

랩스케일 브레이크 다이내모 메터를 이용한 패드각도 및 음의 기울기에 따른 스퀄 소음 실험 연구

남재현¹, 조병제¹, 강재영^{1*}
¹공주대학교 기계공학부

Squeal Test Using Lab-Scale Brake Dynamometer for Pad Angle and Negative-slope

Jae-Hyun Nam¹, Byung-Jae Cho¹ and Jae-Young Kang^{1*}

¹Division of Automotive & Mechanical Engineering, Kongju National University

요약 본 연구에서는 회전속도, 브레이크 압력 제어가 가능한 브레이크 다이내모메터를 제작하여 스퀄 소음 실험을 실시하였다. 브레이크 패드는 각각 34°, 30°, 26°로 가공하여 패드 각도에 따른 스퀄 발생 조건과 음의 기울기 발생에 따른 스퀄 연관성을 연구 하였다. 각도에 따라 특정한 회전속도와 브레이크 압력에서 스퀄이 발생하였으며, 각도에 상관없이 하모닉 성분을 가지는 특정 주파수 소음을 발견하였다. 햄머링 테스트 및 유한요소해석을 통해서 특정 주파수는 In-plane 모드 성격을 갖고 있으며, 패드 각도에 둔감한 모드임을 밝혀냈다.

Abstract In this study, squeal noise test was conducted by using the lab-scaled brake dynamometer. Squeal conditions with respect to the angle of the brake pads (34°/30°/26°) and negative slope, were studied. Squeal frequency of the In-plane-like mode was confirmed by hammering test and finite element analysis. This Squeal mode was difficult to control by the pad angle variation. Also the squeal sound was found to be periodic signal which has higher harmonic components. Squeal noise is independent of the negative slope. It implies that squeal noise can reach the stick-slip oscillation.

Key Words : Brake squeal, Brake dynamometer, FFT, Hammering test, Sound pressure

1. 서론

제동장치에서 발생하는 진동 소음으로는 스퀄(Squeal), 및 저더(Judder) 등이 있다. 자동차 브레이크 스퀄의 경우 온도와 관계없이 냉간 소음의 일부분으로 발생하는 경우가 많다. 이 소음은 차량이 정차 하기 직전이나 낮은 압력과 저속에서 발생하게 된다[1,2]. 이러한 소음이 발생 되는 원인은 고유 진동수, 진동 모드, 마찰계수의 음의 기울기 발생여부 등에 의한 원인이 있으며 그 해결 방법 또한 각기 다르다. 브레이크 스퀄 소음은 그 해석에 대한 많은 연구와 실제 차량을 대상으로 실험한 분

석결과 들이 있다. 그러나 소음을 해결할 수 있는 근본적인 메커니즘에 대해 명확하게 증명한 것은 없어 보인다[3-5]. 본 연구에서는 기계적인 압력제어와 전기적인 속도제어가 가능 한 브레이크 다이내모메터를 설계 및 제작 하였다[6]. 음의 기울기 발생, 브레이크 패드각도, 속도와 압력 에 따른 스퀄의 관계를 실험적으로 알아보았다. 또한 실험 데이터에 대한 스퀄 소음을 분석하기 위하여 FFT 데이터를 기반으로 햄머링 테스트를 통해 진동모드에 대한 실험적 분석을 하였으며 스퀄이 발생하는 원인을 찾아보았다[7].

본 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012-0007301)

*Corresponding Author : Jae-Young Kang(Kongju National Univ.)

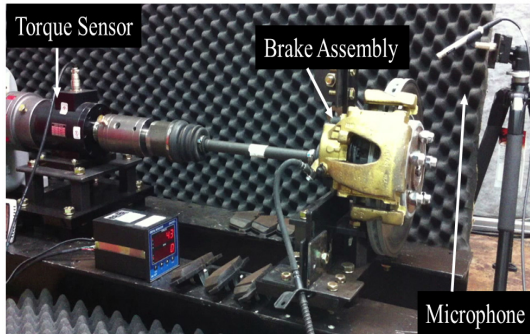
Tel: +82-41-521-9263 email: jKang@kongju.ac.kr

Received April 23, 2013

Revised (1st June 3, 2013, 2nd June 12, 2013)

