

전동식 조향 장치용 ECU의 환경 내구 시험 시간 단축을 위한 설계 검증 시험 사양 변경 사례

김태훈[†] · 강동영* · 정인승**

An Example of Modification of Design Validation Test Specification to Reduce the Environmental Durability Test Time of Electronic Control Unit for Motor-Driven Power Steering system

Tae-Hun Kim, Dong-Young Kang and In-Seung Chung

Key Words : Coffin-Manson model, temperature cycle test

Abstract

This paper suggests an example of modification of the durability test specifications of electronic control unit for an automotive system in phase of design validation. The basic concept to redefine the specifications of durability test is based on the Arrhenius relationship for accelerated temperature test and the modified Coffin-Manson model for temperature cycle test. The ambient temperature of the powered-event durability test is increased to reduce the required test time of the current specification. Furthermore, the holding time between the events to cool down the temperature of the components is shortened and the resultant temperature rise affects the durability of the components. Thus, the acceleration factor due to the increased temperature range of temperature cycle is also estimated by the modified Coffin-Manson model.

기호설명

AF : 가속 계수

E_a : 활성화 에너지(0.123 eV)

k : Boltzmann 상수(8.6147 eV/°K)

T : 온도

f : 빈도

1. 서론

본 논문은 자동차용 전동식 조향 장치의 ECU 개발 시 실시하는 환경 내구 시험의 시험 기간이 장시간 소요되어 신뢰성 검증에 필요한 시험 시간의 단축이 제품 개발 프로세스의 효율을 위해서

중요한 요구 사항이 되고 있다. 따라서 현재의 내구 시험의 각 시험 항목에 대한 단축 가능성을 점검하고 시험 시간이 가장 현저히 많이 소요되고 가속 인자를 변화시켜 소요되는 시간을 줄일 수 있는 항목을 우선 선정하여 구체적인 시험 사양을 변경하는 방법을 소개하고자 한다. 이 방법의 기본 개념은 먼저 ECU의 설계 검증에서 요구되는 시험 항목 중 전체적인 시험 평가에 가장 소요 시간이 큰 항목을 우선 선정하는데 환경내구시험-2가 전체 시험 시간의 70%를 차지하고 있으며 이 환경내구시험-2 항목에 포함된 세부 프로세스 중 작동내구시험 프로세스에 소요되는 시간이 전체 환경내구시험-2 항목의 55.4%를 차지하여 이 세부 프로세스에 대한 시험 사양의 개선에 목표를 두었다.

2. 환경내구시험-2 프로세스 분석

2.1 환경내구시험의 기간단축 목표 설정
이번 내구 시험의 사양 변경의 목표는 Fig.1에 나

[†] 김태훈

E-mail : taehkim@mando.com

TEL : (031)680-5362 FAX : (031)680-5487

* 강동영 만도중앙연구소

** 정인승 만도중앙연구소

타난 전동식 조향 장치의 ECU 설계 검증에 필요한 소요 시간을 최대한 단축하는 것이다. 설계 검증 시험(Design Validation Test)의 소요 시간을 단축하기 위한 환경내구시험-2를 구성하는 프로세스의 소요시간이 Table 1에 나타나 있다. 여기서

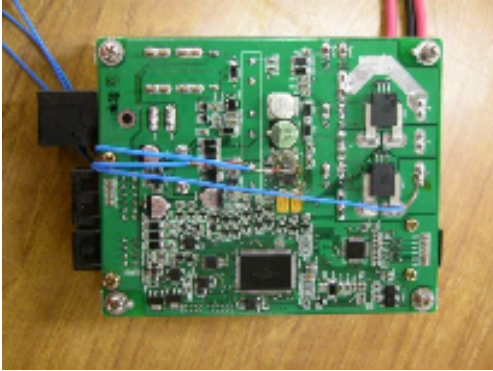


Fig. 1 ECU of Motor-Driven Power Steering System

환경내구시험-2에서 가장 비중이 큰 세부 프로세스는 작동 내구 시험인 것을 알 수 있다.

