Key Words : cabin(캐빈), noise analysis(소음해석), noise reduction(소음저감), tail pipe(테일 파이프), transmission path(전달경로), wheel loader(휠로더)

ABSTRACT

In a wheel loader, the tail-pipe is installed at the exhaust tube of muffler for the reduction of exhaust noise and the cooling of engine room, however, the cabin noise level can be largely increased due to the tail-pipe. In this paper, to grasp and reduce the cabin noise, a series of noise and vibration tests were carried out in addition to numerical simulations. As a result, the transmission path of exhaust noise toward the cabin was exactly identified and the improved shape of tail pipe, that can reduce the cabin noise, was derived through various numerical simulations and real tests.

1. 서론

경제 발전과 더불어 삶의 질 향상의 측면에서 환경소음에 대한 관심이 더욱 높아지고 있으며 이러한 경향과 함께 건설장비에 대해서도 작업에 필요한 기능적인 면 뿐 아니라 작업자 및 주위 환경과 조화를 이룰 수 있도록 저소음·저진동의 친환경적인 제품 생산으로 변화해 가는 추세이다.

특히 건설장비의 캐빈은 작업자가 항시 작업하는 공간으로서 저소음화에 대한 욕구가 날로 증대되고 있다. 엔진룸 냉각 및 배기 소음 저감을 위해 휠로더의 머플러 배기단에 설치되는 테일 파이프는 캐빈 소음 수준을 증가시키는 주요 원인이 될 수 있으며 따라서 캐빈 소음 저감을 위하여 이에 대한 개선 방안이 필요하다.

본 논문에서는 테일 파이프에 의한 캐빈 소음 현상을 파악하고 이를 저감하기 위하여 테일 파이프의 진동 및 음향 모드의 계측과 해석, 그리고 캐빈의 소음 전달경로 파악을 위한 다양한 실험을 수행하였다. 이러한 일련의 실험으로부터 테일 파이프에 의한 캐빈의 소음 전달경로를 규명하였으며, 테일 파이프의 형상 개선을 통해 캐빈 소음을 저감할 수 있음을 확인하였다. 최종적으로, 소음해석을 통하여 엔진룸의 냉각 성능을 만족하면서 캐빈 소음을 저감할 수 있는 테일 파이프의 개선 모델을 도출하였으며 실차에 적용하여 이를 검증하였다.

2. 캐빈 소음 현상 파악

2.1 캐빈 소음

휠로더의 머플러 배기단에 설치되는 테일 파이프가 캐빈 소음에 미치는 영향을 알아보기 위하여 테일 파이프 설치 및 제거 조건에서 캐빈 소음을 계측하였다.

머플러 배기단과 테일 파이프 형상은 Fig.1 과 같으며, 캐빈 소음이 크게 나타나는 주요 rpm 에서의 소음 수준을 Fig.2 에 나타내었고 이로부터 캐빈 소음은 엔진 주차수 1 차 성분에 의한 영향이 지배적임을 알 수 있다. 또한 Fig.3 의 테일 파이프 유·무에 따른 캐빈의 엔진 주차수 1 차 성분의 소음 수준 비교로부터 테일 파이프 설치 시 캐빈 소음이 증가하는 현상을 확인할 수 있다.

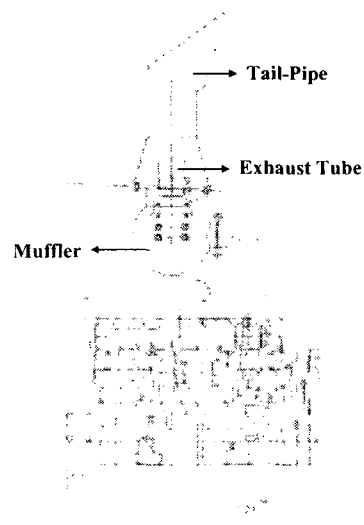


Fig. 1 Exhaust system with tail-pipe

† 현대중공업㈜ 진동소음연구실
E-mail : kekopro78@hhi.co.kr
Tel : (052) 230-5941, Fax : (052) 230-5495

