

전동 지게차용 3상 유도 모터의 소음 진동 특성에 대한 연구

A Study on the Characteristic of Noise and Vibration in 3-phase Induction Motor for the Forklift

김 우 형*·정 진 태†

Woohyung Kim and Jintai Chung

(2008년 7월 22일 접수 ; 2008년 12월 4일 심사완료)

Key Words : Motor Noise(모터 소음), Electrical Forklift Motor(전동 지게차 모터), Magnetic Noise(자기 소음)

ABSTRACT

This paper presents the reduction of acoustic noise generated by electromagnetic force in an induction motor of the electrical forklift. After summarizing the electromagnetic excitation forces due to the interaction between the stator/rotor slot permeance and the stator winding magnetomotive force, the effects of the electromagnetic force on the noise and vibration of an induction motor are analyzed. In order to experimentally identify the noise sources of the motor, the signal analyses for noise and vibration are performed by using waterfall plots of noise and vibration spectrums. It is found that severe noise and vibration are caused by the electromagnetic force when the mode number of the excitation shape for a stator is low. Furthermore, it is verified that the motor noise is amplified if the excitation frequency of the electromagnetic force coincides with one of the natural frequencies of the stator. It is experimentally demonstrated that this severe noise can be considerably reduced by structure modifications. Finally, some design guidelines are suggested to develop an induction motor with a low level of noise.

1. 서 론

대형 물류 산업이 발전하면서 전동 지게차의 수요는 증가되고 있으며, 주로 실내에서 사용되기 때문에 전동 지게차의 소음은 제품의 품질 결정 및 환경 오염을 유발하여 관심이 커지고 있다. 전동지게차에서 발생하는 일반적인 소음은 모터와 구동축으로 구성되는 구동계에서 주로 발생되며⁽¹⁾, 모터 특성에 따라 구동계의 소음의 경향도 변하게 된다. 전동지게차는 모터의 동력으로부터 지게차의 주행과 리프트 용적특성이 결정된다. 지게차의 성능을 높이

기 위해서는 모터의 성능을 향상시켜야 하기 때문에, 모터의 소음 진동 특성은 중요시 되고 있다. 전동 지게차는 제어 특성이 쉬운 DC 모터를 주로 사용하였지만 높은 제조 단가 및 낮은 출력 때문에 AC 모터로 바뀌어 가고 있다. AC 모터는 DC 모터에 비해 구조가 간단하여 제조 단가가 낮은 장점이 있으나 높은 출력을 위해 전기적인 특성을 높여서 모터를 설계하게 되면 예기치 못한 소음 및 진동이 발생하게 되고 이는 지게차 구동계에 영향을 주게 된다. 특히 모터를 설계할 때 기본적인 성능을 위해 전기적인 특성만을 고려하여 기계적인 특성을 충분히 고려하지 못하게 된다. 전자기적인 현상에 의해서 모터는 작동하지만 회전자의 운동은 기계적인 특성이기 때문에 복잡한 상호 작용에 의해 소음 및 진동이 발생하게 된다.

모터에서 발생하는 소음은 크게 세 가지로 구분

† 교신저자; 정희원, 한양대학교 공학대학 기계공학과
E-mail : jchung@hanyang.ac.kr

Tel : (031)400-5287, Fax : (031)406-6964

* 한양대학교 일반대학원 기계공학과

할 수 있는데 기계적인 원인과 공기 역학적 원인 그리고 전자기적 원인에 의한 것이다⁽²⁻⁵⁾. 기계적인 특징은 베어링에 의해 발생하는 것이며, 공기 역학적

인 것은 회전자의 유동과 회전자에 의한 팬의 공력 소음이고, 전자기적 원인은 고정자와 회전자의 슬롯 고조파에 의해 발생하는 소음이다. 모터에서 주요 소음은 회전자의 회전에 의해 발생하는 슬롯에 기인하는 고조파에 의해 발생한다⁽⁶⁾. 게다가, 모터의 회전 고조파와 시스템의 고유진동수가 공진을 유발할 경우 더욱더 큰 소음 및 진동을 발생하게 된다.

