



< 기술논문 >

장거리 운행 차량 전자제어장치의 노후화 경향 조사

백인선^{*1)} · 안정훈¹⁾ · 정동진²⁾ · 정도근³⁾

콘티넨탈오토모티브 파워트레인 엔진시스템 일렉트로닉스 · 콘티넨탈오토모티브 생산본부제조기술팀²⁾ ·
현대자동차 남양연구소 파워트레인 제어설계팀

Aging Tendency Investigation of Long Mileage Engine Control ECU

Insun Baek^{*1)} · Jeonghoon An¹⁾ · Dongjin Jeong²⁾ · Dogeun Jung³⁾

¹⁾Powertrain Engine System Electronics, Continental Automotive Systems Corporation, 45-29 Saeum-ro, Icheon-si, Gyeonggi 17308, Korea

²⁾Production Technology Team, Continental Automotive Systems Corporation, 45-29 Saeum-ro, Icheon-si, Gyeonggi 17308, Korea

³⁾Powertrain Control Design Team, Hyundai Motors Corporation, 150 Hyundaiyeonguso-ro, Namyang-eup, Hwaseong-si, Gyeonggi 18280, Korea

(Received 19 June 2017 / Revised 21 July 2017 / Accepted 24 July 2017)

Abstract : ECU manufacturers have typically been required to ensure stable operation under various conditions and durability of 15 years or 300,000 km. To this end, ECU aging studies have been conducted through accelerated testing, but these may differ from studies using actual aged EMS ECU. Therefore, in this paper, we investigate the actual aged EMS ECU that exceeded the required operating distance twice, rather than the aged EMS ECU using the acceleration test. Results showed that even if the ECU has an operating distance of 600,000 km and an operation time of over 30,000 hours under the Republic of Korea's climate, no abnormality can be seen in the product.

Key words : Aging(노후화), Aged EMS ECU(노후화된 엔진 전자제어장치), Engine room temperature(엔진룸 온도), PCB cross section(인쇄 배선 회로 기판 절삭 조사), IC cross section(IC 절삭조사), Reliability(신뢰성), Endurance of ECU(전자제어장치 내구)

Nomenclature

R : resistance, Ω

Subscripts

ECU : electronic control unit
EMC : electro magnetic compatibility
ESR : equivalent series resistance
IMC : intermetallic compounds
SEM : scanning electron microscope

SAT : scanning acoustic tomography

PTC : power temperature cycling

IC : integrated circuit

ADC : analog digital converter

1. 서론

자동차에 장착되는 ECU는 장시간의 내구년환을 요구 받고 있으며 다양한 환경 즉 여러 온도, 진동 및 습도 조건에서도 안정적인 동작을 보장하여야 한다. 통상적으로 자동차 제조사에서는 15년 또는 30만 km의 내구성능을 ECU 제조업체에게 요구하고 있다.

*Corresponding author, E-mail: insun.baek@continental-corporation.com

본 논문은 실제 차량환경 아래에서 주행거리 30만 km를 2배 초과한 60만 km 이상의 차량 주행거리 이력이 있는 ECU의 노후화 정도를 다각적인 측면에서 분석하였다. 최소한 저자의 지식으로는 이제까지 가속 시험을 통한 전장 부품 노후화 진행 연구¹⁾는 존재하나 실제 차량환경에서 노후화된 ECU를 분석한 사례는 없기에 이 연구를 진행하게 되었다. 실제 환경에서 작동한 ECU 회로에 사용된 Capacitor, 저항, IC 및 PCB의 노후화 정도를, 소자 특성 변화, IC 및 PCB X-ray 및 Cross section을 통하여 알아보고자 한다.

2. 본 론

제품의 노후화 정도를 판단하기 위하여 여러 가지 방법으로 시험을 시행하였다. 특히 EMC 특성에 있어, 전자회로 및 PCB 설계에서 Capacitor와 임피던스는 중요한 역할을 하므로²⁾ 노후화에 따른 변화를 확인하는 것이 중요하다. 또한 PCB 내 물성변화, 전자부품과의 Soldering 접합면, IC 내부가 노후화에 따라 어떻게 변화했는지 기술하고자 한다.

