

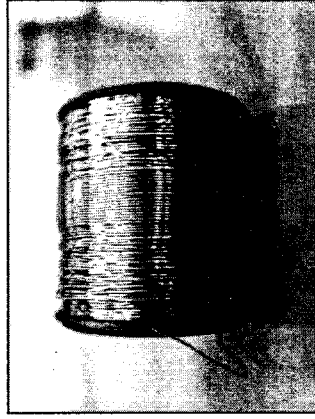
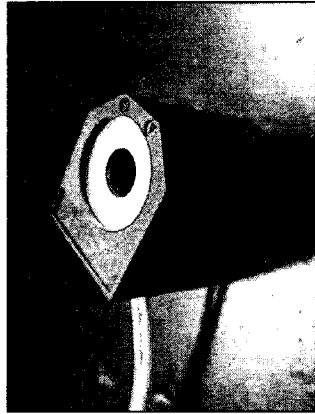
# Solenoid Coile의 가속수명시험 및 신뢰성개선

두산인프라코어(주) 신뢰성평가센터  
주임연구원 김범철

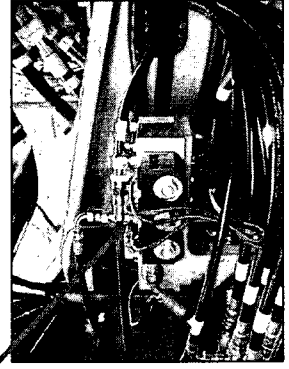
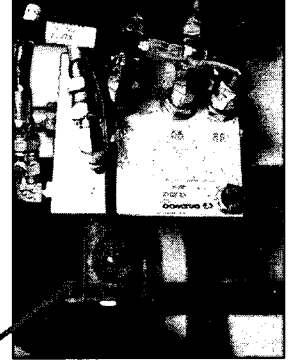
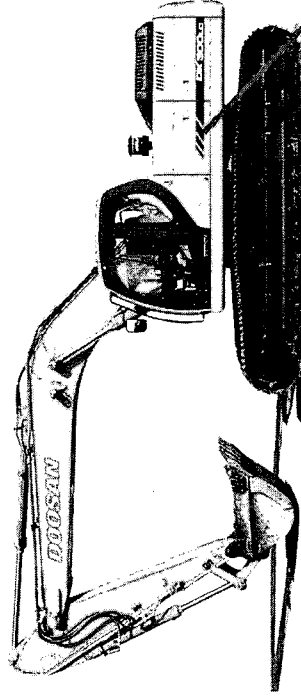
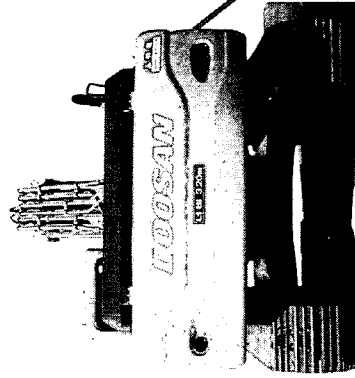
- 개요
- 하자품조사 및 FMEA
- 가속스트레스 인자 설정
- 활성화에너지 산출 및 가속성검증
- 양산품과 1차개선품 비교시험
- 2차개선품 가속수명시험
- 향후 가속수명시험시 고려할 점

