

Power Steering Oil Pump 의 맥동소음 저감에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Pulsation Noise Reduction of Power Steering Oil Pump

안 세 진* · 김 명 환** · 박 진 형** · 정 의 봉*** · 유 승 근****

Se Jin Ahn, Myoung Hwan Kim, Jean Hyung Park, Weui Bong Jeong and Seung Geun You

Key Words :Power Steering Oil Pump (동력 조향 펌프), Noise and Vibration (진동소음), Wavelet Transformation (웨이블렛 변환), Order Analysis (차수 분석), Fluid Pulsation Noise (유체 맥동 소음)

ABSTRACT

Power steering oil pump is generally used to support the power to steering system of most kinds of vehicle. The noise caused by power steering oil pump make passenger to be uncomfortable, because its frequency is higher than that is produced by engine. In this paper, the field test of real car was carried out to analyze the phenomenon of the pump noise, and the lab test was also performed to survey the dynamic characteristics of pump assembly. The results of the series of tests show that frequency range of 600~800 Hz should be dealt with to reduce the pump noise. After four cases of design changes were carried out to actually reduce the noise, and tested in condition of partial assembly. Some improvement can be gotten from a certain design change.

1. 서 론

자동차의 발달과 더불어 사용자들의 정숙성 및 안락한 승차감에 대한 욕구는 계속 증대되고 있으며 이는 NVH 특성이 차량 구입에 중요한 요소로 작용하고 있다는 것을 보여준다. 또 차량의 NVH 특성은 제작회사의 종합적인 기술 수준의 평가기준이 되고 있기 때문에 많은 기술투자와 연구를 진행하고 있다. 본 연구는 동력 조향장치 중 파워스티어링 오일 펌프의 실험적 분석에 주안점을 두고 기술하고 있다.

파워 스티어링 시스템은 차량의 휠 조작력 감소와 편안한 핸들 조작을 위해 널리 장착되고 있다. 그러나 파워 스티어링 펌프는 압력 맥동을 발생시키고 이것은 유체 소음, 구조물 소음 및 공기소음으로 변환되어 사용자로 하여금 불쾌한 느낌을 주게 되며 또한 전체 품질의 저하를 가져오게 된다.

본 논문에서는 실차에서의 소음현상에 대한 주관적(subjective)인 평가와 운전자 귀의 위치에 설치한 마이크로폰(microphone)으로 측정된 객관적(objective) 데이터의 분석으로 사용자들이 불쾌하게 여기는 소음을 파악하였으며 단품상태에서 충격 햄머 실험(impact hammer test)을 통해 동특성을 파악하고 각 주파수, 차수성분을 분석하고 주

된 소음원인인 토출 압력맥동을 줄이기 위해 파워스티어링 펌프의 변경 시에 고려해야 할 요소들과 데이터를 획득하고 분석, 평가하고자 한다.

2. 실차실험

먼저 펌프 소음의 현상을 파악하기 위해서 국내 완성차 업체 중 3사에서 생산되는 차종의 실차실험을 실시하였다. 차량이 출고 후 검사과정에서 파워 스티어링 펌프 소음 불량인 차량과 정상인 차량을 준비해 그림 1 과 같이 마이크로폰(microphone)을 파워 스티어링 펌프(power steering pump), 대쉬 보드(dash Board), 운전석(driver's seat)위치에 설치하고 파워 스티어링 펌프와 엔진에 타코미터(tachometer)를 설치하고 가속도계를 펌프 리어 커버(rear cover)쪽에 설치하였다. 여기서 펌프와 엔진의 타코 신호(tacho signal)를 둘 다 획득한 이유는 엔진과 펌프의 회전수가 다르기 때문에 정확한 펌프 회전 차수를 계산하기 위해서는 펌프 폴리(pump pulley)의 회전수 측정을 해야했고, 회전수가 높아질수록 벨트의 슬립(Slip)으로 인해 회전수의 차이는 더 커짐을 확인하였다.

