

다물체 동역학을 이용한 DC 모터 소음 저감에 관한 연구

정일호[†]·박태원*·박지연**

The Noise Reduction of A DC Motor Using Multi-body Dynamics

Il-Ho Jung, Tae-Won Park, Ji-Yeon Park

Key Words: DC motor(디씨 모터), Hertz Contact(헤르쯔 접촉), Brush Noise(브러쉬 소음), Multi-body Dynamics(다물체 동역학), Durability Test(내구 시험)

Abstract

The DC Motor of a vehicle may cause noise and vibration due to high-speed revolution, which can make a driver feel uncomfortable. There have been various studies that attempted to solve these problems, mostly focusing on the causes of noise and vibration and the means of preventing them. The CAE methodology is more efficient than a real test for the purpose of looking for various design parameters to reduce the noise and vibration of the DC motor. In this study, a design process for reducing brush noise is presented with the use of a computer model, which is made by using a multi-body dynamics program (DADS). The design parameters to reduce the brush noise and vibration were proposed using a computer model. They were used to reduce the noise and vibration of a DC motor and verified by the test results of a fan DC motor in a vehicle. This method may be applicable to various DC motors.

1. 서 론

DC 모터는 구조와 작동원리가 비교적 간단하며, 회전제어가 쉬워 제어용 모터로서 아주 우수한 특성을 가지고 있고, 저렴한 가격으로 여러 분야에서 널리 사용되고 있다. 하지만 DC 모터는 고속으로 회전하기 때문에 시스템에 따라 작동 중에 소음/진동 문제를 발생시킬 수 있다. 특히 자동차용 구동 장치나 가전제품 등에 사용되는 DC 모터는 제품 특성상 소음/진동이 있을 경우 사용자에게 불쾌감을 유발할 수 있어 설계 단계

에서 이 부분에 대한 적극적인 대처가 필요하다. 기존 연구 자료의 검토를 통해 DC 모터 소음/진동의 주요 원인은 정류자(Commutator)와 브러쉬(Brush) 사이의 동적 상호작용임을 알 수 있었다. DC 모터는 구조상 브러쉬와 정류자 사이에 기계적 접촉이 발생하여 마찰이 발생한다. 이 마찰이 DC 모터의 가장 주된 소음/진동원이 되며, 이로 인한 소음을 보통 브러쉬 소음이라 부른다. 이외에도 아마추어(Armature)의 불평형, 아마추어 축과 베어링 사이의 상호 작용 등의 소음/진동 발생 요인이 존재한다.^(1,2)

본 연구는 현재 개발 중인 차량의 팬에 사용되는 DC 모터의 동특성을 파악하기 위하여 DC 모터의 다물체 동역학 모델을 제안하고, 해석을 수행하였다. 해석 결과 중 모터 구성 부품간의 반력을 주로 관찰하였다. 이는 부품간의 반력이 결국은 모터에서 발생하는 소음과 진동에 가장 밀접한 관련을 갖기 때문이다. 브러쉬 소음은 브러

[†] 아주대학교 대학원 기계공학과

E-mail : ilhojung@hotmail.com

TEL : (031)219-2952 FAX : (031)219-1965

* 아주대학교 기계공학부

** 아주대학교 대학원 기계공학과

쉬와 정류자 사이의 반력과 깊은 관련이 있음은 일반적으로 잘 알려진 사실이다. 동역학 해석은 DC 모터 설계자들이 경험적으로 모터 소음/진동과 관련이 있다고 생각하는 설계 변수들의 영향을 분석하였다. 이는 해당 설계 변수가 반력에 미치는 영향을 밝히기 위함이다. 마지막으로 시험 결과와 함께 DC 모터의 소음/진동을 저감할 수 있는 설계 변수의 개선 방안을 제시하였다.

2. DC 모터 모델링

본 연구에서 구현된 DC 모터 모델은 크게 4개의 어셈블리(Assembly)로 이루어져 있다. 모터의 중심부에 위치한 아마추어 어셈블리와 이를 지지하고 있는 스테이터(Stator) 어셈블리와 브라켓(Bracket) 어셈블리, 그리고 아마추어에 전류를 공급하며, 소음과 진동 측면에서 주목되어 지고 있는 브러시를 포함하는 스테이(Stay) 어셈블리로 구성되어 있다. 각각의 부품에 대한 형상은 Fig. 1과 같다.

