

## 가속열화시험을 적용한 MEMS 진공패키지의 신뢰성 분석 및 개선

최민석, 김운배, 정병길, 좌성훈, 송기무

삼성종합기술원 MEMS Lab.

## Reliability Assessment and Improvement of MEMS Vacuum Package with Accelerated Degradation Test (ADT)

MinSeog Choi, WoonBae Kim, ByungGil Jeong, SungHoon Choa and CiMoo Song

MEMS Lab., Samsung Advanced Institute of Technology

### Abstract

We carry out reliability tests and investigate the failure mechanisms of the wafer level vacuum packaged MEMS gyroscope sensor using an accelerated degradation test. The accelerated degradation test (ADT) is used to evaluate reliability (and/or life) of the MEMS vacuum package and to select the accelerated test conditions, which reduce the reliability testing time. Using the failure distribution model and stress-life model, we are able to estimate the average life time of the vacuum package, which is well agreed with the measured data. After improving several package reliability issues such as prevention of gas diffusion through package, we carry out another set of accelerated tests at the chosen acceleration level. The results show that reliability of the vacuum packaged gyroscope has been greatly improved and can survive without degradation of performance, which is the Q-factor in gyroscope sensor, during environmental stress reliability tests.

## 1. 서론

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 기술은 기존의 반도체 공정 기술을 이용하여 기계적이며 전기적인 마이크로미터 크기의 초소형 기계를 개발하는 새로운 기술 분야이다. 이렇게 만들어지는 기계들은 센서, 액추에이터, 통신기기 등 수많은 기기의 기능을 가질 수 있으며, 다양한 분야에서 응용될 수 있다. 최근 MEMS 기술을 이용한 많은 제품들이 상용화 단계에 접근함에 따라 MEMS 제품들의 내구성 및 신뢰성 문제가 크게 대두되고 있다. 특히 MEMS 소자가 자동차 및 우주 항공 등의 극한 상황에서 사용되어지는 경우가 많아짐에 따라 MEMS 소자의 장기 신뢰성 문제가 이슈화 되고 있다. 그러나 아직까지 MEMS 기술을 이용하여 제작된 소자 및 제품들이 어떻게 파괴되는 지에 대해서는 이해가 부족한 상태이며 이는 MEMS를 상용화하는 큰 걸림돌이 되고 있다.

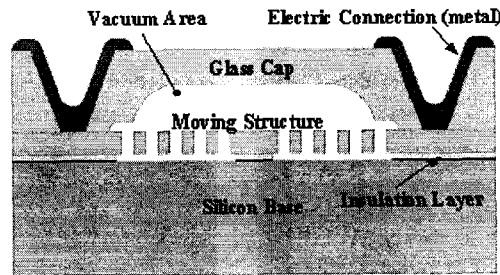
MEMS 기술을 이용한 제품의 대표적인 것으로는 MEMS 자이로스코프 센서(gyroscope sensor)가 있다. 자이로스코프는 선박과 항공기 등의 이동체의 자세와 각속도를 검출하는 센서로 이용되어 왔으며, 최근에는 캠코더의 손떨림 보상용 센서, 차량 주행의 안정화 장치, navigation 시스템 등에 활용되고 있다. 한편 기존의 자이로스코프는 기계식이나 광학식 또는 압전재료를 사용하여 제작되었으며, 정밀한 성능을 얻을 수 있는 장점있는 반면에 제작 비용이 많이 들고 부피가 커서 일반 산업, 가정용 전자제품에 사용되기에는 부적합하다. 이에 따라 소형, 저가격화 및 대량생산에서 유리한 MEMS 기술을 이용한 실리콘 진동형 자이로스코프의 연구 및 개발이 활발하게 진행되고 있다 [1]. 실리콘 진동형 자이로스코프의 원리는 정전기적인 힘에 의해 구조물을 특정 방향으로 진동시킨 상태에서 외부에서 각회전(또는 각속도)이 주어지면 진동과 회전방향의 직각방향에 나타나는 코리올리 힘(Coriolis force)을 검출하여 각회전의 정도를 측정하는 것이다. 그러나 마이크로한 크기의 실리콘 자이로구조물로는 매우 미약한 코리올리 힘을 검출하기가 어렵기 때문에 구조물의 공진을 이용하여 큰 감도를 얻는다. 또한 구조물의 동작하게 되면 구조물 주위의 공기 유동 및 점성에 의한 공기 감쇄현상으로 인하여 Q-factor (또는 quality factor)가 감소하기 때문에 구조물을 진공상태에서 작동시켜야 하며, 이를 위하여 고진공 패키징을 하여야 한다.

