

전자기력 가진원을 이용한 구조해석

김두영, 김도진, 박현진, 홍정표
한양대학교 자동차공학과

Structure Analysis using Electromagnetic Excitation Force

Doo-Young Kim, Do-Jin Kim, Hyun-Jin Park, Jung-Pyo Hong
Department of Automotive Engineering, Hanyang University

Abstract - 본 논문에서는 전자기력 가진원을 이용한 구조해석을 수행할 때 time step과 mode superposition을 통해 해석시간을 저감한다. 이때 결과의 신뢰성을 확보하기 위해 4극 24슬롯 유도 전동기로 대상을 선정하여 연구를 진행하였다. 그리고 일반적인 구조해석법의 결과와 time step과 mode superposition을 적용한 결과를 비교 및 분석하였다.

1. 서 론

산업이 발전함에 따라 현대사회의 인간은 여러 가지 공해에 노출되고 있다. 특히 진동 및 소음 공해는 일상생활에서 빈번하게 접하는 환경요인으로 사람들에게 스트레스를 가중시키고 있다.

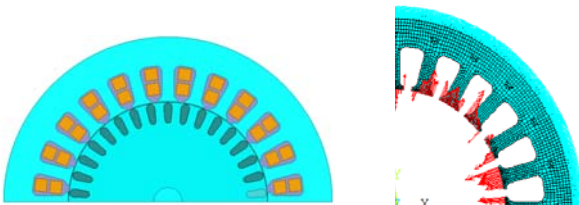
유도 전동기는 전기적 에너지를 축의 회전운동을 통하여 기계적 에너지로 변화시켜주는 기계장치로서, 자동차를 비롯하여 냉장고 등의 가전 제품에 이르기 까지 널리 사용되고 있다. 최근에는 소형화, 경량, 고효율을 지향함과 동시에 쾌적함의 욕구를 충족시키기 위해 진동 및 소음에 대한 저감 대책이 필요한 실정이다. 세부적으로 유도 전동기에서 발생하는 진동의 원인은 전자기적 특성, 기계적 특성, 공기역학적 특성으로 분류할 수 있다. 전자기력 가진원은 normal force와 tangential force로 구분할 수 있고 이러한 힘들의 주파수와 전동기 기계적인 고유 진동수가 일치하면 공진에 의해 진동, 소음이 발생하게 된다.

본 논문에서는 전자기력 가진력에 대한 전동기의 진동량을 산출하고 고조파에 따른 데이터의 신뢰성을 확보하기 위한 time step을 결정하고 해석 시 걸리는 시간을 저감하는 방법에 대해 검토해 보고자 한다. 대상은 4극 24슬롯 유도 전동기이다. 주파수 50Hz에서 고조파가 5000Hz까지 신뢰성을 확보하기 위한 time step을 결정하고 mode superposition을 적용하여 해석 시간 저감을 하였고 결과의 오차를 비교하였다.

2. 본 론

2.1 전동기 모델

그림 1 좌측은 해석에 사용한 유도 전동기의 모델이고 우측은 전자기력 가진원이 치의 끝단에 인가될 때 의 상황을 나타내고 있다. 그리고 표 1은 해석에 사용된 4극 24슬롯 유도 전동기 모델의 고정자 사양을 나타낸다. 일반적으로 회전자는 전체 전동기 결합품의 고유진동수에 영향을 거의 미치지 못하므로 고정자만을 구조해석의 모델로 선정하였다.



〈그림 1〉 4극 24/34 슬롯 유도 전동기 및 힘인가 시 상황

〈표 1〉 전동기 고정자 모델 사양

4극 24슬롯 유도 전동기 고정자	
고정자 외경	57.5 [mm]
고정자 내경	35 [mm]
축방향 길이	42 [mm]
재질	50PN470

2.2 배경이론

2.2.1 Time step

전자기력 가진원을 통해 구조해석을 하게 되면 node 별 시간에 따라 변형량의 데이터가 얻어 진다. 이 데이터를 시간 고조파 분석을 할 때 신뢰성을 가져갈 고조파 차수에 따라 time step을 식 (1)로 결정하게 된다.

$$time\ step = \frac{1}{8f_v} \quad (1)$$

여기서 f 는 전원 주파수, v 는 신뢰성을 가져갈 시간 고조파 차수, f_v 는 신뢰성을 가져갈 주파수이고 f_v 는 식 (2)를 통하여 결정한다.

$$f_v = v \times f \quad (2)$$

식 (1)은 정현파를 대략적으로 표현하기 위해 최소한 8개의 점이 필요하고 v 차 고조파 한 주기에 8개의 데이터가 나오도록 time step을 결정한다.