DC 모터의 실제 동특성을 구현하기 위해 접촉(Contact) 메커니즘을 이용하여 동역학 모델을 구현 하였다. 본 모델에서의 접촉은 아마추어와 양 끝단에 위치한 볼베어링과 메탈베어링에서 각각 1개, 아마추어의 중심 하단부에 위치하여 입력되는 전류를 전달받는 정류자와 브러시 사이에 4개의 접촉 메커니즘으로 이루어져 있다.

Fig. 2에서는 DC 모터 전체 모델의 구성을 보여주고 있다. DC 모터 동역학 모델에서 가장 중요한 접촉 메커니즘을 포함하여 다음과 같이 구성되어 있다.

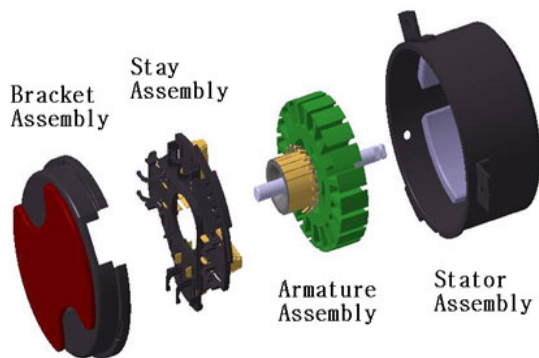


Fig. 1 CAD model of DC motor

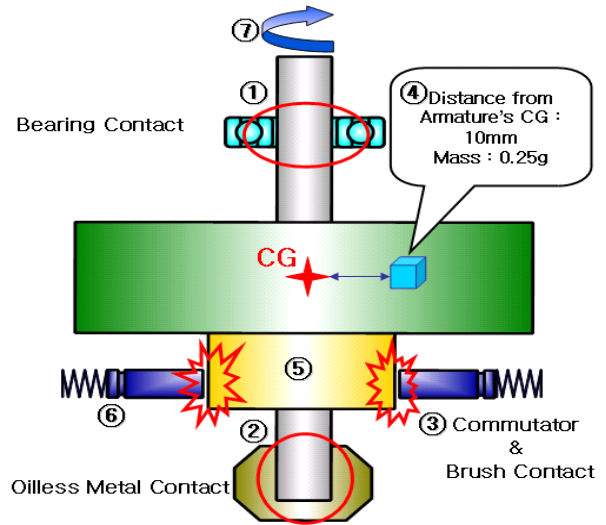


Fig. 2 Schematics of Dynamics model

① 볼 베어링 접촉, ② 메탈 베어링 접촉, ③ 브러시(4개)와 정류자 접촉은 틈새(clearance)를 구현하기 위하여 접촉 메커니즘이 구현되었다. 이에 대해서는 여러 경우에 대한 폭넓은 해석을 수행할 수 있도록 모델링 되었다. 이 모델을 통해 틈새의 변화에 따른 동특성을 살펴볼 수 있다. 또한, 마찰계수 등이 모터의 동특성에 미치는 영향을 평가할 수 있다. 추가적으로 ①과 ②의 축 방향의 위치를 변화하여, 아마추어 축 길이의 변화에 따른 동적 특성도 살펴 볼 수 있게 하였다.

④ 아마추어 불평형(Unbalance)은 제품 생산 과정에서 필연적으로 발생하게 되는데 이는 통상 밸런싱(Balancing) 장치를 이용하여 보정하게 된다. 하지만 100% 밸런싱은 현실적으로 불가능하다. 이 불평형은 특히 모터 진동과 관련되어 있다. 본 모델에서는 더미(Dummy) 불평형 질량을 아마추어에 고정하였는데, 그 질량과 축으로부터의 위치를 변화시켜 불평형 질량이 소음/진동에 미치는 영향 평가를 할 수 있도록 하였다.

⑤ Fig. 3은 정류자의 단면으로 임의의 진원도(Roundness)가 부여된 형상을 보여주고 있다. 정류자의 단면은 난수(Random number)를 이용하여 각 바(Bar)의 중심으로부터 거리를 임의로 배치하는 방법을 사용하여 원하는 진원도를 구현할 수 있도록 하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 20개의 바와 틈새(slot)가 모두 구현되었다. 결론을 미리 언급하자면, 정류자의 진원도가 본 DC 모터의 소음 문제에 가장 큰 영향 인자로 작용하게 된다.

