

지게차용 습식 브레이크 스켈소음의 특성 및 측정실험에 관한 연구

Experimental Study of Wet-Brake Squeal Noise in a Forklift

김 태 종†·정 의 봉*. 김 문 생*. 김 영 현**. 주 원 호**

Tae-Jong Kim, Weui-Bong Jeong, Moon-Saeng Kim, Young-Hyun Kim and Won-Ho Joo

(2009년 4월 28일 접수 ; 2009년 9월 28일 심사완료)

Key Words : Forklift(지게차), Squeal Noise(스켈소음), Wet Disc Brake(습식 디스크 브레이크), Test Rig(시험 장치), Automatic Transmission Fluid(ATF, 자동변속장치 윤활유)

ABSTRACT

Elimination of squeal noise occurred during brake application is an important task for the improvement of comforts in an industrial forklift. In this paper, a test rig was developed which was possible for testing of brake noise and an experimental measurement on squeal noise was performed. The causes of the brake noise are identified by experimenting how the factors such as automatic transmission fluid and rpm of drive axle affect the squeal. In order to identify the squeal characteristics, the signal analyses for noise are performed by using frequency spectrums. Also, brake test using a forklift was carried out to confirm the reliability of test results by using a test rig comparing with the occurrence of squeal noise. Experimental results showed that the tendencies of occurrence of squeal noise are well agreed at two test methods by using the test rig and forklift.

1. 서 론

산업의 발달에 따라 물류 운반수단의 지게차는 그 수요가 증가되고 있으며, 실내공간에서의 작업과 여성 및 노령 인구의 노동 참여 증가로 인하여 운전자의 안전과 쾌적함을 고려하는 환경친화적 차량 개발이 요구되고 있다. 특히, 브레이크의 차량 제동 과정에서 발생하는 진동과 소음 저감에 대한 관심이 증대하고 있으며, 스켈소음은 저속과 저 페달력에서 대부분 정차 전 차량소음이 낮은 조건에서 순음(pure tone)형태로 발생하므로 운전자가 느끼는 불쾌감은 매우 크다. 브레이크는 마찰을 발생시키는 기구적 형태에 따라 드럼과 디스크 형태로, 또 윤활유의 공급 유무에 따라 습식과 건식 구조로 분류된

다. 습식 브레이크는 그 구조와 작동원리가 건식보다 복잡하고, 스켈소음의 발생원인 또한 다양하여 문제해결이 어렵다는 특징이 있다.

산업용 또는 특별용도 차량의 브레이크는 상대속도는 작지만 전달 토크가 큰(low speed high torque) 장치로 구분되며, 이 장치의 특성은 작용압력이 높고 초기 상대속도가 작으므로 브레이크의 작용시간이 길게 된다. 이와 같은 조건하에서 습식 구조의 경우, 마찰면의 높은 압력에 의해 마찰판 내의 그루브(groove)를 통해 윤활유가 빠져나가 경계윤활상태가 이루어지므로 유체윤활과 두 면의 직접접촉에 의한 마찰이 혼재하는 상태가 된다. 이와 같은 혼합윤활조건에서 마찰면 사이의 동마찰과 정마찰 계수의 차이에 기인하는 스틱-슬립(stick-slip)현상이 발생하기 쉽다. 특히 브레이크 작용시간이 길어짐에 따라 불안정한 스틱-슬립 거동이 증폭되면서 날카로운 스켈소음이 발생한다.

