

# BLDC 모터 베어링의 잔여 수명 예측

최유근, 이동규  
LIG 넥스원

e-mail:yugeun.choi@lignex1.com

## Prediction of Residual lifetime of BLDC Motor Bearings

Yu-Geun Choi, Dong-Gyu Lee  
LIG nex1

### 요약

BLDC(Brushless DC) 모터는 다양한 기계 또는 전자제품에 사용된다. 본 연구에서는 BLDC 모터 베어링의 상태를 실시간으로 모니터링하고 변화 추세에 따라 잔류 수명을 예측한다. 본 설계에서는 컴퓨터 부품에 사용되는 소형 팬을 이용한 가속 실험을 수행하여 모터의 RPM을 측정하고 실험에서 측정된 데이터를 활용한 수명 식을 실험적으로 확인한다. 작동 시간에 따라 BLDC 모터의 RPM이 감소하는 경향을 확인할 수 있었지만, 실험 시간의 제약으로 큰 변화폭을 확인하는 데 어려움이 있었다. 실험을 통해 추가적인 센서의 사용 없이 작동 중인 베어링의 잔류 수명을 계산하는 소프트웨어를 개발한다면 제품의 유지보수에 용이해질 수 있으며 예측 정비를 통해 경제성에 긍정적인 영향을 기대할 수 있을 것이다.

### 1. 서론

#### 1.1 연구 목적

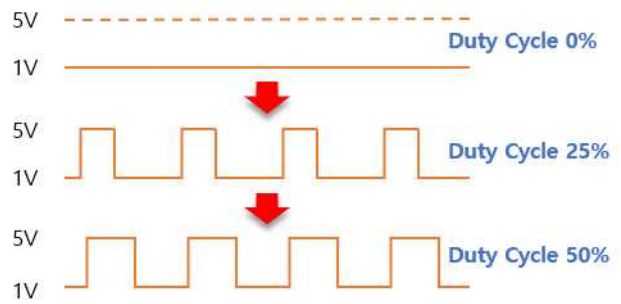
BLDC 모터는 회전자에 브러시가 존재하지 않는 모터로써 영구자석을 사용하는 DC 모터이다. BLDC 모터가 드론, 선종기나 UAM과 같은 거대 비행체 등 광범위한 분야에 활용되면서 유지보수에 대한 중요성이 커지고 있다. 이러한 모터를 탑재하고 있는 기계, 전자제품의 예상 수명을 알 수 있다면 유지보수에 불필요한 비용과 인력을 소모하지 않으며, 효과적인 비용 절감을 불러올 것이다. 본 연구에서는 컴퓨터 쿨링 팬을 데스크톱 전원에 연결하여 샘플 팬의 RPM 추세를 실시간으로 모니터링 및 기록하고 RPM 변화 폭을 통한 베어링의 수명 예측을 하고자 한다.

#### 1.2 관련 이론

- PWM(Pulse Width Modulation)

일반적으로 사용되는 신호 전달법으로 일정한 주기에서 ON/OFF 전원 시스템을 제어한다. 반복 구간 내 신호가 ON되어있는 상태를 Duty Cycle이라 하며, ON의 비율을 0%인 값부터 100%까지 제어한다. Duty cycle의 ratio를 높일수록 입력 전류가 증가하면서 모터의 RPM이 증가하게 된다. 특히

나 4pin PWM 제어는 CPU나 GPU와 같은 컴퓨터 부품에 많이 사용된다. 본 실험에 사용되는 쿨링 팬의 경우에도 3pin DC 제어 방식보다 더 정확하고 안정적인 속도 제어가 가능한 PWM 방식을 아두이노와 연동하여 RPM을 측정하였다.



[그림 1] PWM Duty Cycle

### 2. 본론

#### 2.1 실험 품목

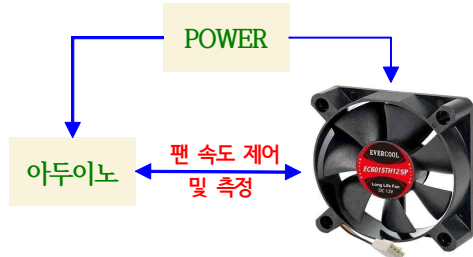
##### 2.1.1 Sample PWM Fan

본 실험에서는 사용된 샘플 팬은 EVERCOOL 사의 60mm EC6015TH12SP PWM Fan으로 [표 1]과 같은 성능을 가진

다. Arduino Mega 2560을 사용하여 9개의 샘플 PWM 팬을 허브를 통해 연결했다. PWM 팬의 3번 Pin(Sense 부분)에 저항을 연결하여 회전 시 저항에 대한 RPM을 계산할 수 있다.

