

우주용 Hybrid DC-DC Converter 신뢰성 예측

김기태*·김달석*·박부희*·안정진**·김종만**·장중순*

아주대학교 산업공학과*·명지대학교 산업공학과**

Reliability Prediction of Hybrid DC-DC Converter for Spacecrafts

Kitae Kim*·Dalsuk Kim*·Boohee Park*·
Jungjin Ahn**·Jongman Kim**·Joongsoon Jang*

Dept. of Industrial Engineering, Ajou Univ.*·
Dept. of Industrial Engineering, Myongji Univ.**

Abstract

The reliability prediction analysis is a feedback tool that designer uses to provide insight into the component designs. This insight may indicate sensitive components within the design. This paper examines predicted failure rates for hybrid dc-dc converter for spacecraft using MIL-HDBK-217F prediction methodology. The results from part count/stress analysis represent priority components that affect the converter failures. The high priority components are analyzed to find out stress factor based on MIL-HDBK-217F. This information provides an opportunity for designer to improve the reliability of the product in development process.

Keywords : reliability prediction(신뢰성 예측), MIL-HDBK-217F, Electronic components for spacecraft(우주용 전기전자 부품)

*이 논문은 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (한국연구재단-2010-0028996)

논문접수일 : 2010년 03월 03일 논문수정일 : 2010년 03월 08일 게재확정일 : 2010년 03월 19일

1. 서론

우주용 시스템에 활용되는 전기/전자 부품의 경우 부품의 결함으로 인한 임무 실패에 따른 위험 비용이 크기 때문에 상용 부품에 비해 고 신뢰성이 요구된다. 이에 우주용 전기/전자 부품의 경우 개념 설계 단계에서부터 신뢰성 관리가 필요하다 유승우 외(2006). DC/DC Converter Reliability(2008)에서는 우주용 전기/전자 부품의 개발 시 요구되는 신뢰성 해석 기법의 종류와 중요도 순위를 아래의 <표 1>과 같이 제안한다.

<표 1> 우주용 하이브리드 DC-DC 컨버터의 신뢰성 해석 기법

우선순위	신뢰성 해석 기법
1	Part Stress Analysis
2	Worst Case Analysis
3	Single Event Effect(SEE)
4	FMECA
5	MTBF on based MIL-HDBK-217F
6	Thermal Analysis
7	Mechanical Stress

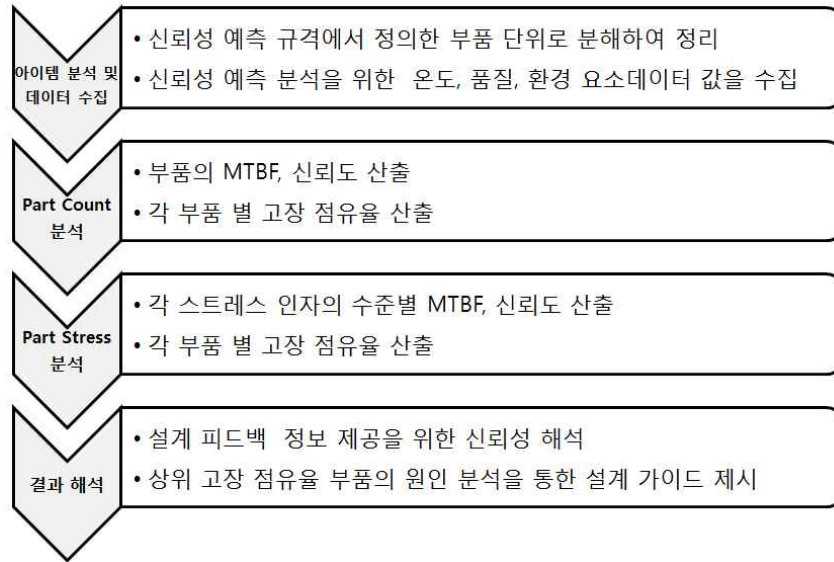
<표 1>의 신뢰성 해석 기법들 중, MIL-HDBK-217F를 활용한 신뢰성 예측 기법은 설계 단계에서 부품의 고장률(MTBF : Mean Time Between Failure)을 예측하여 신뢰성 요구사항(요구수명)을 만족하는지 검증하기 위한 신뢰성 기법이다 Foucher et al(2002). 또한 신뢰성 예측 기법은 아이템의 설계가 요구 수명을 만족하는지를 검증하는 방법으로 사용 될 뿐만 아니라 설계자에게 부품 설계에 대한 신뢰성 정보를 제공하는 피드백 도구로 사용된다. 즉 신뢰성 예측 분석을 통해서 아이템의 고장에 영향을 미치는 부품을 파악하고 부품 내부에 중복 구조를 추가 할 것인지 치명적인 부품을 교체 할 것인지를 판단 할 수 있게 된다. 또한 우주 시스템과 같은 고 신뢰성이 요구되는 경우, 미션 성공률을 높이기 위해서 여분의 부품 수를 결정하는 방법으로도 활용된다.