최근까지 브레이크의 스켈소음에 관한 주제는 자동차용 디스크 모델에 대한 연구가 많았으며 이를

† 교신저자; 정회원, 부산대학교 기계공학부/기계기술연구원
E-mail : tjong@pusan.ac.kr

Tel : (051)510-2474, Fax : (051)514-7640

* 정회원, 부산대학교 기계공학부

** 정회원, 현대중공업(주) 선박해양연구소

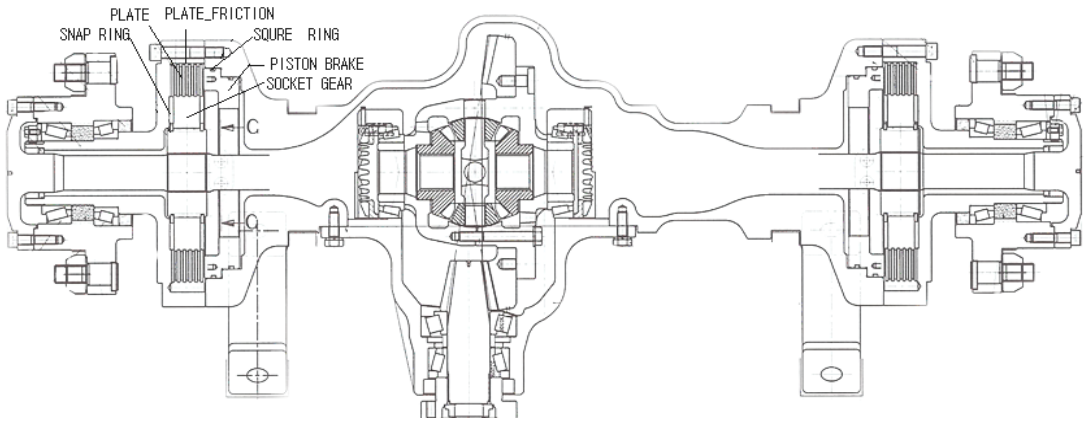


Fig. 1 Schematic diagram of drive axle assembly

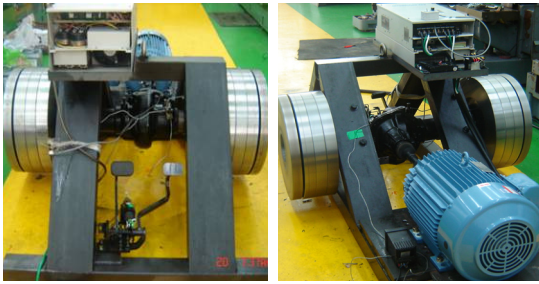
일반화시켜 지게차용 습식 브레이크에 적용하는 것은 구조적 차이에 의해 한계가 있다. 지게차의 경우에도, 제동장치의 동역학적 해석⁽¹⁾, 마스트와 프레임의 구조진동 해석⁽²⁾, 지게차 구조의 진동해석 및 최적설계^(3,4), 구동부의 소음진동 해석⁽⁵⁾ 등 진동 해석 및 구조 설계를 중심으로 연구되었다. 또, 습식 브레이크의 소음특성⁽⁶⁾, 유체윤활 마찰특성과 진동소음에 관한 기본 이론^(7,8)과 브레이크의 실험적 연구에 관한 내용^(9,10)이 있다. 하지만, 경험에 의한 스킨소음의 저감방법이 일반적으로 활용되고 있는 반면, 체계적인 방법에 관한 연구는 부족한 실정이다. 최근 중장비 차량의 개발 기간이 단축되고 있는 것을 감안할 때, 브레이크 설계단계에서 그 활용이 가능한 스킨소음 저감의 실험적 방법에 관한 연구개발이 필요하다.

이 논문에서는 지게차용 유압 습식 브레이크의 스킨소음 저감설계를 위해, 이에 영향을 미치는 각 브레이크 부품의 설계인자의 변경, 윤활유의 교체 적용이 가능하고, 스킨소음을 재현 측정할 수 있는 실험장치를 개발하였다. 이 장치를 이용하여 구동축의 윤활유(ATF) 모델과 모터의 회전수를 변경시켜 소음의 측정실험을 수행하였다. 또, 지게차 실차조건에서 운전속도와 부하조건을 변경시켜 소음을 측정하였다. 실험장치를 이용한 스킨소음 특성과 지게차 실차조건에서의 스킨 측정결과를 비교하여 실험장치의 유용성을 확인하였다. 또, 실험 장치를 이용한 각 시험조건별 소음 특성 및 실차의 브레이크 소음 특성을 비교 분석하여 스킨소음의 주파수대역에서의 특성을 규명하였다.

