

## 실험계획법을 이용한 교류발전기 부착형 진공펌프의 소음저감에 관한 연구

박순식<sup>†</sup> · 김용찬 · 김병덕\*

발레오전장시스템스코리아(주), \*영남대학교 기계공학부

### A study on the Noise Reduction of Vane-type Vacuum pump Mounted on Alternator using Design of Experiments

Soonsik Park<sup>†</sup>, Yongchan Kim<sup>2</sup> and Byoungduk Kim\*

Valeo Electrical Systems Korea Ltd.

\*School of Mech. Eng., Yeungnam University

**Abstract** – Recently one of the automobile customer's greatest concerns is quietness in a vehicle along with various functional requirements such as comfort, stability, mobility etc. Therefore car makers place more weight on vehicle noise.

Especially, in the case of diesel engine, as the noise level of engine becomes more silent by the development of engineering technology. The noise of alternator with vacuum pump has been able to be noticed enough becoming an issue on vehicles. In this study vacuum pump noise on alternator was identified and classified into five types. DOE was applied to induce the statistical analysis result to reduce the vacuum pump noise. It was done by subjective listening. Design and statistical analysis are done with Minitab software. This work provides dominant elements of vacuum pump noise on alternator and can be the basis of future studies.

**Key words** – alternator(교류발전기), vacuum pump(진공펌프), vane-type pump, DOE(실험계획법).

## 1. 서 론

최근 차량 구매자들의 차종선정과 자동차 평가의 주요한 지표로서 소음 및 진동 문제가 강하게 부각되고 있다. 이는 엔진의 저소음화로 인하여 상대적으로 엔진 주변부품들의 소음이 차량의 실내소음수준에서 차지하는 비중이 커지면서 부각되기 시작하였다.

이에 따라 엔진 주변부품들에 대한 소음저감 연구가 활발하게 진행되고 있으나 아직은 미비한 수준이다. 특히 디젤엔진의 경우 최근에 전자식 제어기술의 발달에 힘입어 저소음형 엔진이 개발되고 있으며, 전체적인 소음수준이 많이 저감되어 과거에 언급되지 않던 수준인 차량용 교류발전기(진공펌프부착)의 소음이 차량 실내 소음에 큰 영향을 주는 인자로 주목받고 있는 실정이다.

엔진 주변 부품 가운데 터보차저[1], 연료펌프[2], 냉각팬[3], 차량용 교류발전기(Alternator)[4] 등의 소음에 관한 연구 사례는 있으나 차량용 교류발전기에 부착된 진공펌프 소음[19]에 대한 연구사례는 보고된 바가 없다. 다양한 인자가 관여하는 경우 각 인자의 영향을 정성적으로 규명할 수 있으나 정량적으로 각 인자의 수준을 결정하기가 어렵다. 이러한 경우에 실험계획법이 유용한데, 소음의 저감을 위해서 실험계획법이 사용된 사례로는 노트북용 냉각팬[5], 캘리퍼 브레이크[6], 에스컬레이터[7] 등이 있다.

대체로 소형 디젤엔진에는 고성능의 진공펌프[13](Vacuum pump)가 장착된 교류발전기(Alternator)[8]가 적용되며, 진공펌프는 베인식(Vane-type)으로 Housing 내부에 3개 또는 4개의 Vane이 조립된 Rotor가 편심되어 회전하며 차량의 진공탱크에 진공을 형성시켜

<sup>†</sup>주저자 · 책임저자 : soonsik.park@valeo.com

Vacum Booster[8], EGR(Exhaust Gas Recirculation) [8] Valve 등 진공필요 부품에 진공을 공급한다. 이러한 교류발전기에서 소음과 진동은 진공펌프가 장착된 경우 교류발전기 자체의 소음보다 진공펌프의 소음이 더욱 지배적인 경우가 많다. 따라서, 본 연구에서는 진공펌프를 가진 차량용 교류 발전기에 대한 소음의 실험 분석을 통한 진공펌프의 소음분류 및 발생 현상에 대한 고찰과 통계[15]적 방법인 실험계획법(DOE; Design Of Experiments)[9]을 이용하여 진공펌프의 소음을 개선하고 진공펌프 소음에 대한 개선방향을 제시하였다.

