

고속 유연한 로봇 운동 구현을 위한 BLDC Motor의 진동 최소화 설계

論 文
54B-7-4

A Study on the Vibration Minimization for Realizing the High-Speed and Flexible Motion in BLDC Motor of Robot

李 東 燁* · 金 奎 卓[†] · 鄭 遠 志** · 金 成 炫***
(Dong-Yeup Lee · Gyu-Tak Kim · Won-Ji Jung · Sung-Hyun, Kim)

Abstract - This paper presents the optimal design for reducing the rotor inertia in order to improve the driving characteristic of BLDC motor for robots. The parallel Genetic Algorithm is performed to rotor inertia minimization in optimal design. Also, velocity profile with finite jerk method is introduced to reduce vibration of BLDC motor. As a result, a torque characteristic is same although rotor inertia is reduced to 2/3 compared with prototype model. And, maximum vibration value is reduced by 63.4[%] according to the application of finite jerk method.

Key Words : BLDC Motor of Robots Driving, Finite Jerk, Vibration Minimization, Low Inertia Design, Genetic Algorithm

1. 서 론

최근 기계·전기·전자·제어 등이 융합된 메카트로닉스 기술의 총아인 로봇 산업(Robot Technology)은 IT, BT에 이어 거대시장을 형성하는 차세대 핵심 산업으로 급부상함에 따라, 공작기계 및 로봇을 구동하는 AC 서보모터를 비롯한 구동용 전동기의 저진동, 저소음, 고효율 및 고응답성이 해결되어야 하며, 이를 위해서는 전기, 전자, 기계 및 제어분야 관련 기술의 종합적 접근이 요구된다[1-3].

BLDC 모터에 대한 연구는 많이 이루어져 폐슬롯을 이용, 코깅 토크를 근본적으로 제거시키는 단계까지 큰 발전을 이루게 되었다. 그러나, 토크 리플이 최소화 된 BLDC 모터라 할지라도 로봇 등과 같이 가, 감속 운전을 자주 행하여야 하는 시스템에서는 기동 및 정지 시는 물론 속도가 변하는 시점 즉, 가속구간에서 등속구간으로, 등속구간에서 감속구간으로 가속도가 급변하는 지점, 즉 변곡점에서 큰 진동이 발생한다[4,5]. 이것은 가속도가 불연속이 됨에 따라 가속도의 미분치인 Jerk가 무한한 값을 갖게 되어 일어나는 것이다. 따라서, 고속 유연한 운동을 필요로 하는 로봇 등과 같은 시스템에서는 코깅 토크에 의한 토크 리플 최소화는 물론, 가·감속 운전 시 진동저감을 위한 최적의 속도 Profile을 도출하여야 한다[4,5].

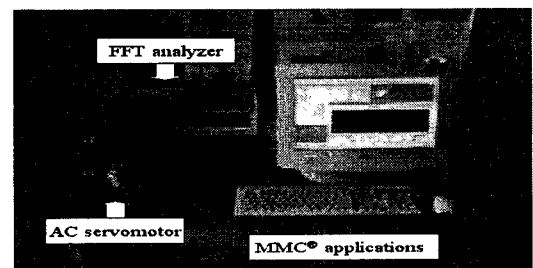
이와 같이 Finite Jerk을 이용한 가, 감속 운전을 시행하여도 급격한 가, 감속 운전을 필요로 하는 로봇 등에 BLDC 모터를 적용할 경우에는 기동시 및 정지시는 물론 가속도가 급변하는 지점, 즉 변곡점에서 관성에 의한 임펄스 충격이 크게

나타나 진동이 매우 커 제어 성능이 떨어지는 문제점이 발생한다[5].

따라서, 본 논문에서는 기존 BLDC 전동기의 고속·유연한 로봇 운동 구현을 위하여 가속도의 미분치인 Jerk가 유한한 값을 갖는 finite jerk방식으로 가·감속 운전을 시행하였으며 속응성의 향상 및 진동 최소화를 위하여 최근 최적화 기법으로 공학분야에 광범위하게 사용되고 있는 유전알고리즘을 이용하여 구동원인 BLDC 모터의 저관성화 설계를 수행하였다.

