

## Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2018.27.3.015>

ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

## 백플레인 형식 항전장비에서 발생하는 간헐결함 탐지를 위한 고장물리 기반의 요구도 개발

이호용\*, 이익훈\*\*

### Requirements Development for Intermittent Failure Detection of an Avionics Backplane based on Physics-of-Failure

Hoyong Lee\*, Ighoon Lee\*\*

#### ABSTRACT

This paper contains analyses and development processes of the requirements to detect the possible intermittent failure in an old avionics backplane. Interconnections for signal transmission between electronic components, such as Pin-to-PCB, FPCB-to-FPCB, pin-to-FPCB, and pint-to-wire, were selected as the main cause of intermittent failure by analyzing target equipment and documents. The possibility of detecting intermittent failures occurring in the target equipment is verified by physics-of-failure analyses. In order to verify the occurrence of intermittent failures and their detectability, latching continuity circuit testers were manufactured and accelerated life tests were performed by applying temperature and vibration cycle in consideration of flight conditions. Through the above process, the detection requirements for the major intermittent failure in the target avionics backplane was developed.

**Key Words** : Intermittent Failure (간헐결함), No Fault Found (재현불가결함), Physics-of-Failure (고장물리), Latching Continuity Circuit Tester (래칭 연속성 회로시험기), Accelerated Life Test (가속수명시험)

#### 1. 서 론

재현불가결함(no fault found)이란 제품이 특정 사용조건에서 결함이 발생한 뒤 그 외의 조건

에서는 그 고장이 사라지는 현상을 말하며, 주로 전자장비에서 이러한 현상이 많이 보고되고 있다(Qi, Ganesan, & Pecht, 2008). 전자장비는 사용되는 부품 및 재료의 수가 많아 복잡하고, 환경의 변화에 민감하게 반응한다. 이에 따라 전자장비의 결함 발생기구(failure mechanism)는 기계구조물에 비해 더욱 복잡하고 그 원인을 찾기 힘든 경우가 많이 있다. 항공정비 현장에서는 항전장비에서 발생하는 간헐결함을 오래전부터 NFF (no fault found), CND (cannot duplicate), NFI (no fault indicated), NTF (no trouble found),

Received : 10. Jun. 2019. Revised : 16. Aug. 2019.  
Accepted : 18. Sep. 2019

\* 광주대학교 국방기술학부 조교수

\*\* 광주대학교 컴퓨터공학과 조교수

연락처자 E-mail : ihlee@gwangju.ac.kr

연락처자 주소 : 광주시 남구 효덕로 277, 광주대학교  
컴퓨터 공학과

RTOK (retest okay) 등 여러 이름으로 불려왔다 (Williams et al, 1998, Beniaminy & Joseph, 2002). Smith & Schoroeder의 조사결과에 따르면, 항전 장비에 있어서 현장에서 발생하는 결함의 85% 이상이 재현불가결함이며, 이에 따른 비용이 총 정비비용의 90% 이상을 차지한다고 보고하고 있다 (Smith & Schoroeder, 1990). 고장물리(PoF, physics-of-failure)란 제품을 고장에 이르게 하는 기구 (mechanism)을 이해하고, 수명을 예측하여 제품의 품질을 높이기 위한 신뢰성 설계도구로 제품의 물리적, 화학적 혹은 기계적인 열화(degradation)가 주어진 환경에서 시간에 따라 얼마나 정량적으로 진행되는지 밝히는 것을 그 기본개념으로 하고 있다 (Pecht & Dasgupta, 1995). Pecht (1995, 2008)는 재현불가결함의 원인을 인적 요소(people), 기계적 요소(machines), 검사방법(method)에 관한 요소로 분류하고, 이 중 실제로 물리적인 결함이 잠재해 있는 경우를 간헐결함(intermittent failure)으로 정의하였다.

