

# 부등 피치 모사 제어를 적용한 변속기용 전동식 오일 펌프의 소음 특성 연구

최진철<sup>1)</sup> · 김형석<sup>1)</sup> · 이우택<sup>\*2)</sup>

명화공업 소프트웨어개발팀<sup>1)</sup> · 창원대학교 제어계측공학과<sup>2)</sup>

## Noise Analysis of Transmission Electric Oil Pump with Uneven Pitch-Simulated Control

Chinchul Choi<sup>1)</sup> · Hyungsuk Kim<sup>1)</sup> · Wootaik Lee<sup>\*2)</sup>

<sup>1)</sup>Software Development Team, Myunghwa Ind. Co., Ltd., 123 Gasan digital 2-ro, Guemcheon-gu, Seoul 08505, Korea

<sup>2)</sup>Department of Control and Instrumentation Engineering, Changwon National University, Gyeongnam 51140, Korea

(Received 13 July 2020 / Revised 28 July 2020 / Accepted 4 August 2020)

**Abstract** : This paper proposes an uneven pitch-simulated control for electric oil pumps. Mechanical arrangements of uneven pitch vane angle are widely used for the noise reduction of vane pumps. However, the tooth angle of the gear-type pumps should be even mechanically. The proposed uneven pitch-simulated control provides similar effects of the mechanical uneven pitch arrangement through the instantaneous motor torque controls of the electric oil pump that cannot have uneven pitch mechanically. The magnitude of the motor torque for each pump tooth is determined by an uneven pitch formula that is widely used for mechanical vane pumps in previous studies and patents. A formula for the shape of the motor torque is proposed by analyzing the pressure fluctuations of the pump as a combination of trigonometric and exponential functions. The calibration factors for the magnitude and shape are adjusted based on the characteristics of the pumps. The experimental results showed the noise reduction and dispersion effects of the proposed method.

**Key words** : Electric oil pump(전동식 오일 펌프), Noise(소음), Uneven pitch(부등 피치), Transmission(변속기), Electric motor(전동기)

### Nomenclature

$\Delta\theta$	: incremental angle(pitch) between the teeth, rad
$n$	: order of the teeth
$N$	: total number of teeth
$A_m$	: distribution magnitude of uneven pitch
$P_1, P_2$	: factors exerting an influence on the cycle
$B_m$	: factors for uneven pitch-simulated control
$\omega^{ref}$	: reference of angular velocity, rad/sec
$\omega$	: measured angular velocity, rad/sec
$i_s^{ref}$	: reference of current, A
$i_s$	: measured current, A
$i_{uneven}^{ref}$	: reference for uneven pitch-simulated control, A
$v_{abc}$	: phase voltage, v

### 1. 서론

친환경 자동차의 연비 향상을 위해 기존 엔진 동력이나 유압식으로 구동되었던 부품이 전동식으로 전환되고 있다. 엔진 및 변속기에 직접 체결되는 기계식 오일 펌프를 영구자석 동기 전동기와 제어기에 의해 구동되는 전동식 오일 펌프로 대체하여 친환경자동차의 연비향상을 도모하고 있다.<sup>1)</sup>

엔진 회전 속도에 비례하여 동작하는 기계식 오일 펌프와 달리 엔진과 관계없이 동작 가능한 전동식 오일 펌프는 차량 정차 및 저속 주행 시에도 비교적 높은 유압 및 유량의 구동이 요구되어 소음 저감 설계가 더욱 중요하다.

오일 펌프의 소음 발생원 및 소음의 구성 등이 알려져 있으며 이를 저감하기 위한 설계 기술은 펌프 제조사의 고유의 기술로서 많은 설계 경험과 노하우가 요구된다.<sup>2)</sup>

\*Corresponding author, E-mail: wootaik@changwon.ac.kr

<sup>\*</sup>This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

주요 소음 저감 설계 인자는 펌프의 날개 및 치형상, 여유공간(Clearance)과 포트 형상이며 이러한 형상 변수를 조정하여 내부 유동을 개선하고 이로부터 소음 저감의 효과를 얻을 수 있다.

이러한 형상변수를 변경하여 소음을 저감하는 기술은 펌프 성능에 밀접한 영향이 있으므로 유압 성능을 유지하면서 소음을 저감하는 것에 한계가 있다. 즉 펌프 로터(Rotor)와 하우징(Housing)의 여유공간, 펌프 치(Tooth)와 치 사이의 여유공간을 크게 하면 소음을 저감할 수 있지만, 펌프의 체적효율을 떨어뜨려 유압 성능이 낮아지게 되는 것이다.