2. BLDC 전동기

2.1 BLDC 전동기의 초기 모델



(a) 실험장치



(b) 외형도

그림 1. 시험 장치
Fig. 1. Test Apparatus

[†] 교신저자, 正 會 員 : 昌原大學校 電氣工學科 教授 · 工博
E-mail : gykim@sarim.changwon.ac.kr
* 正 會 員 : 昌原大學校 電氣工學科 博士課程
** 非 會 員 : 昌原大學校 機械設計工學科 教授 · 工博
*** 非 會 員 : 昌原大學校 機械設計工學科 碩士課程
接受日字 : 2005年 5月 3日
最終完了 : 2005년 6月 20日

본 논문에서는 일반적으로 사용되는 서보모터용 BLDC 전동기를 기본모델로 하였다.

그림 1은 본 연구에서 적용한 BLDC 모터의 외관 및 실험 장치이며, BLDC 모터는 내전형(Interior rotor type), 8극 12 슬롯의 구조이다. 기본 모델의 사양은 표 1과 같다.

표 1. 기본 모델의 사양

Table 1. Specifications of Initial Model

상전류[A]	1.74
정격회전수[rpm]	3000
정격토크[kg.cm]	6.5
효율[%]	87.1
공극[mm]	0.6
영구자석 두께[mm]	3
영구자석의 잔류자속밀도[T]	1.2
회전자직경[cm]	3
계자축방향 길이[cm]	1.76
회전자관성[kg.cm ²]	0.904
정격출력[W]	200
입력전압[V]	220

3. BLDC 모터의 동적 특성 파악

3.1 사다리꼴 속도곡선

일반적인 사다리꼴 속도곡선은 서보모터에 비교적 널리 이용되는 방법으로 통상적으로 계산을 쉽게 하기 위해 가속 시간과 감속시간을 같도록 한다.

그림 2는 일반적인 사다리꼴 속도곡선을 보여준다. 그러나, 그림 2와 같은 사다리꼴 속도곡선을 이용할 경우, 속도가 급격하게 변화하는 부분에서 가속도가 갑자기 변함에 따라 BLDC 모터 뿐만 아니라 로봇에 진동 및 충격이 발생한다.

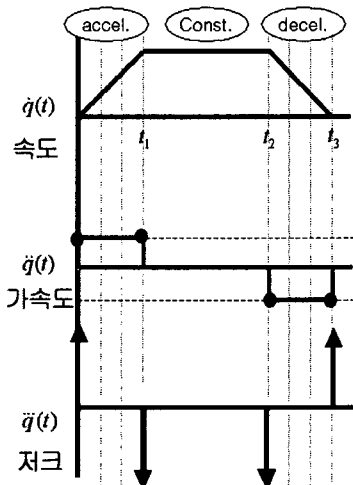
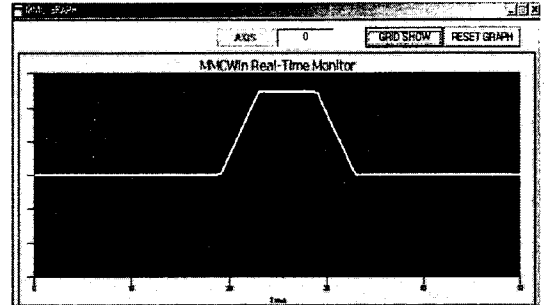
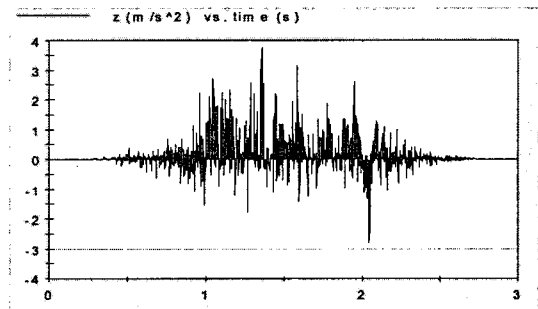


