

6 시그마 프로세스를 이용한 소형 직류 모터의 소음 절감

°차원준* , 최연선**

Noise Reduction of a Small D/C Motor using 6 Sigma Process

°Cha, W. J. * , Choi, Y. S. **

ABSTRACT

This paper studies on the noise reduction for a small automobile DC Motor (a window motor) using the 6 sigma process. The application of 6 sigma process suggested reliable and valuable statistical data for the quality of the DC motor at the production line. In the measurement step in 6 sigma process, the FMEA(Failure Mode Effect Analysis) were used for the detection of noise sources. The application of 6 sigma process gave not only the improving method for the quality of the DC motor but also the confidence of improvement itself since it was done on the basis of the test results for a number of DC motors at the production line. Consequently the 6 sigma process was proved very effective for the noise reduction at the production line.

1 서 론

자동차 관련 연구개발에 있어 현재의 경향은 출력, 품질의 단계를 넘어서, 사용자의 쾌적성, 편리성, 환경 등이 점점 중요시 되고 있다. 자동차의 주 소음원은 엔진 및 구동시에 발생되나 실내에서 사용되는 소형 모터 또한 소비자의 쾌적성 평가에 있어 주요한 인자를 차지하고 있다.

특히 소비자가 차내에서 직접 들을 수 밖에 없는 윈도우 모터(Window motor), 시트 모터(Seat motor) 등은 소비자가 민감하게 느끼는 소음 중의 하나로써 윈도우 모터, 시트 모터 등에 대한 소음, 진동 검사 기준은 점점 강화되어 가고 있는 실정이다. 또한 자동차 산업을 주도하는 선진국에서는 점점 많은 규제를 통하여 자국 시장을 보호하기 위해 자동차용 소형 모터에 대해서도 ISO 9000, QS 9000, ISO 14000 등 국제적 품질규격에 대한 인증을 요구 하고 있다.

1980 년대 말 미국 모토롤라에서 혁신적인 품질 개선의 목적으로 만든 기업경영의 전략인 6 시그마는 미국의 GE, GM, IBM, 일본의 SONY 등 초우량 기업들이 채택함으로써 널리 알려 지게 되었으

며^[1] 그 효용성이 입증됨에 따라 모든 제조공정에서 6 시그마 기법 적용이 강력하게 요구되고 있다. 제조공정에서 6 시그마의 적용은 이전의 실험실에서 소수의 샘플실험에 의해 제시되던 개선 사항을 양산라인에서 다수의 제품에 대한 실험 결과를 바탕으로 개선 사항을 제시하는 것으로써 정확하고도 신뢰성 있는 개선 사항을 제시하게 되었다. 따라서 이제는 제조 현장에서 뿐만 아니라 연구소에서도 6 시그마 기법을 적극 도입하여 품질 개선 및 신제품 개발에 적용하고 있는 추세이다.

그러나 국내외의 연구성과는 김명업, 이두호^[2]의 연구와 같이 프로세스 전반에 대한 6 시그마 기법 적용 보다는 다수제 시험 계획법 등 부분적인 적용이 있었으나 프로세스 전반에 대한 6 시그마 기법 적용은 별로 없는 실정이다. 이에 본 논문에서는 6 시그마 프로세스 기법을 적용하여 자동차용 직류모터의 소음 절감에 관한 연구를 수행하였다.

2. 6 시그마 추진 방법

2.1 6 시그마 기법

1987 년 모토롤라에서 도입되어 시작된 6 시그마 프로젝트는 최고 경영자의 리더십 아래 시

그마란 통계 척도를 사용하여 모든 품질수준을 정량적으로 평가하고 효율적인 품질 문화를 조성하며, 품질 혁신과 고객 만족을 달성하기 위하여 프로세스의 질을 6 시그마 수준으로 높여 기업 경영 성과를 획기적으로 향상시키고자 하는 종합적인 기업 경영전략이다.^[1]

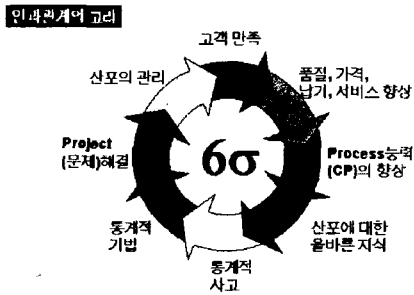


Fig.1. 6 시그마 인과 관계

2.1 6 시그마 프로젝트 수행 Process Map

일반적으로 6 시그마 프로젝트 수행과정은 다음과 같다.^[4]