위의 세 가지 형상 변수 이외에 펌프 날개(Vane)를 부등 피치(Uneven pitch)로 배열하여 발생 소음의 주파수대역을 분산시켜 특정 주파수 대역의 소음을 저감하고, 공진 주파수 대역을 회피하는 설계 기술이 소개되었다.<sup>3)</sup>

베인 펌프에 비해 비교적 저가로 자동차용 오일 펌프에 널리 적용중인 기어 타입의 펌프는 두 개의 기어가 동일한 유격으로 맞물려 돌아가며 유압을 생성하기 때문에 각 치(Tooth) 사이의 간격을 균등해야 하며 부등 피치 적용이 불가하다.

기계식 오일 펌프와 달리 전동식 오일 펌프는 기구적으로 부등 피치를 적용하지 못하는 기어 타입 펌프에 모터의 회전 속도 및 토크를 능동적으로 가변 하여 부등 피치를 적용한 것과 유사한 조건으로 구동할 수 있는 부등 피치 모사 제어를 적용할 수 있다.

이 논문은 기구적으로 부등 피치 적용이 불가한 내접 및 외접 기어 펌프를 기반으로 하는 전동식 오일 펌프에 부등 피치 모사 제어 기법을 적용하고, 변속기용 외접 기어 펌프 기반의 전동식 오일 펌프를 이용한 실험을 통해 소음 특성을 분석하여 그 효과를 확인하였다.

## 2. 펌프 형상 및 부등 피치

### 2.1 베인 타입 오일 펌프의 부등 피치

Fig. 1은 일반적인 형태의 Binary 베인 펌프의 형태를 보여 준다. 펌프 로터 내에 방사상으로 설치된 홈에 삽입된 베인이 하우징에 내접하여 회전하는 형태이다. 다수의 날개를 갖는 유체기계의 소음 저감을 위해 부등 피치를 적용하는 것은 일반적으로 알려진 방식이다.<sup>3)</sup>

Fig. 1의 베인 펌프에서 각 날개의 간격을 식 (1)과 같이 부등하게 배치하여 구성할 수 있다.

$$\Delta\theta_i \neq \Delta\theta_{i-1} \tag{1}$$

부등 피치를 배열하는 과정은 주로 난수 발생기(Random number generator)를 사용한다. 날개의 위치를

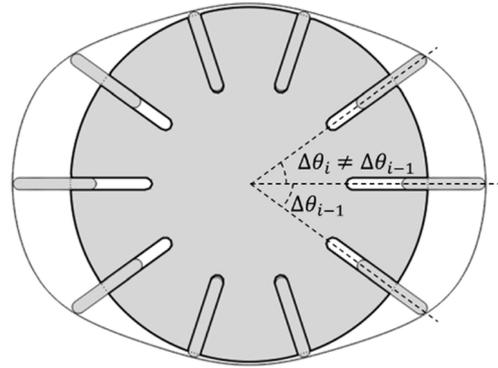


Fig. 1 Binary vane pump with uneven pitch

난수로 배열하게 되면 결정된 형상에 대한 설계 근거가 부족하여 이에 대한 효과는 반드시 성능분석을 통해 확인을 해야 한다. 또한 난수 배열을 인위적으로 조정할 수 없기 때문에 최적의 배열을 도출하기 위해서는 많은 시행착오가 발생한다.<sup>3)</sup>

상기와 같은 문제점을 해결하기 위한 것으로, 날개를 부등 피치로 배열하되 특정 부분에서의 날개 쏠림 현상을 방지하여 음압 피크를 줄이고, 부등 피치를 주기함수적으로 생성하여 날개 배열에 대한 예상 및 조절이 용이한 부등 피치 생성함수가 식 (2)과 같이 제안되었다.<sup>4)</sup>

$$\Delta\theta_n = \frac{2\pi}{N} + (-1)^n \times A_m \left\{ \sin\left(P_1 \frac{2\pi}{N} n\right) \times \cos\left(P_2 \frac{2\pi}{N} n\right) \right\} \tag{2}$$

식 (1)의  $\Delta\theta$ 는 날개 사이 각(Degree), n는 날개 순번, N은 날개 개수이며  $A_m$ ,  $P_1$  및  $P_2$ 는 부등 피치의 크기와 배열을 조정하는 변수이다.

### 2.2 기어 타입 오일 펌프의 형상

베인 펌프는 비교적 형상이 복잡하여 소형화하기 어렵고, 내접 및 외접 기어 펌프라고 불리는 기어 형상의 펌프에 비해 고가이다.

