

하이브리드 전기 자동차용 ISG의 진동 및 소음 개선에 관한 연구

정재우*,*, 전성민*, 김종현*, 윤재섭*, 김도진**, 홍정표**, 김현***, 김기남***
S&T대우*, 한양대학교**, 현대·기아 자동차***

A Study on Reduction of Vibration and Noise of ISG for Hybrid Electric Vehicle

Jae-Woo Jung*,*, Seong-Min Jeon*, Jong-Hyun Kim*, Jae-Seub Yoon*, Do-Jin Kim**, Jung-Pyo Hong**,
Hyun Kim***, Ki-Nam Kim***
S&T Daewoo*, Hanyang University**, Hyundai-Kia motors***

Abstract - 하이브리드 자동차의 Integrated Starter & Generator (ISG)는 기동 시 높은 토크를 발생시키면서 진동과 소음을 동반한다. 이러한 진동 및 소음은 차량의 품질 확보를 위하여 최소화 시켜야 할 필요가 있다. 본 논문에서는 매입형 영구자석 동기 전동기로 설계된 ISG의 진동 및 소음 저감에 관한 연구에 대하여 다룬다. ISG의 진동 및 소음 저감을 위하여 회전자 코어의 형상 최적설계, 슬롯 수 변경설계 그리고 회전자의 step skew를 적용시켜 각각의 설계방법이 ISG의 진동 및 소음에 미치는 영향을 해석과 실험을 통해 검증하였다.

1. 서 론

환경오염에 대한 우려와 연일 치솟는 유가로 인해 하이브리드 전기 자동차 (HEV)에 대한 관심이 증가하고 있다. HEV의 주요 기능 중 idle stop & go는 연비개선에 탁월한 효과를 보인다[1]. 특히 직,병렬 HEV 시스템에서 idle stop & go 기능을 실현하기 위해서는 구동모터 외에 부가적인 모터가 필요하다. 본 논문에서 다루고자 하는 HEV 시스템에서는 기존의 alternator가 제거되고 Integrated Starter & Generator (ISG)가 장착된다[2]. ISG는 차량의 출발 시 엔진을 기동시켜 주는 기능을 하고 배터리 전압이 낮을 때 발전기모드로 동작하여 배터리를 충전시켜주는 기능을 한다. 특히 ISG는 엔진 기동 시 짧은 시간에 높은 토크를 발생시키는데 이때 ISG의 진동에 의해 차량 내부에서 소음이 감지될 수 있으므로 설계 단계에서 진동 및 소음에 대한 충분한 검토가 이루어져야 한다.

본 논문에서는 HEV용 ISG의 진동 및 소음 저감에 대한 내용을 다루었다. 진동 및 소음 저감을 위하여 회전자 코어의 형상설계, 슬롯 수 변경을 통한 가진력의 공진점 회피 그리고 회전자의 step skew를 적용하였다. 각각의 설계 방법이 적용된 시제품을 제작하여 모터 단품에서의 진동을 평가하였으며 차량 상태에서의 소음을 측정하여 설계모델의 진동 및 소음 저감에 대한 영향을 분석하였다.

