

〈논 문〉

실험적 해석을 통한 차량용 교류발전기 소음 저감 특성 연구

A Study of AC Generator Noise Reduction Characteristics of
Automobile Using Experimental Analysis

김 대 원* · 신 중 호**

Dae-Won Kim and Joong-Ho Shin*

(1997년 9월 2일 접수 ; 1997년 10월 6일 심사완료)

Key Words : Electro-Magnetic Noise(전자기 소음), Loading Noise(부하소음) Noloading Noise(무부하 소음), Ac Generator(교류 발전기) Hamonic(고조파)

ABSTRACT

In this report, Experimental analysis for main factors and analyzing methods of electro-magnetic noise and no loading noise was conducted because of noise of AC generator, which is peripheral equipment by reduction of engine noise that would be the the main cause of vehicle radiation noise. In addition, This is intended to suggest the noise reduction development basis of AC generator for actual fan and electro-magnetic noise by making-analyzing-testing it's sample.

1. 서 론

요즈음 국내에서도 차량 구매자들이 차량을 구매할 경우에 우선 순위중 하나를 차량내부 소음크기에 둬으로써 차량 Maker 등에서도 저소음 차량 개발에 가일층 매진하고 있다. 차량에서 방사 소음의 주요원인인 엔진소음이 점차적으로 Fig. 1과 같이 저소음화 함으로써 그동안 큰 문제가 없던 주변장치들의 일종인 전기발전을 일으키는 교류발전기의 소음이 점점 부각되고 있다. 일부 국내외에서 교류발전기의 전자기 소음에 대해 연구를 수행했으나 대개 이론적 접근과 해석에 머물러 있는 수준^(1~4)이고 전자기전력 저감을 교류발전기 케이싱의 고유모드를 변환시

키는 방법들에 대한 연구^(5~7)등이 있으나 본 연구에서는 교류발전기의 전자기 소음과 웬, 공기운동등에 따른 무부하 소음에 대해 실험적 해석 방법을 정립하고 케이싱의 고유모드가 소음에 영향을 미치지 않는 것을 분석하고 또한 실제 웬 소음과 전자기 소음에 대해 개선품의 제작 분석실험을 통해서 개선 방향을 제시함으로써 저소음화 교류발전기 개발의 토대를 이루고자 한다.

2. 교류발전기의 소음 특성

회전기계의 소음피크는 각 부품의 구성갯수와 밀접한 관계가 있다. 즉, 회전기인 교류발전기 회전수에 해당하는 기본 주파수의 배수 즉 고조파(hamonic) 성분에 연관이 있다. 일반적으로 교류발전기의 소음 특성은 무부하 상태와 발전상태인 부하 상태로 크게 나누어서 생각할 수 있다.

* 정희원, 기아정기

** 창원대학교 기계설계학과

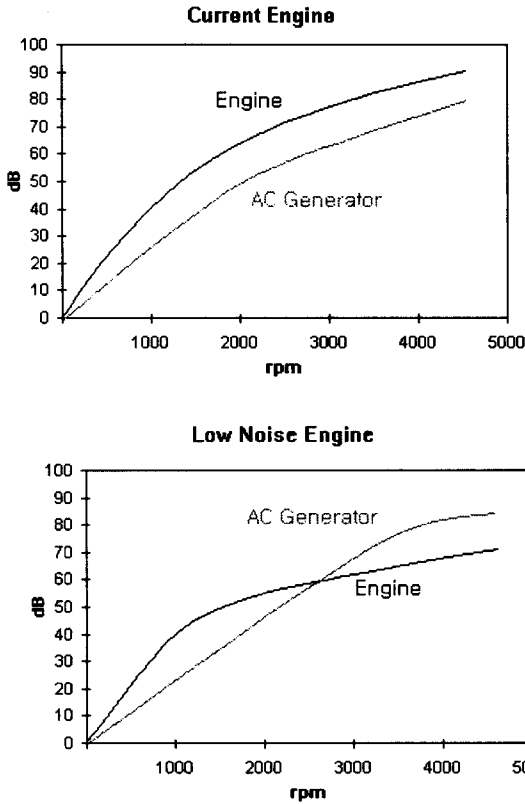


Fig. 1 Development flow of engine noise

Table 1 Components of AC generator

Components	Number
Ball of bearing	n_1
Brade of fan	n_2
Pole of rotor	n_3
Slot of stator	n_4

2.1 무부하 소음 특성

회전기인 교류발전기의 무부하 상태 소음에 영향을 미치는 구성부품은 Table 1 과 같다.

(1) 회전체의 질량 불균형 (eccentricity)

Fig 2와 같이 교류발전기 회전수의 기본 주파수 성분의 기진력이 회전수에 비례하여 증가한다. 이 기본 주파수를 1차 성분이라하고 일반적으로 축의 불균형은 정적 불균형(static unbalance)와 동적 불균형(dynamic unbalance)으로 구분되며 각각 1차 성분 및 기본 주파수의 2배인 2차 성분에 영향을 미친다.

