

파워 스티어링용 유압 베인 펌프의 캠링 형상에 따른 소음특성

Noise characteristics on the camring profile of the hydraulic vane pump in the power steering system

정재연* · 오석형** · 백일현***

- * 전북대학교 기계공학부
- ** 군산대학교 기계공학부
- *** 전북대학교 정밀기계공학과 대학원

Abstract : Recently, according as the supply of power steering system has been diffused, for the comfortable driving condition, the problem to reduce the noise and vibration of this system suddenly appeared. This system can be classified two systems of the pipe line and the pump. In this paper, it is described about the noise characteristic with the camring profile of the hydraulic vane pump. As a result, when it excesses tolerance, the noise is increased. Moreover, in the case of the same of cam-ring, the effect of the rotating speed is larger than the discharge pressure.

Keyword : power steering, hydraulic vane pump, performance, noise, cam profile

1. 서 론

Power steering system은 1926년 미국의 F. W. Davis에 의해서 Pierce Arrow Car에 장착되었다. 일본은 1951년부터 중형차량에 탑재하기 시작하여, 1965년부터 승용차에서도 실용화하기 시작하였다. 국내에서는 1970년대부터 상용차에 장착하기 시작하여, 1996년에는 경차까지도 장착될 정도로 이용범위가 광범위하게 적용되고 있다. 기존에는 시스템의 전반적인 성능, 효율 및 내구성 등이 크게 요구되었지만, 최근에는 운전자의 안락한 승차감을 위한 시스템의 소음 및 진동 저감 문제가 급격히 대두되고 있다.⁽¹⁾⁽²⁾

2. 파워 스티어링 시스템의 소음

Fig. 1에서 유압식 파워 스티어링 시스템의 회로를 보여준다. 이 시스템은 엔진으로부터 구동되는 유압 펌프, 유량 조절 밸브, 압력 조절 밸브(릴리프밸브), 방향 전환 밸브, 유압 액츄에이터, 관로, 타이어까지 포함된 장치로서 차량의 강성까지 고려하면 매우 복잡하여 전체 시스템을 정밀 모델화하기에는 매우 어렵다.

따라서, 파워스티어링 시스템을 펌프계와 그 외의 제어밸브, 배관 및 액츄에이터등의 관로계로 양분하였고, 그 중에서 대표적인 소음원인 유압 베인 펌프를 중심으로 소음 발생 원인을 규명하고자 한다.

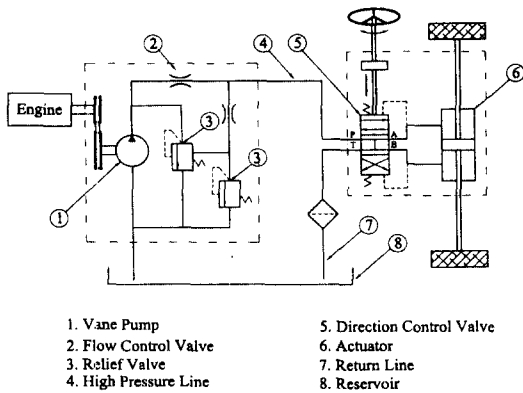


Fig. 1 파워스티어링 시스템의 유압 회로도

3. 유압 베인 펌프의 소음

압력 평형형 유압 베인 펌프의 간단한 작동원리를 Fig. 2에서 보여주고 있다.

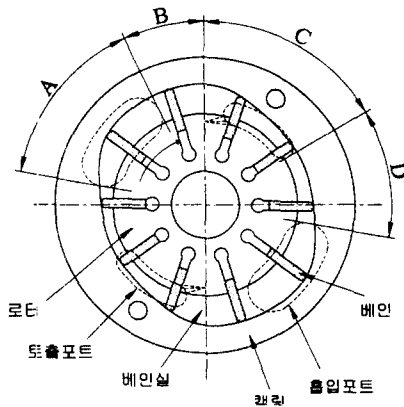


Fig. 2 Vane pump cartridge의 단면부

펌프가 구동됨에 따라서 A~D구간까지 순차적으로 흡입, 압축, 토출 및 폐입과정을 통과하면서 축 1회전당 2회의 흡입·토출작용을 행한다.