- (1) Define : 문제점 정의 단계, CTQ (Critical To Quality) 를 정의 하는 단계
- (2) Measure : CTQ 를 측정하여 개선하고자 하는 목표를 설정하는 단계, DFMEA(Design Failure Mode Effect Analysis), FTA(Failure Tree Analysis), C&E Matrix (Cause & Effect Matrix)
- (3) Analyze : CTQ 에 대한 시험을 분석하는 단계. 다구찌 시험 계획법, 공정능력 평가
- (4) Improve : 변경된 Process 에 대한 공정 적응 방안을 연구하는 단계. 공정능력 평가, PFMEA(Process Failure Mode Effect Analysis)
- (5) Control : 양산 적용된 Process 를 유지 관리 하는 단계, MFG Control Plan

2.3 FMEA

1970 년대 미 해군에서 MIL-STD-1629 의 규격으로 널리 사용되기 시작한 FMEA^[5] 는 6 시그마 프로젝트의 문제 발생 원인을 찾는 기법중의 하나로 채택된 이래 산업현장에서 본격적으로 적용되기 시작하였다. FMEA 는 발생 가능한 잠재 고장모드와 그 영향을 확인하고 예방할 수 있도록 표를 이용하여 체계적으로 접근하는 방법이다.

FMEA 의 추진 방법은 잠재 문제에 대한 심각도, 발생도, 검출도를 통하여 RPN(Risk Priority Number, 위험 우선수)을 계산함으로써 불량제품에서 우선적으로 개선해야할 사항을 찾는 방법이다. 여기서 심각도는 고장이 발생하여 고객에게 미치는 영향 정도를 파악한 것이며, 발생도는 고장이 발생할 가능성의 높고 낮음을 수치적으로 파악한 것이고, 검출도는 고장에 대하여 공정에서 검출될 가능성의 높고 낮음을 수치적으로 파악한 것이다. 상기의 심각도, 발생도, 검출도를 통하여 RPN)의 계산은 아래와 같다.

$$RPN = \text{심각도} \times \text{발생도} \times \text{검출도} \quad (1)$$

RPN 을 계산 하고 RPN 이 높은 수치를 우선적으로 개선에 착수를 하게 되는데 그 이유가 고장이 자주, 심각하게 발생되며 그 고장을 쉽게 검출해 낼 수 있는 최우선 공정을 찾아 개선을 진행하도록 하고자 하는 것이다.

3. 직류모터의 구조 및 소음

3.1 직류모터의 소음

직류모터는 내부에 회전자와 고정자가 있는 회전기계이면서 전자기력에 의해 구동되는 전기기계로서 축정렬 불량, 불평형 등 기계적 요인과 함께, 고정자와 회전자 사이에 존재하는 공극에서 발생하는 전자기적 요인에 의해 진동, 소음이 발생하게 된다.^[6]

(1) 전자기적 진동

고정자와 회전자 사이의 간격 즉, 공극의 변화에 따라 고정자와 회전자 사이에 작용하는 힘은 회전자의 회전각에 따라 변화가 발생한다. 이러한 힘의 불평형은 회전자에 편심을 유발시키고 전동기의 프레임에 전달되어 진동으로 나타나게 된다. 공극내의 불평형 힘에 영향을 주는 성분은 자속이다. 자속에 영향을 주는 인자는 전류에 의한 기자력과 자속이 통과하기 쉬운 정도를 나타내는 퍼미언스(Permeance)가 있고, 이 두 인자의 곱에 의해 자속이 형성된다. 이렇게 형성된 자속의 제곱에 비례하여 전자기력이 생기게 된다.