2. 습식 브레이크의 스킨소음 실험장치

지게차의 유압 습식 브레이크를 포함하는 구동축(drive-axle)의 전체적인 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 습식 브레이크는 프레임(밀폐구조) 내부의 윤활유에 잠긴 상태에서 여러 개의 마찰판(plate_friction)과 디스크(plate)가 겹쳐지는 구조이다. 즉, 회전하는 마찰판(강철재료)의 양면에 브레이크 패드로 호칭되는 펄프(paper materials)를 접착하여 양면 모두를 제동에 사용하며, 구동축의 프레임에 고정된 디스크(금속 플레이트)와 마찰판을 교대로 설치하는 구조이다. 운전자가 브레이크 페달을 밟으면 유압 부스터(booster)에서 높은 압력이 발생되고, 이 압력이 Fig. 1의 피스톤-브레이크 부품을 동작시켜 마찰판-디스크 조립체를 밀어주어 접촉면들 사이에 마찰력을 발생시킨다. 마찰판 패드에는 통상 그루브(groove)가 가공되어 그루브 사이로 오일이 빠져나가면서 마찰판을 냉각시키는 구조이다.

지게차의 유압 습식 브레이크가 내장된 구동축을 이용하고, 엔진 대응으로 모터(40HP 380V 6극의 인버터 구동)를 사용하여 실험장치를 개발하였다. 실험장치의 구성은 Fig. 2와 같으며, 구동축과 모터의 축이 수평으로 연결되도록 차축의 각도를 43°로 기울여 실험장치의 지지구조에 고정하였다. 구동축과 모터축을 연결시키기 위하여 클러치와 유니버설 조인트를 각각 적용하였으며, 각각의 조건에 대해 시행착오의 시험을 거쳐 최종적으로 유니버설 조인트를 사용하였다. 시험장치 프레임의 진동을 저감하기



(a) Front view (b) Side view

Fig. 2 Test rig for forklift squeal noise



Fig. 3 Brake components consisting with pairs of plate-friction and plate

위해 바닥면에 방진패드를 적용하였으며, 구동축에 하중을 부가시키기 위하여 총 8개의 플라이휠(fly wheel)을 장착하였다. 이 논문의 지게차 모델은 자체의 중량이 4.3ton인 모델이므로 바퀴 당 1000 kgf의 플라이휠 중량이 최소한 작용되어야 한다. 하지만, 비용 및 장착 공간 확보 등의 문제로 Fig. 3과 같은 형상의 마찰판/디스크의 브레이크 부품을 4쌍에서 2쌍으로 줄임으로써 브레이크의 제동력을 반으로 감소시켜 플라이휠의 중량을 500 kgf 수준으로 하여 장착하였다. 또, 2쌍의 마찰판/디스크만을 장착하여 비게 되는 공간에는 디스크와 같은 형상의 대응 부품을 가공하여 장착하였다. 이와 같은 시행착오의 시험과정을 거쳐, 윤활유의 교체, 회전수의 변경, 마찰판/디스크 부품 교체 등이 가능한, 다양한 시험조건에서 스켈소음의 발생 유무와 그 특성의 측정이 가능한 실험장치를 개발하였다.

3. 실험장치를 이용한 스켈소음 측정실험

제작된 실험장치를 이용하고, 윤활유와 모터의 회

전 속도를 변경시켜 브레이크 소음을 측정하였다. 윤활유는 자동변속장치 윤활유(ATF)의 2종류 모델(A 모델: 일반 자동차용 미션 오일 SAE10W(100 °C 7.38cST), B 모델: 지게차 전용의 액슬 오일 SAE80W/90(100 °C 13.5cST))을 사용하였다. 모터의 회전수는 인버터를 적용하여 5개 조건(600 rpm, 800 rpm, 1000 rpm, 1200 rpm, 1500 rpm)으로 가변속시켜 실험하였다. 이때, 실험장치를 30분 이상 운전시켜 브레이크 마찰판이 위치하는 구동축 프레임의 표면온도를 약 80 °C 수준에서 유지시켜 시험하였다. 이것은 윤활유의 온도는 점성을 결정하는 주요한 인자이므로, 시험의 온도조건을 일정하게 하고자 하였다. 각 시험조건에 대해 제동실험을 반복 수행하였으며, 마이크로폰을 시험장치에 근접시켜(30 cm) 음압(SPL)을 측정하였다. 동시에 모터축과 구동축의 회전수와 구동축 프레임의 온도를 관찰하였다. 소음 신호는 시간영역에서 간격 $\Delta t = 0.05 \text{ ms}$ (20 kHz)으로 30만개의 데이터를 한 세트로 샘플링하여 주파수 특성을 분석하였다.