실제로 A 차량은 Pump/Engine 회전비율이 0.9347이라는 수치가 나와 펌프 회전수 1000rpm 인 경우 각각 엔진의 30 차수와 펌프의 30 차수는 약 32Hz의 차이를 보였다. 여기서 맥동 주파수를 계산하는 방법은 다음과 같다.

* 부산대학교 기계기술연구소

** 부산대학교 대학원 기계설계공학과

*** 부산대학교 기계공학부

**** ㈜ 영신정공 품질보증팀

$$F = \frac{rpm}{60} \times k \quad [Hz] \quad (1)$$

여기서 F 는 맥동주파수, rpm 은 펌프 회전수, k 는 차수를 나타낸다.

그림 2 는 각각 차종의 idle 상태 스펙트럼이다. 그래프 위쪽 부분은 파워 스티어링 펌프 근처에서 측정된 음압의 스펙트럼이고 밑 부분은 운전석 위치에서 측정된 음압의 스펙트럼이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 파워 스티어링 펌프 근처에서는 펌프의 각 차수(order) 성분이 다 나타나지만 실내에서는 1000Hz 이상의 소음은 흡음되거나 차음되어 나타나지 않고 이후 주파수에도 같은 경향을 보였다.

정상제품 펌프를 장착한 차량에 비해 불량제품 펌프를 장착한 차량의 특징은 A 차량에서는 655Hz (펌프 회전 60 차), 764Hz (펌프 회전 70 차) 에서 불량차량이 더 높게 나옴을 알 수 있었고 B 차량과 C 차량도 비슷한 주파수에서 불량 차량이 높게 나옴을 알 수 있었다. 차량 실내에서의 파워 스티어링 펌프 소음은 엔진 폭발에 의한 소음 보다는 그 크기가 작지만 주파수 대역이 달라 혼란을 거치면 감지 할 수 있다. 불량제품 장착차의 60 차 오더 성분과 70 차 오더성분을 제거한 소음과 정상제품 장착차의 소음을 주관 평가자들(subjects)에게 들려주고 Jury Test 를 실시한 결과 차량 실내에서 들리는 파워 스티어링 펌프의 소음은 600Hz 에서 800Hz 사이의 펌프 차수 성분임을 알 수 있었다.

그림 3 은 A 차종의 불량품을 장착한 차량을 엔진의 회전수를 바꾸면서 획득한 데이터의 wavelet transform 한 결과의 contour diagram 이다. 이를 위해 사용한 연속 웨이블릿(continuous wavelet)변환은 다음의 식과 같다.

$$CWT_a(u, s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} a(t) \psi\left(\frac{t-u}{s}\right) dt \quad (2)$$

여기서 $a(t)$ 는 파워 스티어링 펌프에서 발생하는 소음의 시간신호이고, $\Psi(p)$ 는 웨이블릿 변환에 이용되는 기초함수(basic function)이다. 그리고 s 는 웨이블릿 변환의 스케일 인자 (scale factor)이며 u 는 시간이동(time translation)을 의미한다. 웨이블릿 기초함수 $\Psi(p)$ 는 신호분석의 목적에 따라 다양하게 선택될 수 있으나, 본 논문에서는 다음과 같은 가보 함수(Gabor function)를 이용하였다.

$$\psi(p) = e^{inp} \frac{1}{(\sigma^2 \pi)^{1/4}} e^{-p^2/2\sigma^2} \quad (3)$$

여기서 σ 와 n 는 가보 웨이블릿 기초함수의 형상을 결정하는 변수들이고, 분석하는 신호의 종류와 특성에 따라 적절한 값으로 선택된다. 그리고, 스케일 인자는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$s = \frac{\eta}{\omega} \quad (4)$$

여기서 ω 은 각 주파수이다.