이 전자기력이 회전자에 편심을 유발시켜 프레임의 진동으로 나타나게 된다. 이러한 프레임 진동주파수 성분은 식(2)과 같이 표현된다.

$$f_f = \left[(n_1 R \pm n_2) \frac{(1-s)}{p} \pm 2n_3 \pm n_4 \right] f_1 \quad (2)$$

R : 회전자 슬롯수, p : 극수, s : 슬립비,

$n_1 \sim n_4$: 임의의 정수 (0,1,2,~)

(2) 기계적 요인에 의한 진동

기계적 요인에 의한 진동은 전동기를 이루고 있는 각각의 기계적 요소에 의한 것이다. 베어링, 축정렬 불량, 기계적 헐거워짐, 불균형 등이 주요한 기계적 진동 요인이다.

불균형은 축정렬 불량과 마모와 헐거워짐 등에 의해 발생할 수 있으며, 기계적 요인에 의한 모터의 진동은 식 (3)와 같은 회전주파수의 배수되는 성분을 포함하게 된다.

$$f_u = \frac{kN}{60} \quad k: \text{정수 (1,2,3,~)}, N: \text{rpm} \quad (3)$$

(3) 직류모터의 소음

직류 모터의 소음은 전자기적 요인에 의한 소음과 기계적 진동에 의한 소음 이외에, 공기역학적 소음으로 나눌 수 있다. 그러나 본 실험에 사용된 직류 모터는 Fan 및 공기역학적 냉각이 필요하지 않은 제품으로 직류 모터의 소음은 전자기적 요인에 의한 소음과 기계적 진동에 의한 소음만이 영향을 미치고 있다고 판단된다.

3.2 직류모터의 구조

본 실험에서 사용된 직류 모터인 윈도우 모터의 구조는 Fig. 2 및 Table 1 과 같으며 주요 성능은 Table 2 와 같다.

No	부품명	No	부품명
1	Yoke	5	Op Shaft
2	Armature	6	Brush Card Ass'y
3	Magnate	7	Metal Bush
4	Worm Wheel	8	Gear Case

Table 1. 윈도우 모터의 주요 부품

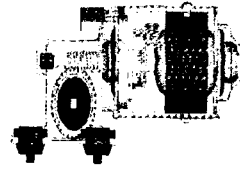


Fig. 2. 윈도우 모터의 구조도

정격전압	10.5 (V)
0.1 Nm부하	510 ~ 725(rpm)
	5.5 (A)
1.0 Nm부하	175~390 (rpm)
	14.4 (A)
구속 전류	28 (A)
중량	412 (g)

4. 직류 모터의 시험

직류 모터의 소음 절감 시험을 위한 시험 장비 및 시험 방법은 다음과 같다.

4.1 시험 방법

직류모터의 소음을 측정하기 위하여 암소음 30 dBA 인 소음실을 이용하였다. 3m×3m 크기의 소음실 중앙에 직류 모터가 놓이게 했다.

외부 Power Supply 에서 배선을 통하여 소음실 중간의 직류 모터와 연결하였으며, 시험 진행 시에는 정격 전압인 D/C 10.5 Volt 를 인가하였다.

직류모터는 소음실 중간 50mm 두께의 스펀지가 놓여진 Table 에 설치 하였으며 소음을 측정하기 위하여 마이크로폰을 사용하였다. 마이크로폰의 위치는 윈도우 모터 상방향 50 cm 에 두고 측정을 하였다.

시험 방법은 직류모터를 무부하, 시계 방향으로 회전시킨 상태에서 시험을 진행하였다.

FFT Analyzer 를 이용하여 직접 신호를 분석하거나 A/D Converter 를 거쳐 컴퓨터로 읽어 들어 Wave 파일로 저장하여 Sound Quality 프로그램으로 데이터를 분석하고, 통계 프로그램을 사용하여 계량화하였다. 통계 분석 시, 합부 판정의 기준은

55 dBA 이하로 하였다.

4.2 시험 장비

시험 진행을 위한 측정 장비는 HP 장비를 사용하였으며 분석 Software 는 MTS T-IDEAS, MTS Sound Quality 를 사용하였다. 마이크폰은 Cel Instrument LTD, 500 Serie.를 사용하였으며 마이크로폰의 교정은 Sound Calibrator ACLAN , 1000Hz 94dB 를 사용하였다.

4.3 측정 항목

본 시험에서 주요 측정 항목은 dBA 를 기준으로 하여 측정하였으며, 향후 미국 자동차 메이커에서 적용을 검토하고 있고, ISO 532B [7] 규정으로도 명시되어 있는 Zwicker Loudness (Sone, Phone), Zwicker Loudness Sharpness 항목을 측정 비고 하였다.

