

## 접촉연소식 가스센서의 수명시험기준 개발

강준구 · 박정원 · 황동훈 · 함중걸

산업기술시험원 신뢰성종합기술지원센터

## Development of Life Test Specification for Catalytic Gas Sensor

Jun-Ku Kang · Jung-Won Park · Dong-Hoon Hwang · Jung-Keol Ham

Korea Testing Laboratory, Reliability Technology Center

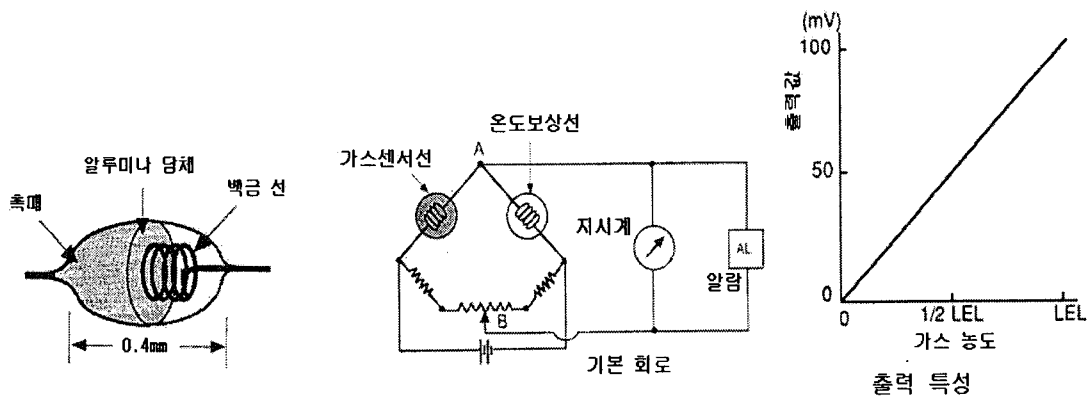
### Abstact

The accelerated life tests of the catalytic gas sensor were performed at three different gas concentration conditions. From the test data, the power-Weibull model was estimated and the acceleration factor between test condition 25%LEL(Lower Explosive Limit) and use condition 5%LEL was about 3 according to this acceleration model. Using this acceleration factor, life test specification for qualifying that B10 lifetime of the catalytic gas sensor meets the goal lifetime(5 years) was designed.

Key Words : Accelerated Life Test(가속수명시험), Power-Weibull model (멱와이블 모델) B<sub>10</sub> Life Time (10%고장수명)

## 1. 서론

접촉연소식 가스센서는 가스가 있는 경우 감지하여 신호를 발생시키도록 하는 센서로서 LPG, LNG등의 도시가스를 대상으로 한 가연성 감지소자의 하나이다. 전통적으로 광산보안용으로 사용되어 감지대상인 가연성 가스의 연소열에 의해 발생하는 온도변화를 측정함으로써 가연성 가스의 존재여부와 농도를 알 수 있게 해준다. 이 방식은 미국 Johnson & Williams 사의 Modol F로서 1923년에 발표되었으며, 일본의 경우는 1958년 광명이화학공업에서 제조한 FM-1형이 처음인 것으로 알려져 있다. 초기 단계에서는 Pt 저항체만으로 온도감지 기능과 열 발생용 열선 및 촉매 기능을 겸하도록 하였다. 그 이후 Pt 족의 나선 코일상에 알루미늄나 또는 실리카 비드(bead)를 도포하고 그 위에 귀금속 촉매를 담지한 감지소자를 개발하였다. 여기서 Pt 코일은 인가전력에 의한 가열원으로 사용되고, 또한 가스 검지시 센서 자체의 온도 상승을 검출하는 축온 저항체로도 사용되는 것으로서, 칸탈선 등이 사용된 적도 있으나 펠리스트(pellistor)용으로 쓰이는 알루미늄나 담체와의 열팽창계수 차이에 의한 박리현상을 방지하고 화학적 안정성을 위하여 현재는 Pt를 주로 사용하고 있다. 이런 형태의 소자는 영점이동현상 감소, 저온연소개시, 금속과 촉매체의 박리현상 억제, 장 수명, 저농도 계측 등의 특징을 가지며, 반도체식 가스센서에 비해 가연성 가스에 대한 선택성과 선형적인 출력특성, 온도 및 습도변화에 대한 안전성, 짧은 안정화 시간, 그리고 양호한 재현성 등의 장점을 가지고 있다. 접촉연소식 가스센서는 <그림 1>과 같은 구조와 출력특성을 갖는다.



