

## 정밀부품 및 기기에 대한 환경시험기술

### Environmental Testing for Precision Parts and Instruments

최만용\*, 박정학\*, 윤규택\*

Man-Yong Choi\*, Jeong-Hak Park\* and Kyu-Tek Yun\*

**초 록** 정밀부품이나 기기는 개발과정이나 완료단계에서 부적절한 설계에 의하여 발생할지도 모르는 잠재적인 결함을 방지하기 위하여 시험평가를 실시하게 된다. 본 논문에서는 신뢰성 기술 분야의 기초가 되는 환경시험기술을 소개하였으며 엔코더, 교통신호제어기, 계측기기 및 위성항법 수신기 등 제품단위의 대상품에 대한 시험조건 및 방법 등을 기술하고 시험사례를 보고하였다. 이러한 사례를 통하여 제품의 신뢰성 향상을 위한 복합환경시험의 중요성을 강조하였고 최근 환경시험기술에 대한 인식이 날로 증대되면서 시험기술자 양성, 지그설계기술 그리고 고장해석 및 대책기술의 확보가 매우 필요함을 제안하였다.

**주요어:** 정밀부품 및 기기, 환경시험, 신뢰성, 엔코더, 고장해석

**Abstract** Precision parts and instruments are tested to evaluate performance in development-process and product-step to prevent a potential defect due to a failure design. In this paper, Environmental test technology, which is the basis of reliability analysis, is introduced with examples of test criterion, test method for products, encoder and traffic signal controller, and measuring instruments. Recently, as the importance of the environmental test technology is recognised, It is proposed that training of test technician and technology of jig design and failure analysis are very essential.

**Keywords :** Precision parts and instruments, environmental test, reliability, encoder, failure analysis

#### 1. 서 론

신뢰성이란 사용자가 제품을 사용할 때 제품에 대한 최종적인 평가로써 제품이 어느 기간 동안 어느 정도로 정상 가동되어 사용자에게 편리함과 사용효과를 얻게 하느냐 하는 것이다. 신뢰성시험에 관한 대부분은 부품단위로 소개되는 경우가 많고 실제로 전기·전자·기계 부품위주로 신뢰성평가가 수행되어 왔다. 그러나 실제 사용자 측면에서는 제품전체에 관한 품질보증에 관심이 많으며 그것에 대한 신뢰성데이터를 갖기를 원하고 있

다. 어느 한편은 통계기술위주의 이론적 측면에만 치우쳐있어 그 자체로 만족되는 인상을 주고 현장에 별로 도움을 주지 못하는 것이 사실이다. 최근 국내에서 신뢰성에 관한 논문발표도 많고 현장에서 여러 기술평가가 진행되고 있어 고무적인 상황에 돌입하고 있다. 특히 정부에서 품질신뢰성에 관심을 두고 여러 곳에 센터를 개설하고 국제경쟁력을 갖추기 위해 제도적 장치도 마련하였다.

신뢰성기술은 시간과 절대적인 관계에 있다. 아무리 우수한 기능을 지니고 있고 값이 싸더라도 기대하는 시간

동안 그 제품을 구입 목적으로 사용할 수 없다면 그 제품의 가치는 저하되기 마련이다. 또한 고장에 따르는 손해의 증대와 더불어 제품 책임에 따른 신뢰성 향상이 무엇보다도 우선 과제로 대두되고 있다. 이에 따라 제품의 수명 관련 품질 특성값의 추정, 새로운 고장 원인의 발견, 새로운 설계나 제조 공정의 비교나 평가를 위한 신뢰성 분석의 중요성이 점점더 증대되고 있다. 이를 위해 실험실에서 행해지는 시험을 통한 고장 자료뿐만 아니라 현장에서 얻어지는 고장 자료로 부터의 신뢰성 분석이 요구되어 진다.

본 논문에서는 신뢰성 데이터를 생산하는 방법 중에서 기본이 되는 환경시험기술에 대하여 소개하고 몇 가지 시험 사례를 통하여 부품 및 기기의 신뢰성 시험 기술 결과를 보고한다.