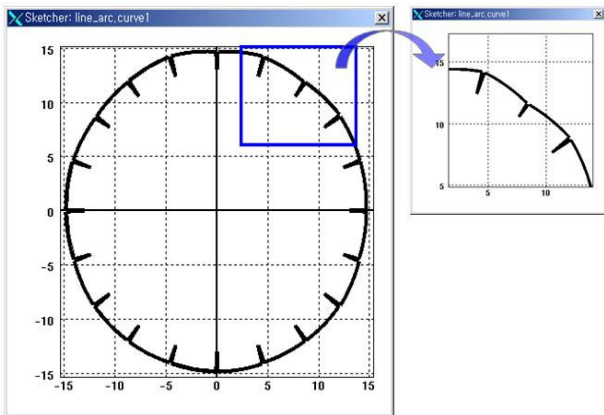


Fig. 3 The shape of commutator section

⑥ 브러시는 실제 DC 모터에서와 같은 동적 특성을 구현하기 위해, 각각 병진 조인트와 스프링으로 모델링 되어 있다. 4개의 브러시는 각각 독립적으로 정류자와 접촉을 하며 이를 통해 브러쉬와 정류자간의 상호 작용을 알아 볼 수 있도록 하였다. 또한, 각각의 스프링 강성의 변화에 따른 동적 해석도 가능하다.

⑦ 부하시 회전수인 2180 RPM을 유지하도록 간단한 제어 알고리즘을 이용하였다. 아마추어 바디의 각속도를 읽어 들여 각속도가 감소할 시에 토크를 발생시키면서, 각각의 접촉으로 인해 손실되는 회전력을 보상해 주어 실제 구동과 같은 상황을 재현해 주고 있다.

본 모델은 특징은 실제 DC 모터의 동특성을 구현하고자 접촉 메커니즘을 적용하였다는 점이다. 접촉을 이용한 운동해석법은 연속해석법(Continuous analysis)⁽³⁻⁵⁾을 사용하였으며, 접촉력의 계산은 헤르쯔 접촉(Hertz Contact) 힘 모델⁽⁵⁻⁷⁾을 사용하였다. 동역학 해석을 통하여 설계자들이 가장 많은 관심을 갖고 있는 5개의 설계 변수들에 대하여 DC 모터 동특성을 분석하였다.

3. 해석 결과

설계 변수를 바꾸어가며 1초 동안 아마추어를 2180 RPM으로 회전시키는 동역학 해석을 수행하였다. 본 동역학 해석 결과들 중에서 심도 있게 관찰되어야 할 결과는 소음과 진동에 대해 큰 영향력을 미칠 수 있는 브러쉬 반력과 축 반력이다. 여기서 브러쉬 반력은 4개의 브러쉬와 정류자 사이의 접촉 모델에서 발생하는 수직 접촉력 RMS(Root Mean Square)의 평균값이고, 축 반력은

축과 연결된 볼 베어링과 메탈 베어링의 수직 접촉력 RMS의 평균값이다. 브러쉬 반력은 소음에 상대적으로 큰 영향을 미치게 된다.⁽¹⁾ 물론 브러쉬와 정류자의 접촉으로 인해 진동적인 측면에도 영향을 미친다. 반면, 축 반력은 소음보다는 진동에 상대적으로 큰 영향을 주게 된다. 즉, 아마추어 측은 볼 베어링과 메탈 베어링과 접촉을 일으키며, 모터 자체의 진동에 영향을 준다. 그러나, 축 반력도 아마추어 불규칙 운동의 결과이므로 이 또한 소음에 영향을 주게 됨은 물론이다. 이를 감안하여 각각의 결과를 고찰하였다.

3.1 정류자 진원도

본 연구에서는 정류자의 20개의 바 중에서 가장 높은 바와 가장 낮은 바의 단차를 진원도로 정의하였다. Fig. 4는 정류자의 진원도에 따른 브러쉬와 축의 반력을 도시한 그래프이다. 진원도가 증가함에 따라 브러쉬와 축 반력이 모두 증가하고, 임계점 0.11 mm를 기점으로 브러쉬 반력이 급격히 증가함을 알 수 있다. 이는 브러쉬 소음이 급격히 증가 할 수 있음을 의미한다. 이상적으로 진원도가 0 mm인 경우나 0.001 ~ 0.003 mm 이하로 규정되는 양산 규격에서는 반력의 변화가 거의 없다. 이는 현재 진원도에 관한 양산 규격이 타당함을 나타낸다. 문제는 모터의 장시간 사용에 따른 정류자 진원도의 변화가 소음과 진동의 직접적인 요인이 될 수 있다는 것이다. 따라서 내구 후의 소음/진동을 개선하기 위해서는 정류자의 마모를 지연시키는 방안이 절실히 요구된다고 하겠다.