(2) 회전자의 극수(pole number)

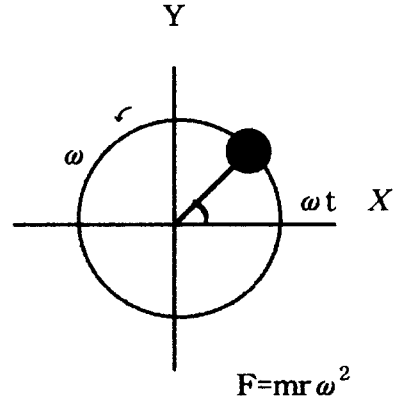


Fig. 2 Rotating model of eccentric weight

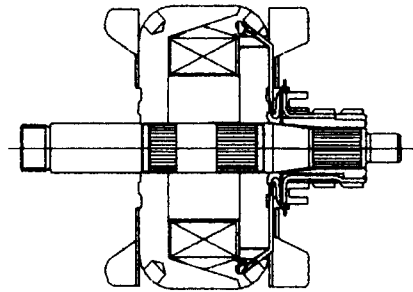


Fig. 3.1 Rotor of AC generator

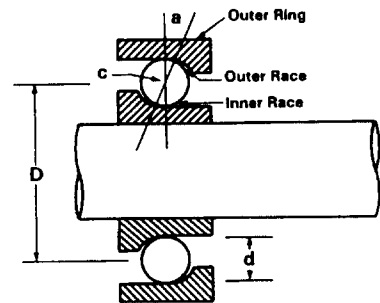


Fig. 3.2 Basic rolling element bearing geometry

회전자의 극수는 회전하는 교류발전기 기본 주파수의 n_3 배(rotor pole 수)인 n_3 차 고조파 성분의 소음에 영향을 미치고 있다.

(3) 구름 요소 베어링 (rolling element bearing)

교류발전기의 회전축을 지지하는 베어링은 구름요소 베어링으로 회전축 양끝 단에 한 개씩 존재한다. 이 2개의 베어링의 크기는 각각 다르다.

이러한 구름 요소 베어링이 소음 특성에 영향을 미

치는 차수는 일반적으로 아래와 같다.

$$\text{Cage 주파수} = -\frac{f_0}{2} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right) (\cos a) \right] \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{로러 스피ن (roller spin) 주파수} \\ = \frac{f_0}{2} \left(\frac{D}{d} \left\{ 1 - \left[\left(\frac{d}{D} \right) \cos a \right]^2 \right\} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{외륜결합 주파수} &= \left(\frac{f_0}{2} \right) (n) \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right) \cos a \right] \\ \text{내륜결합 주파수} &= \left(\frac{f_0}{2} \right) (n) \left[1 + \left(\frac{d}{D} \right) \cos a \right] \end{aligned} \quad (3)$$

단, d : 구름요소 외경 D : 베어링 피치경
 a : 접촉각 n : 구름 요소 수
 f_0 : 기본 주파수

(4) 냉각 팬

냉각 팬의 회전 소음은 기본 주파수의 팬 날개수 배의 특성을 가지고 교류발전기를 높은 회전수에서 사용할 때 팬 소음은 고주파의 순음 성분으로 시끄러움이 증폭되는 현상 때문에 광대역화하고 피크레벨값을 줄이기 위해 팬의 날개가 대칭을 이루고 균등하지 않은 간격으로 배열되게 하고 그 크기도 다르게 설계되어져 있다.

냉각팬의 소음 특성은 팬날개가 대칭으로 이루어져 있기 때문에 $\sin 2\omega_0 t$ 에 비례해서 변환하는 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} (A \sin 2\omega_0 t) \sin n_2 \omega_0 t \\ = \frac{1}{2} [\cos(n_2 - 2)\omega_0 t - \cos(n_2 + 2)\omega_0 t] \end{aligned} \quad (4)$$

단 $\omega_0 : 2\pi f_0, n_2 : \text{팬 날개수}$

그러므로 냉각팬에 의해 영향을 크게 받는 고조파 성분은 $n_2 - 2, n_2, n_2 + 2$ 차 성분이다.

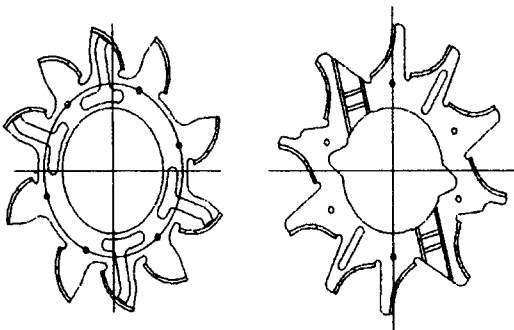


Fig. 4 Diagram of cooling fan

(5) 슬립링 마찰

마찰에 의해 발생되며 백색 잡음과 같은 광대역이며 교류발전기의 회전수 증가에 따라 소음도가 모든 주파수 대역에서 단순 증가한다.

2.2 부하 소음특성

무부하 상태에서 발생하는 축질량의 불균형, 베어링, 회전자 pole, 팬, 슬립링 소음등에 발전상태에서 발생하는 전자기적 소음을 추가한 소음특성을 가진다.