2. 부품 및 기기 환경시험기술

현대 산업 사회에서는 매우 다양한 종류의 부품 및 기기가 사용되고 있으며 정밀·정확도(불확도)가 대단히 중요한 시점에 도달하고 있다. 거대설비의 이상 상태 감지에 있어서는 그 중요성이 더하다고 말할 수 있다. 그동안 국내에서 사용되는 대부분의 센서나 계측장비는 신뢰성의 검증 없이 그대로 사용되어 왔으며 현장에서 사용되는 경우 여러 가지 환경조건에 노출됨은 물론이고 아울러 노후화 되어 얼마가지 않아 제 기능을 발휘하지 못하게 되는 경우가 종종 발생하게 된다. 따라서 사용하고 있는 제품이나 개발된 제품에 대한 환경시험을 통하여 신뢰성 데이터를 확보하는 기술은 매우 중요하다.

부품 및 기기에 대하여 고려해야할 환경스트레스 시험은 다양하며 IEC, MIL, KS 등의 관련 규격을 참고로 하여 시험 규격을 결정하여 환경시험을 실시하게 된다. 환경시험기술은 일반적으로 다음과 같은 방법이 있다.

2.1. 온·습도 환경시험기술

온도, 습도시험 및 온·습도사이클시험, 열충격시험 등 기후에 관련된 것으로 기후환경시험이라고도 한다.

2.2. 진동 및 충격시험기술

사인진동시험, 랜덤진동시험 및 충격시험 등 역학적 충격을 가하는 것으로 기계적 환경시험이라고 부른다.

2.3. 전자기적 환경시험기술

전원변동시험, 너저지시험, 내전압시험, 절연저항시험 및 전자파시험 등 전자기적 환경과 관련된 시험이다.

2.4. 복합환경시험기술

부품 및 기기가 현장에서 사용될 때의 환경은 단일환경조건이 아니고 온도, 습도, 진동 및 전자기환경이 복합된 형태이지만 지금까지 대부분 국내에서 수행되는 환경시험은 단일환경조건에서 수행되었고 복합환경시험은 그리 많지 않았다. 앞으로 복합환경시험은 가속수명평가 등에 적극적으로 활용해야 될 것이다.

3. 엔코더의 환경시험기술

이상적으로, 변환기는 고유현상에 두 개의 평행선과

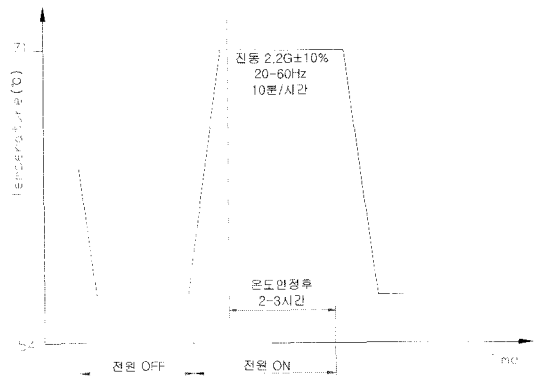


Fig. 1 MIL-STD-781B 시험수준F의 환경조건

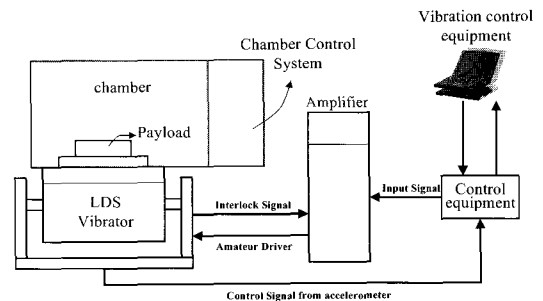


Fig. 2 복합환경시험 개요도

같은 전기적 신호 또는 디지털출력을 계속해야한다. 기본적으로, 엔코더는 회전의 각을 측정하고, 변위, 힘, 압력, 수준 그외의 적용에서 사용되며 광학 엔코더는 투명한 부분과 불투명한 부분으로 만들어진 분할된 디스크, 광원과 광학시스템이 연결된 부분, 광원탐지기의 3개의 주요한 구성요소를 가지고 있다. 광학엔코더의 분할된 디스크는 고정밀도를 위해서 광에칭에 의해서 만들어졌으며 광학엔코더의 출력은 전기의 펄스를 공급한다. 이 펄스의 주파수는 회전속도에 비례하고 속력신호는 추가 전자회로를 사용하는 엔코더에서 펄스를 처리하는 것에 의해 얻게 된다. 광학엔코딩 시스템은 여러 가지 주위의 조건에 의해서 작동하며 신뢰성의 관점으로부터 여러 가지 주위의 요소들(온도, 습도, 진동, 잡음)하에서 엔코더의 성능평가를 실시하였다.