## 2. 진공펌프가 장착된 교류발전기

### 2-1. 진공펌프가 장착된 교류발전기의 구조

승용 디젤 엔진<sup>(18)</sup> 및 1톤 계열의 소형트럭에 사용되는 진공펌프는 대체로 Vane을 사용하고, 교류발전기의 후방에 회전축과 동일 축 상에 위치하며, 교류발전기와 함께 엔진 회전수의 2.0~2.6배로 고속 회전하고 있다. 진공펌프가 부착된 교류발전기의 구조는 Fig. 1 과 같이 두 개의 브라켓(Bracket) 사이에 고정자(Stator)가 고정되며, 풀리(Pulley)에 의해 구동되는 축에 로터(rotor) 및 진공펌프가 부착된 구조이며, 진공펌프는 Fig. 2와 같은 구조를 가진다.

### 2-2. 진공펌프 소음 구성 및 요인

교류발전기의 진공펌프 소음 구성은 크게 아래와 같이 5가지로 구분할 수 있다.

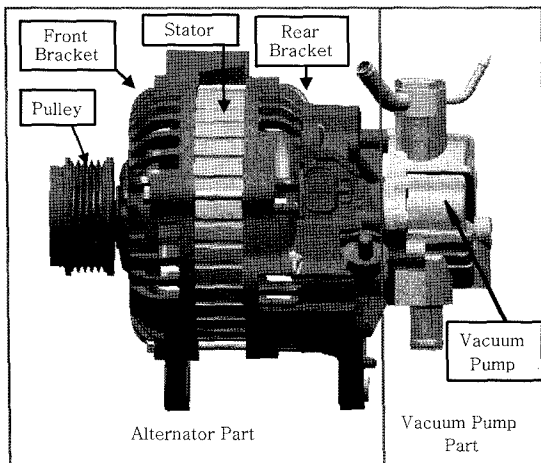


Fig. 1. Structure of alternator with vacuum pump.

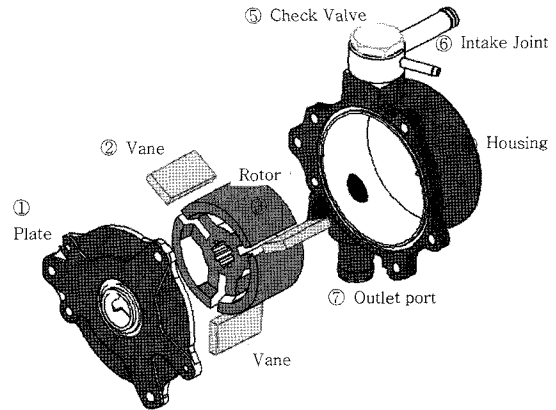


Fig. 2. Structure of vacuum pump.

- (1) 고 진공 소음(High Vacuum Pressure Noise)
- (2) 베인 채터링 소음(Vane Chattering Noise)
- (3) 유체 유동 소음(Fluid Flux Noise)
- (4) 배기 호스 떨림 소음(Exhaust Hose Rattling Noise)
- (5) 구조 소음(Structure Bone Noise)

교류발전기의 소음은 대체로 진공펌프에서 직접 발생하는 경우와 진공펌프가 가진원(source)이 되고 여기서 발생한 진동이 브라켓을 통해 전파되어 소음이 발생 되는 경우가 있다.

진공펌프의 소음에 영향을 줄 수 있는 인자는 크게 Pump Housing, Pump Rotor, Housing Plate, Vane 및 교류발전기 Assembly이며, 그 외의 인자로 Oil 급유와 관계된 급유온도, 압력, 유량과 진공도 등이 주요 인자이다.

진공펌프의 지배차수는 Vane이 3개인 경우 3의 배수차인 3rd, 6th, 9th, 12th 등이며, Vane이 4개인 경우는 4의 배수차인 4th, 8th, 12th, 16th 등이다.