<그림 1> 가스센서의 구조 및 출력 특성

이 가스센서는 백금코일에 촉매가 코팅되어 있는 형태로서 촉매로는 백금, 팔라듐 또는 혼합물을 사용하며, 센서표면은 대상가스의 흡착효율을 증가하기 위해 표면적을 최대한 크게 하여, 기공(pore)이 많은 다공질의 형상을 가진다. 센서에 정격전압이 인가되면 표면의 온도는 200~400℃를 유지하게 되어 일정저항을 유지하고, 표면에 흡착된 가스가 연소할 때 연소열에 의해 저항이 증가하여 저항의 증가에 따른 출력이 변화한다. 출력은 직선구간과 포화구

간이 존재하며, 영점은 센서별로 다를 수 있다.

이러한 접촉연소식 가스센서는 유해가스를 함유하고 있는 산업현장으로 부터 일반 가정집에 이르기까지 광범위하게 사용되고 있으며, 유독가스 및 가연성 가스를 사전에 탐지하여 경보를 발생함으로써 사용자의 생명과 재산을 보호하는데 있어 없어서는 안 될 중요한 안전장치이다. 하지만, 현재까지는 가스센서에 대한 수명예측이 전혀 이루어지지 않고 있어 수명을 다한 가스센서들이 제때에 교체되지 못함으로써 유사시 발생하는 사고에 취약할 수밖에 없다. 가스센서의 수명을 평가하여 제때에 교체해 주는 것이 필요한데 가스센서의 수명평가에는 많은 시간이 소요되므로 현실적인 평가가 되기 위해서는 가속수명시험방법의 도입이 필요하다. 본 연구에서는 접촉연소식 가스센서의 수명평가시간을 단축할 수 있는 가속수명시험법을 개발하고 개발된 가속수명시험법을 이용하여 수명을 평가하는 수명시험기준을 설계하였다.

## 2. 가속수명시험법 개발

### 2.1 시험 설계

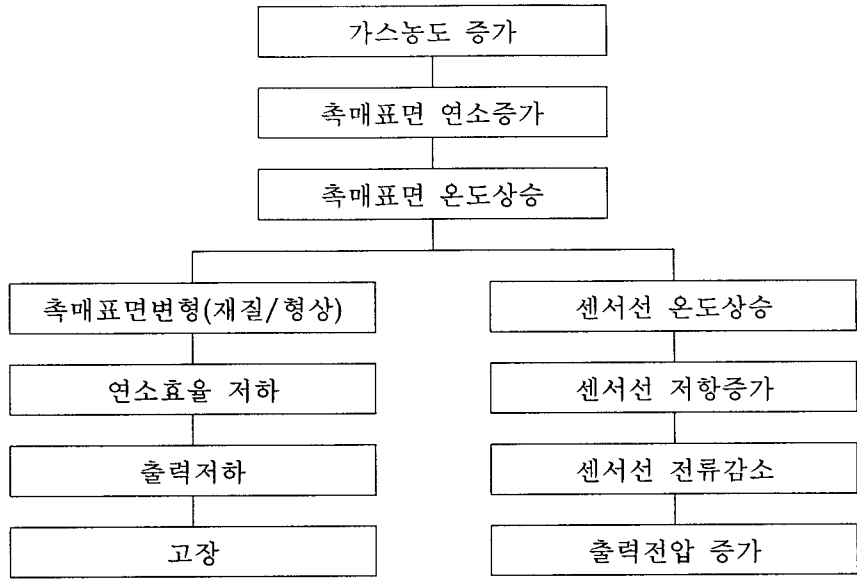
가스센서의 가속수명시험방법을 개발하기 위하여 다음과 같은 절차에 따라서 시험을 설계하였다.



<그림 2> 가속수명시험 계획 절차

#### 2.1.1 필드 고장모드 및 고장메커니즘

표면에 흡착된 가스의 연소열에 의해, 촉매표면의 성질이 변하게 되며(이 성질은 물리적 또는 화학적일 수 있다), 촉매의 성질변화에 의해 가스 흡착율 또는 연소효율이 저하되어 출력이 저하된다. 이와 같은 고장메커니즘의 진행과정은 <그림 3>과 같다.