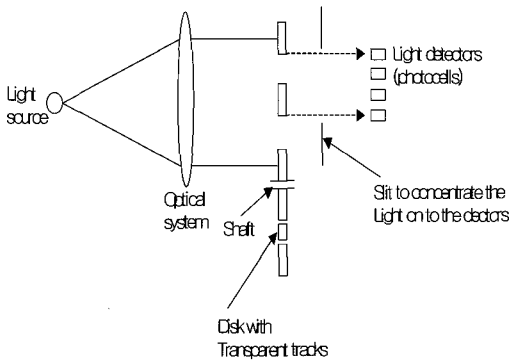


Fig. 3 Optical encoding system

3.1. 광학엔코더의 환경시험

한국에서 만들어진 광학엔코더는 RPM 측정 미터에 설치되고, 최대 4000rpm으로 평가받았던 변속 장치로 DC 모터의 구동축에 의해 이어졌다. 광학엔코더의 성능을 보여주기 위해서 DC 모터의 구동축을 360, 720, 1440, 2880와 3600RPM으로 회전시켰다. 시간에 대한 함수로서 속도의 변경은 환경요인과 함께 디지털 오실로스코프로 관찰하였다.

3.1.1. 시험된 엔코더의 명세사항

Table 1 Encoder specification

Item	Specification
Resolution	500 pulse/revolution
Detecting type	Optical
Signal output	A, B, Z phase with rectangular

3.1.2. 엔코더의 성능시험을 하기 위한 환경시험 조건

Table 2 Environmental factor and stress level

Environmental factor	Stress level
Temperature	-10°C ~ 55°C
Humidity	60 ~ 95% R.H
Vibration	Frequency 10 ~ 40 Hz: Amplitude 1.5mm
	Frequency 40 ~ 55 Hz: Acceleration 5G
Encoder speed	360 ~ 4000 rpm
Electric noise	Burst 500V, 1000V

3.2. 환경시험 결과

3.2.1. 성능시험 결과

Table 3 성능시험(360RPM, 10Vdc)

Testing item		Temp.of test(°C)		
		-10	20	55
1 Rise time(μs)	A Phase	0.834	0.834	0.825
	B Phase	0.816	0.816	0.834
2 Falling time(μs)	A Phase	0.844	0.867	0.857
	B Phase	0.826	0.829	0.857
3 Power consumption(A)		0.136	0.1418	0.149

- starting torque : less than 2.0g-m
- AC High Voltage Insulation test : 1min, AC 500V
- Insulation test : greater than 500MΩ(DC500V)

3.2.2. 진동시험 결과

Table 4 진동시험 결과

Frequency(Hz)	Stress level	Results
10 ~ 40	Amplitude 1.5mm	Abnormal output of encoder and failure were not found
40 ~ 50	Acceleration 5G	

3.2.3. 온도시험 결과

Table 5 온도시험 결과

온도 (°C)	습도 (%R.H)	rpm	Output Frequency (kHz)		Duty(%)	
			A Phase	B Phase	A Phase	B Phase
-10	60	360	3.019	2.994	57.40	54.77
		720	6.061	6.024	61.24	58.45
		1440	12.06	12.05	59.00	55.45
		2880	24.05	24.02	60.01	61.18
		3600	30.02	30.06	76.56	71.27
20	60	360	2.993	2.995	50.96	54.27
		720	6.024	6.079	54.27	52.61
		1440	12.02	12.03	51.74	53.78
		2880	24.05	24.08	51.56	52.72
		3600	30.08	30.00	54.51	51.87
55	60	360	3.076	3.016	45.56	43.35
		720	6.009	6.012	45.79	45.30
		1440	12.02	12.05	46.25	44.92
		2880	24.01	24.02	41.96	37.67
		3600	30.13	30.17	40.00	39.84

※ 엔코더 출력의 전압변화 시험동안 발견되지 않았음 (360 ~ 4000rpm)

3.2.4. 습도시험 결과

Table 6 습도시험 결과

온도	습도	rpm	Output Frequency (kHz)		Duty(%)	
			A Phase	B Phase	A Phase	B Phase
55	95	360	2.999	3.006	45.17	44.80
		720	6.008	6.005	44.80	45.39
		1440	12.06	11.99	43.08	42.75
		2880	24.00	23.98	*38~43	42.08
		3600	29.33	30.01	*35~43	39.08

※ 엔코더 출력의 전압변화 시험동안 발견되지 않았음 (360 ~ 4000 rpm)

\* 효율의 변화가 발견되었음.

