

6 시그마 프로세스를 이용한 소형 직류 모터의 소음 절감 Noise Reduction of a Small D/C Motor Using 6 Sigma Process

차 원 준* · 최 연 선†
Cha, W. J. and Choi, Y. S.

(2003년 5월 6일 접수 : 2003년 6월 14일 심사완료)

Key Words : DC Motor(직류 모터), 6 Sigma Process(6 시그마 프로세스), FMEA(failure mode effect analysis) Bar To Bar(정류자 편간 단차, BTB difference) TCE(total composite error)

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

선진국에서는 일찍부터 제품의 결함 발생은 소비자의 외면을 가져오는 것을 파악하였다. 그래서 제품의 결함을 줄이기 위한 다양한 품질관리 기법을 동원하여 왔다. 1960년대 일본의 분임조 활동에서부터 시작한 QC 활동은 이후 TQC(total quality control), TQM(total quality management) 등으로 발전하여 전세계적으로 소개되게 되었으나 세계적인 품질 개선 활동 기법으로 발전되기에는 한계가 있었다.

특히 20세기말 소비자의 인식이 발전됨에 따라 만들어진 PL법(product liability, 제조물 책임법), ISO 14000 등의 인증규격들은 기존의 품질관리 기법으로서는 한계를 느끼게 되었다.

1980년대말 미국 모토롤라에서 품질개선에 주안점

† 책임저자, 정회원, 성균관대학교 기계공학부
E-mail : yschoi@yurim.skku.ac.kr
Tel : (031)290-7440, Fax : (031)290-5849

* 정회원, 계양전기(주)

을 둔 기업경영의 전략으로 시작된 6 시그마 프로세스는 미국의 GE, GM, IBM, 일본의 SONY 등 다국적 기업들이 채택하여 획기적 효과를 거둠에 따라 품질관리에 있어 많은 회사에서 적용하게 되었다.⁽¹⁾

따라서 국제 인증 규격인 ISO 9000, QS 9000, ISO 14000의 품질관리 관련 프로세스에도 6 시그마 프로세스가 기본이 되고 있다. 따라서 국내 기업도 세계 시장으로 진출하기 위해서는 국제규격 인증을 받아야 하고 이를 위해서 6 시그마 프로세스를 적용할 수 밖에 없는 상황이다.

6 시그마 프로세스는 문제 해결을 위한 road map 이 명확할 뿐만 아니라 각각의 품질관리 기법의 용어를 통일하고 그 관리를 근본적으로 하여 품질 개선의 효과를 높였다.

그러나 국내의 연구성과는 김명업, 이두호⁽²⁾의 연구와 같이 프로세스 전반에 대한 6 시그마 기법 적용보다는 6 시그마 기법중 부분적 내용인 다구찌 시험 계획법 등 부분적인 적용이 주류를 이루고 있으며, 프로세스 전반에 대한 6 시그마 기법 적용은 없는 실정이다. 이에 본 논문에서는 6 시그마 프로세스 기법

을 적용하여 자동차용 소형 직류모터의 소음 저감에 관한 연구를 수행하여 양산 라인의 품질 개선을 통한 소음 저감 방안을 제시하고자 하였다.

2. 6 시그마 추진 방법

2.1 6 시그마 기법

1987년 모토롤라에서 시작된 6 시그마 프로젝트는 최고 경영자의 리더십 아래 시그마란 통계 척도를 사용하여 모든 품질수준을 정량적으로 평가하고 효율적인 품질 개념을 조성하여, 품질 혁신과 고객 만족을 달성함으로써 품질을 6 시그마 수준으로 높여 기업 경영 성과를 획기적으로 향상시키고자 하는 종합적인 기업 경영 전략이다.⁽³⁾

2.2 기존의 기법과의 차이점

기존의 TQC, TPM, TQM, 100 PPM 등의 품질 경영기법 또한 많은 장점을 가지고 있으며 좋은 성과를 올리고 있으나 새로운 품질 경영기법인 6 시그마 프로세스와 기존의 품질 관리 기법과 비교 하면 품질 성과에 대한 혁신적이며 과학적인 기준을 제공 할 수 있다.⁽⁴⁾

특히 6 시그마 프로세스는 용어의 통일, 프로세스의 통일을 통하여 누구나 쉽게 적용을 할 수 있고 누구나 쉽게 이해를 할 수 있도록 하여 현장 작업자도 쉽게 적용을 하여 적용이 확대돼 가고 있다.

