

레이더용 고출력 증폭기 모듈의 HALT*

황순미† · 김철희 · 이관훈

전자부품연구원 신뢰성연구센터

HALT of High Power Amplifier Module Used in Radar

Soon-Mi Hwang · Chul-Hee Kim · Kwan-Hun Lee

Reliability Technology Research Center, Korea Electronic Technology Institute

Radar is an object-detection system that uses radio waves to determine the range, altitude, direction, or speed of objects. High power amplifier Module is the most critical part of the high-power radar transmitter systems. It can be used to detect aircraft, ships, spacecraft, guided missiles, motor vehicles, weather formations, and terrain. Research related to radar has been conducted in various fields according to improvement of the communication technology. But only performance-originated technology development has been dashed; study concerning environment duality and safety concerning reliability are still insufficient. In general, radar module is exposed to the outside, on the means of moving or fixed in a certain place. It should be guaranteed sufficient immunity for a variety of environmental stresses that can occur in the outdoor. HALT is a great process used for quickly finding failure mechanisms in a hardware design and product. By applying various kinds and extreme level of stresses, we can find the operating limits of products. In thesis, we conducted HALT test of the high power amplifier modules which used in military and automotive radar. After the test, we analyzed environmental weaknesses of high power amplifier modules using conventional construction data.

Keywords: HALT Test of Radar Amplifier Module, High Power Radar Amplifier Module, Reliability Test of Radar Amplifier Module, HALT Test

1. 서론

레이더(Radio Detecting And Ranging; Radar)란 파장 100 cm 이하의 초고주파를 물체에 발사시켜 그 물체에서 반사되는 전자기파를 수신하여 물체와의 거리, 방향, 고도 등을 알아내는 무선감시 장치이다. 이러한 레이더는 2차 세계대전을 계기로 발전하였고, 선박·항공 운항 보조기구나 차량용 안전 시스템 등의 민수용으로 사용되기도 하지만 주로 전차·유도 무기·군함 등 군용으로 사용되고 있다.

레이더의 송출기용으로 사용되고 있는 고출력 증폭기 모듈(High Power Amplifier Module)은 고출력 레이더 통신 시스템의 가장 핵심적인 부분으로, 유럽과 북미 기술선진업체를 따라 국내에서도 기술개발을 추진하고 있다. 레이더에 사용

되는 고출력 증폭기 모듈은 이동수단에 부착되어 사용되거나 일정한 장소에 고정되어 사용되는데 다양한 환경에서 충분한 성능을 발휘할 수 있도록 제품 신뢰성이 보장 되어야 한다(황순미, 2012). 뿐만 아니라 200W 이상의 높은 출력을 발생시킴에 따라 오랜 기간 사용 시 많은 열이 발생하며 열에 의해 제품 내구성이 떨어지는 등 신뢰성 문제가 심각하게 대두되고 있다.

본 논문에서는 군통신 레이더용으로 사용되는 국내 업체 개발 고출력 증폭기 모듈 및 자동차 안전 시스템 레이더에 사용되는 선진업체의 고출력 증폭기 모듈을 대상으로 초가속 수명시험(High Accelerated Life Test; HALT, 이하 HALT)을 실시하였고, 그 결과를 기존에 구축된 HALT 데이터와 비교하여 제품의 내환경적 취약점을 분석하였다.

* 본 연구는 산업통상자원부 과제인 “신뢰성기반기술확산사업-GaN Tr을 이용한 수출형 Radar Module의 신뢰성 향상(2010년 10월-2012년 09월)”으로 진행되었다.

† 교신저자 asfara@keti.re.kr

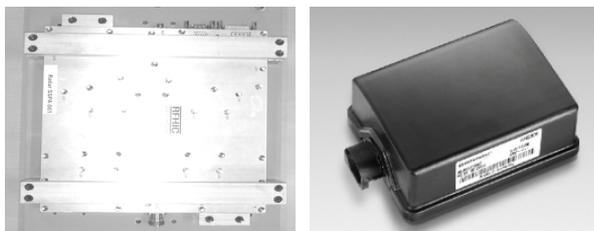
2014년 2월 8일 접수; 2014년 4월 13일 수정본 접수; 2014년 4월 30일 게재 확정.