5. 시험결과

5.1 양산 제품 회전 주파수 분석

양산제품의 회전 주파수는 Table 3 과 같다.

Table .3 회전 주파수

부품명	회전 주파수(Hz)
Armature	100
Worm Wheel	330
Commutator	1600
OP Shaft	10

5.2 양산제품 시험 Data

현 제품의 현상 파악을 위하여 무작위로 30 대를 선정하여 소음 분석 시험을 진행하였다.

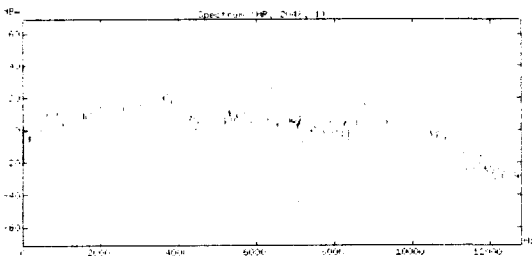


Fig. 3. 양산 제품 FFT Data

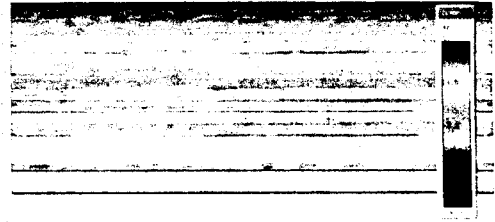


Fig. 4. 양산제품 Sound Quality Data

Factor	A Scale Noise	Zwicker Loudness sone	Zwicker Loudness phone	Zwicker Loudness sharpness
Unit	dBA	Sone	Phone	Acum
Mean	53.103	4.196	60.647	2.4387
Standard Deviation	1.381	0.4898	1.316	0.1428

Table 4. 양산 제품 측정 Data

구분	y1	y2	y3	y4	y5
단위	dBA	kurtosis	loudness(s)	loudness(p)	sharpness
상한	45				
하한					
평균	30	30	30	30	30
분포					
최대					
N	30	30	30	30	30
평균	43.10	2.8952	4.20	60.65	2.4387
표준편차	1.381	0.48976	0.389	1.316	0.14282
편위	7.0	2.497	1.6	6.6	0.537
Cp	0.458				
Cpk	0.458				
PU(PPM)	84779.1				
PL(PPM)					
PT(PPM)	84779.1				
공분					
합계					
비고	Y(과) 편차의 Cpk가 작은 순서로 dBA <				

Fig. 5. 양산 제품 소음 산포도

5.3 양산제품 문제점 분석

- 1) Fig. 5 의 양산 제품의 소음 산포도에서 나타난 바와 같이 양산제품의 소음 평균은 53.1 dBA 로 기준치 55dBA 이내에 드는 것을 알 수 있다.
- 2) 제품 전체의 불량율은(Total PPM, PT) Fig. 5 과 같이 84779.1 로 %로 환산시 8.48%의 불량율을 갖고 있는 것을 알 수 있다.
- 3) 전체적으로 직류모터의 소음은 100 대 생산시 8.5 대의 소음 불량율을 갖고 있는 것으로 판단되며, 이러한 불량률은 결국 제품의 품질저하 및 불량에 따른 원가상승 등 악영향을 미치고 있는 것으로 판단이 되어 6 시그마 수준의 소음을 갖을 수 있도록 개선이

시급한 것으로 판단이 되었다.

- 4) 또한 Fig. 3의 양산제품 FFT Data에서 보면 소음의 가장 큰 인자는 800 Hz의 정류자와 Carbon Brush와의 접촉 Noise 및 정류자 noise가 가장 크게 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다.

5.4 소음원 분석을 위한 FMEA

소음원 분석을 위하여 윈도우 모터에 대하여 FMEA를 실시한 결과는 Table.5와 같다.

5.5 FMEA 결과 분석

2.3 절에 논한 방법으로 윈도우 모터에 대한 FMEA 분석을 진행하였으며 심각도, 발생도, 검출도의 점수 배분은 QS 9000에서 명기한 방법으로 진행하였다. 결과를 RPN으로 환산한 결과

(1) Commutator 편간 단차 : 60 점

(2) Worm Wheel 흔들림 : 45 점

이 가장 RPN치가 높은 것으로 판단되어 가장 시급하게 개선 진행해야 될 것으로 판단되었다.