본 연구에서는 MEMS 자이로스코프 센서의 주 부품인 웨이퍼 레벨 진공패키징 (wafer level vacuum packaging; WLVP)된 MEMS 자이로스코프 칩의 환경보존 신뢰성 분석을 실시하였다. 모델변경이 잦은 개발 단계의 특성상 단시간에 신뢰성 분석/평가를 실시하기 위해 가속열화시험법을 적용하였다. 이를 위해 WLVP된 자이로스코프 칩의 고장모드를 분석하고 주요 가속인자를 선정하였으며 가속인자의 수준별 가속시험을 실시하였다. 시험결과로부터 정상상태의 WLVP 보존수명을 예측하고 가속인자의 수준별 가속팩터를 산출하였으며 정상조건 수명과 가속시험으로부터 예측된 수명의 비교를 통해 가속모델의 유효성을 검증하였다.

## 2. 고장 메커니즘 분석

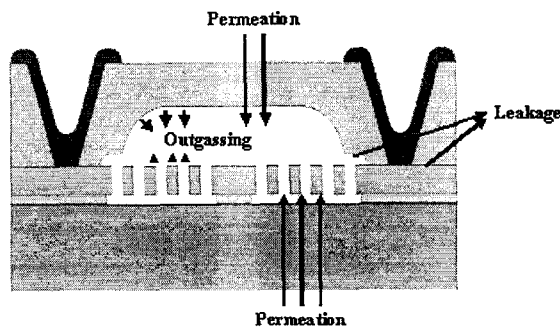
MEMS 자이로스코프 센서(이하 ‘자이로 센서’)에 적용한 웨이퍼 레벨 진공 패키지 방법으로 제작되는 패키지의 구조는 <Figure 1>과 같다. 패키지는 SOI (silicon on insulator) 실리콘 웨이퍼와 글래스 웨이퍼를 진공상태에서 양극접합 (anodic bonding)하여 제작하였다. 실리콘 웨이퍼에 자이로 구조를 형성하고 글래스 웨이퍼의 하부에 공동 (cavity)을 형성하고 적절한 진공압을 형성함으로써 내부에 형성된 실리콘 구조물이 적절한 댐핑 (damping) 하에서 구동이 될 수 있도록 하였다.

MEMS 자이로 센서 또는 자이로 칩의 신뢰성과 관련된 가장 중요한 두 가지는 고속으로 장시간 구동되는 구조물의 피로와 패키지의 진공도 유지 성능이다.



<Figure 1> Configuration of wafer level vacuum package for MEMS gyroscope chip.

본 자이로 칩의 경우 구조물의 피로현상은 없는 것으로 판명되었으나 시간의 경과에 따른 패키지 내부 진공도의 변화가 관찰되었다. 진공도 변화는 표면의 오염물 또는 재료 표면으로부터 자체 함유된 가스의 방출 (out-gassing), 외부 가스의 재료 격자 및 입계를 통한 가스투과 (permeation), 미세한 크랙 등을 통한 외부 가스침투 (leakage) 등의 메커니즘이 알려져 있다 [2]. MEMS 자이로 진공 패키지에서 예상되는 이와 같은 진공도 파괴의 고장 메커니즘은 <Figure 2>와 같다.



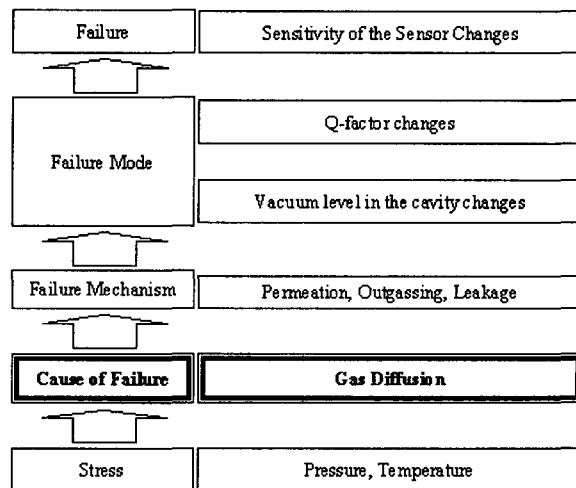
<Figure 2> Failure mechanisms of the MEMS vacuum package.

자이로 칩 고장발생 메카니즘에 대한 개념도는 <Figure 3>과 같다. 자이로 센서 신뢰성과 관련한 대표적인 고장형태는 입력 각속도에 대한 출력 감도 (sensitivity)의 변화이다. 센서의 출력감도에 영향을 미치는 핵심 인자는 자이로 칩 (chip)의 패키지 내부 진공도 변화 또는 이에 따른 Q-factor 변화이며 움직이는 구조물의 질량을  $m$ , 강성을  $k$ , 댐핑 상수를  $c$ 라고 할 때 다음과 같이 정의된다.

$$Q = \frac{\text{Energy Stored per Cycle}}{\text{Energy Lost per Cycle}} = \frac{\sqrt{mk}}{c} \quad (1)$$

구조물 질량과 스프링 상수가 일정하다고 가정하면 패키지 내부의 진공도 변화는 댐핑 상수  $c$ 값을 변화시키고 결과적으로  $Q$  값을 변화시킨다. 따라서 측정 가능한 물리량인  $Q$  값의 변화 현상을 진공 패키지의 고장모드로 정의한다. 이러한 고장모드를 일으키는 고장메커니즘은 가스방출, 가스투과 및 가스침투가 대표적이다. 이와 같은 고장 메커니즘은 모두 고체 내부에서의 가스 확산 (gas diffusion)에 의해서 진행된다고 알려져 있다 [2].