4. 교통신호제어기의 환경시험기술

교통의 흐름을 제어하는 교통신호제어기는 24시간동안 작동하며 정확하게 사용되지 않으면 안전사고는 물론 물류 흐름을 원활하게 하지 못하여 막대한 경제적 손실을 유발하게 된다. 대부분의 신호제어기는 야외에 노출되어 있고 유선으로 연결되어 있어서 다양한 환경조건과 장시간의 신뢰성 요구를 받게된다. 본 실험에서는 다양한 환

경조건을 시험하여 신호제어기의 신뢰성 향상을 도모하고자 하였고 그 시험방법 및 결과의 일부를 소개하고자 한다.

4.1. 외관검사

육안검사 및 촉수검사를 원칙으로 하고 필요한 경우에는 기구를 사용하며, 합체의 도색상태, 연결단자, Connector 등의 연결상태를 검사한다.

4.2. 기능시험

4.2.1. 전기적 안정도시험

- 정격하한전압으로부터 정격상한전압으로 가변시키면서 주제어기의 상태를 시험한다.
- 전원차단을 시킨 후 500msec 이내에 전원 복구시는 계속 진행하여야 하고 1000msec 이후에 전원 복구시는 주제어기가 초기 동작상태로 전환되어야 한다.

4.2.2. 조작스위치 기능시험

- 전원 ON/OFF 기능시험
- 신호등 ON/OFF 기능시험
- 신호등 점멸 기능시험
- 수동조작 기능시험

4.2.3. 출력시간 정확도시험

- 1Cycle 시간의 오차가 100ms 이내에 들어가는지를 10회 이상 반복하여 시험한다.

4.2.4. 모순검지 기능시험

- 신호모순검지 기능시험
- Red Fail 검지 기능시험
- 전압이상 검지 기능시험

4.2.5. 시간계획제어(TOD) 기능시험

- 주제어기에 내장된 시간을 지시기를 통해 표시하고 시간대의 간격을 30분 정도로 하는 각기 다른

Program Data를 입력시키고 미리 정한 시간에 해당 Program Data로 변환되는가 지시기를 통하여 확인하며 시험은 최소한 3개 이상의 시간대에 적용한다.

#### 4.3. 온습도 환경시험

##### 4.3.1. 시험조건

- 전원차단시험
- 출력시간 정확도시험
- 신호모순 검지 기능시험

##### 4.3.2. 저온저전압시험

제어기에 정격하한전압 190V AC를 인가 한 상태에서 Chamber의 온도를 -34℃까지 낮춘 다음 10시간 동안 시험한 후 모든 기능이 정상동작되는지 확인한다.

##### 4.3.3. 저온고전압시험

제어기에 정격상한전압 250V AC를 인가 한 상태에서 Chamber의 온도를 -34℃까지 낮춘 다음 1시간 동안 시험한 후 모든 기능이 정상동작되는지 확인한다.

##### 4.3.4. 고온고전압시험

제어기에 정격상한전압 250V AC를 인가 한 상태에서 Chamber의 온도를 74℃, 습도 18%로 유지시킨 다음 15시간 동안 시험한 후 모든 기능이 정상동작되는지 확인한다.

##### 4.3.5. 고온저전압시험

제어기에 정격상한전압 190V AC를 인가 한 상태에서 Chamber의 온도를 74℃, 습도 18%로 유지시킨 다음 3시간 동안 시험한 후 모든 기능이 정상동작되는지 확인한다.

#### 4.4. 진동시험

##### 4.4.1. 공진시험

복진폭 0.76mm, 시험주파수변화를1Hz/sec로 시험주파

수 범위를 1회 왕복하여 X축, Y축 그리고 Z축에 대하여 각각 공진주파수 시험을 한다.

