

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

김우형† · 정진태*
Woohyung Kim and Jintai Chung

Key Words : Motor noise(모터 소음), Electrical forklift motor(전동 지게차 모터), Magnetic noise(자기 소음)

ABSTRACT

This paper is studied the noise and vibration characteristics analysis of the three-phase induction AC motor of the electrical forklift. And we suggest the method which the reduction orders the noise and vibration to be the mechanical. In other to investigate these characteristics, we considered the mechanical characteristics, the electromagnetic effects, and these interactions. In mechanical, we studied the characteristic of the stator, the bearing supported condition of the rotor, and the sound radiation. In electronically, this paper is considered the harmonic effect which is related the magnetic motive force (mmf) with respect to the characteristic of the slot number of the rotor and the stator and the pole number of the motor. Finally we investigated the overall noise and vibration of the induction motor by relations between the electronically harmonic and the mechanical resonance of the stator. By the analysis of the generally three-phase induction motor, we suggest the design methodology to low noise and vibration.

1. 서론

대형 물류산업이 발전하면서 전동 지게차의 수요는 증가하고 있으며, 일반적인 엔진 지게차와 달리 주로 실내에서 사용되기 때문에 지게차에서 발생하는 소음은 제품의 품질 및 작업자에게 영향으로 관심이 높아지고 있다. 전동 지게차에서의 소음은 모터와 구동축으로 구성되는 구동계에서 주로 발생되며, 특히 모터의 특성에 따라서 구동계의 소음 경향이 변하게 된다. 지게차는 많은 짐을 옮겨야 하기 때문에 큰 힘이 요구된다. 기어박스를 통해 큰 토크를 발생 시킬 수 있겠지만 기본적으로 모터에서 큰 출력과 빠른 회전수가 지게차의 성능을 결정하기 때문에 모터의 성능은 점차적으로 높아지고 있다.

전동 지게차에서는 AC 모터와 DC 모터가 모두 사용되며, 이전에는 제어 특성이 쉬운 DC 모터를 주로 사용하였지만 높은 제조 단가 및 낮은 출력 때문에 점차 AC 모터로 바뀌어 가고 있다. AC 모터는 DC 모터에 비해 구조가 간단하여 낮은 제조단가의 장점이 있으나 높은 출력을 위해 전기적인 특성을 높여서 모터를 설계하게 되면 예기치 못한 소음 및 진동이 발생하고 이는 지게차 구동계에 영향을 주게 된다. 특히 모터를 설계할 때 기본적인 성능을 위해 전기적인 특성만을 고려하기 때문에 많은 문제가 발생하게 된다. 전자기적인 효과에 의해서 모터는 작동하지만 구동계에서

의 운동은 기계적인 특성이기 때문에 복잡한 작용에 의해 소음 및 진동이 발생하게 된다.

본 연구의 목적은 전동 지게차용 3상 유도 모터의 소음 및 진동 특성을 분석하고, 저소음 저진동의 모터를 설계 할 수 있는 기술을 확보하는 것이다. 이를 위해 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 진동 인자를 추출 할 것이다. 실험을 통하여 추출된 모터의 소음 인자는 전기적, 기계적, 전기와 기계의 복합적인 영향에 의해서 발생할 것이다. 모터의 설계 인자인 회전자와 고정자에 의해 발생 할 수 있는 전자기적인 힘을 분석하고, 소음 및 진동으로 유발 될 수 있는 고조파의 성분을 유추할 것이다. 또한, 모터는 회전자의 운동에 의해서 동력이 전달되고 모터의 구조적인 특징에 의해 증폭이 될 수 있기 때문에 고정자와 케이스 및 베어링의 기계적인 특징을 분석 할 것이다. 마지막으로 전기적인 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