10 초동안 엔진의 회전수를 2번 올렸다 내리면서 데이터를 획득하였는데 저주파 대역 즉 엔진의 소음 성분들은 빨리 줄어드는 반면에 펌프의 소음 성분은 600Hz 에서 800Hz 사이에서 길게 나타나는 것을 보여준다. 이는 필드(field)에서 파워 스티어링 소음 불량량의 현상과 유사한 특성과 같다. 각 펌프의 차수 성분들이 600Hz 에서 800Hz 를 통과하면서 크게 반응한다는 것을 보여준다. 이 사실로 파워 스티어링 펌프가 유발하여 운전자의 귀를 거슬리게 하는 주파수는 600Hz 에서 800Hz 사이의 것임을 알 수 있다.

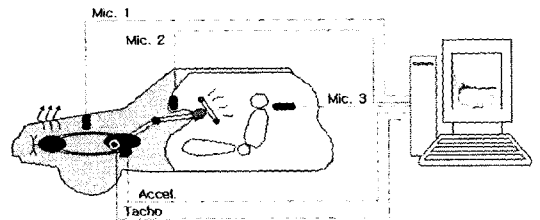
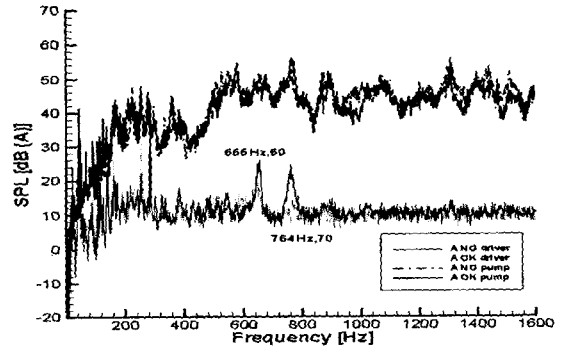
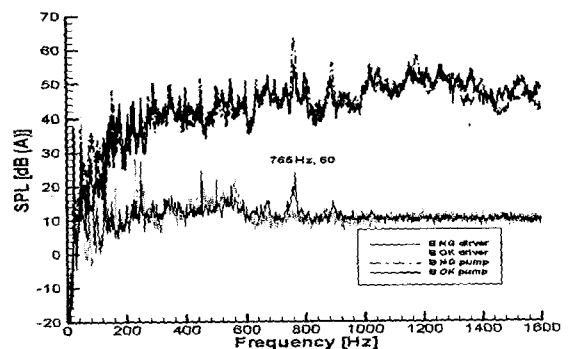


