한국소음진동공학회 1996년도 추계학술대회논문집, pp. 98-103.

지게차용 습식 브레이크의 소음저감

°장한기*, 이성호**, 김태일**

Reduction of Wet Brake Squeal in a Forklift

Han-Kee Jang, Seong-Ho Lee, Tae-Il Kim

ABSTRACT

Elimination of squeal noise generated during brake application is an important task for the improvement of comforts in vehicles. In this paper, the structure of the wet brake and its operation are described first, and the cause of the noise is analyzed by identifying how the factors such as torque, speed, oil pressure, lubricant, and friction material affect the noise. To verify the mechanism of generation of the noise, several experiments of brake applications are executed. Based upon the review on the technical papers and the results from the experiments, several solutions to reduce the noise, available in real applications, are suggested, and the feasibilities of them are confirmed through the applications to the current system.

1. 서론

제동시스템, 즉 브레이크는 차량(vehicle)이나 회전체 등에서 속도를 제어하거나 정지하기 위한 목적으로 사용되는, 중요한 기계요소 시스템이다. 브레이크의 근본적인 기능은 구조물의 관성에 의한 운동에너지를 짧은 시간 내에 다른 형태의 에너지-열에너지, 변형에너지, 소리에너지 등-로 변환시키는 것이다[1]. 두면 사이의 마찰계수를 이용하는 직접마찰식 브레이크에서 가장 이상적인 상황은 운동에너지를 짧은 시간 내에 다른 형태의 에너지로 변환시키는 것이라고 할 수 있다. 그러나 일반적인 제동 시스템에서는 열에너지뿐만 아니라 고착-미끄러짐(stick-slip)거동에 의해 야기된 진동에너지와 소리에너지 등이 발생하여 브레이크의 성능을 떨어뜨릴 뿐만 아니라 주위 사람을 불쾌하게 만든다. 이렇게 발생된 소음을 브레이크 소음 또는 브레이크 이상소음(squeal, chatter)이라 한다.

브레이크 이상소음은 차량의 흡, 배기계나 엔진블록의 방사소음과 달리 간헐적이고 매우 날카롭게 발생하여 신경에 매우 거슬리므로 우선적으로 저감시켜야 할 대상이다.

브레이크 이상소음은 발생 주파수에 따라 그 원인이나 해결을 위한 접근 방법에 큰 차이가 있으며, 특히 습식 브레이크는 그 구조와 작동원리가 다른 브레이크보다 복잡하고 소음의 발생원인 또한 다양하여 문제해결이 어렵다는 특징을 갖고 있다. 본문에서는, 현재까지 진행되어온 관련 기술의 분석을 통해, 습식 디스크 브레이크의 구조와 특성, 그리고 이상소음 발생과정을 간략히 기술하고 실차에 대한 제동실험을 통해 확인하였다. 관련기술자료와 실험결과를 토대로 이상소음 저감방안을 제시하였으며 이를 실차에 적용하여 그 효과를 확인하였다.

2. 습식 브레이크의 구조와 특성

습식 브레이크는 제동시 흡수 에너지가 클뿐 아니라 수명도 사용조건에 따라 150,000km에 이른다. 특히, 밀폐된 용기안에서 오일에 잠긴 상태에서 마찰력이 발생하기 때문에, 사용환경이 비교적 열악한 off-road 차량에 주로 사용된다[2].

습식브레이크의 구조는 Fig.1에 도시한 바와 같으며, 대부분 여러 개의 디스크를 겹쳐서 사용한다. 마찰재가 부착된 디스크 패드와 금속 플레이트를 번갈아 가며 설치하는데, 이 때 한 쪽은 정

*) 고등기술연구원 자동차기술연구실, 정회원
**) 대우중공업 산차제기부

지해 있고 다른 한쪽은 축과 함께 회전한다. 운전자가 브레이크 페달을 밟으면 부스터(booster)에서 높은 압력이 발생되고, 이 압력이 패드-플레이트 어셈블리를 밀어주어 접촉면 사이에 마찰력을 발생시킨다. 이 과정에서 발생되는 힘, 속도, 발생 토오크의 특성곡선을 단계별로 그리면 Fig.2와 같고, 이 때 각 단계에서의 특징을 정리해보면 Table 1과 같다.