가스확산 과정에 영향을 미치는 주요 인자는 패키지 내부 및 외부의 압력차와 온도이며 [3], 자이로 칩의 경우 패키지 내부의 압력은 설계에서 결정되고 사용 중 가스 확산은 주로 온도 변화에 의존하게 된다. 고체 재료의 온도가 증가함에 따라 재료 내부의 기공 (pore), 결함 (defect) 및 침투로 (leak channel)의 크기가 증가하고 가스 분자의 운동에너지가 증가함에 따라 가스분자의 이동이 쉬어지고 가스 투과율이 증가한다. 이와 같이 단위 시간 당 외부 가스의 유입량은 온도가 높을수록 증가하여 내부의 진공도를 낮추고 댐핑상수를 증가시켜  $Q$  값 변화 (감소)를 촉진시키게 된다. 본 연구에서는 기초시험을 실시하고 자이로 칩의 가속열화 시험을 위한 가속인자로서 시험온도를 선정하였다.



<Figure 3> Failure mechanism of MEMS gyroscope sensor

### 3. 가속 열화 시험

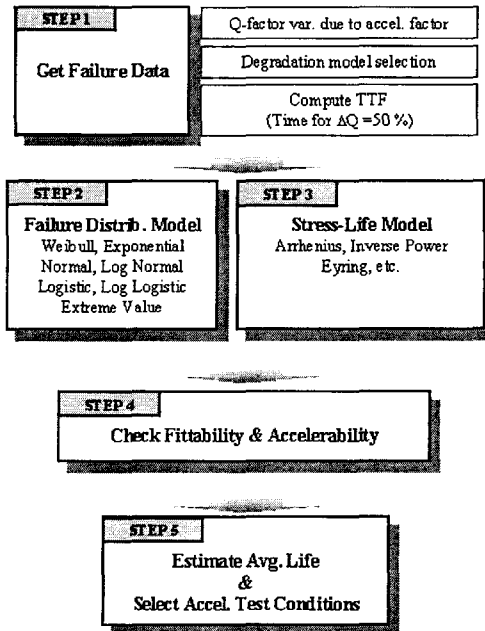
자이로 칩 진공패키지의 가속열화시험을 위한 전체적인 순서는 고장데이터 수집 (Step 1), 고장분포 모델 선정 (Step 2), 스트레스-수명 모델 선정 (Step 3), 적합성 및 가속성 검토 (Step 4), 평균 수명 및 가속시험 조건 선정 (Step 5)이다 (<Figure 4>).

시험은 스트레스 인자인 온도수준은 60℃, 85℃ 및 125℃ (3 수준)이며 각 온도별 시험 시간은 기초 시험을 통해 4 수준으로 정하고 각 시험 당 사용한 시료 수는 10개로 하였다 (<Table 1>). 본 시험은 시료의 고장시간을 연속적으로 모니터링할 수 없기 때문에 일정 시간마다 성능 값을 측정하고 이로부터 고장시간을 예측하는 방법을 사용하였다.

자이로 칩의 고장 판단의 기준이 되는 성능은 Q 값 변동량이며 다음 식과 같이 초기 Q값 대비 시험 후 Q 값의 변화율이 50 %가 되는 시간을 고장시간 (TTF, time to failure) 으로 정의하였다.

$$TTF = Time\_to\_ \left[ \Delta Q = \frac{Q_1 - Q_0}{Q_0} \times 100 = 50(\%) \right] \quad (2)$$

여기서  $Q_0$ 는 시험 전 Q 값이며  $Q_1$  은 시험 후 Q 값이다.