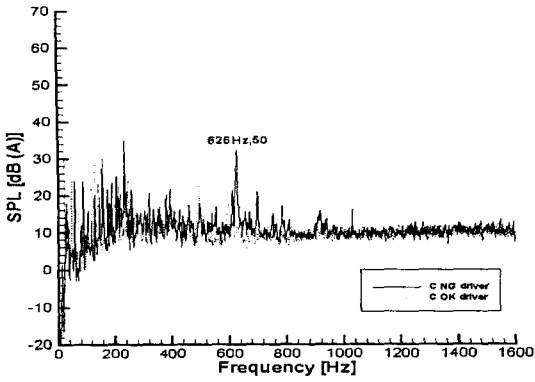
Fig. 1 Set-up for signal acquisition



(a) Spectrum of sound pressure in Vehicle A



(b) Spectrum of sound pressure in Vehicle B



(c) Spectrum of sound pressure in Vehicle C

Fig 2. The fourier spectrum of the noise in idle condition

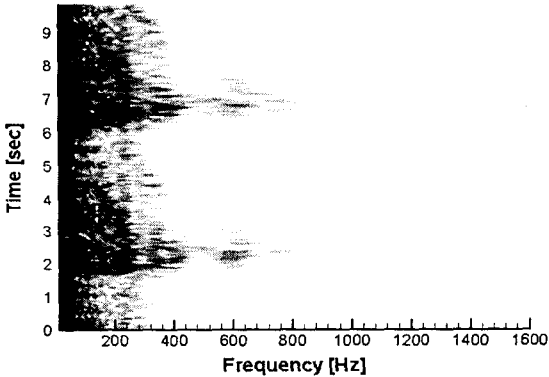


Fig. 3 Contour of wavelet transform of noise signal in Vehicle A

3. 단품 실험

3.1 충격 햄머 실험

먼저 펌프의 동특성을 파악하기 위해서 A 차량 단품의 충격 햄머 실험(impact hammer test)을 실시하였다. 충격햄머 실험은 그림 5에 보여지는 단품 실험을 위해 준비된 test set up 에서 실시하였다. 가속도계를 리어커버(rear cover)와 펌프 하우징(pump housing)에 설치하고 내부 유체를 채운 상태에서 suction pipe 를 가진하였다. 주파수 응답함수(FRF)는 그림 4 와 같다. 이 결과로 펌프는 537Hz 에 구조적인 고유진동수를 가짐을 확인하였다.

3.2 단품실험

실차실험에서 펌프 소음의 현상을 분석한 후 단품에서의 펌프 소음의 특성을 분석 하기 위해서

단품실험을 실시하였다. 실험은 그림 5 와 같이 하여 실시 하였다. 펌프 뒤쪽에는 다이내모(dynamo)가 설치되어 펌프를 구동 할 수 있으며 무향실(anechoic chamber) 밖에는 압력을 조절하고 펌프의 회전수를 조작할수 있는 컨트롤 박스가 설치 되어있다. 펌프 전면 30cm 에 마이크로폰을 설치하고 rear cover 쪽에 가속도계를 설치 하였으며 폴리 쪽에는 펌프의 회전 속도를 측정 할 수 있는 타코메터(tachometer)를 설치하였다.

그림 6 은 1000rpm 무부하 상태 (3kgf/cm^2)에서 A 차량에 장착되었던 정상제품과 불량제품의 음압을 비교하였다. 여기서, 무부하 상태는 스티어링 휠을 중앙에 둔 상태, 즉 조향을 하지 않는 상태를 말한다. 펌프 회전의 모든 차수에서 불량품의 소음도가 높게 발생하며, 특히 20 차 (333Hz) 성분과 50 차 (833Hz) 성분의 차이가 큼을 알 수 있다. 참고로 정상제품과 불량제품의 over all 값의 차는 약 4dB(A)이다.

