

기자동차 저감을 위한 구동모터 하우징의 동특성 평가 Identifying Dynamic Characteristics of the Traction Motor Housing For the Noise reduction of the Electric vehicle

박 종찬† · 박 승용* · 조 현규* · 박 윤수*

Jongchan Park, Seungyong Park, Hyun-kyu Cho and Yunsu Park

Key Words : Noise reduction, Interference fit, Auto Power Spectrum, Impact force, Coherence, Electric Vehicle, Traction motor.

ABSTRACT

Assessment of the dynamics properties, like damping, dynamic stiffness and resonance sharpness is essential for the development of a robust system, specifically for the reduction of a traction motor noise. A practical method for identifying dynamic characteristics of a traction motor housing for an electric vehicle is proposed. Assembling using interference fit of the components of the motor is attributed to the main cause of strong nonlinearity. It is well known that nonlinearity of a structure makes it difficult to assess damping properties or dynamic characteristics of the system. This research presents a practical damping or dynamic stiffness identifying procedures for a nonlinear system according to the boundary condition between assembled components. Based on the simple idea that impact forces of modal tests are highly affected on the condition of the hammer tip, Auto Power Spectrum of the impact forces are used to assess the assembling condition and dynamic characteristics of the system, especially, damping of the system.

1. 서 론

CO₂ 배출에 따른 지구 온난화 현상과 화석연료 고갈은 자동차 산업계에도 문제 극복을 위한 많은 노력을 요구하고 있다. 전기자동차는 차량 주행에 따른 매연의 유해 물질을 배출하지 않는다는 점과 감속/정지 시 회생제동을 이용하여 발전을 하고 이 전기에너지를 배터리에 저장하여 다시 사용함으로써 획기적인 연비향상을 가능케 하여 온난화와 화석연료 고갈에 대한 해결책으로서 많은 연구가 이루어지고 있다[1,2]. 이러한 전기자동차의 개발에는

고효율 구동모터, 배터리 사용시간 연장 등의 성능/효율 문제 이외에도 방열 문제[3], 전기모터와 배터리 등이 극심한 환경 조건하에서 안정적으로 작동해야 한다는 신뢰성적인 문제의 해결도 요구하고 있다.

NVH 측면에서 전기자동차는 연료의 폭발을 이용하여 동력을 얻는 내연기관을 대신하여 전기모터를 이용하기 때문에 저소음으로 알려져 있다. 하지만, 본 논문에 제시된 바와 같이 내연기관 대신 전기모터를 사용하게 됨으로써, 전체적으로 낮아진 소음 환경으로 인해 기존에는 문제가 되지 않았던 소음 문제들이 대두되었다. 본 논문은 전기자동차에서 탑승자의 감성에 거슬리는 모터 소음의 원인이 되는 구동모터 구조적 특성 개선을 위하여 최우선적으로 요구되는 구조 특성 파악에 대한 연구 내용을 기술하였다.

† 교신저자; 현대모비스 연구개발본부

E-mail : jcp@mobis.co.kr

Tel : 031-8021-4856 , Fax : 031-280-2808

* 현대모비스 연구개발본부

일반적으로 구조 특성 파악을 위해서는 모달 실험을 통한 FRF(Frequency Response Function) 분석 방법이 널리 사용된다. FRF 측정을 바탕으로 공진 주파수, 댐핑, 동강성 등을 파악하여 구조 개선에 이용한다.

본 논문의 목적은 전기모터의 소음진동 저감을 위하여 비선형성이 높은 구조, 특히 압입 등에 의한 접촉 비선형성이 강한 구조에 대한 댐핑 특성 및 구조 강성을 평가하는 방법에 대하여 제안하고 효과를 기술하고자 한다. 본 논문의 2 장은 전기자동차의 소음에 대해 기술하고 3 장에서는 전기자동차 소음의 주요한 소음 원인인 구동모터의 동특성 평가에 대한 기술로 이루어져 있다.