##### 4.4.2. 내구력시험

시험기기를 0.5g의 가속력으로 공진주파수 각 면에 대하여 1시간동안 진동하여 이상유무를 관찰한다.

#### 4.5. 충격시험

세 수평면 각각에서 시험기기에 10g±1g 충격을 가하여 기기 내·외부의 이상 유무를 관찰한다.

#### 4.6. 전자기적 시험

##### 4.6.1. 절연저항시험

제어기의 절연저항을 500V 절연저항계로 측정하였을 때 10M이상이어야 한다.

##### 4.6.2. 교류 내전압시험

주제어기에 1500V AC를 인가하였을 때 1분간 견디어야 한다.

##### 4.6.3. 직류 내전압시험

주제어기에 1500V DC를 인가하였을 때 1분간 견디어야 한다.

##### 4.6.4. 리치 임펄스 내전압시험

주제어기에 교류 입력전원 1×40sec, 5000V 또는 8×20sec, 5000V의 임펄스를 인가한다.

#### 5. 일반 계측기기 환경시험기술

일반 계측기기에 적용하는 환경시험조건은 기기에 따라 IEC, MIL, KS 등의 관련 규격을 참고로 하여 시험 규격을 결정하여 시험을 실시하게 된다. 여기서는 VIBLOW POINT의 환경시험에 대하여 기술하였다.

5.1. 온도시험

5.1.1. 실험방법

시료의 전원을 차단한 상태에서 영하 10℃에서 영상 50℃까지 온도변화를 24시간 이내에 3회 반복하여 시험한다.

5.1.2. 시험전후의 시료동작 측정결과

160Hz에 1S(S=100mV RMS)일 때 총진동 값이고 단위는 mm/s RMS 이다.

Table 7 온도시험 결과

번호		1	2	3	4	5	평균
시험 전	측정 모드	9.82	9.82	9.81	9.82	9.82	9.82
	수집 모드	9.82	9.82	9.82	9.81	9.83	9.82
시험 후	측정 모드	9.82	9.83	9.80	9.82	9.82	9.82
	수집 모드	9.84	9.83	9.82	9.84	9.81	9.82

$$\text{측정모드} = \frac{9.82 - 9.82}{9.82} \times 100\% = 0.0\%$$

$$\text{수집모드} = \frac{9.82 - 9.82}{9.82} \times 100\% = 0.0\%$$

5.2. 진동시험

5.2.1. 실험방법

시료의 전원을 차단한 상태에서 아래의 진동시험수준으로 시험한다.

Table 8 진동시험 조건

진동방향	시험주파수	진동수준	시험시간
X축	160Hz	1G	1시간
Y축	160Hz	1G	1시간
Z축	160Hz	1G	1시간

5.2.2. 시험전후의 시료동작 측정결과

Table 9 진동시험 결과

<X축 방향>

번호		1	2	3	4	5	평균
시험 전	측정 모드	9.83	10.03	9.82	9.84	9.83	9.87
	수집 모드	9.98	9.86	9.82	9.84	9.80	9.86
시험 후	측정 모드	9.82	9.79	9.83	9.80	9.82	9.82
	수집 모드	9.80	9.83	9.81	9.79	9.83	9.82

160Hz에 1S(S=100mV RMS)일 때 총진동 값이고 단위는 mm/s RMS 이다.

$$\text{측정모드} = \frac{9.87 - 9.82}{9.87} \times 100\% = 0.5\%$$

$$\text{수집모드} = \frac{9.86 - 9.82}{9.86} \times 100\% = 0.4\%$$

5.3. 습도시험

5.3.1. 실험방법

시료의 전원을 차단한 상태에서 온도 23℃, 습도 90%의 환경 하에서 4시간 동안 시험한다.