본 연구에서는 고 신뢰성이 요구되는 우주용 하이브리드 DC-DC 컨버터를 대상으로 MIL-HDBK-217F를 활용한 신뢰성 예측 분석 사례 연구를 실시한다. 2절에서는 우주용 전기/전자 부품의 신뢰성 예측 해석 절차에 대해 소개하고 3절에서는 설계 단계인 우주용 하이브리드 DC-DC 컨버터를 대상으로 신뢰성 예측 해석을 실시한다.

2. MIL-HDBK-217F 기반의 신뢰성 예측 해석 절차

2절에서는 우주용 전기/전자 부품의 신뢰성 예측 해석 절차에 대해 설명한다. 아래의 <그림 1>은

MIL-HDBK-217F를 활용한 우주용 전기/전자 부품의 신뢰성 예측 해석 절차를 나타낸 것이다. 각 단계 별 세부내용은 2.1~2.4절에 자세히 설명한다.



<그림 1> MIL-HDBK-217F 기반의 신뢰성 예측 절차

2.1 『아이템 분석 및 데이터 수집』 단계

『아이템 분석 및 데이터 수집』 단계에서는 신뢰성 예측 규격(MIL-HDBK-217F)에서 정의하는 요소 부품 단위로 대상 아이템을 분해하고 각 부품의 기능, 특성에 따라 분류한다. 분해한 부품들은 아이템 분석 표 양식<표 2>에 따라 정리한다. 아이템을 모두 분류하고 나면 해당 부품의 입력 요소들에 대한 정보를 수집하고 이를 아이템 분석 표에 정리한다.

인덱터 MIL-HDBK-217F 입력 요소

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_T \pi_Q \pi_E$$

- 기본 고장률 (Base Failure Rate): λ_b
- 온도 요소 (Temperature Factor): π_T
- 품질 요소 (Quality Factor): π_Q
- 환경요소 (Environment Factor): π_E

<표 2> 제안된 아이템 분석표 (사례 : 인덕터)

아이템 분해 및 분류					입력요소 데이터 수집 및 정리					
Part Information					Temperature Factor	Environment Factor	Quality Factor	Temperature Factor		Type
Ref Des	Description	Part Number	Manufacturer	Capacitor Style	Ambient Temperature	Environment	Quality Level	Temp Rise to Hot Spot	Hot Spot Temperature	Type
L1	Inductor	A00001	C사	Coil	30	SF SC-Space Flight	MIL-Spec	-	165	RF, Fixed or Molded
L2	Inductor	A00002	P사	Coil	30	SF SC-Space Flight	MIL-Spec	-	165	RF, Fixed or Molded
L3	Inductor	A00003	C사	Coil	30	SF SC-Space Flight	MIL-Spec	-	165	RF, Fixed or Molded
L4	Inductor	A00004	C사	Coil	30	SF SC-Space Flight	MIL-Spec	-	165	RF, Fixed or Molded
L5	Inductor	A00005	C사	Coil	30	SF SC-Space Flight	MIL-Spec	-	165	RF, Fixed or Molded
T1	Inductor	A00006	P사	Transformer	30	SF SC-Space Flight	MIL-Spec	-	165	Flyback
T2	Inductor	A00007	P사	Transformer	30	SF SC-Space Flight	MIL-Spec	-	165	RF, High Voltage

위의 <표 2>는 인덕터의 아이템 분석 사례이다. MIL-HDBK-217F에서는 인덕터의 고장률 예측을 위한 입력 요소를 4가지로 정의한다 MIL-HDBK-217F(1991). 즉 인덕터의 신뢰성 예측 해석을 위해서는 인덕터의 종류, 사용온도, 부품의 품질 수준, 사용 환경, 패키지 접합 부에서의 발열 온도 등의 입력 정보가 요구된다.