펌프의 정상 운전 시에 발생할 것으로 예측되는 소음들은 다음과 같다.

- 1) 펌프 구성요소들의 기하학적 형상과 가공정도에 기인한 구조적 문제에 따른 소음

- 2) 펌프의 유량변동에 따른 압력변동에 의해서 발생하는 소음
- 3) 흡입 포트의 형상에 따른 캐비테이션에 의해서 발생하는 소음

본 논문에서는 펌프 구성요소들의 기하학적 형상 및 가공 정도에 기인한 구조적 문제, 그 중에서도 캠 형상에 따른 베인 펌프의 소음특성을 파악하고자 한다.

Table 1은 실험용 펌프의 제원을 보여주고 있다.

Table 1 실험용 베인 펌프의 제원

항 목	규 격
Displacement	20cc/rev
조정 유량	17 l/min
조정 압력	125kgf/cm ²
허용회전수	350 ~ 3700rpm
적용 분야	상용차용 파워 스티어링 시스템

3.1 압력보상형 유량조절 밸브

베인 펌프 1회전당 토출유량 V_{th} 와 이론토출유량 Q_{th} 는 다음과 같다.

$$V_{th} = 2\pi b(R_2^2 - R_1^2) \left\{ 1 - \frac{Z \cdot t}{\pi(R_2 + R_1)} \right\} \quad (1)$$

$$Q_{th} = n \cdot V_{th} \quad (2)$$

허용 회전수 범위 내에서 펌프의 이론토출유량은 7~74 l/min으로 상용차의 고속 주행시에 유량 조절을 하지 않는다면, 대용량의 부하유량이 액츄에이터로 유입되어 조향에 큰 문제점이 발생하게 된다. 이를 해결하기 위해서 파워스티어링용 베인

펌프에는 압력보상형 유량조절밸브가 장착되어 회전수가 1000rpm을 초과하면, 일정 유량(17 l/min)으로 제어한다.

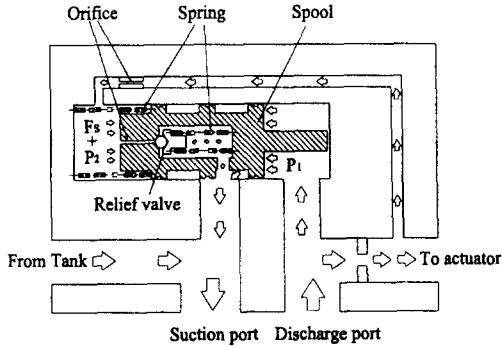


Fig. 3 압력보상형 유량조절밸브

유량조절밸브의 오리피스를 통과하는 유량 Q 는 다음과 같다.

$$Q = C_d A \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (3)$$

여기에서, 유량은 오리피스 전후의 압력 차에 비례한다.

Fig. 3을 살펴보면, 식 (4)와 같은 스톱의 평형관계식에서 압력차를 일정하게 유지하는 것을 알 수 있다.

$$F_s + P_2 A_2 = P_1 A_1 \quad (4)$$

3.2 캠 곡선 형상의 비교

Fig. 4와 같이 압력 평형형 베인 펌프의 캠 형상은 대원호(반경 R_2), 소원호(반경 R_1) 그리고 이들을 연결하는 캠 곡선으로 구성된다.

여기에서, 캠 곡선은 소원호와 대원호를 매끄럽게 연결하여, 마찰·마모의 억제하고 소음·진동을 감소시키는 역할을 한다.