# 1. 유압구동용 솔레노이드 Coil 개요

## 1-1. 외부 형상 및 Coil Winding



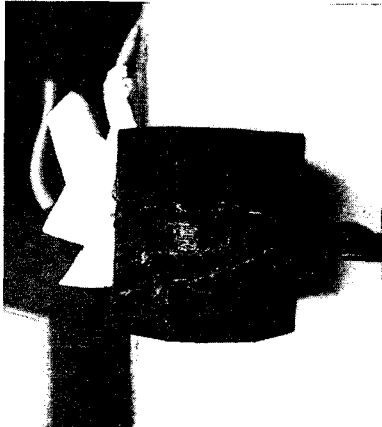

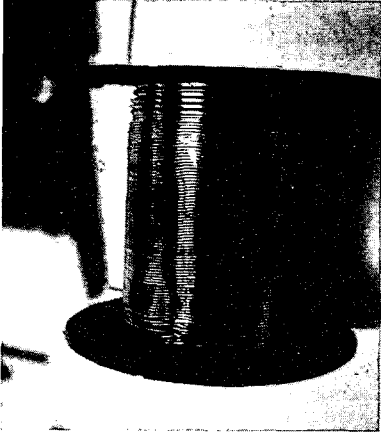
## 1-2. 실차 적용 상태



## 2. 가속수명시험 절차

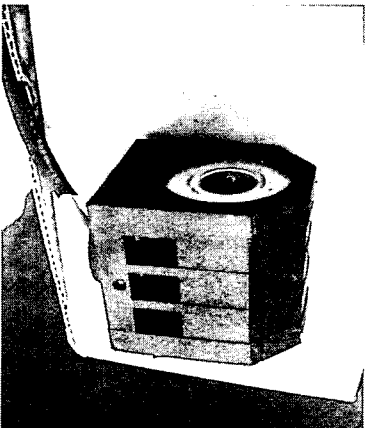

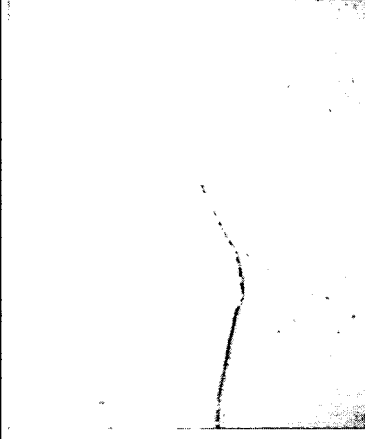


### 3. 고장분석

외부형상	Coil 저항(Ω) 기준 : 30 Ω	고장원인	
<p>물딩부 소손</p> 	23.7	<p>과열에 의한 물딩부 소손</p> 	<p>Coil 내부의 Short에 의한 과전류 유입</p> 

### 3. 고장분서



외부형상	Coil 저항(Ω) 기준 : 30 Ω	고장원인
<p>이상없음</p> 	<p>7 350</p>	 <p>Coil 내부 단선, 단선부 탄화 흔적, 순간 과전류 유입으로 인한 Open</p>
	<p>469.0</p>	 <p>Coil 중간부분 단선, 단선부 탄화 흔적 보임</p>

# 4. 고장메커니즘 선정 (FMEA)

Item's Name & Part Number	Item's Function	Potential Failure Mode	Potential Effects of Failure			Potential Cause of Failure			Existing Condition		RPN	
			Local	Next Higher Level	End User	Severity	Immediate Cause(s)	Root Cause(s)	Frequency	Control, Critical, or Significant Item		Existing Controls
Spool	Control Flow Direction	Sticking			Machine Down	8	이물질 (Particulate)	이물질 (Particulate)	3	내구시험	3	72
Coil	Push Spool	Open(Crack Soldering Joint)			Machine Down	8	Fatigue Crack Due to Thermal Cycle	Cyclic Change in Temperature	2	Functional Test	7	112
Coil	Push Spool	Short(Insulation Breakdown)	Fuse Blow Out		Machine Down	8	Degradation	Temperature in Coil(진부, 주위 온도, 장화위치)	8	Accelerated Life Testing	2	128
Coil	Push Spool	Short(Insulation Breakdown)	Fuse Blow Out		Machine Down	8	Degradation(결연체 열화상태의 진동)	Vibration	8	Accelerated Life Testing	3	192
Coil	Push Spool	Open(코일단선)			Machine Down	9	Degradation	Temperature in Coil	8	Accelerated Life Testing	2	128
TNR	Absorb Surge Voltage	Open			No Effect	1	Degradation	Temperature in Coil	3	Accelerated Life Testing	2	6
TNR	Absorb Surge Voltage	Short(Crack Diode)	Fuse Blow Out		Machine Down	8	Thermal Overstress	Temperature in Coil and Molding	7	Accelerated Life Testing	5	280
TNR	Absorb Surge Voltage	Short(Punch Through)	Fuse Blow Out		Machine Down	8	BOS	Over voltage	7	Functional Test	7	392
Connector Harness	Connect Lead Wire to	No Contact			Machine Down	8	Corrosion	Humidity/ Ambient Temperature	3	내구시험	3	72
Block	House Valve	Crack	Leakage		외부 누유, 장비 오염	8	Fatigue Fracture(피로 파괴)	Cyclic Change in Pressure	1	내구시험	2	16

## 4. 고장메커니즘 선정 (FMEA)

Potential Effects of Failure			Potential Cause of Failure			Existing Condition			Recommended Actions		
Lo- cal	Next Higher Level	End User	Severity	Immediate Cause(s)	Root Cause(s)	Frequency	Control, Critical, or Significant Item	Existing Controls		Detectability	RPN
		Machine Down	8	Fatigue Crack Due to Thermal Cycle	Cyclic Change in Temperature	2		Functional Test	7	112	Applying Eyelet, Packaging 방법 변경: Low Module Silicon Soldering 주위 도 포, Thermal Cycle Test
	Fuse Blow Out	Machine Down	8	Degradation	Temperature in Coil(전류, 주위 온도, 장착위치)	8		Accelerated Life Testing	2	128	Increased Voltage Rate(24V →28V)
	Fuse Blow Out	Machine Down	8	Degradation(결 연체 열화상태 의 진동)	Vibration	8		Accelerated Life Testing	3	192	진동조건하에 온도사이 클 시험
		Machine Down	9	Degradation	Temperature in Coil	8		Accelerated Life Testing	2	128	