Pecht(1995, 2008)는 간헐결함을 유발할 수 있는 광범위한 여러 가지 고장물리 요인을 분석하였다. 인쇄회로기판(PCB, printed circuit board)의 경우, 온도변화에 의한 휨 현상, 습기 및 오염물질로 인한 화학적 반응에 의한 누설전류 등이 간헐결함을 일으키며, 커넥터와 같이 빈번하게 장착 및 탈착이 되는 부위에서는 마멸부식(fretting fatigue)으로 인한 간헐결함 현상이 발생한다고 보고하고 있다. 국내에서도 스마트폰, 자동차 전자부품 등에서의 간헐결함 현상이 보고되고 있다. 유연회로기판(flexible PCB)에서 발생한 간헐고장에 대한 연구가 수행된 바 있으며 (Han & Lee, 2015), 항전장비에서 발생한 결함 분석 사례(Lee, 2018) 및 노후전투기 전기배선계통 완전분해점검(Lee, 2018) 등 이에 대한 연구 관심이 증대하고 있다.

본 논문은 공군에서 운용 중인 항전장비 중 재현불가결함의 발생빈도가 높은 장비를 선정하고, 이 장비에서 발생 가능한 주요 간헐결함 유발요인을 선정한 후, 고장물리분석에 의해 그 발생현상을 재현하여, 이 유발요인에 의한 간헐결함 현상을 탐지할 수 있는 장비를 개발할 때 필요한 기본 요구도를 작성하는 것을 목표로 한다.

## II. 본 론

### 2.1 대상장비 선정

항전계통 간헐결함 탐지 대상장비를 선정하기 위하여 2008년에서 2012년간 공군에서 운용 중인 전투기에서 발생한 재현불가결함 현황을 조사하였다. 통합군수전산시스템 정비기록 중 결함 보고에 따른 점검 시 결함현상이 발생하지 않은 자료를 추출하였으며, 항공전자장비의 운영비중이 높은 전투기 3개 기종을 대상으로 분석하였다.

한국공군에서 운용 중인 세 기종 항공기에서 발생하는 재현불가결함 발생률은 각각 48.3%, 52.6%, 67.3%로 조사되었으며, 항공기 1대당 연간 재현불가결함 발생건수는 각각 25.1건, 14.4건, 49.8건으로 분석되었다(Fig. 1).

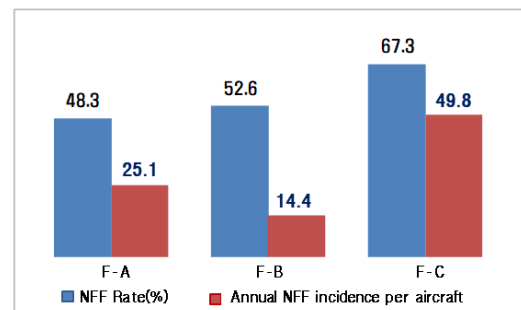


Fig. 1. Avionics NFF rate & annual NFF incidence per aircraft in RoK Air Force

Fig. 2에 세 기종의 계통별 재현불가결함 발생률을 파이차트로 표시하였다. 도표에 나타난 바와 같이, 계통별 재현불가결함 발생률은 화력통제계통(fire control system)에서 공통적으로 가장 높게 나타났으며, 그 뒤를 비행조종계통(flight control system)과 통신계통(communication system)이 따르고 있다. 이에 따라 재현불가결함의 발생 빈도가 높고, 해외수리에 장기간이 소요되어 가동률이 낮은 F-A 기종의 화력통제계통 항전장비 MLPRF(modular low-power radio frequency)를 선정하여 간헐결함 발생 및 검출 가능성을 분석하였다.