그림 2. 사다리꼴 속도곡선
Fig. 2. Trapezoidal velocity curve

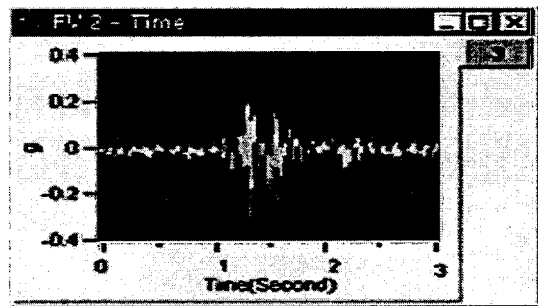
그림 3은 기본 모델에 사다리꼴 속도곡선을 적용하여 가, 감속 운전시의 진동 특성을 나타낸 것이다. 이 때의 동특성 해석은 상용 프로그램인 visual Nastran 4D를 이용하였으며 진동은 FFT(Fast Fourier Transform)Analyzer로 측정하였다. 실험 및 계산시 BLDC 모터의 회전속도는 3000[rpm]이며, 가, 감속 및 등속 시간은 1[sec]로 설정하였다. 이때의 P, D gain은 각각 10 및 2로 설정하였다.



(a) 속도



(b) 진동 이론치



(c) 진동 실험치

그림 3. 진동 시험 결과
Fig. 3. Test result of Vibration

그림 3에서 알 수 있는바와 같이 최대 진동 가속도는 0.383[G]으로 계산되었으며 이때의 실험치는 0.38[G]로 매우 잘 일치하였다. 그러나 가속도가 급변하는 지점에서 진동이 크게 발생하였다. 이와 같이 기존의 사다리꼴 속도 구동 방식으로 속도 입력을 주었을 경우, 최초 정지 마찰을 이기고 구동하기 위한 관성 때문에 구동 초기 단계에 진동 가속도가 현격하게 크게 됨을 알 수 있다. 그러므로 가속도를 급격하게 변화시키지 않는 새로운 속도 곡선이 필요하다.

3.2 Finite Jerk 방식의 속도곡선

일반적으로 사다리꼴 속도곡선에서 가속도의 미분치인 Jerk는 불연속이면서 크기가 무한대가 된다. Jerk는 가속도 값의 변화율로써 순간 작용하는 시동 토크를 대변하며 이 토크가 클수록 시스템에 가해지는 부담이 커지게 되며, 이 시동 토크로 인하여 시스템에 진동이 크게 발생하게 된다. 이를 보완하기 위한 방법으로 Finite Jerk방식이 제안되었으며 본 논문에서도 이를 적용하였다[5]. Finite Jerk방식의 속도 특성 곡선은 그림 4와 같은 패턴을 가진다.

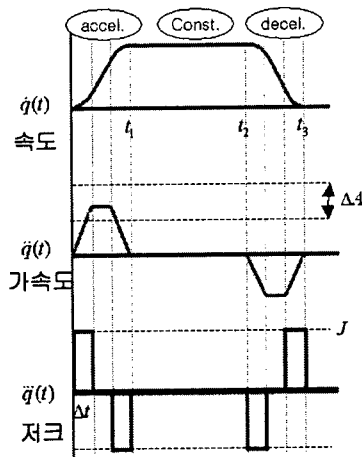


그림 4. Finite Jerk 속도 곡선
Fig. 4. Velocity curve of finite jerk

그림 4에서 Jerk 성분이 Δt 구간에 J 크기 만큼의 유한한 값을 갖도록 했을 경우, 가속도는 일정하지 않고 사다리꼴 형태를 가지게 되며 이로 인하여 속도는 S커브 곡선으로 된다. 이를 통해 최대 허용 가속도의 범위 내에서 가장 유연한 속도를 구현할 수 있게 된다[5].