[표 1] PWM Fan Spec

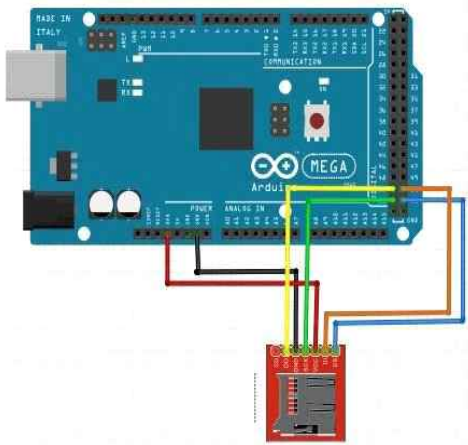
제원	60 x 60 x 15 mm
Voltage	12V DC
Current	0.21 A
Input	2.52 W
Fan speed RPM	2000~5500 ± 10% RPM
Noise	≤ 18.2~38.9 dBA
Type	슬리브 베어링



[그림 2] PWM 팬의 RPM 측정을 위한 관계도

### 2.1.2 SD Card Reader Module

아두이노 자체적으로 파일의 저장 기능이 없으므로 측정된 데이터를 기록할 수 있는 리더기를 사용한다. Arduino Mega 2560에 [그림 3]과 같이 연결되며 SD 카드를 삽입한 순간부터 데이터 저장이 진행된다.



[그림 3] SD Card Reader Module Connect with Arduino

## 2.2 실험 진행

### 2.2.1 고장 정의

일반적으로 베어링의 고장은 내부 윤활유의 약 50% 손실로 발생한다. 단순히 베어링의 고장만을 본다면 팬의 고장과는 엄연히 다르다. 하지만 쿨링 팬이 성능 저하로 폐기된다면 내부에 탑재된 베어링 또한 함께 제거되므로 팬의 고장을 베

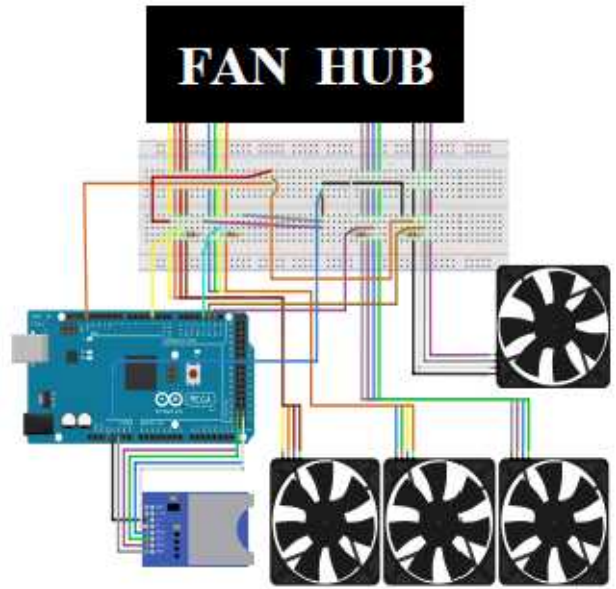
어링의 고장과 같다고 가정하였다. 팬의 기능 및 작동은 일정 이상의 진동, 소음, 발열, 마모 등으로 발생하며 고장 발생 기준은 다음과 같다.

- 팬 소음 3~5dB 이상 증가
- RPM 15% 저하(10~30% 사이)
- 최대 Input 전류값 대비 15% 증가

위의 팬 고장 정의 기준 중 실험 목적에 맞게 RPM 값만을 고려하여, 초기 RPM값 대비 15% 감소를 팬(베어링)의 고장으로 정의하였다.

### 2.2.2 Test Bed

본 실험을 진행하기 위한 장치 Setting은 [그림 4]와 같으며 각 샘플의 RPM 측정 데이터를 아두이노 코드로 제어하였다. CPU와 FAN HUB를 연동할 경우, CPU의 작동에 따라 발열량이 변화하고 이를 냉각하기 위해 팬의 속도가 제어된다. 따라서 HUB에는 CPU 냉각팬을 제외한 9개의 샘플 팬을 작동시켰다.