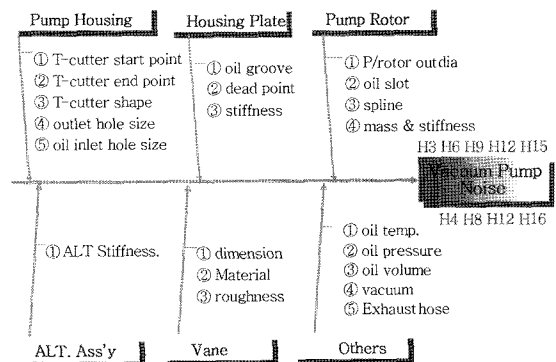


Fig. 3. Fishbone diagram of vacuum pump noise.

주요인자에 대한 소음요인도는 Fig. 3과 같다

### 2-3. 진공펌프 소음의 발생 기구

#### (1) 고 진공 소음

고 진공 소음(High Vacuum Pressure Noise)의 발생은 720 mmHg이상의 고 진공상태에서 발생을 하며, 주된 주파수는 기종 및 종류에 따라 다소 차이는 있으나 500~800 Hz 대역이 대부분을 차지한다. 이러한 소음에 영향을 미치는 인자로는 T-cutter의 시작점(각도), T-cutter의 형상, Dead Point와 Pump Rotor 사이의 간격, 진공펌프의 기밀성, T-cutter의 단면적, 급유량 등이며, “웅~” 또는 “왕~”하는 소음으로 주기성을 가지는 경우가 많다.

#### (2) 베인 채터링 소음

채터링 소음(Vane Chattering Noise)은 Vane 흡동 [14] 과정에서 발생하며, 주파수 대역은 대체로 1.5 kHz~5 kHz 구간으로, Fig. 4와 같이 크게 두 가지 형태로 분류되며 아래와 같다.

첫째, Vane의 반경방향 흡동으로 배기구에서 Dead Point까지의 원주상 거리가 먼 경우 Vane이 Dead Point에 근접할 때 Vane의 진행방향 앞쪽에 잔류한 Oil이 Dead Point에 가까워져서 갑자기 배기구측으로 이동 되는 순간 Vane이 Pump Housing을 Impact하는 경우와 Vane이 T-cutter 시작점(각도)을 지나는 순간 즉, 배기가 시작되는 순간 갑작스런 공기 및 Oil의 흐름이 발생하는 경우 Vane의 반경방향 운동에 의하여 Pump Housing을 가격하는 소음이 발생한다.

둘째, Vane의 원주방향 진동으로 Vane이 T-cutter 시작점(각도)을 지나고 배기구가 Open 되는 순간 배기구로 많은 양의 공기와 Oil이 유동되는 경우로 Vane의 경방향 진동과 동시에 발생하며, 공기와 Oil의 진동 전파가 진행되어 배기구 측으로 접근하는 다음 Vane을 가진 하여 원주방향의 진동을 유발시킨다. 이러한 원주방향의 진동은 배기 유로 특히, 배기구에 Oil

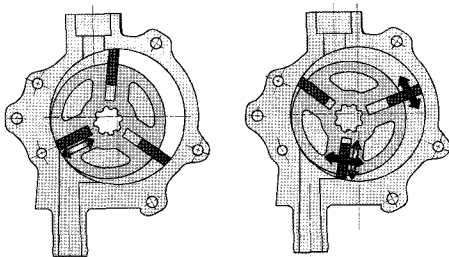


Fig. 4. vibration behaviors of vane in vacuum pump.

이 잔류할 수 있는 형상으로 설계된 경우 배기구 끝부분에 도달한 유체가 배기 호스를 통하여 자연스럽게 배출되지 못하고 진공펌프의 Chamber로 재 유입되는 현상이 발생하며, 이러한 경우 Vane의 경방향 및 원주 방향의 진동을 유발시키게 된다. 이러한 공기와 Oil의 유동은 Vane 진동의 원인으로 마모와 파손에 악영향을 끼치게 되며, 갈매기형 마모로 알려진 Vane 마모를 일으키는 원인으로 추정된다.

#### (3) 유체 유동 소음

유체 유동소음(Fluid Flux Noise)은 크게 아래와 같은 3가지에 의한 것으로 추정된다.

첫째, 급유구를 통하여 급유되어 Pump Rotor의 급유 Slot을 거쳐 각 부분으로 유체가 이동되는 순간에 발생한다.