2.3 6 시그마 프로젝트 수행 프로세스 맵

일반적으로 6 시그마 프로젝트 수행과정은 다음과 같다.⁽⁵⁾

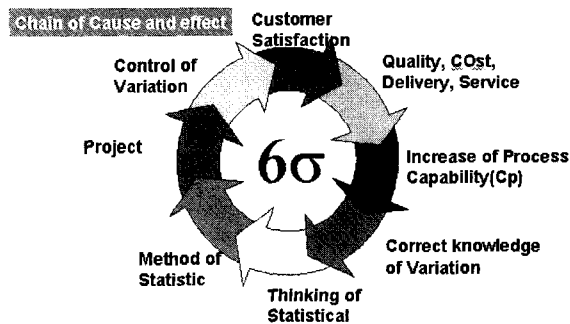


Fig. 1 Relationship for 6 sigma

(1) Define : 문제점 정의 단계, CTQ(critical to quality)를 정의 하는 단계

(2) Measure : CTQ를 측정하여 개선하고자 하는 목표를 설정하는 단계, DFMEA(design failure mode effect analysis), FTA(failure tree analysis), C&E Matrix(cause & effect matrix)

(3) Analyze : CTQ에 대한 시험을 분석하는 단계, 다구찌 시험 계획법, 공정능력 평가

(4) Improve : 변경된 process에 대한 공정 적응 방안을 연구하는 단계, 공정능력 평가, PFMEA (process failure mode effect analysis)

(5) Control : 양산 적용된 process를 유지 관리하는 단계, MFG control plan

2.4 FMEA

1970년대 미 해군에서 MIL-STD-1629의 규격으로 사용되기 시작한 FMEA⁽⁶⁾는 6 시그마 프로세스에서 문제 발생 원인을 찾는 기법중의 하나로 채택되어 산업현장에서 널리 사용되고 있다. FMEA는 발생 가능한 잠재 고장모드와 그 영향을 확인하고 예방할 수 있도록 표를 이용하여 체계적으로 접근하는 방법이다.

FMEA의 추진 방법은 잠재 문제에 대한 심각도(severity), 발생도(occurrence), 검출도(detection)를 통하여 위험 우선수(risk priority number, RPN)를 계산함으로써 불량제품에서 우선적으로 개선해야 할 사항을 찾는 방법이다. 여기서 심각도는 고장이 발생하여 고객에게 미치는 영향의 정도를 파악하는 것이며, 발생도는 고장이 발생할 가능성의 높고 낮음을 수치적으로 표시한 것이고, 검출도는 고장에 대하여 공정에서 검출될 가능성의 높고 낮음을 수치적으로 나타낸 것이다. 상기의 심각도, 발생도, 검출도를 통하여 위험우선수의 계산은 아래와 같이 계산 된다.

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

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

3. 소형 직류 모터의 구조

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

4. 6 시그마 프로세스에 의한 시험진행

4.1 정의

6 시그마 프로세스를 적용하여 문제를 정의하기 위한 직류 모터의 소음 시험을 위한 시험 장비 및 시험 방법은 다음과 같다.

(1) 시험 장비

진동 시험을 위한 측정 장비는 HP E 8491B 장비를 사용하였으며 분석 software는 MTS T-IDEAS.