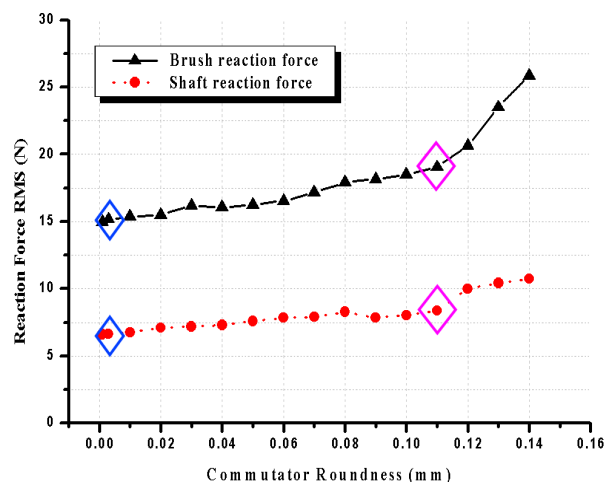


Fig. 4 Commutator roundness vs. reaction force

Table 1 Test results before and after durability

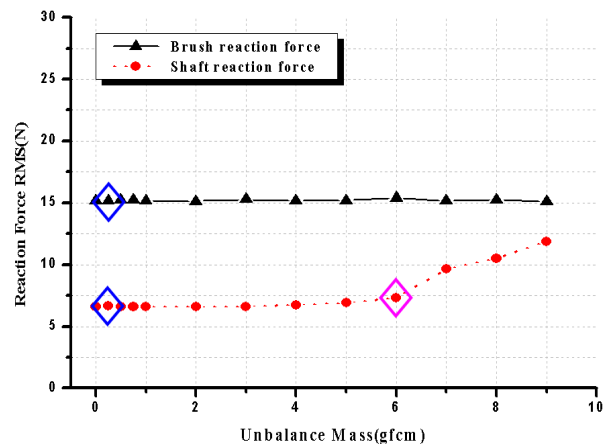
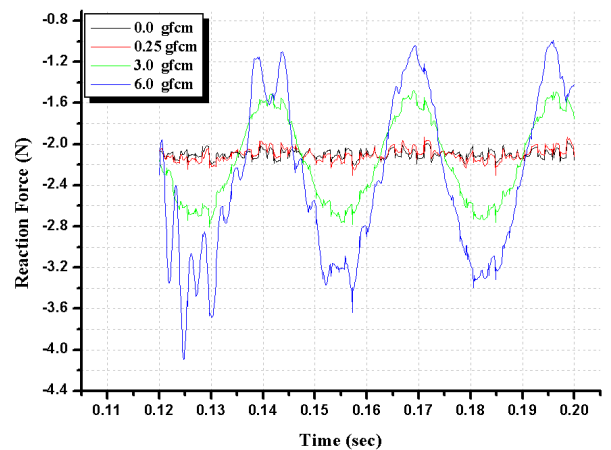
Group	Before		After	
	Roundness [mm]	Noise [dB(A)]	Roundness [mm]	Noise [dB(A)]
A1	Max.3	61.4	0.146	78.8
	Max.3	58.8	0.140	78.6
	Max.3	60.3	0.137	78.9
	Max.3	59.0	0.148	79.5
B1	Max.3	60.3	0.078	74.1
	Max.3	56.8	0.042	73.6
A2	Max.3	53.9	0.087	76.5
	Max.3	52.1	0.067	71.1