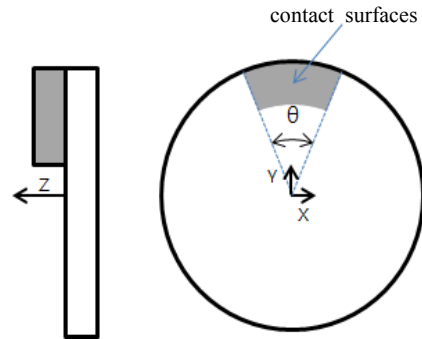
Accepted July 11, 2013

2. 실험 방법



[Fig. 1] Brake dynamometer

실제 차량에서의 브레이크 제동 장치에 관한 실험은 차량의 무게, 주행의 가속도와 감속도 주행 중에 발생될 수 있는 열 등, 환경적인 요인에 의해 정확한 실험을 하기가 어려운 점이 많다. 이로 인해 상온에서 동일한 실험 조건을 부여하기 위한 실험실을 구축 하였으며 습도조절이 가능하고 온도 측정이 가능한 램스케일 브레이크 다이내모메터를 제작 하였다. 브레이크 디스크를 모터로 회전시키며, 유압에 의해 브레이크 패드를 디스크와 마찰시켜 제동 실험을 하였다. Fig. 1은 본 논문에 이용된 브레이크 다이내모메터의 개략도 이다. 사용된 모터로는 맥스기어드모터 이며 최대토크 58.77kg-m, 최대 180rpm, 용량 11kW - 15HP 이다. 보통 풋(foot) 브레이크로 자동차에 압력을 가하던 것을 기계식으로 개조하여 일정한 압력을 유지할 수 있으며 최대 20bar의 압력을 가지고 실험 할 수 있다. 모터의 속도는 인버터에 연결된 컴퓨터로 제어가 가능하며 실제 차량으로는 실험하기 힘든 일정한 가속과 감속 및 속도를 설정할 수 있다. 브레이크 디스크는 실제차량의 허브로, 패드는 켈리퍼에 장착하고 제작한 지그와 켈리퍼를 결합하여 두 개의 프레임에 고정하였다. 기계식으로 제작된 압력발생으로 일정한 브레이크의 압력을 가할 수 있게 하였으며 브레이크 패드가 디스크를 양쪽에서 압착시켜 제동력이 발생한다. 제동력이 발생하는 이때의 실험 데이터는 DAQ 장비를 이용하여 입력 받은 신호를 Labview를 통해 축에 걸리는 토크, 디스크와 패드 사이에 발생하는 음압을 실시간으로 관측하였다.



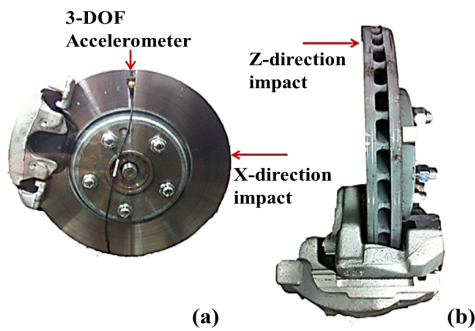
[Fig. 2] Brake pad processing reference point

본 실험에서는 브레이크 패드 각도, 압력과 속도 에 따른 스켈 발생 원인을 이해하고자 스켈이 잘 발생되는 패드를 이용하였으며, 브레이크 패드 뒷면에 있는 댐핑 심도 제거 하였다. 패드는 디스크의 중심에 맞춰 처음 완제품 각도 34°에서부터 가공해 30°, 26°로 Fig. 2와 같이 θ 값에 변화를 주었다. 실험을 시작하기 전 온도와 습도를 측정하여 기록하고 각도가 다른 3개 패드를 교환하며 실험 하였다. 습도는 60~63%로 유지하였고 온도는 24℃이다. 패드와 디스크면의 정렬을 위해 회전속도 180rpm, 브레이크 압력 5bar, 모터 발생 토크 1kg-m~11kg-m 에 맞춰 5분간 아이들링 후 실험을 실시하였다[8]. 컴퓨터와 연결된 인버터로 모터의 속도는 단계적으로 일정하게 유지하였다. 5rpm씩 0~90rpm까지 18차례 실험을 실시하였다. 브레이크 압력은 0~8bar까지의 범위를 가지고 일정한 속도와 압력의 영향으로 발생하는 스켈 주파수들을 측정 하였다. 또, 스켈이 발생한 조건의 압력을 유지하고 0~90rpm까지 일정한 가속도로 가속과 감속을 실시해 스켈과 속도변화에 따른 마찰계수 변화를 DAQ를 통해 기록하였다. 각도가 다른 3개의 패드도 동일 한 방법으로 실험 하였다.