모터의 회전수 600 rpm과 2종류(A 모델과 B 모델)의 윤활유를 각각 사용하여 브레이크 제동시험을 하였으며, 제동 전후의 시간영역 소음신호를 Fig. 4에 나타내었다. 이 결과에서 A 모델의 윤활유(ATF)를 사용한 경우 스켈소음 발생의 음압(SPL)신호가 측정되었으며, 청각으로도 확인할 수 있었다. 또, 브레이크 작동 전과 작동할 때의 소음을 주파수 스펙트럼 선도로 Fig. 5에 비교하여 나타내었다. A 모델의 ATF를 사용하는 경우, 600 Hz, 1200 Hz, 1800 Hz, 2400 Hz에서 피크가 나타나며 주된 주파수는 약 600 Hz 구간이며, 소음레벨은 112 dBA 수준으로 확인하게 구분되었다. B 모델 윤활유의 경우 이와 같은 피크가 나타나지 않으며 전반적으로 소음의 레벨만 약간 상승하는 것을 측정결과의 그림에서 볼 수 있다.

시험장치의 모터 회전수 800 rpm, 1000 rpm, 1200 rpm와 2종류의 윤활유(ATF)를 사용한 조건에서 브레이크 소음의 측정시험을 하였으며, 1000 rpm에서의 결과를 주파수 스펙트럼 선도로 Fig. 6에 나타내었다. B 모델 ATF의 조건과는 달리 A 모델 윤활유의 경우 스켈소음이 발생되는 것을 관찰할 수 있다. 이와 같이 습식 브레이크의 스켈 소음은 윤활유의 종류에 따라 발생 유무가 달라지므로

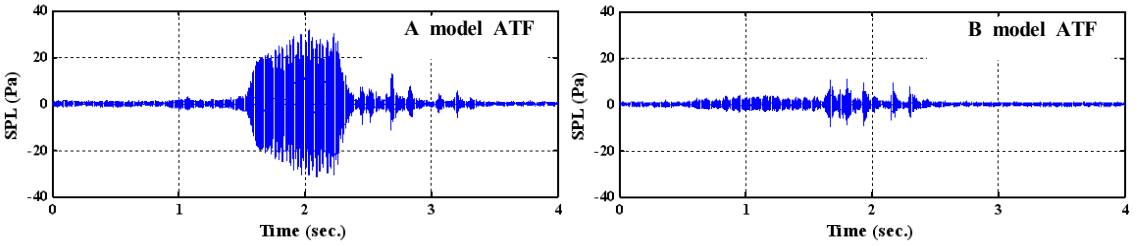


Fig. 4 The SPL time history of brake noise in a test rig at 600 rpm of motor

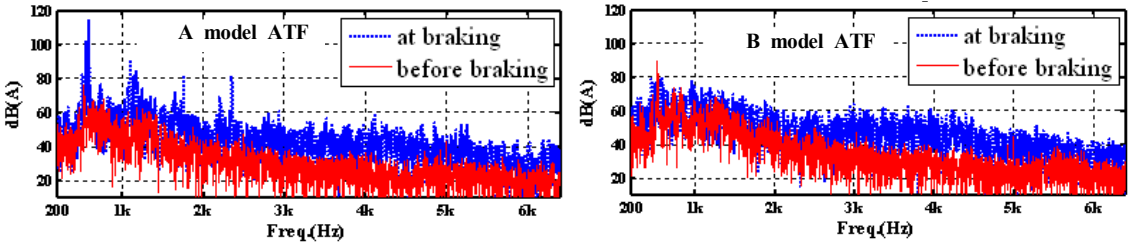


Fig. 5 Comparison of the frequency spectrum between “before braking” and “at braking” at 600 rpm