<Figure 4> Schematic for accelerated degradation test of WLVP

### 3.1 고장 데이터 수집

자이로 진공패키지의 고장 형태는 시간 경과에 따른 성능의 열화에 의해 발생하므로 성능의 열화과정에 대한 모델을 구하여 고장시간을 예측함으로써 간접적으로 고장데이터를 수집한다. 시간에 따른  $Q$  값 변동은 다음 식 (3)과 같이 지수적인 감소를 보인다.

$$Q(t) = Q_0 e^{-c \cdot t} \tag{3}$$

식 (2)와 같이  $Q$  변화율이 50 %인 시간을 계산하면 다음 식 (4) 및 식 (5)와 같이 고장시간을 구할 수 있다.

$$t = -\frac{1}{c} \ln\left(\frac{Q(t)}{Q_0}\right) \tag{4}$$

$$TTF = -\frac{1}{c} \ln(0.5) \tag{5}$$

<Table 1> Test plan for ADT of WLVP

Temperature	Test Time	No. of SPL
60 °C	0 hr	10 EA
	120 hr	
	240 hr	
	360 hr	
85 °C	0 hr	10 EA
	120 hr	
	240 hr	
	360 hr	
125 °C	0 hr	10 EA
	24 hr	
	48 hr	
	72 hr	

고장시간은 식 (5)와 같이 지수적으로 감소하는  $Q$  변화모델의 상수인  $c$ 의 함수이며 시험 결과 및 예측된 고장시간은 <Table 2>와 같다. 이후 분석에서는 이와 같이 간접적으로 예측된 고장시간을 이용하였다.

### 3.2 고장분포

고장분포 모델은 7 가지 분포 (Weibull, Lognormal, Normal, Exponential, Extreme value, Log-logistic, Logistic)에 대해 적합성을 고려하여 선정하였다. 미니탭 (MiniTab) [4]을 이용한 7 가지 확률분포의 고장 데이터에 대한 적합도는 <Table 3>과 같다.

<Table 2> TTF (time to failure) data from ADT

시험 온도 시도	60도			85도			125도		
	Q0	c	TTF[hr]	Q0	c	TTF[hr]	Q0	c	TTF[hr]
#1	3021	0.00126	552	3508	0.00307	226	2996	0.01305	53
#2	2994	0.00145	478	3315	0.00219	316	3040	0.01323	52
#3	3083	0.00160	432	3152	0.00271	256	2998	0.01351	51
#4	3098	0.00137	505	3090	0.00264	263	3004	0.01381	50
#5	3132	0.00162	428	2721	0.00256	271	3104	0.01274	54
#6	3123	0.00124	558	2690	0.00260	267	2980	0.01262	55
#7	3337	0.00189	366	2574	0.00291	238	3128	0.01137	61
#8	3253	0.00138	502	2223	0.00187	370	3014	0.01335	52
#9	3124	0.00112	618	2031	0.00188	369	3096	0.01399	50
#10	3182	0.00140	496	1481	0.00198	350	3292	0.01522	46
평균	3137	0.00143	493	2678	0.00244	293	3065	0.01329	52
표준편차	107	0.00022	73	629	0.00043	54	95	0.00100	4

<Table 3> Compatibility of failure distribution by Anderson-Darling (AD) index.

Distribution Model	Test Temperature (°C)	AD Index	Distribution Model	Test Temperature (°C)	AD Index
Weibull	60	1.246	Extreme Value	60	1.296
	85	1.567		85	1.629
	125	1.668		125	1.753
Log-normal	60	1.252	Log-logistic	60	1.174
	85	1.496		85	1.512
	125	1.388		125	1.359
Exponential	60	4.119	Logistic	60	1.202
	85	3.87		85	1.597
	125	4.586		125	1.416
Normal	60	1.229			
	85	1.571			
	125	1.436			

각 분포별 적합도는 Anderson-Darling (AD) 지수를 사용하며 수치가 낮을수록 적합도가 높다 [4]. 세 가지 온도에 대한 AD지수를 비교하면 전체적으로 로그로지스틱 (Log-logistic) 분포가 WLVP의 고장분포로서 가장 적합함을 알 수 있다.

자이로스코프 센서 웨이퍼 레벨 진공패키지의 고장분포는 <Table 3>에서와 같이 로그로지스틱분포이며 고장함수 (식 6), 고장확률밀도함수 (식 7), 고장율함수 (식 8) 및 신뢰도함수 (식 9)는 다음과 같다 [4].

$$F(t, \mu, \sigma) = \Phi_{\log is} \left( \frac{\ln t - \mu}{\sigma} \right) \tag{6}$$

$$f(t, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma t} \psi_{\log is} \left( \frac{\ln t - \mu}{\sigma} \right) \tag{7}$$

$$h(t, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma t} \Phi_{\log is} \left( \frac{\ln t - \mu}{\sigma} \right)$$