2. 본 론

2.1 레이더용 고출력 증폭기 모듈

전파를 방사하여 물체에 관련된 각종 정보를 분석하는 레이더 시스템은 송신단에서의 높은 출력을 필요로 한다. 기존의 레이더 송신기는 마그네트론, TWTA 등의 진공관을 사용하여 큰 출력을 생성했지만 장비구동 예열시간이 필요하고 크기가 큰 단점이 있었다(구용서, 2013). 이러한 단점을 보완하여 최근에는 반도체 소자 기술을 사용한 전력증폭기를 레이더 송신기에 사용하고 있다. 레이더에 사용되는 전력증폭기는 높은 출력을 갖는 동시에 기존 진공소자에 비해 낮은 동작 전압, 소형화, 경량화 등의 장점을 가지고 있다(Barnes *et al.*, 1999). 특히, 반도체소자 중 GaN 기반의 고출력 전력증폭기의 개발이 활발히 이루어지고 있는데, GaN 물질은 AlGaIn/GaN 이종접합을 사용할 경우 2-Dimensional electron gas의 형성이 가능하여 SiC 계열의 물질에 비해 큰 활동성, 캐리어밀도, 포화속도를 얻기 용이하기 때문에 높은 최대전류, 전압, 동작 주파수를 가질 수 있다(Singhal, 2006; Ohki, 2009). 이런 GaN 소자를 이용하여 높은 출력과 높은 효율을 갖는 전력증폭기 구현이 가능하며(Mishra *et al.*, 2002), 고출력을 요구하는 레이더의 송출기용으로 사용되고 있다.

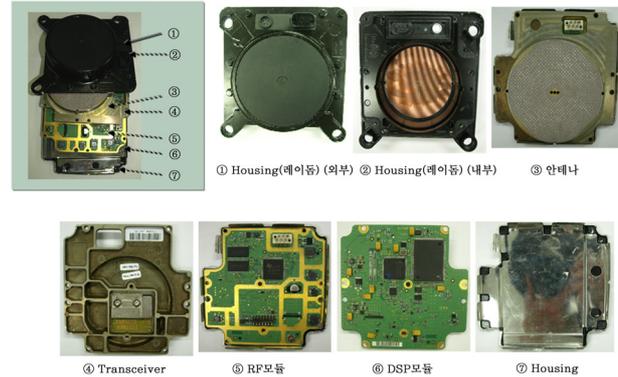
본 논문에서 시험품으로 사용한 군 레이더용 고출력 증폭기 모듈은 GaN 트랜지스터 증폭기를 사용한 제품으로 우수한 기술력을 보유하고 있는 국내 업체 개발 제품이다. 비교 시험 대상인 차량용 제품은 자동차 안전시스템 레이더에 사용되는 제품이며 근거리용 레이더와 장거리용 레이더를 통합하여 크기를 초소형화한 단일형 멀티모드 레이더 센서를 사용하여 넓은 방위각과 고출력이 동시에 가능한 독일 제품이다(Klotz, and Rohling, 2001; Nagasaki *et al.*, 2008; Tullsson, 2000). <그림 1>은 시험 샘플의 모습이다.



(a) 군용, (b) 차량용
 <그림 1> 레이더용 고출력 증폭기 모듈의 모습

레이더용 고출력 증폭기 모듈은 일반적으로 하우징(Housing), 안테나, 트랜시버(Transceiver), RF모듈, DSP 모듈로 구성되어 있으며 RF모듈 부분에 트랜지스터, IGBT, 전력 MOSFET, 다이오드를 포함하는 주요 고전력 반도체 소자, 전해커패시터, 리액터, 트랜스포머 등이 구성되어 있다. <그림 2>

는 레이더용 고출력 증폭기 모듈의 구성 모듈 모습, <표 1>은 주요 구성 부품이다.