Table 1 Required Time for Processes of Environmental Durability Test

	Process	시험 시간	비율	시험 조건
환경 내구 시험 시간	저온 작동	105H	5.5%	-30℃
	작동 내구	1060H	55.4%	25℃
	고온 작동	155H	8.1%	75℃
	온도 Cycle	245H	12.8%	75℃ ~ -30℃
	정상습도	105H	5.5%	55℃/95%
	온습도 Cycle	245H	12.8%	75℃ & 55℃/95% ~ -30℃
	총계	1915H	100%	-

3. 가속 인자

3.1 가속 인자 적합성

환경 시험에서 가속을 시키는 방법으로는 아레니우스-피크(Arrhenius-Peak) 관계식에서 알려진 것과 같이 온도와 습도가 가속 인자로서 작용한다는 점에 착안하여 시험 조건에서 온도와 습도에 대한 환경조건을 가혹하게 설정한다.

3.2 휴지 조건

본 연구에서는 작동 내구 시험에서 모터의 작동

전원을 차단한 상태로 방지되는 휴지 시간을 줄이는 방법에 대해서 검토하였다. 이를 위하여 이미 확보한 ABS 용 ECU의 시험 결과가 Table 2에 나타나 있다. 즉, 환경 조건이 일정한 상태에서 휴지 시간의 차이에 의한 포화 온도의 변화가 고장 원인에 영향을 미칠 수 있는지를 조사하였다.

Table 2 Saturation Temperature of ABS ECU depending on Holding Time

조건		결과	
환경	휴지 시간 (2차 Off)	포화 온도	편차
125℃	3min	134.7℃	1.1℃ (0.82%)
	7min	133.6℃	
90℃	3min	101.3℃	2.3℃ (1.97%)
	7min	99.3℃	
25℃	3min	48.9℃	4.1℃ (8.38%)
	7min	44.8℃	

이 때의 포화 온도의 차가 통계적으로 휴지 시간 변경 전후에 실제적 변화로 볼 수 있는지 2-Sample t 검정을 한 결과가 Fig.2에 나타나 있다. 여기서 ECU의 작동 시간 변경에 따른 온도 포화 시간으로 확인된 바와 같이 동일한 포화 온도를 유지한다고 통계적 결론을 내리고 시험 시간 단축을 위한 변수로 적합하다고 판단한다.

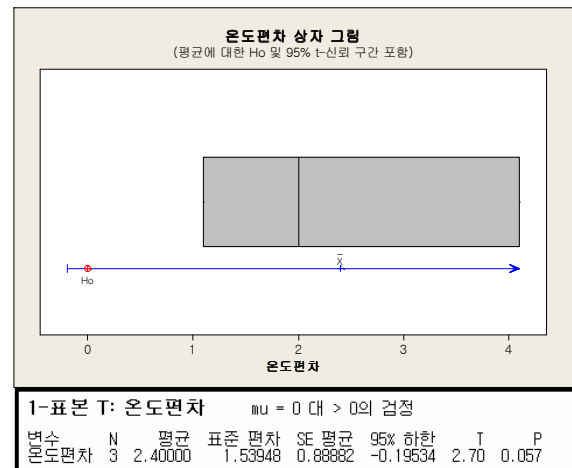


Fig. 2 2-Sample t Test of Saturation Temperature

3.3 온도 조건

온도에 의한 가속 효과는 식(1)의 나타난 것과 같이 아레니우스 식으로 표현된다. 여기서 환경 시험 조건의 주변 온도를 상승시키면 가속 효과를 증대시켜 시험 시간을 단축시킬 수 있는 것을 알 수 있다.

$$AF = \exp\left(\frac{1}{k} E_a \left(\frac{1}{T_{use}} - \frac{1}{T_{test}}\right)\right) \quad (1)$$

여기서 T_{use} 는 현재의 시험 사양의 온도조건이고 T_{test} 는 시험 가속을 위한 변경된 온도 조건이다. 또한, AF 는 시험 온도 변경에 따른 가속계수이다. Table 3 은 기준에 확보한 ABS 용 ECU 환경 조건 온도 변화에 따른 시험 샘플의 포화온도를 나타내고 있다.

