

## 우주 환경에서의 Worst Case Analysis에 대한 소개와 응용에

이윤기\*, 권기호\*\*, 김대영\*\*\*, 이상곤\*\*\*\*

### Introduction and Application of Worst Case Analysis in Space Environment

Yun-Ki Lee\*, Ki-Ho Kwon\*\*, Day-Young Kim\*\*\*, Sang-Kon Lee\*\*\*\*

#### Abstract

In the space environment, many other things to design electronic circuits should be considered with respect to commercial circuit design. The first thing is that electronics in space are likely to be exposed to radiation effects and the second thing is that it is impossible to repair or replace electronic parts after once spacecraft was launched. In this severe situation, very strict and tight worst case analysis conditions should be applied to the electronics in space environment to do its own function well without any problems during the overall mission period. So this paper summarizes worst case input conditions and methods which are specified in the ESA Worst Case Analysis Specification (ECSS-Q-30-01A) and proposes the results of Worst Case Analysis for one simple electronic circuit which is implemented at a real On-Board Computer in the Low Earth Orbit Satellite.

#### 초 록

우주 환경에서 동작하는 위성의 전자회로를 설계할 때는 지상에서 동작하는 상용 회로 설계와는 다른 고려 요소들이 존재한다. 그 이유는 첫째, 위성은 우주 방사능 등에 직접적으로 노출된 우주 환경에서 동작하기 때문이고, 둘째, 한번 궤도로 올라간 위성에 대해서 수리나 노화에 따른 교체가 불가능하기 때문이다. 이러한 상황에서 주어진 임무 기간 동안 아무런 문제없이 임무를 잘 수행하는 전자회로를 설계하기 위해서는 지상에서 동작하는 회로의 Worst Case Analysis보다 훨씬 엄격한 조건의 WCA를 적용해야 한다. 본 논문에서는 ESA에서 제시하는 WCA에 관한 규격서인 ECSS-Q-30-01A에서 WCA를 위해 고려해야 할 입력요소들과 WCA적용 방법을 정리하고, 실제로 저궤도 On-Board Computer에 구현된 간단한 회로를 가지고 WCA적용 사례를 제시하고자 한다.

키워드 : 최악 조건 해석 (worst case analysis), 우주 환경 (space environment)

접수일(2007년12월14일), 수정일(1차 : 2008년 10월 23일, 2차 : 2008년 10월 27일, 게재 확정일 : 2008년 11월 1일)

\* 위성전자팀/yklee@kari.re.kr

\*\* 위성전자팀/khkwon@kari.re.kr

\*\*\* 위성전자팀/dykim@kari.re.kr

\*\*\*\* 위성전자팀/skon@kari.re.kr

## 1. 서 론

우주 환경에서 동작하는 전기/전자 회로는 일반적으로 지상에서 상용으로 사용하는 회로보다 극한 조건에서 견딜 수 있도록 하기 위해서 온도 및 Radiation효과에 강인한 Grade가 훨씬 높은 파트를 사용한다. 하지만 이러한 우주 환경용 파트를 선택하는 것 못지않게 중요한 것은 전기/전자 회로를 구성하는 수동 및 능동 파트들이 최악의 조건으로 변하는 상황에서도 관심 가지는 요소들(주로 전압, 전류, 전력, 타이밍 등)이 원하는 기능을 출력할 수 있는가를 해석적으로 따지는 Worst Case Analysis (이하 WCA로 명칭)를 수행하는 것이다. WCA에서 관심있게 보아야 할 요소는 일반적으로 다른 해석들, 이를테면, 회로 레벨의 FMECA (Failure mode Effects and Criticality Analysis) 혹은 Hazard Analysis, Radiation Analysis, Fault Tree Analysis등에 의해서 정해지며, 상용 WCA와는 달리 더 극심한 온도조건을 포함하여 Radiation 효과 조건에 의한 파트의 변화를 고려해야 한다. 따라서 본 논문에서는 ESA규격서인 ECSS-Q -30-01A에 나오는 내용 중 WCA에서 고려해야할 입력요소들과 WCA적용 방법을 정리한다. 또한 실제로 저궤도 On-Board Computer에 구현된 간단한 회로를 가지고 ESA에서 제시하는 WCA적용 방법을 그대로 적용한 결과를 예제로서 제시하여 실무에 WCA를 어떻게 회로 설계에 적용하였는지 보여 준다.