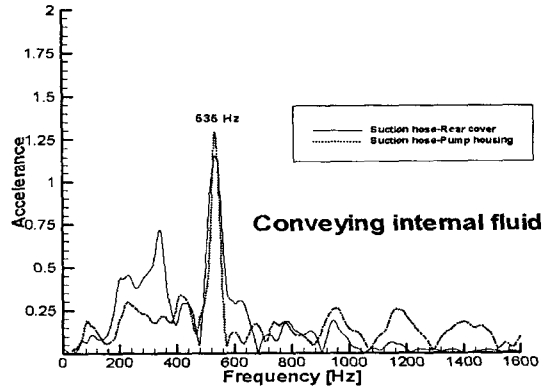


Fig. 4 FRF of power steering oil pump

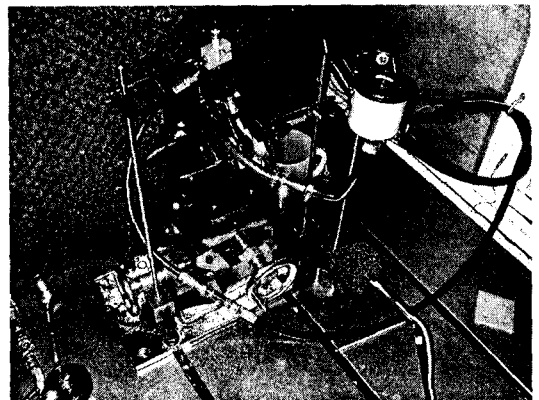


Fig. 5 Test set-up for P/S oil pump assembly

그림 7 은 단품상태의 파워 스티어링 펌프가 3kgf/cm²(무부하)의 토출 압력 상태에서 1000rpm의 회전수로 회전할 때 획득한 시간 신호를 이용하여 wavelet transform 한 contour diagram 이다. 펌프 유체 토출에 의한 맥동 소음이 0.1초 동안에 약 16 회가 발생하는 것을 확인하였으며, 이로부터 유체의 맥동에 의한 기본 주파수는 약 160Hz 임을 알 수 있다. 그림에서 높은 소음도로 나타나는 833Hz, 1000Hz의 신호는 펌프 맥동 50,60 차 성분임을 알 수 있다. 0.08 초에서 0.12 초 사이의 538Hz의 신호는 충격 햄머 실험에서의 고유진동수와 일치한다.

그림 8 은 펌프 단품 실험에서 회전수를 점차적으로 높이면서 측정된 소음 신호로 오더 분석(order analysis)한 Contour diagram 이다. 3kgf/cm² (무부하) 에서 회전수를 600rpm 에서 3400rpm 까지 바꾸면서 데이터를 획득하였는데 회전수가 높아질수록 각 차수의 소음 수준이 높아지는 것을 알 수 있다. 특정한 회전수에서 특이하게 크게 발생하는 차수 성분이 있음을 알 수 있는데 이것은 펌프의 공진에 의한 영향으로 간주된다.

그림 9 는 정상제품과 불량제품의 주요 차수 별로 Order tracking 한 결과를 나타낸 그래프이다. 각각 20 차 30 차 40 차 성분에서 정상제품과 불량제품의 차이가 있음을 알 수 있다. 50 차수 이상에서는 불량제품과 정상제품의 차이가 거의 없었다. Over all 값은 전 rpm에 걸쳐 평균 4.8dB의 차이를 보인다. 문제가 되는 주파수는 식(1)을 이용해 계산하면 약 570Hz가 나온다. 이는 펌프 자체의 공진 주파수를 통과하면서 내는 구조 유발 소음(structure born noise) 이다. 그러나 실차 장착 시에는 시스템이 바뀌면서 공진 주파수가 달라져서 그 주파수에서는 문제가 되지 않는다.

여기서 전체 소음도에 영향을 미치는 차수는 20 차에서 40 차까지이고 정상제품과 불량제품은 펌프 폴리 회전수에 따라 경향은 일치 하지만 소음의 크기에서 문제가 되고 있음을 알 수 있었다.