2. 전기자동차의 소음 문제

2.1 전기자동차와 소음

연비 절감과 공해물질을 저감시킬 수 있다는 이점 이외에 전기자동차의 또 다른 특징 중의 하나는 소음 낮다는 점이다. 이것을 가장 잘 보여주는 것이 VSP라는 용어이다. VSP는 Vehicle Sound for Pedestrians의 약자로 하이브리드 자동차, 전기차의 개발과 함께 만들어진 것이다. 전기자동차의 차량 운행소음이 기존의 내연기관을 이용한 차량보다 낮아서 보행자, 맹인, 자전거 운전자 등이 다가오는 차량을 인지하지 못하여 발생할 수 있는 사고를 방지하기 위해서 전기자동차에서 인위적인 소음을 발생시켜 차량의 운행을 인지 시키기 위한 것이다. VSP에서 알 수 있듯이 전기자동차의 소음 특성은 너무 조용하다는 것이다. 이러한 전기자동차의 정숙성은 새로운 문제를 발생시키게 되는데 엔진 소리가 조용해 짐에 따라 주행소음, 풍절음, 감속기 Whine noise 등이 더욱 크게 느껴지게 되고 이에 따른 저감 노력이 요구된다는 점이다. 특히, 엔진을 대신해 차량의 구동을 목적으로 사용되는 모터의 경우 모터 특유의 전기적 가진에 의한 순음 발생 관련 연구가 충분히 진행되지 않는 상황이다.

2.2 전기자동차 구동 모터의 소음/진동 특성

전기자동차의 구동모터로는 영구자석을 사용한 PM(Permanent Magnet)모터와 유도모터(Induction motor)가 주로 사용된다. PM모터의 경우, 전자기 소음/진동의 주요한 발생원은 크게 토크리플과 코깅토크가 있다. 토크리플은 3상 구동모터의 경우, 전기적 1주기당 6번 발생하는 리플의 기본 주기와 기

계적 1회전당 극쌍수의 곱으로 주어진다. 그리고 코깅토크는 극 수와 슬롯 수의 최소공배수로 발생한다. 슬롯과 극 수 조합의 한 예로써 16극 24슬롯의 조합을 가정해 보면 토크리플 48차, 코깅토크 48차의 가진원 발생으로 토크리플의 가진원과 코깅토크의 가진원이 중첩됨을 알 수 있다.

이와는 달리 유도모터[4,5]는 회전자 슬롯 수 \pm 극 수, 고정자 슬롯 수 \pm 극 수의 주요한 가진원을 가지고 있기 때문에, 전자기 설계 조합이 더욱 복잡하다. 회전자 슬롯 수 36, 고정자 슬롯 수 44의 경우(본 연구의 대상 모터의 조합), 회전자로부터 발생하는 가진원 40차와 고정자로부터 발생하는 가진원 40차의 중첩으로 소음/진동 측면에서 바람직하지 못한 예이다.

위의 두 가지 예에서처럼 소음/진동 측면에서 불리한 전자기적 설계는 전기적 성능을 위하여 채택되는 경우가 많다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 소음/진동 저감을 위한 대응 설계는 기계적 관점에서 매우 중요할 뿐 아니라 전체적 시스템의 완성도를 해결하기 위해서 필요 불가결한 과제이다.

Fig. 1은 전기자동차용 구동모터로부터 측정된 소음결과를 보여 주고 있다.

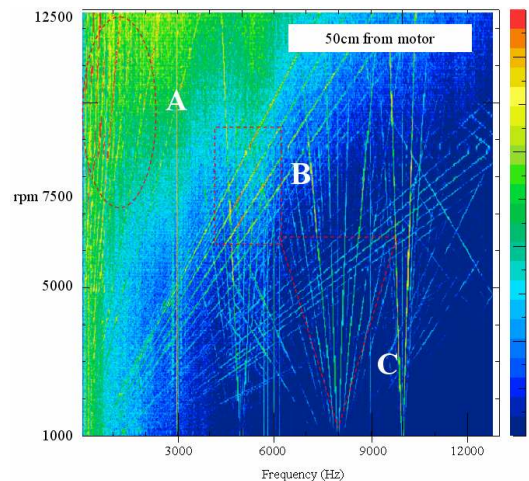


Fig. 1 Motor noise depending on speed

Fig. 1에서 A 대역은 베어링 관련 회전수 저차 소음이 주요한 원인이다. 다른 대역에 비하여 매우 높은 소음 수준이기는 하나 저주파 대역에서 높은 강도를 보이고 주파수가 높아짐에 따라 수준이 낮아지고, 주행소음, 풍절음 등의 마스킹 효과 때문에 차량에서는 크게 문제가 되지 않는다. C 대역은 인버터 스위칭 주파수와 기생 성분에 의한 방사 소음

이다. 가전기와 마찬가지로 전기자동차에서도 스위칭 주파수 성분의 소음문제를 회피하기 위하여 수kHz 이상의 주파수를 사용하고 있다.