이 연구의 목적은 전동 지게차용 3상 유도 모터 (Fig. 1)의 소음 및 진동 특성을 분석하고, 저소음 저진동 모터를 설계 할 수 있는 기술을 확보하는 것이다. 전동 지게차에서 모터로부터 발생하는 소음 및 진동의 정도를 측정 할 것이다. 시스템에서의 모터 특성을 분석 후에 단품에 대한 실험으로 모터에서 발생 할 수 있는 소음 및 진동의 기여인자를 규명할 것이다. 실험을 통해 규명 모터의 소음 및 진동은 전기적, 기계적, 전기와 기계의 상호작용에 의해서 발생할 것이다. 모터의 회전자와 고정자에 의해 소음 및 진동으로 유발 될 수 있는 고조파의 성분을 유추할 것이다. 회전자의 회전력에 의해 모터의 기계적인 공진이 발생 할 수 있기 때문에 고정자



Fig. 1 Electrical forklift and 3-phase induction motor

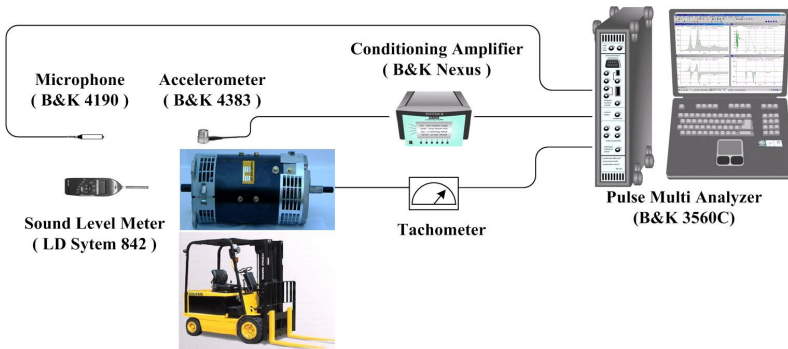


Fig. 2 Experiment setup for a signal test

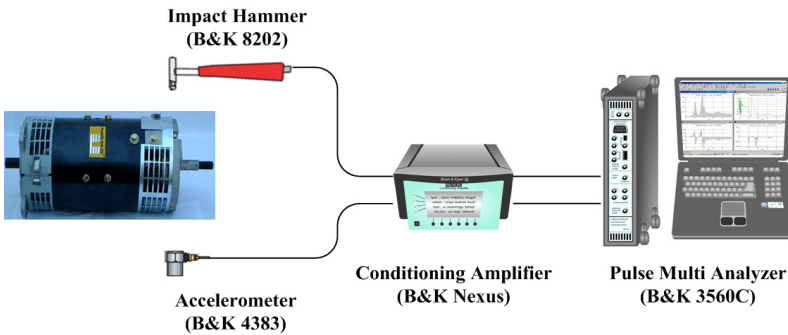


Fig. 3 Experiment setup for an impact test

에 대한 고유진동수 및 고유모드 측정하고 전자기적인 힘이 기계적인 특성과의 상호작용으로 소음 및 진동을 유발할 수 있는지를 분석할 것이다. 지게차 시스템과 모터 단품에서의 실험적 결과와 이론적으로 발생할 수 있는 소음 및 진동의 인자를 비교하여 저소음 저진동 모터를 설계할 수 있는 방안을 강구할 것이며, 개선 사항을 토대로 모터의 소음 진동 특성을 시험할 것이다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 Signal Test

신호분석은 알려지지 않은 가진 입력에 대해 시스템의 응답을 측정하여 이를 해석하는 방법이다. 전동 지게차를 주행하면서 발생하는 소음 및 진동의 고조파 및 공진을 분석할 것이며, 모터 단품을 일정 rpm에 대한 소음 진동 스펙트럼을 분석하면서 가진 원 분석을 수행하는데 사용된다. 진동/소음 신호와 구동축의 회전 속도 신호를 타코미터(tachometer)를 이용하여 동기화 시키면 좀더 정확한 실험을 수행할 수 있다. 실험 장치도는 Fig. 2와 같다.

2.2 Impact Test

모터 구조물의 고유진동수와 고유 모드를 측정하기 위해 시스템 분석법을 이용한다. 충격해머(impact hammer)를 이용하여 부품에 가진하고 가속도계(accelerometer)를 이용하여 가진에 대한 응답을 측정하여 진폭 및 위상정보를 이용하여 동특성을 구한다. 실험 장치도는 Fig. 3과 같다.