Table 1은 DC 모터 내구 전후의 시험 결과로 3 가지 그룹에 대하여 진행되었다. 첫 번째 그룹 A1은 기존 사양의 브러쉬와 정류자를 사용하여 시험한 결과이고, 그룹 B1은 그룹 A1과 다른 브러쉬를 사용한 시험 결과로 이 브러쉬는 타사에서 사용하고 있는 제품이다. 이 브러쉬는 벤치마킹용으로 입수하여 그 재질 구성을 정확히 알 수는 없었음을 밝힌다. 마지막 그룹 A2는 그룹 A1에 윤활유를 함유시켜 마찰 계수가 낮아진 정류자를 사용한 경우의 시험 결과이다. 위 시험 결과를 통하여 다음 사실을 확인하게 되었다. 우선 관심을 두어야 할 결과는 내구시험 후 진원도가 0.11 mm 이상인 그룹 A1은 나머지 두 그룹보다 진원도의 현저하게 크다는 점이다. 이는 일단 진원도가 커지면 브러쉬와 정류자 사이의 접촉력의 증가로 인하여 진원도가 점점 더 불량해지는 악순환이 계속됨을 의미한다. 이는 Fig. 4의 해석 결과와도 매우 잘 부합한다. 또한 그룹 A1은 다른 그룹에 비해 음압 레벨이 평균 5 dB(A) 정도가 높다는 사실이다. 이로 인하여 정류자의 진원도가 소음과 관련이 있다는 일반적인 사실을 수치적으로 확인할 수 있었다. 또한 보통 차량 팬용 DC 모터의 소음 규격이 내구시험 후에 73 ~ 75 dB(A) 이하인 점을 고려하면 본 모델의 정류자 진원도는 내구 시험 후에도 0.11 mm 이하로 관리되어야 함을 알 수 있다. 두번째 그룹 B1의 결과를 통하여 브러쉬의 재질이 달라지면 정류자의 마모 정도나 경향이 달라지고, 그로 인하여 소음이 저감 될 수 있음을 알 수 있다. 마지막으로 그룹 A2의 결과를 통해 정류자의 마찰 계수

를 낮추면 이 또한 정류자의 마모 정도를 줄어 들게 하고, 그로 인하여 브러쉬 소음이 저감 될 수 있음을 보여준다. 이 방안은 추가적으로 초기 소음까지도 낮출 수 있음을 확인 할 수 있다.

3.2 아마추어 불평형

동역학 모델링 과정에서 설명한 불평형 질량에 따른 반력의 변화는 Fig. 5에서 살펴볼 수 있다. 불평형 질량 0.2 ~ 0.25 gcm 이하가 보통 설계 규격이다. 불평형 질량이 작을수록 축 반력이 작아서 관련된 진동에 유리한 경향을 보여주고 있다. 그리고 임계점에 해당하는 6 gcm부터는 축 반력이 급격히 증가할 것으로 예상된다. 그러나 이 반력은 Fig. 6과 같이 평균값을 중심으로 등락을 반복해 RMS 값이 임계점까지 큰 변화가 없는 것처럼 보이므로 불평형 질량의 경우는 RMS 값과 피크 값을 모두 고려하여 판단해야 한다.

**Fig. 5** Unbalance mass vs. reaction force**Fig. 6** Shaft reaction force of metal bearing

불평형 질량의 변화에 따른 영향 분석 결과, 현재 설계 규격은 이상적으로 불평형 질량이 전혀 없는 경우와 RMS 값이나 피크 값이 거의 차이가 없으므로 타당한 것으로 판단된다.

3.3 스프링 강성

브러쉬 스프링 강성을 현재 사양에서 60, 80, 120, 140 %로 변화하였을 때의 반력은 Fig. 7과 같다. 스프링 강성의 값이 작을수록 브러쉬 반력이 줄어 소음에는 유리하다는 결론을 도출할 수 있으나, 스프링 강성이 작은 경우는 정류자와 브러쉬 사이의 접촉이 유지되지 않아 전류 공급 문제를 발생할 수 있으므로 설계할 때 신중히 고려해야 할 것이다. 또한 모터를 장시간 사용하게 되면 필연적으로 정류자와 브러쉬에 마모가 발생하므로 이 또한 스프링 강성 및 자유장을 결정할 때 고려해야 할 것이다. 검토 결과 현재 스프링 강성이 충분히 작아서 더 줄이는 것은 불가능하였다.