* 현대중공업㈜ 진동소음연구실

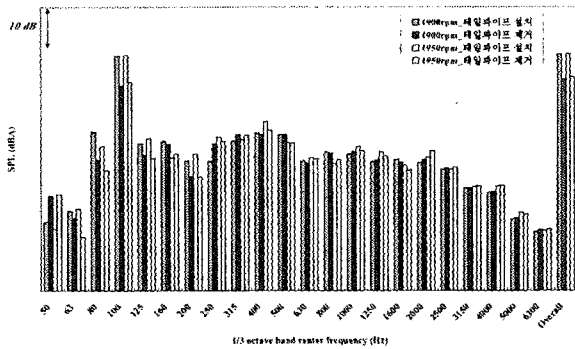


Fig. 2 Cabin noise level at main operating rpm

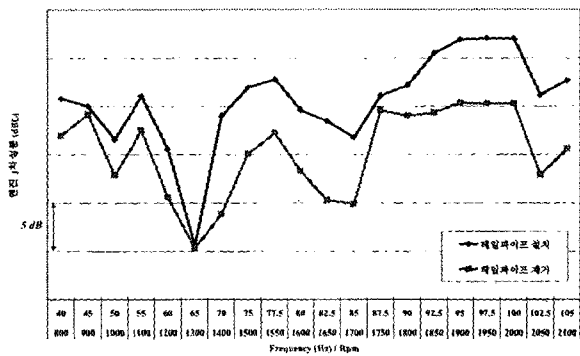


Fig. 3 Cabin noise level without/with tail-pipe

2.2 테일 파이프 모드 시험 및 해석

테일 파이프 설치 조건에서 캐빈 소음이 증가하는 원인이 테일 파이프의 구조 및 음향 기인에 의한 공명 현상인지를 알아보기 위하여 테일 파이프의 진동 모드 시험 및 음향 모드 해석을 수행하였다.

(1) 진동 모드 시험

진동 모드 시험 결과 약 117Hz 이상에서 원주 방향의 진동 모드가 나타나며, 이는 캐빈 소음 수준이 크게 나타나는 95 ~ 100Hz 영역뿐 아니라 홀로더 최고 운전 영역의 엔진 주차수 1 차 성분인 105Hz 를 벗어난 것으로서 테일 파이프의 구조 공진에 의한 캐빈 소음은 아닌 것으로 판단된다.

(2) 음향 모드 해석

테일 파이프의 음향 모드 해석을 위하여 상용 소음해석 프로그램인 SYSNOISE^[1]를 사용하였으며, 테일 파이프 끝단의 설치 조건을 고려하여 일단 개구간과 양단 개구간의 경계 조건에 대하여 음향 모드 해석을 수행하였다^[2]. 각각의 1 차 모드가 일단 개구간의 경우 117Hz, 양단 개구간의 경우 137Hz 로서 실제 테일 파이프의 음향 모드는 두 해석 결과 사이의 주파수 영역에서 나타날 것으로 판단되며, 진동 모드 시험 결과와 마찬가지로 최고 운전 영역의 엔진 주차수 1 차 성분인 105Hz 를 벗어남을 알 수 있다.

2.3 캐빈 소음의 전달경로 파악

캐빈 소음의 주요 원인이 되는 엔진 주차수 1 차 성분의 전달경로를 파악하기 위하여 테일 파이프 설치 및 제거 조건에서 주요 전달경로로 판단되는 테일 파이프 토출구와 엔진룸 내부 소음을 계측하여 Fig. 4 에 나타내었다. 테일 파이프 유무에 따라 테일 파이프 토출구의 소음 수준은 유사한데 반해, 엔진룸 내부 소음 수준은 테일 파이프 설치 시 약 10dB 이상 증가함을 알 수 있다. 이로부터 엔진 주차수 1 차 성분의 캐빈 내 주요 전달 경로는 엔진룸과 캐빈 사이의 격벽임을 알 수 있으며 테일 파이프 설치 시 엔진룸 내부 소음 수준의 증가로 인하여 캐빈 소음이 증가함을 확인할 수 있다.