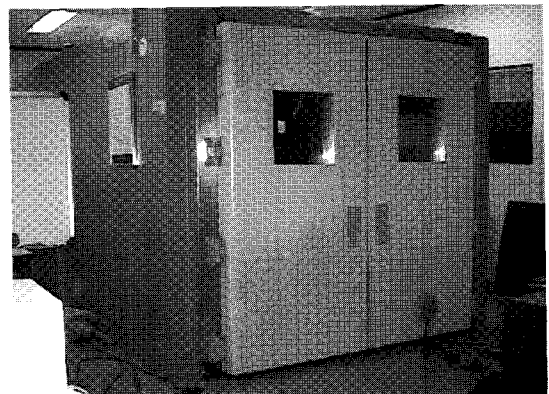


Fig. 4 Walk-In Chamber

5.3.2. 시험전후의 시료동작 측정결과

160Hz에 1S(S=100mV RMS)일 때 총진동 값이고 단위는 mm/s RMS 이다.

Table 10 습도시험 결과

실험		번호					평균
		1	2	3	4	5	
시험전	측정 모드	9.78	9.82	9.80	9.82	9.82	9.81
	수집 모드	9.81	9.84	9.82	9.79	9.82	9.82
시험후	측정 모드	9.80	9.83	9.79	9.81	9.80	9.81
	수집 모드	9.79	9.82	9.80	9.79	9.81	9.80

$$\text{측정모드} = \frac{9.81 - 9.81}{9.81} \times 100\% = 0.0\%$$

$$\text{수집모드} = \frac{9.82 - 9.80}{9.82} \times 100\% = 0.2\%$$

6. 위성항법 수신기의 복합환경시험

복합환경시험은 온도 및 진동의 영향을 동시에 고려하여 2개의 환경조건을 복합적으로 제품에 적용하여 제품의 특성을 파악하는 기술이다. 여기서는 위성항법 수신기의 복합환경시험에 대하여 기술한다.

6.1. Burn-In시험

아래의 시험조건에 따라 Burn-In시험을 실시 시험하였다.

Table 11 Burn-In시험 조건

온도 시험	고온	+50°C
	저온	-20°C
진동 시험	진동형태	Random Vibration
	진동방향	1축(Vehicle)
	진동시간	10분
동작 시험	시험시간	10분 (진동시험시)
주기수		4주기
소요시간/주기		4시간 (고온, 저온 각 2시간)

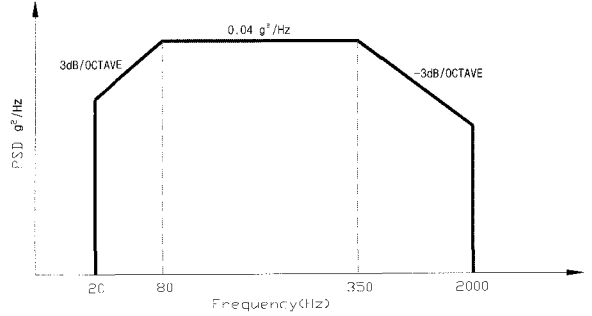


Fig. 5 Random Vibration

5.2. 시료동작 측정결과

구분	평가 항목	점검 결과
시험전	시리얼 통신 유무 점검	57600bps 통신 확인
	MIL-STD-1553B 통신 유무 점검	RT Add5, Bus A 확인
	Cold Start 명령 전달 및 상태 점검	초기화 확인
	항법 정보 출력 유무 점검	1Hz 출력확인
	위성 정보 검출 능력 및 저장 기능 점검	Good Almanac 확인
시험중	시리얼 통신 유무 점검	57600bps 통신 확인
	MIL-STD 1553B 통신 유무 점검	RT Add5, Bus A 확인
	항법 정보 출력 유지 유무 점검	1Hz 출력확인
	GPS 위성 추적 유지 유무 점검	유지 확인
시험후	시리얼 통신 유무 점검	57600bps 통신 확인
	MIL-STD-1553B 통신 유무 점검	RT Add5, Bus A 확인
	항법 정보 출력 유지 유무 점검	1Hz 출력확인
	GPS 위성 추적 유지 유무 점검	유지 확인
	Cold Start 명령 전달 및 상태 점검	초기화 확인
	위성 정보 검출 능력 및 저장 기능 점검	Good Almanac 확인

7. 부품 및 기기 환경시험 기술에 대한 고찰

부품 및 기기의 제품군으로 생산되는 제작품에 대한 신뢰성 데이터를 확보하고자 여러가지 제품과 다양한 환경조건에서 환경스트레스를 가한 결과를 통하여 다음과

같은 것을 고찰하고자 한다.