그림 4의 가, 감속 및 정속시간은 사다리꼴 구동 방식의 입력값과 동일하게 하였다. 단 가, 감속 시 finite jerk시간은 0.3[s]로 설정하였다. 즉, 가, 감속 시, 속도 곡선이 절환 되는 시간은 0.3[s]동안은 2차 함수로, 0.4[s]동안은 1차 직선 함수로, 나머지 0.3초 동안은 다시 2차함수로 연속적인 구간 절환이 되도록 하였다

그림 5는 Finite Jerk방식을 적용하기 위한 제어 알고리즘이다. Finite Jerk 방식의 제어 알고리즘은 실제 MMC² 자체에서 제공되는 라이브러리를 수정하여 Visual C++의 디지털 코딩을 통하여 모터의 서보 시스템에 장입 정보를 프로그램 코딩하였고, 속도 정보를 상수가 아닌 해당 시간 구간에 대한 함수 형태를 주어 Finite Jerk 방식의 속도 정보를 서보팩으로 통신하도록 하였다. 그림 6은 본 논문에서 적용한 Finite Jerk방식에 의한 진동값에 대한 시뮬레이션 및 실험 결과이다. Finite Jerk 방식을 적용한 경우, 최대 진동 가속도는 0.295[G]로 사다리꼴 속도 곡선 적용 시와 비교할 때 진동은 22.98[%] 감소하였으며, 이때의 실험치는 0.29[G]로 매우 만족스러운 결과를 얻었다.

즉, 두 가지 경우의 속도 패턴에 의한 시뮬레이션 결과와 실제 실험치가 거의 오차가 없는 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 그러나, 가속도의 미분치인 Jerk가 유한한 값을 갖는 finite jerk방식의 적용만으로는 고속·유연한 로봇 운동의 구현은 다소 미흡하였다.

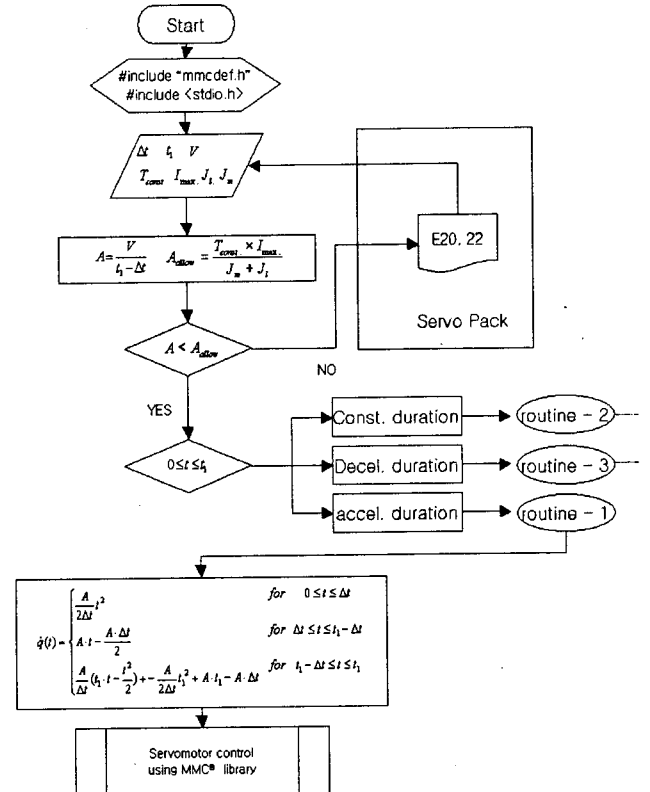
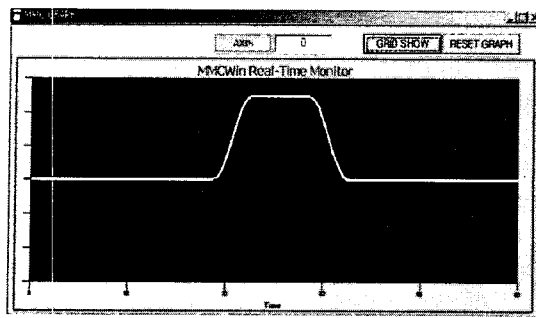


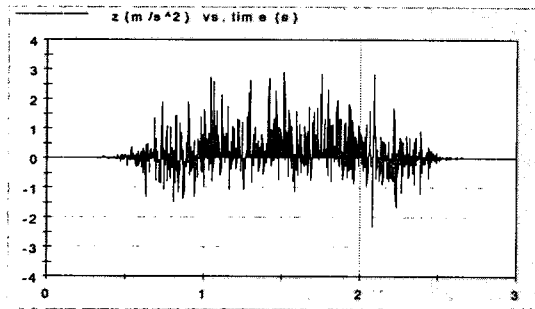
그림 5. Finite Jerk 제어 알고리즘
Fig. 5. Control algorithm of Finite Jerk