3. 실험 결과

3.1 전동 지게차 주행시험

전동 지게차를 정지 상태에서부터 최고 속도까지 주행하면서 운전자의 헬멧 위치에 마이크를 설치하여 소음의 신호분석 실험을 수행하였다(Fig. 4). 지게차의 주행중에 발생하는 고조파를 분석하기 위하여 차수분석(order analysis)을 시행하였으며 주요 고조파는 42차와 50차 성분이 주요 성분이라는 것을 알 수 있다. 전동 지게차는 Fig. 5와 같이 모터의 동력을 다단 기어박스로 전달하여 구동하게 되며, 기어 박스의 구동축에 의해 42차의 기어 가진 주파수(gear mesh frequency, GMF)를 가지고 있는 것

을 알 수 있고 50차 성분은 모터에서 발생하는 것이라 추정할 수 있다.

3.2 모터 단품 시험

전동 지게차의 주행시험으로 모터로부터 발생하는 50차수가 주요 소음 고조파인 것을 도출하였으며, 모터 단품 시험을 통하여 문제시 되는 고조파를 분석하였다. 모터를 무 부하상태의 자유 경계 조건에서 소음 및 진동 시험을 시행하였으며 그 결과는 Fig. 6과 같다. 단품 시험에서는 모터 회전자의 회전수에 대하여 소음 및 진동량 시험(overall analysis), 스펙트럼 분석(spectrum analysis, waterfall)을 시행하였다. 진동량 시험 그래프의 가로 축은 모터의 회전 rpm을 나타내며, 세로 축은 소음과 진동의 크기를 나타낸다. 스펙트럼 분석 그래프의 가로 축은 주파수(Hz), 경사 축은 모터의 회전 rpm, 세로 축은 소음 및 진동의 크기를 나타낸다.

단품 시험 모터는 3상 AC유도 모터로써, 44개의 회전자와 50개의 고정자 및 6극 모터이며 4,500 rpm의 정격 속도를 가지고 있다. 회전자의 회전수를 증

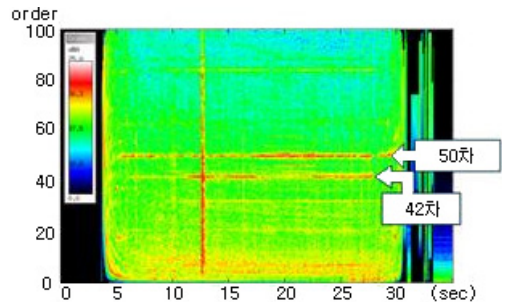


Fig. 4 Order analysis plot of driving test

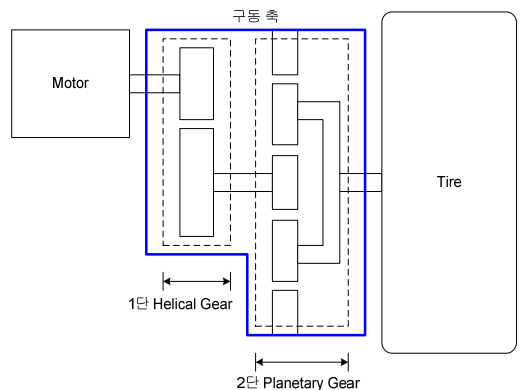
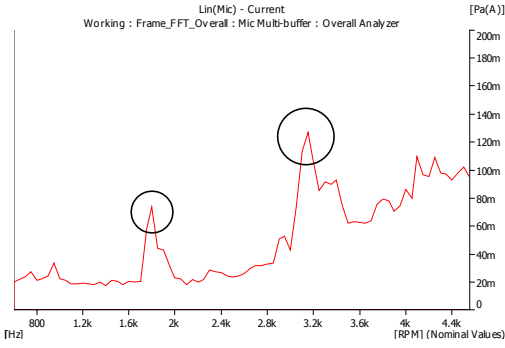
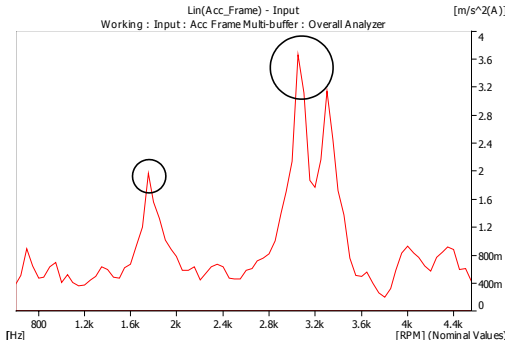