첫째, 그동안 국내에서 개발되는 센서 및 계측기기가 소수에 불과하였으므로 신뢰성에 대한 큰 관심 없이 생산 판매되었다. 그 결과로 환경시험 규격이나 신뢰성 보증체제가 거의 마련되어 있지 못하였다. 따라서 고부가가치인 센서 및 계측기기 개발사업을 육성시키는 동시에 신뢰성 대책 기술도 동시에 개발해야 될 것이다.

둘째, 비교적 고정밀 환경시험이 요구되는 계측기구나 센서류에 대한 시험기술은 까다로우므로 환경시험을 수행하는 기관도 회피하는 경우가 많았고 시험 기술자가 자주 바뀌므로 단일환경 및 단순부품에 치중되어 왔다. 앞으로는 센서 및 정밀기기를 시험할 수 있는 전문가를 양성하여 진동시험 설계기술 확보 등 핵심환경시험기술의 개발이 필요하다.

셋째, 가장 중요한 것으로 환경시험을 수행하고 나면 고장현상이 발생하는 경우가 대부분이다. 특히 초기제품인 경우 그렇다. 대부분의 센서 및 기기 제조회사에서는 고장원인을 잘 파악하지 못하는 경우가 많다. 환경시험기술은 일반화될 수 있지만 고장원인은 다양하고 재료, 회로, 센서 및 기구물 등에 대한 전문적인 지식이 없이는 고장대책이 불가능하거나, 장기간의 시간이 소요되는 것이 대부분이다. 교통신호제어기를 수년동안 환경시험하여 오면서 제조업체와 꾸준히 품질신뢰성에 관심을 가지고 노력한 결과 현재는 거의 고장이 없는 제품을 생산하는 수준에 이르게 되었다. 따라서 고장물리 및 신뢰성설계기술 등을 동원하여 적극적으로 지원하지 않으면 제품의 신뢰성향상은 더디게 발전할 것이다.

## 8. 결 론

엔코더 및 교통신호제어기 등 몇 개의 부품 및 기기에 대한 환경시험결과 다음과 같은 결론을 갖고자 한다.

첫째, 부품 및 기기에 대한 환경시험은 제품 신뢰성 평가 차원에서 수행되어야 하며 기후환경시험, 기계적 환경시험, 전자기적 환경 시험 및 복합환경시험을 통하여 대부분의 신뢰성 데이터의 확보가 가능하며 품질개선의 자료로 활용된다.

둘째, 특히 부품이나 기기의 경우 고장이발생하였을 때 이것에 대한 대책기술을 개발하거나 자문할 수 있는 전문가 그룹 및 고장분석센터 같은 조직이 필요하다.

셋째, 신뢰성기술의 필요성이 날로 증대되고 있으므로 규격검토 및 지그설계를 포함한 신뢰성 설계기술과 실질적으로 신뢰성 시험을 수행할 수 있는 전문가의 육성이 시급하다.

## 참고문헌

- [1] V.B Patki, B.N Chatterji, "Reliability and maintainability consideration in computer performance evaluation" : IEEE Trans. Reliability, Vol. 32, No. pp. 433-436, (1983)
- [2] R.Bonert, "Design of a high performance digital tachometer with a microcontroller" : IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, Vol. 38, No. 6, pp. 1104-1108, (1983)
- [3] Sensor technology : Vol. 9, No. 8, pp. 80-26, Japan (1989)
- [4] Sensor technology : Vol. 10, No. 4, pp. 23-26, Japan (1990)
- [5] Sensor technology : Vol. 11, No. 6, pp. 35-64, Japan (1991)
- [6] M. Y. Choi and S. J. Lim, "Performance Evaluation of Encoder," Proceedings of the Fourth Rok-Roc Metrology Symposium, May 19-21, pp. 163-166, (1992)
- [7] J.E. Arsennautt, "Reliability and maintainability of Electronic System," Computer Science Press
- [8] 정해성, 박동호, 김재주, "신뢰성 분석과 응용", 영지문화사(1999)
- [9] 신뢰성시험 가이드, 일본과학기술연맹
- [10] 이근오, 강영식, 백종배, "설비신뢰성공학", 동화기연(2000)
- [11] 한응교, "신뢰비파괴검사공학", 학연사(2001)