[그림 4] Experimental Device

### 2.2.3 실험 조건

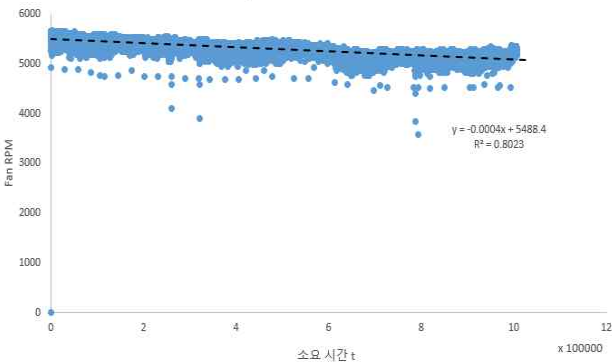
총 45일 동안 일 평균 10시간 주기로 실험을 진행하였으며, 모터의 최대 RPM만으로 베어링의 수명을 판단하기 위해 그 외 다른 특정 조건(외력, 소음, 온도 등)들을 변동 없이 모든 샘플 팬에 동일하게 적용하였다. 대부분의 베어링 고장은 윤활유량에 절대적인 영향을 받지만, 본 실험에서는 윤활유량을 고려하지는 않았다. 사용된 팬이 분리형이 아닌 일체형으로 제작되었으며, 일체형 특성상 내부 베어링의 윤활유량을 임의로 조정하는 데 어려움이 있었기 때문이다.

### 3. 베어링 열화 실험 결과

샘플 팬의 예상 수명을 계산하기 위해 얻은 RPM 데이터값으로 소요 시간에 따른 하락 폭을 예상할 수 있었다. 대부분의 팬 RPM 데이터는 최대 속도인 5,500rpm으로부터 하락하는 추세를 보이는 것을 확인할 수 있었으나 45일이라는 제한적인 시간으로 현저한 감소 폭을 도출하지 못하였다. 따라서 선형회귀 방식으로 수명 가속을 통한 팬 수명주기의 매개변수를 [그림 5]와 같이 구하였다. 9개의 샘플 중 결정계수가 가장 큰 Sample 1 Fan의 값을 대푯값으로 선정하였다.

[표 2] RPM 변화에 따른 열화식 및 결정계수

Sample Fan	$y = at + b$		결정계수
	$a$	$b$	
1	-0.0004	5488.4	0.8023
2	-0.0002	5516	0.6148
3	-0.0003	5375.7	0.6391
4	-0.0001	5233.7	0.1537
5	5E-05	5134.4	0.0282
6	-0.0002	5537.4	0.5238
7	-0.0001	5651.5	0.5587
8	-0.0001	5656.1	0.5906
9	-6E-06	5468.8	0.0017



[그림 5] RPM Variation of Sample 1 Fan

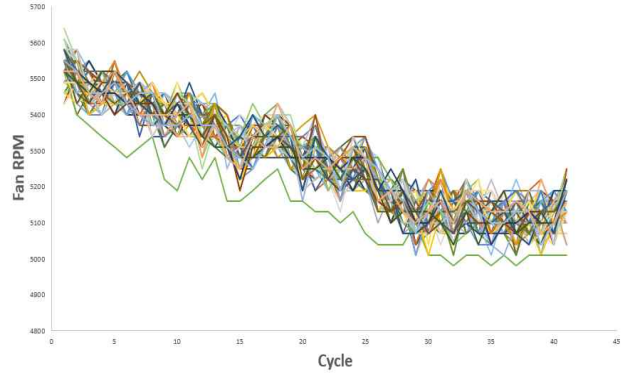
$$y = -0.0003x + 5488.4, \quad R^2 = 0.8023$$

(x : 전체 소요 시간[Cycle], y : 팬 RPM)

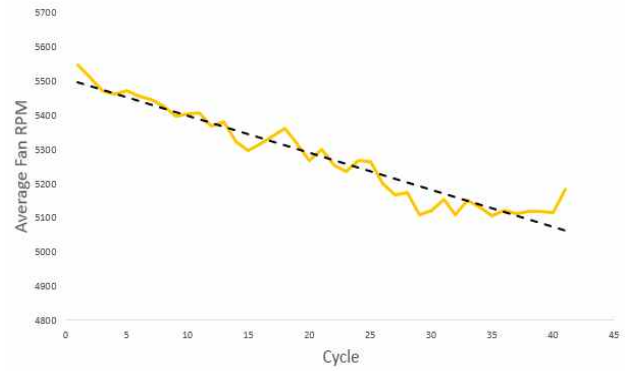
고장 정의에 따라 RPM 값이 초기로부터 15% 감소하는 순간을 베어링의 완전고장으로 가정한다면, 고장까지의 소요 시간은 2,711,333sec, 즉 753.148 hours로 도출되며 동일한 환경조건에서 약 76일 정도의 실험 시간이 확보되어야 고장이 발생할 것이므로 예측되었다.

위 데이터값은 10시간의 Cycle로 팬을 작동시킴으로써 측정되는 RPM 변화를 기록한 것이므로 각 Cycle의 초기시간마다 기준값보다 9.4~10.8% 정도 낮은 RPM이 측정되었다. 이러한 초깃값들을 제거하고 각 Cycle의 동일 소요시간 대비 팬 RPM 변화량을 추출하였다. 이때 전체 Cycle 중 높은 결정

계수를 가진 상위 3.5%를 뽑아서 [그림 6]과 같이 표현하였다.