3. 소음발생 메카니즘

습식브레이크에서 제동력이 발생되는 부분인 마찰패드-오일-마찰판 구조를 습식 마찰짝(wet friction couple)이라고 지칭하는데 사용조건에 따라서 두 가지 장치로 나눌 수 있다. 하나는 상대속도가 크고 전달 토오크가 작은(HSLT: High Speed Low Torque)장치이고, 또 하나는 상대속도는 낮지만 전달 토오크가 매우 큰(LSHT: Low Speed High Torque)장치이다. HSLT 장치는 승용 차량용 자동변속기의 동력 연결-차단 장치인 클러치로, LSHT 장치는 산업용 차량이나 비포장 도로용(off-road) 차량의 브레이크로 널리 쓰인다[3].

이 두 가지 형태의 장치들의 상대적인 특징은 Table 2에 정리하였는데, 브레이크로 사용되는 LSHT장치의 두드러진 특성은 우선 작용압력이 높고, 초기 상대속도가 낮으며, 브레이크 작용시간이 매우 길다는 것이다. 이와 같은 조건하에서는 마찰면의 높은 압력에 의해 면내의 오일이 빠져나가게 되는(squeeze-out) 경계윤활상태가 이루어지는데 오일에 의한 유체마찰과 두 면의 직접접촉에 의한 마찰이 혼재하는 상태가 된다. 이와 같은 상황에서는 두 면 사이의 동마찰계수와 정마찰계수의 차이에 기인하는 stick-slip현상이 발생하기 쉽다. 특히 브레이크 작용시간이 길어짐에 따라 불안정한 stick-slip 거동이 증폭되면서 다소 날카로운 마찰소음이 발생한다[2,4].

4. 소음발생 메카니즘의 확인실험

앞에서 분석한 이상소음 발생 메카니즘이 실제 차량에서도 적용되는지를 확인하고 이를 토대로 저감방안을 제시하기 위해서는, 이상 소음이 발생하는 시점, 제반조건과 그 특성을 정확하게 파악할 필요가 있다. 이를 위해서 본 연구에서는 다양한 운전조건에 대해 제동시험을 수행하여 이상소음 발생여부를 확인하였으며, 이 때 제동조건과 소음의 특성을 함께 분석하였다.

시험조건 및 방법

시험은 3가지 운전조건(최대부하상태에서의 후진, 무부하상태에서의 전/후진) 각각에 대해, 페달답력을 3단계(강/중/약)로 조절해가며 9가지 경우에 대해 이상소음 발생여부를 파악하였다. 각 경우에 대해 실차 제동시험을 6-10회씩 반복 수행하였으며, 이 때 제동메커니즘에 영향을 주는 신호들-차량속도, 바퀴의 회전속도, 브레이크 오일온도, 페달의 답력, 브레이크 오일압력, 소음레벨-을 각각 측정하였다. 여기서 차량속도와 바퀴의 회전속도는 브레이크 locking에 따른 미끄러짐(skid)발생여부를 파악하기 위해서 측정하였고, 답력과 브레이크 오일압력은 브레이크 부스터(booster) 시스템의 특성을 파악하기 위해서, 마지막으로 소음레벨은 이상소음의 크기와 주파수 특성을 분석하기 위해서 각각 측정하였다. 브레이크 오일의 온도는 오일의 점성을 결정하는 주요한 인자이므로 차량을 장시간 운행하여 정상상태로 유지시키면서(약 80°C) 시험을 수행하였다. 각 신호는 시간영역에서 10kHz의 샘플링 간격으로 30만개의 데이터를 한 세트로 하여 측정, 분석하였다.