2.2.2 Mode superposition

전자기력 가진원에 의한 소음이 주로 위치하는 1 kHz에서 5 kHz까지 고조파 분석의 신뢰도를 가져가기 위해 전원 주파수와 식 (1)에 의해 결정된 time step에 따라 데이터의 개수가 많아져 구조해석 시 해석 시간이 길어지게 된다. 그러므로 mode superposition을 도입하여 요소의 mode shape를 제한함으로써 해석시간을 저감한다.

저차수의 mode shape이 변형에 큰 영향을 미치므로 요소의 mode shape의 수를 적당히 제한하여 modal test simulation을 통해 요소별 mode shape matrix를 얻게 된다. 얻어진 요소의 mode shape matrix를 가지고 구조해석을 수행하게 된다. Modal test simulation은 damping coefficient를 고려하지 않고 계산하게 되며 그 과정은 식 (3)~(6)과 같다. 식 (7)은 modal test simulation 결과 얻어진 mode shape 별 고유진동수를 구조해석에 적용하는 식이다.

$$[M_e]\ddot{y}_j + [K]y_j = 0 \quad (3)$$

$$y_j = [M_e]^{-1/2}q \quad (4)$$

$$q = [P]r \quad (5)$$

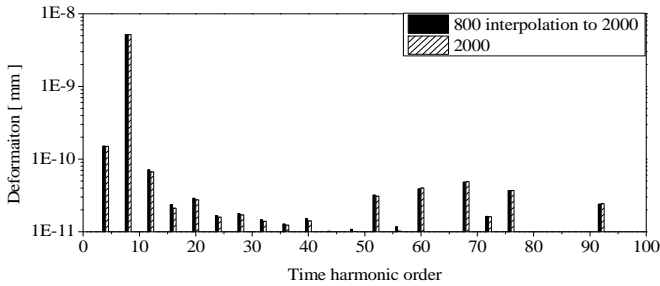
$$\ddot{r} + \omega_j r = 0 \quad (6)$$

$$\ddot{y}_j + 2\omega_j\xi_j\dot{y}_j + \omega_j^2y_j = f_j \quad (7)$$

여기서 $[M_e]$ 는 요소의 질량, $[K]$ 는 요소의 스프링 상수, y_j 는 j 요소의 변위량, ω_j 는 j 요소의 mode shape의 고유진동수, ξ_j 는 damping coefficient, f_j 는 j 요소에 작용되는 외력이다.

2.3 Time step의 결정

질량과 스프링 상수로 결정되는 기본적인 기계 시스템에서 일반적으로 v 차 고조파에 20개의 데이터를 가지고 정현파를 표현하면 1% 내의 오차를 가지고 있다고 알려져 있다. 그때의 time step은 식 (8)로 결정하게 된다. 그러나 해석시간이 길어 식 (1)로 데이터의 개수를 줄여 해석시간을 단축시켰다. 이때 식 (1)의 신뢰성을 평가하기 위해 결과를 식 (8)의 데이터 개수로 보간하여 비교하였다.