Item	Potential Failure Mode	Potential Effect of Failure	Action Results			
			Severity	Occurrence	Detection	RPN
Noise	Brush Noise	Commutator Roundness	4	2	2	16
		Carbon Brush Roundness	4	3	2	24
		Carbon Brush Round	4	3	2	24
		Brush Card Eccentricity	3	4	2	24
		Housing Setting Force	4	4	1	16
		Yoke Setting Force	4	4	1	16
	Worm Wheel	Yoke Slaking	3	2	3	18
		Commutator Scratch	4	4	1	16
		Worm Wheel Total Composite Error	5	2	3	30
		A/R Wheel Total Composite Error	5	2	3	30
Abnormal Noise	Distance Control of Housing	Distance Control of Housing	4	2	2	16
		C/P Shaft Roughness	5	2	2	20
		Metal Bush Roundness	7	2	2	28
		Metal Bush Roundness	7	2	2	28
	Gap of C/P Shaft and Metal Bush	Gap of C/P Shaft and Metal Bush	5	3	2	30
		Run Out of Worm	5	3	2	30
		A/R Roundness	4	2	2	16
		A/R Roundness	3	3	2	18
Yoke Perpendicular	3	3	2	18		

Table 5 양산제품 FMEA 결과

6. FMEA 분석

6.1 시험계획 수립

5.5에서 분석된 내용에 대한 시험 계획은 다음과 같다.

(1) 편간 단차 : 0~1μ m, 1~2 μ m(기준 : 3μ m 이하)

(2) 흔들림 : 0~0.03, 0.03~0.07mm(기준 : 0.1mm 이하)

6.2 시험 수량 : 각각 30 Set.

6.3 시험 결과

(1) 편간 단차 시험 결과

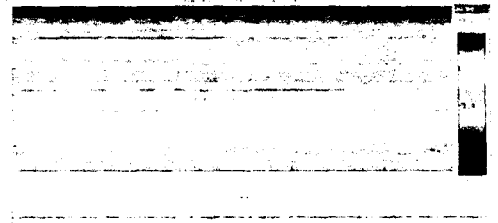


Fig. 6. 편간 단차 0.5μ의 Sound Quality Data

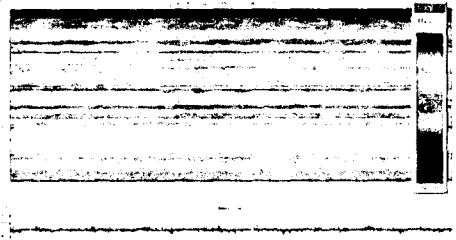


Fig. 7. 편간 단차 1.7의 Sound Quality Data

(2) 편간 단차 시험 결과에 대한 통계적 분석 결과는 Table.6와 같다.

Factor	Level	Mean	St Dev	P-value	Effect	Results
dBA	A	53	1.381	0.05	1 dBA down	Accept
	B	52	1.846			
Zwicker Loudness sone	A	4.20	0.369	0.02	0.34 Sone down	Accept
	B	3.86	0.555			
Zwicker Loudness phone	A	60.65	1.316	0.01	1.28 Phon down	Accept
	B	59.37	1.908			
Zwicker Loudness sharpness	A	2.44	0.143	0.31	0.05 Acum down	Reject
	B	2.39	0.130			

Note: ISO 532B Zwicker Loudness

Table.6 양산 Data와의 차이 점정 (MiniTap)