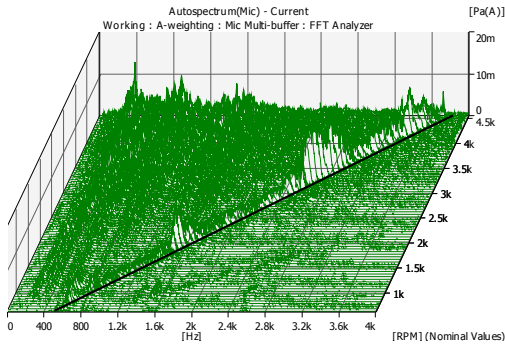
Fig. 5 Schematic of the electrical forklift axle



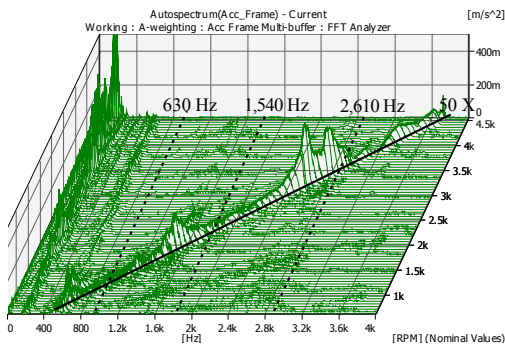
(a) Overall data of the noise



(b) Overall data of the noise and vibration



(c) Waterfall plot of the noise spectrum



(d) Waterfall plot of the vibration spectrum

Fig. 6 Motor test result

가시킴으로써 소음 및 진동량을 분석한 결과 약 1,800 rpm과 3,200 rpm에서 소음 및 진동의 증폭이 나타났다(Fig. 6(a), (b)). 모터 회전자의 각 일정한 회전 속도에 대하여 600 rpm부터 4,550 rpm까지 50 rpm 씩 속도를 증가시키면서, 스펙트럼 분석을 한 결과 소음 신호와 진동 신호에서 동일하게 50차수 주요 고조파가 발생하는 것을 확인 할 수 있다(Fig. 6(c), (d)). 모터에서 발생하는 고조파는 630 Hz, 1,540 Hz, 2,610 Hz에서 공진현상이 발생하는 것을 확인 할 수 있으며, 이는 소음 신호와 진동신호 모두 동일한 경향을 보이고 있다. 특히 1,540 Hz와 2,610 Hz에서의 신호 증폭은 각각 overall 분석의 1,800 rpm(30 Hz)과 3,200 rpm(53 Hz)에서 신호 증폭과 관련이 있음을 알 수 있다. 이는 모터의 회전자의 속도가 50차수의 영향을 받아 약 1,500 Hz와 2,600 Hz와 공진하여 발생하는 것으로 보인다.

3.3 모터 고정자의 충격 햄머 시험

모터의 단품 시험의 신호분석 결과 모터에서 발생하는 주요 소음 및 진동은 구조적인 공진에 의해 발생하는 것을 알 수 있다. 이를 검증하기 위하여 Fig. 7과 같이 모터에서 고정자만을 분리하여 충격 햄머 실험을 수행하였다. 모터의 고정자의 고유진동수와 모드형상을 규명하기 위해 반경방향으로 격자모양 그리고 각 위치에서의 주파수 응답함수(frequency response function)를 측정하였다(Fig. 7). 이 연구 대

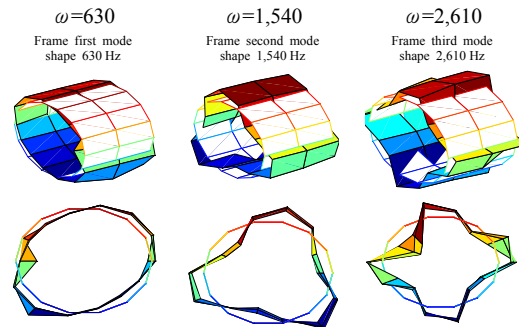
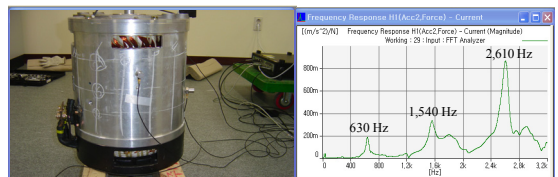


Fig. 7 Impact test and mode shape

상의 모터는 약 4,500 rpm까지 회전하며 주요 관심 고조파가 50차수 이므로 충격 햄머 실험은 3,200 Hz까지 측정하였으며, 모터 고정자의 고유진동수는 630 Hz, 1,540 Hz, 2,610 Hz가 측정되었다.