4. 유전알고리즘을 이용한 회전자 관성의 최소화

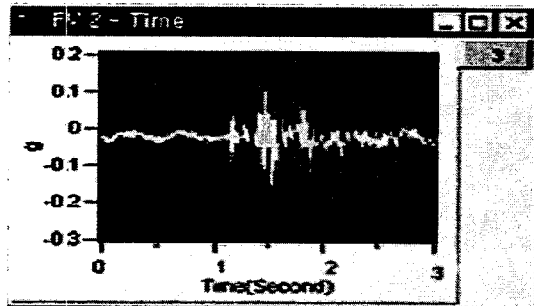
3장의 가, 감속 특성에서 알 수 있는바와 같이 구동 모터의 회전자 관성으로 인하여 구동 초기 단계에서 진동 가속도가 크게 나타난다. 따라서, 고속·유연한 로봇 운동을 실현하기 위하여는 구동원인 BLDC 모터의 저관성 설계가 필수적이다[1,2]. 따라서, 본 논문에서는 BLDC 모터의 속응성 향상 및 진동 최소화를 위하여 최근 최적화 기법으로 공학분야에 광범위하게 사용되고 있는 유전알고리즘을 이용하여 구동원인 BLDC 모터의 저관성화 설계를 수행하였다[6,7]. BLDC 모터의 속응성 향상 및 진동 최소화를 위한 방안으로는 폐슬롯의 사용 등 여러 가지 방법이 고려될 수 있으나 기존 모터의 특성 실험치와 비교하기 위하여 슬롯의 모양, 공극 등은 변화시키지 않고 회전자 관성의 저감 설계로만 극한하였다. 이 때 BLDC 모터의 특성 해석은 설계 파라미터 변화에 능동적으로 대처할 수 있는 퍼미언스법과 자기 등가회로법을 사용하였으며, 최적 설계치에 대하여 정밀기기 해석법으로 적립된 유한요소법을 이용하여 타당성을 검증하였다.



(a) 속도



(b) 진동 이론치



(c) 진동 실험치

그림 6. Finite Jerk에 의한 진동 특성
Fig. 6. Vibration characteristics of Finite Jerk

4.1 회전자 관성의 최소화

BLDC 전동기는 제어성능이 우수하여 고속, 유연한 움직임을 필요로 하는 분야에 많이 쓰인다. 이런 유연한 움직임을 위해서는 기동시, 정지시, 가감속시의 제어 및 운전특성이 좋아야 한다. 또한 이런 제어 운전특성은 BLDC 전동기의 회전자 관성에 많은 영향을 받는다. 회전자 관성에 관한 식은 다음과 같다.

$$\text{회전자 관성(Rotor Inertia)} = \frac{1}{4}GD^2[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$$

(G: 회전자 질량, D: 회전자 직경=계자직경)

이때, 회전자 질량 계산시 회전자 각 부의 밀도와 부피를 고려하여 계산하였다.(Nd 자석의 밀도 : 7.5 g/cm³ 규소강판의

밀도(Fe) : 7.9 g/cm³) 회전자 질량은 다음 식을 이용하였으며 질량 계산 시 Shaft 질량과 홀센서의 질량은 일정하게 두었다.

$$\begin{aligned} \text{회전자 전체질량} &= \text{영구자석 질량} + \text{요크 질량} \\ &+ (\text{Shaft 질량} + \text{홀센서의 질량}) \end{aligned}$$

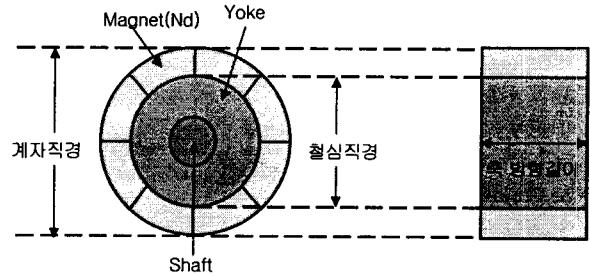


그림 7. 회전자 부피계산
Fig. 7. Calculation of Volume of Rotor

회전자의 질량은 설계시 형상치수의 변화에 따라 변하므로 회전자 질량계산에 관한 부분을 수식화하여 회전자 관성 계산에 적용하였다.