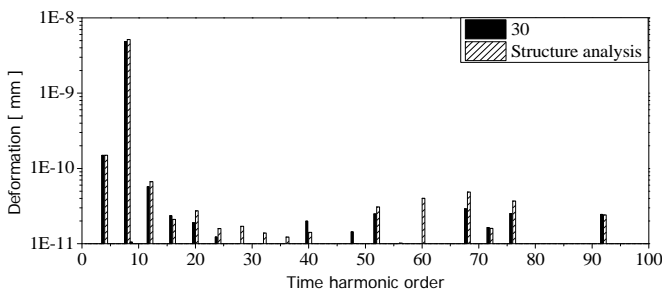
〈그림 2〉 time step의 개수 800과 2000 결과 비교

$$time\ step = \frac{1}{20f_v} \quad (8)$$

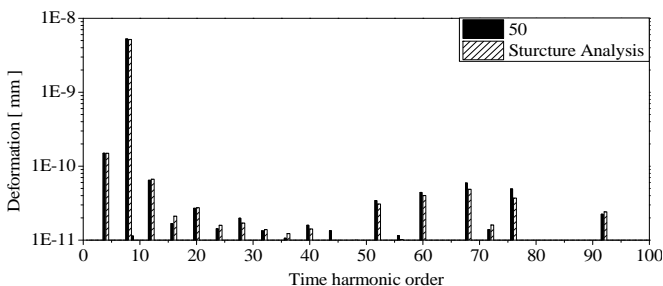
그림 2는 time step의 개수 800로 해석한 결과를 2000개로 보간한 것과 2000개로 해석한 결과를 비교한 그래프이다. 두 결과를 비교해 보면 식 (1)을 사용하여 얻어낸 결과를 보간할 경우 식 (8)을 사용한 것과 일치하는 것을 확인하였다.

2.4 Mode superposition 해석

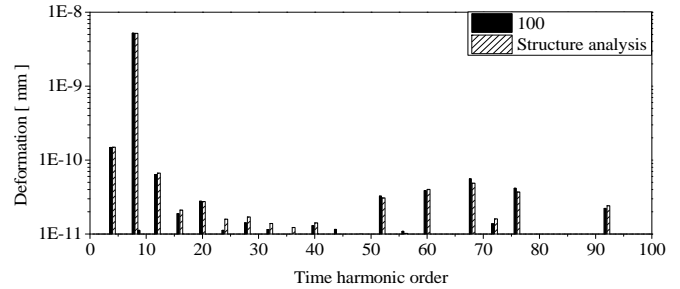
FEM 해석을 통해 얻은 공극자속밀도를 이용하여 normal 방향의 전자기력 가진원을 구해 고정자의 치 끝단에 인가하여 구조해석을 수행한다. 인가된 힘의 공간적 개수는 치와 슬롯 오픈의 각도에 따라 0.5° 이하로 나누어 개수를 정하였다. Time step은 전원 주파수 50Hz에서 5000Hz까지 신뢰도를 확보하기 위해 식 (1)을 통해 산정했으며 전기적으로 5주기를 산정하여 총 힘의 개수를 결정하였다. 해석방법은 요소를 나눈 후 요소의 mode shape의 개수를 30, 50, 100 까지 제한을 해 mode superposition을 적용한 것과 일반적인 구조해석법을 사용하였다. 그리고 구조해석법의 결과를 기준으로 각 mode shape 개수별 결과와 비교를 하였다. 결과비교법은 한 위치를 고정시켜 시간에 따른 변형량의 변화를 구하고 이를 시간 고조파 분석하여 발생하는 고조파 차수와 각 차수별 오차, 전체 평균오차, 해석시간을 비교하였다. 모델이 4극 24슬롯이므로 전자기력 가진원의 기본파는 4고조파가 된다. 그리고 4의 배수 차수들이 큰 값을 가지고 나타나게 된다. 변형량의 크기가 작은 것은 전체에 미치는 영향이 거의 없으므로 변형량이 10⁻¹¹mm 이상인 시간 고조파의 값들만을 고려하여 비교해 보았다. 그림 3은 요소의 mode shape의 개수가 30일 때 시간고조파 성분을 나타낸 것으로 4의 배수 차수 차례대로 0.53 %, 6.48%, 14.17%, 11.79% 등의 오차율을 가지고 있었다. 그림 4는 요소의 mode shape의 개수가 50 일 때를 나타내고 있으며 오차는 0.04%, 1.53%, 3.45%, 20.8% 등이었다. 요소의 mode shape 개수가 100일 때는 그림 5에 나타나있으며 오차는 1.15%, 0.86%, 5.25%, 15.62% 등이었다. 전체적인 경향은 저차수에서 mode shape의 개수가