## 2. 본 론

### 2.1 ESA규격의 WCA 내용 정리

#### 2.1.1 WCA 적용 절차

WCA의 적용 절차는 먼저 회로에 사용된 다른 분석 결과들과 요구하는 규격을 입력요소로 하여서 관심있게 보아야 할 관심 요소들이 무엇인지를 먼저 선정한다. 그 후 회로를 여러 작은 하위 회로들로 분리하고, 회로해석을 통해서 회

로 방정식을 세운다. 그 후 우주 환경에서 고려해야 할 요소들(2.1.2절)을 사용하여, WCA에서 사용되는 분석 방법 4가지(2.1.3~2.1.6절)를 사용해서 WCA를 수행한다. 관심 요소들에 대해서 분석 결과가 요구하는 규격에 적합한지를 판별하고, 만약 적합하지 않다면 회로를 재설계하거나, 분석을 최적화한다. 이상의 설명을 순서도로 간단히 나타내면 다음 그림 1과 같다.

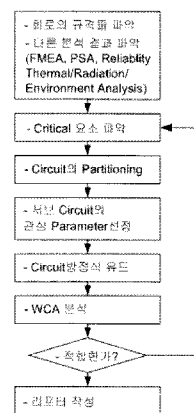


그림 1. WCA적용 절차

#### 2.1.2 WCA에서 고려되어야 할 요소들

우주 환경임을 감안하여 WCA에서 회로 특성(전류, 전압, 전력, 타이밍)들의 변화에 영향을 줄 수 있는 고려 요소들과 그 특징들은 아래의 표 1과 같다.

표 1. 회로 특성 변화 요소와 특징

고려 요소	관련 소자	변화 형태	원인 요소	참조 문서	대비 방법
초기 변화	수동 / 능동	불규칙적	소자 특성	부품 스펙	Align-ment
노화	수동 / 능동	다소 / 규칙적	온도 / 시간	WCA데이터 / WCA관련 규격	-
온도	수동 / 능동	다소 / 규칙적	온도	부품 스펙	온도 보상 회로
방사능	능동	규칙적	입사 총량	부품 스펙 / 방사능 시험 결과	-
EMC / 전기 신호 변화	수동 / 능동	다소 / 규칙적	설계 형태	EMC 시험 결과 / 전기 신호 규격	-

### 2.1.3 극한 값 분석 기법 (EVA)

극한값 분석 기법(이하 EVA)은 회로 내에 있는 각 소자들이 2.1.2절에서 언급한 5가지 요인들에 의해서 값이 최악의 경우로 변화할 때, 회로의 관심 요소에 미치는 영향들을 고려하는 것으로, 관심 요소가 최대/최소로 변화할 수 있는 최소/최대값을 수작업으로 구하는 것이다. 그 풀이 방법은 아래와 같다.

① 회로 내에서 관심 요소(V, I, P, Etc.)를 회로 해석 기법 등을 이용해서 Closed Form 형태의 방정식으로 표현한다.

$$Ex) V = f(R, C, L) \quad (1)$$

② 방정식의 소자를 변수로 하여 편미분 한다.

$$\frac{\partial V}{\partial V} dV = \frac{\partial f}{\partial R} dR + \frac{\partial f}{\partial C} dC + \frac{\partial f}{\partial L} dL \quad (2)$$

여기서 구한 편미분 수식에서 양변 자연로그를 취할 수도 있다.

③ 위에서 구한 편미분 수식을 다음의 형태로 바꾸어서 각 소자에 의한 관심 요소에 미치는 민감도 영향을 알아 볼 수 있는 수식으로 바꾼다.

$$dV = S_R * \frac{dR}{R} + S_C * \frac{dC}{C} + S_L * \frac{dL}{L} \quad (3)$$

④ 각 소자별로 초기 변화, 노화, 온도(3가지만 고려)에 의한 변화량을 앞에서 구한 해당 소자의 민감도와 곱한 것을 모든 소자에 대해서 합하면 최종적으로 관심 요소에 미치는 최악의 변화 정도를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta V = & S_R * (\Delta R_{Init} + \Delta R_{Aging} + \Delta R_{Temp}) \\ & + S_C * (\Delta C_{Init} + \Delta C_{Aging} + \Delta C_{Temp}) \quad (4) \\ & + S_L * (\Delta L_{Init} + \Delta L_{Aging} + \Delta L_{Temp}) \end{aligned}$$

이때, 소자의 초기 변화, 노화, 온도 등에 의한 소자들의 변화량은 소자들의 스펙에 주어진 정보를 사용하면 된다.