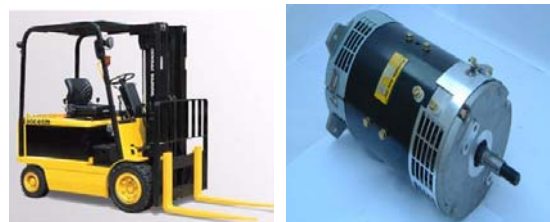


Fig. 1 Electrical forklift and 3-Phase Induction Motor

† 김우형: 한양대학교 일반대학원 기계공학과

E-mail : woohyung@hanyang.ac.kr

Tel : (031) 501-4590, Fax : (031) 406-6964

* 한양대학교 기계공학과

방안을 강구할 것이며, 개선사항을 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 rpm 에 대한 소음 진동 스펙트럼을 분석하면서 가진원 분석을 수행하는데 사용된다. 진동/소음 신호와 구동축의 회전 속도 신호를 타코미터(tachometer)를 이용하여 동기화 시키면 좀 더 정확한 실험을 수행할 수 있다. 실험 장치도는 Fig. 2 와 같다.

2.2 Impact Test

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

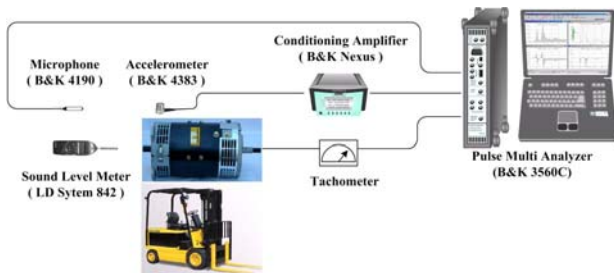


Fig. 2 Experiment setup for a signal test

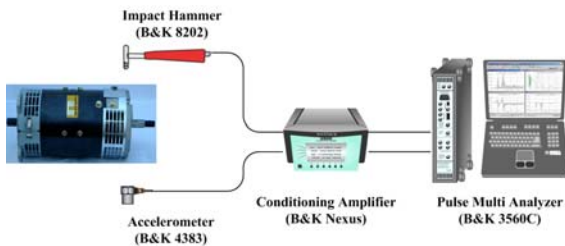


Fig. 3 Experiment setup for an impact test

3. 실험 결과

3.1 전동 지게차 주행시험

전동 지게차를 정지 상태에서부터 최고 속도까지 주행하면서 운전자의 헬멧 위치에 마이크를 설치하여 측정한 소음 결과이다. 전동 지게차의 소음 및 진동 특성에 대한 그래프는 Fig. 5 와 같다. Waterfall plot 을 통해 지게차의 속도가 증가하면서 특성 성분이 두드러진 것을 알 수 있다. 지게차에서 발생하는 고조파를 분석하기 위하여 order analysis 를 시행하였으며 주요 고조파는 42 차와 50 차 성분이 주요 성분이라는 것을 알 수 있다. 전동 지게차는 Fig. 4 와 같이 모터의 동력을 단단 기어박스로 전달하여 구동하게 되며, 기어 박스의 구동축에 의해 42 차의 기어 가진 주파수(Gear mesh frequency, GMF)를 가지고 있는 것을 알 수 있고 50 차 성분은 모터에서 발생하는 것이라 추정할 수 있다.

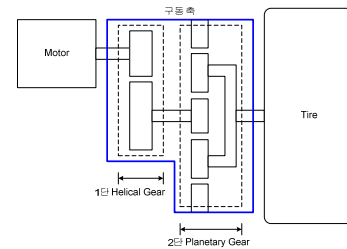
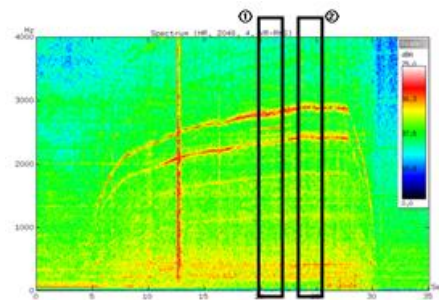
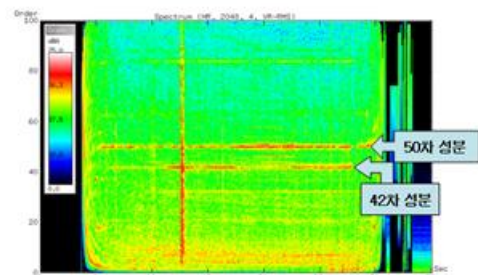