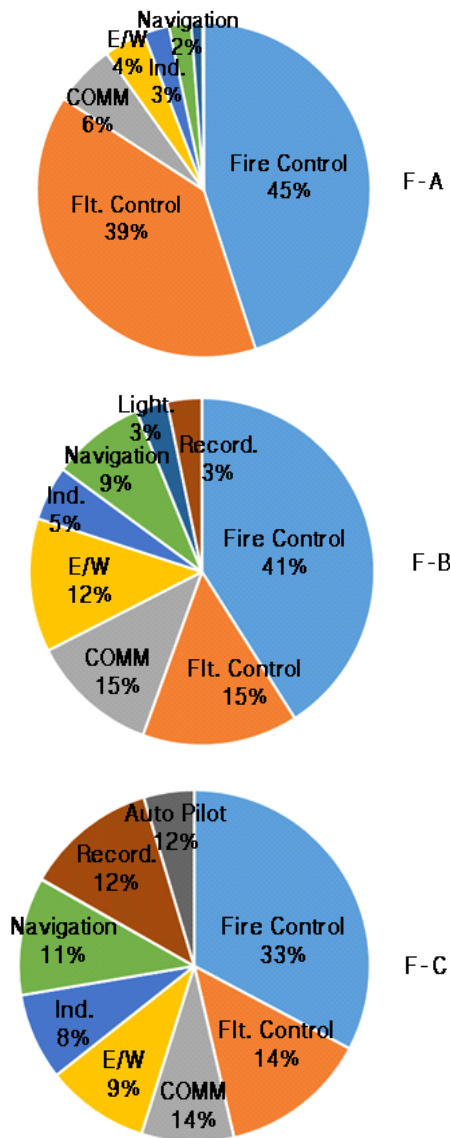


Fig. 2. NFF rate by system

## 2.2 대상장비 분석

간헐결함 발생 및 검출가능성을 분석하기 위해 선정된 MLPRF는 구형 백플레인(backplane) 형식의 장비로서 Fig. 3에 나타난 바와 같다. MLPRF 백플레인은 사각 박스 형태로 한쪽 면에 인쇄회로기판과 유연회로기판이 배치되어 있으며, SRU(shop replaceable unit)들과 다양한 형태의 커넥터로 연결된다.

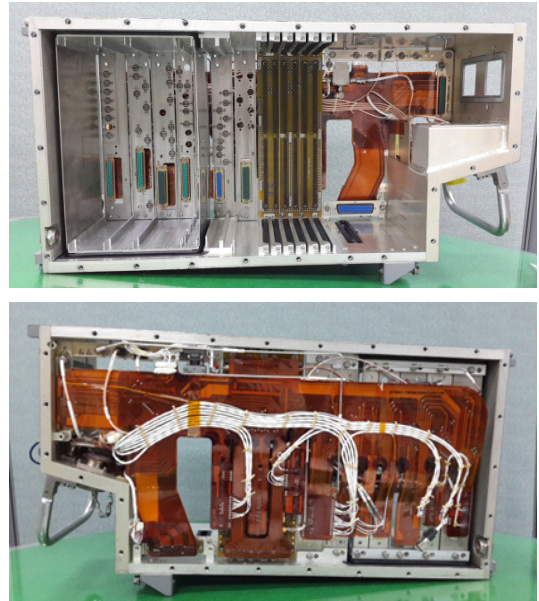


Fig. 3. Front view (upper) &amp; rear view (down) of MLPRF backplane

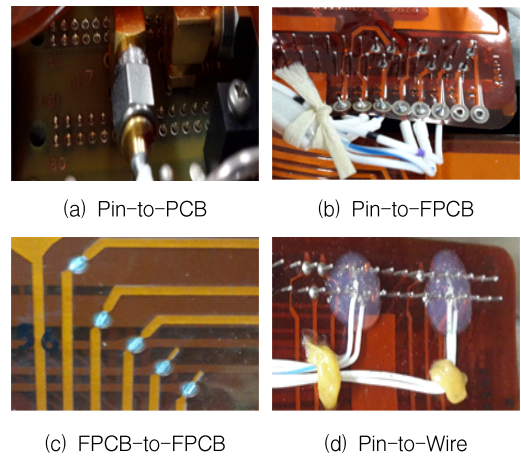


Fig. 4. Interconnection type of MLPRF backplane

총 12개의 슬롯형 SRU와 카드형 SRU가 장입되는 MLPRF 백플레인은 33개의 케이블 조립체와 1,304개의 접점(contact point)이 있으며, 부품 및 신호선 사이의 연결부위(interconnection) 형식은 Fig. 4와 같이 Pin-to-PCB, Pin-to-FPCB, FPCB-to-FPCB, Pin-to-Wire로 구분할 수 있다.

Pecht(1995, 2008)는 논문에서 전자제품에서

발생하는 간헐결함의 주원인으로 느슨해지거나 오염된 솔더조인트(solder joint) 혹은 커넥터 핀과 같은 연결부위가 전체 결함의 80% 정도를 차지한다고 보고하고 있다. MLPRF 백플레인에서 발생이 가능한 모든 간헐결함을 확인하는 것은 불가능하므로, 이 중 간헐결함의 주 원인이 되는 것으로 보고되는 점접간 연결부위의 간헐결함을 재현하고, 검출가능성을 확인하는 것을 본 연구의 목표로 하였다.