(1) 전자기적 소음

12극(N극 6개, S극 6개)으로 구성되어 있는 회전자의 코일에 직류 전기를 가함으로써 6개의 전자석이 자화되어 자장을 형성함으로써 기전력이 발생한다. 이때 회전자가 초당 1회전하면 고정자 코일의 각 상에서 위상차가 120° 인 6 Hz의 3상교류가 발생된다. 이러한 6차 성분의 교류로서 diode에 의해 정류되기 전에 각상의 순간 기전력의 맥동에 의해 케이싱을 진동시키는 기전력이 발생하여 케이싱 표면의 공기층 외란을 유발시켜 전자기적 소음을 발생시킨다. 6차 고조파 성분중에서 36차 성분의 영향

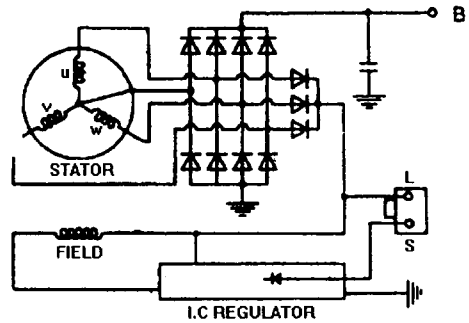


Fig. 5 Curcuit diagram of AC generator

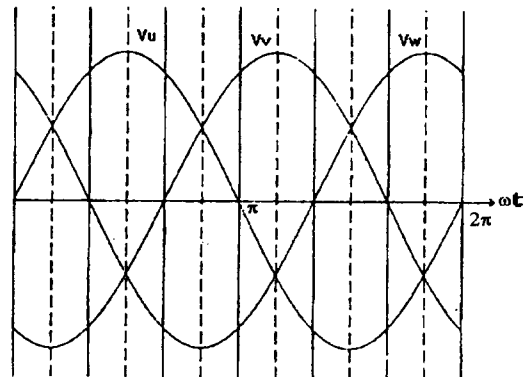


Fig. 6 Voltage wave form of AC generator current

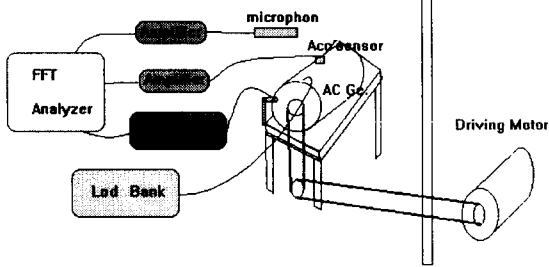


Fig. 7 Block diagram of experimental set up

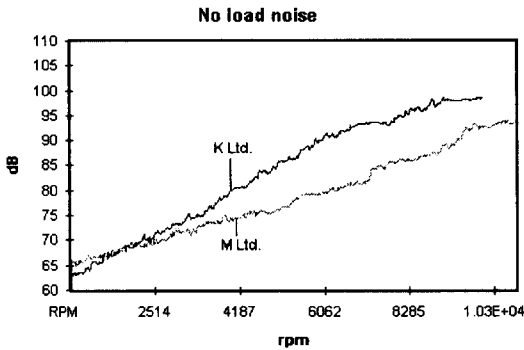


Fig. 8 Overall level of sound (No load operating)

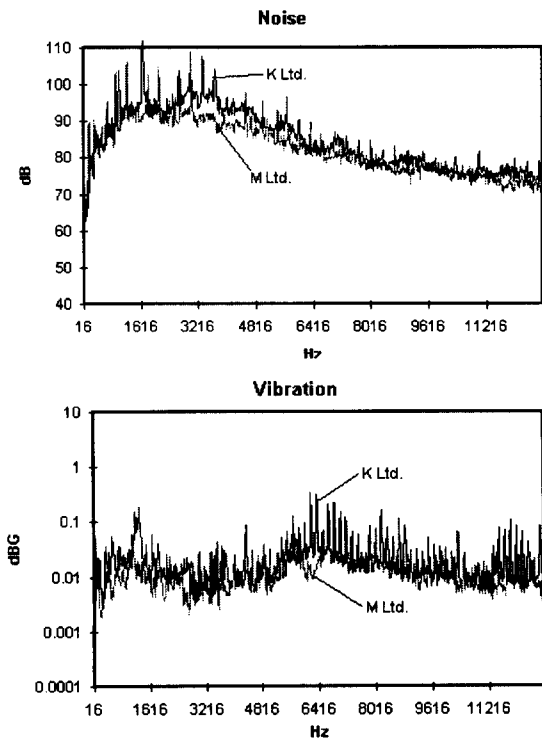


Fig. 9 Frequency characteristics of sound and vibration (No load and 10000rpm operating)

이 가장 크게 나타나는 것은 고정자 teeth의 수(36개)로부터 기인된다. 전자기적 소음의 고조파 Q는 식 (5)와 같다.

$$Q = n_4 \pm \frac{n_3}{2} m_3 \quad (5)$$

$$(m_3 = 0, 1, \dots, n)$$

Fig. 5와 Fig. 6은 각각 차량용 교류 발전기의 회로도와 고정자 코일에서 발생되는 3상교류의 상전압 파형을 나타낸다.