4. 소음 원인 분석

4.1 자기 소음

이 연구 대상의 모터는 3상 AC 유도 전동모터로 회전자는 농형으로 구성되어 있으며 고정자의 슬롯은 54, 회전자의 슬롯은 44 모터의 극수는 6극 모터이다(Fig. 8). 모터로부터 발생하는 자기 소음은 고정자의 회전자계에 의한 고정자와 회전자 사이의 힘의 변화에 의해 발생하게 되고 회전자계 변화의 조화성분이 포함되게 된다. 고정자와 회전자의 공극의 자속밀도의 제공에 비례하여 고정자의 코어가 변형하게 되며 모터에서 발생하는 자기력의 주파수가 고유진동수와 일치하면 공진이 발생하여 큰 소음을 유발한다. 모터의 크기와 극수가 회전자와 고정자의 슬롯 수를 결정하며, 회전자와 고정자의 슬롯 수가 자기소음의 주파수를 결정하게 된다.

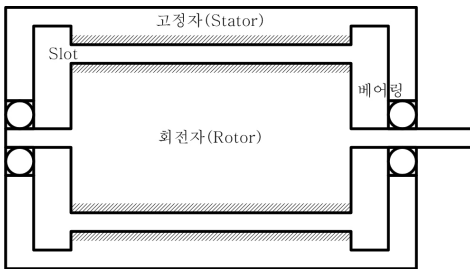


Fig. 8 Schematic of the induction motor

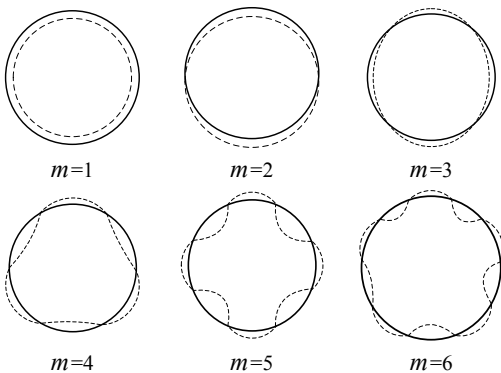


Fig. 9 Mode number and shapes

반경방향의 자기력은 공극의 자속밀도의 제공에 비례하며 단위면적당 다음 식으로 표현할 수 있다⁽⁷⁾.

$$p(\phi, t) = \frac{b^2(\phi, t)}{2\mu_0} \quad (1)$$

$b(\phi, t)$: 자속 밀도

μ_0 : 투자율

반경방향의 자기력의 고정자와 회전자의 조합으로 다양한 고조파가 발생하게 되며 다음과 같다.

고정자에서 발생하는 고조파 S

$$\text{고정자 슬롯에 의한 고조파: } S_{slot} = p + mZ_s$$

$$\text{자기포화에 의한 고조파: } S_{sat} = 3p + mZ_s$$

$$\text{편심에 의한 고조파: } S_{ecc} = p \pm 1 + mZ_s$$

회전자에서 발생하는 고조파 R

$$\text{회전자 슬롯에 의한 고조파: } R_{slot} = p + mZ_s + nZ_r$$

$$\text{자기포화에 의한 고조파: } R_{sat} = 3p + mZ_s + nZ_r$$

$$\text{편심에 의한 고조파: } R_{ecc} = p \pm 1 + mZ_s + nZ_r$$

Z_r, Z_s : 회전자 및 고정자 슬롯 수

p : 극수

m, n : 임의의 정수 ($0, \pm 1, \pm 2, \dots$)

4.2 기계적 특성

모터 고정자의 슬롯, 회전자의 슬롯과 극수에 의한 전자기적인 힘에 의해 가진 하는 모드형상은 Fig. 9와 같다. 모드형상의 모드수는 $m = |Z_s - Z_r| - p$ 과 같이 계산되며, 일반적으로 기계적인 특성과 공진을 유발하지 않기 위해서는 큰 모드수를 갖도록 모터를 설계해야 한다⁽³⁾. 모터의 고정자는 원통형상으로 가정하였을 때 Fig. 9와 같은 형상으로 진동을 할 경우, 각 모드 형상에 대하여 고유진동수를 가지고 모드 수가 높아질수록 고유진동수는 커지게 된다. 전자기적인 특성에 의해 가진되는 모드 형상과 고정자의 구조적인 특성을 나타내는 고유진동수와 일치하게 되면 모터에서 공진이 발생하여 큰 진동과 소음이 발생하게 된다. 그러므로 모터를 설계할 때 가능한 전자기적인 성질에 의해 발생하는 모드수를 높여서 모터와 구조적인 공진이 발생하지 않도록 하는 것이 바람직하다.