## 2.3 간헐결함 재현 및 측정시험 설계

### 2.3.1 시험용 백플레인

MLPRF 백플레인에서 발생하는 간헐결함 현상을 가속수명시험(accelerated life test)을 통해 재현하고, 간헐결함의 기구를 분석하기 위하여 고가(高價)의 운용 중인 백플레인을 대신하는 시험용 백플레인을 별도로 제작하였다. 위에서 언급한 네 가지 형식의 연결부위를 실제 개수 대비 9:1의 비율로 제작하여 시험용 백플레인에 적용하였다. 시험용 백플레인은 가속수명시험시 진동특성이 동일하게 발생하도록 무게와 치수를 동일하게 제작하였다(Fig. 5).

시험용 백플레인에 장착되는 유연기관들과 유연기관 연결부위를 모사하기 위하여 Fig. 6과 같이 2장의 FPCB를 쌓으로 하여 회로를 이루도록 설계하였다. 시험용 백플레인의 회로기관은 Fig. 7과 같이 설계되었으며, 회로기관 위에 Pin-to-PCB 간헐결함 재현을 위한 커넥터 실장부가 설계되었다. 모든 신호들은 PCB 우측(Fig. 5 기준)에 배치된 BNC (Bayonet-Neil-Concelman) 커넥터를 통해 실시간으로 모니터링하였다.

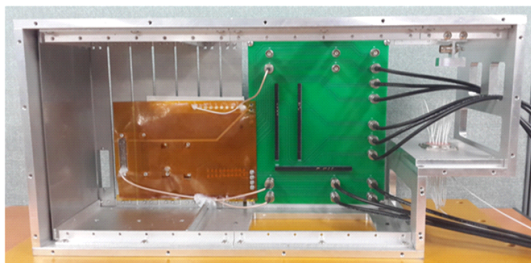


Fig. 5. Manufactured backplane for accelerated life tests



(a) 1st level FPCB



(b) 2nd level FPCB

Fig. 6. FPCB layout in test backplane

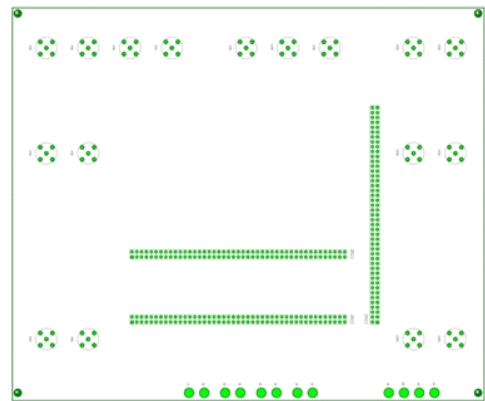


Fig. 7. PCB layout in test backplane

### 2.3.2 래칭 연속성 회로시험기

연속성 회로시험기(continuity circuit tester)는 전기회로 및 부품의 개방(open) 또는 단락(short) 상태를 검사하는 범용기기이나, 짧은 시간에 발생하는 간헐결함을 측정하지는 못한다. 따라서 본 연구에서는 간헐결함을 효과적으로 측정할 수 있는 래칭 연속성 회로시험기(latching continuity



circuit tester)를 설계하여 실험에 사용하였다. Fig. 8과 같이 설계된 래칭 연속성 회로시험기의 동작원리는 중앙에 배치된 2개의 NAND (negative AND) 게이트가 신호를 감지하여, 간헐결함 신호 발생시 신호를 래칭하는 역할을 한다. 본 회로에 사용된 IC 소자는 100ns의 반응시간을 가지고 있는 CD4093BE (Quad two- input NAND Shmitt Trigger [9])를 사용하였다. Fig. 9와 같은 1채널 래칭 연속성 회로시험기 12개를 제작하여 회로시험기를 12채널로 구성하였다.