Table 3 Saturation Temperature and Time of ABS ECU

조건		결과	
환경	ECU	포화 온도	포화 시간
125°C	작동	134.7°C	550 sec
90°C	작동	101.3°C	740 sec
25°C	작동	48.9°C	6100 sec

또한, Fig.3 은 환경 조건 온도에 따른 포화 온도에 도달하는 시간을 보여주고 있다. 여기서 환경 온도 조건이 높을 수록 샘플의 최대온도 포화시간이 짧아지므로 시험 기간 단축이 가능하다는 것을 보여주고 있다.

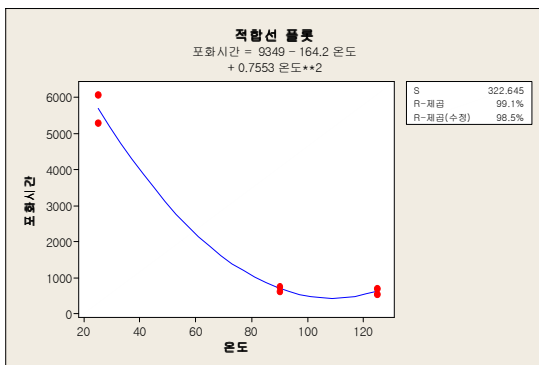


Fig. 3 Lapse Time to Saturation Temperature

3.4 습도 조건

가속 시험의 가속 인자로 습도 역시 생각할 수 있는데 습도의 가속 효과에 대해서는 식(2)의 아레니우스-피크 가속 관계식이 실제적으로 사용되고 있다.

$$AF = \exp\left\{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{use}} - \frac{1}{T_{test}}\right)\right\} \left(\frac{H_{use}}{H_{test}}\right)^{-2.66} \quad (2)$$

여기서 습도도 가속 계수의 영향을 주는 주요 인

자라는 것을 알 수 있다. 그런데 실제적으로는 이미 현재의 시험 조건이 습도가 95%로 설정되어 시험을 실시하고 있고 사용되는 환경챔버가 온도가 고온일 경우에는 고습도 상태를 유지하는 것이 매우 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 습도 조건이 가속 인자이지만 현재의 시험 조건에서는 시험 시간 단축 효과가 크지 않으므로 가속 인자에서 제외하였다.

4. 가속 인자 상세 분석

4.1 환경 온도 조건의 영향성 분석

본 연구의 대상인 전동식 조향 장치의 경우에 대한 작동 내구 시험에서 샘플 ECU 가 설치된 환경 챔버 내의 온도의 변화에 따른 가속 효과를 먼저 분석할 필요가 있다. 현재의 환경 온도 조건은 25°C인데 이것을 상승시키면 전체적인 가속 계수는 아레니우스 관계식으로 예측할 수 있다. 그 결과가 Fig.4 에 나타나 있다.

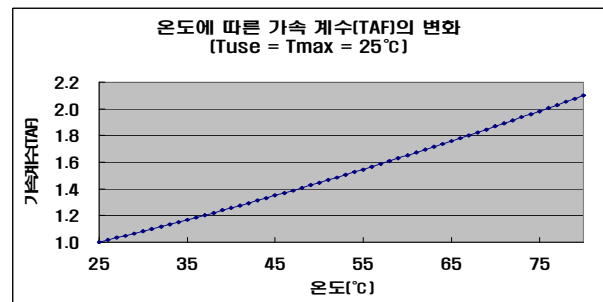


Fig. 4 Estimated Acceleration Factor depending on the Ambient Temperature in Environmental Chamber