2.1 조사 대상 단품 정보

실제 환경에서 주행거리 60만 km 이상 경과한 ECU를 자동차 업체로부터 전달받아 시험하였다. 전달받은 ECU는 택시에 사용되었던 제품으로서, 택시는 영업용으로 사용목적이 있기 때문에 일반 소비자가 사용하는 차량보다 주행거리 및 동작시간이 길다.

단품정보는 Table 1과 같다.

Table 2는 각 ECU의 동작시간동안 Micro-controller die 온도의 분포비율을 나타낸 것이다. 이 값은 Micro-controller내 메모리에 저장되어 있던 값으로서 자동차 정비 중 Reprogram 작업 시 삭제되어

Table 1 Test ECU information

ECU No	Mileage (km)	ECU production date (yy/mm)	Operating hours	Count of cranking
1	658,975	2011/11	30,469	15487
2	632,441	2011/08	27,216	12518
3	604,411	2012/05	26,846	13704
4	595,938	2011/11	25,555	14647

Table 2 Operating temperature of test ECU

Operating temperature	ECU No.2	ECU No.3	ECU No.4	Average
~50	56 %	53 %	57 %	55 %
50~60	22 %	30 %	22 %	25 %
60~70	20 %	16 %	19 %	18 %
70~85	2 %	1 %	2 %	2 %

진다. 이런 이유로 의미 있는 온도 정보는 시료 2, 3, 4에서만 취득할 수 있었다.

Table 2에서 볼 수 있듯이 본 시료의 동작온도 조건은 통상적인 유럽 자동차 회사에서 고려하는 ECU 동작 온도 프로파일보다 낮은 온도에 분포해 있었다. LV124에서는 ECU의 동작 온도분포를 Spectrum3(엔진룸 온도 분포)로 정의하여 Table 2의 값보다 동작온도가 높았다.³⁾

보통 신뢰성을 고려할 때 통상 운전자가 일평균 2번의 시동과 1.5시간 자동차를 사용한다고 가정한다. 이와 같은 조건으로 15년 내내 동작을 할 때 전자제어장치의 전원인가 동작 횟수는 10950번, 작동시간은 8212.5시간으로, 보통 8000시간으로 기준을 잡는다.

본 시료는 Table 1에서와 같이 동작시간은 4시료 모두 25000시간 이상이고 전원인가 횟수는 12000번 이상이다. 비록 조사대상의 단품의 생산날짜가 오래되지 않았으나 위의 언급한 상황을 고려했을 때 본 시료는 15년 동안 동작한 제품, 즉 통상 신뢰성에서 고려하는 조건하의 제품과 비교했을 경우, 보다 짧은 시간에 더 많은 스트레스를 받았다고 볼 수 있다.

2.2 ECU 기능시험을 통한 전자소자 특성 변화 시험

ECU 제조업체는 고객에게 제품을 납품하기 전 제품의 불량 여부를 판단하기 위하여 시험 장비를 통한 제품 기능검사를 수행하고 그 결과를 저장한다. 이를 이용해 ECU 내부 전자소자의 불량유무를 판별할 수 있을 뿐만 아니라 각 제품 간의 편차도 도출할 수 있다. 시험에 쓰인 시료 4개에 대해서도 동일한 시험 장비를 통하여 제품 기능검사를 수행했다.

해당 시료가 최초 생산되었을 당시의 특성데이터가 없으므로, 현재 양산중인 200개 제품과 비교하여 특성 변화를 유추 하였다.