2.2 「Part Count 분석」 단계

Part Count 분석은 아이템을 구성하는 부품 정보가 부족한 초기 설계 단계에서 적용하는 개략적인 방법이다. 이 방법은 시스템을 구성하는 부품 종류와 수, 형태와 수량, 품질 수준, 그리고 아이템의 사용 환경에 대한 정보가 필요하다. 이러한 정보들로부터 부품 i 의 형태와 사용 환경에 따라 결정되는 기본 고장률 λ_G^i (고장수/106시간), 품질수준 Π_G^i 등의 요소 값들을 아래의 (식 1)에 대입하여 아이템의 고장률(λ_{tot})을 예측한다.

$$\lambda_{tot} = \sum_{i=1}^n N_i \lambda_G^i \Pi_G^i \quad (1)$$

$$\text{고장 점유율 (\%)} = \frac{N_i \lambda_G^i \Pi_G^i}{\lambda_{tot}} \times 100 \quad (2)$$

예측된 아이템의 고장률은 아이템을 구성하는 개별 부품의 고장률의 합으로 이루어지기 때문에 각 부품 별 고장 점유율(식 2)은 아이템의 고장에 영향을 미치는 정도를 파악하기 위한 지표가 된다.

2.3 「Part Stress 분석」 단계

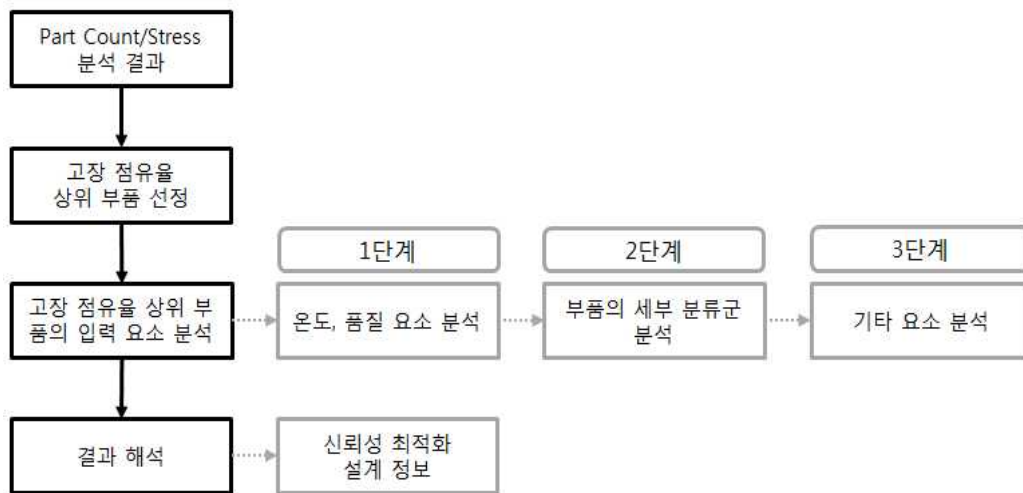
『아이템 분석 및 데이터 수집』 단계에서 아이템에 사용되는 모든 부품의 입력 정보들을 수집하여 정리하면 Part Stress 분석이 가능하다. Part Stress 분석은 각 개별 부품 별로 고장에 영향을 미치는 요소들(Π_T (온도), Π_C (용량), Π_V (전압), Π_{SR} (직렬저항 용량), Π_Q (품질), Π_E (환경))을 아래의 (식 3)과 같이 모형화하여 고장률을 예측한다. (식 3)은 커패시터의 Part Stress 모형이다.

$$\lambda_P = \lambda_b \Pi_T \Pi_C \Pi_V \Pi_{SR} \Pi_Q \Pi_E \quad (3)$$

Part Stress 분석에서는 아이템의 고장률을 변화시키는 여러 가지 입력 요소들을 다양한 수준의 값으로 구분하여 결과를 도출해야 한다. 특히 Part Stress에서는 각 부품 별 디레이팅(Derating) 수준을 고려한 예측 분석을 실시해야 한다. 디레이팅은 아이템의 신뢰도를 향상시키기 위하여 환경적, 동작 상의 제반 스트레스를 정격 치 이하가 되도록 보증하기 위한 방법이다. 따라서 디레이팅을 고려한 고장률 예측 분석은 설계자에게 중요한 정보로 활용된다. 예측된 각 부품 별 고장률은 Part Count 분석과 마찬가지로 고장 점유율을 산출하여 아이템의 고장에 영향을 미치는 정도를 파악한다.