소음의 특성과 발생조건 및 시점

근접장 측정(30cm) 신호의 주파수 분석결과를 Fig.3에 도시하였는데, 소음의 주된 주파수는 약 4550Hz였으며, 해당 소음레벨은 112dBA였다. Fig.4에는 5회의 제동실험에 대해, 각 경우마다 제동메커니즘에 영향을 주는 여러 가지 신호를 동일한 시간 축에 도시하였다. 일단 페달을 밟으면(Fig.4-c), 부스터에서 토출된 압력이 증가하여 패드를 밀어주게 되고(Fig.4-b), 이 때 차량의 속도(Fig.4-e)가 감소한다. 바퀴의 회전속도를 나타낸 tacho신호를 보면(Fig.4-d), 차량의 속도가 0이 되기 전에 바퀴의 회전이 멈췄음을 알 수 있다. 이 그림으로부터 소음은 바로 브레이크의 상대속도가 0에 이르는 시점에서 발생함을 알 수 있다(Fig.4-a). 이 제반과정은 Fig.2에 도시한 그림을 뒷받침해주고 있다.

Fig.4로부터 알 수 있는 또 한가지 사실은 압력이 높은 전반부의 3가지 경우에 비해 압력이 낮은 후반부의 두가지 경우의 소음발생량이 낮다는 것이다. Fig.5에는 부하 후진시 수행한 19회의 제동시험에서 얻어진 브레이크 오일압력과 발생 소음량의 상관관계를 도시하였다. 이 그림을 보면 일

부 예외도 있지만 전반적인 경향을 보면, 압력이 높을수록 소음발생 가능성이 높아지며 소음 량도 함께 증가하고 있다. 예외의 경우는 마찰소음의 특성상 재현성이 떨어지기 때문인 것으로 추정된다.

결과 검토

4장에서 수행한 시험결과를 정리하면, 첫째, 압력 증가에 따라 소음발생 빈도와 발생 량이 증가하는 경향을 보였으며, 둘째, 마찰판의 상대속도가 0이 되기 직전에 소음이 발생하고 있음을 확인할 수 있었다.

5. 소음저감방안의 도출 및 적용결과

이상소음 저감방안

2~4장에서는 각각 자료조사와 실험을 통해 이상소음의 발생조건, 각 인자와 이상소음 사이의 상관관계, 실차상태에서의 소음발생 메카니즘과 그 원인을 파악하였다. 이들 결과를 토대로 현장에서 적용 가능한 개선 안들을 도출하였으며 이를 각각 실차에 적용하여 실험을 수행하였다. 본 연구에서 제시된 저감방안의 기본 개념은 크게 두가지로 나눌 수 있다. 하나는 마찰 면 오일의 'squeeze-out'현상을 억제하여 마찰소음의 발생 자체를 억제하자는 것이고, 또 하나는 이미 발생된 소음의 레벨을 낮추자는 것이다.

구체적으로 제시된 방안은 3가지인데, 첫째는 브레이크 오일압력의 조절, 둘째는 첨가제 사용, 셋째는 마찰 패드의 재질 변경이었다. 첨가제 사용의 목적은 접촉면의 오일이 빠져 나가는 것을 억제하기 위한 것이고, 마찰패드의 변경은 동마찰계수와 정마찰계수의 차이가 적은 재질로의 변경을 의미한다[5].

저감방안 적용 및 결과

위에서 제시된 3가지 이상소음 저감방안을 실차에 각각 적용하였는데, 4장에서의 시험과 마찬가지로 9가지 시험조건(부하 후진/무부하 전진/무부하 후진 ⊗ 답력 강/중/약)에 대해 각각 3회씩 제동시험을 수행하였다. 시험결과는 Fig.6에 하나의 그림으로 정리하였다. 그림에서 'fwd'와 'bwd'는 각각 전, 후진을 의미하고 'force 1,2,3'는 각각 답력의 강, 중, 약을 의미한다. 4개의 막대 그래프 각각은 9가지 운전조건에서의 이상소음발생량을 색깔별로 도시한 것인데, 첫 번째 그림이 초기 상태를 나타낸 것이고 두 번째는 브레이크 오일압력만을 조절했을 때의 결과를, 세 번째는 첨가제만 추가하였을 때, 네 번째 그림은 마찰 패드만을 교체하였을 때의 결과를 나타낸다.