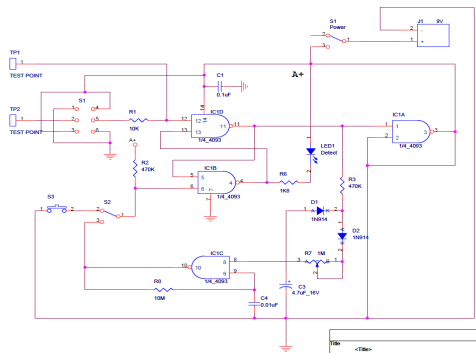


Fig. 8. Latching continuity circuit tester diagram

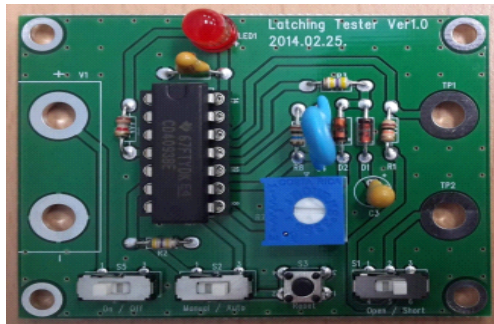


Fig. 9. Latching continuity circuit tester

### 2.3.3 가속수명시험

실제 현장에서 사용된 MLPRF는 20년 이상 장기 사용에 의해 다양한 요인들에 의한 열화가 진행되어 왔다. 시험용 백플레인 내부 접점들에 단 시간으로 열화를 가하기 위하여, 실제 사용환경과 동일한 스트레스 유발인자를 가혹한 세기로 인가하는 가속수명시험(Accelerated Life Test)을

수행하였다.

접점부의 열화를 유발하기 위해 선정된 가속시험의 스트레스 인자는 세 가지이다. 항전장비가 비행 및 정비 시 받는 진동환경에 의한 구조응력 (mechanical stress), 항전장비가 지속적인 온도변화로 팽창과 수축을 반복하여 생성되는 열응력 (thermal stress), 그리고 SRU의 지속적인 하중을 백플레인 장착부에 부가하는 크립(creep)현상을 모사하기 위하여 진동 가속시험, 온도사이클 가속시험, 크립 가속시험을 수행하였다.

## 2.4 가속수명시험 결과

### 2.4.1 진동 가속수명시험

진동가속시험에 사용된 장비는 QualMark사의 6축 랜덤 초가속시험기(highly accelerated life tester)를 사용하였다(Fig. 10). 시험은 일정시간동안 결함 신호가 발생하지 않을 시 진동 크기( $G_{rms}$ )를 단계적으로 상승시키며, 동작신호를 확인하였다. 결함 신호가 발생할 경우에는 다시 이전 단계로 진동 크기를 낮추어 신호가 사라지는지 여부를 확인하였다. 이 때, 이전단계로  $G_{rms}$ 를 낮췄을 때 결함신호가 사라진다면 간헐결함으로, 결함신호가 지속적으로 유지된다면 영구결함(permanent failure)으로 간주할 수 있다.

Fig. 11에 랜덤 가진의 가속도 평균값( $G_{rms}$ ) 변화 프로파일을 나타내었다. 시험 중 신호가 감지되면 가속도 시험하면 아래 검은색의 결함신호가 발생하게 된다.



Fig 10. Experimental setup for vibration ALT

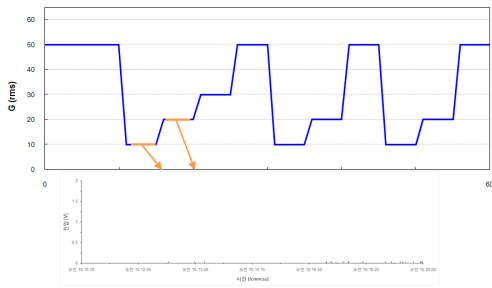
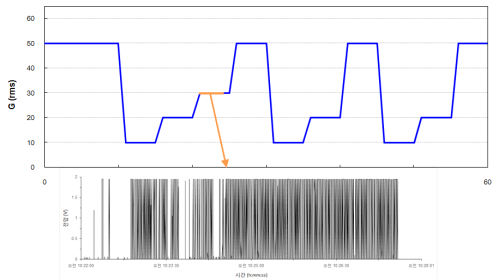
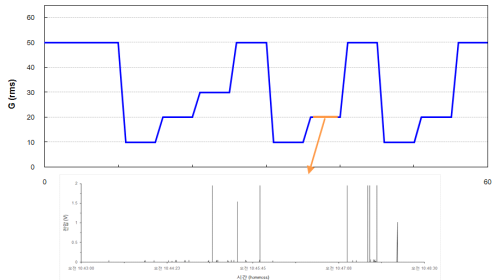


Fig. 11. Vibration ALT test profile



(a) 30 Grms



(b) 20 Grms

Fig. 12. Vibration ALT test results

시험 결과 초기에는 Fig. 11과 같이 결함신호가 발생하지 않지만, Fig. 12 (a)와 같이 간헐적인 결함신호가 발생하면, 결함신호가 발생하지 않았던 이전단계의 진동 수준으로 복귀하여도 결함신호가 간헐적으로 지속 발생하였다(Fig. 12 (b)).