<그림 2> 레이더용 고출력 증폭기 모듈의 구성 모듈

<표 1> 레이더용 고출력 증폭기 모듈의 주요 부품

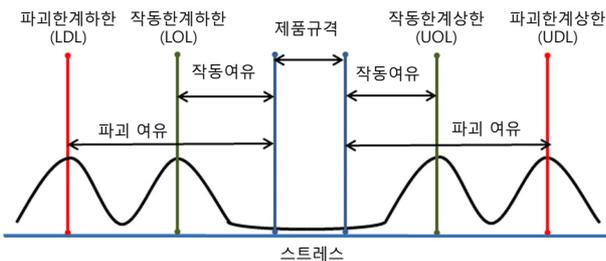
부분	구성부품	갯 수	실장 형태
RF모듈	MMIC	약 3개	SMD 타입
	칩트랜지스터	약 4개	
	칩캐패시터, 칩인덕터, 칩저항	약 70개	
	코일인덕터	약 6개	
	기타-알루미늄 전해캐패시터	약 1개	
DSP모듈	MMIC	약 8개	SMD 타입
	칩트랜지스터	약 10개	
	칩캐패시터, 칩인덕터, 칩저항	약 160개	
하우징 및 안테나 기타	알루미늄, 플라스틱	약 1개	

2.2 HALT 시험 방법 및 조건

HALT는 1988년 Gregg K. Hobbs에 의해서 발표된 제품 설계 완성도를 평가하기 위해서 시행되어지는 신뢰성 시험도구로서, 설계과정 중 발생 가능한 제품의 결함과 시제품 생산 단계에서 내재될 수 있는 모든 잠재결함(Latent Defects)을 검출하여, 고객의 제품 사용과정에서 발생 가능한 신뢰성 고장을 원천적으로 봉쇄하는 시험방법이다(Harry, 2010). RET (Reliability Enhancement Test), STRIFE(Stress Pulse Life Testing), ART(Accelerated Reliability Test) 등으로 불려 지기도 한다.

일반적으로 제품 고장은 제품의 강도가 점점 열화 되어 스트레스보다 작아지는 경우가 생기면 발생 한다. 그러므로 제품의 고장 데이터를 얻기 위해서는 제품이 열화 되어 고장 날 때까지 장시간을 시험하여야 하는데, 이 경우 시간 및 비용이 많이 소요된다. HALT에서는 제품 스펙보다 높은 스트레스 수준을 인가하여 제품의 시험시간을 단축시키며 동작한계 및 파괴 한계 정보를 얻고 도출된 문제점을 개선하여 마진(Margin)을 향상시킨다. HALT는 제품 수명주기 과정에서 발

생하는 환경 조건을 재현하는 시뮬레이션 시험이 아니라, 제품의 잠재결함을 촉진시키는 시험이며, 시험 데이터에 대한 통계적 처리를 하지 않고 촉진된 고장 현상에 대한 정보를 얻는 것이 주목적이다(윤양기, 2005). 이러한 HALT 기법은 다수의 부품으로 구성된 제품의 주요고장모드를 분석하는데 효과적으로 사용되며, 특히 제품 가격이 고가여서 샘플 확보에 한계가 있는 레이더용 고출력 증폭기 모듈과 같은 제품에 적용할 수 있는 효율적인 시험 방법이다. HALT의 스트레스 인자로는 온도(Thermal), 진동(Vibration), 온도충격(Thermal Cycling), 전압(Voltage), 습도(Humidity) 등이 사용되고 있다(Oliver, 2003; Confer *et al.*, 1991). 이러한 환경 스트레스 요인이 제품의 모든 사용 환경을 대변하는 것은 아니지만 적은 시험시료를 사용하여 짧은 시간 안에 제품의 결함부위를 검출할 수 있으며, 다수의 부품으로 구성된 제품의 주요고장모드를 분석하는데 효과적으로 사용된다. <그림 3>은 HALT에서의 제품규격과 동작한계 및 파괴한계를 보여준다.



<그림 3> HALT에서의 제품규격과 동작한계 및 파괴한계

일반적인 HALT는 온도시험(Thermal Step Test(Low, High)), 진동 시험(Vibration Step Test), 열충격시험(Thermal Shock Test), 복합진동 시험(Combination(Thermal Shock and Vibration) Cycle Test)의 순서로 진행되며 각 시험 조건별 시료수는 1개 이상으로 한다. <그림 4>는 일반적인 HALT 순서도이며 <표 2>는 HALT 시험항목 및 시험조건이다.