비교적 저가로 자동차용 오일 펌프에 널리 적용중인 내접 및 외접 기어 펌프는 Fig. 2와 같이 두 개의 기어가 동일한 유격으로 맞물려 돌아가며 유압을 생성하기 때문에 각 치(Tooth) 사이의 간격을 균등해야 하므로 기구적으로 부등 피치 적용이 불가하다.

내접 및 외접 기어 오일 펌프의 주요 소음 발생원인은 유압 맥동으로 펌프의 치형 및 포트 형상의 설계에 따라 Fig. 3과 같이 여러 가지 형태로 발생하게 된다. 기구적으로 치와 치의 간격이 일정한 기어 타입 펌프는 회전 시 치형에 따라 Fig. 3과 같이 비교적 균등한 유압 맥동을 가지게 된다. 따라서 발생 소음의 스펙트럼 분석 결과 대부분

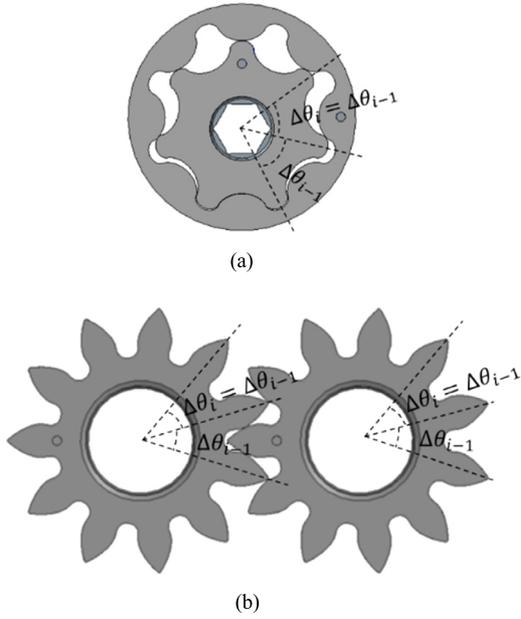


Fig. 2 Structures of gear-type pumps: (a) internal gear type, (b) external gear type

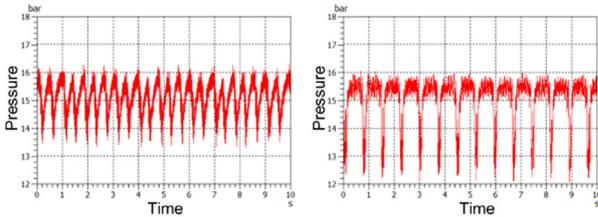


Fig. 3 Analysis results of pressure fluctuation according to pump designs

의 소음은 회전수와 치수의 곱의 주파수의 고주파 차수 성분이 지배적으로 나타난다.

### 3. 부등 피치 모사 제어

엔진 및 변속기에 직접 체결되는 기계식 오일 펌프와 달리 영구자석 동기 전동기와 제어기에 의해 구동되는 전동식 오일 펌프는 모터의 회전 속도 및 토크를 능동적으로 제어할 수 있다.<sup>9)</sup>

기구적으로 부등 피치를 적용하지 못하는 내접 및 외접 기어 펌프에 모터의 회전 속도 및 토크를 가변 하여 부등 피치를 적용한 것과 유사한 조건으로 구동하는 부등 피치 모사 제어 기법을 제안한다.

#### 3.1 영구자석 동기 전동기의 제어

Fig. 4는 전동식 오일 펌프의 제어 시스템의 일반적인 구성을 나타낸다. 시스템은 크게 펌프, 모터, 제어기 및 각종 센서로 나눌 수 있다.

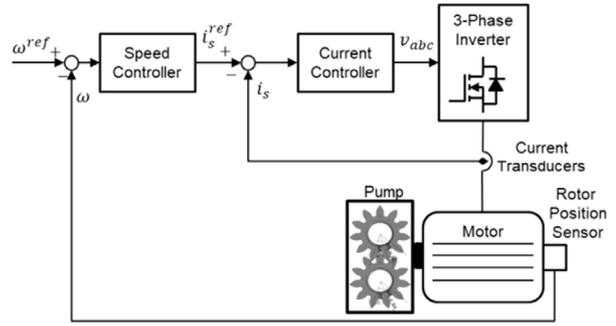


Fig. 4 Control diagram of electric oil pumps

비례적분(PI) 제어기 기반의 속도 제어기 및 전류제어기를 통해 얻은 전압 지령치를 3상 인버터로 출력하여 제어한다. 회전자 위치 센서 및 전류 센서로 측정된 속도 및 전류 값을 피드백하여 속도 지령치와의 오차가 0이 되도록 제어한다. 모터의 전류는 토크와 비례하는 값으로 두 PI 제어기를 통해 모터 속도 및 토크를 순시적으로 가변 제어할 수 있다.<sup>6,7)</sup>