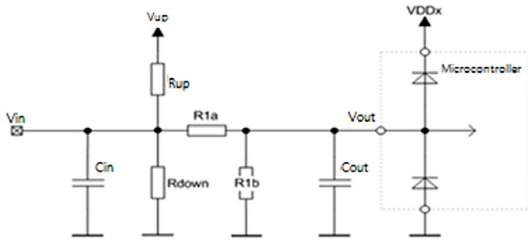


Fig. 1 Typical ECU analog input circuit

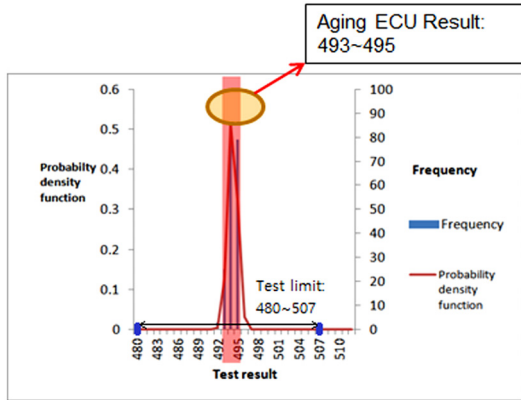


Fig. 2 Example of an analog input ADC result

Fig. 1은 보편적인 ECU 아날로그 입력 회로로서 저항과 Capacitor로 구성되어 있다. 만약 노후화의 영향으로, 회로 특성(R/C/ADC/Vref)이 변화가 있으면 입력 전압에 대한 ADC 결과에 영향을 준다.

이러한 특성을 이용하여 아날로그 입력 단 전자소자의 노후화 영향성을, 제품기능 검사를 통해 판단하였다. 그 결과, 수많은 입력 단 시험결과 양산 직후의 ECU들의 결과 값과 큰 차이를 보이지 않는 것을 알 수 있었다.

Fig. 2는 양산제품 200개로 아날로그 회로 하나의 ADC결과를 취합하여 확률분포함수와 히스토그램으로 나타낸 것이다. 이 중 노후화된 시료 4개의 기능시험결과는 위 그림에서 적색 박스 내에 분포하였으며, 이는 양산제품 200개의 결과 분포의 중앙에 위치하였다.

이외 출력 단에 사용된 FET 특성이 노후화에 따라 $R_{DS(on)}$ (FET drain-source 저항값)이 변하는지를 기능시험을 통하여 검증한 결과, 아날로그 입력 단 시험과 마찬가지로 노후화 후 변화된 FET 특성도 양산제품 200개와 유사한 값을 나타내었다.

2.3 PCB pattern 저항 측정

노후화에 의한 PCB pattern의 전도성 물질 변화를 알아보기 위하여 제품 동작 전류 중 비교적 큰 3~10 A의 전류 허용 용량을 가진 PCB pattern의 저항을 4wire method를 사용하여 mΩ수준까지 측정하였다. 시험결과 설계의 목적대로 3~10 A의 전류 허용이 가능한 수준의 저항치를 보여주었다.

2.4 시료의 전해 Capacitor의 ESR 및 정전용량 측정

전자소자 중 노후화에 의한 특성변화가 높은 소자 중 하나가 전해 Capacitor이다. “전해 Capacitor의 고장 및 열화의 Mechanism은 온도 상승에 따른 전해액의 증발(Dry-up)이 가장 큰 요인이며, 이에 따라 ESR, 정전용량 및 유전율 $\tan \delta$ 의 변화를 초래하고 이를 통하여 고장유무를 판별한다.”⁴⁾

이번 시험은 LCR meter를 이용하여 시료 2번 제품에 사용된 전원 단 Capacitor의 정전용량 및 ESR을 주변온도 -40도, 25도, 105도 환경에서 측정하였다.

Table 3 Example of electrolytic capacitor’s capacitance and ESR measurement at 1 kHz condition

Ambient temperature	Characteristic of capacitor	(220 uF / 20 %) capacitor	
		New	ECU No.2's
-40 °C	Capacitance	232.3 uF	206.1 uF
	ESR	601.3 mΩ	632.0 mΩ
25 °C	Capacitance	243.6 uF	231.7 uF
	ESR	75.6 mΩ	115.1 mΩ
105 °C	Capacitance	258.2 uF	248.2 uF
	ESR	51.3 mΩ	54.6 mΩ

Table 3에서 볼 수 있듯이 시료에 사용된 Capacitor와 새 제품에 사용된 Capacitor의 측정 측정결과가 정격 정전용량의 10 % 이내로 큰 차이는 보이지 않았고 규격 이내였다.