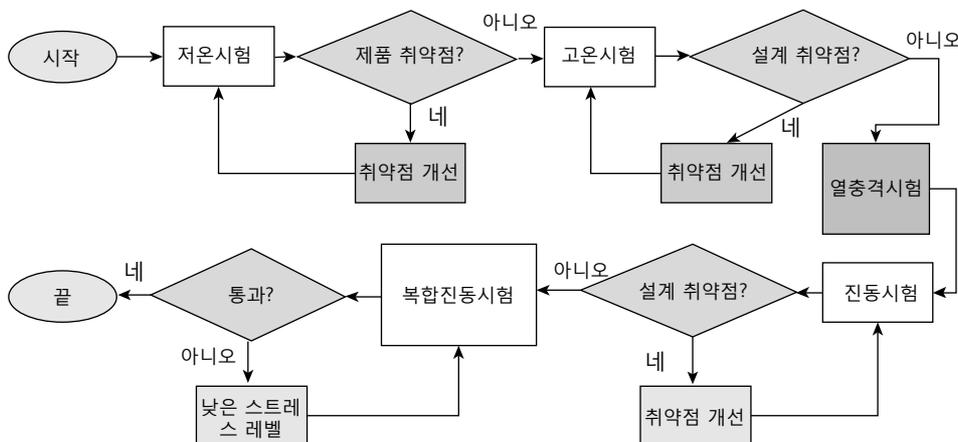
<표 2> HALT 시험항목 및 시험조건

시험항목	시험조건
저온 시험	(20±3)℃를 시작으로 (10±3)℃ 온도를 하강시키며 10분 동안 제품의 동작 확인
고온 시험	(20±3)℃를 시작으로 (10±3)℃ 온도를 상승시키며 10분 동안 제품의 동작 상태 확인
진동 시험	(20±3)℃ 조건 하에서 진동(gRMS) 값을 5 gRMS 씩 증가시켜 10분 동안 제품의 동작 확인
열충격 시험	저온, 고온 시험에서 얻어진 최대 동작한계를 근거로 시험 최대 온도와 최소 온도를 설정하여 각 온도에서 10분 동안 제품의 동작 상태 확인
복합진동 시험	온도시험과 진동 시험에서 얻어진 조건을 동시에 인가하여 시험 진행하며 제품의 동작 상태 확인

첫 번째, 온도시험(저온, 고온)에서는 시험세트가 구성된 상태의 상온에서 시험품의 정상 동작 유무를 확인하고 저온 및 고온 한계(동작, 파괴)까지 시험한다. 액화질소(LN2) 및 가열장치를 이용하여 ±10℃ 씩 온도를 하강 및 상승 시키고 각 온도별 10분간 유지하며 실시간으로 시험품의 정상 동작 유무를 확인 한다.

두 번째로, 열충격 시험은 온도급변(변화율 : 60℃/1 min) 하에서 제품의 취약부위 검출과 고장 발생 여부를 알아보기 위해 실시하는데, 설정 온도는 '온도시험'에서 설정된 동작 한계 마진과 수정된 한계 마진 범위 내 2차 온도를 이용하여 스트레스를 동작상한(UOL), 동작하한(LOL) 각각의 구간에서 10분간 유지하며 급격한 온도변화에서의 정상 동작 유무를 확인한다.

세 번째, 진동 시험에서는 6축(Linear : 3축(x, y, z), Rotation : 3축(x, y, z)) Random 진동(주파수 가진 범위 : (3~5000) Hz) 을 순차적으로 인가한다. 각 단계별로 10분간 유지하며 시험하며, 앞의 두 시험과 마찬가지로 진동 시험 역시 제품의 정격전원 인가 상태에서 정상 동작 유무를 확인 한다



<그림 4> HALT 순서도

마지막으로, 복합 진동 시험에서는 복합 스트레스 하에서 제품의 취약부위 검출과 고장 발생 여부를 알아보기 위해 ‘온도시험’과 ‘진동 시험’에서 설정된 동작 한계 마진 범위 내 온도, 진동을 이용하여 동시에 스트레스를 인가한다.