시스템의 초기 상태를 보면 9가지 시험조건 중에서 8가지 경우에서 소음이 발생하였으나, 압력을 조정하였을 때는 다섯가지, 첨가제 사용할 때에는 두가지, 패드교체시에는 세가지의 경우로 소음발생의 경우의 수가 감소하였다. 그리고 그림에서 볼 수 있듯이 그 절대적인 양도 전반적으로 감소하였음을 알 수 있다. 특히, 초기 상태에서 가장 큰 소음 량을 보였던 부하시 후진상태에서의 이상소음량은 압력 저감을 통해 1/5, 첨가제 사용과 패드교체를 통해 완전히 제거되었음을 알 수 있다.

본 시험의 결과를 보면 제시된 3가지 방안이 이상소음 저감에 상당한 효과가 있었음을 알 수 있다. 그러나 이들 방안의 적용여부는 브레이크의 성능테스트, 즉 제동력 테스트를 통해 최종 확정돼야 한다.

6. 결론

본 연구에서는 지게차에 사용되고 있는 습식 디스크 브레이크에서 발생하는 마찰 소음을 저감시키고자 하였다. 이를 위한 첫 번째 단계로, 관련 자료의 수집과 분석을 통해 습식 디스크 브레이크의 구조와 작동원리를 파악하고, 이를 이용하여 이상소음 발생과정을 분석하고 발생원인을 규명하였다. 두 번째로, 실차시험을 통하여 추정된 이상소음 발생 메커니즘을 확인하였으며, 이를 토대로 현장에서 적용 가능한 개선 안들을 도출하였다. 마지막 단계로, 제안된 개선 안을 실차에 각각 적용하여 다양한 운전조건에서의 이상소음 발생 경향을 살펴보았는데, 발생 빈도와 발생 량의 저감 측면에서 상당한 효과가 있었다.

그러나 브레이크 마찰소음을 분석하고 제거해 나가는 과정에는 몇 가지 해결해야 할 점이 있다. 첫 번째는, 소음발생의 재현성이 확보되지 않는다는 점이다. 동일한 조건임에도 불구하고 어떤 경우에는 소음이 발생하는데 어떤 때에는 소음이 발생하지 않는데, 이런 현상이 현장 엔지니어를 가장 당혹스럽게 만드는 사항이다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서 본 연구에서는 동일 조건에서 실험의 횟수를 증가시켜 통계적인 처리를 하는

방법을 채택했으며, 가능한 한 짧은 기간 내에 시험을 수행하여 결과를 상호 비교하였다.

두 번째로 고려할 것은, 습식 브레이크의 구조와 소음발생 메커니즘이 서로 복잡하게 얽혀 있어서 저감방안의 적용에 많은 제한을 받는다는 사실이다. 본 연구에서도 이와 같은 사항을 고려하여 개선 안을 도출했으나 이들 개선 안의 적용이 브레이크의 근본적인 성능-원하는 시간 내에 원하는 양만큼 감속시켜야 하는-에 영향을 준다면 적용이 불가능하게 된다. 결국 브레이크 마찰소음을 현실적으로 줄이기 위해서는 시스템 차원에서 다각도의 접근을 통해 여러 가지 가능성 있는 방법들 도출하여 상황에 따라 적절히 조합하여 적용하는 것이 바람직하다고 하겠다.

<참고문헌>

1) R. Limpert, Brake Design and Safety, Society of Automotive Engineers, 1992.

2) R. A. Michael, "Key Elements of Wet Brake and Clutch Design," SAE Technical Paper 921660, 1992.