2.5 Visual inspection

전자제품의 PCB와 전자부품의 노후화에 대한 척도로 Ionic migration, Solder joint crack 등을 고려할 수 있고, 이를 판단하기 위하여 Visual inspection을 시행하였다.

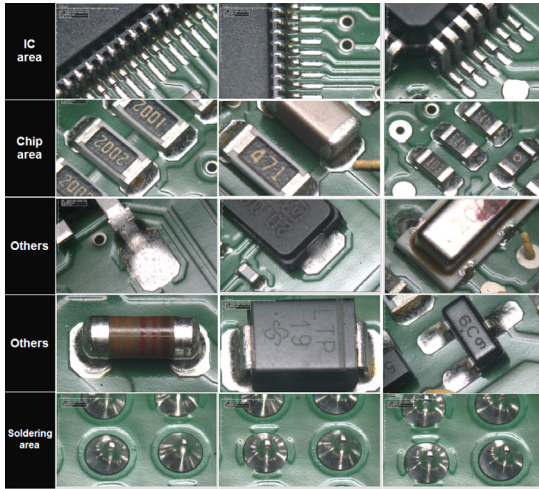


Photo. 1 Result of test ECU No.1 visual inspection by optical microscope

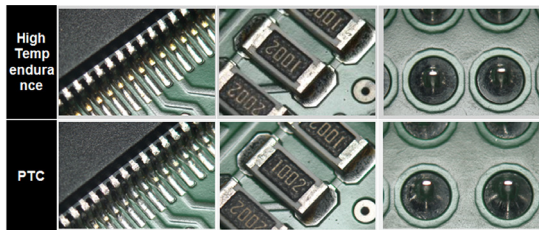


Photo. 2 Result of high temperature endurance test and ECU visual inspection by optical microscope

주행거리가 길고 동작시간이 가장 오래된 시료 1의 결과는 Photo. 1과 같다. 분석결과 Soldering 접합면 Crack, Flux의 변색 및 Ionic migration 등이 관찰되지 않았다. 대조적으로 Photo. 2는 내구시험을 한 시료들에서 보이는 Flux의 변색이 보인다.

2.6 X-ray inspection

IC wire-bonding이나 Lead frame의 손상 등을 관측하기 위하여 시료 1을 대상으로 X-ray 검사를 시행하였다. 그 결과 Photo. 3과 같이 Wire bonding이나 IC의 Lead frame에 별다른 이상을 발견하지 못했다.

2.7 Whisker inspection

Whisker는 Cu에 Sn도금 시 도금 면에 생긴 기다란 Sn 단결정으로 주로 열팽창 계수의 차이, 전기도금 잔류응력 또는 외부의 압력 조절을 잘못했을 경