본 논문에서는 위와 같은 일반적인 HALT 절차에 따라 시험품을 스트레스별 한계 동작까지 시험하였다. 시험장비는 Typhoon-3.0(QualMark, 미국)을 사용하였으며, 고주파 출력 측정시스템(Spectrum analyzer, Agilent E4440A 외) 및 차량용 특정 측정 시스템(CANalyzer, Vector cooperation. V7.5)을 사용하여 각 제품의 신호 송수신 상태 및 출력 전력을 실시간으로 측정 하였다. <그림 5>는 HALT 모습이다.



<그림 5> HALT 모습

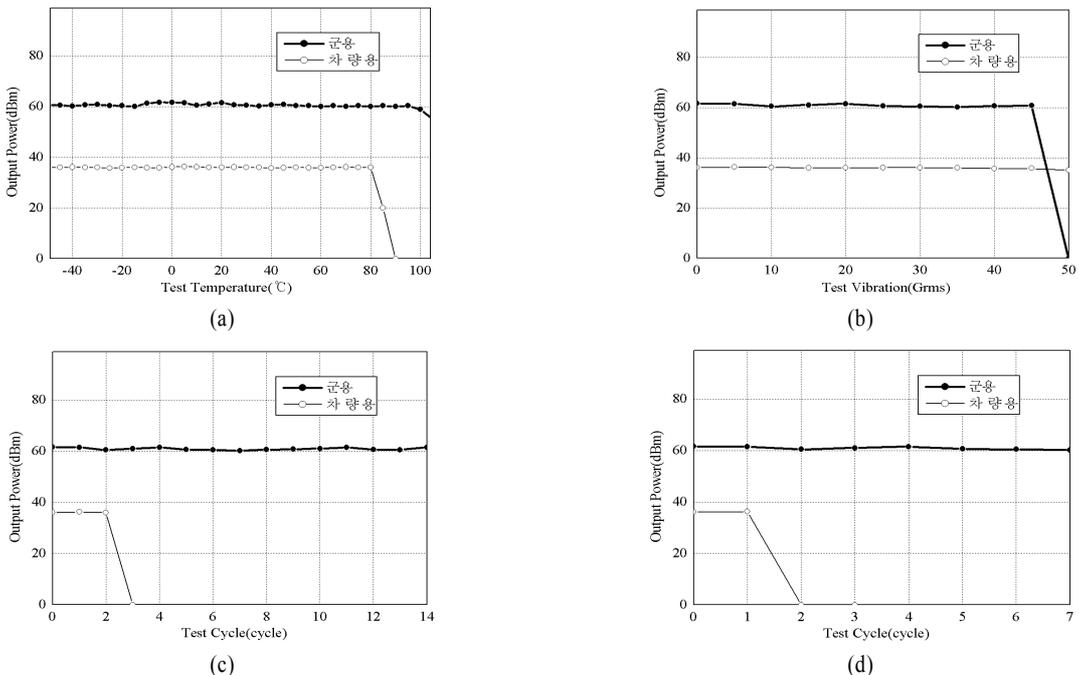
2.3 HALT 결과

<그림 6>은 시험 조건에 따른 레이더용 고출력 증폭기 모듈의 출력 전력변화이며, <표 3>은 레이더용 고출력 증폭기 모듈의 HALT 결과이다.

<표 3> 레이더용 고출력 증폭기 모듈의 HALT 결과

시험 항목	작동상한		작동하한		파괴상한		파괴하한		
	차량용	군용	차량용	군용	차량용	군용	차량용	군용	
온도	저온	N/A	N/A	-50℃	-50℃	N/A	N/A	N/A	N/A
	고온	80℃	100℃	N/A	N/A	90℃	N/A	N/A	N/A
진동	50 g	20 g	N/A	N/A	N/A	25g	N/A	N/A	
열충격	횟수(회)		온도(℃)		온도(℃)		전압(Vdc)		
	2	14	80/-50	100/-50	80/-50	100/-50	12	50	
복합 진동	횟수(회)		온도(℃)		온도(℃)		전압(Vdc)		
	1	7	80/-50	100/-50	50	20	12	50	