2.4 『신뢰성 예측 결과 해석』 단계

『신뢰성 예측 결과 해석』 단계에서는 앞선 Part Count/Stress 분석 결과를 바탕으로 설계자에게 아이템 설계에 대한 피드백 정보를 제동할 수 있도록 분석 결과를 해석하는 단계이다. 『신뢰성 예측 결과 해석』 단계의 절차는 아래의 <그림 2>와 같다.



<그림 2> 신뢰성 예측 결과 해석 절차

고장 점유율의 높은 부품을 선정하여 설계 정보제공을 위한 분석을 실시한다. 선정된 부품은 온도 및 품질, 기본 고장률, 기타 요소의 순서로 고장 점유율에 영향을 미치는 요소를 다음과 같은 방법으로 분석한다.

1단계) 온도 및 품질 요소: 온도 요소는 요소 부품이 사용되는 주변 온도의 크기를 의미한다. 전자 부품의 경우, 대부분의 요소 부품들이 비슷한 온도 환경에서 작동하기 때문에 특별히 다른 온도 환경에 사용되는가를 확인한다. 품질 요소의 경우, 우주용 개발품이 아닌 상용 부품으로 개발 된 것 인지를 확인한다.

2단계) 부품의 세부 분류군: 각 요소 부품의 세부 부품 종류에 따라 부품의 기본 고장률이 결정된다. 예를 들어, 커패시터의 경우 전해질의 종류에 따라 기본 고장률 값이 달라지게 된다. 기본 고장률이 높다는 것은 고장 위험이 큰 부품을 의미하며 다른 세부 부품 군으로 대체가 가능 할 경우, 부품을 교체하는 것이 좋다.

3단계) 기타 요소 분석: 기타 요소는 각 부품 종류가 같은 고유한 요소 값이다. 커패시터의 경우 Π_C (용량), Π_V (전압), Π_{SR} (직렬저항 용량)의 요소가 있고 트랜스포머의 경우, Π_T (발열 부위 온도)요소가 존재한다. 이러한 요소들은 각 부품의 고유의 특성 값이므로 디레이팅 또는 방열 설계 등을 통해서 고장률을 낮출 수 있다.

예측된 아이템의 고장률은 아이템을 구성하는 개별 부품의 고장률의 합으로 이루어지기 때문에 각 부품별 고장 점유율(식 2)은 아이템의 고장에 영향을 미치는 정도를 파악하기 위한 지표가 된다.

3. 우주용 하이브리드 DC-DC 컨버터 신뢰성 예측 해석

3절에서는 우주 시스템 용으로 개발된 하이브리드 DC-DC 컨버터를 대상으로 제안된 절차에 따라 신뢰성 예측 해석을 실시한다.

3.1 우주용 하이브리드 DC-DC 컨버터의 부품 분석 및 데이터 수집

MIL-HDBK-217F에서 정의하는 요소 부품 단위로 하이브리드 DC-DC 컨버터를 분해하면 아래의 <표 3>과 같다. 또한 <표 3>에 분류된 각각의 요소 부품의 입력 데이터를 수집하여 정리하였다 <표 4>.