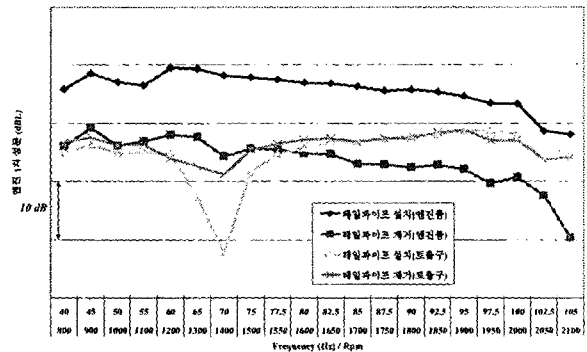


Fig. 4 Noise level at the tail-pipe and engine room without/with tail-pipe

3. 테일 파이프 및 배기단 변경에 따른

캐빈 소음 영향

테일 파이프 설치 및 제거 조건에서의 소음 계측으로부터 테일 파이프 형상 및 머플러의 배기단 형상이 캐빈 소음 수준에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단되어 테일 파이프와 배기단 변경에 따른 소음 계측을 수행하였으며, 각 조건에 대한 캐빈 소음 수준을 Fig.5 에 나타내었다.

초기 모델과 배기단 길이 증가 모델과의 비교로부터 배기단 길이가 증가하면 캐빈 소음 수준이 감소함을 알 수 있다. 초기 모델과 2nd 모델의 테일 파이프 설치 결과의 비교로부터 배기단 길이가 감소하면 캐빈 소음이 증가되는데 반해, 계측 결과는 소음 수준이 유사한 것으로부터 테일 파이프 형상도 캐빈 소음에 영향을 미침을 확인할 수 있다. 또한 테일 파이프를 제거한 조건의 계측 결과에서 배기단이 일정 길이 이하가 되면 테일 파이프를 제거하여도 캐빈 소음 수준이 증가함을 알 수 있다.

이로부터 테일 파이프 형상 및 배기단 길이가 캐빈 소음 수준에 영향을 미치는 주요 요인임을 확인하였다.

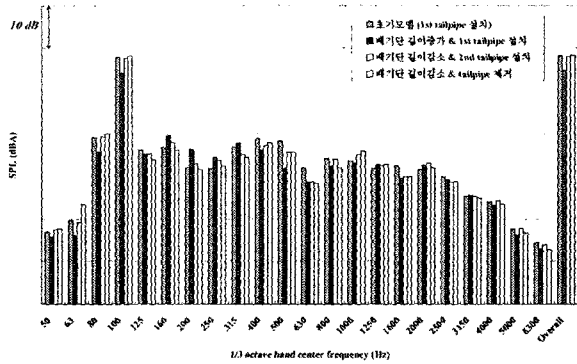


Fig. 5 Cabin noise level according to the various tail-pipes and exhaust tubes

4. 소음 해석

4.1 테일 파이프 형상 변경에 따른 소음 해석

앞의 일련의 실험으로부터 테일 파이프 형상 개선을 통해 캐빈 소음을 저감할 수 있음을 확인하였으며, 형상 개선을 위하여 테일 파이프 형상 변경에 따른 소음 해석을 수행하였고 이로부터 개선안 모델을 도출하였다.

(1) 소음 해석 모델

테일 파이프에 의한 캐빈 소음의 주요 전달경로가 엔진룸의 격벽이므로 엔진룸과 머플러 배기단 및 테일 파이프를 포함하여 BEM 해석을 위한 모델을 작성하였다. 소음 해석 모델 및 테일 파이프 토출구와 엔진룸 내부의 해석 결과를 Fig. 6에 나타내었고, 해석 모델의 검증을 위하여 해석과 계측 결과를 비교하여 유사한 경향을 보임을 확인하였다.

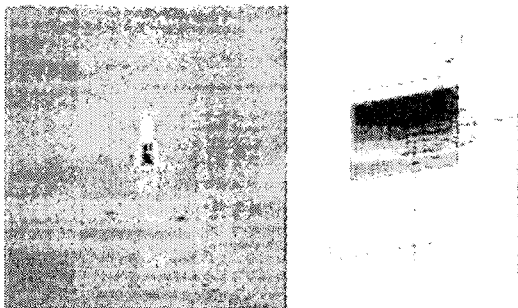


Fig. 6 Noise analysis result for initial tail-pipe

(2) 형상 파라미터 변경에 의한 소음 영향

테일 파이프는 크게 하부단과 원통 쉘 및 출구단으로 구성되며 엔진룸 내부 소음 수준에 영향을 미치는 요인을 파악하기 위해 각 부분을 단계별로

제거하면서 소음 해석을 수행하였다. Fig.7의 엔진룸 내부 소음 수준의 비교로부터 출구단의 영향보다는 하부단과 원통 쉘에 의한 영향이 더 크게 나타남을 알 수 있다. 이것은 머플러 배기단에서 방사되는 소음이 테일 파이프의 하부 형상에 의해 외부로 잘 빠져나가지 못하기 때문으로 판단된다.