B 대역이 앞서 언급한 36, 40, 44, 48차 소음이 문제가 되는 대역으로 전자기 가진원에 의한 모터 하우징 진동이 소음으로 방사되고 있다. 이 대역은 A 대역에 비하여 소음 수준은 낮지만 고주파 대역에서 비교적 조용한 차량 환경에서 주요한 문제가 되는 대역으로 본 연구의 대상이 되는 문제 대역이다.

2.3 모터 구조에 기인한 소음

Fig. 2는 Fig. 1의 회전속도에 따른 소음 측정결과에서 전자기 차수에 해당하는 36, 40, 44, 48차 성분에 대한 차수 선도(order cut) 이다.

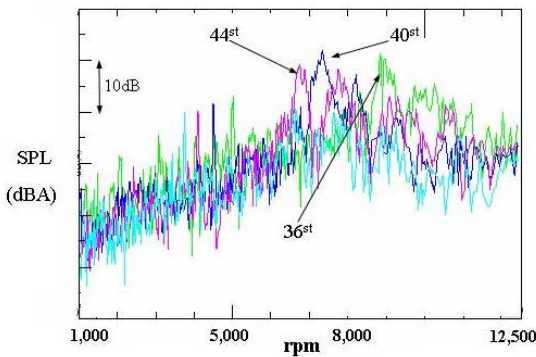


Fig. 2 Sound level of the traction motor

Order cut에서 소음이 높은 최고치 대역의 분석을 위해서는 Fig. 2의 회전속도-소음 선도에서 각 차수 peak 대역의 회전수에 대하여 기본 주파수 성분을 구하고 해당 차수를 곱하면 발생소음 주파수를 알 수 있다. Fig. 2에 보여지는 것과 같이 1,000에서 12,500rpm까지 운전시 주요한 소음대역은 5~6kHz 대역이다. 모터 회전속도가 증가함에 따라, 44, 40, 36차의 높은 차수로부터 순차적으로 발생하는 소음 peak 경향은 전자기 가진원이 특정 구조모드를 가진 하면서 발생하는 구조기인 소음의 특성을 보여 주고 있다.

2.4 전기모터의 구조

앞 절에서 언급한 것과 같이 구동모터는 전기자동차의 소음에 기여도가 매우 높기 때문에 기계적 소음/진동 대응 설계가 매우 중요하다. 전기자동차용 구동모터의 구조는 Fig. 3에서 보여지는 것과 같이

구동모터의 프레임이 되는 하우징 내에 권선이 감겨 있는 고정자가 압입된 상태로 조립이 된다.

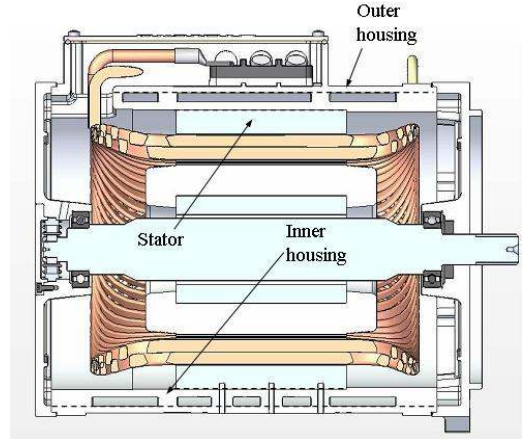


Fig. 3 Schematic view of traction motor [3]

하우징의 양쪽 끝에는 회전자 베어링을 고정하는 커버가 조립이 된다. 하우징은 고정자와 커버를 구조적으로 지지하는 프레임이 될 뿐 아니라 모터 운전으로 발생하는 열을 냉각시켜주는 유로를 내부에 가지게 된다. 유로를 위하여 내피/외피가 압입되는 압입형과 일체형의 구조의 두 가지가 일반적인 경우이다. 어떠한 경우이던 구동모터는 고정자가 하우징에 압입 되는 구조를 취하게 된다. 그리고 회전자계를 형성하는 고정자는 철손 저감을 위하여 전기강판을 적층하고 slot에 권선을 감게 된다.