교류발전기 케이싱의 고조파수 Q 기진력이 소음 특성을 지배하는 강제진동의 특성을 가진다. 일반적으로 교류발전기의 경우 낮은 회전수 영역에서는 전자기 소음이 전체 소음도에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

3. 실험

3.1 실험 장치

자유장 상태의 흡음실에 Fig.7 와 같은 실험장치를 설치하여 교류발전기 회전수에 따른 소음과 진동 특성을 측정하고 일반 마이크로폰을 음세기(sound

Table 2 Specification comparison of experimental specimen

E V E N T		Specifications	
		K Ltd	M Ltd
Weight		5.165 kg	5.090 kg
Electical power		960 W	960 W
Ampere		80 A	80 A
Ball number of bearing		7	7
Large bearing diameter	Pitch(D)	∅ 32	∅ 31
	Rolling element(d)	∅ 8.7	∅ 8.7
Small bearing diameter	Pitch(D)	∅ 18.5	∅ 15.5
	Rolling element(d)	∅ 4.8	∅ 4.8
Contact angle (α)		0	0
Fan number	Left side	10	10
	Right side	10	12
Rotor pole	Number	12	12
Stator slot number	Number	36	36

Table 3 Hamonic order of experimental specimen

Hamonic order	Noise source			
	No load		Load	
	K Ltd.	M Ltd.	K Ltd.	M Ltd.
0.4	Cage frequency of bearing	←	←	←
1	Shaft eccentricity	←	←	←
1.5~1.8	Roller spin of bearing	←	←	←
2	Shaft eccentricity	←	←	←
2.4~2.6	Outer race defect of bearing	←	←	←
2.9~3.6	2×Roller spin of bearing	←	←	←
4.4~4.5	Inner race defect of bearing	←	←	←
8	Fan blade	←	←	←
10	Fan blade	←	←	←
12	Rotor pole, Fan blade	←	←	←
14	-	Fan blade	-	←
30	-	-	Electro-magneticnoise	←
36	-	-	Electro-magneticnoise	←
42	-	-	Electro-magneticnoise	←

intensity)용 마이크로폰으로 교체하여 교류발전기 음세기 분포 상태를 분석했다.

3.2 1차 실험 시료

베어링 내경, 웬 날개수등이 다르나 전기적 용량은 같은 두제품의 소음, 진동 특성을 분석 비교해 봤다.

3.3. 1차 실험 결과

(1) 무부하 소음

Fig. 8과 같이 무부하시 전체 소음도의 Overall 값을 교류발전기의 회전수에 따라 평가하면 K 품이

M 품보다 전체적으로 높은 소음 레벨을 나타내고 특히 10000 회전수에서는 6 dB 높은 것을 알수 있다. 이러한 overall 소음도가 높은 것은 Table 3의 고조파수에서 웬 하모닉 성분이 Fig. 9에서와 같이 M 품에 비해 K 품이 높고 전체 소음도에 타월한 영향을 미치고 있다. 또한 Fig. 10의 무부하 진동의 주파수 특성이 회전수의 변화에도 불구하고 변화가 없는 고유진동을 하고 있고 같은 주파수에서 피크가 나타나는 데 이는 고유모드에서의 진동을 나타내고 Fig. 11의 무부하 소음과 비교했을 때 교류발전기의 케이싱의 고유모드는 소음에 크게 기여하지 않음을 알 수 있다.

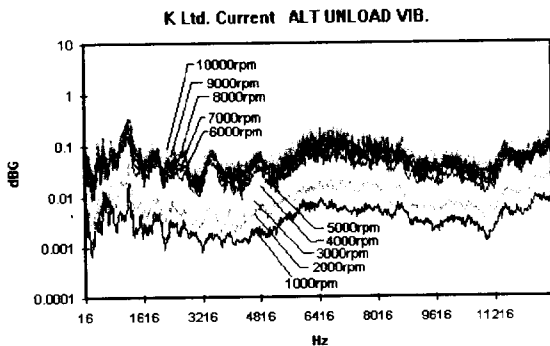


Fig. 10 Frequency characteristic of vibration as variable rotating speed (no load operation)

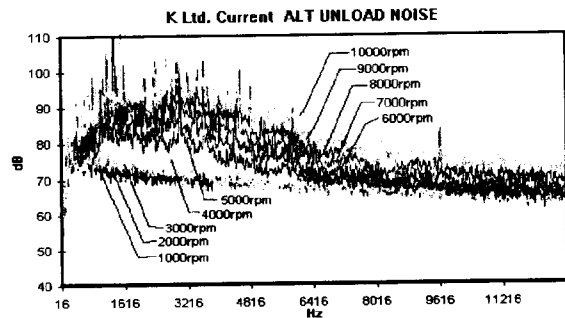


Fig. 11 Frequency characteristic of sound as variable rotating speed (no load operation)

(2) 부하 소음 (전자기 소음)

부하 소음의 회전수 변동에 따른 overall 평가 결과 Fig. 12 에서와 같이 *k* 품이 낮은 회전수 영역에서 방사 소음의 overall값이 2~3개의 피크값을 가지고 회전수가 높아짐에 따라 *M* 품에 비해 소음도가 높게 나타난다. Fig. 13과 같이 교류발전기의 회전수를 일정(6000 rpm)하게 하여 교류발전기 케이싱 진동과 방사 소음의 주파수 특성을 분석해 보면 진동 파형의 30, 36 차수 성분이 강제 진동되어 방사소음인 전체 소음도에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 결국, Fig. 13의 진동 파형에서와 같이 *M* 품도 강제 기전력인 전자기력이 $36 \pm 6m_3$ ($m_3=0,1,2 \dots n$) 차수의 형태로 발생함을 알 수 있다. 그러나, *K* 품이 *M* 품보다 전자기 소음을 발생시키는 전자기전력은 고정자 슬롯수의 주기인 30, 36 차 성분이 높음으로 해서 전체 방사 소음도가 높아지는 것으로 추정된다. 이것에 대한 개선이 필요하다. 또한, Fig. 14을 보면 교류발전기 케이싱의 무부하 및 부하 진동의 주파수 특성이 같으나 단지 부하 진동의 기전력인 전자기전력에 의한 6차의 고조파 성분만이 강제 진동함으로 인해 피크레벨이 증대하여 부하소음 즉, 전자기 소음이 증폭하는 것을 알 수 있다.