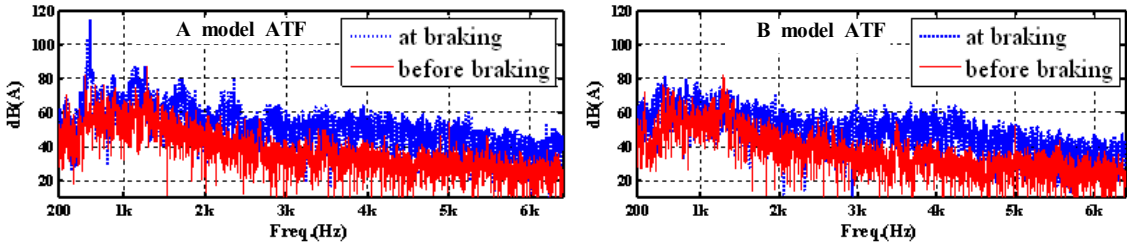


Fig. 6 Comparison of the frequency spectrum between “before braking” and “at braking” at 1000 rpm

ATF의 윤활특성 즉, 동점도 값에 지배적인 영향을 받는 것으로 이해된다.

또, 측정결과에서, 최저 주파수 대역 600 Hz부터 시작하여 2배수, 3배수, 4배수의 1200 Hz, 1800 Hz, 2400 Hz 영역 주파수에서 스켈소음이 일정한 형태로 발생하는 것을 볼 수 있다. 이 특성은 이전의 논문⁽¹¹⁾에서 측정된 건식 드럼 브레이크의 스켈소음의 주파수 특성파도 유사한 경향을 나타내었다. 실험장치 이용 소음 측정결과에서 A 모델의 ATF를 사용하면 스켈이 발생되며, 그 발생 주파수는 모터의 회전속도에 따라 변동되었다. 즉, 600 rpm의 조건에서 550 Hz, 1100 Hz 구간, 800 rpm의 조건에서 550 Hz, 1100 Hz, 2300 Hz) 구간, 1,000 rpm의 조건에서 600Hz, 1200 Hz, 2400 Hz, 1200 rpm조건에서 650Hz, 1300 Hz, 2600 Hz, 1500 rpm조건에서 680 Hz, 1350 Hz, 2700 Hz 등으로 그 피크 주파수가 측정되었다. 그러므로, 회전속도에 따라, 고속조건이

되면 스켈소음의 발생이 고주파 대역으로 이동되는 것으로 볼 수 있다. 즉, 모터 회전속도에 따라 축의 구동 토크가 변동되므로 스켈 발생의 주파수 영역이 변화하는 것으로 이해된다.

4. 지게차 실차 이용 스켈소음 측정실험

실험장치의 소음 측정결과와 실차조건에서 발생하는 브레이크 소음의 특성을 비교하기 위해, Fig. 7과 같이 지게차를 이용하여 스켈 측정실험을 하였다. 부하조건은 지게차 앞 부분의 짐을 들어 올리는 장치를 상단까지 이동시킨 상태를 고부하 조건, 하단까지 이동시킨 상태를 경부하 조건으로 구분하였다. 또, 지게차의 속도 5 km/h 수준을 저속, 10 km/h 수준을 고속 조건으로 하였다. 이상의 조건을 4가지 운전조건(중부하 상태에서 저속 및 고속, 경부하 상태에서 저속 및 고속)으로 하고, 2종류의 윤활유를

사용하여 스켈 발생여부를 시험하였다. 엔진 및 주변 암소음을 측정하는 사전 소음 측정을 한 후, 각 시험조건에 대해 실차 제동시험을 반복 수행하였으며, Fig. 9와 같이 마이크로폰으로 지게차 바퀴 부근 근접장(50 cm)에서 음압(SPL)을 측정하였다. 소음 신호는 시간 간격 $\Delta t = 0.05 \text{ ms}$ (20 kHz)으로 샘플링하여 주파수 특성을 분석하였다.