CAE(Computer Aided Engineering)를 이용한 설계와 해석이 보편화되었지만 박판을 이용한 고정자의 적층과 코일 권선, 압입을 이용한 고정자와 하우징 내/외피의 조립은 접촉상태의 산포를 초래할 뿐 아니라 접촉 자체가 가지고 있는 비선형 성으로 인해 소음/진동 저감 설계를 목적으로 하는 유한요소 해석을 어렵게 하고 있다. 더욱이 이러한 접촉 비선형성은 실험에 있어서도 일반적인 모달 실험을 통하여 구조의 동특성을 평가하는 것이 매우 어려운 실정이다.

3. 비선형 구조 특성 평가

3.1 구조 특성 평가

소음/진동 저감을 목적으로 이용되는 가장 일반적인 분석기법이 모달 시험을 통한 FRF분석과 동특성 평가이다. 모달 시험을 통한 FRF분석은 소음/진

동이 문제되는 대역의 진동 모드를 보여줌으로써 어떠한 설계 변경으로 문제가 해결되어야 하는지에 대한 방법을 제시한다. 동특성 평가에는 공진주파수와 약, 댐핑 평가, 그리고 정적인 강성 이외에 동강성을 평가하는 여러 가지 방법이 있다. 이중 진동의 저감의 지표인 댐핑에 대한 평가로는 아래 Table 1에 나오는 여러 가지 지표들[6]이 이용되고 있다.

Table 1 Damping measures

Measures	Descriptions
Damping Ratio	Fraction of critical damping
Loss Factor	Response to the sinusoidal excitation
Log Decrement	Natural logarithm of the ratio of amplitudes of successive peaks
Quality factor	Sharpness of the resonance peak
Specific damping	Cyclic energy dissipation

본 연구에서는 초기 설계 인자들의 조합을 통해 제작된 모터들에 대하여 FRF 측정 후 5~6kHz의 구조 공진특성을 파악하기 위하여 공진 peak의 크기와 damping등의 동특성을 파악할 수 있는 Q 계수(또는 특성 계수)를 통해서 설계와 공정에 대한 동특성을 평가하고 소음 특성에 대한 예측을 시도하였다. Fig. 4는 서로 다른 설계 인자와 공법으로 제작된 모터에 대한 FRF선도 사례를 보여 준다.

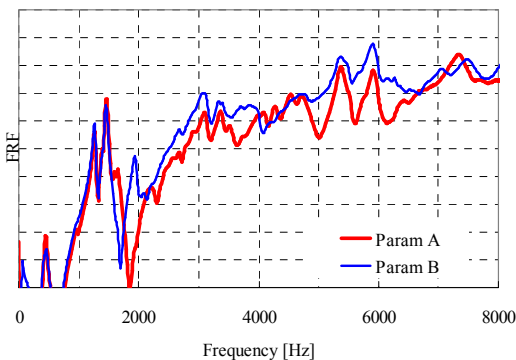


Fig. 4 Comparison of FRFs

Fig. 4의 FRF 선도에서 문제 주파수 대역에서 공진 peak가 발생함을 알 수 있으며, 5~6kHz 대역에서 발생하는 소음은 전자기 가진원이 구동모터 하