모터의 회전자는 자기력에 의하여 회전하는 회전

체이므로 정렬상태가 소음 및 진동에 중요하게 작용하게 된다. 또한 질량 불평형을 최소화하는 것이 중요한데 이를 위해 회전자의 정적 밸런싱(static balancing) 및 동적 밸런싱(dynamic balancing)을 통해 안정된 운동을 유도할 수 있다.

5. 저소음 개선안 도출 및 검증 실험

5.1 저소음 개선안

이 연구의 대상인 모터는 회전자의 슬롯 44개 고정자의 슬롯 54개 및 6극 모터로 다음의 조합으로 고조파가 발생하였다. 회전자의 슬롯과 고정자의 슬롯 및 극수의 조합에 의해 지게차 주행 시험 및 단품 시험을 통해 도출된 50차수를 규명 할 수 있고 관계식은 다음과 같다.

$$R_{slot} = p + mZ_s + nZ_r = 6 + 0 \times 54 + 1 \times 44 = 50$$

회전자의 고조파 관계식을 통해 모터의 소음 및 진동 발생의 회전 차수를 규명 되었으며 고정자와 회전자의 슬롯 개수를 개선하여 주요 가진원을 변경할 수 있을 것이다.

모터의 단품 시험 결과 630 Hz, 1,540 Hz, 2,610 Hz에서 공진이 발생하였으며, 각 고유 진동수의 모드수는 2,3,4의 모드 형상이다. 모터의 슬롯과 극수에 의한 모드수 조합은

$$m = |Z_s - Z_r| - p = |54 - 44| - 6 = 4$$

이므로 4차 모드인 2,610 Hz에서 가장 큰 공진이 발생하는 것을 Fig. 6을 통해 알 수 있다.

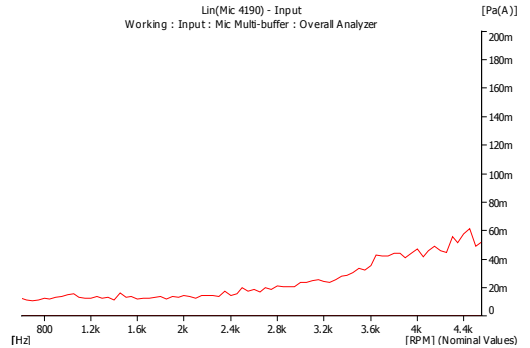
모터의 주요 소음 및 진동 가진원과 전자기력에 의한 공진을 보면 회전자의 특성을 변경시킴으로써 저소음 및 저진동의 효과를 볼 것이다. 전자기적인 특성에 의해 발생하는 고조파와 모드수를 변경하기 위해, 모터의 설계 특성을 고려하여 회전자의 슬롯을 44개에서 38개로 변경하였다. 설계 변경에 의해 모터의 주요 회전 차수는 50차에서 44차로 변하였고, 모드수는 $m=4$ 에서 $m=10$ 으로 변화시킴으로써 전자기적인 가진에 의한 공진을 회피 할 수 있을 것이다.

5.2 개선안 검증 실험

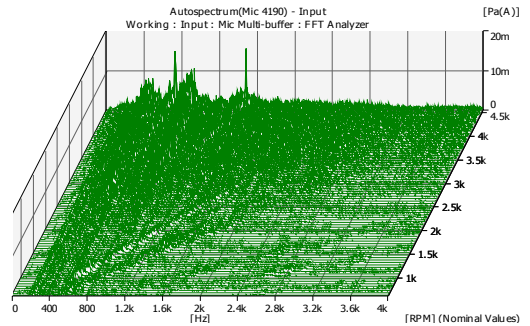
고정자의 슬롯 54개, 회전자의 슬롯 44개 및 6극

의 3상 유도 모터에 대하여 회전자의 슬롯을 38개로 변경하여 실험한 결과는 Fig. 10과 같다. 개선 전과 개선 후 모터의 소음량을 비교해보면(Fig. 10(a)) 개선 전의 1,800 rpm과 3,200 rpm에서 발생했던 회전수의 증가에 대한 이상 증폭이 사라진 것을 알 수 있다. 이는 모터 시스템이 회전수의 증가에 따른 가진력의 증가로 소음의 크기가 비례하여 증가하는 것을 알 수 있으며, 특정 회전수에 대한 소음 증폭은 일어나지 않는 것을 알 수 있다.