여기서 환경 온도 조건을 75°C로 상승시키면 가속 계수는 1.98 로 상승되어 시험 시간이 49.6% 단축이 가능하다는 것을 보여준다. 따라서 작동 내구 시험의 환경 온도를 25°C에서 75°C로 상향시킨다. 이 경우 환경온도조건의 상승에 의한 시험시간에 대한 가속계수는 다음과 같이 표현된다.

$$AF_{ambient} = 1/(1 - 0.496) = 1.984$$

그런데, 전동식 조향 장치의 ECU 에 대한 작동 내구 시험은 현재 사양은 72 초가 소요되는 모터 구동 구간과 180 초가 소요되는 휴지 구간으로 구성된다. 환경 챔버 온도를 25°C에서 75°C로 변경함에 따라 가속계수가 1.98 가 되므로 휴지 기간을 60 초로 줄여 1 사이클 주기를 252 초에서 132 초로 사이클 기간을 48% 단축하여도 주변 온도의 영향에 의한 가속도는 동일하다고 추정할 수 있다.

4.2 휴지 조건의 영향성 분석

작동 내구 시험에서 휴지 시간을 단축하는 것에 따른 온도 변화율을 조사하여 적정한 사이클 횟수를 재설정하는 것이 필요하다. Table 4 에 휴지 시간과 레귤레이터의 최고온도가 나타나 있다. 여기서 샘플의 최대온도의 기준은 가장 발열이 심한 레귤레이터를 기준으로 선정하였다. 따라서 휴지 시간의 변경에 따른 레귤레이터의 온도 변화에 의한 분석을 진행한다.

Table 4 Maximum Temperature of Regulator due to Holding Time

구분		Regulator 온도 [°C]		
환경 조건	휴지 시간	Max	Min	온도차
75°C	180sec	113.8°C	80.8°C	33.0°C
	60sec	120.9°C	93.0°C	27.9°C

환경 온도 조건이 75°C에서 휴지 시간을 180 초에서 60 초로 단축하는데 따른 최대온도 변화율은 6.2%임을 알 수 있다. 이는 고장원인에 영향을 줄 정도의 차이는 아니라고 판단된다. 그러나 온도차 감소에 따른 효과는 무시할 수 없으며 이를 보상하기 위한 사이클 횟수의 증가에 따른 시험 시간의 변동을 함께 고려하는 것이 필요하다.

휴지 시간 단축에 따른 작동 내구 시험에서의 레귤레이터의 최고 온도와 최저 온도의 차이가 감소하여 동일한 가혹도를 부여하기 위해서는 사이클 횟수가 증가해야 한다. 이를 결정하기 위해서 식(3)으로 표현되는 Modified Coffin-Manson 관계식을 사용한다.

$$N_f = A_0 f^\beta \left(\frac{1}{\Delta T} \right)^n G(T_{\max}) \quad (3)$$

여기서

N_f : 고장수명 백분위수의 사이클 횟수

A_0 : 재료 특성에 따른 상수

ΔT : 최대 최소 온도차

$G(T_{\max})$: 최대온도의 함수 인자

이때 레귤레이터의 최고 온도와 최저 온도의 온도차에 의해서 동일한 열충격 가혹도를 갖기 위해 요구되는 사이클 횟수에 대한 보안을 하기 위해서는 식(4)의 열충격 사이클 가속에 대한 Lanzberg-Norris 관계식을 사용한다.

$$\frac{N_{use}}{N_{stress}} = \left(\frac{\Delta T_{stress}}{\Delta T_{use}} \right)^{1.9} \left(\frac{f_{use}}{f_{test}} \right)^{1/3} e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{use,max}} - \frac{1}{T_{stress,max}} \right)} \quad (4)$$