우정의 구조모드를 가진하는 것에 기인하는 사실을 알 수 있다. 그러나 단품 소음과 실제 차량 소음에서 10dBA 이상의 소음 성능차이를 나타내는 두 구동모터에 대하여 Fig. 4에서 공진 peak의 차이는 그러한 동특성의 차이를 설명하지 못하고 있다. 그 이유는 Fig. 5의 Coherence 선도에 보여지는 것과 같이 2kHz 이상의 주파수 대역에서는 모달 시험에서 noise의 기여도를 나타내는 Coherence[7]가 낮은 것과 관계가 있는 것으로 판단된다. 이러한 낮은 Coherence는 고정자의 적층구조와 하우징 내/외피 및 고정자 하우징간의 압입 조립구조에 기인하기 때문이다. 실제로 서로 다른 설계 인자와 공법으로 제작된 Param A와 Param B의 시제작 구동모터는 운전 시험에 있어 10dB이상의 소음 성능 편차를 나타내었지만 일반 적인 FRF plot 분석과 Q 계수 분석으로는 정량적/정성적 차이를 파악하기 힘들 것으로 판단 된다.

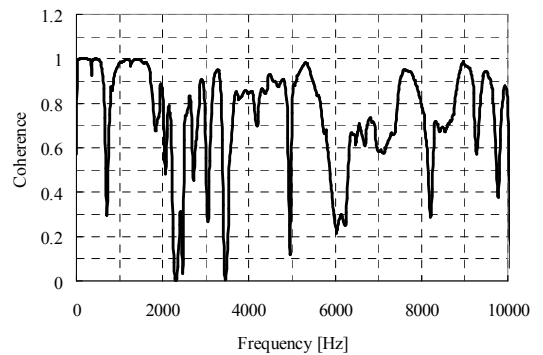


Fig. 5 Coherence Plot of the impact test

위의 예에서처럼 소음 저감을 목적으로 선정된 여러 가지 설계인자와 공법에 대한 모터 하우징에 대한 정량적 동특성 평가는 매우 어려운 것 현실이다. 이 때문에 수 차례 반복되는 모터 제작과 차량 상태의 검증 시간과 경비의 문제를 줄이기 위해서는 구동모터의 소음 성능을 예측할 수 있는 정량적/정성적 동특성 평가 방법이 요구되는 바이다.

3.2 Impact test의 특성

FRF 측정 방법으로 널리 사용되는 방법 중의 하나가 임팩트 해머를 이용한 FRF 측정이다. 임팩트를 이용한 방법은 한번의 실험으로 관심 전 영역을 가진할 수 있다는 장점을 가지고 있는데 이러한 특성은 시험 장비의 특성[8]과도 관계가 있다.

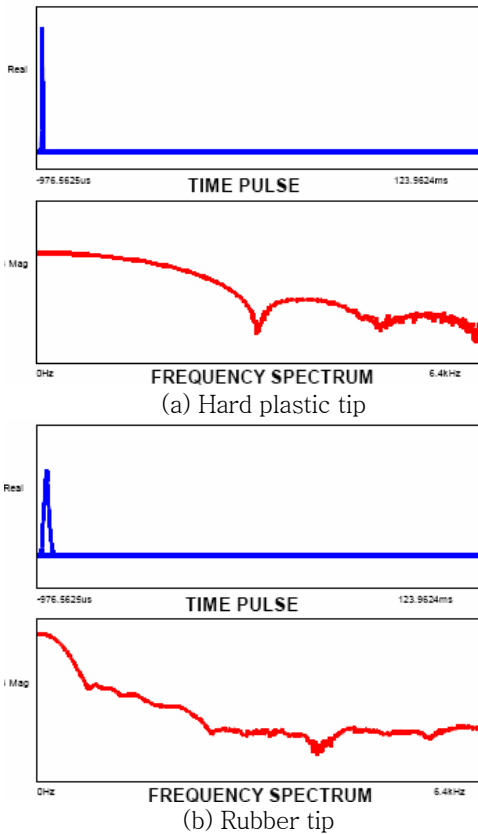


Fig. 6 Frequency spectrums according to types of hammer tips [8]

이론적으로 아주 짧은 시간 동안의 임펄스는 주파수 영역에서 모든 주파수에 대하여 균일한 가진을 할 수 있지만 실제로 유한한 시간 동안의 임펄스에 의한 임팩트는 Fig. 6에서 보여지는 것과 같이 time duration에 관계된 가진 특성을 나타내게 된다. 이처럼 Impact test의 가진 특성을 결정하는 가장 중요한 인자가 impact hammer의 force transducer 전단에 설치되는 tip이다. 일반적으로 rubber tip, plastic tip, aluminum tip, steel tip 등이 있다. Fig. 6의 tip에 따른 spectrum 형상은 충돌현상이 일어나는 상대물의 단단한 정도에 따라 달라지는 충돌 거동과 관련이 있다. 본 연구에서는 이러한 임팩트 특성을 이용하여 특정 설계 인자와 공법에 따라 시제작된 구동모터 하우징의 동특성에 대한 평가를 실시하였다.