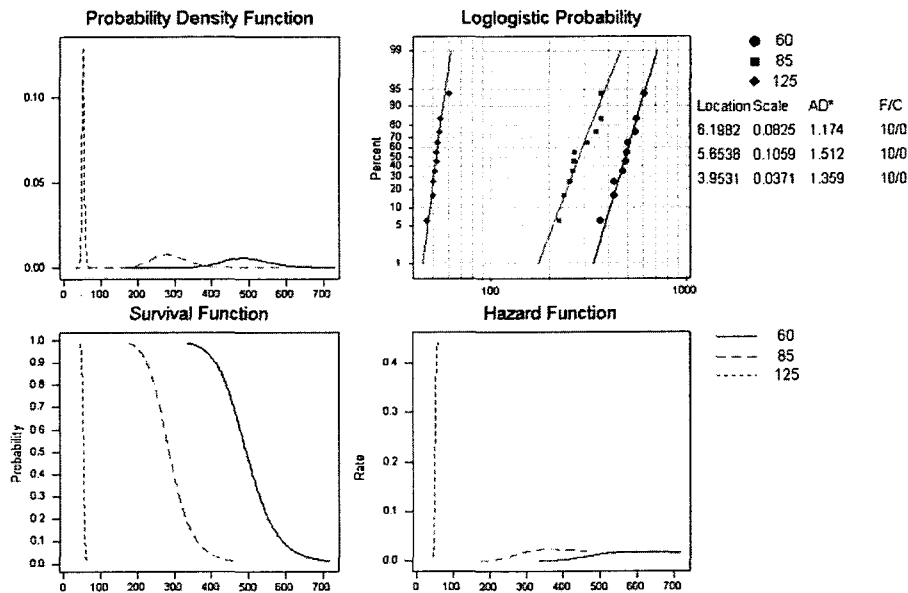
$$R(t, \mu, \sigma) = 1 - F(t, \mu, \sigma) \tag{8}$$

$$= 1 - \Phi_{\log is} \left( \frac{\ln t - \mu}{\sigma} \right)$$

where,

$$\Phi_{\log is}(z) = \frac{e^z}{1 + e^z}, \quad \psi_{\log is}(z) = \frac{e^z}{(1 + e^z)^2}$$

식 (6), (7), (8) 및 식 (9)에서 는 분포의 중심위치를 결정하는 위치모수이며 는 분포의 형상을 결정하는 척도모수를 나타낸다. WLVP 시험 데이터에 대한 고장함수, 고장 확률밀도 함수, 고장을 함수 및 신뢰도 함수의 모양은 <Figure 5>와 같다. 시험조건에 따른 두 모수 와 의 값은 60℃의 경우 6.198과 0.0825, 85℃의 경우 5.854와 0.1059, 125℃의 경우 3.953과 0.0371이다.



<Figure 5> Plot of stress-life distribution model



### 3.3 스트레스-수명 및 가속 모형

자이로칩의 Q 값으로 정의된 성능의 열화를 촉진시키는 주 가속 인자는 온도이며 이 경우 스트레스-수명 모형은 다음과 같은 아레니우스 (Arrhenius) 모형이 널리 사용되고 있다 [5].

$$L = C \cdot \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \tag{10}$$

위 식에서 L은 평균수명, C는 대상 제품에 따른 상수, E<sub>a</sub>는 활성화 에너지 (eV), k는 볼츠만 (Boltzman) 상수 (8.617110<sup>-5</sup> eV/K), T는 절대 온도를 나타낸다. 식 (10)의 양변에 대수를 취하면 다음과 같다.

$$\ln L = \ln C + \left(\frac{E_a}{kT}\right) \frac{1}{T} \tag{11}$$

식 (11)에서 수명의 대수값과 절대온도의 역수는 선형적인 관계를 나타내고 상수 lnC와 활성화 에너지 E<sub>a</sub>를 구하면 가속온도에 따른 평균 수명을 예측할 수 있다. 미니탭을 이용한 데이터 분석결과 lnC=-7.6957, E<sub>a</sub>=0.40285이다. 이 값을 식 (11)에 대입하고 정리하면 자이로 진공패키지의 스트레스\_수명 모형은 다음 식 (12) 및 식 (13)과 같다.

$$\ln L \equiv 7.6957 + \frac{4675}{T} \tag{12}$$

$$L = 0.000455 \cdot \exp\left(\frac{4675}{T}\right) [hr] \tag{13}$$

가속계수는 기준이 되는 정상 사용조건에서의 수명에 대한 가속조건에서의 수명의 비로 표현할 수 있으며 식 (13)으로부터 다음 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