4.2 유전알고리즘에 의한 회전자 관성 최소화

일반적으로 전동기의 설계시 그 용도에 따라 설계기준이 달라지며 본 논문에서는 앞서 선정된 기본모델의 사양과 특성을 고려하여 설계변수를 선정하였다. 이때의 목적함수로는 진동저감을 위하여 회전자 관성의 최소화로 설정하였다.

그러나 회전자 관성만을 목적함수로 선정할 경우 전동기의 효율이 감소할 수 있으므로 본 최적화에서의 제약조건을 기본 모델의 회전자 관성 0.917[kg.cm²] 이하로, 효율에 대하여 87.1[%] 이상으로 제약조건을 설정하였다.

BLDC 전동기의 특성에 영향을 주는 설계변수들은 많이 존재한다. 이 변수들 중에는 전동기의 크기와 극수, 슬롯수와 같은 구조적인 변수들과 철심재질, 자석재질과 같은 재질변수 그리고 그 밖의 여러 경험적인 변수들이 있다. 따라서, 본 논문에서는 재질변수 및 경험적인 변수들은 초기모델의 사양을 참조한 고정된 값으로 하고 목적함수인 회전자 관성과 효율에 크게 영향을 미치는 회전자 직경, 자석두께, 계자축방향 길이 및 전기자 권선수를 설계변수로 선정하였다[4,5,6,7,8].

유전 알고리즘의 적용시 빠른 수렴으로 최적화 시간을 단축시키기 위해서는 설계변수의 최적화 탐색범위의 설정이 요구된다. 따라서, 본 논문에서는 최적화 탐색범위는 기준모델 설계치의 ± 10[%]로 설정하였으며 이를 표 2에 나타내었다.

4.3 최적화 수행결과

회전자 관성과 효율에 대해서 앞서 제시한 제약조건을 두고, 설계변수의 탐색범위를 표 2와 같이 반영하여 유전알고리즘에 적용하였다. 그림 8에 적용한 유전알고리즘의 최적화 수렴 과정을 나타내었으며 최적설계시의 파라미터는 표 3과 같다.

표 2. 설계변수의 탐색범위

Table 2. Searching Range of Design Parameters

설계변수	탐색범위
회전자 직경(X1)	$3.5 \leq X1 \leq 4.5$
자석 두께(X2)	$0.25 \leq X2 \leq 0.35$
계자축방향 길이(X3)	$1.55 \leq X3 \leq 1.95$
전기자 권선수(X4)	$300 \leq X4 \leq 360$

유전알고리즘에 의한 최적 설계 시, 회전자 관성이 기본모델에 비해 34.3 [%] 감소를 하였으며, 이때 효율은 표 3과 같이 0.1[%] 증가 하였다.