Fig. 4 Schematic of the electrical forklift axle

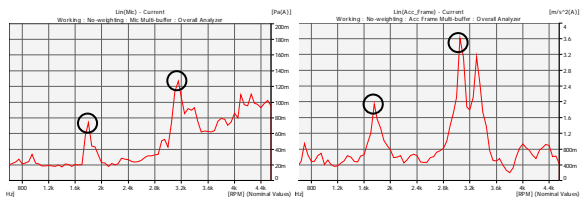


(a) Waterfall plot

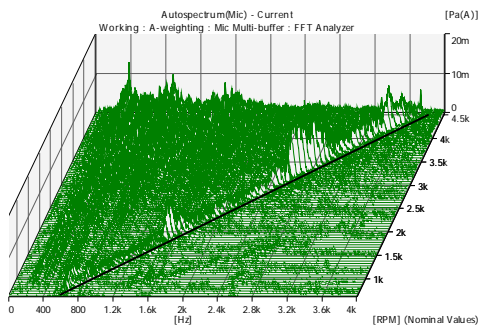


(b) Order analysis plot

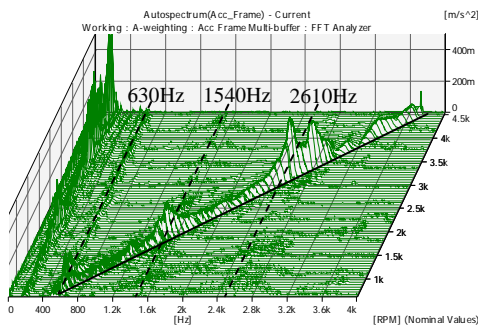
Fig. 5 Driving test result



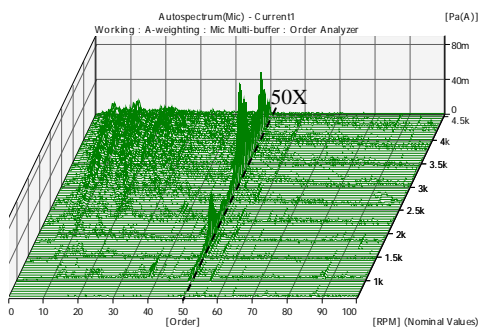
(a) Overall data of the noise and vibration



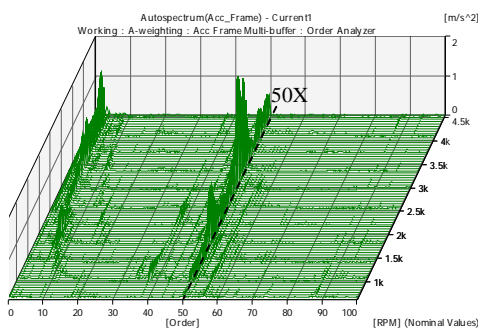
(b) Waterfall plot of the noise spectrum



(c) Waterfall plot of the vibration spectrum



(d) Order plot of the noise spectrum



(e) Order plot of the vibration spectrum

Fig. 6 Motor test result

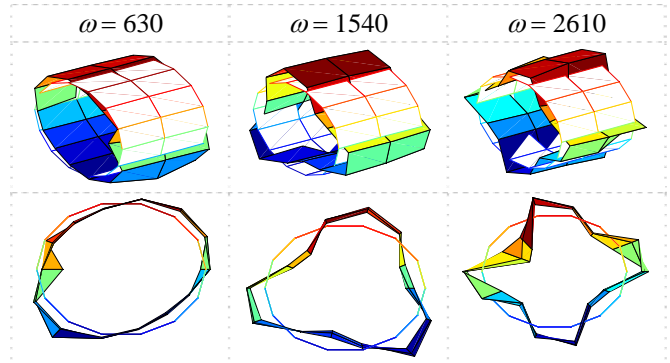
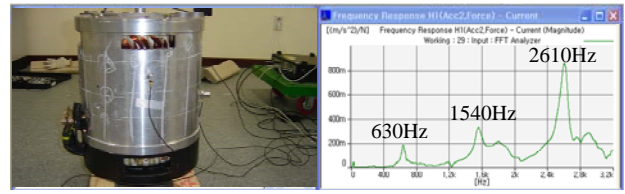