# 4. 고장메커니즘 선정 (FMEA)

Local	Potential Effects of Failure			Potential Cause of Failure			Existing Condition			Recommended Actions	
	Next Higher Level	End User	Severity	Immediate Cause(s)	Root Cause(s)	Frequency	Control, Critical, or Significant Item	Existing Controls	Detectability		RPN
	No Effect	1	Degradation		Temperature in Coil	3		Accelerated Life Testing	2	6	
Fuse Blow Out	Machine Down	8	Thermal Overstress		Temperature in Coil and Molding	7		Accelerated Life Testing	5	280	Packaging 방법 변경: Low Module Silicon Soldering 주위 도포, 하자 발생품 온도 변화에 대한 제너다이오드 특성조사(Coil 없는상태), Noise or Chattering 발생하지 Check, 열충격시험(-45도~150도) 10 cycle후 특성 재조사, Thermal Cycle Test
Fuse Blow Out	Machine Down	8	EOS		Over voltage	7		Functional Test	7	392	하자 TNR 제거 Cross Section Diode(Crack 또는 Punch Through 발견), Increased Voltage Rating 고온용 TNR 적용 및 Diode 적용

# 5. 가속스트레스 인자 설정

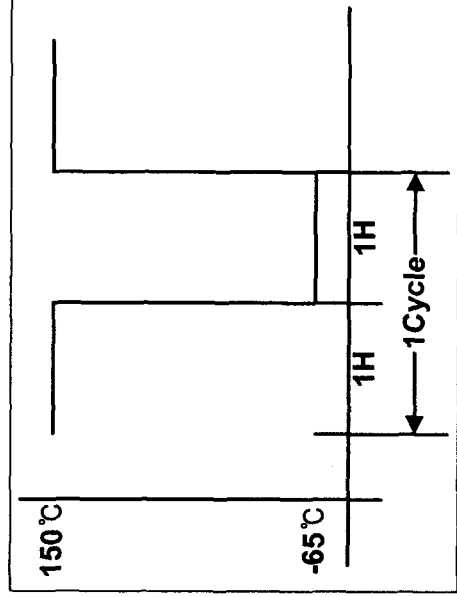


## 5-1. 가속 스트레스 인자

항목	Root Cause	RPN	가속수명시험
TNR	Short	392	Thermal Shock Temperature Cycle Endurance Test in Dry Heat
	Crack	280	
Coil	Open	128	
	Short	192	

## 5-2. 설정 인자에 의한 수명시험 결과

- (1) 열충격시험  
 - 외부 케이스 파손이 발생했으나 Coil 및 TNR은 고장이 발생하지 않음

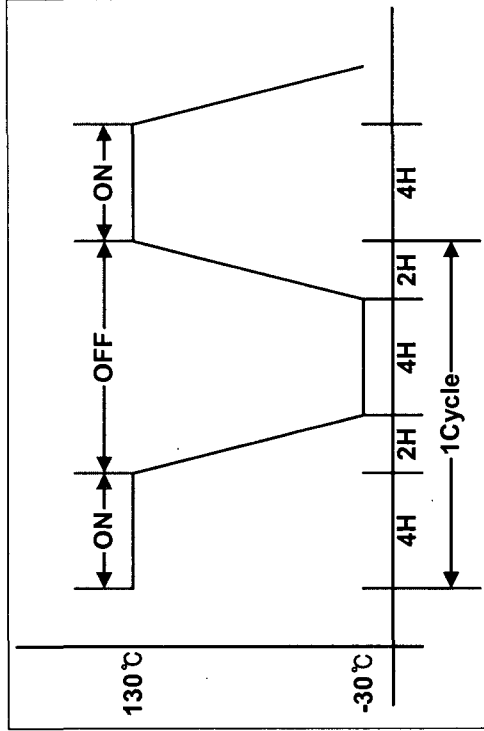


## 5. 가속스트레스 인자 설정

### (2) 온도사이클시험

- 고장이 발생하지 않음
- 적절하지 못한 사용을 설정에 따른 가속시험 Cycle수 오류

시료수 n	8
허용고장수 rf	0
형상모수 $\beta$	1.0
신뢰수준 P	75%
보증 수명 Bx x	10%
보증 Bx LIFE Bx	10,000
사용율 적용 보증 수명 Bxur	2,500
사용율 Ur	25%
사용조건 시험시간 h (hr)	4,112
가속 계수 AF	37
가속 조건 시험시간 (hr)	110
가속 조건 시험 Cycle	28