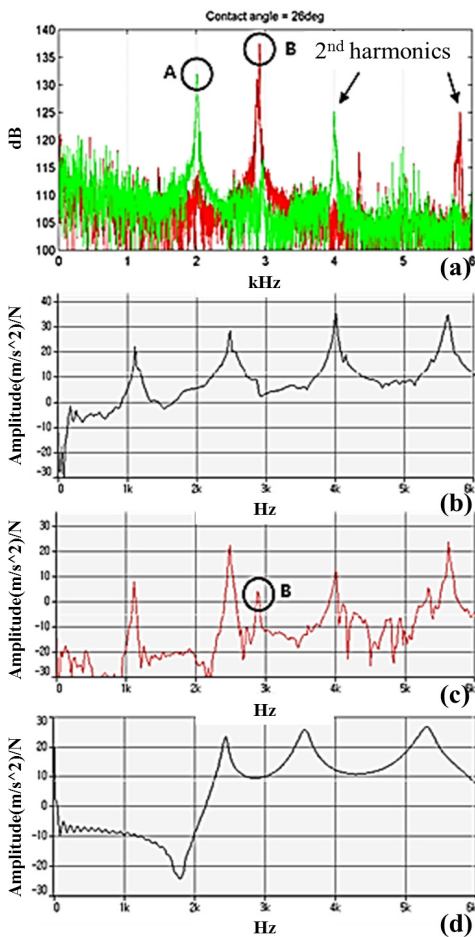
3. 실험 결과

3.1 선행실험

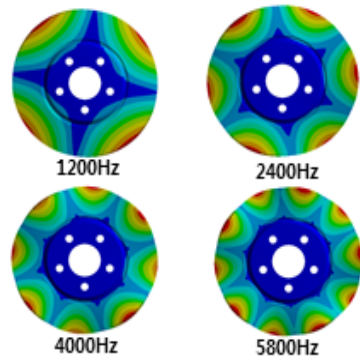
발견한 주파수를 해석적인 결과와 실험적인 결과를 비교하기 위해 디스크는 5개 홈으로 허브와 고정시키고 패드는 압력제거 상태로 3축 가속도계와 B&K장비로 테스트 하였다. Fig. 3은 디스크의 고유주파수를 찾기 위해 3축 가속도센서를 브레이크 디스크에 부착하고 햄머로 X방향과 Z방향으로 충격을 가한 기준 그림이다.



[Fig. 3] Hammering test method
(a) X-direction position (b) Z-direction position

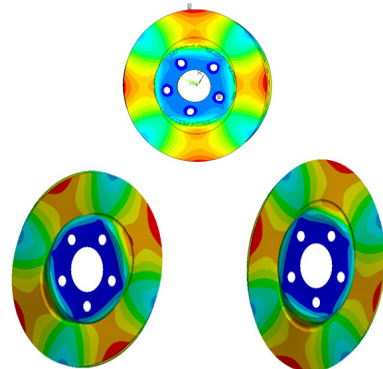


[Fig. 4] Squeal Noise and hammering separately test on the disk
(a) Squeal Noise (b) Disk Hammering (Z-direction component) (c) Disk Hammering (X-direction component) (d) Pad hammering (disk is equipped with state on the Hub, Pad the free state)