또한, 베인 실이 대원호에서 캠 곡선으로 이동하여 토출포트와 연결될 때, 베인 실의 압력은 흡입 압력의 상태이기 때문에 토출측의 고압유가 역류하여 서어지 압이 발생하고 진동 및 소음의 원인이 된다. 따라서, 베인실 압력의 급상승을 막기 위해서 진원 상태인 대원호 구간에서 토출포트로 접근할수록 대원호 반경 R_2 를 직선적으로 감소시키면, 용적이 점차 감소하고 베인실에 예압이 형성되어 압력차를 최소화할 수 있다. ⁽³⁾

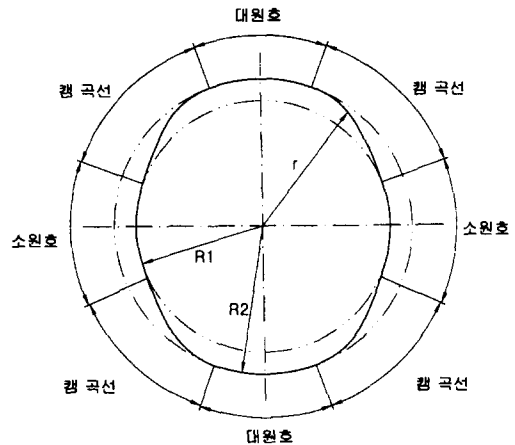


Fig. 4 Cam profile의 형상

본 논문에서는 캠링의 가공 정도를 측정하여 그 형상을 비교 분석하고, 실제 펌프 성능과 소음에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. Table 2에서 본 논문에서 실험한 각 펌프에 대해서 정리하였다.

Table 2 실험용 펌프의 분류

명 칭	A 펌프	B 펌프	C 펌프
최 대 가공오차	30 μ m	60 μ m	150 μ m

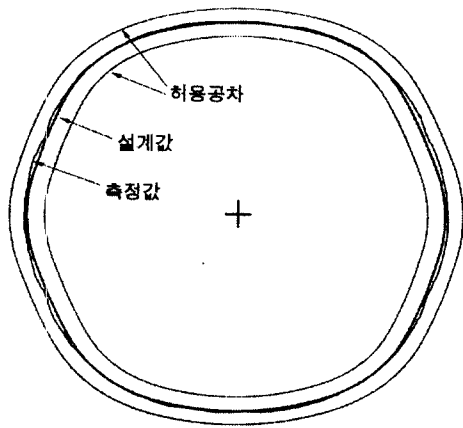


Fig. 5 A 펌프의 캠 형상 측정 결과

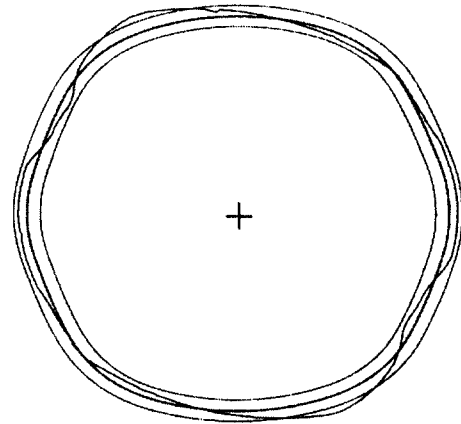


Fig. 7 C 펌프의 캠 형상 측정 결과

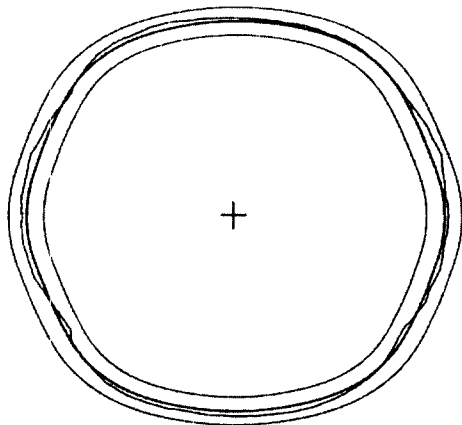


Fig. 6 B 펌프의 캠 형상 측정 결과

각 펌프의 캠 형상은 3차원 측정기를 이용하여 1° 간격으로 반경을 micron 단위로 측정하였다. Fig. 5~7에서 그 결과를 보여주는데, 3차원 측정값과 설계값을 비교하여 측정값이 허용공차($\pm 0.1\text{mm}$) 안에 포함되는지 바로 판별할 수 있다.