#### 3.2 부등 피치 모사 제어

기구적으로 균등하게 배치된 각 치의 위치에 따라 순시적으로 모터의 토크를 가감하여 부등 피치를 적용한 것과 같은 효과를 기대할 수 있다. 이때 모터 토크의 가감 형상을 식 (3)과 같이 제안한다.

$$y = e^{-B_m x^2} \quad \text{where } -1 \leq x \leq 1 \quad (3)$$

이는 Fig. 3과 같이 해석 또는 측정된 펌프의 유압 맥동 형상에 따라 식 (3)의 부등 피치 제어 형상 인자인  $B_m$ 의 크기를 조정하여 적용한다. Fig. 5는  $B_m$ 에 따른 부등 피치 모사 형상을 보여준다.

속도제어기에 의해 결정된 전류 지령치에 Fig. 6과 같이 부등 피치 모사를 위한 전류 지령치,  $i_{uneven}^{ref}$ 를 Fig. 6과 같이 추가 인가하여 펌프 치 개수 및 치 위치에 맞추어 모터의 토크를 순시적으로 가변 제어한다.

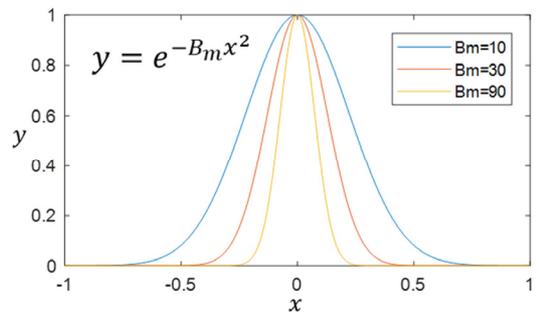


Fig. 5 The proposed shape of uneven pitch-simulated control

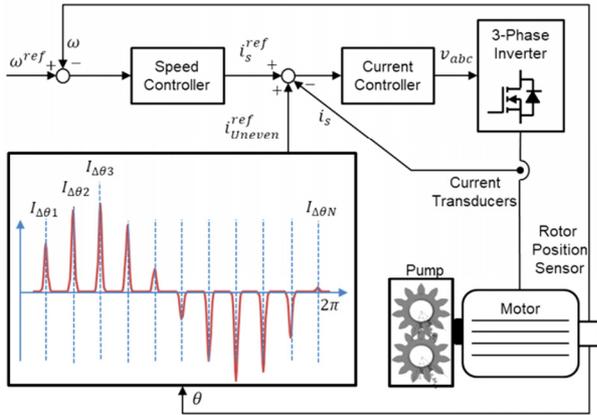


Fig. 6 The proposed uneven pitch-simulated control

각 치 순번에 차등적으로 적용될 부등 피치 모사 제어 지령의 크기는 선행 연구 및 특허를 통해 알려진 부등 피치 함수 식 (2)를 이용하여 식 (4)와 같이 정의한다.

$$I_{\Delta\theta_n} = (-1)^n \times A_m \left\{ \sin\left(P_1 \frac{2\pi}{N} n\right) \times \cos\left(P_2 \frac{2\pi}{N} n\right) \right\} \quad (4)$$

펌프 유압 성능을 유지하기 위해 제어 지령의 평균은 0이며, 그 최대 크기는 펌프의 유압 성능이 저하되지 않는 선에서 실험적으로 결정이 필요하다.

최종적으로 각 치 순번에 적용된 부등 피치 모사 제어 전류 지령은 식 (5)와 같이 구현된다.

$$i_{uneven}^{ref} = I_{\Delta\theta_n} \times e^{-B_m \left\{ \text{mod}\left(\theta; \frac{2\pi}{N}\right) - 1 \right\}^2} \quad (5)$$

where *mod* : modulo operation

#### 4. 실험 결과

Table 1은 실험에 사용된 전동식 오일 펌프의 주요 특성을 나타내고, Photo. 1은 무향실 내에 설치된 전동식 오일 펌프 및 장착된 소음 진동 센서의 위치 등의 실험 환경을 보여준다.