속도 및 부하상태와 윤활유의 종류가 스켈에 미치는 영향을 알아보기 위해서 각 조건에 따라 실험을 하여 스켈소음을 측정하였다. 앞서의 2가지 윤활유(ATF)의 모델에 따라 스켈의 발생 유무를 관찰할 수 있는 시간영역에서의 소음신호를 Fig. 8에 나타내었으며, 스켈소음의 발생 여부를 음압(SPL)의 크기로 확인할 수 있다. 브레이크 작동 전과 후의 소

음신호에 대해 주파수 분석한 결과를 Fig. 9에 도시하였으며, 소음의 주된 주파수는 약 1200 Hz이며, 해당 소음레벨은 70 dBA 수준으로 확연하게 구분할 수 있으며 또, 청각으로도 확인할 수 있었다.

지게차의 저속 저부하(LSLT) 및 저속 고부하(LSHT)와 고속 저부하(HSLT) 및 고속 고부하(HSHT)의 상태에서 2종류의 ATF를 사용하여 브레이크 소음을 측정하였으며, 그 측정결과를 Fig. 10~12에 나타내었다. 각 측정값들을 보면 A 모델 ATF를 사용한 조건에서 스켈소음이 발생됨을 볼 수 있고, 대체적으로 최저 주파수 대역 1200 Hz부터 시작하여 2배수, 3배수, 4배수의 2400 Hz, 3600 Hz, 4800 Hz 영역 주파수에서 일정한 간격으로 피크가 발생되었다. 이와 같은 윤활유 모델에 따른 스켈 발생 특성의 경향은 앞서의 실험장치 이용 측정결과와 거의 일치하였다. 또, 지게차의 저속 저부하 및 고부하와 고속 저부하 및 고부하의 상태에서 B 모델 ATF를 이용한 브레이크 소음 측정 스펙트럼에서 스켈소음이 발생되지 않음을 비교하여 나타내었다.

지게차 실차조건에서의 스켈 측정에서도 A 모델 ATF를 사용하면 스켈소음이 발생되었으며, 그 발생 주파수는 운전속도와 부하조건에 따라 변동되었다. 즉, 저속 저부하 조건의 측정결과 Fig. 9에서 첫 번째 피크 주파수는 1170 Hz이고, 저속 고부하 조건의 결과 Fig. 10에서 피크 주파수는 1400 Hz로 측정되었



Fig. 7 View of squeal measurement test using a forklift

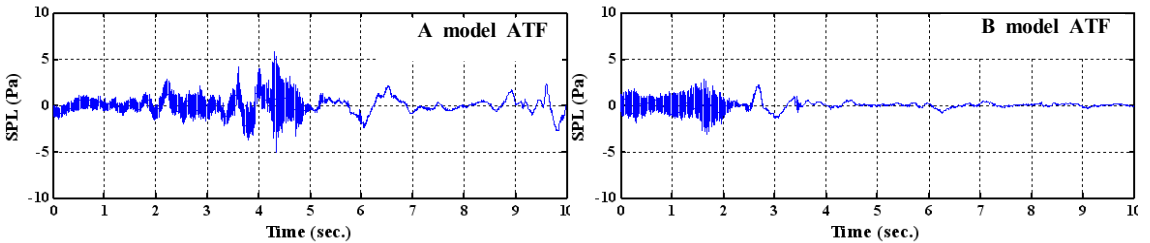


Fig. 8 The SPL time history of braking noise at LSLT condition in a forklift

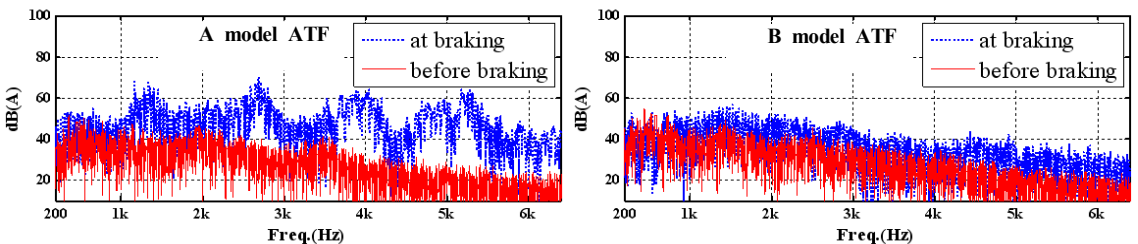


Fig. 9 Comparison of the frequency spectrum between “before braking” and “at braking” at LSLT