[Fig. 5] FEM analysis result of Z-direction doublet mode

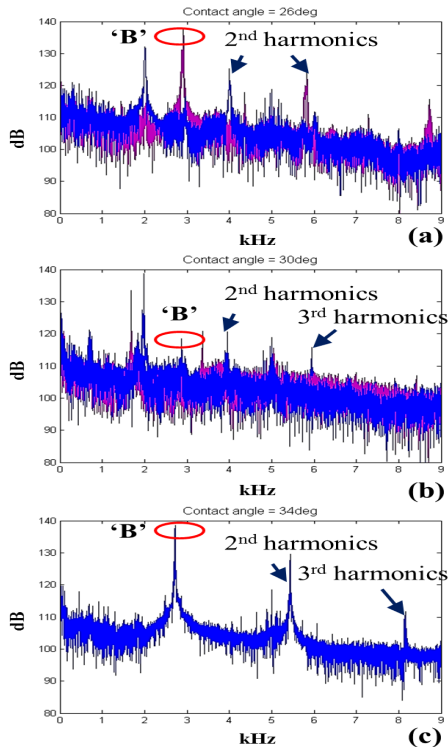
Fig. 4 (a)는 26°브레이크 패드를 사용하여 마이크로폰으로 측정된 주파수 2000Hz와 2800Hz를 포개어 나타낸 그래프이다. (b),(c),(d)는 B&K장비와 3축 가속도계를 이용하여 Fig. 3의 방법으로 측정된 햄머링 테스트 결과 그래프이다. 그래프(a)의 A점 2000Hz와 B점 2800Hz 부근에서 피크가 발생하였으며 처음 발생한 주파수에 배수 간격을 둔 2차 하모닉 성분이 발견되었다. 그래프(b)는 z방향에서 발행하는 디스크 고유주파수 들이다. 4개의 고유주파수 피크들은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 FEM 해석 결과 디스크 쌍 모드들이다. z방향 성분의 4000Hz와 5800Hz 피크의 주파수는 A모드와 B모드의 stick-slip에 의한 고차 하모닉 성분이며, 디스크 고유진동 모드에 의한 것이 아니다. Fig. 4 (a)와 (b)에서 스킵 소음의 발생 주파수와 디스크 쌍 모드의 주파수와 일치하는 주파수는 없다. Fig. 4 (d)에서도 패드 고유주파수는 스킵 주파수와 일치하지 않고 있음을 볼 수 있다. 차이가 있는 것으로 보아 스킵 소음은 디스크 모드로 인한 소음이 아님을 알 수 있다.



[Fig. 6] FEM analysis result of X,Y-direction In-plane mode

그러나 X방향성분의 Fig. 4 (c)에서 발견된 B점의 2800Hz는 이론적 유효요소 해석을 통한 FEM 결과로 비교해 보았을 때 Fig. 6 와 같이 In-plane 모드, 옆으로 퍼지는 모드 성향을 가지는 것임을 알 수 있다.

3.2 패드 마찰 재 각도에 따른 스킵 실험

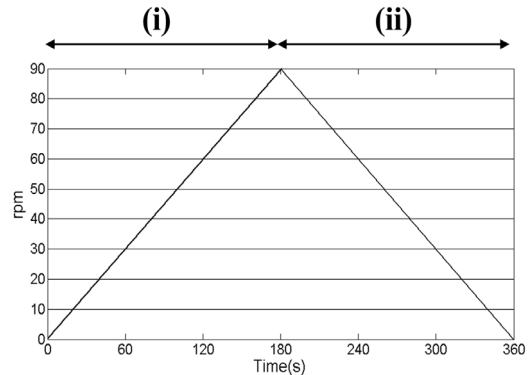


[Fig. 7] The pad angle Squeal Noise signal (FFT)
 (a) 26°pad (b) 30°pad (c) 34°pad

Fig. 7은 각도에 따라 발생하는 스킵 주파수들을 각도 별 그래프에 겹쳐서 나타내었다. (a),(b)는 변동하고 안하는 몇 가지 주파수 피크가 있었으며 (c)의 경우 2800Hz 한 개의 주파수만 발견 되었다. 속도에는 크게 상관없이 압력에 따라 스킵이 발생하는 주파수가 변동되는 영역이 있지만 3개의 패드 B점에서 동일한 2800Hz 주파수들이 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 각도에 따라 나타나고 사라지는 주파수를 발견 하였으며, 스킵 시험 시 고차 하모닉 성분들이 발생하였다. 26°(a)의 경우 2000Hz 및 2800Hz의 스킵 주파수가 나타났고 그에 대한 2차, 3차 하모닉 성분이 측정되었다. 30°(b)의 경우 2800Hz 뿐만 아니라 1600~2000Hz까지 변동하는 스킵 주파수를 발견 하였다. 34°(c)의 경우 2800Hz 기본 주파수 및 배수인 2차, 3차 하모닉 성분이 측정 되었다. 9]에 따르면 접촉 각