차량 레이더용 고출력 증폭기 모듈의 경우, 고온 시험에서 80℃ 조건까지 동작이상이 없었으나 90℃ 조건에서 고장이 발생하였다. 저온 시험과 진동 시험에서는 각각 -50℃, 50g 조건까지 동작이상이 없었다. 온도변화 (-50~80)℃ 조건의 열충격 시험에서는 2회까지 동작이상이 없었으며, 온도변화 (-50~80)℃ 및 50g의 진동조건의 복합진동 시험에서는 1회까지 고장이 없었다. 군 레이더용 고출력 증폭기 모듈의 경우, 고온 시험에서 100℃ 조건까지 동작이상이 없었고, 저온 시험에서는 -50℃ 조건까지 동작이상이 없었으나 진동 시험



(a) 온도시험(저온, 고온), (b) 진동 시험, (c) 열충격시험, (d) 복합진동 시험

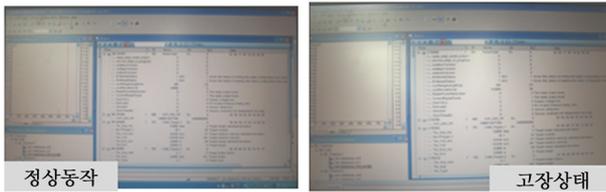
<그림 6> 시험 조건에 따른 레이더용 고출력 증폭기 모듈의 출력 변화

에서는 20 g 조건에서 고장이 발생하였다 온도변화 (-50~100)℃ 조건인 열충격 시험에서는 14회까지 동작이상 없이, 온도변화 (-50~100)℃ 및 20 g의 진동조건인 복합진동 시험에서는 7회까지 고장이 없었다.

HALT 후 고장이 발생한 차량 및 군 레이더용 고출력 증폭기 모듈 모두 ‘신호 송수신 불가와 소비전류증가’의 고장현상을 보였다. 고장샘플 분석결과, 외형상 이상은 없었고 레이더 모듈의 송수신을 담당하는 DSP chip이 일정조건 이상에서 동작이상을 나타내고 있었으며, 이 경우 정상조건 시 정상동작으로 회귀되는 현상을 보였다. <그림 7>은 레이더용 고출력 증폭기 모듈의 고장 모습이다.



(a)



(b)

(a) 동작모습, (b) 신호 모니터링 모습

<그림 7> 레이더용 고출력 증폭기 모듈의 고장 모습,

레이더용 고출력 증폭기 모듈의 HALT 결과를 QualMark사의 시험 데이터와 비교해 보면 <표 4>와 같다. QualMark사의 Mike Silverman은 1995년 5월 22일부터 1996년 3월 31일까지 진행된 서로 다른 33개 회사의 47개 제품에 대한 HALT 시험 결과를 <표 4>와 같이 분석하고 있다. HALT 시험에 사용된 시험품은 일반 사무용 전자제품(18개), 휴대용 전자제품(9개), 자동차용 제품(8개), 외부설치 전자제품(7개), 외부사용 전자제품(4개), 항공기용(1개)로 구성된다(Silverman, 1998). 사용 환경에 따라서, 차량 레이더용 고출력 증폭기 모듈은 ‘Vehicle’ 군과 시험결과를 비교하였고, 군 레이더용 고출력 증폭기 모듈은 ‘Field’ 군과 시험결과를 비교하였다.

QualMark사의 ‘Vehicle’ 군 HALT 데이터와 비교하여 차량 레이더용 고출력 증폭기 모듈은 고온, 저온, 진동 등 모든 항목에서 상대적으로 낮은 한계 마진을 가지고 있었으며, 특히 고온 부분에서 보다 취약하다는 것을 알 수 있었다. QualMark사의 ‘Field’ 군 HALT 데이터와 비교하여 군 레이더용 고출력 증폭기 모듈 역시 고온, 저온, 진동의 항목에서 상대적으로 낮은 한계 마진을 가지고 있었으며, 특히 진동 부분에서 보다 취약하다는 것을 알 수 있었다.