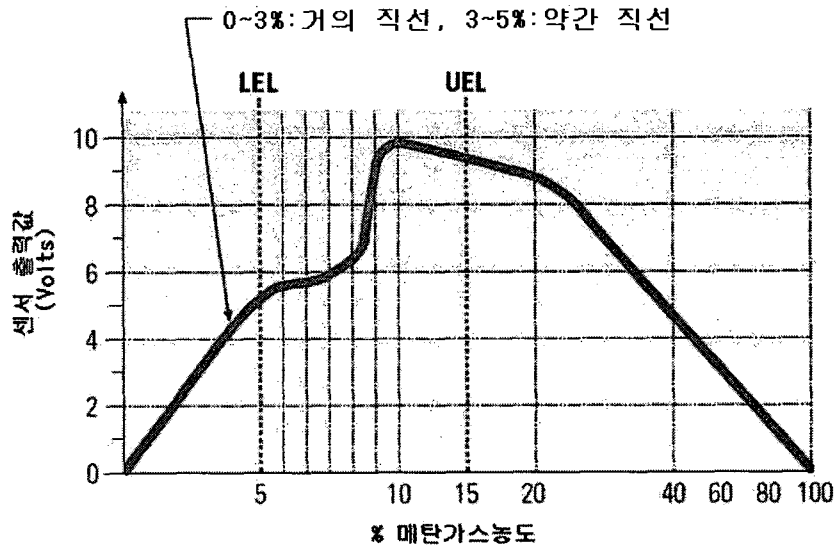
<그림 3> 가스센서의 고장메커니즘 진행 과정

2.1.2 가속 스트레스 선택

<그림 3>의 가스센서 고장메커니즘 진행 과정에서 알 수 있듯이 가스농도의 증가는 촉매 표면의 연소를 증가시키고 촉매 표면의 온도를 상승시켜 고장시간을 앞당기게 된다. 이와 같은 배경에서 접촉연소식 가스센서의 가속 스트레스로서 가스농도를 선택하였다.