이와 같은 전자기 소음은 Fig. 15의 교류발전기 케이싱의 진동 주파수 특성과 같이 진동을 유발하는 전자기전력이 전체 운전 회전수 영역에 존재하고 그 피크가 운전 회전수 증가에 따라 증가하고 있으므로 교류발전기의 케이싱 공진(고유 모드 진동)에 의한 것이 아니고 전자기력에 의한 강제진동에 의해 발생하는 전자기 소음임을 나타낸다.

또한, 전자기 소음이 낮은 회전수 영역에서 주로 나타나는 것은 Fig. 13의 방사 소음 특성상 전자기 소음의 고조파 성분이 전체 소음도에 미치는 영향이 크기 때문이고 그 이상의 회전수 영역에서는 Fig. 15의 10000회전수의 방사 소음 주파수 특성과 같이 전체 소음도에 비해 전자기음이 큰 영향을 주지 못하고 오히려 다른 웬 소음등이 크게 기여를 하고 있기 때문인 것으로 기인된다.

3.4 2차 실험 시료

(1) 무부하 소음

5000 회전수 이상의 소음 특성상에서 주요 인자인 웬의 고조파 소음 피크를 낮추기 위해 Fig.16와 같이 웬에 흡입되는 공기의 유로 변경으로 공기의 흐름을 정류화 시킴으로써 웬 소음의 저감을 도모한다.

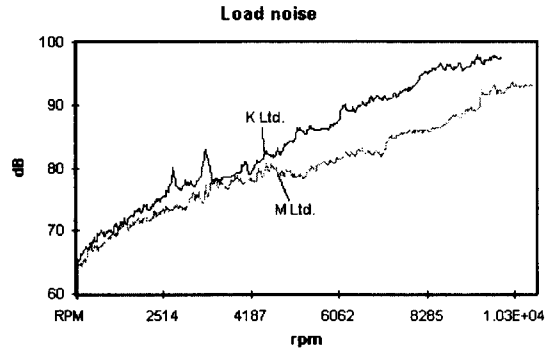


Fig. 12 Overall level of sound (load operation)

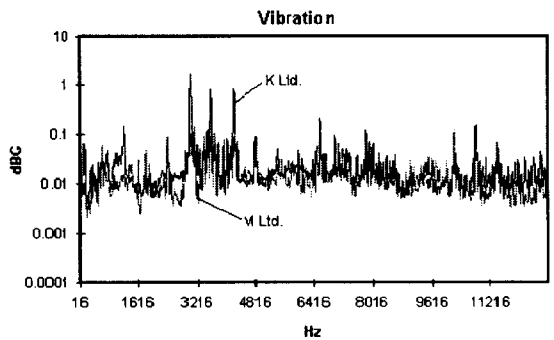
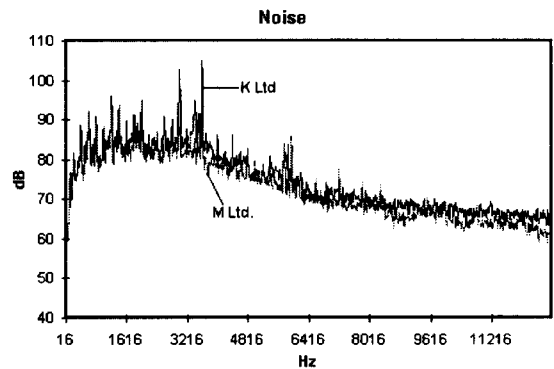


Fig. 13 Frequency characteristic of sound and vibration as raising electro-magnetic sound (load operation)

(2) 부하 소음 (전자기 소음)

전자기력의 저감을 위해 회전자의 외경을 1/100 mm정도 축소함으로써 회전자와 고정자 사이 간격에 존재하는 자속 밀도의 불안정을 저하시킴으로써 전자기력의 저감을 도모하고 높은 회전수 영역의 방사 소음도의 경우 전자기력보다는 웬 소음의 기여가 높으므로 무부하 소음과 같은 방법으로 저감 추진한다.