### 2.1.4 Quadratic 분석 기법 (RSS)

일반적으로 EVA기법은 소자들이 모두 최악의 방향으로 변화했다고 보았을 때, 관심 요소가 어떻게 최악으로 변화하는지를 보는 것으로서 이런 경우가 실제로 일어날 확률은 매우 낮다. 따라서 WCA의 또 다른 계산 방법으로 소자의 변화를 Random Variable로 보고, 실제 확률 분포는 정규 분포를 따른다고 가정한 상태에서 분석하는 기법이 있는데 이를 Quadratic 분석 기법 (이하 RSS)라고 한다. 실제로 소자를 판매하는 Vendor의 스펙에 나오는 소자의 변화량은 소자의 Nominal값에서 3배의 표준편차에 해당하는 변화까지를 나타내는 것으로서 EVA보다 더 현실적인 방법이라고 볼 수 있다.

RSS는 민감도를 구하는 것과 소자의 스펙에 나오는 소자 변화량을 이용하는 것은 EVA와 같지만, 그 이후에 관심 요소의 변화를 구할 때 단순 합이 아니라, Square Root를 한다는 것이 다르다. 아래 수식은 소자가 R1, R2만 있다고 볼 때, 관심 요소를 구하는 방법이다.

$$\begin{aligned} \Delta V = & \text{Root} \{ (S_{R1} * \Delta R_{Init})^2 + (S_{R2} * \Delta R_{Init})^2 \\ & + (S_{R1} * \Delta R_{Aging})^2 + (S_{R2} * \Delta R_{Aging})^2 \quad (5) \\ & + (S_{R1} * \Delta R_{Temp})^2 + (S_{R2} * \Delta R_{Temp})^2 \} \end{aligned}$$

### 2.1.5 Monte Carlo 계산 방법

Monte Carlo 계산 방법은 RSS와는 달리 소자 Random 변수의 분포가 정규분포가 아닐 때 구할 수 있는 방법으로 Monte Carlo 알고리즘에 따라 정해진 수의 샘플을 만들어서 분석하는 것이다. EVA나 RSS와는 달리 회로 시뮬레이션 소프트웨어에서 제공하는 Monte Carlo 툴을 사용

하는 것이 일반적인 방법이다. 이 때, 시뮬레이션 소프트웨어의 분석 결과는 평균과 표준 편차로서 보여지는데, 구하고자 하는 관심요소의 변화는 3\*표준편차 값으로 해석을 하면 된다.

### 2.1.6 직관적 방법에 의한 분석

ESA 스펙에서 제시되지 않는 않지만, 기존 저궤도 위성에서 가장 많이 사용되었던 방법으로 굳이 EVA, RSS에서와 같이 민감도를 구하지 않고, 소자의 최소값과 최대값을 적절히 대입하여 구하는 방법이다. 하지만 이 방법은 잘못 구하면, 크게 실수를 할 수 있는 방법으로 EVA, RSS 혹은 Monte Carlo로 검증한 상태에서 회로 소자 값만 바뀌었을 때, 사용할 수 있는 방법이다. 실제로 RSS를 제외하고 EVA, Monte Carlo 그리고 직관 방법은 거의 비슷한 양상의 결과가 나와야 정상인데, 만약 직관을 잘못 적용하면 다른 분석 기법과 서로 다른 양상의 결과가 나올 수 있다.

$$\begin{aligned}
 Ex) \quad V_{min} &= f(R_{min}, C_{min}, L_{min}) \\
 V_{max} &= f(R_{max}, C_{max}, L_{max})
 \end{aligned}
 \quad (6)$$

## 2.2 Thermistor Current Stimulus Circuit에 대한 4가지 방법의 Worst Case Analysis

### 2.2.1 해석할 회로 소개 및 해석 목적

저궤도 위성의 On-Board Computer에 장착된 Thermistor 구동을 위한 Current Stimulus Circuit은 기존 위성의 사용하고 있는 회로로서 최종 외부에 있는 Thermistor까지 전류가 공급되는 상황은 아래 그림 2와 같다.