### (3) 온도내구시험

- 고장모드 : Coil 및 TNR 파손 발생
- 고온 내구시험에 의한 가속수명시험 설정

## 6. 가속성 검증 및 활성화에너지 산출

### 6-1. 3수준 스트레스 시험

#### (1) 시험조건

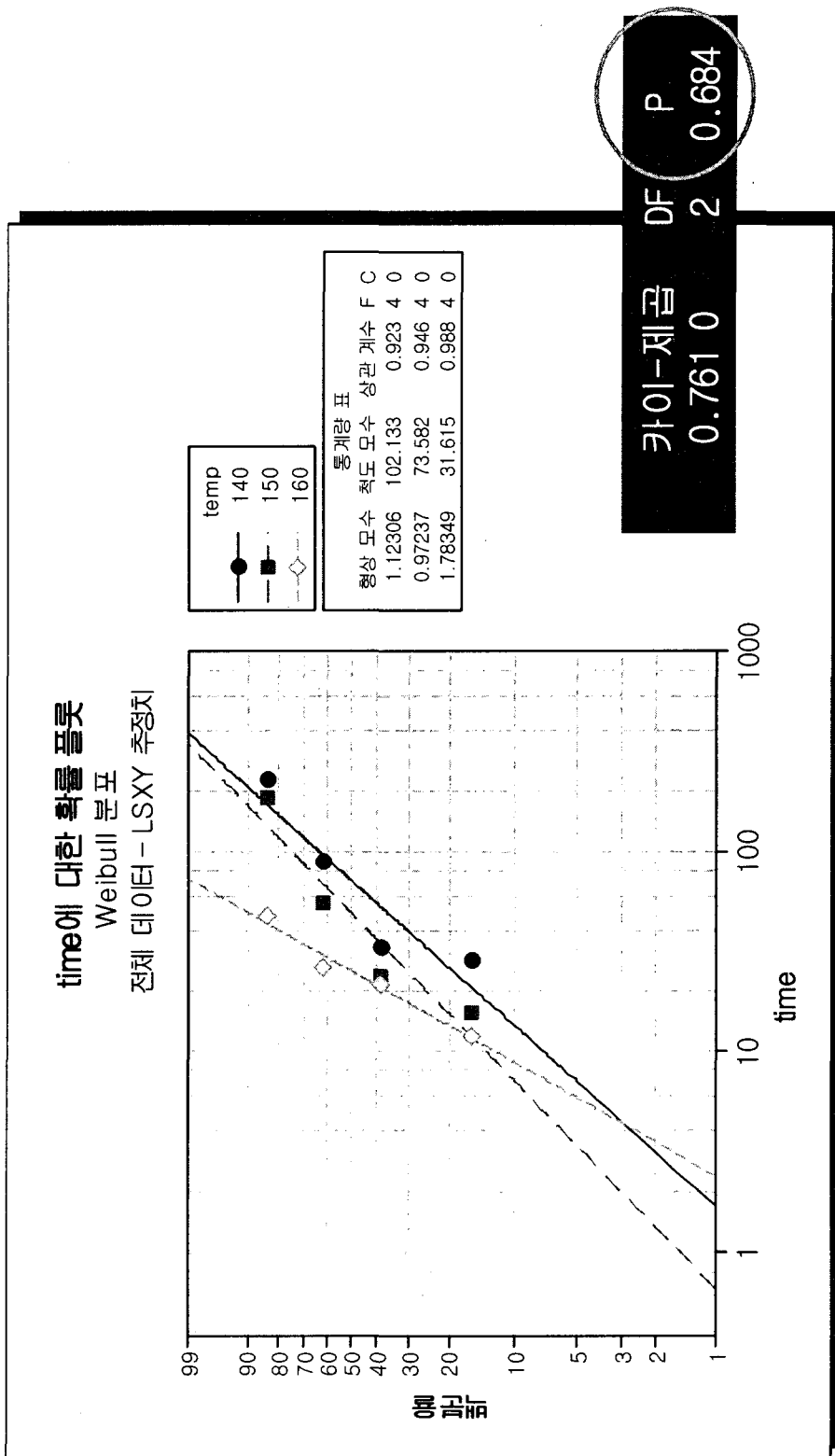
- Field 사용온도 : 80 °C
- 가속인자 : 온도
- 시험온도(3수준) : 140 °C, 150 °C, 160 °C
- 시료수 : 각 수준별 5개씩
- 인가전압 : 28 V 연속
- 가속모델 : 아레니우스
- 고장판정기준 : 과전류 2 A 이상 통전시 Failure