Fig. 7 Impact test and mode shape

3.2 모터 단품 시험

전동 지게차의 주행시험으로 모터로부터 발생되는 50 차수의 문제를 도출하였으며 모터 단품 시험을 통하여 문제시 되는 고조파를 분석하였다. 모터를 무 부하상태의 자유 경계 조건에서 소음 및 진동 시험을 시행하였으며 그 결과는 Fig. 6 과 같다. 전동 지게차의 주행시험과 다르게 시험의 제약 조건이 적기 때문에 회전수에 대한 소음 및 진동량 시험(Overall analysis), 스펙트럼 분석(Spectrum analysis, Waterfall) 및 회전차수 분석(Order analysis)을 시행하였다.

회전수를 증가시키면서 소음 및 진동량을 분석한 결과 약 1800rpm 과 3200rpm 에서 소음 및 진동의 증폭이 나타났다. (Fig. 6-(a)) 스펙트럼 분석과 회전차수 분석을 통해 모터에서 50 차수가 두드러지게 큰 진폭을 가지고 있음 알 수 있고, 스펙트럼 분석에서는 630Hz, 1540Hz, 2610Hz 에서 소음 신호와 진동신호 모두 공진을 하고 있음을 알 수 있다.

전동 지게차의 주행 시험과 모터의 단품 시험 결과 모터의 50 차수가 지게차 시스템에 주요하게 문제를 일으키는 것을 알 수 있으며, 또한 이는 소음 및 진동 신호에서 공진이 발생하여 그 크기를 증폭시킨다.

3.3 모터 고정자의 충격 햄머 시험

모터의 단품 시험의 스펙트럼 분석 결과 모터는 소음 및 진동 신호에서 구조적인 공진이 발생

하는 것을 알 수 있다. 이를 검증하기 위하여 Fig. 7 과 같이 충격 햄머 실험을 수행하였다. 모터의 고정자의 반경방향으로 격자모양을 각 위치에서의 주파수 응답함수(Frequency response function) 을 구하고 위상과 크기 정보를 통하여 모드형상을 도시하였다. (Fig. 7) 본 연구 대상의 모터는 약 4500rpm 까지 회전하며 주요 관심 고조파가 50 차수 이므로 충격 햄머 실험은 3200Hz 까지 측정하였으며, 모터 고정자의 고유진동수는 630Hz, 1540Hz, 2610Hz 가 측정되었다. 이는 링의 2 차, 3 차, 4 차 모드 형상을 나타내고 있다.

4. 소음 원인 분석

4.1 자기 소음

본 연구 대상의 모터는 3 상 AC 유도 전동모터 로 회전자는 농형으로 구성되어 있다. (Fig. 8) 고정자의 슬롯은 54, 회전자의 슬롯은 44 모터의 극수는 6 극이다.

모터로부터 발생하는 자기 소음은 고정자의 회전자계에 의한 고정자와 회전자 사이의 힘의 변화에 의해 발생하게 되고 회전자계 변화의 조화성분이 포함되게 된다. 고정자와 회전자의 공극의 자속밀도의 제곱에 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.

반경방향의 자기력은 공극의 자속밀도의 제곱에 비례하며 단위면적당 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\sigma(\phi, t) = \frac{B^2(\phi, t)}{2\mu_0}$$

$B(\phi, t)$: 자속 밀도, μ_0 : 투자율

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

고정자에서 발생하는 고조파

고정자 슬롯에 의한 고조파: $S_{stor}=p+mZ_s$

자기포화에 의한 고조파: $S_{sar}=3p+mZ_s$

편심에 의한 고조파: $S_{ecc}=p\pm 1+mZ_s$

Z_r : 회전자 슬롯 수, Z_s : 고정자 슬롯 수, p : 극수, m : 임의의 정수 (0, ± 1 , ± 2 ,...)