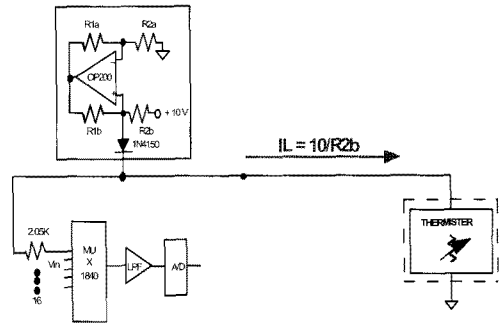


그림 2. Thermistor Current Stimulus 회로 Scheme

이 Current Stimulus 회로는 일반적으로 Negative Impedance Converter라는 회로로서 Load에 상관없이 일정한 전류  $10V/R2b$ 를 공급한다. 이때, 이 Current Stimulus 회로는 OP200 OP-AMP가 이상적이라는 가정하에서도 10V 전원, R1a, R1b, R2a, R2b의 변화 정도에 따라서 일정하기를 원하는 전류의 변화가 있을 수 있다. 따라서 본 Worst Case Analysis는 위성 버스 시스템에서 요구하는 정전류 변화량 1%를 만족하기 위해서 R1a, R1b, R2a, R2b를 어떠한 타입의 소자들로 구성해야 할지 분석하기 위한 용도로 행하여 졌다.

### 2.2.2 해석을 위한 가정 및 회로의 변화 요소들 정리

Worst Case Analysis를 위한 회로 가정은 다음과 같다.

▶ **가정 1:** OP-400은 무한대의 이득을 갖는 이상 OP-Amp이다. (실제 OP-Amp의 Voffset이나 Ibias를 기존 WCA자료들에는 고려하였으나, 그 영향은 매우 작음을 여러 WCA자료들에서 볼 수 있으며, ESA의 WCA교육자료에 나오는 예제들에서도 OP-Amp를 이상 증폭기로 가정하여 문제를 풀이하고 있음.)

▶ **가정 2:** 회로의 Load 저항은 Thermistor로

서 1Kohm으로 고정 (사실 부하는 영향없음을 확인함.) 되어 있다고 가정하며, 회로는 1mA 정전류를 공급할 경우만(실제 1mA를 사용하지 않으면, 전류가 낮아지므로 정확도는 더 좋아지고, 따라서 1mA가 Worst임.) 을 고려한다. 한편 1N4150은 회로 해석을 수행함에 있어서 아무런 영향을 주지 않는다고 가정하고, Analog Mux단의 입력 저항은 OP27A의 입력 저항으로서 최소 1.3Mohm이상이므로 무시한다.

▶ **가정 3:** IL의 변화에 영향을 주는 요소는 R1a, R2a, R1b, R2b와 10V전원이며, 저항은 각각 RNC50, RNC90, RM0603의 파트인 3가지 경우에서 저항의 초기, 온도, 노화에 따른 변화를 고려하고, 10V전원은 초기, 온도, 노화, Radiation을 모두 고려한다고 가정한다.

한편 정전류의 변화를 유발할 수 있는 요소들은 아래 표 2와 같다.

표 2. Thermistor Current Stimulus의 변화를 유발하는 요소 정리

	10V전원	저항 파트 경우1	저항 파트 경우2	저항 파트 경우3
관련	AD574의 10V Vref전압과 버퍼 회로	RNC90파트	RNC50파트	RM0603파트
초기 변화	$20 \times 10^{-3}$	0.02%	0.1%	0.1%
온도	150ppm/도	5ppm/도	25ppm/도	100ppm/도
노화	$\pm 250$ ppm /1000시간	$\pm 60 \times 10^{-5}$ /5년	$\pm 2 \times 10^{-2}$ /5년	$\pm 4 \times 10^{-3}$ /5년
방사능	0.2% @ 10Krad	무시 가능	무시 가능	무시 가능

여기에서 저항 파트들의 초기변화와 온도에 의한 변화량은 MIL-STD-975문서를 참조하였으며, 노화에 따른 변화량은 ECSS-Q60-11A문서를 참조하였다. 한편 10V전원은 이 회로를 위해서 Reference전압을 공급하는 회로의 변화를 의미하는데, 여기에서의 가정은 실제 10V Reference 전원 회로에 대한 Worst Case Analysis결과보다 더 Worst조건을 적용하였다.