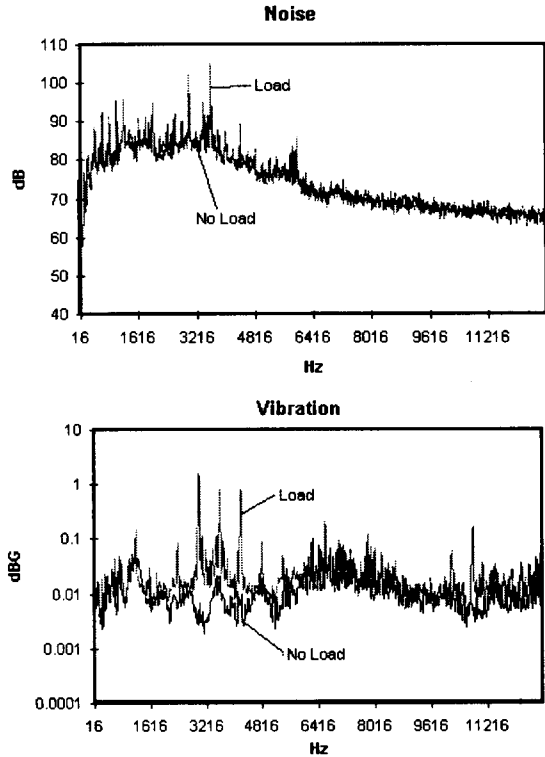


Fig. 14 Comparison between no load and load frequency characteristics

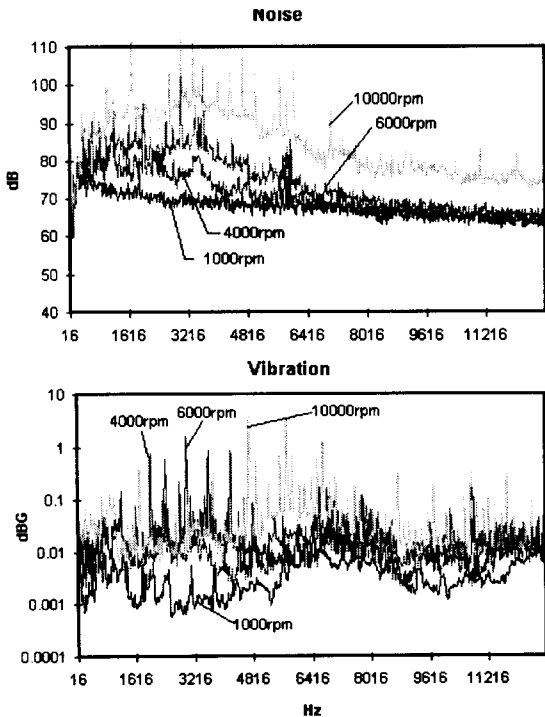


Fig. 15 Frequency characteristics of sound and vibration as variable rotating speed (load operation)

3.5. 2차 실험 결과

(1) 무부하 소음

팬에 흡입되는 공기의 흐름을 개선함으로써 전 회전수에서 소음 overall의 값이(Fig. 17) 7 dB(10000 rpm 기준)정도 개선되고 개선후의 소음 주파수 특성의 분석결과 (Fig. 18) 팬의 고조파 성분의 소음 피크가 개선된 것으로 나타났다. 한 단면당 16 point에서 sound intensity probe를 사용해서 교류발전기에서 방사되는 음의 세기 분포를 팬 고조파 성분(10차수)에서 Fig. 19과 Fig. 20과 같이 분석해보면 개선전은 교류발전기의 팬에 근접한 위치에서 음의 세기 분포등 고선의 최고점이 존재하고 있으나 팬 흡입 공기 흐름을 변경함으로써 음의 세기 분포 등고선의 최고점이 분산되었고 특히 교류발전기 뒷면의 분포 등고선의 최고점이 개선전에는 팬에 공기가 흡입되는 부위인 중앙에 위치했으나 팬 흡입 공기 흐름을 개선함으로써 중앙에서 분산된 것을 알 수 있다.

또한, 팬에 근접한 위치에서의 10000 회전수에서 음의 세기 overall 값을 개선 전후 비교 분석해 본 결과 역시 팬 차수 성분(특히 10차수 성분)이 저감된 것이 Fig. 21과 같이 나타났다.

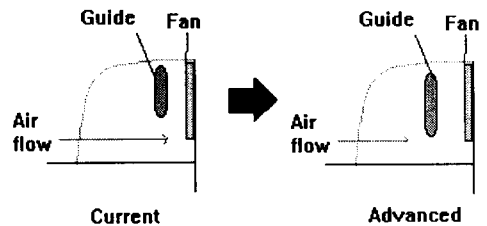


Fig. 16 Redesign of air flow

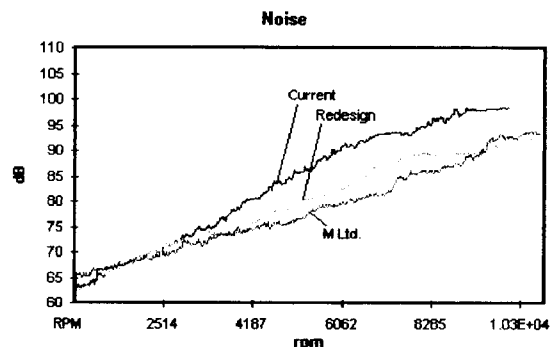


Fig. 17 Overall level comparison of sound (no load operation)

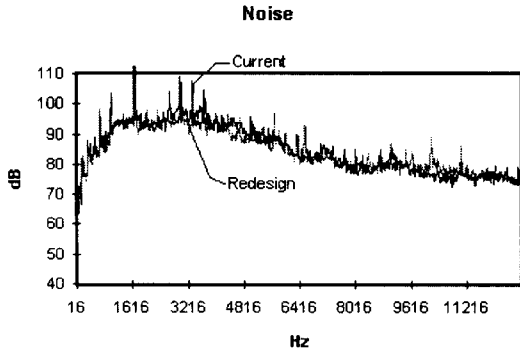


Fig. 18 Sound frequency characteristics comparison of current and redesign products (No load and 10000 rpm operation)