회전자에서 발생하는 고조파

회전자 슬롯에 의한 고조파: $R_{stor}=p+mZ_s+nZ_r$

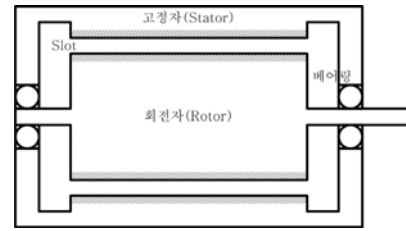


Fig. 8 Schematic of the Induction Motor

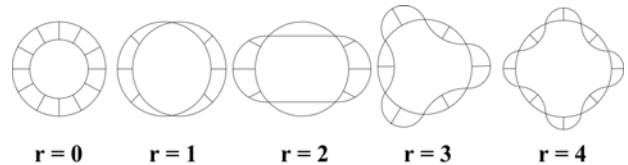


Fig. 9 Mode number and shapes

자기포화에 의한 고조파: $R_{sar}=3p+mZ_s+nZ_r$

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

n : 임의의 정수 (0, ± 1 , ± 2 ,...)

4.2 기계적 특성

모터의 고정자의 슬롯, 회전자의 슬롯과 극수를 모드 수 $m=|Z_s - Z_r| - p$ 이 가능한 크게 설계해야 한다. 모드 수에 대한 형상은 Fig. 9 와 같으며 m 의 값이 2,3,4 가 되지 않도록 설계하는 것이 바람직하다. 고정자를 지지 및 방열을 하는 모터의 케이스 프레임은 고정자의 고유진동수에서의 모드 형상을 방해하는 방향으로 설계 되는 것이 바람직하다.

모터의 회전자는 자기력에 의하여 회전하는 회전체이므로 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

본 연구의 대상인 모터는 회전자의 슬롯 44 개 고정자의 슬롯 54 개 및 6 극 모터로 다음의 조합으로 고조파가 발생하였다. 회전자의 슬롯과 고정자의 슬롯 및 극수의 조합에 의해 지계차 주행 시험 및 단품 시험을 통해 도출된 50 차수를 규명할 수 있고 관계식은 다음과 같다. $R_{stor} = p + mZ_s + nZ_r = 6 + 0 \times 54 + 1 \times 44 = 50$ 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 630Hz, 1540Hz, 2610Hz 에서 공진이 발생하였으며, 각 고유 진동수의 모드수는 2,3,4 의 모드 형상이다. 모터의 슬롯과 극수에 의한 모드수 조합은 $m = |Z_s - Z_r| - p = |54-44|-6=4$ 이므로 4 차 모드인 2610Hz 에서 가장 큰 공진이 발생하는 것을 Fig. 6 을 통해 알 수 있다.

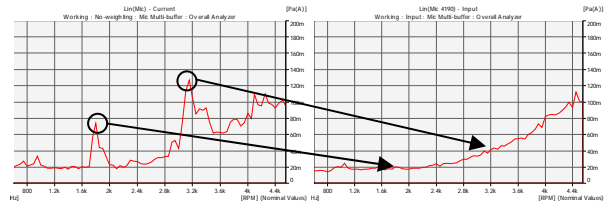
모터의 주요 소음 및 진동 가진원과 전자기력에 의한 공진을 보면 회전자의 특성을 변경시킴으로써 저소음 및 저진동의 효과를 볼 것이다. 회전자의 슬롯을 44 개에서 38 개로 변경시킴으로써 모터의 주요 회전 차수를 50 차에서 44 차로 변화시킬 수 있으며 공진 모드수를 $m=4$ 에서 $m=10$ 으로 변화시킴으로써 공진을 회피 할 수 있을 것이다.