<표 3> 아이템 분해

대상 아이템	부품 종류	세부 부품 종류	수량
하이브리드 DC-DC 컨버터 (요구수명: 10년)	커패시터	탄탈 전해 커패시터	9
		알루미늄 전해 커패시터	2
		MLCC	19
	다이오드	Fast Rectifier 다이오드	3
		Shottky 다이오드	2
		Zener 다이오드	1
	FET	-	2
	인덕터	코일	5
		트랜스포머	2
	IC류	PWM	3
		Driver	1
		Op-Amp	1
	저항기	Thick Film 저항기	34
		Metal Strip 저항기	4
		Thermistor 저항기	1

<표 4> 커패시터 데이터 수집 사례

Part Information			Temperature	Environment	Quality	Voltage				Capacitance
ID	Descrip	Capacitor Style	Ambient	Environment	Quality Level	DC Voltage	AC RMS	Rated	Ratio	Capacitance
C1	CAPACITOR	Solid, Elec, Tant (CSR)	30	SF,SC-Space Flight	MIL-Spec	21	0	35	0.60	23000000
C2	CAPACITOR	Solid, Elec, Tant (CSR)	30	SF,SC-Space Flight	MIL-Spec	21	0	35	0.60	23000000
C3	CAPACITOR	General Ceramic (CK, CKR)	30	SF,SC-Space Flight	MIL-Spec	150	0	250	0.60	4700
C4	CAPACITOR	Solid, Elec, Tant (CSR)	30	SF,SC-Space Flight	MIL-Spec	6	0	10	0.60	470000000
C5	CAPACITOR	Solid, Elec, Tant (CSR)	30	SF,SC-Space Flight	MIL-Spec	6	0	10	0.60	470000000
C6	CAPACITOR	Super Metallized Plastic (CRH)	30	SF,SC-Space Flight	MIL-Spec	6	0	10	0.60	470000000
C7	CAPACITOR	Solid, Elec, Tant (CSR)	30	SF,SC-Space Flight	MIL-Spec	10	0	16	0.63	47000000
C8	CAPACITOR	General Ceramic (CK, CKR)	30	SF,SC-Space Flight	MIL-Spec	150	0	250	0.60	1000
C9	CAPACITOR	Chip, Ceramic (CDR)	30	SF,SC-Space Flight	MIL-Spec	30	0	50	0.60	1000000
C10	CAPACITOR	Chip, Ceramic (CDR)	30	SF,SC-Space Flight	MIL-Spec	30	0	50	0.60	470000

3.2 우주용 하이브리드 DC-DC 컨버터의 Part Count 분석

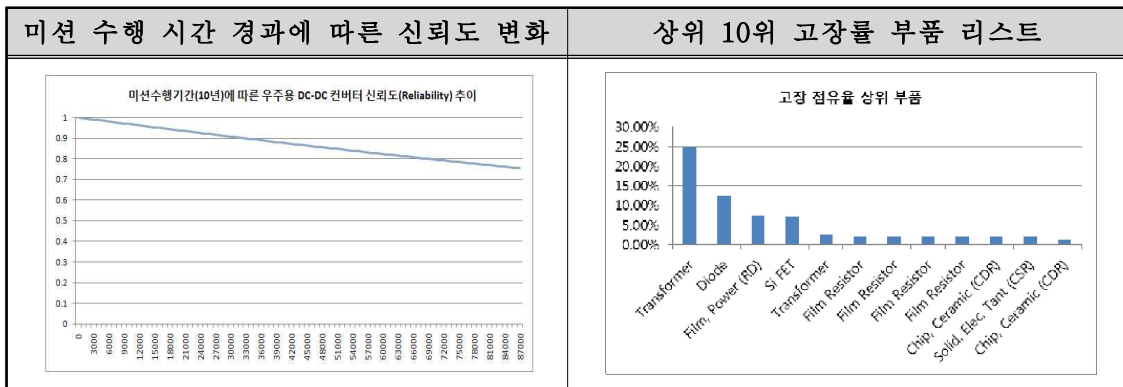
아래의 <표 5>은 Part Count 분석 결과 표이다. 우주용 하이브리드 DC-DC 컨버터의 고장률은 3.2409/106(시간). MTBF는 308,555(시간), 요구수명 10년에서의 신뢰도는 75%로 나타났다. 이는 요구 수명 10년(87,600시간)의 약 3배 수준이다.

<표 5> Part Count 분석 결과

구분	고장률	MTBF	신뢰도 (요구수명 10년)
결과 값	3.240907/106시간	308,555시간	75%

Part Count 분석 결과 각 부품 별 고장률을 산출하고 이를 바탕으로 우주용 하이브리드 DC-DC 컨버터의 신뢰도, 각 부품 별 고장 점유율, 고장 점유율 상위 부품을 산출한다. 분석 결과는 아래의 <표 6>, <표 7>과 같다.