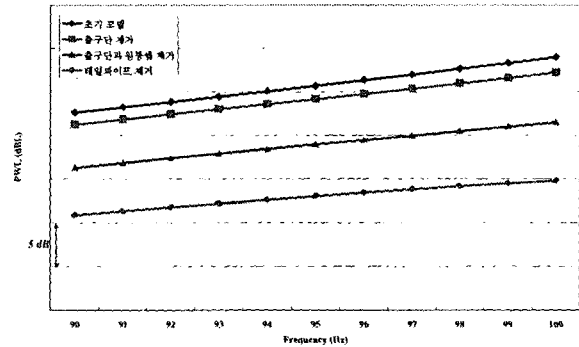


Fig. 7 Noise contribution due to each part of tail-pipe

이로부터 얻은 테일 파이프 형상 파라미터로는 테일 파이프 출구단의 각도와 원통 쉘의 길이 및 반경, 그리고 하부단의 길이 등이며, 소음 해석을 통해 이러한 파라미터의 변화에 따른 엔진룸 내부 소음의 영향을 파악하였다. 형상 파라미터 변경에 따른 소음 해석 결과는 출구단 각도를 10도 변경함에 따라 소음 수준에 큰 차이가 나타나지 않았으며 원통 쉘 길이가 150mm 증가 시 약 1dB 소음 수준이 증가하였다. 또한 원통 쉘 반경을 증가한 경우에는 소음 수준에 큰 영향이 없었으며 하부단 경사면이 150mm 짧아지면 약 1dB 소음 수준이 감소함을 알 수 있었다.

(3) 개선안 모델

형상 파라미터 변경에 따른 소음해석 결과로부터 4개의 개선안 모델을 도출하였다. 개선안 1은 테일 파이프 출구단이 3단으로 구성되었으며 개선안 2는 하부단을 150mm 낮추어 설계하였다. 또한 개선안 3은 하부단의 경사를 제거한 모델이며, 개선안 4는 소음 수준을 낮추는 여러 형상 파라미터를 조합하여 설계하였다.

이에 대한 소음 해석 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 개선안 1의 경우는 소음 수준에 큰 영향이 없으며 개선안 2~4는 관심 주파수 영역에서 각각 약 1~4dB 소음 수준이 감소함을 알 수 있다.

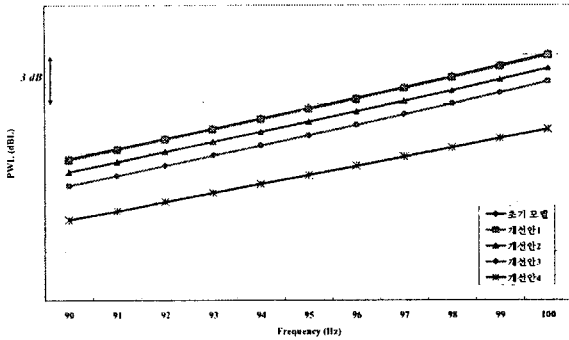


Fig. 8 Noise analysis result for modified tail-pipe

4.2 실차 시험

소음 해석으로부터 도출한 테일 파이프 개선안 모델을 실차에 적용하여 소음 계측을 수행하였다.