5.2 개선안 검증 실험

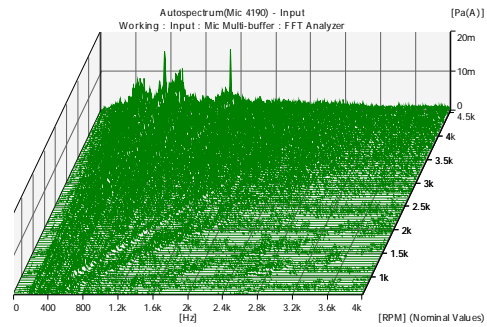
고정자의 슬롯 54 개, 회전자의 슬롯 44 개 및 6 극의 3 상 유도 모터에 대하여 회전자의 슬롯을 38 개로 변경하여 실험한 결과는 Fig. 10 과 같다. 개선 전과 개선 후 모터의 소음량을 비교해보면 (Fig.10-(a)) 개선 전의 1800rpm 과 3200rpm 에서 발생했던 회전수의 증가에 대한 이상 증폭이 사라진 것을 알 수 있다. 이는 모터 시스템이 회전수의 증가 따른 가진력의 증가로 소음의 크기가 비례하여 증가하는 것을 알 수 있으며, 특정 회전수에 대한 소음 증폭은 일어나지 않는 것을 알 수 있다.

개선 모터의 스펙트럼은 (Fig. 10-(b), (c)) 모터의 구조적인 공진이 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 이는 회전자의 슬롯을 변경함으로써 전자기력에 모드 수를 $m=4$ 에서 $m=10$ 으로 변경에 의해 고정자의 고유진동수와 공진을 유발하지 않기 때문에 안정적인 구동을 하고 있다는 것을 알 수 있다.

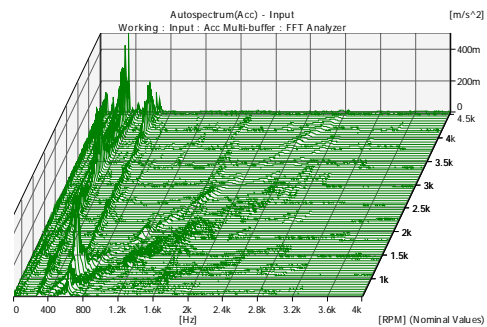
또한, 개선 전 모터의 지게차 시험 및 단품 시험에서의 주요 회전 차수인 50 차수(Fig. 6)는 회전자의 슬롯의 변경으로 $R_{slot}=50$ 에서 $R_{slot}=44$ 로 변경된 것을 실험 결과로 알 수 있다. (Fig. 10-(d), (e))



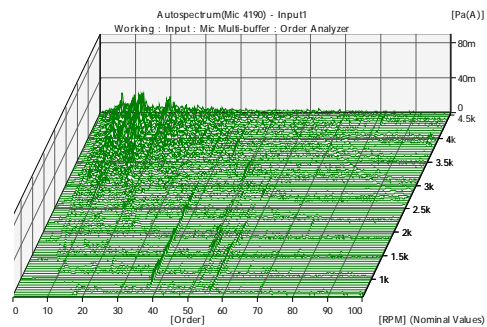
(a) Overall data of the old type motor and the new type motor



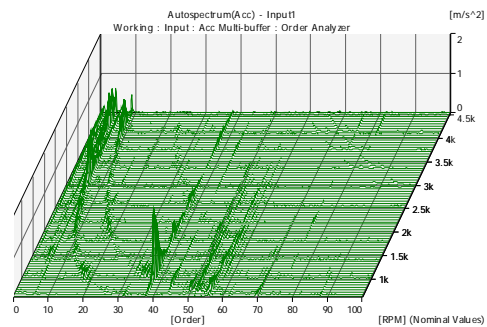
(b) Waterfall plot of the noise spectrum



(c) Waterfall plot of the vibration spectrum



(d) Order plot of the noise spectrum



(e) Order plot of the vibration spectrum

Fig. 10 Modified motor test result

6. 결 론

전동 지게차용 3 상 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 의한 기계적인 공진이 아니라 회전자와 고정자의 슬롯과 극수의 상관관계에 의한 모드 수와 관련하여 전자기적인 힘에 의해 발생하는 공진임을 알 수 있다. 모드 수가 낮을 경우 모터의 기계적인 공진 주파수의 모드 수와 만날 경우 크게 증폭하여 소음 및 진동이 크게 발생하는 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 모드 수를 높여서 공진을 회피해야 할 것이다.