<표 4> 레이더용 고출력 증폭기 모듈의 HALT 결과와 QualMark사 HALT 데이터의 비교

적용 환경 (시료수)	온도(℃)				진동(g)	
	작동 한계 하한	파괴 한계 하한	작동 한계 상한	파괴 한계 상한	작동 한계 진동	파괴 한계 진동
Office(18)	-62	-80	92	118	46	52
Office with User(9)	-21	-50	67	76	32	36
Vehicle(8)	-69	-78	116	123	121	124
Field(7)	-66	-81	106	124	66	69
Field with User(4)	-49	-68	81	106	62	62
Airplane(1)	-60	-90	110	110	18	29
차량용(Vs ‘Vehicle’)	▽19	-	▽36	▽33	▽71	-
군용(Vs ‘Field’)	▽16	-	▽6	-	▽46	▽45

레이더용 고출력 증폭기 모듈의 HALT 결과를 전자부품연구원 시험 데이터와 비교해 보면 <표 5>와 같다. 전자부품연구원은 2003년부터 2010년까지 서로 다른 11개 회사의 103개 제품에 대한 HALT 결과를 <표 5>와 같이 분석하고 있다. HALT에 사용된 시험품은 일반 사무용 전자제품(86개), 자동차용 제품(3개), 외부설치 전자제품(13개), 외부사용 전자제품(1개)로 구성된다. 사용 환경에 따라서, 차량 레이더용 고출력 증폭기 모듈은 ‘Vehicle’ 군과 시험결과를 비교하였고, 군 레이더용 고출력 증폭기 모듈은 ‘Field’ 군과 시험결과를 비교하였다.

<표 5> 레이더용 고출력 증폭기 모듈의 HALT 결과와 KETI의 HALT 데이터의 비교

적용 환경 (시료수)	온도(℃)				진동(g)	
	작동 한계 하한	파괴 한계 하한	작동 한계 상한	파괴 한계 상한	작동 한계 진동	파괴 한계 진동
Office(86)	-38.4	-46.2	121.9	132.1	31.9	35.8
Vehicle(3)	-70	-80	130	160	40	50
Field(13)	-42.3	-56.2	123.8	153.8	31.9	35.8
Field with User(1)	-30	-60	70	140	20	30
차량용(Vs ‘Vehicle’)	▽20	-	▽50	▽70	△10	-
군용(Vs ‘Field’)	△7.3	-	▽23.8	-	▽11.9	▽10.8

KETI의 ‘Vehicle’ 군 HALT 데이터와 비교하여 차량 레이더용 고출력 증폭기 모듈은 고온, 저온, 진동 등 모든 항목에서 상대적으로 낮은 한계 마진을 가지고 있었으며, 특히 고온 부분에서 보다 취약하다는 것을 알 수 있었다. KETI의 ‘Field’ 군 HALT 데이터와 비교하여 군 레이더용 고출력 증폭기 모듈은 저온의 제외된 저온, 진동의 항목에서 상대적으로 낮은 한

계 마진을 가지고 있었으며, 특히 고온 부분에서 보다 취약하다는 것을 알 수 있었다.

3. 결 론

본 논문에서는 군 및 차량용 레이더 송출기로 사용되고 있는 레이더용 고출력 증폭기 모듈에 대한 HALT를 실시하고 그 결과를 기존에 구축된 데이터와 비교하였다. HALT는 일반적인 절차에 따라 온도시험(고온, 저온), 열충격시험, 진동 시험, 복합진동 시험을 제품 동작 한계까지 시험하였으며 실시간으로 각 제품의 신호 송수신 상태 및 출력 전력을 측정 하였다.