소음이 차량의 틈새 등을 통해 바로 실내로 전달되는 공기 기인(Airborne) 소음 측정을 위해 30 cm 거리에 마이크로폰(1/2인치 free-field 타입, PCB 377B02 앰프 426E01, 50 mV/Pa)을 설치하였고, 펌프의 진동이 고정 구조물을

Table 1 Specification of the tested system

	Value	Unit
Pump type	External gear	-
Number of teeth	11	EA
Max speed	3200	RPM
Max hydraulic power	4bar@16lpm	-
Max electric power	25A@12V	-

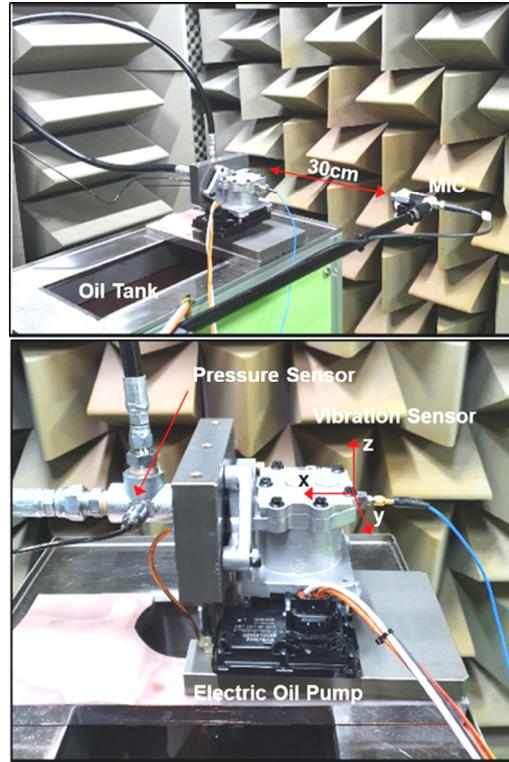


Photo. 1 Noise and vibration measurements in the anechoic room

통해 차체를 가진하여 실내에 소음을 방사하는 구조 기인(Structure-borne) 소음을 측정하기 3축 진동가속도 센서(PCB ICP HT356A33, 1.02 mV/(m/s<sup>2</sup>))을 전동식 오일 펌프 표면에 Photo 1과 같이 부착하였다. 자동변속기용 오일(ATF SP-4M)을 사용하였고, 오일 온도는 60 °C에서 수행하였다. 스트레인 게이지 타입(MNEBEA NS30T)의 유압센서를 펌프 토출 부에 장착하여 유압을 측정하였다.

펌프 구동 속도는 저속 주행 및 주차 시 주로 요구되는 1500 rpm(25 Hz)와 고속 주행 시 요구되는 3000 rpm(50 Hz)에서 실험을 수행하였다. 해당 펌프의 경우 3000 rpm의 펌프 구동이 요구되는 고속 주행 시에는 차량 주행 소음 및 엔진 소음에 비해 펌프 소음의 영향도는 작고, 오히려 저속 주행이나 주차 시 1500 rpm의 펌프 구동 소음이 운전자 귀에 거슬릴 수 있어 소음 저감이 더욱 요구된다.

Fig. 7은 일반 제어와 부등 피치 모사 제어 적용에 따른 펌프 유압 성능 및 소비 전류를 비교한 결과이다. 부등 피치 모사 제어 지령의 최대 크기를 정격 전류의 40%까지 키울 경우 유압 성능 10% 정도 저하됨을 알 수 있다. 유압 성능의 변화가 1% 이내 수준을 유지하도록 부등 피치 모사 제어 지령의 최대 크기를 정격 전류의 20% 수준으로 정하여 실험을 진행하였다.