여기서 use 는 Table 4 의 현재의 휴지시간 180 초의 시험 조건이고 $stress$ 는 변경조건 휴지시간 60 초의 시험 조건을 의미한다. 그리고 모터 구동 시간 72 초는 동일하다. 따라서 실제의 측정값을 대입하면 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta T_{stress} = T_{stress,max} - T_{stress,min} = 394K - 366K = 28K$$

$$\Delta T_{use} = T_{use,max} - T_{use,min} = 387K - 354K = 33K$$

$$t_{use} = 72 + 180 = 252 \text{ sec}$$

$$t_{stress} = 72 + 60 = 132 \text{ sec}$$

$$f_{use} = \frac{1}{t_{use}} = \frac{1}{252} = 3.968 \times 10^{-3}$$

$$f_{stress} = \frac{1}{t_{stress}} = \frac{1}{132} = 7.576 \times 10^{-3}$$

따라서, $\frac{N_{use}}{N_{stress}} = 0.63$ 로 계산되는데 이는 휴지

시간을 단축한 결과 레귤레이터의 최대 온도와 최소 온도의 차가 줄어드는 것에 따라 시행해야 할 사이클 시험의 횟수는 현재의 사양보다 증가해야 한다는 것을 의미한다. 결론적으로 온도 사이클의 영향을 고려하여 현재의 사양과 변경된 조건에 의한 소요 시험시간을 비교할 수 있다. 전체 소요 시간을 t_{total} 이라 하면 현재조건에 의한 시험 시간과 변경조건-2에 의한 시험 시간은 다음과 같다.

$$t_{total, stress} = N_{stress} \times t_{stress} = \frac{1}{0.63} N_{use} \times t_{stress}$$

$$= 209.5 N_{use}$$

$$t_{total, use} = N_{use} \times t_{use} = 252 N_{use}$$

4.3 환경 온도와 휴지 조건에 의한 시험 시간 단축 효과 분석

전동식 조향 장치의 ECU 작동 내구 시험 시간을 현실적 방법으로 시험 조건 중 시험 장치의 환경 온도를 상승시키면 아레니우스 관계식에 의해서 50% 정도의 시간 단축이 가능하다고 판단한다. 이때 기계적 또는 전기적 내구 조건에 해당하는 모터 구동 이벤트의 전체 횟수는 변경하지 않고 휴지 시간 시간을 단축하는 방향으로 사양을 변경

하도록 한다. 그러나 휴지 시간에 의한 사이클 주기의 차이로 인한 최대온도와 최소온도의 온도 편차가 변화하므로 시료에 가해지는 열충격 효과가 상이하므로 이를 보상해야 한다. 이를 위해서는 동일한 열충격 가혹도를 갖도록 전체 사이클 횟수가 증가되었다. 따라서 시험 시간 단축율은 휴지 시간에 의한 1 사이클 기간 단축율과 증가된 사이클 횟수의 증가율을 동시에 고려해서 계산되었다.

따라서 휴지기간 단축에 의한 작동 내구 시험 시간의 단축율은 식(5)로 계산된다.

$$RR = 1 - \frac{t_{total, stress}}{t_{total, use}} = 1 - \frac{209.5N_{use}}{252N_{use}} = 0.17$$

따라서 시험 사양 변경에 따른 작동내구시험의 시험시간 단축율은 17%가 된다

5. 결 론

본 연구에서는 ECU 의 설계 검증 단계에서의 시험 시간을 주이기 위하여 시간 소요 비중이 큰 작동 내구시험의 환경 조건 중 온도를 높여 시험 가속을 시키는 경우에 있어 시험 사이클의 구성 요소인 휴지 시간을 줄이는 방법을 선택할 때 발생하는 구성 부품의 발열 온도 편차의 영향을 고려하고 기존의 사양에 대한 등가의 가혹도를 갖고 시험 시간은 단축되는 새로운 사양의 근거를 논리적 타당성에 대한 평가를 진행하였다.

참고문헌

- (1) General Motors corp., 2005, "General specification Electrical/Electronics", *GMW3172*
- (2) SEMATECH Inc. 1999, "Use Condition Based Reliability Evaluations – An Example Applied Ball Grid Array (BGA) Package "
- (3) Freescale Corp., 1998, "Customer Applications Support "