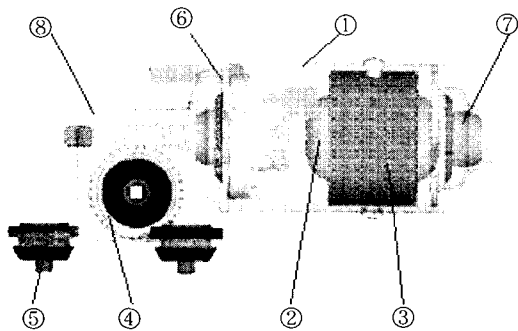


Fig. 2 View of window motor

Table 1 Parts list for window motor

No	Parts name	No	Parts name
1	Yoke	5	Op shaft
2	Armature	6	Brush card ass'y
3	Magnate	7	Metal bush
4	Worm wheel	8	Gear case

Table 2 Specification of DC motor

Rated load	10.5(V)
0.1 Nm load	510~725(rpm)
	5.5(A)
1.0 Nm load	175~390(rpm)
	14.4(A)
Current of stall	28(A)
Weight	412(g)

MTS sound quality 를 사용하였다. 마이크폰은 Cel Instrument LTD, 500 serie.를 사용하였으며 마이크 로폰의 교정은 Sound Calibrator ACLAN, 1000 Hz 94 dB를 사용하였다.

(2) 시험 방법

직류모터의 소음을 측정하기 위하여 소음실을 이용하였다. 3m×3m 크기의 소음실 중앙에 직류 모터가 놓이게 했다. 외부 전원 공급장치에서 배선을 통하여 소음실 중간의 직류 모터와 연결하였으며, 시험 진행 시에는 정격 전압인 D/C 10.5 Volt를 인가하였다. 직류모터는 소음실 중간 50mm 두께의 스펀지가 놓여진 Table에 설치하였으며 소음을 측정하기 위하여 마이크로폰을 사용하였다. 마이크로폰의 위치는 윈도우 모터 위 50cm에 두고 측정을 하였다.

시험 방법은 직류모터를 무부하, 시계 방향으로 회전시킨 상태에서 시험을 진행하였다. HP E 8491B FFT analyzer를 이용하여 직접 신호를 분석하거나 A/D converter를 거쳐 컴퓨터로 읽어 들여 WAV 파일로 저장하여 sound quality 프로그램으로 데이터를 분석하고, 통계 프로그램을 사용하여 계량화하였다. 통계 분석 시, 합부 판정의 기준은 55 dBA 이하로 하였다.

(3) 측정 항목

본 시험에서 주요 측정 항목은 dBA를 기준으로 하여 측정하였으며, 향후 미국 자동차 메이커에서 적용 여부를 검토하고 있고, ISO 532B⁽⁷⁾ 규정으로도 명시되어 있는 Zwicker loudness(sones, phons), Zwicker loudness sharpness 항목을 추가하였다.

4.2 측정(measurement)

(1) 양산 제품 회전 주파수 분석

양산제품의 회전 주파수는 Table 3과 같다.

(2) 양산제품 시험 data

현 제품의 현상 파악하기 위하여 QS 9000에서 정 의된 정량적 신뢰성 있는 데이터를 뽑기 위한 최소

Table 3 Main frequency

Parts name	Frequency(Hz)
OP shaft	10
Armature	100
Worm wheel	330
Carbon brush	800
Commutator	1600

수량인 30대를 무작위로 선정하여 소음 시험을 진행하였다.

(3) 양산제품 문제점 분석

Fig. 5의 양산 제품의 소음 산포도에서 나타난 바와 같이 양산 제품의 소음 평균은 53.1 dBA로 기준치 55 dBA 이내에 드는 것을 알 수 있다. 그러나 제품 전체의 불량률은(total PPM, PT) Fig. 5와 같이 84779 PPM으로 %로 환산시 8.48%의 불량률을 갖고 있는 것을 알 수 있다. 즉 이것은 100대 생산시 약 8대의 소음 불량을 발생한 다는 것으로 해석 할 수 있다. 이러한 불량률은 결국 제품의 품질 저하 및 불량에 따른 원가상승 등 악영향을 미치고 있게 된다. 따라서 6 시그마 수준의 소음을 갖을 수 있도록 개선을 해야만 품질 비용을 절감 할 수 있을 것으로 파악 된다.