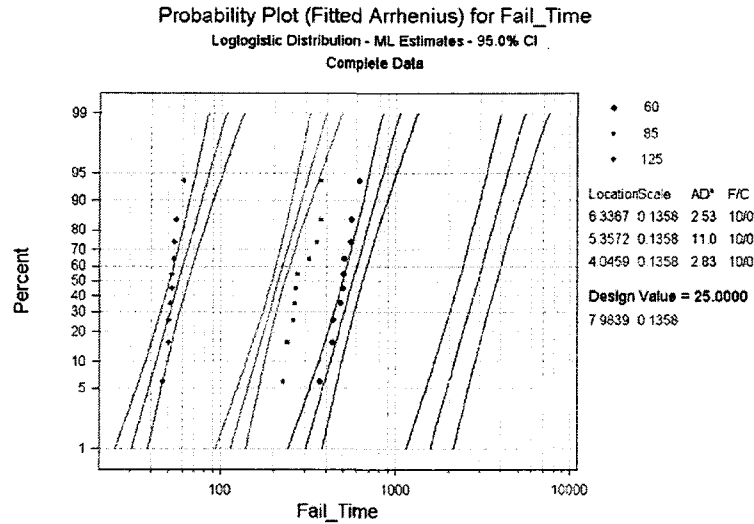
$$AF = \frac{L_n}{L_a} = \exp\left[4675\left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T_a}\right)\right] \tag{14}$$

AF는 가속계수, L<sub>n</sub>은 정상온도 T<sub>n</sub>에서의 수명, L<sub>a</sub>는 가속온도 T<sub>a</sub>에서의 수명을 각각 나타낸다.

### 3.4 수명분포 및 스트레스-수명 모형의 적합성/가속성

WLVP에 대한 수명분포 및 스트레스-수명 모형을 동시에 고려할 경우 분포의 적합성과 가속성에 대한 결과는 <Figure 6>과 같다. 그림에서 데이터들이 직선에 가깝게 분포하기 때문에 수명분포는 적합하다고 할 수 있으며 가속 조건별 분포선이 서로 평행하므로 가

속성이 있음을 알 수 있다 [4]. 또한 척도모수는 0.1358로 적합된다. 이 결과로부터 WLVP의 경우 고장분포는 로그로지스틱이며 아레니우스 모형에 의해 가속시킬 수 있음을 알 수 있다



<Figure 6> Compatibility and accelerability

### 3.5 수명예측 및 가속계수

MEMS 자이로스코프 센서용 WLVP의 요구수명은 제품 요구수명인 7~10년을 보장해야 한다. WLVP의 수명은 동공내의 진공도 유지성능에 의해 직접적으로 영향을 받기 때문에 제품의 사용과 상관없이 열화는 진행되고 따라서 WLVP의 수명은 보존수명으로 정의할 수 있다. 상온과 고온환경시험의 온도 범위 내에서 같은 고장 메커니즘을 갖는다고 가정하면 고온 환경보존 시험 자체가 상온 보존에 대한 가속시험으로 간주할 수 있으며 환경시험을 통해 상온수명을 예측하는 것이 가능하다. 식 (6)~식 (9)의 로그로지스틱 분포로부터 다음 식 (15)와 같이 평균수명을 구할 수 있다 [4].

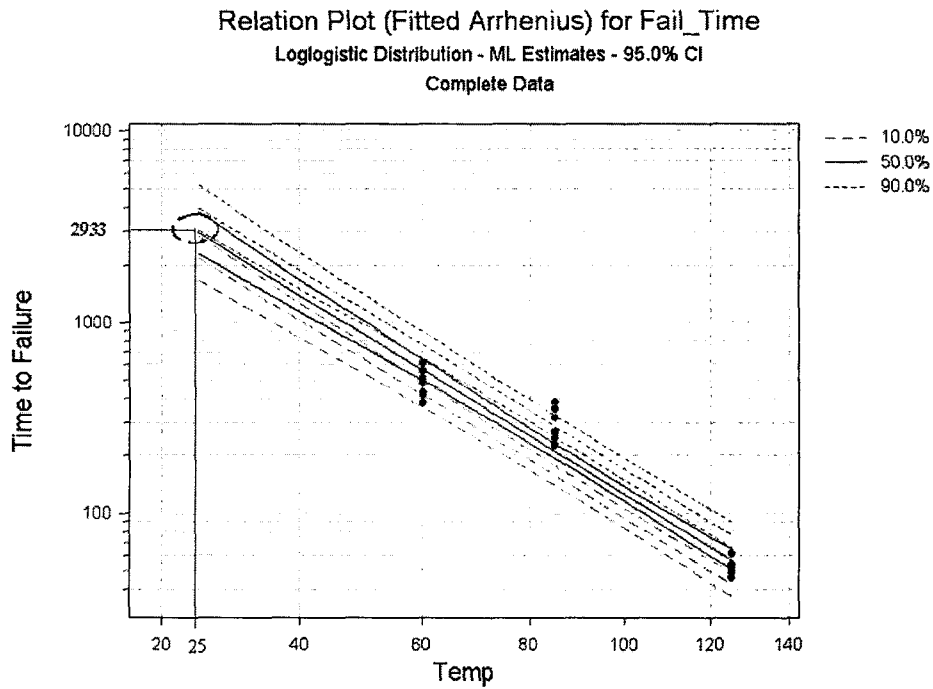
$$MTTF = e^{\mu} \Gamma(1 + \sigma) \Gamma(1 - \sigma) \tag{15}$$

where,

$$\Gamma(a) = \int_0^{\infty} x^{a-1} e^{-x} dx$$

상온보존 온도를 평균 25℃로 가정하고 예상되는 수명을 구하면 <Figure 7>과 같이 2933시간으로 요구되는 수명시간에 크게 못 미침을 알 수 있다.