## 2.4.2 온도사이클 가속수명시험

MLPRF 백플레인이 온도의 변화에 따라 수축과 팽창을 반복하는 과정에서 발생할 수 있는 결함을 온도사이클 가속수명시험을 통해 재현하였다(Fig. 13). 시험용 백플레인을 온도사이클 가속시험 챔버에서  $-50^{\circ}\text{C}$ 와  $125^{\circ}\text{C}$ 로 반복하여 변

화를 주면서 회로기판 및 유연회로기판 접점부의 신호연결 상태를 래칭 연속성 회로시험기로 실시간 확인을 하였다. 이 때, 온도사이클의 상승, 하강, 유지시간은 각 15분으로 하였다.

온도사이클 가속수명시험은 총 1,300사이클을 수행하였다. 시험 결과, 회로기판에 연결된 접점부에서는 결함이 발생하지 않았으나, 유연회로기판에 연결된 래칭 연속성 회로시험기에서 400사이클 경과된 시점에서 간헐결함이 발생하였고, 곧 영구결함 신호로 변화하였다.



Fig. 13. Experimental setup for thermal cycling ALT

## 2.4.3 크립 가속수명시험

정비를 위해 백플레인에 장착된 회로기판에서 SRU들을 분리하고, 재결합하는 과정에서 회로기판의 휨(bending) 현상이 발생하게 되며, 이러한 휨 현상은 회로기판에 실장된 커넥터와 커넥터 핀 등에 균열을 발생시키는 원인이 된다. 이러한 현상을 모사하기 위하여 커넥터 부분에 휨현상을 유도하고, 간헐결함의 발생 여부를 실시간으로 모니터링하며 확인하였다. 시험은 Fig. 14와 같이 회로기판의 중앙부에 6kgf의 하중을 부과하고,  $65^{\circ}\text{C}$ 에서 110시간,  $85^{\circ}\text{C}$ 에서 80시간,  $95^{\circ}\text{C}$ 에서 65시간 순차 진행하였다.

총 260시간의 3단계 온도상승 크립시험 결과, 회로기판과 커넥터 연결 접점부에서는 결함이 발생하지 않았다. 따라서 크립에 의한 간헐결함은 실제 운영조건에서는 발생 가능성이 낮은 것으로 판단된다.



Fig. 14. Experimental setup for creep test

## 2.5 간헐결함 발생 메커니즘 분석

가속수명시험 후, 회로기판 및 유연회로기판의 접점부 이상 여부를 육안, 현미경 및 X-Ray 장비를 이용하여 관찰하였다.

Fig. 15는 회로기판과 커넥터 핀의 솔더 부위에서 균열이 발생한 사진이다. 진동시험에 의해 균열이 발생하였으며, 균열된 솔더에서는 무부하 시에는 래칭 연속성 회로시험기에 정상적인 신호가 나타나지만, 충격이나 진동을 가하게 되면 간헐결함 현상이 나타나게 된다. Fig. 16에 균열된 솔더에서 발생하는 간헐결함 발생기구를 도시하였다. 그림에서 제시된 것과 같이 무부하시 핀이 솔더 부위에 접촉해 있다가 진동하중 하에서 전기적 접촉이 오픈상태로 변하는 것으로 해석된다.

온도사이클 가속수명시험 중 나타난 간헐결함 및 영구결함의 원인은 유연회로기판 내 Pin-to-FPCB 부분에서 발생한 균열에 의한 것으로 확인되었다. Fig. 17과 같이 솔더링된 Pin-to-FPCB 접점부의 Via와 Copper pad 연결부가 절단되었다. 절단에 이르게 한 결함 발생기구는 유연회로기판과 솔더 영역의 열팽창율의 차이에 의해 온도사이클 도중 균열이 발생하고, 반복되는 열수축 및 팽창에 의해 균열이 진전되어 최종 파단이 된 것으로 판단된다.