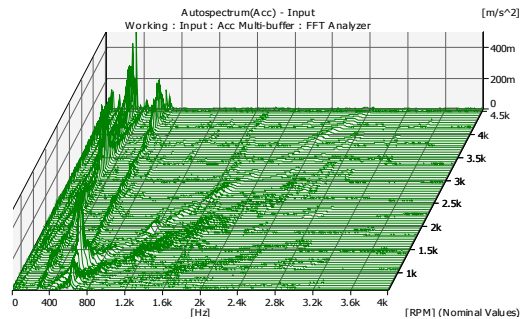
개선 모터의 스펙트럼은(Fig. 10(b), (c)) 모터의



(a) Overall data of the new type motor



(b) Waterfall plot of the noise spectrum



(c) Waterfall plot of the vibration spectrum

Fig. 10 Modified motor test result

구조적인 공진이 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 이는 회전자의 슬롯을 변경함으로써 전자기력에 모드 수를 $m=4$ 에서 $m=10$ 으로의 변경에 의해 고정자의 고유진동수와 공진을 유발하지 않기 때문에 안정적인 구동을 하고 있다는 것을 알 수 있다. 또한, 개선 전 모터의 지게차 시험 및 단품 시험에서의 주요 회전 차수인 50차수(Fig. 6)는 회전자의 슬롯의 변경으로 모터의 주요 회전 차수가 변한 것을 실험 결과로 알 수 있다.

6. 결 론

전동 지게차용 3상 유도 전동 모터가 구동하면서 발생하는 주요 가진원 회전자에 의한 고조파에 의해 주로 발생하는 것을 알 수 있다. 일반적으로 모터에서는 회전자, 고정자, 회전자와 고정자의 상호작용에 의해서 많은 고조파가 발생하지만 소음 및 진동에 영향을 주는 고조파는 회전자가 회전운동을 하면서 발생하는 전자기력의 고조파에 의해 주로 발생하는 것을 알 수 있다. 또한, 모터에서 발생하는 공진 현상은 단순한 회전자의 회전에 의해 발생하는 기계적인 공진이 아니라, 회전자와 고정자의 슬롯과 극수의 상관관계에 의해 발생하는 전자기의 모드 형상과 전자기적인 힘에 의해 발생하는 고조파와 공진한 것을 알 수 있다. 전자기적 모드 형상의 수가 낮을 경우 모터의 기계적인 공진 주파수의 모드 수와 만나 소음 및 진동이 크게 증폭되는 것을 알 수 있다.

저소음 및 저진동 모터를 설계하기 위해서는 고정자와 회전자 및 극수에 따른 고조파에 대한 분석을 회전자의 관점에서 분석해야 할 것이며 공진을 회피하기 위해서는 전자기적 모드 형상의 모드 수를 높여서 공진을 회피해야 할 것이다.

후 기

이 논문은 2008년도 2단계 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음

참 고 문 헌

- (1) Kim, W. H., Hong, I. H. and Chung, J. T., 2008, "A Study on Noise Reduction for the Driving System of a Forklift," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 1, pp. 80~86.
- (2) Nau, S. L. and Mello, H. G. G., 2000, "Acoustic Noise in Induction Motors: Causes and Solutions," IEEE, pp. 253~263.
- (3) Finely, W. R., 1991, "Noise in Induction Motors-cause and Treatments," IEEE, Vol. 27, No. 6, pp. 1204~1213.
- (4) Song, J. S. and Kim, K. J., 2000, "Analysis on Noise of Automotive Alternator Considering the Number of Stator Slots," Journal of the KSME, Vol. 24, No. 1, pp. 126~133.
- (5) Chung, J. T., Suh S. J. and Eun H. J., 1989, "Identification of Noise Characteristics of an Automobile Alternator," Journal of the KSME, Vol. 13, No. 1, pp. 40~47.
- (6) Yang, S. J., 1981, "Low-noise Electrical Motors," Clarendon Press, Oxford, pp.15~48.
- (7) Timar, P. L., 1989, "Noise and Vibration of Electrical Machines," Elsevier, Amsterdam, pp. 27~87, pp. 105~113.