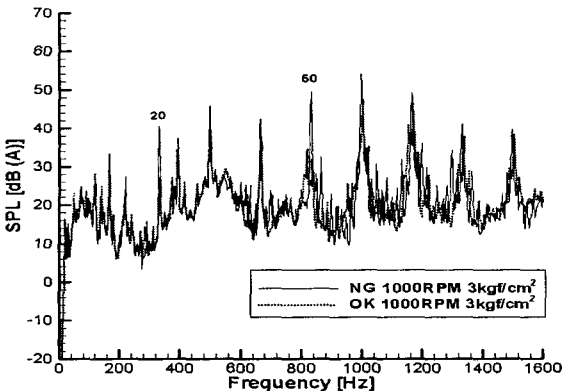


Fig. 6 Spectrum of sound pressure in good product and bad product of Model A

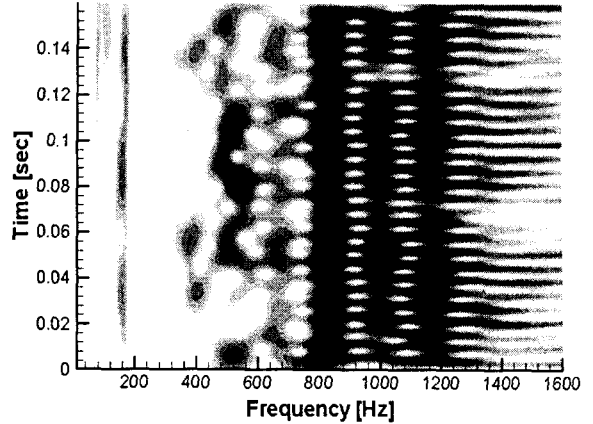


Fig. 7 Contour of wavelet transform of noise signal in bad pump

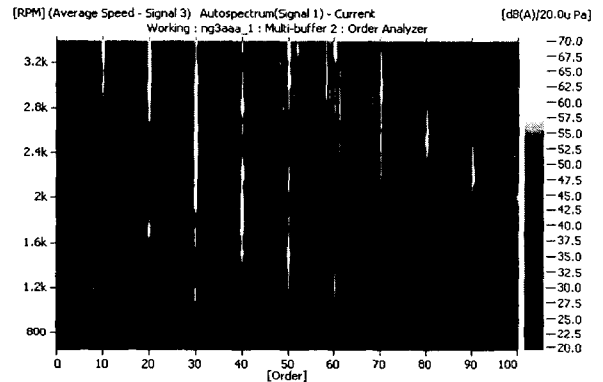
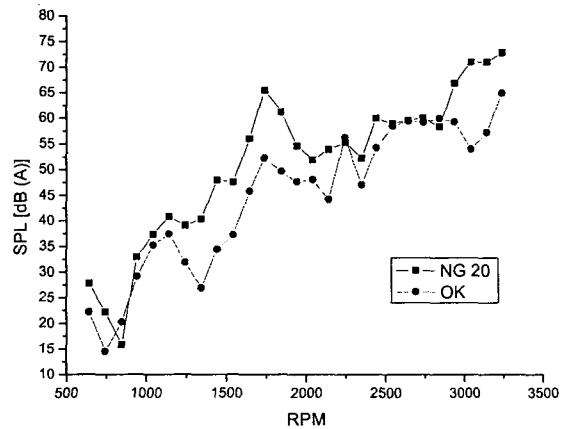
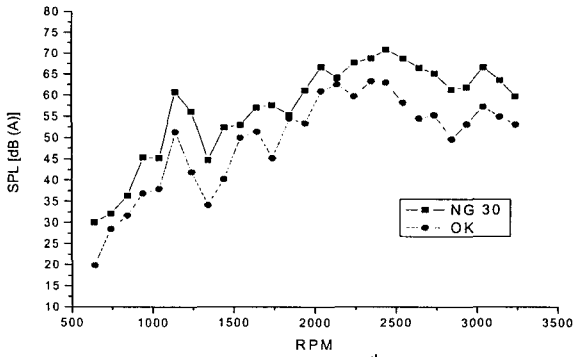


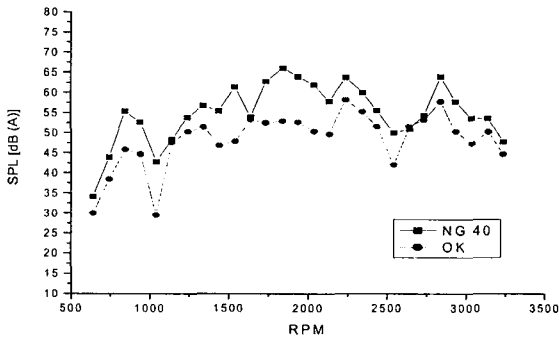
Fig. 8 Contour diagram by the order tracking in the power steering oil pump