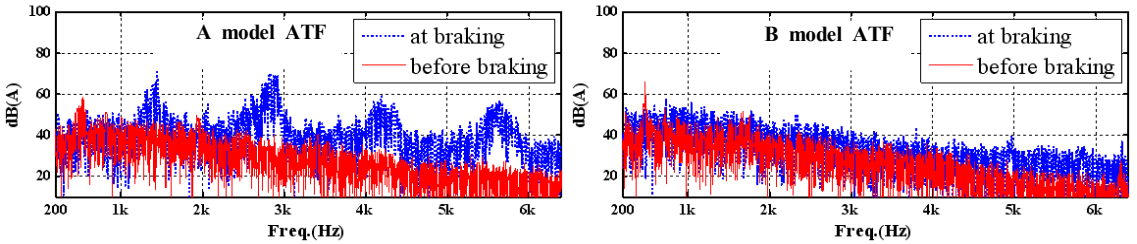


Fig. 10 Comparison of the frequency spectrum between “before braking” and “at braking” at LSHT

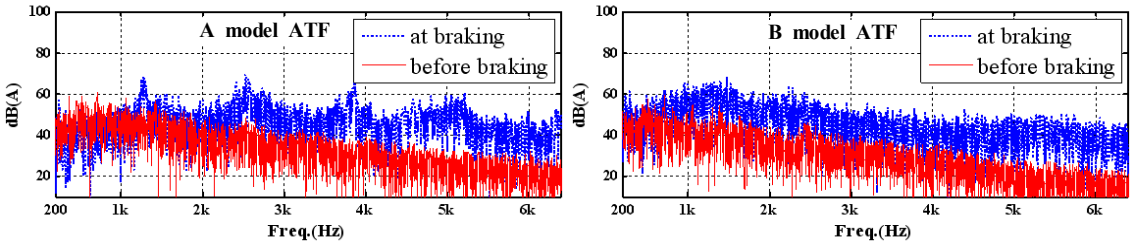


Fig. 11 Comparison of the frequency spectrum between “before braking” and “at braking” at HSLT

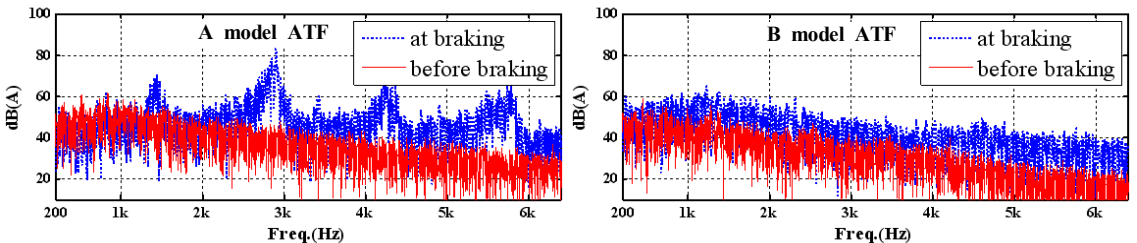


Fig. 12 Comparison of the frequency spectrum between “before braking” and “at braking” at HSHT

다. 또, 고속 저부하 조건의 측정결과 Fig. 11에서 첫 번째 피크 주파수는 1280 Hz이고, 고속 고부하 조건의 결과 Fig. 12에서 피크 주파수는 1430 Hz로 측정되었다.

즉, 부하특성에 따라, 고부하 조건이면 스킨의 피크 주파수가 고주파 대역으로 이동되고, 회전속도에 따라 고속조건이면 스킨의 발생이 고주파 대역으로 이동되었다. 한편, 실험장치와 지게차 실차조건에서 각각 측정된 스킨 발생의 주파수가 서로 다르게 나타나는 것은 운전주파수와 구동토크 즉 부하조건에 차이에 의해 발생하는 것으로 이해할 수 있다.