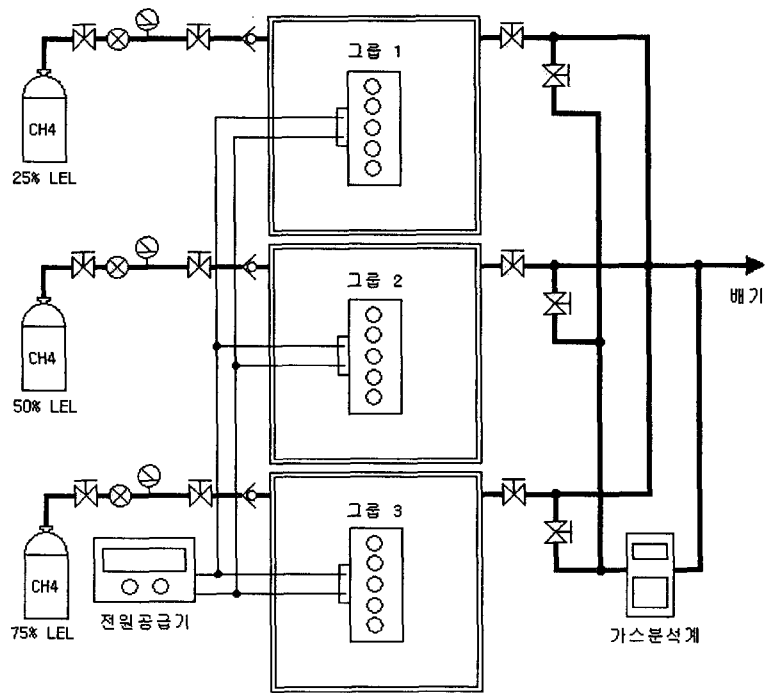
2.1.3 스트레스 수준 수 및 수준 결정

스트레스 수준 수는 Meeker와 Hahn(1985)의 가이드라인에 따라서 3수준으로 결정하였다. 3수준을 결정하는데 있어서 가장 중요한 것은 가장 높은 스트레스 수준을 결정하는 것이다. 스트레스 수준을 너무 높게 정하면 정상 사용조건에서의 고장메커니즘과 달라질 수 있고, 스트레스 수준을 너무 낮게 정하면 고장 데이터를 얻기가 힘들기 때문에 적절한 스트레스 수준을 정하는 것이 중요하다. Jack Chou(1999)에 의하면 접촉연소식 센서의 이론적인 출력 특성곡선에서 신뢰성 있는 직선성을 확보할 수 있는 구간은 메탄 기준 0~5% 구간이다(<그림 4> 참조). 이로부터 세 스트레스 조건을 5%내에서 3수준을 결정하였다. 결정된 가스의 농도는 1.25%, 2.5% 및 3.75%로서, 메탄가스의 경우 폭발하한농도(Lower Explosive Limit : LEL)가 5%이므로 위에서 결정한 가스의 농도는 각각 25%LEL, 50%LEL, 75%LEL 조건이 된다. 이는 각각 폭발하한농도의 25% 수준, 50% 수준, 75% 수준을 의미한다.



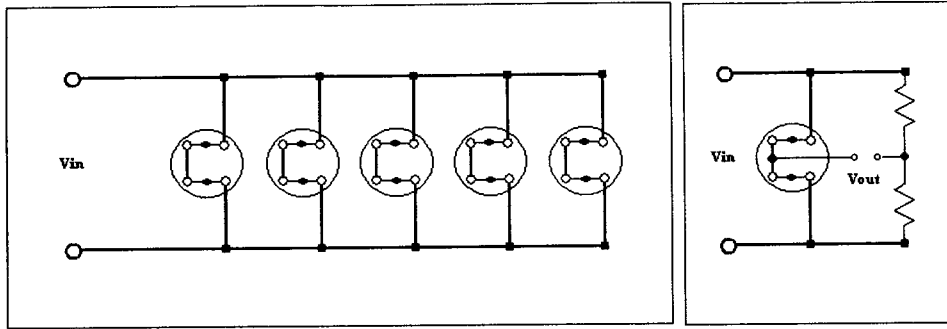
<그림 4> 이론적인 출력특성곡선에서 신뢰성 있는 직선성을 확보할 수 있는 구간

시험조건을 구현하기 위하여 시험장치는 <그림 5>와 같이 구성하였다.



<그림 5> 시험장치 구성

이 때 시험장치 내의 시험 시료들은 <그림 6>과 같이 설치하였다.



<그림 6> 시료 연결 회로

#### 2.1.4 시험시간, 시료수, 시료 배분 비율 결정

각 시험조건에서의 시험시간과 시료수는 <표 1>과 같이 결정하였다.

<표 1> 각 시험조건에서의 시험시간과 시료수

시험조건	시료수	시험시간
25%LEL	5개	1000시간
50%LEL	5개	1000시간
75%LEL	5개	1000시간

1000시간 시험시간 중 24시간을 기준으로 16시간동안 메탄 가스에 노출시키고 8시간은 노출시키지 않는 시험사이클을 반복하였고, 시험 중에는 정격전압을 인가하였다.

#### 2.1.5 측정항목 및 고장판정기준 결정

가스센서의 고장여부를 판정하기 위한 측정항목으로 표준가스상태(25%LEL)의 출력전압과 청정공기상태의 출력전압 차를 이용하였고, 초기 값 대비 50% 이상 변화되면 고장으로 판정하였다.

2.1.6 관측방법 및 관측시간 결정

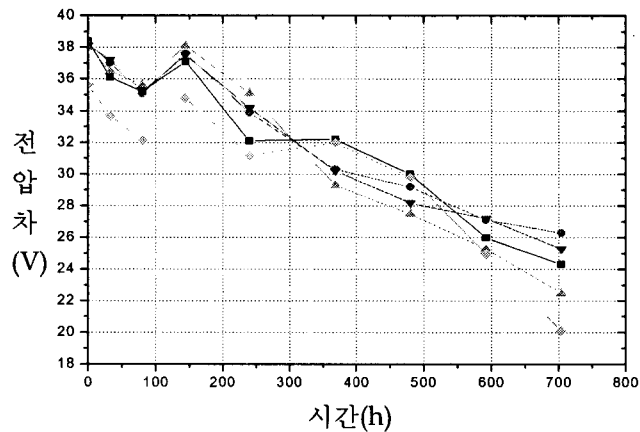
시험 중 측정항목의 측정은 미리 시간을 정하여 정한 시간에 측정하는 단속적 관측방법을 사용하였고, 관측시간은 Meeker(1986)의 연구결과를 참고하여 시험 초기에 측정주기를 짧게 정하고 시간이 지날수록 측정주기를 길게 정하였다. <표 2>에 측정 일자를 제시하였다.