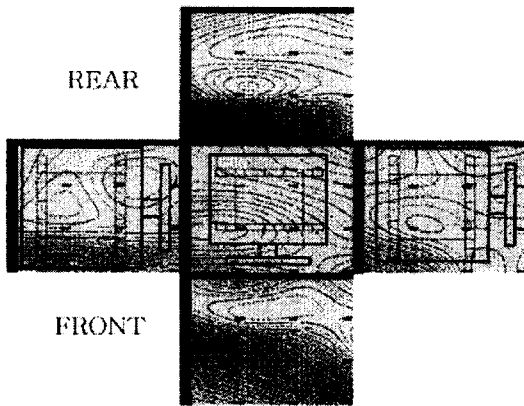


Fig. 19 Sound intensity distribution around AC generator at fan sound harmonic order of current product (10 order and no load operation)

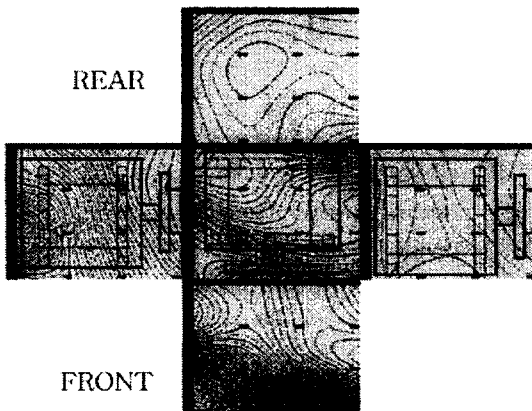


Fig. 20 Sound intensity distribution around AC generator at fan sound harmonic order of redesigned product (10 order and no load operation)

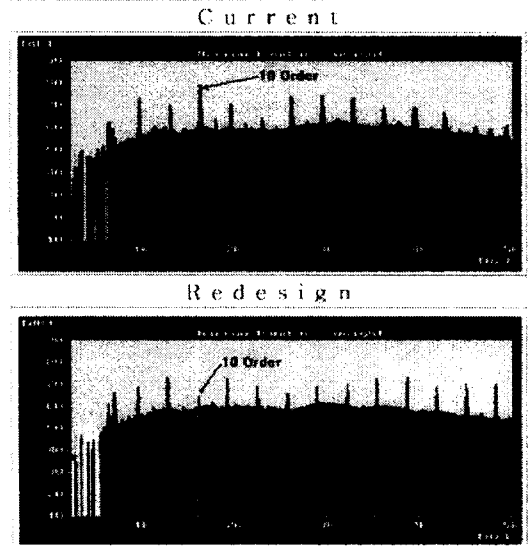


Fig. 21 Frequency characteristics of sound intensity at closely fan location (10000 rpm)

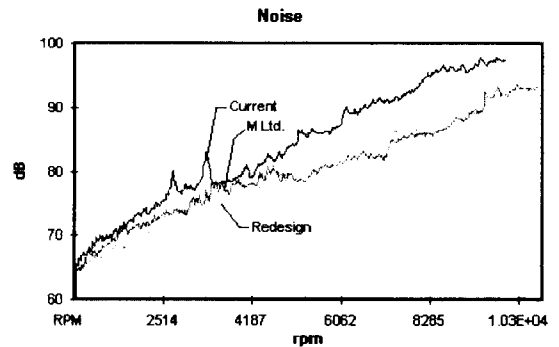


Fig. 22 Overall comparison of sound (load operation)

(2) 부하 소음 (전자기 소음)

회전자의 외경 개선으로 Fig. 23과 같이 교류발전기의 케이싱을 강제 진동시키는 전자기력이 현저하게 개선됨으로 해서 방사소음의 전자기 소음 피크가 낮아져서 Fig. 22에 나타난 것과 같이 운전 회전수 변화에 따른 소음도가 개선전에 비해 많이 낮아졌다. 또한, 높은 운전 회전수 영역에서 무부하 소음도와 같은 개선 효과를 보이는 것은 팬 흡입 공기 흐름 개선과 회전자 외경 개선의 효과가 합쳐진 결과로 분석된다. 이것은 Fig. 23의 방사 소음 주파수 특성에 잘 나타나 있는데 교류발전기진동의 전자기력 성분과 일치하는 전자기 소음성분 보다 낮은 주파수 영역 성분(팬 차수 성분)이 개선 전후가 뚜렷이 구별되는 것을 알 수 있다. 그러나, M 품과