또한 Fig. 3 및 Fig. 4의 양산제품 data는 30대 제품의 가장 평균적인 소음을 나타내는 data로 소음의 가장 큰 인자는 800 Hz인 정류자와 카본 브러쉬(carbon brush)와의 접촉시 발생하는 소음이 가장 크게 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다. 따라서 정류자와 카본 브러쉬 노이즈 및 기타 소음을 일으키는 것으로 판단되는 부품에 대한 확실한 검증 시험이 필요하다.

(4) 소음원 분석을 위한 FMEA

소음원 분석을 위하여 윈도우 모터에 대하여 QS 9000의 FMEA 작성 세칙⁽⁸⁾에 준하여 설계자, 현장 엔지니어, 품질관리 담당자들과 공동으로 FMEA를 실시하여 심각도, 발생도, 검출 도를 도출하였고 그 결과를 계산한 RPN값은 Table 5와 같다.

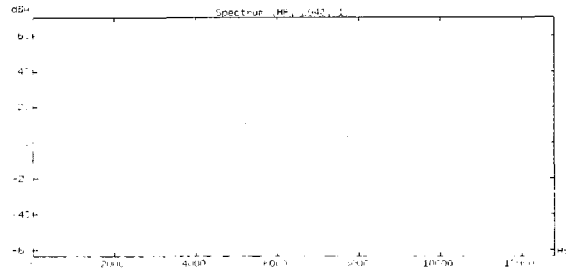


Fig. 3 FFT Data for mass production

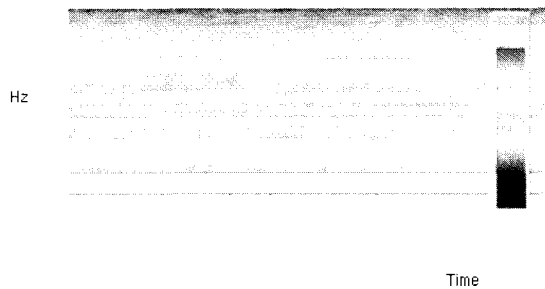


Fig. 4 Sound quality data for mass production

Fig. 5 Statistical data for mass production

[Total table of quality control point]						
Group title	Lot	Period	2002.1.15 ~ 2001.1.15	Date	2001/2/28	Name
Symbol	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄	y ₅	
Item	dBA	Kurtosis	Loudness(b)	Loudness(p)	Sharpness	
Upper limite	55					
Lower limite						
Graph of standard distribution						
N	30	30	30	30	30	
Mean	53.1	2.6952	4.20	60.65	2.4387	
S/D	1.381	0.48978	0.369	1.316	0.14282	
Range	7.0	2.497	1.5	5.6	0.537	
Cp	0.458					
Cpk	0.458					
PU(PPM)	84779.1					
PL(PPM)						
PT(PPM)	84779.1					
Results	Standard deviation	Non standard deviation	Non standard deviation	Non standard deviation	Non standard deviation	

(5) FMEA 결과 분석

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

(1) Commutator 편간 단차 : 60점

(2) Worm wheel 흔들림 : 45점

으로서 RPN 치가 가장 높은 것으로 나와 두 가지 사항이 시급히 개선해야 될 사항으로 판단되었다.

(2) 시험 결과

• 정류자 편간 단차 시험 결과

Fig. 6, Fig. 7은 정류자 편간 단차 시험결과에서 나타난 대표적인 제품의 시험 결과이다.