5. 결 론

이 논문에서는 지게차용 유압 습식 브레이크에서 발생하는 스킨소음 저감을 위해 설계단계에서 활용할 수 있는 실험장치를 개발하였다. 지게차의 구동

축(drive-axle)과 모터, 브레이크 페달, 플라이휠, 유니버설 조인트 등을 이용한 스킨소음 실험장치를 구성하였다. 실험장치의 스킨 발생과 측정실험의 검증을 위하여, 모터 회전수와 사용 윤활유(ATF)을 변경시켜 스킨소음을 측정하였다. 또, 지게차 실차 실험으로 브레이크 제동 소음을 측정하였으며, 실험장치를 이용한 측정결과와 유사한 경향을 나타내는 것을 확인하였다.

윤활유의 종류에 따른 소음측정실험에서, 습식 브레이크의 스킨소음은 윤활유의 종류에 따라 그 발생 유무가 구분되므로 ATF의 윤활특성 즉 동점도의 값에 지배적 영향을 받는 소음현상으로 이해된다. 속도 및 부하상태와 윤활유의 종류의 각 시험조건에 따라 스킨소음을 측정하고 주파수 분석을 하였으며, 측정의 모든 조건에서 스킨의 발생 주파수는 최저 주파수에서부터 2배수, 3배수 등의 일정한 간격으로 스킨소음이 발생하는 것을 확인하였다.

또, 실험장치와 지게차의 실차를 이용한 스킵소음의 측정실험에서 A 모델 윤활유(ATF)를 사용하면 스킵소음이 발생되고, 그 주파수는 운전속도와 부하조건에 따라 변동되었다. 즉, 부하특성에 따라, 즉 고부하 조건이면 스킵소음의 발생이 고주파 대역으로 이동하였다. 또, 회전속도에 따라, 고속조건이면 스킵소음의 발생이 고주파 대역으로 이동되었다.

이상과 같이 개발된 실험장치를 이용한 스킵소음 발생의 재현실험과 지게차 실차 조건의 스킵 측정 결과를 비교하여 실험장치의 유용성을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

(1) Yoo, H. H., Park, K. B., Shin, S. H. and Kim, T. I., 1997, "Development of a Procedure to Calculate Principal Internal Force for the Strength Design of a Forklift Truck Brake System," The Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 5, No. 5, pp. 27~36.

(2) Kim, W. H., Joo, W. H. and Kim, S. K., 2004, "Vibration Characteristics and Countermeasures of a Transaxle Type Forklift Truck," Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 912~918.

(3) Lee, D. I., Choi, H. W., Park, K. B. and Lee, S. K., 1996, "Dynamic Response Optimization for Vibration Reduction of the Fork-lift Truck," Proceedings of the KSNVE Annual Spring

Conference, pp. 155~160.

(4) Ra, D. J., Kim, J. H., Choi, S. B. and Kim, N. I., 2004, "Study on Riding Quality Improvement of a Forklift Truck through Structural Vibration Analysis," Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 542~545.

(5) Kim, W. H., Hong, I. H. and Chung, J. T., 2008, "A Study on Noise Reduction for the Driving System of a Forklift," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 1, pp. 80~86.

(6) Jang, H. K., Lee, S. H. and Kim, T. I., 1996, "Reduction of Wet Brake Squeal in Forklift," Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 98~103.

(7) Horace. E. Staph, 1985, "Experimental Study of Wet-Brake Friction," SAE 851575.

(8) Friesen, T. V., 1983, "Chatter in Wet Brakes," SAE 831318.

(9) Vincent, M. Stempien, 1981, "Wet Disk Brakes for Off-highway Vehicles," SAE 811288.

(10) Michael, R. A., 1992, "Key Elements of Wet Brake and Clutch Design," SAE 921660.

(11) Kim, J. H., Bae, B. J., Lee, S. H. and Kim, T. J., 2005, "Squeal Noise Analysis and Reduction of Drum Brake Using Component Mode Synthesis," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 1, pp. 72~80.