2. 본 론

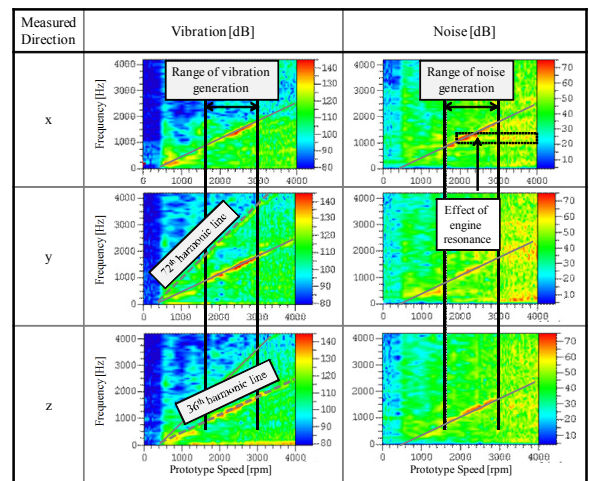
2.1 Prototype의 진동 및 소음

Prototype인 매입형 영구자석 동기 전동기 (IPMSM) type ISG의 최대 부하 시 속도에 따른 진동 및 소음을 측정 하였으며 결과는 그림 1과 같다. 진동과 소음은 x, y, z축 전 방향에서 모두 측정되었다. 측정 결과, 진동과 소음의 주파수 대역이 서로 유사함을 볼 수 있었고 진동 및 소음의 36차 고조파가 가장 크게 나타나는 것으로 확인되었다. 일반적으로 전동기의 진동과 소음의 원인으로써 코깅토크, 토크리플, 고정자의 radial force와 tangential force가 있다. Prototype의 경우 6극 36슬롯임을 감안했을 때 36차 소음과 진동은 코깅토크의 기본파, 토크리플의 2차 고조파성분과 일치하며 radial force와 tangential force의 6차 고조파와 일치함을 알 수 있다[3]. 앞서 언급한 여러 가지 원인 중 prototype의 진동 및 소음에 가장 큰 영향을 주는 원인은 토크리플의 2차 고조파라고 판단되며 토크리플의 저감을 위한 설계를 수행하였다.

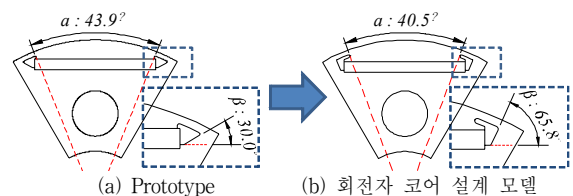
2.2 진동 및 소음 저감설계

2.2.1 회전자 코어의 형상 최적설계

회전자 코어의 형상 중 토크리플에 가장 큰 영향을 주는 자속장벽의 형상을 반응표면법을 이용하여 최적 설계를 수행하였다[3]. 토크리플은 pole arc의 변화에 따라 민감한 반응을 보이므로 자속장벽의 형상이 pole arc에 영향을 주도록 설계변수를 설정했다. 그림 2는 최적설계 시 설정한 설계변수와 prototype과 회전자 코어 설계 모델의 형상을 보여준다. 회전자 코어 설계 모델의 pole arc는 40.5°로써 prototype에 비해 약 7.7% 줄었음을 볼 수 있다.



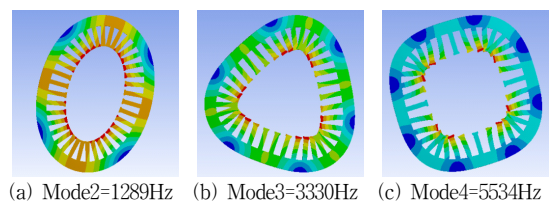
〈그림 1〉 Prototype의 진동 및 소음



〈그림 2〉 설계 변수 및 회전자 코어 설계 결과

2.2.2 슬롯 수 변경 설계

Prototype 회전자 코어의 모드해석을 수행하였으며 그림 3의 결과를 얻었다. 해석결과 2차 모드의 주파수가 prototype의 주요 소음주파수 대역과 일치함을 확인하였다. 36차 소음을 회피하기 위하여 가진원의 주파수를 변경시켜 소음을 저감시키는 방향으로 설계를 하였으며, 이에 대한 방법으로 그림 4와 같이 기존 36슬롯에서 18슬롯으로 변경하였다. Prototype의 경우 권선이 5/6 단절권으로 이루어진 반면 18슬롯의 경우 전절권으로 권선이 된다. 그러므로 권선계수가 바뀌게 되고 이에 따른 역기전력의 변화가 발생한다. 역기전력의 변화는 성능변화를 야기하므로 18슬롯의 역기전력을 prototype과 동일하도록 회전자 코어 형상설계를 수행하였다[4]. 슬롯 수 변경 모델의 경우 회전자 코어 설계 모델에서 진동 및 소음을 추가로 개선하기 위한 모델이며 회전자 코어 설계 모델을 기반으로 설계하였다.