Fig. 8은 제어 방식에 따른 펌프 유압 맥동 변화를 보여준다. 부등 피치 제어 형상 인자인 *B<sub>m</sub>*은 유압 맥동 측정

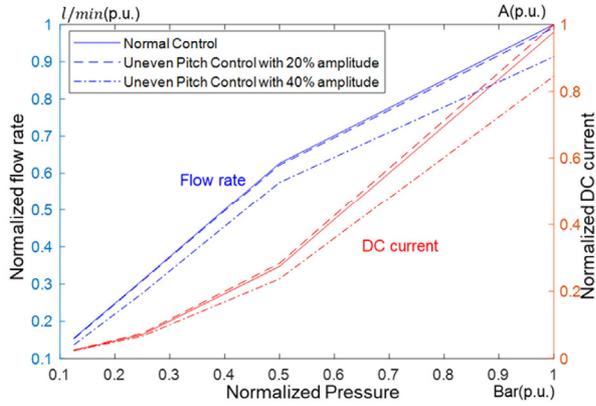


Fig. 7 Hydraulic performances according to the control methods

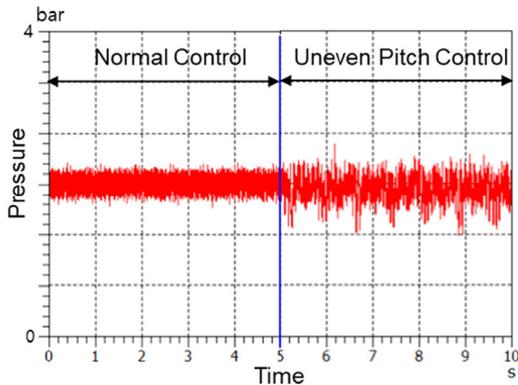


Fig. 8 Pressure fluctuation according to the control methods

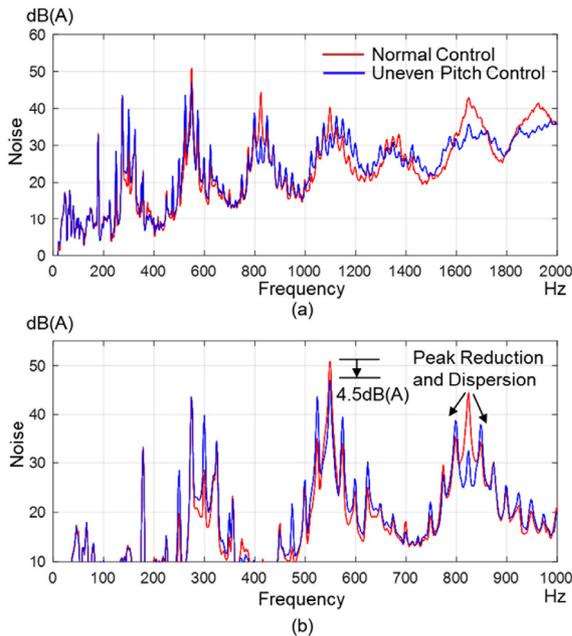


Fig. 9 Noise spectrum according to the control methods (1500 rpm)

결과로부터 유사한 맥동 폭을 가지도록 30으로 결정하여 적용하였다. 유압 맥동의 평균 값은 동일하지만 각 치의

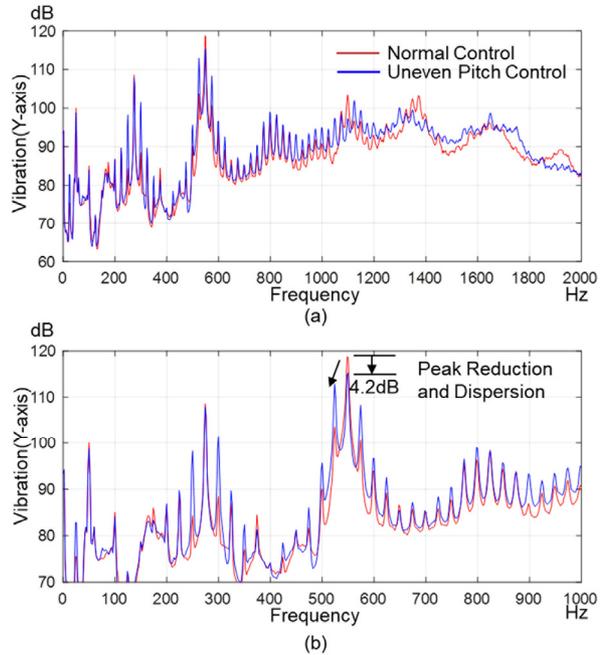


Fig. 10 Vibration spectrum according to the control methods (1500 rpm)

Table 2 Noise and vibration measurement results at 1500 rpm

	Noise [dB(A)]		Vibration [dB]	
	Overall	Max peak	Overall	Max peak
Normal control	58.2	52.0	134.0	118.1
Uneven pitch-simulated control	58.0	47.5	133.5	113.9

위치에 따라 균등하게 발생하는 일반 제어에 비해 부등 피치 모사 제어 적용 시 치 위치에 따라 가감되어 변화한다.

Figs. 9~11은 측정된 소음 및 진동의 주파수 스펙트럼 분석 결과이다. 일반 제어 시 회전수(25 Hz)와 치 개수(11)의 조합 주파수인 275 Hz의 차수 성분인 550 Hz, 825 Hz 주파수 대역의 피크가 지배적으로 발생하고 있다.

부등 피치 모사 제어 적용 시 550 Hz 및 825 Hz의 주파수의 소음이 감소된 것을 확인할 수 있다. 이에 반해 550 Hz, 825 Hz를 기준으로 회전 주파수인 25 Hz의 간격을 두고 분포한 525 Hz, 575 Hz와 800 Hz 및 825 Hz의 주파수 성분이 대칭적으로 증가되어 분산되는 경향을 확인하였다. 이는 각 치에 해당하는 부등 피치 모사 제어 지령치의 크기를 식 (4)와 같이 1회전 주기로 설정하였기 때문이고, 이 결과는 기계적으로 부등 피치를 식 (2)와 같이 적용한 선행 연구 결과와 동일한 경향임을 확인할 수 있다.<sup>3,4)</sup> 진동 측정 결과에서도 소음 측정 결과와 동일하게 550 Hz를 기준으로 대칭적으로 분산됨을 확인할 수 있다.