Fig. 15. Cracked solder joint after vibration test

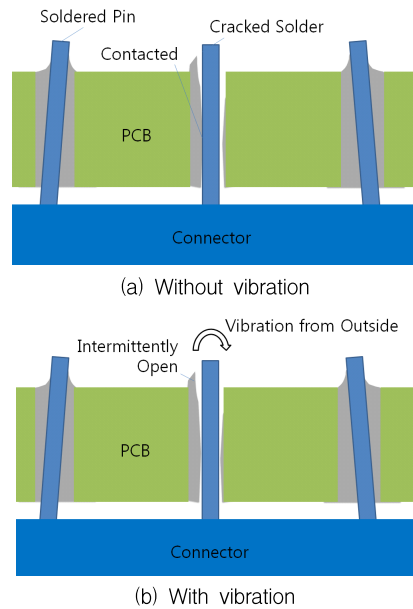


Fig. 16. Intermittent failure mechanism of cracked solder joint

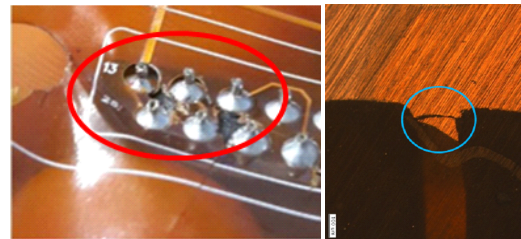


Fig. 17. Cracked FPCB copper wire

백플레인과 LRU (line replaceable unit)들을 연결하는 D-SUB 커넥터에서도 진동환경에서 간헐결함이 발생하였다. D-SUB 커넥터는 시험용 백플레인에 Fig. 18과 같이 한 쌍으로 결합되어 있다. 커넥터는 양 끝단의 나사로 체결되는데, 나사가 적절히 체결되지 않거나, 큰 진동이 발생하는 경우 나사가 풀리며 간헐결함이 발생하게 된다. 이 때 간헐결함은 앞에서 설명한 균열된 솔더의 경우와 같이 순간적으로 전기적 접촉이 상실되며 발생하게 된다.

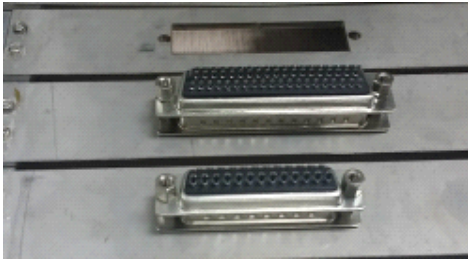


Fig. 18. D-SUB connector on MLPRF test backplane

## 2.6 간헐결함 탐지를 위한 요구사항 개발

MLPRF 백플레인 내부 부품과 신호선 접점부에서 발생하는 간헐결함을 탐지하기 위하여 탐지장비는 다음과 같은 요구사항을 만족해야 한다.

### 2.6.1 간헐결함의 재현을 위한 장비 구성 요구사항

비행 환경(진동 및 온도변화 사이클)에 의한 간헐결함 발생 재현을 위하여 진동시험기와, 환경챔버 장비로 구성된 복합하중조건 구현이 가능해야 하며, 이들 진동시험기와 환경챔버는 컴퓨터를 통해 제어가 가능해야 한다.

### 2.6.2 간헐결함 탐지를 위한 장비 구성 요구사항

짧은 시간 동안 회로에 발생하는 개방현상을 측정할 수 있도록 래칭 연속성 회로시험기를 구비하여야 한다. 백플레인과 래칭 연속성 회로시험기는 ITA (interface test adapter)를 통해 신호를 교환하고, 탐지성능의 저하 없이 지속적으로 간헐결함 발생여부를 측정할 수 있도록 각 접점부(1304 채널)와 병렬로 연결하여야 한다.

### 2.6.3 간헐결함 탐지장비의 측정성능 요구사항

본 연구에서 이용한 래칭 연속성 회로시험기와 동등 또는 이상의 속도(결함지속시간 100 ns)로 순간적으로 발생하는 간헐결함을 측정하고 기록할 수 있어야 한다. (최적의 결함탐지성능을

위한 결함탐지속도는 추후 연구를 통해 선정하여야 한다.)