3) M. A. Anleitner, "Vibration and Noise in Oil-immersed Friction Couples-A Basic Discussion," SAE Technical Paper 861202, 1986.

4) T. V. Friesen, "Chatter in Wet Brakes," SAE Technical Paper 831318, presented at the international Off-Highway Meeting & Exposition, Milwaukee, Wis., September, 1983.

5) 장한기, 이성호, 김태일, "습식 디스크 브레이크의 마찰소음 해석 및 저감, 대우기보 9월호, 1996.

Table 1 Change of conditions in contacting surfaces during engagement

condition	Phase I	Phase II	Phase III
Torque	deceleration torque by viscous shear	stabilized deceleration torque	increase by mechanical contact
Lubrication	wet friction	boundary lubrication	dry friction
	separated by hydrodynamic film	breakdown of the hydrodynamic film	remaining oil is squeezed out
Noise/vibration	X	O	O

Table 2 Comparison of two kinds of wet friction couples (HSLT device and LSHT device)

	HSLT(High Speed Low Torque) device	LSHT (Low Speed High Torque) device
Initial velocity	2000~4000 rpm	200~400 rpm
facing pressure	about 150 psi	about 400 psi
engagement time	less than 0.5 sec	up to 3~5 sec
torque	a few hundred Lb-ft	about 10,000 Lb-ft
usage	auto T/M clutch, driveline brake	wheel end brake