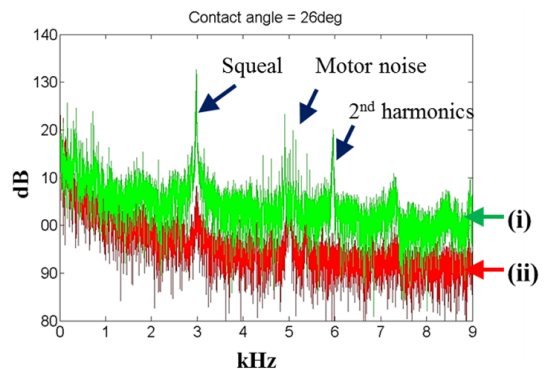
도에 따라 진동 모드의 불안정성이 변함을 알 수 있고, 이것이 스킵 주파수 변동으로 반영되었다고 판단된다. 다만, 2900Hz 스킵 소음은 접촉각도에 둔감한 진동 모드에 의한 것으로 판단할 수 있다. 따라서 본 실험에서 측정된 스킵 소음은 stick-slip 현상에 의한 주기함수성 소음임을 알 수 있다.

3.3 디스크속도에 따른 마찰 및 스킵 실험

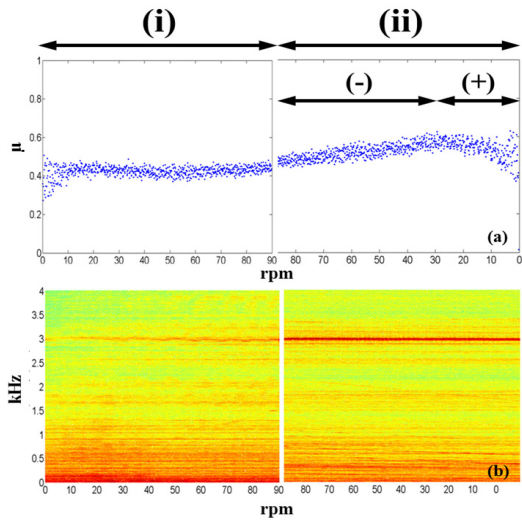


[Fig. 8] rpm change graph used in the experiment
 (i) acceleration section (ii) deceleration section

Fig. 8은 속도에 따른 마찰계수 측정을 위해 사용한 속도 설정 값이다. 스킵이 발생하는 압력 조건에서 일정한 가속과 감속을 실시하였으며 0~90rpm까지 3분 동안 가속하였고 90~0rpm까지 3분 동안 감속한 시간에 따른 rpm 그래프 이다.



[Fig. 9] Squeal Noise signal that occurred during the acceleration(i) and deceleration(ii)



[Fig. 10] (i) acceleration section (ii) deceleration section, (a) friction coefficient and velocity graph (b) squeal frequency with respect to rotation speed