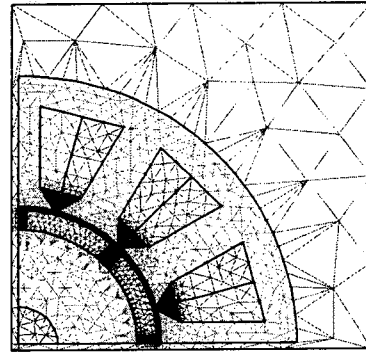


그림 9. 요소분할도
Fig. 9. Element subdivision

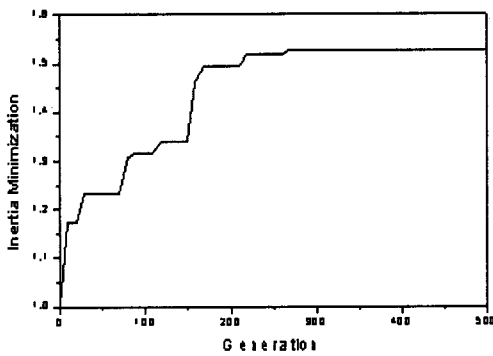


그림 8. 유전알고리즘의 수렴특성
Fig. 8. Convergence characteristic of mode

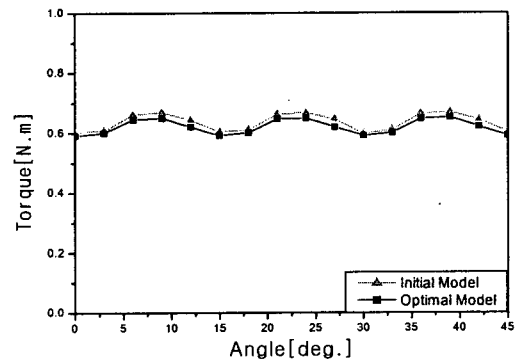


그림 10. 토크 특성
Fig. 10. Torque characteristic

표 3. 유전알고리즘에 의한 최적화 수행결과

Table 3. Result of the Optimization by Genetic Algorithm

설계변수 및 목적함수	초기 모델	최적모델
회전자 직경(X1)[cm]	3.93	3.54
자석 두께(X2)[cm]	0.3	0.33
계자축방향 길이(X3)[cm]	1.76	1.58
전기자 권선수(X4)[Turns]	328	360
회전자 관성[kg.cm ²]	0.917	0.602
효율[%]	87.1	87.2

4.4 특성해석

유전알고리즘에 의한 최적화 수행 후, 추출된 설계변수들은 검증을 위해 유한요소법으로 특성해석을 수행하였다. 그림 9는 유한요소해석을 위한 요소분할도이다. 그림 10은 초기 모델과 최적 모델의 토크특성을 비교한 것이다. 최적 모델의 발생 토크가 기본 모델의 토크와 다소 다르게 나타난 것은 최적 모델의 권선수가 328[회]에서 360[회]로 증가하여 리액턴스의 증가로 인하여 전압과 전류의 위상이 달라졌기 때문이다.

코깅 토크를 계산한 결과를 그림 11에 나타내었다. 코깅 토크도 최적 모델이 감소하였으며 토크 리플도 줄었다. 그러

나, 코깅토크는 토크 리플로 작용하여 BLDC 모터의 진동에 치명적인 영향을 미치게 되므로 코깅 토크를 더욱 더 줄이기 위하여 모터의 회전자 영구자석을 1/2 슬롯피치 만큼 스큐를 시행하였다. 그림 12는 1/2 스큐를 시행한 후의 토크특성이다. 스큐를 시행하기 전과 비교하여 토크의 크기에서는 약간의 감소를 보였지만, 반면에 코깅 토크는 현저히 감소하여 토크 리플이 크게 감소하였다.

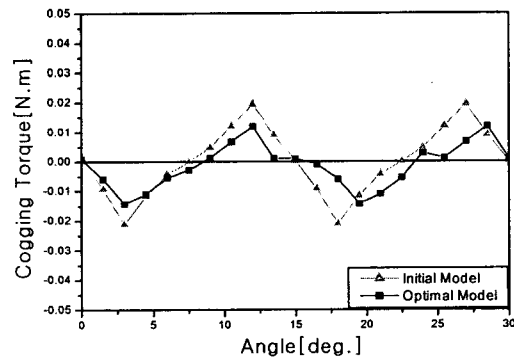


그림 11. 코깅 토크
Fig. 11. Cogging torque

진동 가속도의 최대치는 0.187[G]로 Finite Jerk 방식을 적용한 기본 모델의 최대 진동치와 비교시 63.4[%]로 대폭 감소하였으며 이를 그림 13에 나타내었다. 한편, 기본 모델에 기존의 사다리꼴 속도 구동방식에 의한 진동치와 비교하면 48.8[%]로 대폭 감소하여 만족스러운 결과를 얻었다.