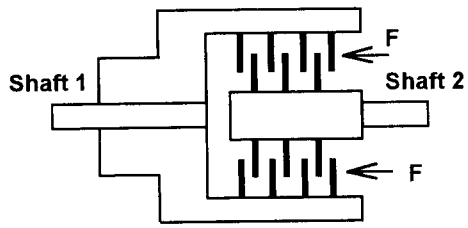

Fig. 1 Schematic diagram of wet disk brake

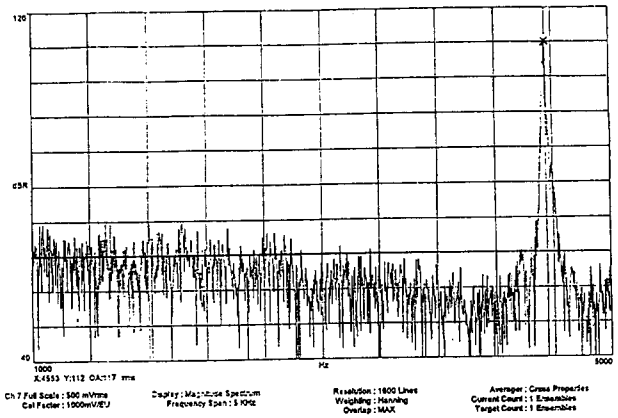

Fig. 3 Near field noise spectrum of a brake

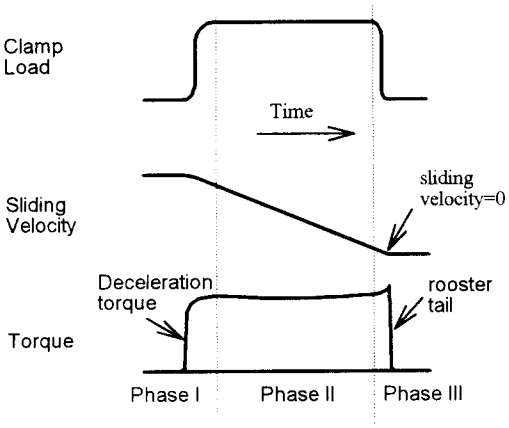

Fig. 2 Characteristic curves during engagement of wet brakes

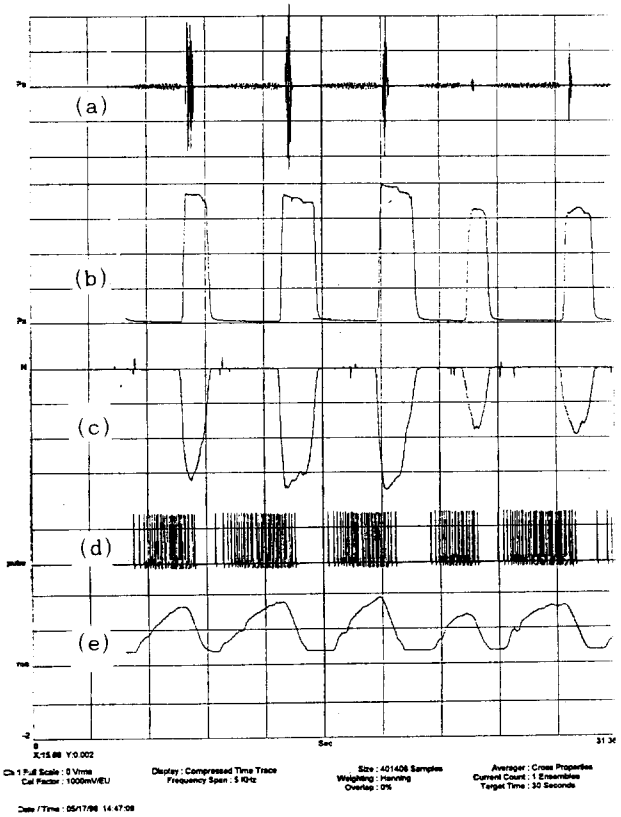

Fig. 4 Characteristic signal patterns of a brake
(a)noise level (b)brake line oil pressure (c)pedal force
(d)tacho signal of front wheel (e)vehicle velocity

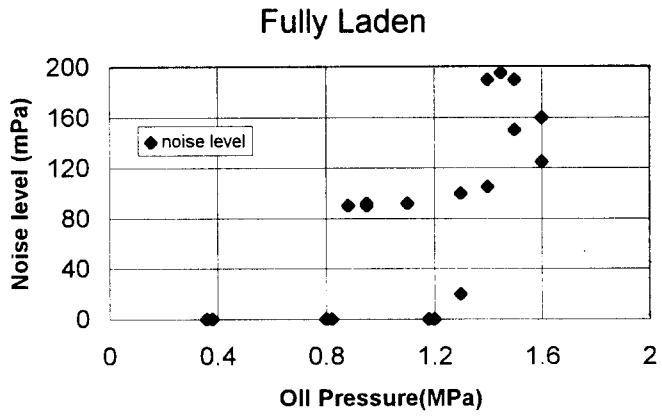

Fig. 5 Variation of noise level for various oil pressure

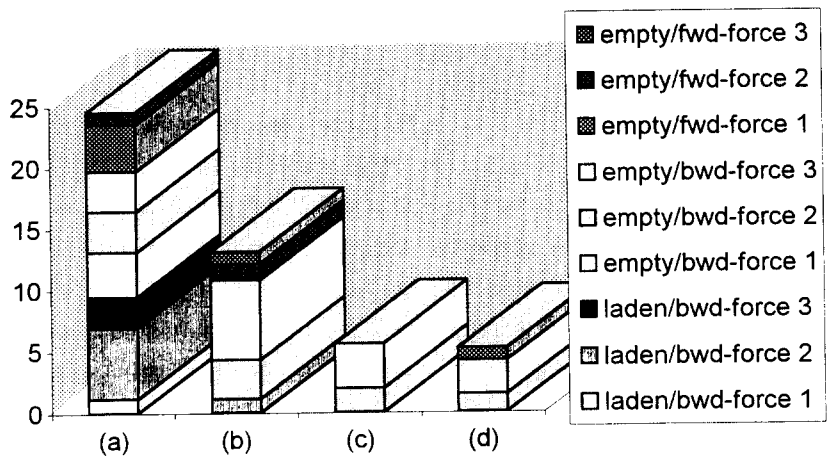

Fig. 6 Variation of the noise level with the system modification
(a)original state (b)reduction of pressure (c)use of additive
(d)change of pad material