A, B 펌프[Fig.5, Fig.6]은 캠링의 설계값을 기준으로 최대가공오차가 $30\mu\text{m}$, $60\mu\text{m}$ 를 가지는 펌프들로서 설계치의 허용공차 안에 포함되어 있다.

반면에, C 펌프 [Fig.7]의 경우, 최대 가공오차가 $150\mu\text{m}$ 로서 부분적으로 허용 오차를 벗어나 있다.

따라서, A, B 펌프보다 최대 가공오차가 $50\mu\text{m}$ 을 초과한 C 펌프의 경우, 거친 가공 정도에 따른 베인 선단과 캠링 사이의 마찰·마모에 의해 발생하는 소음이 펌프 전체의 소음에 큰 영향을 줄 것으로 사료된다.

4. 실험장치 및 방법

실험은 유압펌프 성능시험기를 이용하여 각 변수들의 변화에 따른 펌프의 성능과 소음특성을 분석하고자 한다.

Fig. 8에서 성능 시험기의 유압 회로도를 보여준다. 그 작동원리를 살펴보면, 30kW DC 모터가 회전함에 따라서 이와 축으로 연결된 베인 펌프에 의해 토출된 작동유는 역류 방지를 위한 체크밸브와 고압필터를 통과하고 센서 매니폴드 블록에서 유량·압력·온도를 동시에 측정할 수 있도록 하였다. 압력은 릴리프 밸브를 통해서 제어하고, 온도는 열교환기를 이용하

여 항상 55~65℃의 범위를 유지하였다.

열교환기를 통과한 작동유는 리턴 필터를 거쳐 탱크로 귀환한다. 또한, 회전수는 S. HIMMELSTEIN 社의 torquemeter를 이용하였고, RION 社의 소음계를 사용하여 각 실험 조건에 대해서 음압(音壓) 레벨을 측정하였다.

그리고, 펌프의 토출 압력 맥동을 측정을 위해 HYDROTECK 社의 압력센서를 사용하였고, KRACHT 社의 기어식 유량계를 이용하여 회전수, 압력의 변동에 따른 토출 유량을 정확히 측정하였다.

Fig. 9에서 각 실험 변수의 변화에 따른 베인 펌프의 성능 및 소음을 측정하기 위한 펌프 성능 시험기의 전면도를 보여준다. 또한 Fig. 10에서 베인 펌프의 취부도를 보여준다.