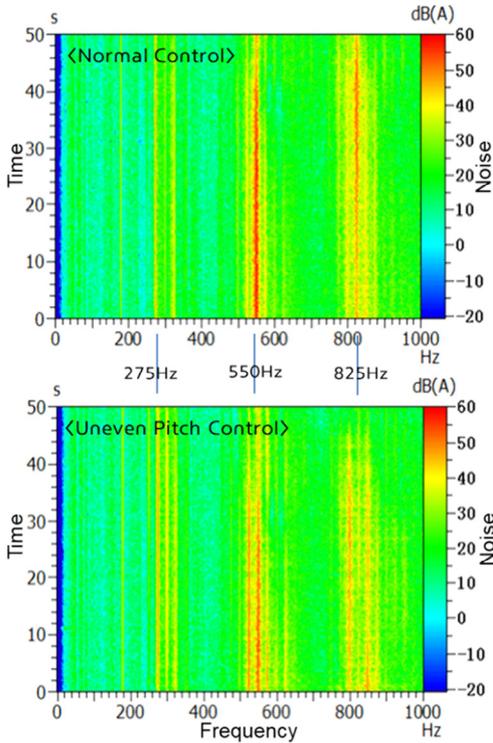


Fig. 11 Noise color map according to the control methods (1500 rpm)

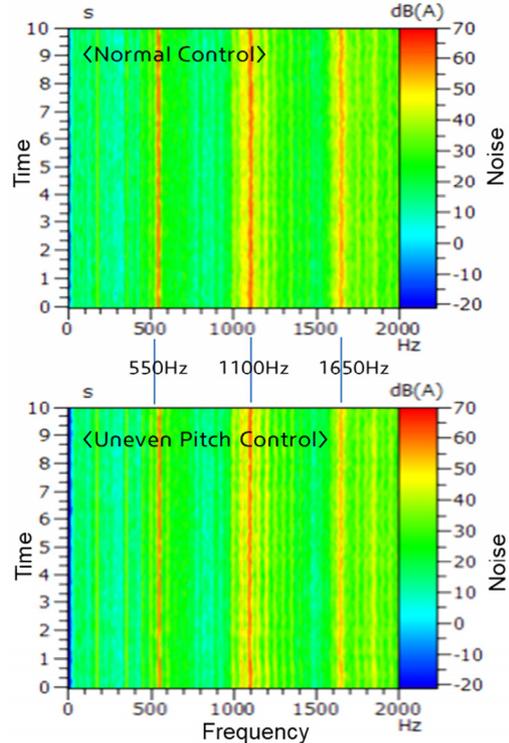


Fig. 13 Noise color map according to the control methods (3000 rpm)

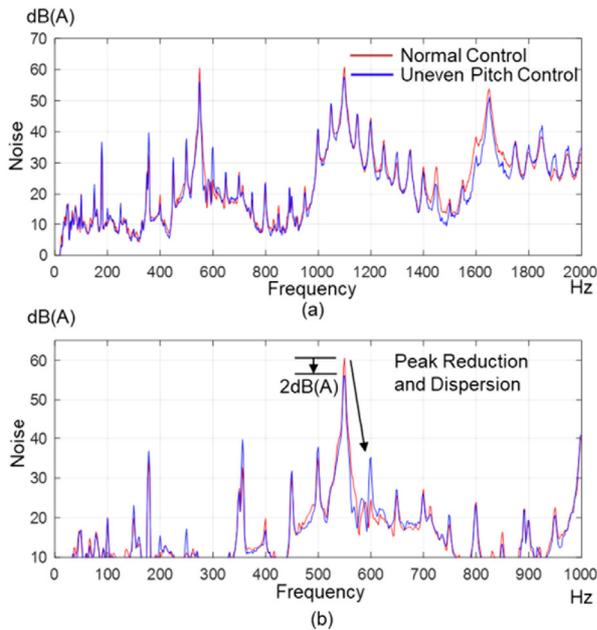


Fig. 12 Noise spectrum according to the control methods (3000 rpm)

Table 2에 정리한 것과 같이 부등 피치 모사 제어를 적용하면 소음의 최대 피크치는 4.5 dB(A) 감소하지만 전체 소음의 Overall 크기는 동등 수준을 유지하게 된다. 이는 부등 피치 적용 시 소음의 절대적인 감소 보다는 주파수 성분을 분산시켜 운전자의 귀에 덜 거슬리는 소음의 형

태로 바꾸는 역할임을 알 수 있다.