둘째, Rear Bracket과 진공펌프 사이의 Oil Seal부 간격에서 캠 개구부를 통하여 유체가 이동되는 순간에 발생한다.

셋째, Vane이 T-cutter 시작점(각도)을 지난 후 유체가 Chamber로 이동되는 순간이다. 그러나 흡기구에서의 유동소음의 발생은 확인 실험 결과 영향이 미약하였다.

유동 소음의 발생은 진공도가 680 mmHg이상에서 급유량이 많은 경우에 대체적으로 크게 발생하며, 주파수 구간은 700 Hz~4 kHz 대역이다.

#### (4) 배기호스 떨림 소음

배기 호스의 떨림 소음(Exhaust Hose Rattling Noise)은 고진공 및 배기 호스가 고온인 상태에서 다량의 Oil이 급유되는 경우에 대체로 발생하며, 1.5 kHz~10 kHz 대역이 주된 발생 주파수 영역이다.

#### (5) 구조 소음

구조 소음(Structure Bone Noise)은 차량용 발전기의 브라켓을 올려서 발생하는 소음이 지배적이며, 500 Hz 이하의 저주파 구간에서 발생한다.

## 3. DOE를 이용한 실험 및 결과

### 3-1. DOE를 이용한 실험 진행

DOE를 이용한 일반적인 개선 과정은 아래와 같다 [10].

- 1) 문제 정의 및 기술
- 2) 현 수준 파악
- 3) 소음요인도로부터 주요인자 및 수준 선정
- 4) 통계적 프로그램을 이용한 실험디자인

- 5) 실험을 통한 데이터 수집
- 6) 각 인자의 효과분석
- 7) 인자의 유효성 분석
- 8) 수학적 모델 및 최적조건 도출
- 9) 효과 검정 및 결론

**3-2. 실험장치 및 평가**

Fig. 5는 본 연구의 실험장치 구성도이다. 구동모터를 이용하여 교류발전기를 구동시켜서 소음발생을 측정하였으며, 청감평가를 실시하였다. 진공펌프 소음의 청감평가는 발생소음에 따라 앞서 언급한 바와 같이 고진공 소음, 배인 체터링 소음, 유체유동 소음, 배기호스 떨림 소음 및 구조 소음의 5가지로 분류하였으며, 10점 만점에서 감점하는 방식을 적용하였다. 청감평가에서 6점 이하일 경우(개선전의 수준은 평균 5점)는 불량으로 간주하며, 7점 이상이 되는 경우를 양호한 수준으로 판정한다.

소음요인도(Fishbone diagram)로부터 진공펌프의 소음에 영향이 있는 인자 및 수준을 Table 1과 같이 선정하였다.

실험설계 및 분석을 위한 통계 프로그램으로는 Minitab[10-12]을 이용하였으며, 5인자 2수준으로 Minitab의 부분배치법(Fractional Factorial Design)을 이용하여 Resolution III 및 3회 반복 실험(8x3=24회)으로 디자인하여 실험한 결과 Table 2와 같은 결과를 얻었다.

**3-3. 결과 분석 및 효과 검정**

Table 2의 실험결과를 Minitab을 이용하여 분석[16]하였으며, 분석은 Fig. 6의 주 효과(Main effect) 및 Fig. 7의 Interaction Plot을 이용한 인자의 효과분석,

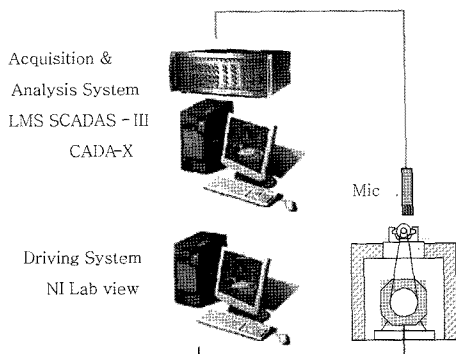


Fig. 5. Experimental equipment diagram.