환경보존시험 시간 단축을 위한 가속시험을 실시하기 위해 식 (14)를 이용하여 계산한 시험온도별 가속계수 (acceleration factor:  $AF$ )는 <Table 4>와 같다. 자이로스코프 센서에 요구되는 환경보존 신뢰성 시험조건은 85°C에서 1000시간 동안 방치하는 것이다. 따라서 가속계수 산출시 기준 온도를 85°C로 하였으며 표와 같이 85°C의 가속계수는 1이 된다. 환경 시험 온도가 125°C인 경우에 가속계수는 3.7이며 이 때 소요되는 시험시간은 270 시간으로 정상적인 환경시험 시간인 1000시간에 대해 약 1/3.7의 시간단축 효과가 있다.



<Figure 7> Estimation of the WLVP life for average operational temperature.

#### 4. 가속모형의 유효성 검증

선정된 WLVP의 수명분포 및 스트레스-수명 모형을 이용한 가속열화시험의 유효성을 검증하기 위해 정상 사용조건에서의 WLVP 수명을 분석한다. 30개의 시료에 대해 0 시간, 312 시간, 1104 시간 및 2544 시간에서  $Q$  값을 측정하고 식 (3), (4) 및 (5)와 같은 지수모

형에 적합시켜 예측한 고장시간은 Table 5와 같다.

<Table 4> Acceleration factor for various temperatures.

Unit: °C, hour

Temperature	Life Time [hr]	AF	Equiv. Test Time
85	212.1	1.0	1000
95	148.8	1.4	702
105	106.4	2.0	502
115	77.4	2.7	365
125	57.2	3.7	270
150	28.6	7.4	135
175	15.4	13.8	73
200	8.9	23.8	42

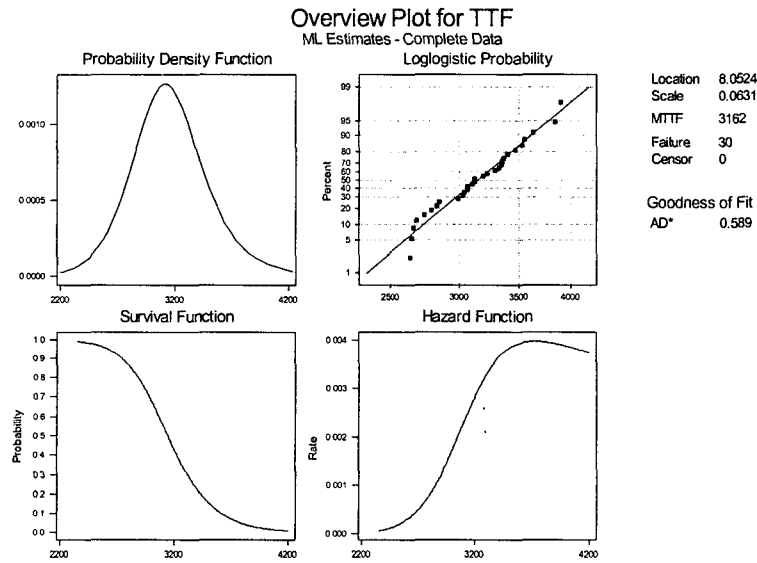
<Table 5> Time-to-failure under normal operation condition.

SPL	시간	0 시간	312시간	1104시간	2544시간	Q0	C	TTF
#1		3306	2857	2206	1702	3135.2	0.000253	2739
#2		2829	2451	2009	1632	2677.5	0.000206	3365
#3		3274	2825	2153	1656	3100.9	0.000260	2662
#4		3037	2688	2296	1786	2932.5	0.000200	3463
#5		3564	2924	2284	1762	3296.6	0.000261	2651
#6		3522	2874	2446	1799	3292.6	0.000245	2829
#7		3207	2941	2419	1882	3142.9	0.000207	3344
#8		3177	2959	2228	1840	3090.0	0.000217	3186
#9		3025	2646	2174	1740	2883.5	0.000208	3325
#10		3402	3012	2239	1893	3212.5	0.000227	3060
#11		3222	2941	2344	1779	3154.6	0.000232	2997
#12		3809	2674	1974	1802	3167.6	0.000258	2686
#13		2978	2451	2273	1793	2784.5	0.000178	3901
#14		3119	2924	2123	1788	3026.6	0.000224	3100
#15		3171	2392	1891	1570	2785.3	0.000248	2792
#16		3325	3030	2528	1947	3256.6	0.000207	3351
#17		3003	2809	2174	1797	2932.5	0.000204	3396
#18		3439	2732	2113	1675	3115.7	0.000263	2635
#19		3034	2283	1899	1596	2666.8	0.000222	3121
#20		3103	2747	2174	1769	2960.1	0.000215	3225
#21		3338	2488	2432	1869	2994.2	0.000191	3632
#22		2720	2358	1982	1670	2566.0	0.000180	3845
#23		3334	3030	2133	1900	3152.3	0.000222	3118
#24		3245	2825	2184	1861	3043.9	0.000211	3289
#25		3155	2778	1590	1774	2797.9	0.000229	3024
#26		3247	2732	2027	1774	2973.9	0.000226	3060
#27		3117	2778	2284	1866	2990.0	0.000195	3532
#28		3232	2924	2459	1937	3145.5	0.000196	3533
#29		3079	2475	1965	1579	2805.6	0.000243	2849
#30		3146	2890	1991	1777	2984.9	0.000228	3039