이때, 10V 전원의 총 변화량과 RNC90, RNC50, RM0603저항의 총 변화량을 계산하면 각각 아래와 같다.

▶ 10V전원 총 변화량 (5년 미션, 25도에서 +40도까지 변화, Tdos 10Krad)

$$20 \times 10^{-3} + 150 \times 10^{-6} \times 40 \text{도} + (250 \times 10^{-6}) \times (5 \times 365 \times 24) / 1000 + 20 \times 10^{-3} = \text{약 } 60 \times 10^{-3}$$

▶ RNC90 총 변화량 (5년 미션, 25도에서 +40도까지 변화)

$$0.02 \times 10^{-2} + 5 \times 10^{-6} \times 40 \text{도} + 60 \times 10^{-5} = 1 \times 10^{-3}$$

▶ RNC50 총 변화량 (5년 미션, 25도에서 +40도까지 변화)

$$0.1 \times 10^{-2} + 25 \times 10^{-6} \times 40 \text{도} + 2 \times 10^{-2} = 22 \times 10^{-3}$$

▶ RM0603 총 변화량 (5년 미션, 25도에서 +40도까지 변화)

$$1 \times 10^{-3} + 100 \times 10^{-6} \times 40 \text{도} + 4 \times 10^{-3} = 9 \times 10^{-3}$$

### 2.2.3 회로의 관심 요소 파악

일반적인 회로의 Worst Case Analysis를 위한 제 1단계는 관심있는 회로의 출력 전류나 전압 등에 대한 Closed Form형태의 방정식을 세우는 것이 중요하다. 다음 그림3는 회로 방정식을 세우기 위한 Current Stimulus회로를 나타낸다.

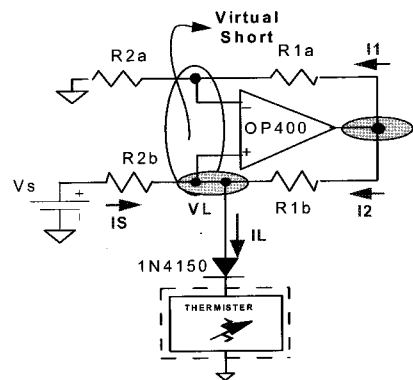


그림 3. 방정식 유도를 위한 회로

이때 관심 전류 IL에 관한 회로 방정식은 다음과 같은 수식으로 구해진다.

$$R2 = \frac{V_o - VL}{R1b}, IS = \frac{VS - VL}{R2b} \quad (7)$$

$$V_o = \frac{VL}{R2a} * (R1a + R2a), VL = IL * RL \quad (8)$$

$\equiv > (A), (B)$ 에 의해서

$$IL = R2 + IS \quad (9)$$

$$= VS * \frac{R1b * R2a}{R1b * R2a * (R2b + RL) - R1a * R2b * RL}$$

## 2.2.4 EVA에 의한 해석

먼저 수식 (9)의 회로 방정식을 R1a, R1b, R2a, R2b, VS에 대해서 편미분을 취하면 아래와 같은 꼴로 바꿀 수 있다.

$$dIL = S_1 * \frac{dR1a}{R1a} + S_2 * \frac{dR1b}{R1b} + S_3 * \frac{dR2a}{R2a} + S_4 * \frac{dR2b}{R2b} + S_5 * dVS \quad (10)$$

여기서 S1부터 S5는 아래와 같이 구해진다.

$$S1 = \frac{R1a * R1b * R2a * R2b * RL * VS}{(R1b * R2a * (R2b + RL) - R1a * R2b * RL)^2} \quad (11)$$

$$= 0.1 * 10^{-3}$$

$$S2 = R1b * \left( - \frac{R1b * R2a * (R2a * R2b + R2a * RL) * VS}{(R1b * R2a * (R2b + RL) - R1a * R2b * RL)^2} + \frac{R2a * VS}{R1b * R2a * (R2b + RL) - R1a * R2b * RL} \right) \quad (12)$$

$$= -0.1 * 10^{-3}$$

$$S3 = R2a * \left( - \frac{R1b * R2a * (R1b * R2b + R1b * RL) * VS}{(R1b * R2a * (R2b + RL) - R1a * R2b * RL)^2} + \frac{R1b * VS}{R1b * R2a * (R2b + RL) - R1a * R2b * RL} \right) \quad (13)$$

$$= -0.1 * 10^{-3}$$

$$S4 = - \frac{R1b * R2a * R2b * (R1b * R2a - R1a * RL) * VS}{(R1b * R2a * (R2b + RL) - R1a * R2b * RL)^2} \quad (14)$$

$$= -0.9 * 10^{-3}$$

$$S5 = \frac{R1b * R2a}{R1b * R2a * (R2b + RL) - R1a * R2b * RL} \quad (15)$$

$$= 0.1 * 10^{-3}$$

(조건 : R1a=R1b=1Kohm, R2a=R2b=10Kohm, RL=1Kohm, VS=10V)