<표 2> 측정 일자

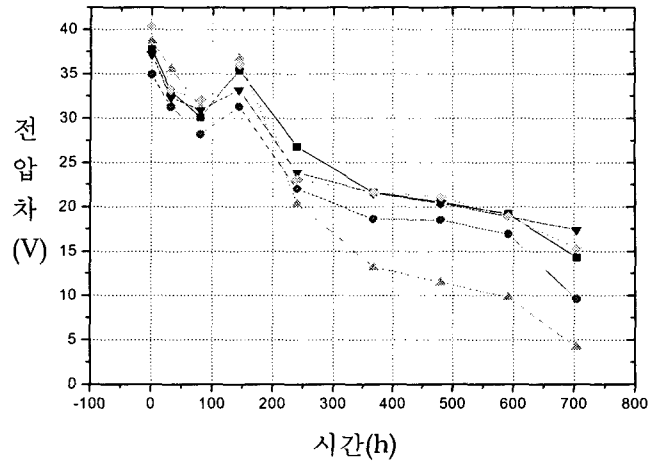
측정 회수	1	2	3	4	5	6	7	8	9
측정일자	1일	2일	5일	9일	15일	23일	30일	37일	44일

2.2 시험결과

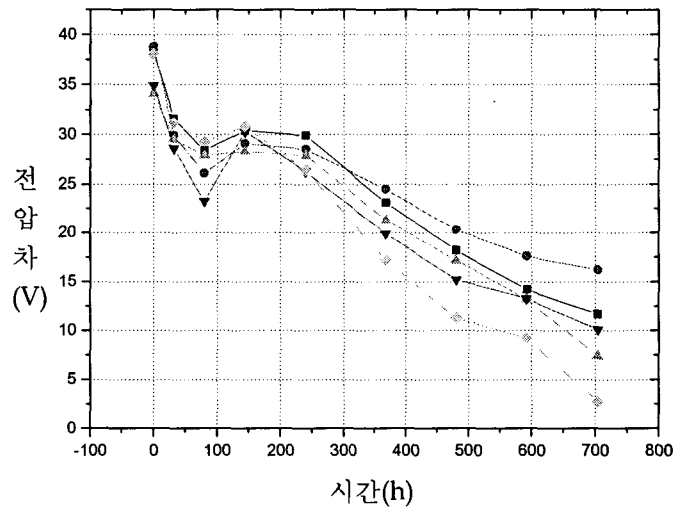
<표 2>와 같이 결정된 측정 날짜에 측정항목인 표준가스상태(25%LEL)의 출력전압과 청정공기상태의 출력전압 차를 측정한 결과 <그림 7>~<그림 9>와 같은 데이터가 얻어졌다. <그림 7>~<그림 9>의 시험시간은 가스에 노출된 시간만 고려하여 나타낸 것이다. <그림 7>~<그림 9>에서 볼 수 있듯이 출력전압 차는 시간에 따라서 일정한 경향을 가지고 변화하였다. 초기 측정값의 50% 이하로 떨어지면 고장으로 판정하였을 때 50%LEL 조건과 75%LEL 조건에서는 5개의 시료들이 모두 고장 났으나 25%LEL 조건에서는 전압 차 변화율이 31%~43%로 고장이 하나도 발생하지 않았다. 25%LEL 조건에서는 시간에 따른 전압 차의 변화 추이를 2차 다항식으로 모델링하고 <표 2>의 특성 측정 일정과 같이 7일 간격을 두고 어느 구간에서 고장이 발생할지 예측하였다. 이로 부터 <표 3>과 같은 고장 데이터를 얻었다.