〈그림 3〉 30 mode까지 고려 결과 비교



〈그림 4〉 50 mode까지 고려 결과 비교



〈그림 5〉 100 mode까지 고려 결과 비교

〈표 2〉 각 해석 방법 별 해석 시간과 오차

[M : mode shape의 개수]				
	구조해석	M : 30	M : 50	M : 100
해석시간 [min]	125	13	17	23
전체 평균오차 [%]	-	14.78	11.17	10.11

작아도 잘 맞으나 고차수로 갈수록 오차가 커졌고 mode shape의 개수가 많아지면 고차수에서도 오차가 줄어들었다. 표 2는 각 해석별 해석시간의 비교와 일반적인 구조해석을 기준으로 평균오차를 비교한 것이다. 해석시간은 일반적인 구조해석법은 125분이 소요되었고 mode shape의 개수 30에서 13분, 50이 17분, 100이 23분이 걸려 mode superposition이 최소 1/6 정도의 시간 저감 효과가 있다. 또한 변형량이 10⁻¹¹mm 이상인 시간 고조파 차수만을 고려하여 오차를 평균 냈을 때 요소의 mode shape의 개수가 100일 때 10.11%로 가장 작은 오차를 나타냈고 50, 30 일 때는 각각 11.17%, 14.78%가 나왔다. 그러므로 요소의 mode shape의 개수가 많을수록 전체 평균오차가 작음을 확인하였다.

3. 결 론

전동기에서 전자기력 가진원의 진동 및 소음을 분석하기 위해 수행되는 구조해석에서 해석시간의 저감을 위해 time step의 결정과 mode superposition을 적용하였다. time step을 늘리면서 전체 해석 데이터의 개수를 줄였고 이때 신뢰성을 확인하기 위해 1%이내의 오차를 가지는 time step의 결과와 비교하였다. 그리고 mode superposition 적용 시 저감되는 시간을 비교하였고 결과도 고조파 분석을 통해 비교를 하였다.

비교 결과 전기적 한 주기에 time step의 수를 800개로 하고 해석한 결과를 2000개로 보간한 것과 time step의 수를 2000개로 해석한 것의 결과는 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 mode superposition을 요소의 mode shape이 30, 50, 100 단계적으로 적용하여 비교해 본 결과 각각 14.78%, 11.17%, 10.11%의 오차를 가지고 있고 해석시간은 일반적인 구조해석 시 걸리는 시간의 1/6 정도로 줄어드는 것을 확인하였다.

결론적으로 v 차 고조파 성분에 8개의 데이터로 표현하여 time step을 결정하고 mode superposition으로 요소의 mode shape을 100으로 제한하여 해석을 수행하면 오차 10%정도의 타당한 결과를 도출하면서 시간을 1/6로 감소시킨다.

[참 고 문 헌]

- [1] Ji Ying, Liying Xue, "Macromodeling of the Electrostatically Actuated Circular Plate Based on Mode Superposition Method", ICEMI, 9th, pp. 4-59-4-64, 2009
- [2] Linwei Wang, Heye Zhang, Pengcheng Shi, "Computational Complexity Reduction via Mode Superposition: Application to Biomechanics-based Nonlinear Cardiac Deformation Recovery", IEEE International Conference, 17th, pp. 4417-4420, 2010
- [3] Naumann, M., Mehner, J., Recent "Developments in Reduced Order Modeling Based on Mode Superposition Technique", EuroSimE International Conference, 12th, pp. 1/6-6/6, 2011
- [4] Eibert, T.F., "Periodically Loaded Waveguide Analysis by Propagating and Evanescent Mode Superposition", EuMC, pp. 1271-1274, 2009
- [5] Sang-Ho Lee, Jung-Pyo Hong, Sang-Moon Hwang, Ji-Young Lee, and Young-Kyoun Kim, "Optimal Design for Noise Reduction in Interior Permanent Magnet Motor", Industry Applications Society 40th Annual meeting, 2006