참고로 S4, 즉 R2b에 의한 IL의 변화에 미치는 정도가 다른 저항의 영향보다 훨씬 민감함을 알 수 있다.

이제 마지막으로 VS는 동일한 상황에서 표 2에서 정리한 RNC90, RNC50, RM0603저항에 대해서 각각 IL의 EVA방법에 의한 총 변화량을 정리하면 아래와 같다.

▶ RNC90 의 경우 총 IL 변화

$$\bullet (abs(S1)+abs(S2)+abs(S3)+abs(S4))*1 + abs(S5)*60 = \underline{0.0072mA} \quad (0.7200\%)$$

▶ RNC50 의 경우 총 IL 변화

$$\bullet (abs(S1)+abs(S2)+abs(S3)+abs(S4))*22 + abs(S5)*60 = \underline{0.0324mA} \quad (3.2400\%)$$

▶ RM0603 의 경우 총 IL 변화

$$\bullet (abs(S1)+abs(S2)+abs(S3)+abs(S4))*9 + abs(S5)*60 = \underline{0.0168mA} \quad (1.68\%)$$

## 2.2.5 RSS에 의한 해석

한편 2.2.4에서 이미 구한 S1 ~ S5를 사용하여 RSS에 의해서 IL의 총 변화량을 정리하면 아래와 같다.

▶ RNC90 의 경우 총 IL 변화

$$\bullet \sqrt{\{(S1^2+S2^2+S3^2+S4^2)*(0.2^2+0.2^2+0.6^2)+S5^2*60^2\}} = \underline{0.006030mA} \quad (0.6030\%)$$

▶ RNC50 의 경우 총 IL 변화

$$\bullet \sqrt{\{(S1^2+S2^2+S3^2+S4^2)*(1^2+1^2+20^2)+S5^2*60^2\}} = \underline{0.019330mA} \quad (1.9330\%)$$

▶ RM0603 의 경우 총 IL 변화

$$\bullet \sqrt{\{(S1^2+S2^2+S3^2+S4^2)*(1^2+4^2+4^2)+S5^2*60^2\}} = \underline{0.007982mA} \quad (0.7982\%)$$

## 2.2.6 Monte Carlo기법에 의한 해석

Monte Carlo기법의 분석을 하기 위해서 PSPICE Version 10.0을 사용하였으며, 모든 저항은 Deviation을 앞에서 구한 변화량을 이용하여, RNC90, RNC50, RM0603 의 경우에 해당하는 0.1%, 2.2%, 그리고 0.9% 로 주며, 10 Vref 는 9.94V, 10V, 10.06V 3 가지 경우에 대해서 시뮬레이션 하였다. 또한 Monte Carlo해석 조건은 Uniform Distribution이라는 가정하에, 400개 Sample수집하며, No LOT변화의 상태에서 하였다. 다음 그림4는 Monte Carlo해석을 위한

PSPICE회로도를 나타낸다.

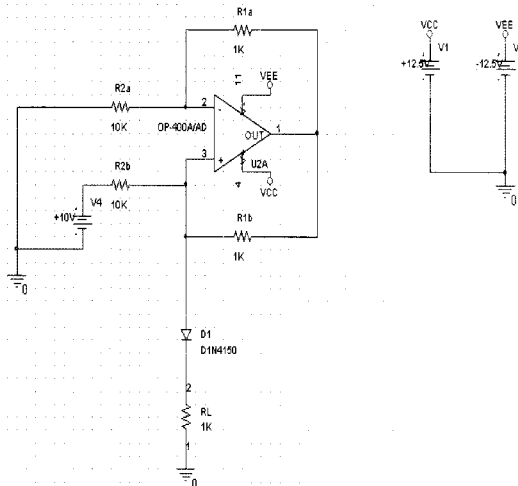


그림 4. Monte-Carlo 해석을 위한 PSPICE회로

이 경우에 IL의 총 변화량을 Vref가 10.06V이고 RNC90파트를 사용했을 때를 예제로 PSPICE 출력 결과를 표시하면 그림 5와 같다.