(3) Worm Wheel 개선 시험 결과

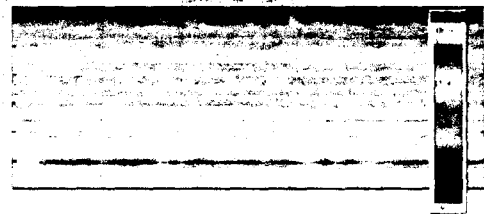


Fig. 8. Worm Wheel 흔들림 0.025mm Data

(4) Worm Wheel 흔들림 시험에 대한 통계적 분석
Worm Wheel 에 대한 분석 결과는 Table .7 과 같다

Factor	Level	Mean	St Dev	P-value	Effect	Results
dBA	A	44.4	1.530	0.83	None	Reject
	B	44.5	1.580			
Zwicker Loudness sone	A	4.37	0.430	0.35	None	Reject
	B	4.49	0.284			
Zwicker Loudness phone	A	61.20	1.908	0.35	None	Reject
	B	61.60	1.487			
Zwicker Loudness sharpness	A	2.57	0.143	0.62	None	Reject
	B	2.54	0.223			

Note. ISO 532B- Zwicker Loudness

Table 7. 개선 Data 의 차이 검정 (MiniTap)

(5) 통계적 분석 결과 해석

A : 양산, B : 편간 단차 개선품 (0~1 μ m) 에 대한 각 측정 Data 의 검정 결과

dBA : 94%의 신뢰율로 (R(신뢰율) = [1 - P Value]× 100) 1 dBA 개선된 것으로 판단되고

Zwicker Loudness Sone, Phone 도 각각 98%, 99%의 신뢰율로 개선이 된 것으로 판단된다.

이러한 결과는 일반적으로 신뢰율 95% 이상일 때에 유의한 것으로 판단하는 통계적 기준에 대하여도 적합하고 관능적인 평가에 의해서도 상당히 개선이 된 것으로 판단이 되었다. 단 Worm Wheel 개선 시험 결과는 통계적으로도 개선이 안된 것으로 판단 되었다.

7. 결론

그 동안 분석이 되질 않고 있던 윈도우 모터의 소음을 6 시그마 프로세스를 이용하여 소음원을 추출하고 분석함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 윈도우 모터의 소음은 정류자 편간 단차가 큰 영향을 미치고 있는 것을 확인하였다.
- 2) 정류자 편간 단차가 소음에 미치는 영향을 분석하여 편간 단차의 산포를 줄임으로써 소음이 94% 신뢰율로 1dBA 가 개선되었다.
- 3) 소음의 인자로서 판단되었던 Worm Wheel 의 흔들림은 현재의 기준으로는 큰 문제가 없는 것으로 확인이 되었다.

4) 특히 다수의 제품을 이용한 시험 및 분석으로 얻은 신뢰율은 개선의 정도 및 개선의 정확도를 알 수 있게 제시됨으로써 개선의 성공 여부를 확인하는 좋은 척도가 되었다. 따라서 현재 해외로 수출을 하기 위하여 형식적으로 적용하여 오던 6 시그마 기법이 실제 현업의 개선 업무에 유용한 방법으로써 사용 될 수 있음을 확인하였다. 이상의 6 시그마 기법 적용을 통해 최상의 품질을 갖는 자동차용 직류모터 개발이 가능해짐에 따라 수출 증대에 크게 이바지 할 수 있게 되었다.

다만 현재의 시험은 시계방향(CW) 만의 시험이 진행된 것으로써 이후

- 1) 반시계방향 운전에 대한 소음 영향 확인
- 2) 부하시 소음에 대한 소음 분석 및 개선 등의 연구가 진행 되어야 할 것이다.

8. 참고 문헌

1. 6 시그마 이론과 실제, 박성현, 이명주, 정목용, 한국 표준협회 P 13
2. 대구치 직교배열을 이용한 승용차의 실내소음 분석 및 개선, 김명업, 이두호, 한국소음진동 공학회지, 제 9 권, 제 5 호, pp. 998-1004, 1999. 10
3. 6 시그마 설계를 위한 DFSS, 박성현 이명주, 이강군, 한국 표준협회 P 14
4. 6 시그마 공정 능력 분석, 이강군, 서문효, ㈜ 시그마 스펙트럼 p 20~22
5. 6 시그마 이론과 실제, 박성현, 이명주, 정목용, 한국 표준협회 p 212
6. 전동기의 진동 및 소음원에 대한 실험적 고찰, 조준제, 최연선, 한국 소음 진동공학회 1996 년 추계 학술대회 논문집
7. ISO 532B, Acoustic-Method for calculating loudness level, 1975.7
8. QS 9000 FMEA 작성 세칙, 한국품질환경인정 협회, 1999