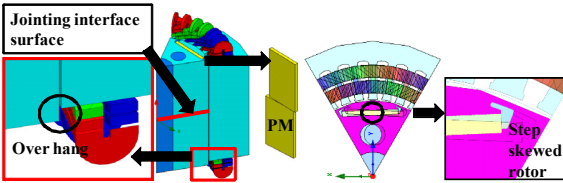


〈그림 3〉 Prototype 회전자 코어의 모드해석결과



(a) 36슬롯 모델 (Prototype) (b) 18슬롯 모델 (설계모델)

〈그림 4〉 고정자 코어 형상 및 권선



〈그림 5〉 회전자의 step skew 적용 3D 모델

2.2.3 회전자 step skew

전동기의 소음 및 진동 저감에 가장 효과적인 방법 중 하나인 skew를 고려하였으며 제작의 편의를 위하여 회전자에 step skew를 적용하였다. IPMSM의 경우 회전자에 step skew를 적용할 경우 축 방향으로 누설자속이 생기므로 역기전력이 감소하게 된다. 18슬롯 설계 시와 마찬가지로 설계모델의 성능 변화를 최소화하기 위하여 회전자에 누설자속을 보상해줄 overhang을 그림 5와 같이 적용하였다. 회전자의 overhang 길이는 3차원 유한요소해석을 통하여 결정하였다[5]. 회전자의 step skew 모델 또한 회전자 코어 설계 모델에서 소음을 추가로 개선하기 위하여 검토하였으며 회전자 코어 설계 모델을 기반으로 설계되었다.

2.3 진동 및 소음 시험

진동 및 소음 저감 설계 방법에 대한 검증을 위하여 모터 단품 상태에서의 진동 시험과 차량 상태에서의 진동 및 소음 시험을 수행하였다.

2.3.1 모터 단품시험

각 설계 모델의 ISG 단품 상태에서의 진동량이 얼마나 줄었는지 확인하기 위하여 그림 6과 같이 시험 장치를 구성하여 진동량을 측정하였다. 측정 조건은 ISG가 최대토크를 발생하면서 엔진을 기동시키는 상태이며 ISG 속도가 1000rpm일 때의 진동상태를 측정하였고 그림 7과 같다.

1000rpm에서 36차 성분과 일치하는 0.6kHz의 진동량을 비교해보면 설계 시 예측한 양상과 동일하게 나오는 것을 확인할 수 있다. 우선 회전자 코어 설계 모델의 경우 prototype 대비 약 77% 저감된 결과를 얻을 수 있었다. 한편 18슬롯 모델의 경우 18차 성분인 0.3kHz에서의 진동량은 회전자 코어 설계 모델보다 증가하였지만 0.6kHz의 진동량은 약 63% 감소함을 확인할 수 있다. 마지막으로 회전자의 step skew 적용 모델의 0.6kHz 진동량은 전체 네 모델 중 가장 작은 값을 가지며 회전자 형상 설계 모델 대비 약 83% 감소함을 확인하였다.

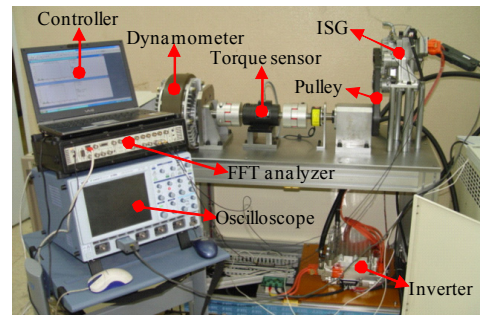
Prototype의 진동 발생 양상은 소음과 동일한 양상을 보이므로 각 설계 모델의 소음 또한 진동량이 저감된 만큼 줄어 들 것으로 예상된다.