3.3 Impact test를 이용한 동특성 분석

본 연구에서는 앞서 기술한 impact의 특성을 이용하여 구동모터 하우징의 설계인자와 공법에 따른

동특성 평가 방법에 대한 분석을 진행 하였다.

Fig. 7은 서로 다른 설계 인자와 공법으로 시제작된 구동모터에 대한 임팩트 테스트의 input force의 Auto Power Spectrum(APS)을 나타낸 것이다.

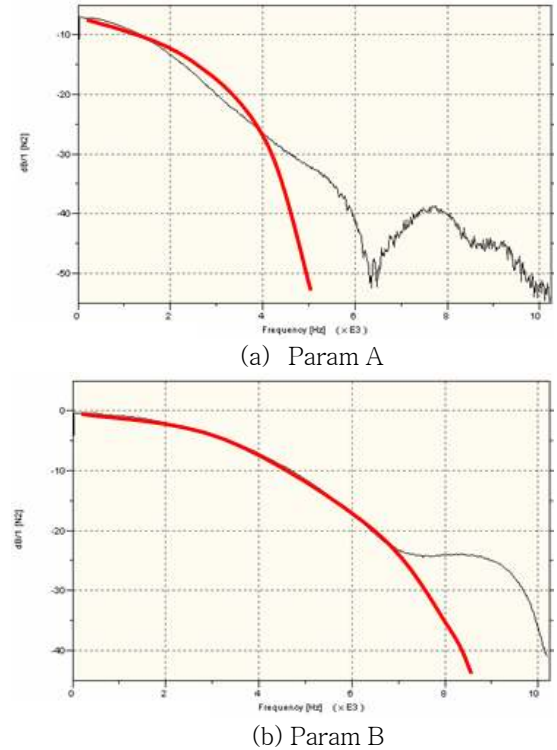


Fig. 7 Auto Power Spectrum of input force

Fig. 7의 Param A와 B의 결과는 똑같은 팁을 사용하여 측정된 임팩트 테스트의 APS 선도이다. 동일한 팁을 사용한 실험 결과에서 rubber tip과 hard plastic tip을 사용 했을 때 impact 특성의 차이로 발생하는 것과 같은 차이를 보여 주고 있다.

위 그림의 결과를 바탕으로 앞서 10dB 이상의 소음특성을 가지고 있으나 일반적인 FRF 분석으로는 고주파 대역에서의 공진 특성과 소음특성을 평가하기 어려운 Param A와 Param B의 구동모터 하우징에 대하여 임팩트 테스트의 input force의 Auto Power Spectrum(APS)을 분석하였다. 아래 Fig. 8은 12.4kHz까지 측정된 시험에서 입력신호가 20dB정도까지 내려가는 6kHz까지의 신호에 대하여 2차 함수로 회귀 분석 결과를 나타낸 것이다.