**Table 1. Effective factors and levels**

인자(Factor)	수준(Level)	Minitab입력
1 T-cutter 시작각도	0°, 20°	0, 20
2 T-cutter 형상	사각, 사다리	1, 2
3 급유구(Oil inlet) 경	F2.2, F2.5	1, 2
4 T-cutter 끝	배기구중앙, D.P시작	1, 2
5 배기구(Outlet) 경	F10, F11	10, 11

**Table 2. Test result**

No. of samples	Avg.	Mean	Min.	Max.	Standard deviation	
1500 rpm	24	7.04	7	6	8	0.69

Fig. 8의 Normal probability, Fig. 9의 Pareto chart 및 수치분석에 의하는 인자의 유효성 분석을 시행하였다. 본 연구에서는 유의수준 0.05, 신뢰구간 95%로 실험 및 분석을 실시하였다.

Fig. 6는 각 인자의 수준에 따라 소음도에 미치는 민감도를 나타낸 것으로서, 이 주 효과 분석을 기울기가 큰 인자가 통계적으로 유의하므로 T-cutter시작(각

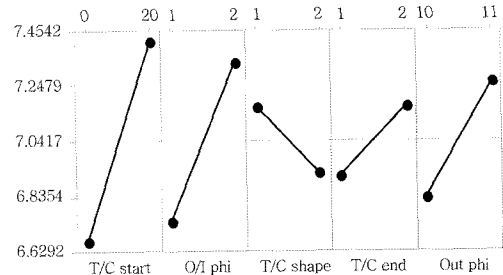


Fig. 6. Main effect plot.

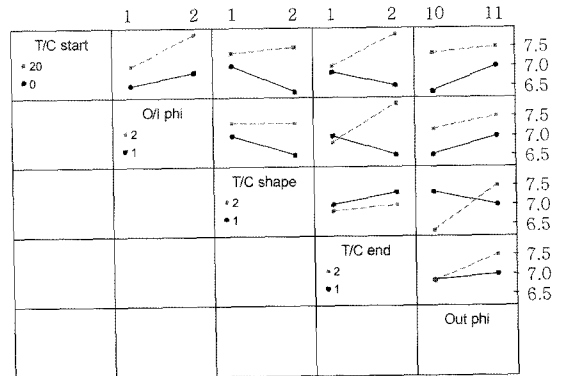


Fig. 7. Interaction plot.

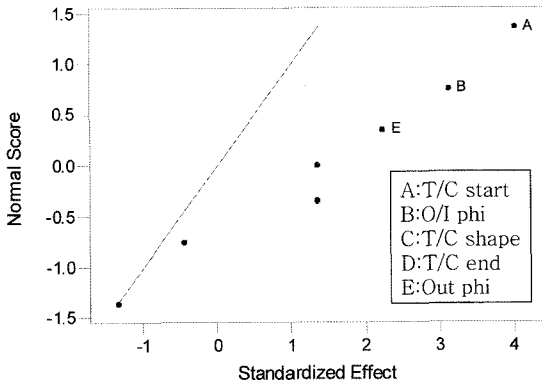


Fig. 8. Normal probability plot of the standardized effects.

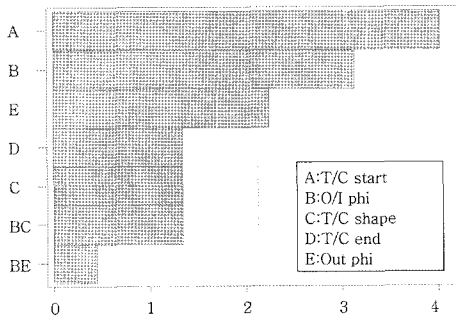


Fig. 9. Pareto chart of the standardized effects.

도), 급유구 경 및 배기구 경의 영향이 큰 인자로 나타나고 있다.

Fig. 7의 Interaction Plot에서는 교호 효과 분석을 위한 것으로서 두 직선이 만나는 기울기가 90°에 가까울수록 영향이 크다는 것을 의미 하므로 그림으로부터 3가지 경우 즉, T-Cutter시작(각도)과 T-Cutter 끝, 급유구 경(Φ)과 T-Cutter끝 그리고 T-Cutter 형상과 배기구의 경 사이에 상호작용이 큰 것으로 나타났다.