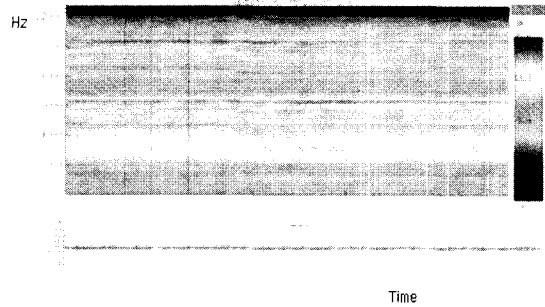


Fig. 6 Sonogram for BTB difference 0.5 μ

4.3 분석

(1) 시험계획 수립

4.2장 (5)에서 분석된 내용에 대한 시험 계획은 Table 6과 같다.

Table 4 Measurement data for mass production

Factor	A scale noise	Zwicker 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 6 Test condition for FMEA data

	Level		Test number of every level
	First level	Second level	
Commutator bar to bar difference	0~1 μm	1~2 μm	30 set
Worm wheel total composite error	0~0.03 mm	0.03~0.07 mm	30 set

Table 5 FMEA for mass production.

Item	Potential failure mode	Potential effect of failure	Action results			
			Severity	Occurrence	Detection	RPN
Noise	Brush noise	Commutator roundness	4	2	2	16
		Bar to bar difference	4	5	3	60
		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
		Yoke staking	3	2	3	18
		Commutator scratch	4	4	1	16
	Worm wheel	Worm wheel total composite error	5	2	3	30
		Worm wheel total composite error after insert	5	3	3	45
		Distance centrt of housing	4	2	2	16
		O/P shaft roughness	5	3	2	30
		Metal bush roundness	7	2	2	28
		Metal bush roughness	7	2	2	28
		Gap of O/P shaft and metal bush	5	3	2	30
	Run out of worm	5	3	2	30	
Abnormal noise	Worm scratch	3	4	3	36	
	A/R unbalance	4	2	2	16	
	A/R roundness	3	3	2	18	
	Yoke perpendicular	3	3	2	18	

30대 편간 단차 시험 결과에 대한 통계적 분석 결과는 Table 7과 같다.

Fig. 6 및 Fig. 7의 그래프를 비교하여도 정류자 편간 단차 1수준의 소음 값이 2수준의 값보다 우수하고 양산 데이터와 비교 하였을 때에도 우수한 것으로 판단된다.

• Worm wheel 개선 시험 결과

Worm wheel에 대한 분석 결과는 Table 8과 같다.

Fig. 8의 data에서 보면 1수준의 좋은 흔들림을 갖고 있음에도 불구하고 소음은 개선되고 있지 않은 것으로 판단이 된다. 따라서 worm wheel 흔들림은 소음에 큰 영향을 주지 않고 있는 것으로 판단이 된다.

• 통계적 분석 결과 해석

Table 7의 정류자 편간 단차에 대한 통계적 분석에서 A : 양산, B : 편간 단차 개선품(0~1 μm)에 대한 각 측정 data의 검정 결과 dBA : 94 %의 신뢰율로(R(신뢰율)=[1 - P value] × 100) 1 dBA 개선된 것으로 판단되고, Zwicker loudness sone, phone도 각각 98 %, 99 %의 신뢰율로 개선이 된 것으로 판단되었다.

이러한 결과는 일반적으로 신뢰율 95 % 이상일 때에 유의한 것으로 판단하는 통계적 기준에 대하여도 적합하고 관능적인 평가에 의해서도 상당히 개선이 된 것으로 판단이 되었다.