4. 결 론

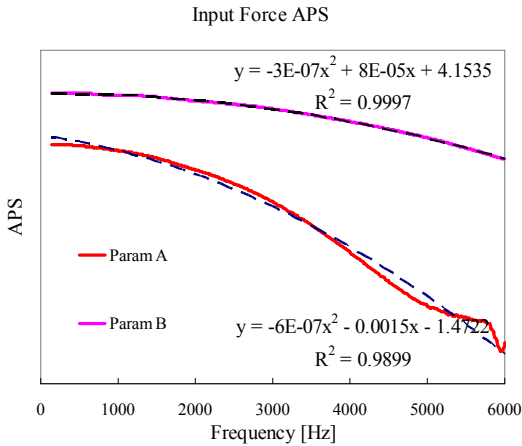


Fig. 8 Regression analysis of input force auto power spectrum

Fig. 8의 Auto power spectrum의 회귀분석결과 는 소음 성능이 우수한 Param B의 경우 상관 계수가 99.97%로 이상적인 이차함수에 매우 유사한 것을 보여 주고 있다. 반면 Param A의 경우, 실선의 Auto power spectrum 그래프가 회귀분석에 사용된 2차함수에서 벗어 나는 정도가 높아 상관 계수가 98.99%로 소음 양호품보다 낮게 나오며 기울기 또한 Param A의 2배로 가진영역이 상대적으로 낮은 것을 알 수 있다. 위의 결과에서 Impact force의 ASP를 비교 함으로써 구동모터 하우징의 설계 인자와 공법에 따른 강성 및 동특성을 예측 할 수 있었다. 또한, 동일 형상의 구조물에 대해서 서로 다른 부위의 동특성 및 조립특성 비교 할 때, 일반적인 FRF 비교나 Q 계수 분석을 이용할 경우, 비교 대상이 되는 부위의 FRF 선도의 기저 형상이 틀리기 때문에 직접 비교가 어렵게 된다. 하지만 Impact force의 APS를 이용한 방법은 FRF의 모드 특성을 이용하지 않고 Impact 특성을 통해서 접촉 상태와 동특성을 파악하기 때문에 위치가 달라도 동특성 및 조립특성 비교가 가능 하였다. 이러한 결과는 임팩트 테스트의 Input force에 대한 분석을 통해 접촉 비선형을 내포한 구조물의 동강성 예측이 정성적인 측면뿐 아니라 주어진 기준 품 (합격품 또는 양품)의 특성치를 만족하는지 못하는지에 대한 정량적인 기준으로도 사용 될 수 있음을 보여주고 있다.

본 연구를 통해 구성 부품의 압입 조립으로 인한 전기자동차용 구동모터 하우징의 강한 비선형 진동특성과 이에 따른 소음 특성의 차이가 제시 되었다. 이러한 비선형 구조에 대한 진동 특성 평가 특히, 댐핑 특성 평가를 위하여 기존의 모달 시험에서 FRF를 이용하는 방법이 아닌 IMPACT FORCE의 AUTO POWER SPECTRUM을 이용하는 방법을 제안하였다. 기존의 방법에서 접촉 비선형 특성 때문에 공진 특성의 평가가 어려운 COHERENCE가 매우 낮은 고주파의 주파수 영역에 대한 진동 및 댐핑 평가를 보완 할 수 있으며, 동일한 형상의 구조에 대해 기하학적으로 다른 위치의 진동 특성에 대한 비교에 대해서도 유용하게 사용 될 수 있음을 보여 주었다.

참 고 문 헌

- (1) C. Zheng, Y. Park, W. Lim, S. W. Cha, A Study on Battery SOC Estimation by Regenerative Braking in Electric Vehicles, Transactions of KSAE, Vol. 20, No. 1, pp.119-123, 2012
- (2) J. Ji. C. Ma, H. Kim, Motor Control of a Parallel Hybrid Electric Vehicle, KSAE 2010 annual Conference, pp.57~62.
- (3) Lee J. H., Ha M.J., S. Kang, Park Y. J, Thermal Analysis of Electric Vehicle Motor Using CFD, 대한 기계학회 논문집, pp. 2711~2714. 2010
- (4) W. Y. Kim, J. T. Chung, A Study on the Characteristic of Noise and Vibration in 3-phase Induction Motor for the Forklift, 한국소음진동 공학회논문집, Vol. 19, pp.3-9, 2009
- (5) B. Cassoret, R. Corton, D. Roger, J-F. Brudny, Magnetic Noise Reduction of Induction Machines, IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 18, NO. 2, MARCH 2003
- (6) Cyril M. Harris, Shock and Vibration Handbook 4th, McGRAW-HILL
- (7) Daniel J. Inman, Engineering Vibration, Prentice Hall International Editions
- (8) P. Avitabile, Experimental Modal Analysis (A simple Non-Mathematical Presentation), Sound & Vibration Magazine, May 27, pp. 1-15, 2000