[그림 6] Cycle 내 동일 시간대 RPM Variation

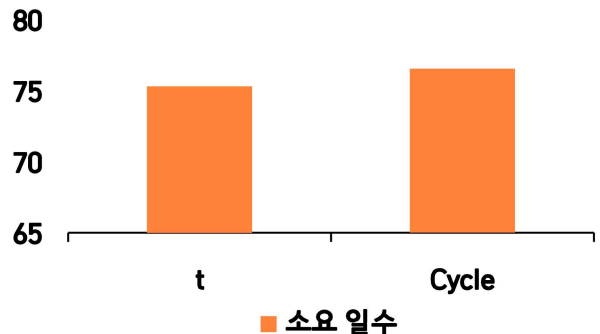


[그림 7] 평균 RPM Trend line of 1 Cycle

$$y = -10.881x + 5507.8, \quad R^2 = 0.9320$$

(x : 소요 일수, y : 평균 팬 RPM)

각 Cycle에 대한 평균 RPM을 추출하고 해당하는 열화식에 베어링 고장 RPM을 대입시킨 결과, 고장 발생 시기가 76.537 Cycle(소요 일수)로 예측되었다. 이는 Sample 1 Fan 예측값과 1.59%의 오차를 보이면서 76일 차 부근에서 고장이 발생할 것이라고 보여진다.



[그림 8] 각 x축에 대한 베어링 고장 시기

## 4. 결론

## 참고문헌

본 실험에서는 쿨링 팬을 최대출력으로 작동시키는 환경을 구축하고 팬의 RPM을 실시간으로 측정하여 BLDC 모터 베어링의 잔여 수명 예측을 진행하였다. 볼베어링에 비해 평균 수명이 짧은 슬리브 베어링 기반 PWM 팬을 활용하였으며, 아두이노로 팬의 RPM을 측정하는 동시에 연결된 SD카드 리더기에 기록하는 방식을 사용하였다. 그리고 일 평균 10시간 씩 팬을 작동시키면서 총 45일에 걸쳐 시간에 대한 RPM 변화를 측정하고 Run-to-fail 열화식을 구하여 베어링의 고장 발생 예측값을 도출하였다.

결과적으로 시간에 대한 RPM 열화에 대응되는 매개변수를 구하였으며 진동 또는 소음 측정 센서 없이 BLDC 모터의 고장 발생을 사전에 예측할 수 있었다. 하지만 팬 베어링의 평균 예상 수명의 효용성이 떨어진다는 점이 한계였다. 주요 한계는 다음과 같다.

첫째, 고장 예측 시기보다 짧은 실험 소요 시간으로 인해 실질적인 고장 발생 시점을 이론적으로만 예측하였다.

둘째, 10시간 Cycle로 반복 실험을 진행하여 전력 공급이 일정하게 유지되지 못하였다. 이에 따라 온도와 같은 외부요인에 의한 RPM 변화폭이 일정하지 않고 계속 변화하여 실제 쿨링 팬 사용환경에서의 수명 예측에는 어려움이 있었다. 고장 정의에서 베어링의 고장을 팬의 고장과 동일하다고 가정하기 위해서는 팬의 기능에 맞게 사용되는 환경조건을 일치시킬 필요가 있었다.

마지막으로 x값에 따라 output 값을 추출하는 과정에서 한번에 최대로 나타낼 수 있는 값이 255개였기에 전체 데이터 중 선형성이 높은 상위 3.5%의 데이터 표본만을 추출하여 분석할 수밖에 없었다.

이러한 한계점들은 차후 타 연구를 통해 보완되어 적용할 필요가 있으며, 본 실험에서는 한계점들을 도출하고 차후 연구 설계의 기반이 된다는 것에 의의를 둔다. 이를 바탕으로 추가적인 센서의 사용 없이 작동 중인 베어링의 잔류 수명을 계산하는 소프트웨어를 개발한다면, BLDC 모터 외 베어링을 이용하는 타제품의 유지보수에 용이해질 수 있으며 예방정비가 아닌 예측 정비를 통해 경제성 향상에 긍정적인 영향을 기대할 수 있다.

[1] Yun-Ho Seo, "Life Prediction of Bearing by Statistical Estimation of State Index. Transactions of the KSNVE," vo..28, no.3, pp. 339-347, 2018년.

[2] William, Gousseau, "Analysis of the Rolling Element Bearing data set of the Center for Intelligent Maintenance Systems of the University of Cincinnati," 2018년.

[3] Karolina, Kudelina, "Bearing Fault Analysis of BLDC Motor for Electric Scooter Application,." 2020년.

[4] Xijin Tian, "Cooling Fan Reliability: Failure Criteria, Accelerated Life Testing, Modeling and Qualification," RAMS '06. Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2006년