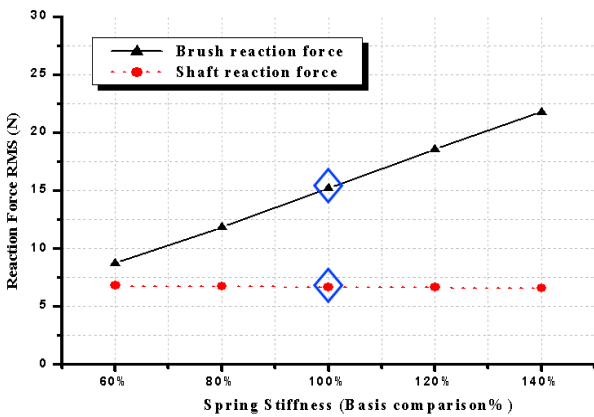


Fig. 7 All spring Stiffness vs. reaction force

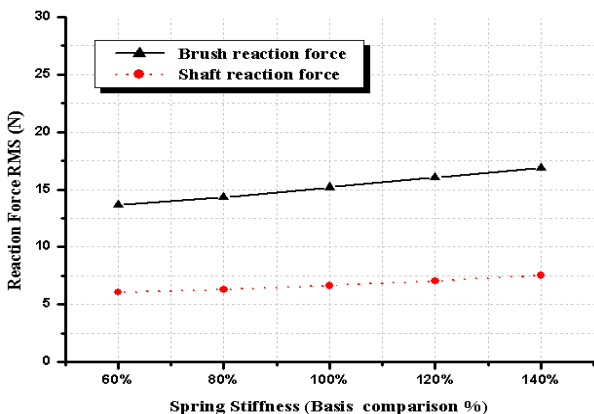


Fig. 8 Only 1 spring Stiffness vs. reaction force

Fig. 8과 같이 오직 한 개의 브러쉬 스프링 강성을 변화시킨 경우에는 강성의 비대칭 불평형으로 인하여 강성이 작을수록 브러쉬 반력도 같이 줄어드는 경향을 보인다.

3.4 아마추어 축 길이와 베어링 틈새

아마추어 축 길이와 베어링 틈새를 변화 시킨 경우에 해당하는 반력은 Fig. 9 ~ 10과 같이 거의 변화가 없는 것으로 판단된다. 다만 결과 데이터를 면밀히 살펴보면 축 길이와 베어링 틈새가 작을수록 축 반력들이 작아지는 경향이 발견되어, 소음에 유리할 것이라고 예상되지만 그 영향은 앞에서 언급한 것과 같이 미비할 것이다.

Fig. 9의 가로축은 현재 사양의 축 길이에서 변화되는 길이를 뜻하며, Fig.10의 가로축은 볼 베어링과 메탈 베어링이 가지는 공차 범위에서 틈새를 최소, 중간, 최대 3가지씩으로 구분하여 조합한 9가지 경우를 뜻한다. 1은 소-소, 2는 소-중, ~ 9는 대-대의 조합을 뜻한다.