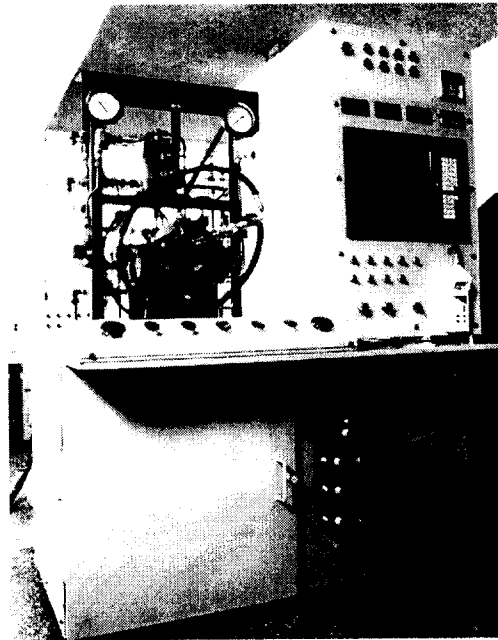


Fig. 9 베인 펌프 성능 시험기의 전면도

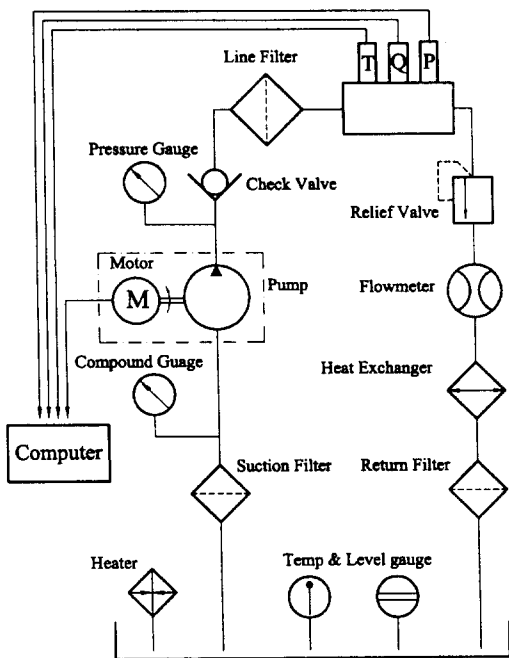


Fig. 8 성능 시험기의 유압 회로도

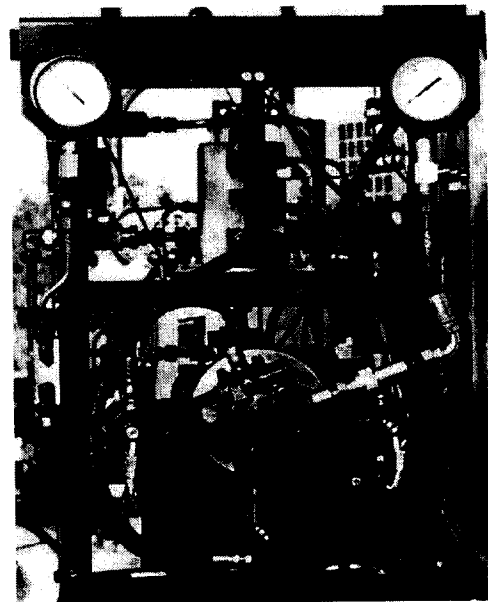


Fig. 10 베인 펌프 취부도

5. 실험 결과

5.1 유량 특성

Fig. 11~13은 토출압력을 단계적으로 증가(0, 50, 100 kgf/cm²)시켰을 때, 회전수 변화에 따른 각 펌프의 유량을 비교하였다. 유량은 회전수와 더불어 증가하고, 1000rpm 이상이 되면 압력보상형 유량조절 밸브가 작동하여 유량을 일정하게 제어하게 된다.

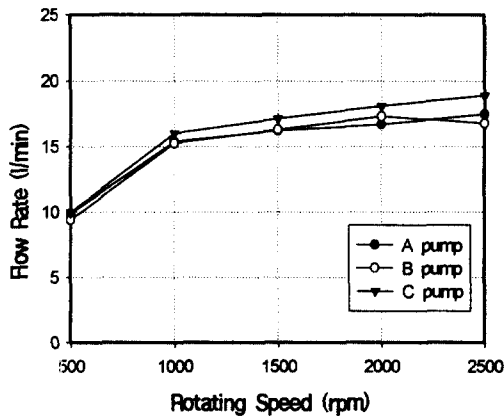


Fig. 11 회전수 변화에 따른 유량 비교 (토출압력 = 0 kgf/cm²)

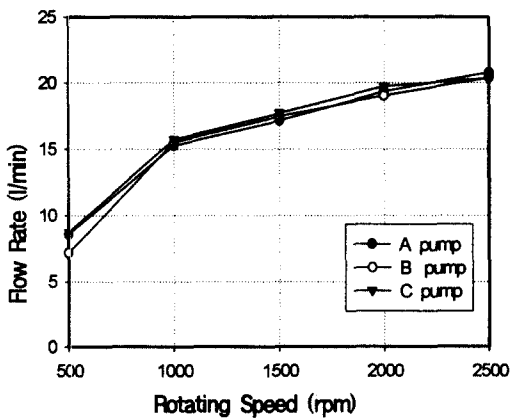


Fig. 12 회전수 변화에 따른 유량 비교 (토출압력 = 50 kgf/cm²)

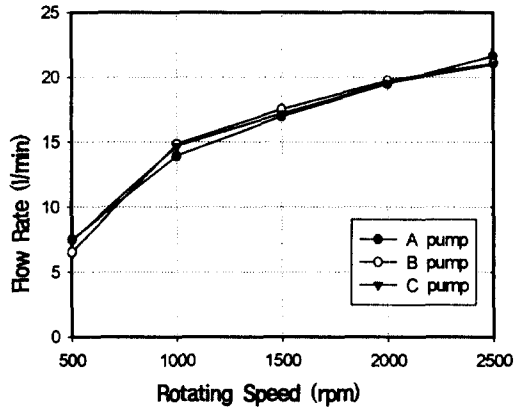


Fig. 13 회전수 변화에 따른 유량 비교 (토출압력 = 100 kgf/cm²)