#### (2) 시험결과 (단위:시간)

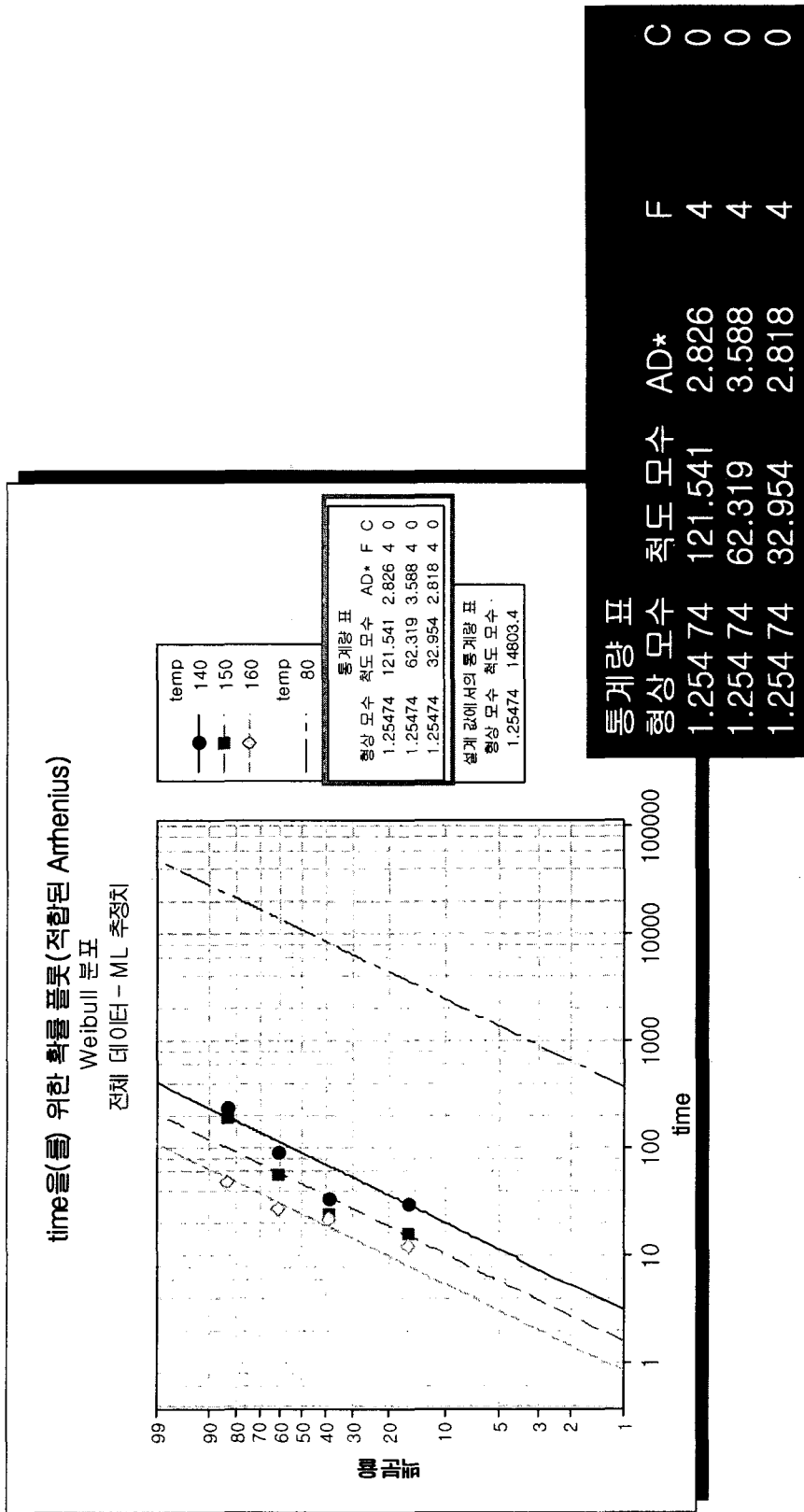
TEMP(주변온도)	TIME	FREQ
140 °C	29	1
	33	1
	89	1
	233	1
150 °C	16	1
	24	1
	56	1
	191	1
160 °C	12	1
	22	1
	27	1
	48	1

# 6. 가속성 검증 및 활성화에너지 산출

## 6-2. 가속성 검증



# 6. 가속성 검증 및 활성화에너지 산출



가속계수:  $121.541 / 62.319 = 1.95$

## 6. 가속성 검증 및 활성화에너지 산출

### 6-3. 활성화에너지 산출

아레니우스 모형 관계식에 근거

$$AF = \exp\left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{\text{field}}} - \frac{1}{T_{\text{test}}}\right)\right] \quad k = 8.617 \times 10^{-5} (\text{eV} / ^\circ\text{K})$$

$$E_a = \frac{k \ln(AF)}{\frac{1}{T_{\text{field}}} - \frac{1}{T_{\text{test}}}} = 1.0 (\text{eV})$$

$$(AF = 1.95)$$

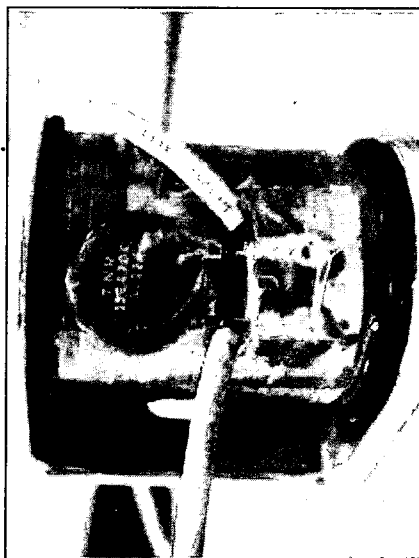
### 6-4. Field 온도 조건(80 °C)에서 150 °C 시험시 가속계수 산출

$$AF = \exp\left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{\text{field}}} - \frac{1}{T_{\text{test}}}\right)\right] = \exp\left[\frac{1.0}{8.617 \times 10^{-5}} \left(\frac{1}{273 + 80} - \frac{1}{273 + 150}\right)\right] = 231$$

## 7. 양산품 및 1차개선품 비교시험

### 7-1. 1차 개선현황

구분	양산품	개선품
권선종류	AIW 2중, N등급	AIW 2중, N등급
도체경 및 권선수	Φ0.37, 2 200 (turn)	Φ0.35, 2 300 (turn)
Surge Absorber	TNR 15G470	TNR 15G470
절연물	절연지/절연테이프E종(120 °C)	내열등급 H종(180 °C)
공정추가	무	바니쉬공정