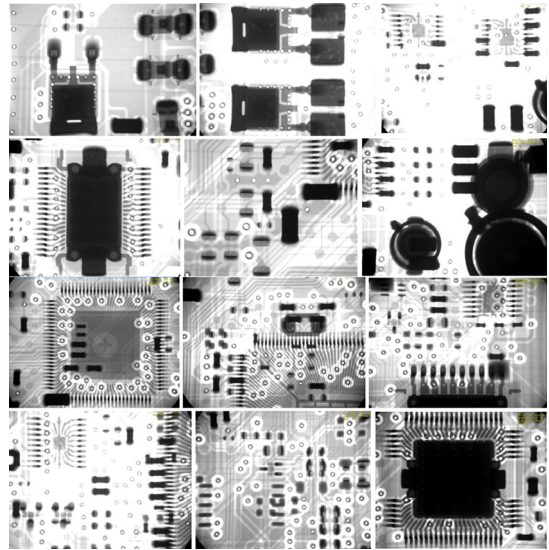


Photo. 3 Result of ECU X-ray inspection

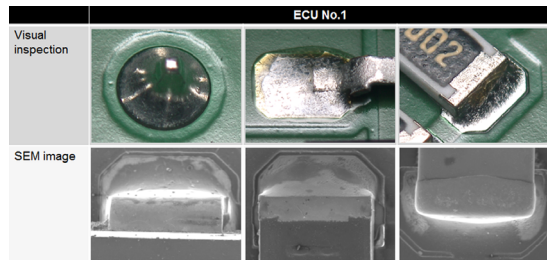


Photo. 4 Whisker inspection by microscope and SEM

우 Whisker가 발견된다. 이는 곧 인접 전도 면에 단락 등 갖가지 문제를 야기 시키는 요인이 된다. 이러한 Whisker가 시료 1에서 발생했는지 알아보기 위해 Visual inspection과 SEM을 이용하여 검사하였다. Photo. 4와 같이 Whisker가 발견되지 않았다.

2.8 SAT inspection

IC내의 웨이퍼와 Package compound와의 박리 유무를 확인하기 위하여 SAT를 이용하여 시료 1을 검사하였다. 박리현상이 있는 경우 Photo. 5처럼 박리 부분에 빨간색으로 나타난다. 하지만 시료 측정 결과 Photo. 6과 같이 특별한 박리현상이나 Crack 없이 정상상태를 보여주었다.

2.9 Cross section

PCB의 Plated through hole의 Crack 정도, IC와 수

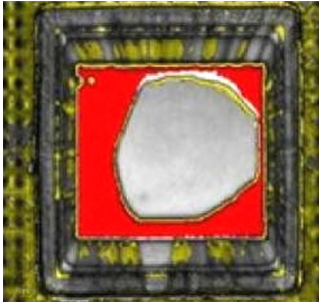


Photo. 5 Example of delamination SAT image⁶⁾

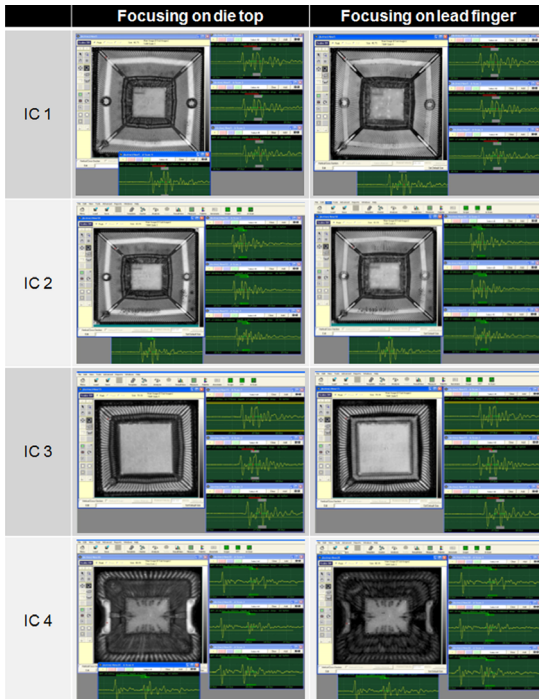


Photo. 6 SAT inspection

동소자들의 Soldering 상태 및 IMC 두께 등을 관측하기 위하여 시료 1을 대상으로 Cross section을 하여 광학 현미경과 SEM을 사용하여 관측하였다.