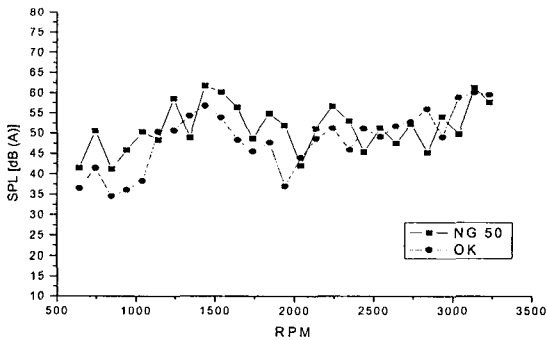
(a) The comparison of SPL in 20th order



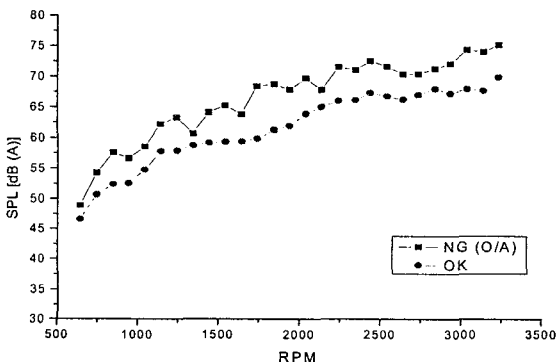
(b) The comparison of SPL in 30th order



(c) The comparison of SPL in 40th order



(d) The comparison of SPL in 50th order



(e) The comparison of SPL in Over All

Fig. 9 The comparison of SPL in good pump and bad pump

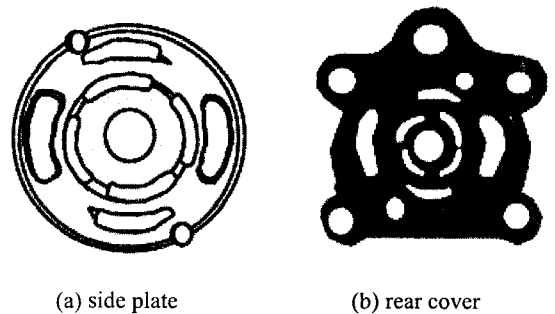
4. 설계 변경 실험

파워 스티어링 펌프에서 압력 맥동 현상이 일어나는 원인은, 토출부를 통해 유출되는 유량 맥동 및 작동 유체가 불안전 압축 상태로 토출부를 통과하면서 토출부로부터 베인실로 유입되는 역류 그리고 베인의 운동에 따른 각 섭동부에서의 누설 유량 맥동 때문에 발생하는 것으로 캠 링 형상, 베인의 수 포트의 개폐 타이밍 등에 의해 크게 영향을 받는다.⁽³⁾ 그렇기 때문에 완만한 압력 상승을 유도하기 위해 사이드 플레이트 (side plate)의 토출 포트에는 완만한 압력 상승을 유도하기 위해 노치(notch)가 가공되어 있다. 본 연구는 파워 스티어링 펌프 불량제품에 사이드 플레이트 (side plate)와 리어커버(rear cover)의 형상을 변화시켜가면서 단품실험을 실시하였다.

Type A,B,C 는 사이드 플레이트 형상 변경 모델인데, Type A 는 노치가 없으며, Type B 는 노치 깊이가 1.2mm, Type C 는 2.0mm 이고, Type D 는 리어 커버 형상 변경 모델로 토출 배압부의 부피를 기존 보다 확장하였다.

그림 10 은 각각 사이드 플레이트와 리어커버를 나타낸다.

그림 11 은 1000rpm 3kg/cm²(무부하)의 조건에서의 스펙트럼으로부터 펌프 회전차수에 대한 피크값 (peak value)과 전체 값 (overall value)을 도표로 나타낸 것으로 사이드 플레이트에 의한 소음 저감 효과는 미미하나, 리어커버에 의한 소음 저감 효과는 큼을 알 수 있다. 그리고 그림 12 는 동일 제품에 대하여 차수 분석 (Order Analysis)한 전체 값 (overall value)을 나타낸 것이며, 이로부터 리어커버(rear cover)의 형상을 바꾼 Type D 의 소음도가 전 차수에 걸쳐 작게 나옴을 알 수 있다.