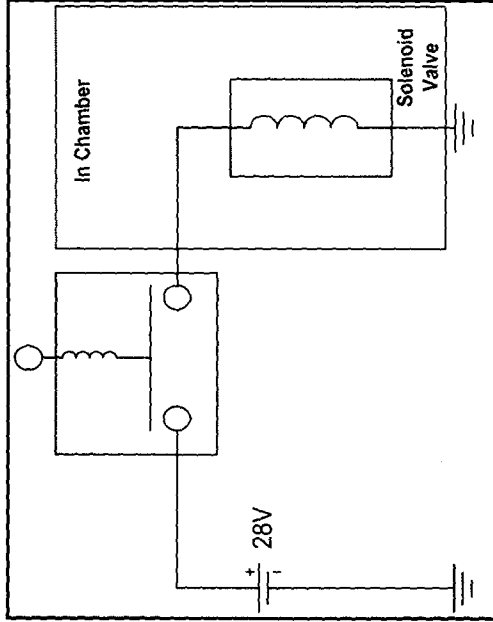


# 7. 양산품 및 1차개선품 비교시험



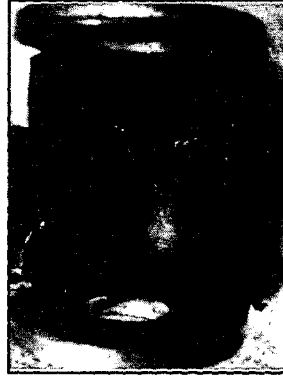
## 7-2. 양산품 및 개선품 비교시험

- (1) 시험방법 : 고온동작시험
- 가속모델 : 아레니우스 모델
  - Chamber내 온도 150 °C 설정
  - 180 s 동작, 0.5 s 휴지를 반복 동작
  - 시험시료 : 5개
  - 고장판정기준 : Fuse Open(2 A)

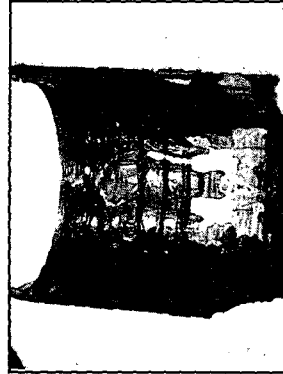


## (2) 시험결과(개선품)

구분	개선품 (코일변경)		고장시간
	동작횟수		
시료 1,2	4	0.5	
시료 3	6	0.75	
시료 4	7	0.875	
시료 5	430	53.75	



TNR 소손



납땀부 Short

# 7. 양산품 및 1차개선품 비교시험



## (3) 시험결과(양산품)

구분	양산품	고장시간
	동작횟수	
시료1	500	62.5
시료2	13	1.625
시료4	459	57.375
시료5	1 434	179.25

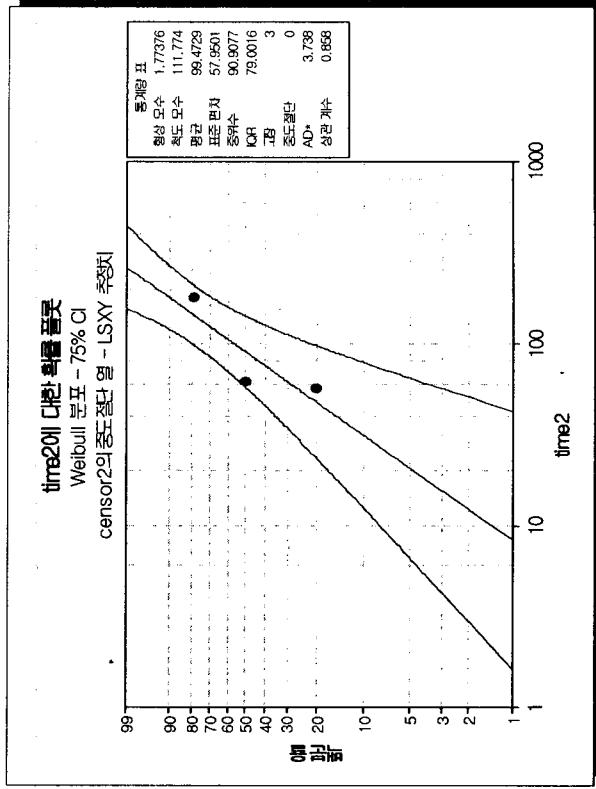
형상모수	MTTF	B <sub>10</sub> 수명
1.8	31.0	12.5

- 가속계수를 적용한 수명

형상모수	MTTF(시간)	B <sub>10</sub> (시간)
1.8	$31 * 231 = 7 161$	$12.5 * 231 = 2 887$

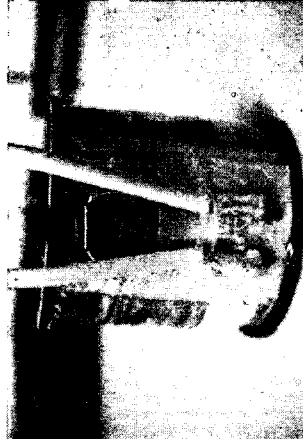
- 1. Coil 및 TNR에 대한 재설계
- 2. 작업공정 개선
- 3. 가속계수 재산출