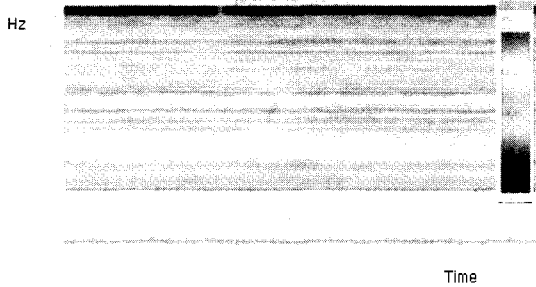


Fig. 7 Sonogram for BTB difference 1.7 μ

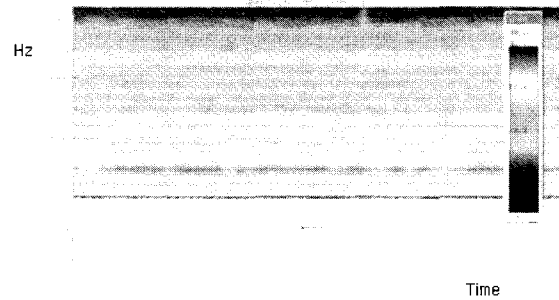


Fig. 8 Sonogram for worm wheel TCE 0.025 mm

Table 7 Hypothesis test for mass production data(minitap)

(A : 양산, B : 단차 0~1 μm)

Factor	Level	Mean	St Dev	P-value	Effect	Results
dBA	A	53	1.381	0.06	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			

Table 8 Hypothesis test for mass production data(minitap)

(A : 양산, B : 흔들림 0~0.03 mm)

Factor	Level	Mean	St Dev	P-value	Effect	Results
dBA	A	53	1.530	0.83	None	Accept
	B	52.5	1.580			
Zwicker loudness sone	A	4.37	0.430	0.36	None	Accept
	B	4.49	0.284			
Zwicker loudness phone	A	61.20	1.908	0.35	None	Accept
	B	61.60	1.487			
Zwicker loudness sharpness	A	2.57	0.143	0.62	None	Reject
	B	2.54	0.223			

또한 1dBA의 소음 개선으로 기존 8.48%의 라인 불량률을 1.79%로 개선 할 수 있을 것으로 판단되었다.

단 Table 8에서 보여주는 worm wheel 개선 시험 결과는 통계적으로도 개선이 안된 것으로 판단되었다. 이것은 현장 작업자 및 엔지니어가 감각적으로 느끼고 있던 소음에 영향을 미치는 인자가 실제 소음과 반드시 일치하고 있지는 않은 것으로 판단이 되며 이번 기회를 통하여 불필요한 인자의 관리를 위한 품질 비용 절감에도 많은 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단되었다.

5. 결 론

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

(1) 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 1dBA가 개선되었다. 1dBA의 소음 절감은 대량 생산시 불량률을 개선하고 품질 코스트를 절감 시키는 측면에 있어 상당한 성과를 이룬 것으로 판단되었다.

(3) 소음 인자로써 판단되었던 worm wheel의 흔들림은 현재의 기준으로는 큰 문제가 없는 것으로 확인이 되었다. 따라서 소음 관리를 위한 인자 중 worm wheel 흔들림을 제거 할 수 있어 품질 비용 절감에도 기여를 할 수 있을 것으로 판단되었다.

(4) 특히 다수의 제품을 이용한 시험 및 분석으로 얻은 신뢰율은 개선의 정도 및 개선의 정확도를 알수 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 사용될 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

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

참 고 문 헌

- (1) 박성현, 이명주, 정목용, "6 시그마 이론과 실제," 한국표준협회, p. 13.
- (2) 김명업, 이두호, 1999, "다구치 직교배열을 이용한 승용차의 실내소음 분석 및 개선," 한국소음진동공학회논문집, 제9권, 제5호, pp. 998~1004.
- (3) 박성현, 이명주, 이강근, "6 시그마 설계를 위한 DFSS," 한국표준협회, p. 14.
- (4) 박성현, 이명주, 정목용, "6 시그마 이론과 실제," 한국표준협회, p. 31.
- (5) 이강근, 서문호, "6 시그마 공정 능력 분석," (주) 시그마 스펙트럼, pp. 20~22.
- (6) 박성현, 이명주, 정목용 "6 시그마 이론과 실제," 한국표준협회, p. 212.
- (7) ISO 532B, Acoustic-method for Calculating Loudness Level, 1975.7.
- (8) "QS 9000 FMEA 작성 세칙," 한국품질환경인정협회.