Fig. 8의 Normal probability plot은 그림 중앙의 직선에서 멀리 떨어져 있을수록 영향이 크다는 것을 의미하므로 A, B, C인자 즉, T-cutter시작(각도), 급유구 경, 배기구 경순으로 나타남을 볼 수 있다.

Fig. 9의 Pareto chart는 Dot Line 보다 우측으로 치우친 인자가 영향이 크며, 이 두 가지 분석은 모두 인자의 유효성을 분석하는 방법으로 T-cutter시작(각도), 급유구 경 및 배기구 경의 크기 인자가 통계적으로 유의한 인자인 것으로 나타났다.

위와 같은 결과로부터 통계적으로 유의한 인자는 T-cutter시작(각도), 급유구 경 및 배기구 경의 크기 3가지이며, Minitab을 이용한 분석으로부터 수학적 모델

Table 3. Coefficients and coded unit of statistically significant factors

	A	B	E	Constant
Coefficient	0.3750	0.2917	0.2083	7.0417
Coded unit	+1	+1	+1	-

을 얻기 위한 Coefficient 와 Coded Unit은 Table 3 과 같으며 수학적 모델의 계산은 식 (1)과 같다.

여기서, 유효인자에 대한 Coefficient 는 Minitab의 수치분석 결과를 이용한 것이다. 그리고 Coded Unit(+1 or -1)은 Fig. 10의 Cube Plot으로부터 도출한다.

$$\begin{aligned}
 Y &= \text{constant} + \sum \text{Coefficient } t \times \text{coded unit} \\
 &= 7.0417 + 0.3750 \times (+1) + 0.2917 \times (+1) + 0.2083 \times (+1) \\
 &= 7.92 \quad (1)
 \end{aligned}$$

통계적으로 유의한 세 가지의 인자가 조합된 경우에 대한 수학적 모델 및 통계적 계산결과를 확인하면, 수학적 모델에 의한 결과는 7.92이며, 통계적 계산은 8 점으로 유사한 결과를 나타낸다.

Cube plot은 주어진 인자를 어떻게 조합해야 가장 좋은 결과를 얻을 수 있는지를 통계적으로 보여주는 그래프로써 Fig. 10과 같으며, 수학적 모델과 작은 값의 차이를 보이는 것은 유의인자 이외 인자들의 영향까지 포함하기 때문이다.

Fig. 9 에서 보는 바와 같이 오른쪽 상측에 보이는 8.0이 주어진 수준에서의 가장 이상적인 결과를 나타내며, 이 수가 본 연구에서 가장 좋은 조건들을 적용한 경우에 얻을 수 있는 결과임을 의미한다.

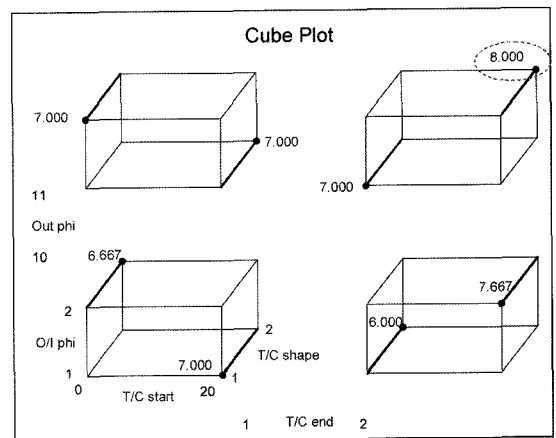


Fig. 10. Cube plot.

이렇게 선정된 인자가 실제로 개선효과가 있는 인자에 대한 검증[17]은 필수적인 과정으로, 인자가 조합된 시료를 제작하여 확인시험을 실시하여야 하며, 실험 결과 평균 7.8로 본 연구에서 주어진 인자에 의한 진공펌프의 소음은 개선됨을 확인 할 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 교류발전기의 진공펌프에서 발생하는 소음을 5가지로 구분하여 각 소음의 발생 조건 및 발생 현상에 대하여 경험적인 면을 포함하여 상세히 기술 하였다. 또한 통계적인 접근 방법인 DOE Method를 이용하여 주요 인자를 추출하였으며, 시료를 제작하여 통계적 방법에 따라 시험 및 분석을 실시하였다.