Fig. 9은 가속과 감속 6분 동안의 발생한 스켈 소음의 누적 그래프이다. (i) 구간은 가속할 때 발생한 스켈 소음 들이며 (ii) 구간은 감속할 때 발생한 스켈 소음들이다. 가속할 때 보다 감속할 때, 평균적으로 더 높은 데시벨이 보인다. Fig. 10 (a)의 가속구간 (i)에서는 마찰계수가 거의 일정하여 속도 대 마찰계수 기울기를 보이지 않는다. 하지만 감속구간 (ii)에서는 저속에서는 양의 기울기 고속에서는 음의 기울기를 가지며, 가속구간 (i)보다 큰 마찰계수를 보인다. 그에 따른 스켈 소음은 Fig. 10 (b)에서 보듯이 마찰계수가 큰 감속구간 (ii)에서 2900Hz의 스켈 소음이 상대적으로 강하게 나타나고 속도 및 음의 기울기에 상관없이 지속적으로 발생함을 볼 수 있다. 따라서 2900Hz의 스켈 소음은 음의 기울기보다 마찰계수의 크기에 영향을 받고 있음을 확인 할 수 있다. 이는 2900Hz의 스켈 모드는 마찰의 음의 기울기에 기인한 것이 아니고 모드 연성에 기인함을 유추할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 실제 차량에서 발생하는 스켈 소음을 분석하기 위하여 직접 제작한 브레이크 다이내모메타를 이용하여 수치 해석적인 예측과 햄머링 테스트와 비교하여 다양한 조건에서 실험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 각도 별로 변치 않는 2800Hz 주파수를 발견 하였으며 이 주파수는 FEM과 Hammering Test로 확인 해본 결과 디스크 In-plane 모드임을 확인 하였다.
- 2) 각도에 따라 나타나고 사라지는 주파수를 발견하였고, 이 주파수는 FEM과 Hammering test로는 찾기 힘든 모드 이다.
- 3) 각도별 스켈 시험 시, 스켈 소음은 확연히 고차 하모닉 성분들이 발생하였다. 이는 Stick-slip 소음임을 암시 하는 것이며, 고차 하모닉 성분은 진동 모드와 무관하다.
- 4) 속도에 따른 마찰계수 시험 시, 2800Hz 스켈 소음은 속도와 음의 기울기에 무관하며 마찰계수의 크기에 영향을 받고 있음을 확인 할 수 있다.

References

- [1] T. K. Sohn, "A Studies For The Reason And Solution of The Squeal Noise Occurred in Very Cold and High Humidity Condition at Automotive Brake Friction Materials" *KSAE*, Vol.3, No.6, pp.1701-1706, 2006.
- [2] S. J. Kwon, C. J. Kim, "A Study on The Analysis of Squeal Noise for Brake Design" *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol.16, No.8, pp.830-839, 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5050/KSNVN.2006.16.8.830>
- [3] I. D. Moon, "An Experimental study on Brake Judder via the Frequency Analysis of the Brake System and Vehicle System of a Commercial Vehicle" *KSME*, Vol.31, No.12, pp.1131-1138, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2007.31.12.1131>
- [4] S. W. Kung, "Complex Eigenvalue Analysis for Reducing Low Frequency Brake Squeal", *Society of Automotive Engineers*, paper No. 2000-01-0444.
- [5] Q. Cao, H. Ouyang, M. I. Friswell and J. E. Mottershead "Linear Eigenvalue Analysis of The Disc-Brake Squeal Problem", *International Journal For Numerical Methods In Engineering*, Vol.61, Issue 9, 61:1546-1563, 2004.
- [6] J. Glišović, R. Radonjić, "Experimental Method for Analyzing Friction Phenomenon Related to Drum Brake Squeal" *Tribology in industry*, Vol.32, No.4, 2010.
- [7] J. H. Nam, J. Y. Kang "A Basic Experimental Study on The Squeal Noise Using the Pin-on-disk" *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol.22, No.8, pp.736-741, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5050/KSNVE.2012.22.8.736>

- [8] J. P. Park, Y. S. Cho, "Experimental Analysis on Brake Squeal Noise Due to Disk Misalignment" *Transactions of KSAE*, Vol.12, No.5, pp.118-124, 2004.
- [9] J. Y. Kang, C. M. Krousgrill, "Dynamic Instability of A Thin Circular Plate with Friction Interface and Its Application to Disc Brake Squeal" *Journal of Sound and Vibration*, Vol.316, pp.164-179, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2008.02.041>

강 재 영(Jae-Young Kang)

[정회원]



- 1997년 12월 : University of michigan - Ann arbor (기계공학 석사)
- 2008년 8월 : Purdue University (기계공학박사)
- 2009년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계자동차 공학부 교수

<관심분야>
소음 진동

남 재 현(Jae-Hyun Nam)

[준회원]



- 2012년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계공학과 (석사 과정)

<관심분야>
소음 진동

조 병 제(Byung-Jae Cho)

[준회원]



- 2008년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계설계학과 (학사 과정)

<관심분야>
소음 진동