<그림 7> 25%LEL 조건에서의 특성 열화 추이



<그림 8> 50%LEL 조건에서의 특성 열화 추이



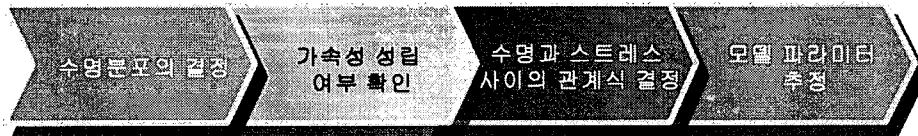
<그림 9> 75%LEL 조건에서의 특성 열화 추이



<표 3> 고장 데이터

	시료 No.	고장시간
25%LEL (표준가스)	1	816시간~928시간
	2	1040시간~1152시간
	3	704시간~816시간
	4	1152시간~1264시간
	5	816시간~928시간
50%LEL	1	592시간~704시간
	2	480시간~592시간
	3	240시간~368시간
	4	592시간~704시간
	5	480시간~592시간
75%LEL	1	368시간~480시간
	2	592시간~704시간
	3	368시간~480시간
	4	368시간~480시간
	5	240시간 ~368시간

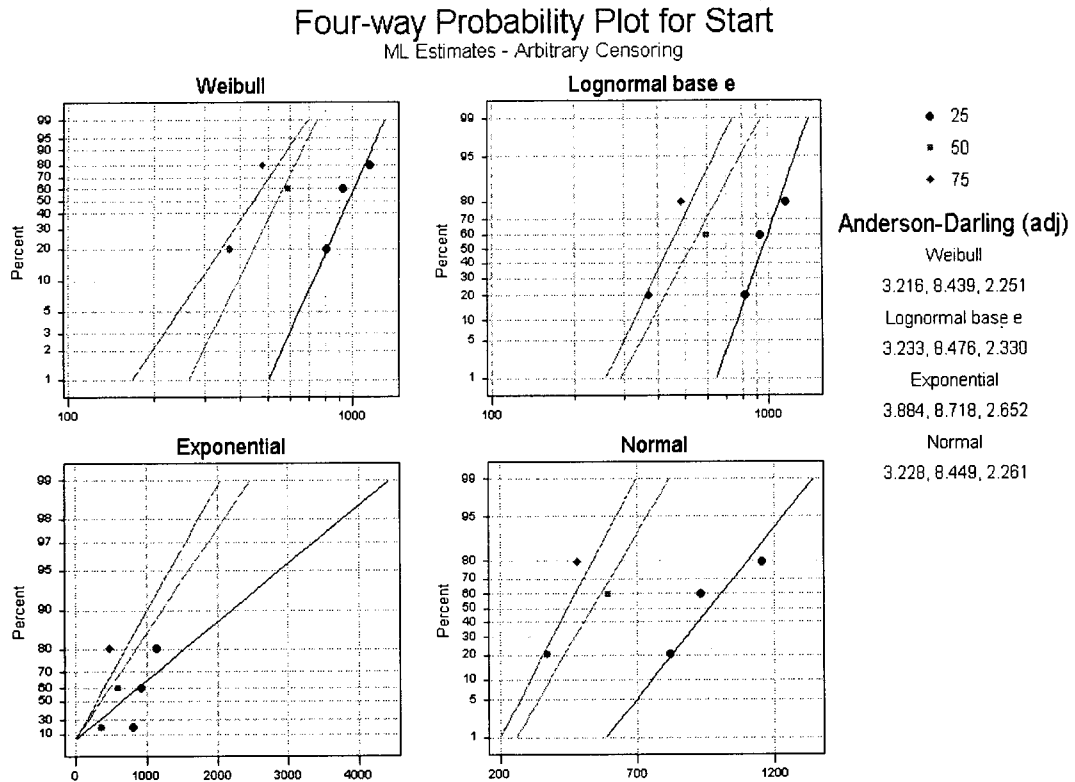
<표 3>의 고장시간을 <그림 10>과 같은 절차에 따라서 가속모델을 추정하였다.



<그림 10> 가속수명시험 데이터 분석 절차

### 2.2.1 수명분포의 결정

적정한 수명분포를 선택하기 위하여 일반적으로 많이 사용되는 와이블분포, 지수분포, 대수정규분포, 정규분포 확률지에 고장데이터를 타점하고 앤더슨 다링 통계량 값을 구한 결과 <그림 11>과 같았다.