진공펌프 소음에 대한 연구 결과는 아래와 같이 요약 할 수 있다.

1. 진공펌프의 소음 감소를 위한 가장 중요하며 통계적으로 유의한 인자는 세 가지 즉, T-Cutter의 시작 지점(각도), 급유구 경 및 배기구 경의 크기 이며, 이들 인자의 수준을 조정함으로써 진공펌프의 소음을 감소시킬 수 있다.
2. 수학적 모델 및 Cube plot에 의한 예측결과와 개선시료의 실험에 의해 얻어진 결과는 통계적으로 일치한다.
3. 주어진 인자의 수준을 세분화하여 다 수준 완전 요인 배치법을 이용하면 더욱 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.
4. 본 연구에서는 참값평가로 실험이 진행되었으므로 다소 주관적인 평가가 가미되었으나 그 결과는 차량용 진공펌프뿐만 아니라 Vane를 사용하는 모든 습식 진공펌프의 소음감소에 적용될 수 있다.

#### 후 기

이 연구는 2006년도 현대자동차 ITon 디젤엔진의 차량 진공압의 불평형으로 인한 베인 마모 및 파손을 개선하고 소음을 감소 하기 위해 수행되었습니다.

#### 참고 문헌

1. 김병형, 홍상수, 송재은, “승용 디젤엔진에서의 터보차저 소음에 대한 연구,” 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집 pp. 1707-1712, 2006.

2. 강태식, “자동차 연료펌프 날개깃 모양에 따른 소음 변화의 실험적 연구,” 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집 pp. 1773-1778, 2006.
3. 정석운, 김경훈, 박만홍, “자동차용 쿨링팬의 유동 및 소음특성 해석,” 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집 pp. 1379-1384, 2002.
4. S. J. Suh, J. Chung, B. D. Lim and C. H. Hwang, “Noise Source Identification of an Automobile Alternator by RPM Dependent Noise and Vibration Spectrum Analysis,” Noise Control Engineering J., Vol. 37, pp. 31-36, 1992.
5. 선유영, 구정호, 외3인, “실험계획법을 이용한 노트 북용 fanblock의 소음성능 최적화,” 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, 2007.
6. 한민규, 박준기, “다구찌법을 이용한 캘리퍼 브레이크 시스템의 스킵노이즈저감 최적화,” 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집, pp. 480-485, 2000.
7. 권이석, 박선용, 김성태, 서장원, 김석관, 이종원, “다구찌기법을 이용한 에스컬레이터의 소음저감에 관한 연구,” 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp. 142-147, 1996.
8. James E. Duffy, “Modern Automotive Technology,” pp. 435-436, pp. 538-571, pp. 781-785, pp. 811-812, pp. 1330-1338.
9. 박성현, “현대실험계획법(Design of Experiments,” 개정판, 민영사.
10. Minitab 측정 시스템 분석, 2002, 이승훈.
11. Minitab을 활용한 예제 중심의 실험계획법, 이상복, 2001.
12. Minitab 실무 완성, 이레 테크, 2001.
13. J.Y Jung, “Lubrication Characteristics of High Performance Oil Hydraulic Vane Pump,” Journal of KSLE, Vol. 9, No. 1, pp. 45-54, 1993.
14. J.H. KIM and J.Y. Jung, “The Dynamic Behavior of Internal Rotating Slider of Oil Hydraulic Vane Pump,” Journal of the KSLE, Vol. 6, No. 2, pp. 43-49, 1990.
15. Ferguson, G.A., and Takane, Y., Statistical Analysis in Psychology and Education, Sixth Edition, McGraw-Hill, New York, 1989.
16. Borrer, Connie M., Minitab Handbook, American Society for Quality Control, Vol. 33, No. 1, 2001.
17. S.H. Park, Quality Control by Statistical Method, Minyoungsa, 1996.
18. 자동차 연구회 편저, “자동차 공학,” 성원사, pp.7-65~7-86
19. 조명래, 한동철, 문호지, 박민호, 배홍용, “노치 영역에서 유체관성을 고려한 압력 평형형 베인의 압력 상승에 관한 연구,” 한국윤활학회지, 제13권 제1호, pp. 14-20, 1997.