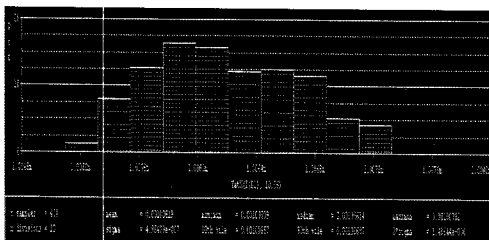


그림 5. Vref가 10.06V이고, RNC90저항들을 사용했을 때, IL과 그 변화량

정상적으로 1mA가 나오기를 기대하는 IL값이 Monte Carlo 분석에 의해서 RNC90을 사용할 때, 최악의 경우로 Vref가 10.06V일 때, 1.00619mA (도표의 Mean값이 이에 해당)가 나오며, 이때, 이 값이 가지는 정확도는 3\*Sigma값인 0.1486%가 나온다. 여기에서 1.00619mA가 1mA에 비해서 정확도가 0.619%가 변했고, 여기에 0.1486%를 더해서 총 Vref가 10.06V가 공급된 상황에서는 0.7676%가 변화하는 것으로 결론을 낼 수 있다.

다음 표 3는 각각 Vref가 9.94V, 10V, 10.06V 일 때, RNC90, RNC50, RM0603저항에 대해서 Monte Carlo방법에 의한 분석 결과를 정리한 것이다.

표 3. Monte Carlo분석 기법을 이용한 IL과 정확도 정리

Vref		9.94V	10V	10.06V
RNC90의 경우	Mean	0.99420mA	1.00015mA	1.00619mA
	3*Sigma	0.1451%	0.1477%	0.1486%
	Accuracy	0.7251%	0.1627%	0.7676%
RNC50의 경우	Mean	0.99390mA	0.99973mA	1.00577mA
	3*Sigma	3.20058%	3.25406%	3.27388%
	Accuracy	3.81058%	3.28106%	3.85088%
RM0603의 경우	Mean	0.99404mA	0.99995mA	1.00600mA
	3*Sigma	1.31003%	1.32997%	1.33797%
	Accuracy	1.90603%	1.33497%	1.93797%

## 2.2.7 직관적 방법에 의한 분석

수식 (9)에서 만들어진 회로방정식에서 ILmax 와 ILmin을 다음과 같은 방법으로 구한다.

$$IL_{min} = VS_{min} * \frac{R1b_{min} * R2a_{max}}{R1b_{max} * R2a_{max} * (R2b_{max} + RL) - R1a_{max} * R2b_{max} * RL} \quad (16)$$

$$IL_{max} = VS_{max} * \frac{R1b_{min} * R2a_{min}}{R1b_{min} * R2a_{min} * (R2b_{min} + RL) - R1a_{min} * R2b_{min} * RL} \quad (17)$$

이 때, 직관적 방법에 의한 IL의 총 변화량을 구하면 아래와 같다.

- ▶ RNC90 의 경우 총 IL 변화
  - ILmin = 0.993mA (0.6993%),
  - ILmax = 1.007mA (0.7007%)
- ▶ RNC50 의 경우 총 IL 변화
  - ILmin = 0.9726mA (2.7397%),
  - ILmax = 1.0286mA (2.8629%)
- ▶ RM0603 의 경우 총 IL 변화
  - ILmin = 0.985mA (1.4866%),
  - ILmax = 1.0151mA (1.5136%)

## 2.2.8 Thermistor Current Stimulus Circuit에 대한 WCA결과 정리

위의 3절에서 구한 4가지 방법의 Worst Case Analysis 결과를 정리하면 아래 표 4와 같다.