<그림 11> 확률지 타점 결과

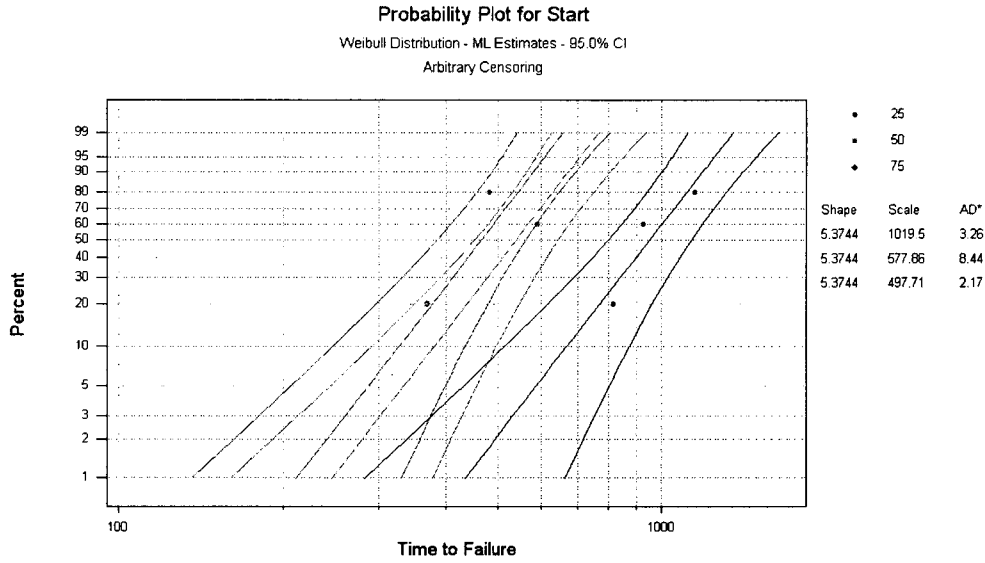
<그림 11>에서 보면 와이블분포가 최소의 앤더슨 다링 값을 가지므로 대안으로 고려했던 4가지 분포 중에서 와이블분포가 가장 적합함을 알 수 있다

### 2.2.2 가속성 성립 여부 확인

세 조건에 있어서 가속성이 성립하는지 여부를 확인하기 위하여 우도비 검정(Likelihood Ratio Test)을 통하여 와이블분포의 형상모수가 동일한지 검정하였다. 검정 결과 p-value가 0.710으로 형상모수가 동일한 것으로 확인되었다(유의수준 0.05).

### 2.2.3 수명과 스트레스 사이의 관계식

우도비 검정을 통하여 세 조건에 있어서 형상모수가 동일한 것으로 확인되었으므로 형상모수를 동일하게 제약한 상태에서 각 조건의 와이블분포를 추정하였다. <그림 12>는 동일한 형상모수를 가정하였을 때 와이블 확률지에 타점한 결과를 제시한 것이다.



<그림 12> 와이블 분석 결과

<그림 12>에서 알 수 있듯이 형상모수는 5.3744의 값을 가지고 각 조건에서의 척도모수는 <표 4>와 같은 값이 추정되었다.

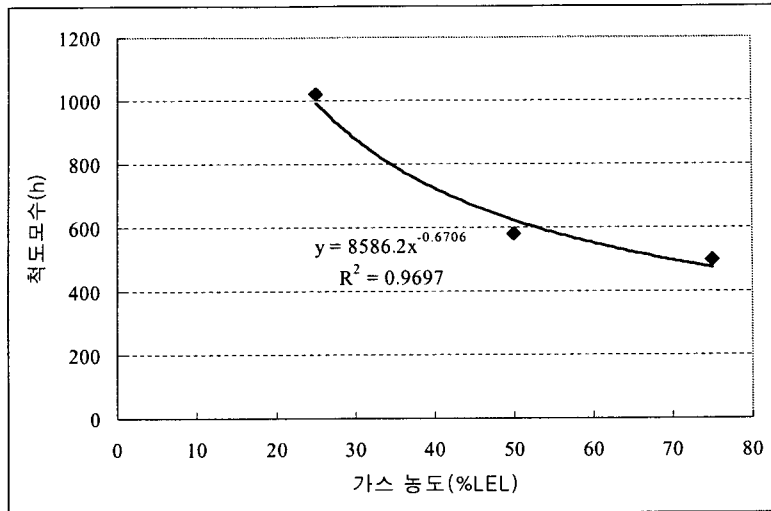
<표 4> 각 농도 조건에서의 수명

농도	수명( $\alpha$ )
25 %	1019.5 h
50 %	577.86 h
75 %	497.71 h

<표 4>의 추정 결과를 이용하여 농도와 수명 사이의 관계를 추정한 결과 다음과 같은 식이 얻어졌다.

$$\alpha = 8586.2(c) - 0.6706 \tag{1}$$

단,  $\alpha$ 는 와이블분포의 척도모수이고,  $c$ 는 농도이다.