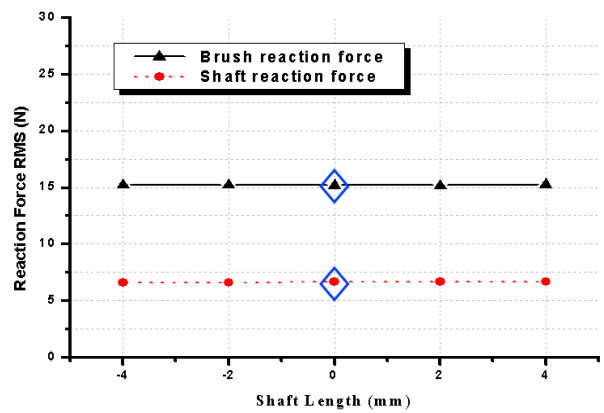


Fig. 9 All spring Stiffness vs. reaction force

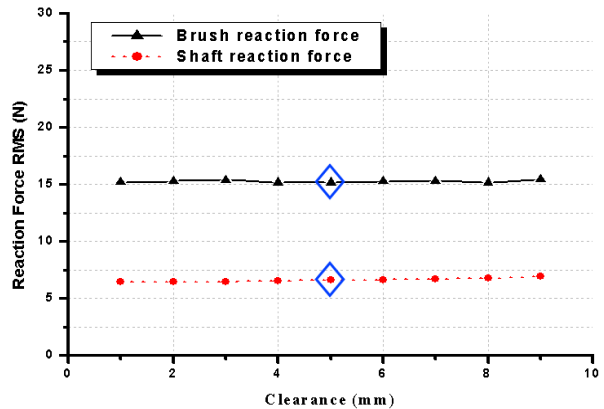


Fig. 10 All spring Stiffness vs. reaction force

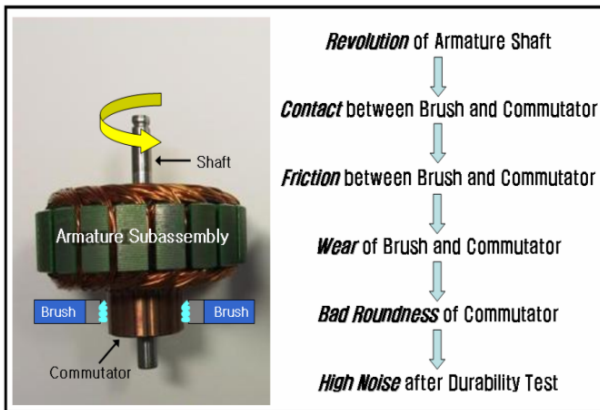


Fig. 11 Main reason of DC motor brush noise

4. 결 론

본 연구에서는 DC 모터의 동특성을 해석할 수 있는 다물체 동역학 모델을 개발하였고, 각 설계 변수들이 소음과 진동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 다양한 시뮬레이션을 수행하였으며 그 연구 결과는 다음과 같다.

(1) 앞에서 언급한 5개의 설계 변수들은 모두 작을수록 반력을 감소시켜 소음/진동을 개선시킬 것으로 예상되나 그 효과가 미비하다. 따라서 위 설계 변수들을 현재 규격보다 더 작게 하는 것은 품질 비용 등을 감안할 때 큰 소득이 없을 것으로 판단된다.

(2) 차량 편용 DC 모터는 차량의 수명 기간동안 계속 사용되기 때문에 내구 후의 소음은 초기 설계 단계에서 반드시 고려해야 할 것이다. 이러한 측면에서 위 5개의 설계 변수 중 내구 전후로 변할 수 있는 변수가 정류자의 진원도 뿐이라는 사실에 주목해야 한다. 또한 해석 결과에서 진원도의 변화에 따라 브러쉬 반력이 커지고, 특별히 임계점 이후에는 그 변화가 급격하다는 점과 시험 결과에서 브러쉬 반력이 커지면 브러쉬 소음도 증가한다는 점을 감안하면, 정류자의 진원도가 Fig. 11과 같은 과정을 통하여 DC 모터의 브러쉬 소음을 발생시키는 주 원인을 확인할 수 있었다. 결국 내구 후에도 정류자의 진원도가 일정 기준 이하로 유지되어야만 원하는 소음 성능을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 본 모델의 경우 0.1 ~ 0.11 mm 이하로 유지되어야 할 것이다.

(3) 시험을 통하여 브러쉬의 재질 변경과 정류자의 마찰 계수 감소가 정류자 마모를 안정화 시

켜 진원도가 급격히 불량해지는 것을 막고, 이를 통하여 브러쉬 소음의 증가를 막을 수 있음을 확인하였다. 이에 재질이나 마찰계수와 같은 관련 설계 변수와 소음과의 관계를 밝히려는 연구가 계속 진행 중이다.

결론적으로 본 DC 모터 동역학 모델과 해석을 통하여 설계 변수의 소음/진동 저감 효과를 수치화 할 수 있었고, 소음 저감 방안을 구체적으로 제시 할 수 있었다. 본 동역학 모델 과정과 해석 방법은 다양한 DC 모터 연구에 확대 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Kang, H., 1995, The Study of DC Motor Noise and Vibration, SAE951350, p.2461
- (2) Kim, K.W. and Ahn, T.K., 2000, A Study of the Vibration Reduction of Small DC Motor, Proceeding of the KSNVE Autumn Annual Meeting, p.88
- (3) Curtis, A. R., 1983, "Jacobian Matrix Properties and Their Impact on Choice of Software for Stiff ODE System", IMA Journal of Numerical Analysis, Vol.3, pp.397-415
- (4) Feng, C. X and Kuslsk, A., 1994, "Design of Tolerance for Quality", ASME, DE-Vol. 66
- (5) Fenton, R. G., Cleghorn, W. L. and Fu, J. F., 1989, "Allocation of Dimensional Tolerances for Multiple loop Planar Mechanisms", Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, Vol. 111, pp.465-470
- (6) Führer, C. and Leimkuhler, B., 1989, "A New Class of Generalized Inverses for the Solution of Discretized Euler-Lagrange Equations", NATO Advanced Research Workshop on Real-Time Integration Methods for Mechanical Systems Simulation, Snowbird, Utah, USA
- (7) Gear, C. W., 1971, "Numerical Initial Value Problems in Ordinary Differential Equations", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J