**고장모드**  
**: Coil 소손, TNR 소손**

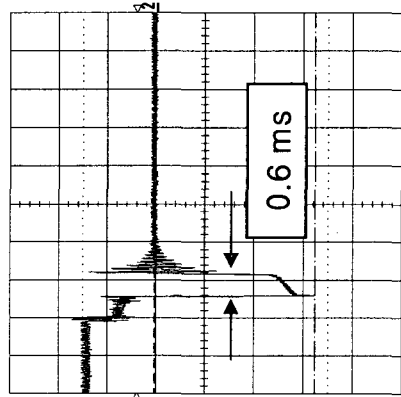


## 8. 2차 개선품 가속수명시험

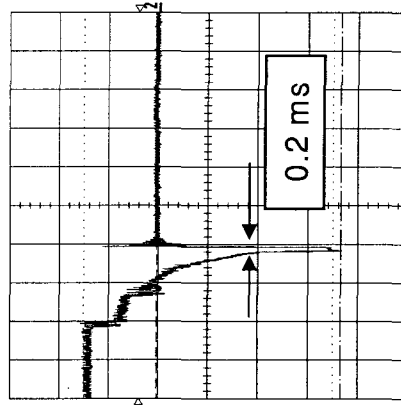
### 8-1. 2차 개선현황

구분	2차 개선품	개선품 형상
권선종류	AIW 1종, N등급	
도체경 및 권선수	Φ0.37, 2 200 (turn)	
Surge Absorber	Transil Diode (Bipolar) BZW06-58B	
절연물	내열등급 H종(180 °C)	
공정추가	진공함침	

Switch Off시  
Surge 비교



TNR 삽입

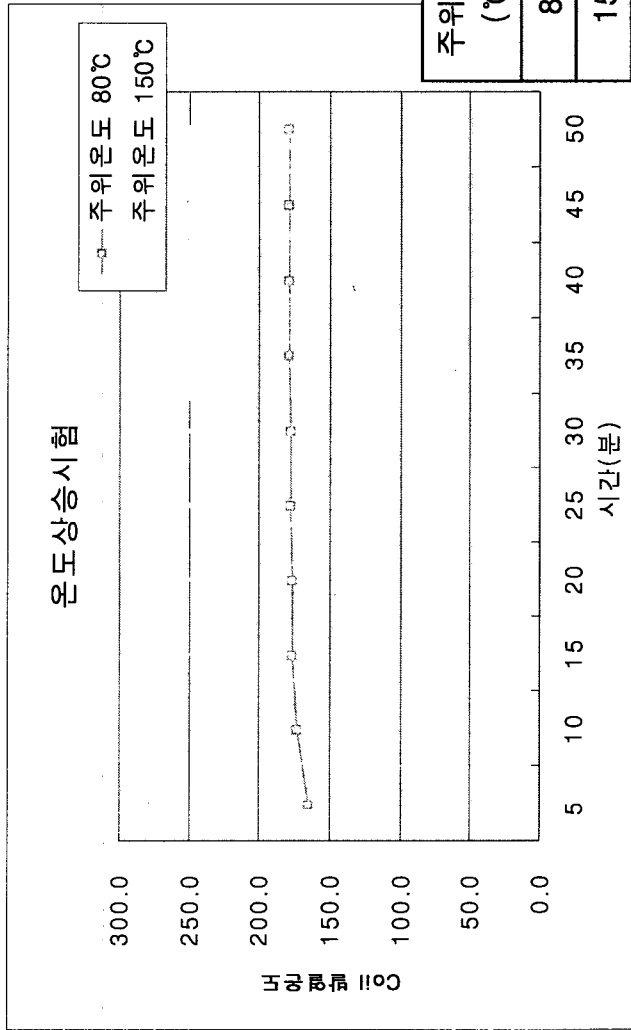


Diode 삽입

## 8. 2차 개선품 가속수명시험

### 8-2. 가속계수 산출

- (1) 1차 시험시 온도기준 : 주위온도 (80 °C와 150 °C)
- (2) 가속계수는 Coile 자체의 발열온도로 설정해야 함



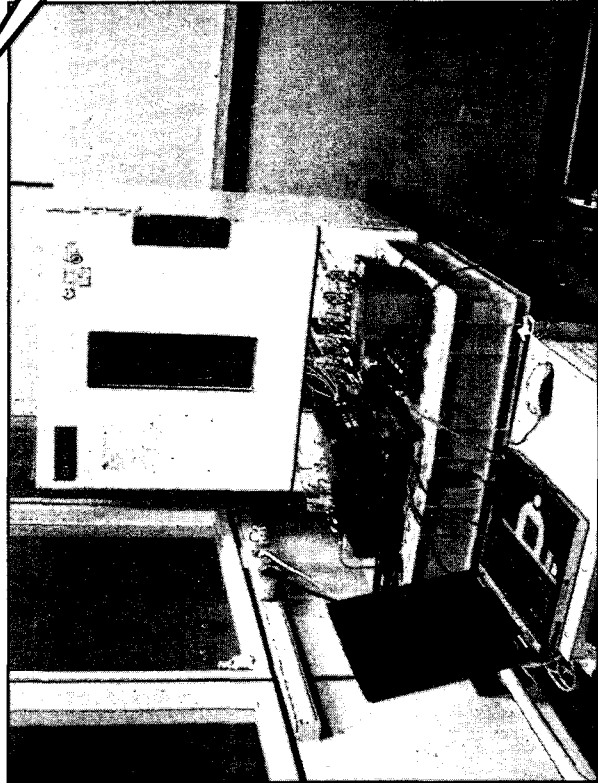
주위온도 (°C)	Coile 온도 (°C)	ΔT = Coile온도-주위온도
80	180	100
150	250	100

$$\therefore AF = \exp\left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{453} - \frac{1}{523}\right)\right] = 31$$