(a) side plate

(b) rear cover

Fig. 10 Schematic of side plate and rear cover in power steering pump

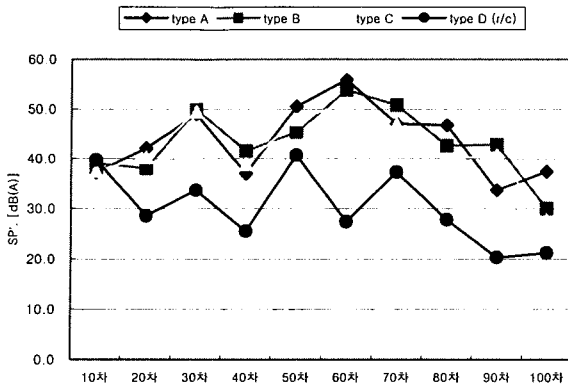
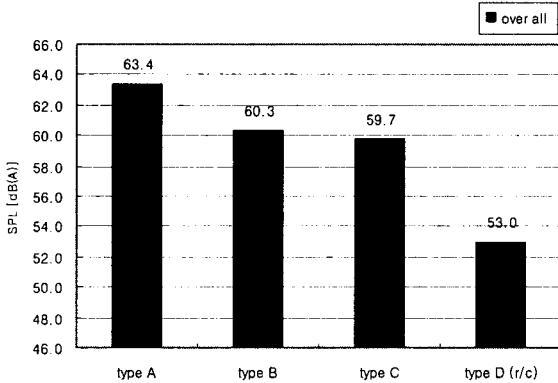


Fig. 12 The slice of order tracking

(a) The SPL of the order



(b) Overall SPL

Fig. 11 The SPL by shape transformation of side plate and rear cover

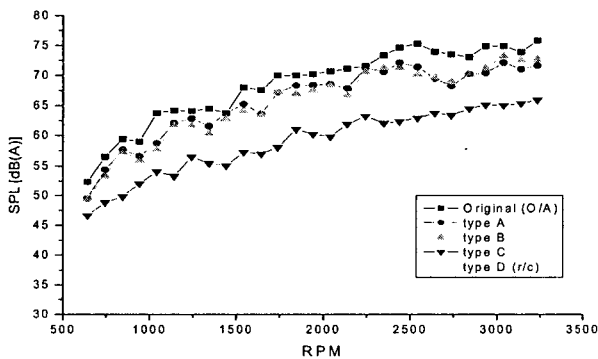


Fig. 12 The overall value by order analysis

5. 결론

본 논문은 파워 스티어링 펌프의 실차 및 단품 상태에서의 실험에 관해 기술하고 있으며 다음과

같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 차실내에서 발생하는 소음 중에 600~800Hz의 성분이 Power steering oil pump에 의한 소음을 실차 시험으로부터 알 수 있었다.

(2) 실차에서 문제가 되었던 Power steering oil pump와 문제가 되지 않았던 Power steering oil pump를 단품상태로 분해하여 단품 실험을 실시하였다.

(3) 단품 실험에서 소음 불량 Power steering oil pump가 양품의 Power steering oil pump에 비해 모든 회전차수에서 높은 소음, 진동 수준을 나타내었다.

(4) Power steering oil pump의 맥동소음에 영향을 미칠 수 있는 설계 인자를 일부 변경하여 단품 실험을 실시하였고, 소음 저감 효과가 기대되는 설계안을 도출할 수 있었다.

참고문헌

(1) S. Takeuchi and E. Adachi, 1995, Analysis and Reduction of Power Steering Noise During Static Steering Operation, SAE 950581.

(2) 최창환 등, 1999, "자동차 조향 유압 시스템의 주파수 분석 및 음향인텐시티 측정을 통한 소음원 분석에 대한 연구", 한국소음진동공학회지, 제 9 권 제 4 호, pp. 761~768.

(3) 김기동 등, 1998, "유압 배인 펌프의 압력 맥동에 관한 해석적 연구", 대한기계학회논문집 A 권, 제 22 권 제 11 호, pp. 1964~1972.