<그림 13> 가스 농도와 척도모수의 관계

결과적으로 추정된 가속모델은 다음과 같다.

$$F(t) = 1 - \exp[-(t/\alpha)5.3744], \alpha = 8586.2(c) - 0.6706 \quad (2)$$

이 때, 가속계수는 다음과 같다.

$$AF = (cU/cA) - 0.6706 \quad (3)$$

단, AF는 가속계수, cU는 정상조건에서의 가스 농도, cA는 가속조건에서의 가스 농도이다.

### 3. 수명시험기준 설계

식 (3) 과 같이 추정한 가속계수를 사용하여 정상 사용조건에서 가스센서의 수명이 목표한 수명을 갖는지 확인하기 위한 수명시험 기준을 계수형 신뢰성샘플링검사방식을 적용하여 <그림14>와 같은 절차에 따라서 설계하였다.



<그림 14> 수명시험기준

대상으로 하는 가스센서의 신뢰성 목표는 5%LEL 농도조건에서 B10수명이 5년(단, 1일

가스 노출 시간 1 h 즉 가스노출시간으로 1825 h) 이상됨을 신뢰수준 90%로 보증하는 것이었다. 시험조건은 가속수명시험으로서 진행했던 <표 1>과 같은 3조건 중 정상 사용조건과 가장 가까운 25%LEL 조건으로 결정하였다. 이 때 25%LEL 조건과 5%LEL조건 사이의 가속계수는 식 (3)으로부터 2.94가 된다. 이 가속계수를 적용하면 5%LEL조건에서의 가스노출시간 1825 h은 25%LEL 조건에서 621 h이 된다. 시료수가 최소가 되도록 하기 위하여 허용 고장수를 0으로 결정하면 시료수는 다음 식에 의하여 22개가 된다.

$$n \geq \{B_{10}^*/(t \cdot AF)\}^\beta \times \chi^2(1 - CL; 2c + 2) / \{2 \times \ln(1 - 0.1)^{-1}\} \quad (4)$$

단,  $B_{10}^*$ 은 목표 수명(=1825 h),  $t$ 는 시험조건에서의 시험시간,  $AF$ 는 시험조건과 정상 사용조건 사이의 가속계수,  $CL$ 은 신뢰수준,  $c$ 는 허용 고장수이다. 즉, 25%LEL 조건에서 22개의 시료를 621시간동안 시험하여 고장이 한 개도 발생하지 않으면 가스센서의 B10수명이 5% 농도조건에서 5년 이상됨을 신뢰수준 90%에서 보증할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 접촉연소식 가스센서의 가속수명시험방법을 개발하였다. 접촉연소식 가스센서의 주요 고장메커니즘이 표면에 흡착된 가스의 연소열에 의해 촉매표면의 성질이 변하고, 촉매의 성질변화에 의해 가스 흡착율 또는 연소효율이 저하되어 출력이 저하되는 것으로 조사되어 가스 농도를 높임으로써 고장을 가속하였다. 높은 가스 농도 조건 3조건에서 시험하여 열화데이터와 고장데이터를 분석함으로써 가속모델을 추정할 수 있었다. 추정된 가속모델로부터 시험조건으로 결정한 25%LEL 조건에서는 5%LEL 조건에 비하여 약 3배의 가속효과를 얻을 수 있음을 알 수 있었고, 이와 같은 가속계수를 활용하여 시험시간을 단축시킨 수명평가 기준을 설계할 수 있었다. 설계된 수명평가기준에 따르면 25%LEL 조건에서 22개의 시료를 621시간동안 시험하여 고장이 한 개도 발생하지 않으면 가스센서의 B10수명이 5% 농도조건에서 5년 이상됨을 신뢰수준 90%에서 보증할 수 있다.

#### 참고문헌

- [1] Jack Chou(1999), Hazardous Gas Monitors : A practical guide to Selection, Operation and Applications, McGraw-Hill Professional.
- [2] Meeker(1986), "Planning Life Tests in Which Units are Inspected for Failure," IEEE Trans. on Rel., 35, 571-578.

- [3] Meeker and Hahn(1985), How to Plan an Accelerated Life Test- Some Practical Guidelines, ASQC Basic References in Quality Control: Statistical Techniques, Vol.10.