Fig. 19는 간헐결함 탐지장비의 체계구성 개념을 나타낸다.

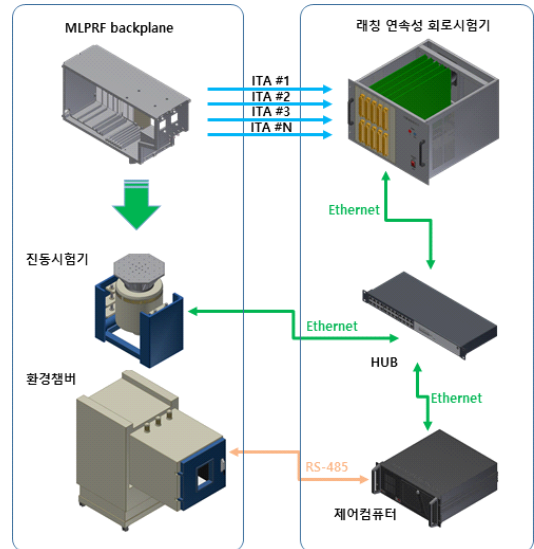


Fig. 19. Conceptual diagram of intermittent failure detection system

## III. 결 론

본 논문은 장기 사용된 항전장비 백플레인의 접점부에서 발생하는 간헐결함을 재현하고, 간헐결함 발생 메커니즘을 분석하여, 이를 탐지할 수 있는 장비를 개발하기 위한 탐지장비의 요구사항을 개발하였다. 공군에서 운용 중인 주요 전투기의 항전장비 재현불가결함 발생현황을 분석하여, 재현불가결함 발생률이 높은 구형장비의 백플레인을 선정하였다. 간헐결함의 검출가능성을 확인하기 위하여 래칭 연속성 회로시험기를 제작하고, 비행조건 및 정비조건을 고려하여 진동, 온도사이클 및 크립현상을 적용한 가속수명시험을 수행하였다. 가속수명시험 수행 후 X-ray 및 광학현미경을 이용하여 간헐결함을 발생시킨 메커니즘을 분석하였으며, 이들 프로세스를 통해 노후 항공전자 백플레인에서 발생하는 주요 간헐결함 탐지를 위한 장비의 요구사항을 개발하였다.



## 후 기

본 논문은 2019년도 광주대학교 교내 연구비 지원에 의하여 작성되었으며, 2019년 한국항공운항학회 춘계학술대회 발표논문을 수정 및 보완하였습니다.

Journal of the Korea Society for Aviation and Aeronautics, 26(4), 2018, pp.116-121.

- [9] Texas Instruments, "CMOS Quad 2-Input NAND Schmitt Triggers", CD4093B Types Datasheet, September, 2003.

## References

- [1] Qi, H., Ganesan, S., and Pecht, M., "No-fault-found and Intermittent failures in electronic products", *Microelectronics Reliability*, 45(5), 2008, pp.663-674.
- [2] Williams, R. et al., "An investigation of cannot duplicate failure", *Quality and Reliability Engineering International*, 14(5), 1998, pp.331-337.
- [3] Beniaminy, I., and Joseph, D., "Reducing the "No Fault Found" problem: Contributions from expert-system methods," *IEEE Aerospace Conference*, IEEE, Big Sky, MT, 2002, p.6.
- [4] Smith, G., and Schroeder, J., "Advanced maintenance diagnostics for air force flight control", *Ann. Reliability and Maintainability Symposium*, January, 1990, pp.394-399.
- [5] Pecht, M., and Dasgupta, A. "Physics-of-failure: An approach to reliable product development", *Journal of the IES*, 38(5), 1995, pp.30-34.
- [6] Han, C., and Lee, H., "Mechanism analysis and detection method design for intermittent failure in flexible printed circuit board assembly", *Proc. Spring Conference of the KSME*, Feb., 2015, p.14.
- [7] Lee, H., "A study on the improvement of the domestic maintenance capability development system of military for overseas maintenance items through the case study of intermittent failure of an avionics", *Journal of the Korea Society for Aviation and Aeronautics*, 26(2), 2018, pp.68-75.
- [8] Lee, H., "EWIS reliability analysis of aging fighter aircraft through teardown inspection",