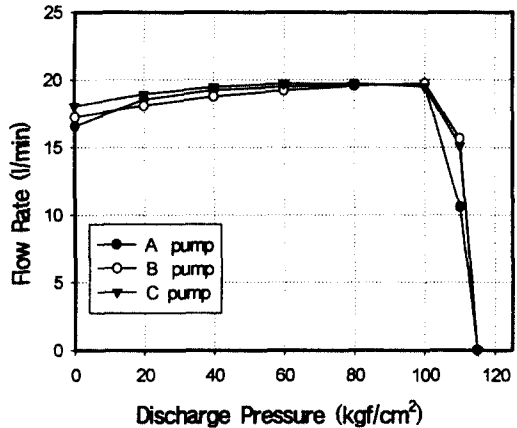


Fig. 14 토출압력 변화에 따른 유량 비교 (회전수 = 2000 rpm)

Fig. 14는 회전수가 2000rpm일 때, 토출압력 변화에 따른 각 펌프의 유량을 비교한 결과이다. 압력이 증가하여도 유량조절 밸브가 작동하고 있기 때문에, 유량은 일정하게 조정되고 있다. 또한, 토출압력이 릴리프 압력에 도달하면, 시스템의 안전을 위해서 모두 탱크로 리턴된다.

따라서, 캠링의 가공오차가 부분적으로 허용공차를 초과한 경우, 회전수나 압력의 변화에 따른 펌프 유량 특성에는 큰 영향을 미치지 못하고 있음을 알 수 있다.

5.2 소음특성

Fig. 15~17은 토출압력이 단계적으로 증가(0, 50, 100 kgf/cm²)시켰을 때, 회전수 변화에 따른 각 펌프의 소음을 비교하였다.

펌프 회전수의 상승과 더불어 소음도 급격히 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한, 최대 가공오차가 60 μ m만인 A, B 펌프는 150 μ m인 C 펌프에 비해서, 회전수의 변화에 따른 소음이 상대적으로 15dB정도 작게 나타난다.

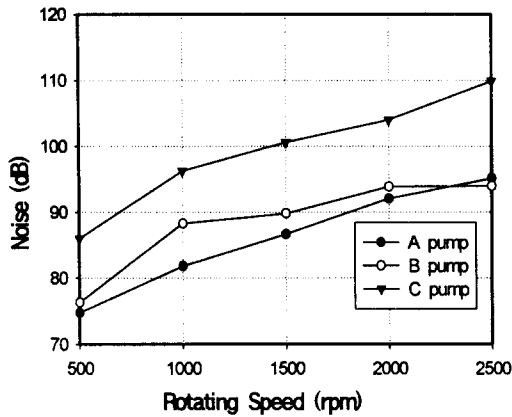


Fig. 15 회전수 변화에 따른 소음 비교 (토출압력 = 0 kgf/cm²)

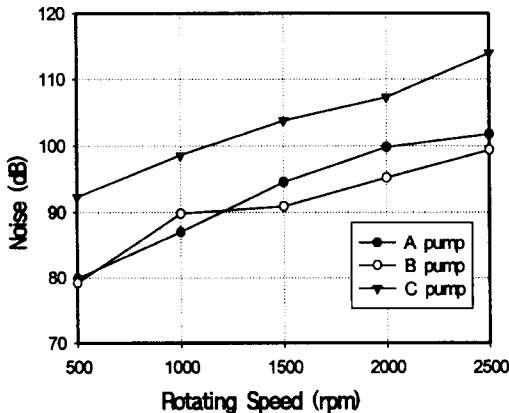


Fig. 16 회전수 변화에 따른 소음 비교 (토출압력 = 50 kgf/cm²)