IMC는 두 개 혹은 그 이상의 금속들이 일정한 비율로 혼합되어있는 상태아래 공유결합이 일어난 상태로 합금보다 더 단단하고 탄성 계수도 훨씬 더 높아서 깨지기가 쉽다.⁵⁾ 과도한 IMC는 일반적으로 Soldering 접합면의 조성과 물리적 성능을 크게 변경시키기 때문에 부정적인 효과를 발생시킨다. 제품의 노후화가 진행 시간이 경과함에 따라, 그에 비례하여 IMC가 진행된 두께도 함께 증가하는 특성을

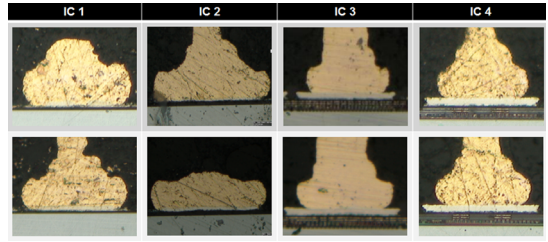


Photo. 7 IC cross section on wire-bonding area

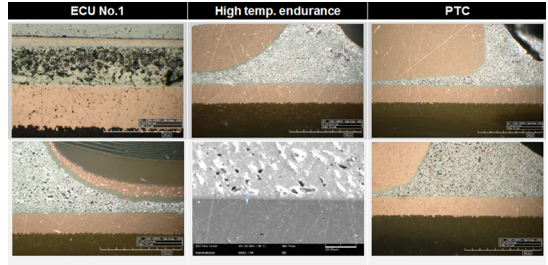


Photo. 8 Soldering joint cross section result

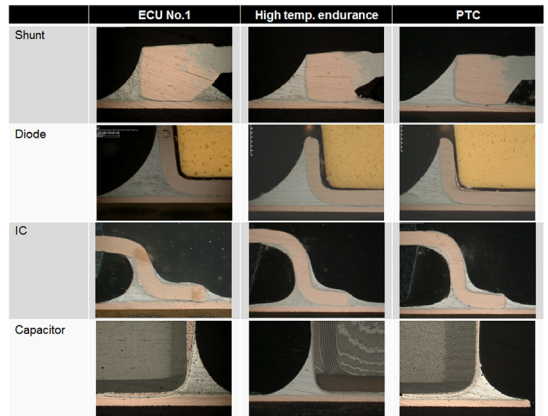


Photo. 9 Soldering joint cross section result

보인다.⁷⁾ IMC가 진행되면 될 수록 주위의 금속들과의 확산속도 차이로 인해 Kirkendall void까지 생성될 수 있기에 보통 IMC두께를 측정하여 노후화 정도를 판단한다.

Photo. 7은 광학현미경을 통해 IC wire bonding 부분을 Cross section 하여 관찰한 사진이다. IMC 성상이나 Kirkendall void가 발견되지 않았다.

Photo. 8, 9는 시료1과 고온내구시험 1500시간 경과 후 제품 및 PTC 1540시간 경과 후 제품을 서로 비교한 것이다. Photo. 8, 9에서 볼 수 있듯이 시료 1이 다른 제품보다 IMC 생성두께가 더 작았다.



Photo. 10 PCB plated through hole inspection by microscope

Photo. 10은 광학현미경을 통해 PCB를 Cross section 하여 Plated through hole을 관찰한 사진이다. 검사결과 Hole의 전도체 Crack이 발견되지 않았다.

3. 결 론

- 1) 실제 대한민국 주행환경에서 59만 ~ 65만 km 주행거리를 기록한 노후화된 ECU의 전기적 특성을 조사한 결과, 새 제품과 비교하여 큰 차이가 발견되지 않았다.
- 2) 시료 4개 중 가장 주행거리가 많은 시료 1번에 X-ray, Visual inspection, Cross section, SAT inspection 및 SEM 등 여러 가지 방법으로 조사한 결과 Soldering 접합면이나 Plated through hole에 Crack, Delamination과 Kirkendall void 등이 발견되지 않았다.
- 3) 자동차 제조사에서 요구하는 고온내구시험이나 PTC 시험을 마친 ECU의 상태보다 시료 1번이 IMC생성 정도나 Soldering 접합면 상태에서 훨씬 양호한 결과를 나타내었다.