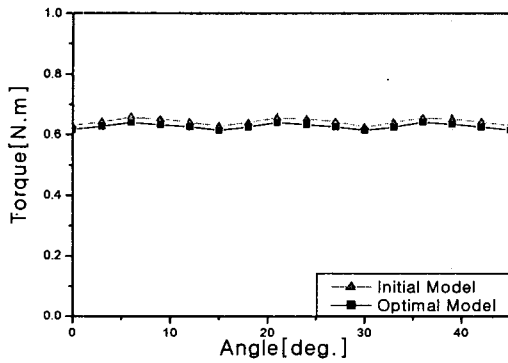


그림 12. 1/2 스큐를 적용한 토크특성
Fig. 12. Torque characteristic(with 1/2 Skew)

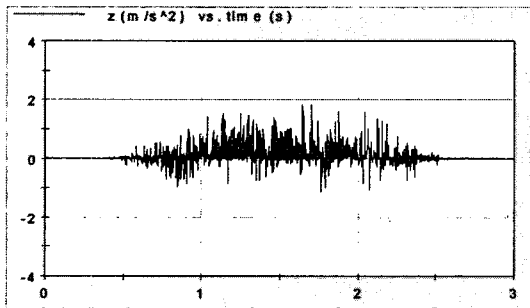


그림 13. 최적 설계 모델의 진동특성
Fig. 13. Vibration characteristic of optimal model

5. 결 론

본 논문에서는 로봇 구동용으로 많이 사용되는 BLDC전동기에 대하여 속응성의 향상 및 진동 최소화를 위하여 유전알고리즘을 이용한 관성 최소화 설계를 수행하였으며, 실제 구동시 인가된 속도 프로파일에 의한 진동의 최소화를 위하여 Finite Jerk방식의 속도 패턴을 제시하였다.

그 결과 관성 최소화 최적 설계시 기존의 서보 모터에 비해 관성이 2/3으로 감소하면서도 동일한 토크 특성을 얻을 수 있었으며, 관성의 감소로 인하여 속응성이 향상되었다. 또한, 최적 모델의 경우, Finite Jerk 방식의 속도 구동으로 기본 모델에 비해 진동 최대치가 63.4[%]로 대폭 감소하였다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 출연금 등으로 수행한 지역 전략산업 석박사 연구인력 양성 산업 및 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2003-B-271) 주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

- [1] Duane C. Hanselman, Brushless Permanent-Magnet Motor Design, McGraw -Hill Inc., 1994.
- [2] J. R. Hendershot Jr and TJE Miller, Design Of Brushless Permanent-Magnet, Oxford Magna Physics, 1994
- [3] T. Kenjo, S. Nagamori, Permanent Magnet and Brushless DC Motors, Sogo Electronics Publishing Company, 1984.[2] 大川 光吉, 永久磁石回轉機の設計・特性計算法, TDK CORPORATION, 1984.
- [4] Gyu-tak Kim, et'al 4, "Vibration minimization of PM-LSM by using the Jerk continuity acceleration curve", ICEMS '2004, PF-3, pp. 163, 2004. 11.
- [5] 김규탁 외 2인, "유전알고리즘을 이용한 로봇구동용 BLDC 형상최적화", '04 전기학회 하계학술대회논문집 B, pp 932 ~ 934, 2004. 7.
- [6] 진강규, "유전알고리즘과 그 응용", 교우사, 2002.
- [7] Mitsuo Gen, Runwei Cheng, "Genetic algorithms and engineering design", John Wiley & Sons. INC.

저 자 소 개

이동엽(李東燮) : 전기학회 논문지 Vol. 54, No. 2 참조

김규탁(金奎卓) : 전기학회 논문지 Vol. 54, No. 2 참조

정 원 지(鄭遠志)

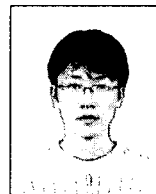


1959년 10월 25일생. 1982년 서울대학교공대 기계공학과 졸업. 1984년 한국과학기술원 생산공학과 졸업(석사). 1992년 포항공과대학교 기계공학과 졸업(공학). 1995년~1996년 미국 하와이대학 Post Doc.. 현재 창원대학교 공대 기계설계공학과 교수.

Tel : 055-279-7574, Fax : 055-263-5221

E-mail : wjchung@sarim.changwon.ac.kr

김 성 현(金成炫)



1979년 9월 23일생. 2002년 창원대 공대 기계설계공학과 졸업. 2005년~현재 동 대학원 기계설계공학과 석사과정

Tel : 055-267-1138, Fax : 055-263-5221

E-mail : kimsh5101@yahoo.co.kr