Fig. 12와 13은 3,000 rpm(50 Hz) 구동 시 소음의 주파수 스펙트럼 분석결과이다. 1,500 rpm 구동 조건에 비해 부등 피치 모사 제어 적용 시 550 Hz, 1100 Hz 차수 주파수의 피크 소음의 감소량은 2 dB(A)로 작지만 회전주파수 50 Hz 간격을 두고 대칭적으로 분산되는 경향성은 동일함을 확인할 수 있다. 부등 피치 모사 제어 지령치의 크기를 정격전류의 20%로 정하였기 때문에 부하 전류가 커질수록 부등 피치 모사 제어 적용 효과가 줄어들을 수 있다.

### 5. 결론

기계적인 부등 피치가 적용 불가능한 내접 및 외접기어 펌프 기반 전동식 오일 펌프의 모터 토크(전류)를 각 치(Tooth)의 위치 별에 따라 순시적으로 가변 하여 부등 피치를 적용한 것과 유사한 특성을 얻도록 하는 부등 피치 모사 제어 기법을 제안하였다.

부등 피치 모사를 위한 모터 전류 제어 지령치의 크기는 선행 연구 및 특허에서 기계식 부등 피치 적용을 위해 제안된 삼각함수 기반의 부등 피치 생성 함수로부터 결정하였고, 모터 전류 제어 지령의 형상은 펌프의 유압 맥동 분석으로부터 지수 함수 형태로 제안하였다. 최종적으로 제안된 부등 피치 모사 제어 지령치 생성 함수의 크기 및

형상 인자를 펌프 특성에 따라 조정하여 적용할 수 있다.

실제 변속기용 전동식 오일 펌프에 부등 피치 모사 제어 적용 시 일반 제어 대비 차수 주파수의 최대 피크치 감소 및 주파수 대역 분산 효과를 실험적으로 확인하였다.

제안된 방법은 전동식 오일 펌프의 전류 지령을 순시적으로 가변 하는 방법으로 전 속도 운전 영역에 적용하는 것 보다는 엔진 및 변속기 등 타부품과의 공진을 유발할 수 있는 차수 주파수의 피크치를 감소시키는 공진점 회피 등을 위한 특정 운전 영역에 국한하여 적용 시 효과적인 소음 저감을 기대할 수 있을 것이다.

## 후 기

이 논문은 2019~2020년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임.

## References

- 1) J. W. Chang and D. Y. Yoon, "Sensorless Starting Method and Fuel Pressure Control of BLDC Motor for Fuel Pump of Vehicle," Transactions of KSAE, Vol.21, No.2, pp.114-121, 2013.
- 2) T. Son, "Analytical Study on Inner Flow and Structural Stiffness in Vane Type of Vacuum Pump," Transactions of KSAE, Vol.25, No.2, pp.201-206, 2017.
- 3) K. -Y. Lee, U. -H. Jung, J. -H. Kim, C. -H. Kim, Y. -S. Choi, J. -H. Ma, K. -H. Jeong and W. -J. Park, "Analysis of Noise Characteristic of Uneven Pitch Regenerative Blower," Journal of Fluid Machinery, Vol.18, No.6, pp.71-75, 2015.
- 4) J. W. Jang, Y. -T. Hwang, Y. -S. Choi, K. -Y. Lee, U. -H. Jeong and M. Seiji, Random Pitch Impeller for Fuel Pump, United States Patent, US8092186B2, 2012.
- 5) S. Kim, W. -S. Choi, M. Kim, H. Kim and W. Lim, "Analysis of Fuel Economy of Mild Hybrid Vehicle by the Backward Simulation with Considering Power Loss of Oil Pump," Transactions of KSAE, Vol.26, No.4, pp.533-539, 2018.
- 6) C. Choi and W. Lee, "Improvement of Low Speed Sensorless Drive with Gain Attenuation and Delay Compensation of Measured Phase Voltage for Transmission Electric Oil Pump," Transactions of KSAE, Vol.27, No.10, pp.819-826, 2019.
- 7) C. Choi, J. Kang and W. Lee, "Improvement of Sensorless Drive with Varying Electric Motor Parameters for Transmission Electric Oil Pump at Lower Limit Temperature and Speed Region," Transactions of KSAE, Vol.27, No.12, pp.949-955, 2019.