위와 같은 시험을 통해 본 시료가 대한민국 기후 아래에서 약 60만 km의 주행거리와 25,000 시간 이상의 동작시간을 보유함에도 불구하고 기능이나 제품의 상태에 아무런 이상이 없음을 알 수 있었다. 오히려 자동차 업체가 요구하는 각 종 신뢰성 규격에 따른 시험 후 제품 상태가 이번 시료보다 더 노후화 되어 있음을 알 수 있었다.

이는 종래의 요구되는 내구년한을 초과하는 경우가 발생하더라도 대한민국 기후 아래에서는 기능

및 제품특성 변화가 문제되지 않는 수준이라고 유추할 수 있다.

현실적으로 장거리 주행거리를 가지는 동일한 차량의 전자제어장치를 수배하는데 어려움이 있어 시험할 수 있는 시료수가 적었지만, 신뢰성 시험 후의 단품들의 상태와 비교했을 때 4개의 시료 모두 굉장히 양호한 상태를 보여주는 것에 의의를 둔다.

후 기

이번 논문에서 다뤘던 시험에 대하여 몇몇의 한계점이 있었다.

첫 번째, 최신 경향 제품은 PCB와 전자부품 Soldering시에 무연납을 사용하지만 이번에 시험한 시료들은 유연납을 사용하였다.

두 번째, 전장부품 노후화에 영향을 미치는 가장 큰 요인이 열인데⁸⁾ 대한민국 기후가 적도부근이나 사막의 환경보다 평균기온이 낮기 때문에 실제 자동차 제조사들이 고객에게 보증해야하는 환경 조건보다 열악하지는 않았다.

세 번째, 시험한 대상 시료들의 개수가 한정되었고, 그마저도 시료들의 생산할 당시의 초기 기능시험 결과나 부품의 품질 수준을 알 수 없었다.

하지만 이러한 한계점에도 불구하고 이번 시험에 사용된 제품들이 보증수명보다 2배 정도의 주행거리를 보유하고 있는 것에 시험 의의를 두고 있다.

더 나은 연구를 위해, 첫째 대한민국 기후보다 기온이 높고, 습한 조건의 환경을 가진 타국에서 사용된 제품, 둘째 무연납을 사용한 최신 경향의 제품, 마지막으로 이번 연구와 같이 보증 주행거리보다 긴 주행이력을 가진 제품, 이렇게 세 가지 조건을 모두 만족하는 일정 수량 이상의 ECU들을 조사할 필요성이 있다고 본다.

References

- 1) J. E. Oh, W. H. Kang, H. J. Lee, W. S. Park, Y. Y. Lee and S. W. Shin "Reliability Assessment of Automotive Electronic Using Highly Accelerated Life Test & Virtual Qualification," KSAE Fall Conference Proceedings, pp.1160-1165, 2006.

- 2) H. S. Kweon, T. H. Kim, M. R. Kim and B. J. Ahn, "Design and Analysis of Automotive Electronic Component PCB Design According to EMC Specification," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.1757-1762, 2009.
- 3) Volkswagen, LV124 VW 80000 Electric and Electronic Components in Motor Vehicles up to 3.5t-General Component Requirements, Test Conditions and Tests, 2013.
- 4) J. C. Park and J. G. Shon, "Characteristic Investigation of External Parameters for Fault Diagnosis Reference Model Input of DC Electrolytic Capacitor," The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol.61P, No.4, pp.186-191, 2012.
- 5) Ed Hare, SEM Lab, Inc, <http://www.semlab.com/papers/intermetallicsinsolderjoints.html>, 2017.
- 6) MuAnalysis, <http://www.muanalysis.com/techniques/confocal-scanning-acoustic-microscopy-csam>, 2017.
- 7) E. Zaia, C. Andre and B. Moreau, Comparison between SnPb 63/37 and SAC305 Solders: Structure and Intermetallics Morphologies after Thermal Stress on PCB-Engineering, Serma Technologies.
- 8) J. W. Koo, S. W. Shin and B. S. Kim, "Thermal Analysis for Automotive Electronic Components and Equipments," KSAE Fall Conference Proceedings, pp.1263-1268, 2005.