후 기

이 논문은 2007 년도 2 단계 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었음

참고문헌

- (1) Nau, S. L. and Mello, H. G. G., 2000, Acoustic noise in induction motors: causes and solutions, IEEE, pp. 253~263
- (2) Ronnie, J. M. and Raymond D. F., 1991, Electro-Mechanical Analysis of the Audible Noise of an Inverter-Fed Squirrel-Cage Induction Motor, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 27, no. 27, pp.539~544
- (3) Roy, S. C., Francois, M. M. and Timothy, 1996, Vibration Modes and Acoustic Noise in a Four-Phase Switched Reluctance Motor, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32, no. 6, pp.1357~1364
- (4) D. H. Cho and K. J. Kim, 1998, Modeling of electromagnetic excitation forces of small induction motor for vibration and noise analysis, IEE Proc. Electr. Power Appl., vol. 145, no. 3, pp.199~205
- (5) Bin Kaku, Ichiro Miyashita, and Satoru Sone, 1999, A Novel Prediction Method of Acoustic Magnetic Noise Based on Induction Motor's NHCC Function, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 46, no. 2, pp.398~406
- (6) C. Wang and J. C. S. Lai, 1999, Vibration analysis of an induction motor, Journal of Sound and Vibration, vol.

244, no. 4, pp. 733~756

(7) 정진태, 서상준, 은희준, 1989, 승용차용 교류발전기의 소음 특성 규명, 대한기계학회논문집, 제 13 권, 제 1 호, pp. 40~47

(8) 송진섭, 김광준, 2000, 승용차용 교류발전기의 고정자 슬롯 수가 소음에 미치는 영향 분석, 대한기계학회논문집, 제 24 권, 제 1 호, pp. 126~133

(9) 차항병, 장경환, 1997, 차량용 교류발전기의 전자기소음 특성에 관한 연구, 한국소음진동공학회지, 제 7 권, 제 4 호, pp.663~668

(10) Yoshinori Sakamoto, Mitsuo Natusaka and Koichi Murakami, 1992, A Low Noise Slotless Parametric Motor Suited for Use in Quiet Environment, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 28, No. 5, pp. 3000-3002

(11) G. Joksimovic, M. Djurovic, and J. Penman, 2001, Cage Rotor MMF:Winding Function Approach, IEEE Power Engineering Review, pp. 64-66

(12) A. Canova, and C. Ragusa, 1995, Calculation of Slot Harmonic effects in Induction Motors by Finite Element Method, IEE 'Electrical Machines and Drives, 11-13 September 1995, Conference Publication NO. 412, pp. 82-87

(13) S. Salon, D. Burow, M. DeBortoli, and C. Slavik, 1994, Effects of Slot Closure and Magnetic Saturation on Induction Machine Behavior, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 30, No. 5, pp. 3697-3700

(14) Timothy E. McDevitt, Robert L. Campbell, and David M. Jenkins, 2004, An Investigation of Induction Motor Zeroth-Order Magnetic Stresses, Vibration, and Sound Radiation, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 40, No. 2, pp. 774-777

(15) S. P. Verma, and R. S. Girgis, 1973, Resonance Frequencies of Electrical Machine Stators Having Encased Construction, Part I: Derivation of The General Frequency Equation, IEEE Rotating Machinery Committee of the IEEE Power Engineering Society, Paper T 73 113-6, pp. 1577-1585

(16) Bertrand Cassoret, Rodolphe Corton, Daniel Roger, and Jean-Francois Brudny, 2003, Magnetic Noise Reduction of Induction Machines, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol 18, No. 2, pp. 570-579