표 4. 4가지 WCA방법들을 사용한 결과 정리

저항 파트 3가지		RNC90	RNC50	RM0603
EVA 해석		0.7200%	3.2400%	1.6800%
RSS 해석		0.6030%	1.9330%	0.7982%
Monte Carlo 해석	Vref = 9.94V	0.7251%	3.8106%	1.9060%
	Vref = 10.06V	0.7676%	3.8509%	1.9379%
직관 해석	ILmin	0.6993%	2.7397%	1.4866%
	ILmax	0.7007%	2.8629%	1.5136%

살펴보면, Metal Film타입의 저항인 RNC50은 처음부터 노화에 의한 영향이 너무 커서 정확도가 매우 좋지 않음을 알 수 있다. 한편 RM0603도 IL의 정확도 1%를 만족하지 못함을 알 수 있다. 하지만 RNC90은 4가지 분석 기법 모두에서 1%이내의 IL 정확도를 만족하고 있다. 따라서 이 해석 결과를 바탕으로 실제로 차세대 위성의 On-Board Computer안의 R1a, R1b, R2a, R2b저항은 모두 IL의 정확도가 1%미만을 요구하는 채널에 대해서는 RNC90으로 장착하도록 설계에 반영하였다.

## 3. 결 론

우주 환경에서 사용될 전기 및 전자 회로들은 상용 회로들과는 달리 운용될 환경이 훨씬 열악한 만큼 반드시 파트의 Grade에 대한 주의뿐만 아니라 우주환경에서만 적용되는 Radiation효과 등을 고려하여 Worst Case Analysis를 수행하여야 한다. 더욱이 우주 환경에서는 임무기간 동안 단 한 번도 회로를 구성하는 파트의 교체나 수리가 불가능한 점을 고려할 때, 정확한 Worst Case Analysis는 지상보다 더욱 중요하다. 한편 일반적으로 많이 적용하는 Worst Case Analysis방법으로는 ESA규격서에도 제시된 EVA와 RSS, Monte Carlo가 있으며, 기존 위성에서 많이 사

용한 직관적 방법이 있다. 각 방법의 장,단점들을 정리하자면, EVA는 실제로 소자의 변화가 모두 한 방향으로 극단적으로 치우치는 것을 고려하여 소자 변화량을 해당 민감도와 곱하고, 단순 합하여 관심 요소 총 변화량을 구하는 것으로서 현실성이 다소 떨어질 정도로 관심 요소의 총 변화량이 크게 나오며, RSS는 실제 소자가 대부분 정규 분포를 따른다는 측면에서 현실성은 있으나, 역시 회로 소자의 변화량을 Square Mean을 하기 때문에 다른 WCA방법에 의한 결과보다 오히려 관심 요소의 총 변화량이 작아서 신빙성이 다소 떨어진다. Monte Carlo 해석 방법은 정규 분포를 따르지 않는 소자의 변화량을 임의로 Sampling하여 관심 요소의 총 변화량을 구하는 것으로서 회로 시뮬레이션 툴을 사용하기 때문에 손쉽게 계산이 가능하며, 그 결과 또한 EVA보다는 작지만 다소 믿을만한 결과를 도출할 수 있다. 직관적 방법에 의한 분석은 단순히 직관을 적용하면, 잘못된 결과를 얻을 가능성이 있으며, 항상 다른 분석 방법과 그 결과를 비교하여, 해석 결과의 흐름을 검증하여야 한다. 일반적으로 우주환경에서 동작할 전기, 전자회로는 EVA방법으로 검증하여 관심요소의 Margin이 충분한 것을 파악하며, 다른 3가지 분석 방법으로 확인하는 것이 바람직하다. 본 논문에서는 ESA에서 제시하는 Worst Case Analysis 규격서를 정리하고 실제로 규격서에서 제시하는 방법대로 저궤도 위성에서 사용되는 Thermistor Current Stimulus회로에 적용하여 분석한 사례를 제시하였으며, 그 결과로 회로에 더 정밀한 저항 파트로 교체하는 설계 변경 사례가 있었음을 실무 예제로 보여준다.

## 참 고 문 헌

1. MIL-STD-975M Specification.
2. ECSS-Q-60-01A Specification.
3. Walter M. Smith외 2인, "Worst Case Circuit Analysis - An Overview", IEEE 1996 PROCEEDINGS Annual RELIABILITY and MAINTAINABILITY Symposium, pp. 326 ~ 334



4. 석병석외 2인, "인공위성용 서미스터의 온도측정 정확도 분석", 한국항공우주학회지, 제2권, 2007 추계, pp. 1625 ~ 1630
5. 이상철, "Thermistor (NTC, PTC Thermistor)", 포항공과대학교 신소재공학과.
6. AD574 Datasheet, ANALOG DEVICES사