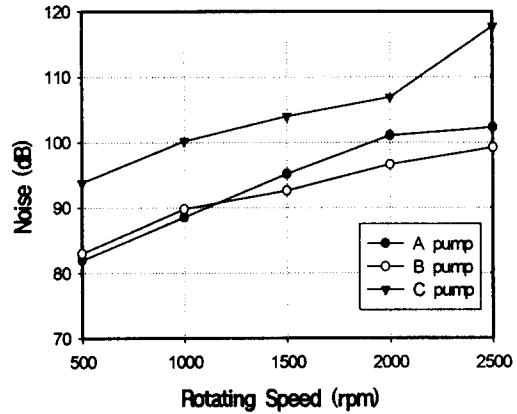


Fig. 17 회전수 변화에 따른 소음 비교 (토출압력 = 100 kgf/cm²)

Fig. 18은 회전수가 2000rpm일 때, 압력 변동에 따른 소음을 변화를 보여준다.

A, B, C 펌프는 토출압력의 상승에 따른 소음의 증가량의 극히 미소함을 알 수 있다. 그리고, 최대 가공오차가 캠링의 허용오차를 벗어난 C 펌프의 경우, A, B 펌프보다 소음이 현격하게 높은 것을 알 수 있다.

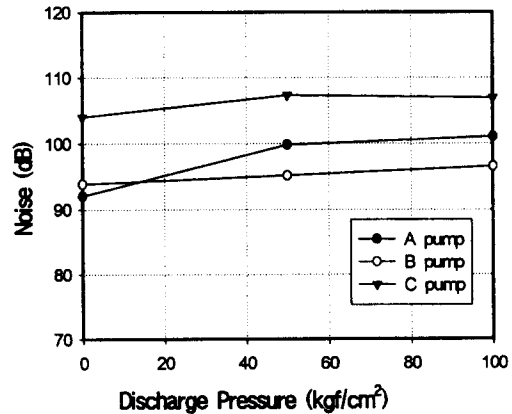


Fig. 18 토출압력 변화에 따른 소음 비교 (회전수 = 2000 rpm)

6. 결론

실험결과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

- (1) 캠링 형상은 베인 펌프의 소음에 큰 영향을 미친다. 즉, 캠링의 최대가공 오차가 $150\mu\text{m}$ 으로 부분적으로 허용 공차를 벗어난 B pump의 경우, A, B pump에 비해서 소음이 평균 15dB정도 높은 것을 알 수 있었다.
- (2) 회전수가 증가함에 따라서 펌프의 소음도 급격히 높아진다. 즉, Fig. 15~17에서 회전수가 500rpm과 2500rpm일 때, 소음차는 약 20dB정도이다.
- (3) 토출압력의 변동은 펌프의 소음에 미치는 영향은 미소하다.

주요 기호

A_1	스플 대경부 면적
A_2	스플 소경부 면적
b	베인 폭
F_s	스프링력
n	회전수
P_1	오리피스 전 압력
P_2	오리피스 후 압력
Q_{th}	이론토출유량
R_1	캠 소원호 반경
R_2	캠 대원호 반경
t	베인 두께
V_{th}	Displacement
Z	베인 개수

참고 문헌

- (1) 加藤孝, “高壓ベーンポンプの特質と構造”, 油壓化設計, 第8巻, 第4号, PP8~16
- (2) 永田精一, “パワーステアリングにおける低騒音化”, 油壓と空氣壓, 第28巻, 第6号, 1996, PP 615~621
- (3) 高橋米秋, “ベーンポンプのカム曲線が騒音に及ぼす影響”, 油壓と空氣壓, 第9巻, 第2号, 1979, PP 46~54
- (4) Hirata, M. and Watanabe, H., “Wear in Vane Pump Test”, ASLE Trans., Vol 22, No 4, 1978, PP342~348
- (5) 高橋純悦, “ベーン形油壓ポンプの騒音について”, 第3期 秋季油空壓技術講演論文集, 11/14
- (6) 野口, “パワーステアリングシステムにおける異音評價方法”, 平成8年 秋季油空壓技術講演會論文集, 1991, 125/128