<표 6> Part Stress 분석 결과



<표 7> 상위 고장 점유율 부품 리스트 - Part Count

구분	세부구분	수량	고장 점유율(%)	고장률(/106시간)
Inductor	Transformer	1	24.86	0.1396
Semiconductor	Diode	4	12.54	0.0704
Resistor	Film, Power(RD)	4	7.30	0.0410
Semiconductor	Si FET	2	7.50	0.0396
Inductor	Transformer	1	2.68	0.0150
Resistor	Film Resistor	3	1.96	0.0150

3.3 우주용 하이브리드 DC-DC 컨버터의 Part Stress 분석

Part Stress 분석에서는 디레이팅을 고려한 수명 예측 분석이 요구된다. ECSS-Q-ST-ST-30-11C(2008)에서 제시하는 각 부품 별 디레이팅 수준으로 수명을 예측 하였을 경우 하이브리드 DC-DC 컨버터의 고장률은 3.7237/106(시간). MTBF는 268,553(시간), 요구수명 10년에서의 신뢰도는 72%로 나타났다.

또한 Part Count 분석에서 고장 점유율이 가장 높게 나온 트랜스포머의 발열 부위 온도와 각 부품 별 전압, 전력 값의 디레이팅 수준을 여러 가지로 변경하여 분석을 실시하였다 <표 8>.

<표 8> Part Stress 분석 결과

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
MTBF(시간)		268553	327923	189842	56073	24981	269604	270807	264939	255170	88257
온도	온도	30℃	0℃	50℃	100℃	125℃	30℃	30℃	30℃	30℃	30℃
	인덕터 HotSpot	130℃	120℃	140℃	150℃	165℃	130℃	130℃	130℃	130℃	130℃
디레이팅	커패시터 (전압)	60%	60%	60%	60%	60%	40%	60%	60%	60%	80%
	다이오드 (전압)	75%	75%	75%	75%	75%	75%	50%	75%	75%	90%
	저항기 (전력)	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	30%	50%	70%
	FET (전력)	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	60%

<표 8>의 1번 시험 조건의 분석 결과를 바탕으로 각 부품 별 고장 율과 고장 점유율을 산출하면 아래의 <표 9>와 같다. Part Count분석 결과와 마찬가지로 트랜스포머가 컨버터의 고장에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 고장 점유율이 약 57%로 전체 고장 영향의 절반을 차지한다. 트랜스포머는 우주용 DC-DC 컨버터에 가장 치명적인 요소 부품으로 높은 고장 점유율의 원인 분석이 필요하다.

<표 9> 상위 고장 점유율 부품 리스트 - Part Stress

구분	세부구분	수량	고장 점유율(%)	고장율(/106시간)
Inductor	Transformer	1	56.79	0.1396
Semiconductor	Diode	4	6.86	0.0704
Inductor	Transformer	1	6.12	0.0410
Semiconductor	Si FET	2	4.14	0.0396
Resistor	Film, Power(RD)	4	2.16	0.0150
Capacitor	Chip, Ceramic	3	1.89	0.0150

3.4 우주용 하이브리드 DC-DC 컨버터의 신뢰성 해석

Part Count/Stress분석 결과 트랜스포가 우주용 하이브리드 DC-DC 컨버터의 치명적이 요소 부품으로 나타났다. 본 절에서는 트랜스포머의 고장 점유율에 영향을 미치는 입력 요소들을 분석하여 컨버터의 신뢰성 향상을 위한 설계정보를 도출한다.

트랜스포머의 고장점유율에 영향을 미치는 요소는 다음과 같다.

- 1) 온도/품질 요소
- 2) 트랜스포머 종류에 따른 기본 고장률
- 3) 발열 부위 온도

온도/품질 요소는 다른 부품과 동일한 조건이기 때문에 높은 고장률의 원인이라고 보기 어렵다. 따라서 고장률의 주요 원인은 트랜스포머의 종류에 따른 기본고장률과 발열부위의 온도이다.