## 8. 2차 개선품 가속수명시험

### 8-3. 시험결과

구분	동작횟수	고장시간	고장현상
시료1	7 475	1 121.25	Coil 소손
시료2	8 448	1 267.2	Coil 소손
시료3	8 448	1 267.2	Coil 소손



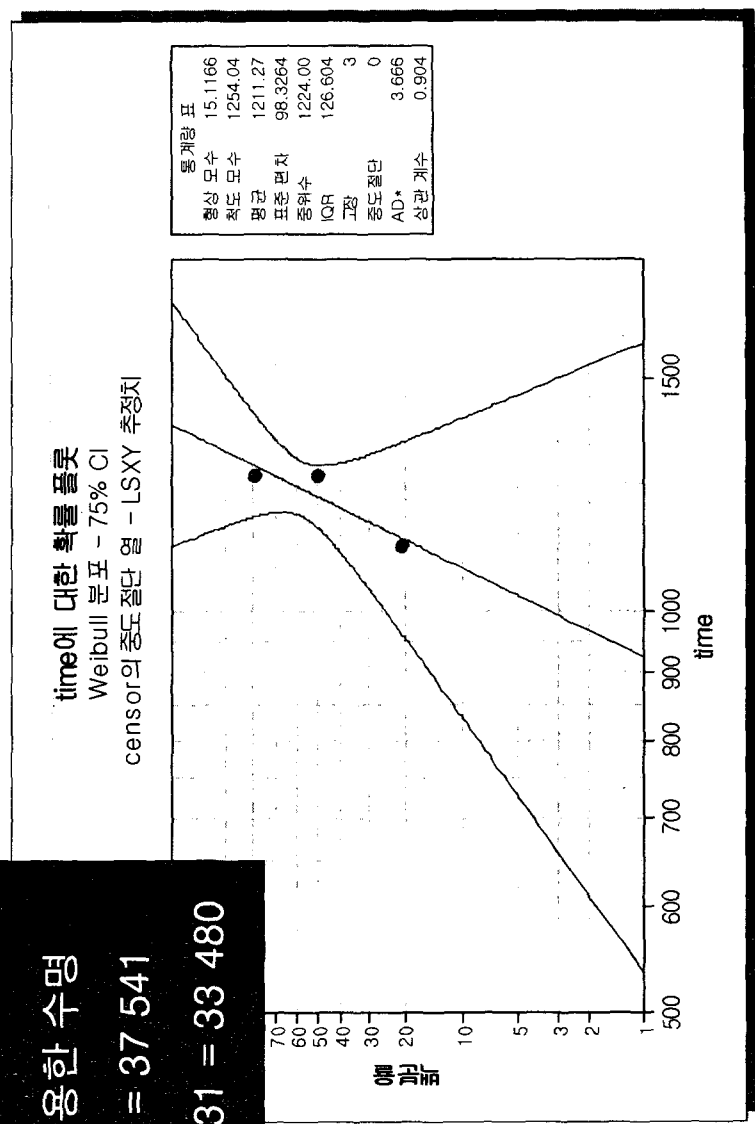
고장시간이 비슷함은  
시료가 그만큼  
균질하다는 것

# 8. 2차 개선품 가속수명시험

## 8-4. 시험결과에 따른 2차개선품의 수명예측

형상모수	MTTF	B <sub>10</sub> 수명
15.1	1 211	1 080

가속계수를 적용한 수명  
 MTTF :  $1\ 211 \times 31 = 37\ 541$   
 B<sub>10</sub> 수명 :  $1\ 080 \times 31 = 33\ 480$



## 9. 향후 가속수명시험시 고려할 점

1. Coil 열화에 대해서만 아레니우스 모형을 적용할 경우  
: Field에서 복합적인 영향으로 발생한 고장모드에 대한 평가 미흡
2. 개선설계 후 발생한 다른 고장모드를 평가할 수 있는 시험방법의 재설정 필요  
예) 납땜불량, 열화의 원인이 아닌 코일 자체의 내부 소손
3. 가속 스트레스 설계시 반드시 재현될 수 있는 고장 메커니즘의 연구 필요 (FMEA sheet 이용)
4. 전장품은 작업공정에 따른 불량이 많이 발생하므로 제품 출하 전 불량을 최소화할 수 있는 시험방안을 적용하여 고장을 감소시켜야 함  
예) Burn-in Test, Dielectric Test 등
5. 가속수명시험의 정확도 향상을 위한 고려사항  
: Field 사용조건과 부합되는 가속계수 및 Duty Cycle의 설정