QualMark사의 'Vehicle'군 HALT 데이터와 비교하여 차량 레이더용 고출력 증폭기 모듈은 고온, 저온, 진동 등 모든 항목에서 상대적으로 낮은 한계 마진을 가지고 있었으며, 특히 고온 부분에서 보다 취약하다는 것을 알 수 있었다. QualMark사의 'Field'군 HALT 데이터와 비교하여 군 레이더용 고출력 증폭기 모듈 역시 고온, 저온, 진동의 항목에서 상대적으로 낮은 한계 마진을 가지고 있었으며, 특히 진동 부분에서 보다 취약하다는 것을 알 수 있었다. KETI의 'Vehicle'군 HALT 데이터와 비교하여 차량 레이더용 고출력 증폭기 모듈은 고온, 저온, 진동 등 모든 항목에서 상대적으로 낮은 한계 마진을 가지고 있었으며, 특히 고온 부분에서 보다 취약하다는 것을 알 수 있었다. KETI의 'Field'군 HALT 데이터와 비교하여 군 레이더용 고출력 증폭기 모듈은 저온의 제외한 저온, 진동의 항목에서 상대적으로 낮은 한계 마진을 가지고 있었으며, 특히 고온 부분에서 보다 취약하다는 것을 알 수 있었다.

고장이 발생한 레이더용 고출력 증폭기 모듈을 분석한 결과, 송수신을 담당하는 DSP chip이 일정조건 이상에서 동작 이상을 나타내고 있었으며, 정상 환경 조건 시 정상동작으로 회귀되는 현상을 보였다.

본 시험에 사용된 샘플은 각 용도별 1종류의 모델로써, 본 논문의 시험 결과가 전반적인 레이더용 고출력 증폭기 모듈의 HALT 마진을 의미하지는 않는다. 통계적인 완성도를 높이기 위해서는 보다 많은 제품에 대한 HALT 및 분석이 필요할 것으로 생각된다. 본 논문 결과를 현재 기술개발 중인 국내제품의 신뢰성설계 지표에 참고로 활용할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] 구용서 (2013), 순차바이어스를 이용한 반도체 레이더용 SSPA 설계, 한국정보통신학회논문지, 제17권, 제11호, pp. 2479-2485.
- [2] 윤양기 (2005), 초고속 수명 시험(HALT) 기술동향, 한국전기전자시험연구원 주간전자정보.
- [3] 황순미 (2012), GaN Tr을 이용한 수출형 Radar Module의 신뢰성 향상, 사업보고서, 전자부품연구원.
- [4] Barnes, A. R., Moore, M. T., Allenson, M. B., and Davis, R. G.(1999), A compact 6 to 18 GHz power amplifier module with 10 W output power, *International Microwave Symposium Digest*, Vol. 3, pp. 959-962.
- [5] Confer, R., Canner, J., Trostle, T., and Kurtz, S. (1991), Used of Highly Accelerated Life Test(HALT) to Determine Reliability of Multilayer Ceramic Capacitors, *Electronic Components and Technology Conference*, pp. 320-322.
- [6] Harry, M. L. (2010), From HALT Results to An Accurate Field MTBF Estimate, *Reliability and Maintainability Symposium*, pp. 1-5.
- [7] Klotz, M. and Rohling, H. (2001), A 24 GHz short range radar network for automotive applications, *Radar, CIE International Conference on Proceedings*, pp.115-119.
- [8] Mishra, U. K., Parikh, P., and Wu, Y. (2002), AlGaIn/GaN HEMTs-an overview of device operation applications, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 90, No. 6, pp. 1022-1031.
- [9] Nagasaku, T., Kogo, K., Shinoda, H., and Kondoh, H. (2008), 77GHz Low-Cost Single-Chip Radar Sensor for Automotive Ground Speed Detection, *Compound Semiconductor Integrated Circuits Symposium*, pp. 1-4.
- [10] Ohki, T. (2009), Reliability of GaN HEMTs: current status and future technology, *International Reliability Physics Symposium*, pp. 61-70.
- [11] Oliver, A. (2003), Highly Acceleration Electromigration Lifetime Test(HALT) of Copper, *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, Vol. 3, No. 4, pp. 213-217.
- [12] Silverman, M. (1998), Summary of HALT and HASS Results at an Accelerated Reliability Test Center, *Reliability and Maintainability Symposium*, pp. 30-36.
- [13] Singhal, S. (2006), GaN-ON-Si Failure Mechanisms and Reliability Improvements, *International Reliability Physics Symposium*, pp. 95-98.
- [14] Tullsson, B. E. (2000), Alternative applications for a 77GHz automotive radar, *Radar conference*, pp. 273-277.