(1) 개선안 적용 실차 시험

개선안 모델의 실차 시험 결과, 엔진 주차수 1차 성분인 100Hz 옥타브 밴드의 캐빈 및 엔진룸 내부 소음 수준을 Fig.9 ~ Fig.10에 나타내었다. 개선안 1의 경우 기본 모델과 비교해 캐빈 소음 수준은 rpm 별로 약 0.5 ~ 1dB 증가 또는 감소하며 엔진룸 소음 수준은 기본 모델과 비교하여 약 1dB 증가하는 경향을 보인다. 개선안 2의 경우 캐빈 소음 수준이 약 0.5 ~ 2dB 정도 감소하며 엔진룸 소음 수준은 기본 모델과 유사한 수준을 보인다. 개선안 3의 경우 캐빈 소음 수준은 약 0.5 ~ 2dB 정도 감소하며 엔진룸 소음 수준은 약 1dB 감소하고, 개선안 4의 경우 캐빈 소음은 약 1 ~ 4dB 감소하며 엔진룸 소음 또한 약 3dB 감소함을 알 수 있다. 개선안 모델의 소음 저감 수준을 Fig.8의 해석 결과와 비교하여 해석과 계측이 유사한 경향을 보임을 확인할 수 있다.

또한 테일 파이프의 주요 역할인 엔진룸 냉각 성능을 알아보기 위하여 엔진룸 내부와 테일 파이프 토출구의 온도 및 유속을 계측하였으며, 그 결과 개선안 1은 테일 파이프 끝단의 유로 형성이 개선되어 유속이 빨라지고 개선안 2와 개선안 3의 경우 초기 모델과 비교해 유속이 빨라지고 온도도 낮아짐을 알 수 있다. 개선안 4의 경우는 테일 파이프의 길이가 너무 짧아서 배기가스가 엔진룸 내부로 역류하여 실제 적용은 어려울 것으로 판단된다.

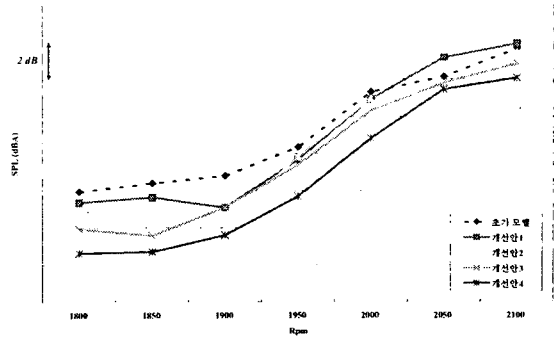


Fig. 9 Cabin noise level after the modification of tail-pipe

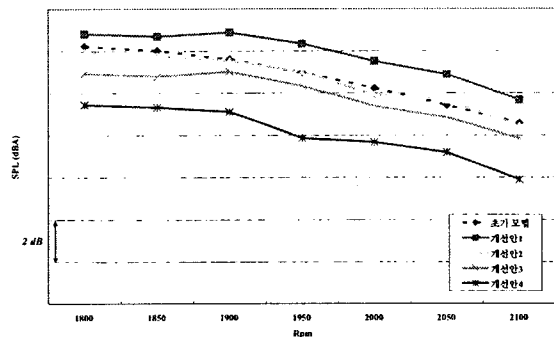


Fig. 10 Noise level in the engine room after the modification of tail-pipe

5. 결론

본 논문에서는 테일 파이프에 의한 휠로더 캐빈 소음 현상을 파악하고 이를 저감하기 위하여 테일 파이프 유·무에 따른 소음 계측 및 테일 파이프의 진동 및 음향 모드에 대한 계측과 해석을 수행하였다. 이로부터 테일 파이프에 의한 캐빈의 소음 전달경로를 규명하였으며, 테일 파이프 및 배기단 형상 개선을 통하여 캐빈 소음을 저감할 수 있음을 확인하였다.

결과적으로, 테일 파이프의 형상 파라미터 변경에 따른 소음 해석을 수행하여 개선안을 도출하였으며 이를 실차에 적용하여 검증함으로써 캐빈 소음 저감 및 엔진룸 냉각 성능을 높여주는 개선안 모델을 얻을 수 있었다.

참고문헌

- (1) SYSNOISE Release Notes, User's Manual/Appendices, Revision 5.6.
- (2) 김성재 등, 2004, "소음 및 냉각개선을 위한 건설기계 테일파이프의 형상 설계", 추계학술발표회 논문집, 한국소음진동공학회, pp. 737~740.
- (3) M. L. Munjal, 1987, Acoustics of Ducts and Mufflers, John Wiley & Sons, Inc., New York.