2.3.2 차량시험

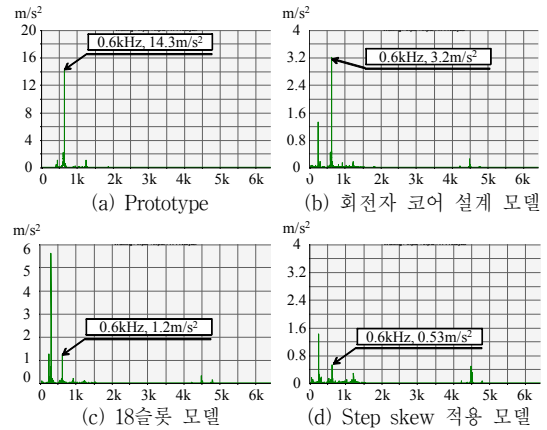
최종 목표인 차량 상태에서의 소음 저감을 확인하기 위하여 설계 모델을 장착한 차량의 진동 및 소음 시험을 수행하였다. 차량 시험은 회전자 형상 설계 모델에 대해서만 제시하였다. 시험 결과는 ISG가 엔진을 기동하는 순간에 측정된 결과이며 그림 8과 같다. 회전자 형상 설계 모델의 ISG 진동량은 prototype 대비 5dB 감소하였으며 차량 실내 소음은 2dB(A) 감소함을 볼 수 있다. 18슬롯 모델의 경우 차량에 장착된 ISG의 진동은 감소하였지만 실내소음의 18차 성분의 과도하게 증가하였으며 step skew 모델의 경우 시험 일정 상 차량시험을 수행하지 못하였다.

3. 결 론

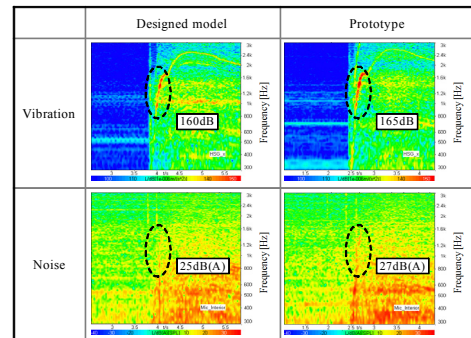
HEV용 ISG의 차량 진동 및 소음 개선을 위한 설계를 하였으며 실험을 통해 진동 및 소음 개선을 검증하였다. 모터의 진동 및 소음은 전자기적 가진력과 큰 상관관계가 있으며 이를 잘 분석한다면 진동 및 소음 특성 개선을 위한 설계가 효과적으로 이루어 질 수 있을 것으로 판단된다. 향후 전자기적 가진력과 기계적 변형 그리고 음압과의 상관관계에 대한 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다. 또한 IPMSM의 진동 및 소음 저감 시 회전자의 기구적 강성에 대한 검토가 동시에 이루어져야 할 것이다.



〈그림 6〉 모터 단품 진동측정 시험 구성



〈그림 7〉 최대 토크에서의 진동 값 (@1000rpm)



〈그림 8〉 회전자 설계 모델의 차량 진동 및 소음 시험 결과

[참 고 문 헌]

- [1] Friedrich, G., Girardin, A., "Integrated starter generator," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol.12, no.4, pp. 26-34, July/Aug. 2009.
- [2] HyoungJun Cho, SangHoon Moon, KiNam Kim and KiSang Lee, "A Development of Traction Motor for mid-size sedan Hybrid Electric Vehicle," *KSAE 2010 Annual Conference*, KSAE10-A0550, Nov. 2010.
- [3] Jae-Woo Jung, Sang-Ho Lee, Geun-Ho Lee, Jung-Pyo Hong, Dong-Hoon Lee, and Ki-Nam Kim, "Reduction Design of Vibration and Noise in IPMSM type Integrated Starter and Generator for HEV," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 6, pp. 2454-2457, June 2010.
- [4] Jae-Woo Jung, Sang-Ho Lee, Geun-Ho Lee, Jung-Pyo Hong, and Dong-Hoon Lee, "Effect of Vibration and Noise on IPMSM type Integrated Starter and Generator According to Number of Slots," *Proc. of 13th Int. Conf. on Electrical Machines and System (ICEMS)*, Incheon, Korea, pp. 2040-2043, Oct. 2010.
- [5] Jae-Woo Jung, Do-Jin Kim, Jung-Pyo Hong, Geun-Ho Lee, and Seong-Min Jeon, "Experimental Verification and Effects of Step Skewed Rotor type IPMSM on Vibration and Noise." *IEEE Trans. Magn.*, to be published.