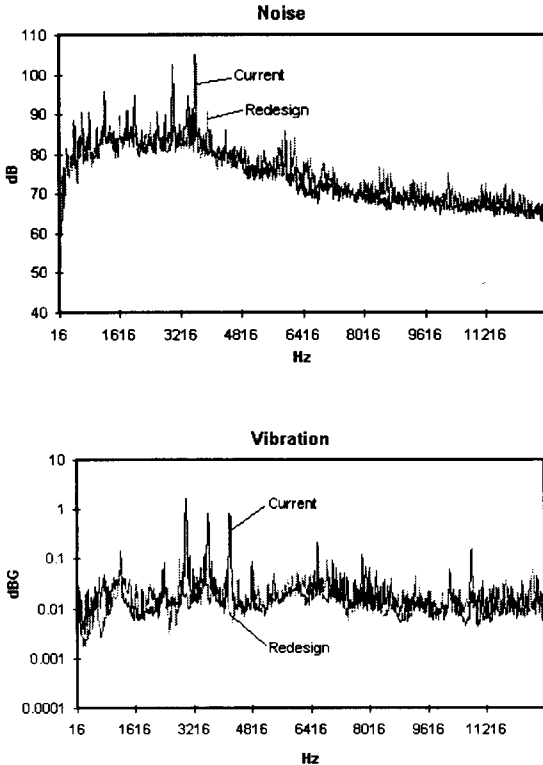


Fig. 23 Sound and vibration frequency characteristics of current and redesign products (At Range raising electro-magnetic noise)

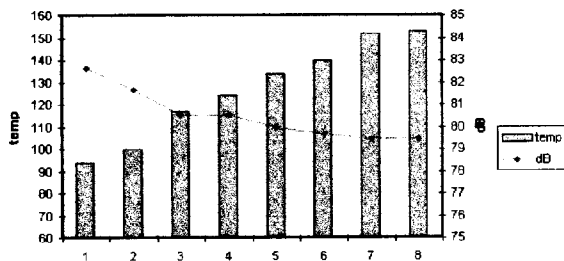


Fig. 24 Relation between sound level and temperature (5000 rpm)

비교해서 K 품이 무부하(Fig. 17) 및 부하(Fig. 22) 소음도가 중간 운전 회전수 영역에서는 여전히 높게 나타남을 알 수 있다.

(3) 기타

Fig. 24와 같이 전자기음의 소음 레벨이 교류발전기의 경우 표면온도의 변화에 의해 소음 레벨이 변화가 일어나고 있으나 일정 시간 회전후에는 포화 상태에 도달하게 되므로 온도가 일정하게 되어 소음 레벨의 변화가 없다.

4. 결 론

교류발전기의 소음특성에 대해 실험적 해석을 통해 개선품등에 대한 해석을 진행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 교류발전기 케이스의 고유진동모드와는 상관 없는 강제진동인 전자기전력에 의해 전자기 소음이 발생한다.

(2) 전자기 소음은 낮은 회전수 영역에서 소음의 overall값에 큰 영향을 미치고 있다.

(3) 회전자의 외경 개선이 전자기전력의 저하를 가져오고 전자기 소음을 저감시킨다.

(4) 5000 회전 rpm 이상 영역에서는 웬 소음이 소음의 overall값에 탁월한 영향을 미치고 있다.

(5) 웬의 흡입공기 흐름을 정류화시킴으로써 7 dB의 소음 저감이 있다.

(6) 교류발전기의 표면 온도 변화에 따라 방사 소음도가 변화된다.

앞으로의 과제는 전자기 소음의 저감 대책인 회전자 외경의 축소는 미세한 교류발전기 출력 저하를 초래할 우려가 있으므로 현재의 구조에서 회전자와 고정자 사이의 회전 상대 운동 균일화로 자속밀도의 불안정화를 줄이는 연구가 필요하다. 그리고 중간 운전 회전수 영역에서의 방사 소음도 저감에 대한 개선 검토가 이루어져야 하고 또한 향후 저소음화 엔진의 개발에 의해 차량 운전자에게 문제가 되지 않을 정도로 소음 레벨이 점점 낮아지고 있는 경향이기 때문에 전체 소음도의 저하와 순음의 차수 성분 소음 레벨 저감을 위한 끊임없는 노력이 필요하다.

참 고 문 헌

(1) Middleton and Andrew, "Noise and Vibration Testing of Automotive Components", Noise Vib. Control Worldwide, Vol.19, No.3, Mar 1988, pp.89~92.
 (2) Villsboll, N., and Pinegin, A., "Designing and Testing a 20KW Multi-pole Permanent Magnet Alternator for Use in Wind Turbines", Wind Engineering, Vol.20, No.3, 1996, pp. 107~114.
 (3) Fujita, T., and Fukuhisa, S., "Active Microtremor Isolation System Using Linear Motors", Trans. Japan Soc. Mech. Eng., Vol.56, No.523, 1990, pp. 629~633.

- (4) Yamamoto, S., and Ozeki, O., "Electrical Environmental Characteristics for Automotive Electronic Systems", IEEE Trans Veh Technol, Vol.32, No.2, May 1983, pp. 151~157.
- (5) Joon, S. S., and Chung, J. T., "Case History. Noise Source Identification of an Automobile Alternator by RPM Dependent Noise and Vibration Spectrum Analysis", Noise Control Eng J, Vol.37, No.1, Jul-Aug 199, pp.31~36.
- (6) 김양한, "유도전동기의 방사소음 특성 고찰", 대한기계학회 추계학술대회 논문집, 1996, pp. 103~117.
- (7) 김광준, 박윤식, "소형 유도 전동기의 진동특성 분석", 대한기계학회 추계학술대회 논문집, 1996, pp. 119~126
- (8) Norman, C., and Otto, "Subjective Evaluation and Analysis of Automotive Starter Sounds", Noise Control Eng J, Vol.41, No.3, Nov-Dec 1993, pp. 377~382.