고장시간 데이터에 대한 분포는 <Figure 8>과 같으며 로그로지스틱 분포의 위치모수 =8.0524 및 척도모수 =0.0631이다. 따라서 평균수명에 대한 식은 다음 식 (16)과 같다.

$$MTTF = e^{8.0524} \int_0^{\infty} x^{0.0631} e^{-x} dx \int_0^{\infty} x^{-0.0631} e^{-x} dx \quad (16)$$

식 (16)으로부터 계산된 정상상태의 WLVP 수명은 3162시간이며 가속시험으로부터 예측된 2933 시간과는 약 7.2 %의 비교적 작은 오차가 존재하여 가속시험의 유효성을 확인할 수 있다.



<Figure 8> Distribution under normal operation condition.

가속계수의 유효성 검증을 위해 열화방지를 위한 설계개선을 수행하고 가속조건인 125℃, 270 시간으로 가속시험을 실시한 결과 시험 전후 Q 값의 차이가 발생하지 않아 WLVP의 열화가 발생하지 않았다는 결론을 얻었다. 이를 확인하기 위해 개선된 샘플에 대해 정상 시험조건인 85℃, 1000시간 시험을 실시하였으며 마찬가지로 시험 전후 WLVP의 열화가 발생하지 않아 가속계수의 유효성을 확인할 수 있었다.

## 5. 결론

MEMS 자이로스코프 각속도 센서의 웨이퍼 레벨 진공 패키지 (WLVP)의 환경보존 신뢰성 분석 및 시험시간 단축을 위한 가속열화시험을 실시하였다. WLVP의 고장 메커니즘은 진공도의 변화이며 이는 가스확산에 의해 이루어진다. 따라서 WLVP 열화를 가속시키는 가속인자로는 시험온도를 선정하였다. 열화과정은 지수모형으로 적합되며 수명 판정기준에 따

라 고장시간을 예측하였다. 분석결과 고장분포는 로그로지스틱 (log-logistic)분포이며 스트레스-수명 모형은 아레니우스 모형이 적합함을 확인하였다.

가속모형을 이용하여 예측한 WLVP의 평균 수명은 2933시간이며 시험 온도별 가속계수를 구하였다. 가속시험을 통해 예측한 수명 및 가속계수의 유효성을 검증한 결과 수명의 경우 약 7.2 %의 오차를 보여 가속시험의 유효성을 확인할 수 있었다. 정상적인 환경시험 조건인 85°C, 1000시간에 대한 가속시험 조건은 125°C, 270시간으로 1/3.7의 시간 단축을 꾀하였으며 신뢰성 개선된 WLVP에 적용시 동일한 결론을 얻음으로써 가속계수의 유효성을 확인할 수 있었다.

이와 같이 MEMS 자이로스코프의 웨이퍼 레벨 진공 패키지에 대한 가속열화시험을 통해 제한된 제품 개발기간에 비해 상대적으로 긴 시간을 요구하는 환경보존 신뢰성 시험의 시간단축이 가능하며 가속시험모형을 통해 제품의 수명을 단시간에 예측할 수 있음을 확인하였다.

## 참고문헌

- [1] Oh, Y.S., Lee, B.L., Baek, S.S., Kim, H.S., Kim, J.G., Kang, S.J., and Song, C.M. (1998). A tunable vibratory microgyroscope, *Sensors and Actuators*, Volume A. 64, 51-56.
- [2] Roth, A.(1990), *Vacuum Technology*, Elsevier Science Ltd., 1990.
- [3] Greenhouse, H.(1999), *Hermeticity of Electronic Packages*, William Andrew Publishing, New York.
- [4] 서순근(2002), 미니탭 신뢰성 분석, 이레테크.
- [5] 이상용(1999), 신뢰성 공학, 형설 출판사.