트랜스포머 종류에 따른 기본 고장률

<표 10> 트랜스포머의 종류별 기본 고장률

트랜스포머의 종류	기본 고장률
Flyback (<20 Volts)	0.0054
Audio (15~20Hz)	0.0140
Low Power Pulse (<5W)	0.0220
High Power Pulse (>5W)	0.0490
RF High Power (10K~20MHz)	0.1300

<표 10>은 트랜스포머의 종류별 기본 고장률을 나타낸 표이다. 우주용 하이브리드 DC-DC 컨버터에 사용된 트랜스포머는 50kHz의 'RF High Power' 타입의 부품으로 다른 부품들에 비해 고장률이 매우 크다<표 11>. 따라서 RF High Power 타입에서 다른 타입(Flyback, Audio, Low/High Power)의 트랜스포머로 부품을 변경한다면 컨버터의 전체 고장률을 낮출 수 있다.

<표 11> RF High Power 트랜스포머와 요소 부품들 간의 기본 고장률 비교

구분	커패시터	저항기	다이오드	IC	트랜스포머
각 부품 별 기본 고장률	0.0044	0.0015	0.0031	0.0158	0.1300
기본 고장률 비교	30배	87배	42배	8배	-

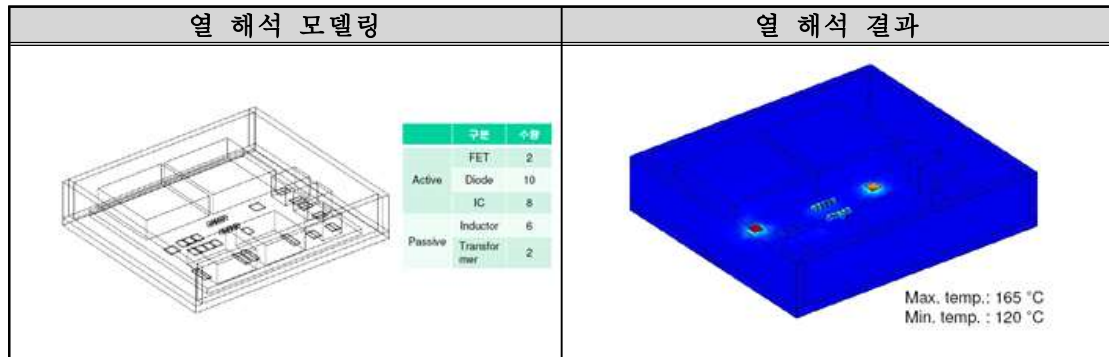
발열부위 온도

발열 부위 온도의 크기 역시 트랜스포머의 높은 고장률의 원인이다. MIL-HDBK-217F에서는 우주용 전기/전자 부품에 사용되는 트랜스포머의 경우에 열 해석 시뮬레이션을 통한 발열 온도 예측을 권고한다. 열 해석 시뮬레이션 결과를 통한 우주용 하이브리드 DC-DC 컨버터의 패키징 내부의 발열 부위 온도(THS)는 120°C~165°C이다. 아래의 <표 13>은 열 해석 시뮬레이션 결과를 나타낸 표이다[1].

<표 12> 트랜스포머의 발열 부위에 따른 온도 요소 값

THS	ITT
120	2.8
140	3.3
160	3.8
180	4.3

<표 13> 트랜스포머의 발열부위 시뮬레이션 결과



발열 내부의 온도 값이 작을수록 온도 요소에 의한 고장 영향이 줄어든다. <표 12> 따라서 트랜스포머의 고장률을 낮추기 위해서는 발열 온도를 최소로 할 수 있는 방열 설계가 요구된다.

참고문헌

[1] 김남수, 최성준, 한창운 (2010), 우주용 하이브리드 DC-DC 컨버터의 열 설계, 한국신뢰성학회 추계학술대회, pp.301-312.
 [2] 유승우, 이백중, 진영권 (2006), 우주 시스템의 신뢰성 예측에 관한 연구, 항공우주기술, 5권 2호, pp.227-239.

- [3] B. Foucher, J. Boullie, B. Meslet, D. Das (2002), A Review of Reliability Prediction Methods for Electronic Devise, Microelectronics Reliability, Vol. 42, No. 8, pp1155-1162.
- [4] ECSS-Q-ST-30-11C (2008), Space Product Assurance - Derating EEE Parts.
- [5] DC/DC Converter Reliability (2008), NASA Guidelines for Selection and Application of DC/DC Converters.
- [6] MIL-HDBK-217F (1991), Reliability Prediction of Electronic Equipment.