

## Worst Case 분석을 이용한 항공 전자장비 성능 사전분석

# Preliminary analysis of performance of avionics equipment using worst case analysis

천영호 · 우희승 · 서인범 · 안태식  
LIG넥스원 항공드론연구소

Young-ho Cheon · Hui-Seung Woo · Inn-beom Seo · Tae-Sik Ahn  
Avionics and Drone R&D Lab, LIG Nex1, Daegjeon, 34127, Korea

### [요 약]

항공전자 장비는 개발 시 다양한 환경 조건 및 성능이 요구되어지며, 이에 따른 개발 리스크에 대한 대책으로 최악조건 회로 해석(WCCA)을 적용하여 성능사전분석을 수행한다. WCCA 은 부품소자레벨에서 온도 및 운용 기간의 노화를 고려하여 파라미터의 값을 도출한 후, 해당 회로의 모든 부품들의 파라미터 값을 조합하여 해당 파라미터의 최대 값과 최소 값을 산출한다. 본 논문에서는 WCCA 분석 적용을 위하여 필요한 사항에 대하여 기술하였다. 2장에서는 WCCA 기법인 EVA 및 RSS, Monte Carlo 등의 차이와 특성을 기술 하였다. 3장에서는 실제 분석하는 절차를 소개하기 위하여 예제 회로를 통한 분석 과정을 기술하였다. 4 장에서는 분석 대상 조건별 분석 기법의 선택 관련 내용을 기술하였다. 본 논문에 소개된 절차 및 분석방법을 개발 시 적용한 결과 사전에 성능 분석 및 부품 최적화 설계 검증이 가능함을 확인하였다.

### [Abstract]

Avionics equipment requires various environmental conditions and performance during development, and as a countermeasure against such development risk, the worst-case circuit analysis(WCCA) is applied to predict preliminary performance analysis. WCCA calculates the maximum and minimum values by combining the parameter values of the relevant circuit after deriving the parameter values in consideration of the aging of the temperature and operating period at the component level. In this paper, the necessary matters for WCCA application are described. Chapter 2 describes the differences and characteristics of the WCCA techniques EVA, RSS, and Monte Carlo. Chapter 3 introduces the analysis process through the example circuit to introduce the actual analysis procedure. Chapter 4 describes the method of selecting an analysis technique for each condition of the analysis target. As a result of applying the procedures and analysis methods introduced in this paper when open, it was confirmed that preliminary performance analysis and part optimization design verification are possible.

**Key word** : EVA , Monte Carlo, Preliminary analysis, RSS, WCCA.

<https://doi.org/10.12673/jant.2022.26.4.185>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 20 July 2022; Revised 1 August 2022  
Accepted (Publication) 28 August 2022 (30 August 2022)

\*Corresponding Author , Young-ho Cheon

Tel: +82-42-723-2465  
E-mail: cheonyh25@lignex1.com

## I. 서론

항공 전자장비는 비행 안정성을 위하여 높은 신뢰성이 요구된다. 이와 같은 신뢰성을 보장하기 위하여 성능을 사전 예측하고 시험 수행 전 환경시험을 포함한 검증시험을 고려한 시스템 최적화 설계를 통하여 각종 리스크를 감소시키고 비용절감 및 개발 일정을 단축할 수 있다. 위와 같은 사전 성능 예측을 위하여 항공 우주 장비에서는 최악 조건 회로 해석 기법 (Worst Case Circuit Analysis, WCCA)을 통하여 사전 분석을 수행한다. WCCA 분석을 위한 절차는 Reliability Analysis Center에서 1993년에 발행한 “Worst Case Circuit Analysis Application Guidelines” 문서에 기본적인 개념 및 분석 방법에 대한 내용을 최초로 기술 하였다.[3] 실제 이론을 적용하여 적용된 사례는 European Space Agency의 규격서인 ECSS-Q-30-01A ‘Worst Case circuit Performance’(2005년)에 의하여 위성 탑재 장비에 대한 분석을 위한 절차를 구체화 하여 분석을 수행 하고 있다. ECSS-Q-30-01A 규격은 국내에서 개발한 저궤도 위성의 On Board의 부품의 신뢰도 분석 하는데 적용되어 왔다.[4] 이와 같이 위성 탑재 장비에서는 WCCA 분석을 통하여 부품의 신뢰도 검증에 대한 분석이 수행 되었으나, 항공전자 장비에 대한 분석 사례는 현재는 없는 상태이다. 그러나 최신 항공전자 장비의 복잡도 증가 및 고신뢰도 요구조건을 고려 시 사전 분석이 요구되어 지고 있는 추세이다.[4] WCCA 기법은 부품 소자 레벨에서 온도조건, 운용 기간에 의한 노화를 고려하여 파라미터 (출력 전압, 저항, 캐패시턴스 등)의 값을 도출한 후, 해당 회로의 모든 부품들의 파라미터 값을 조합하여 회로 별 관심 파라미터 (ex. Offset, 출력전압 등)의 최소값, 최대값을 산출하는 기법이다. 이 기법은 신뢰성 높은 프로그램의 해석 방법으로 널리 사용되어 왔다.[1][2] WCCA 기법은 도출한 관심 파라미터의 최소, 최대 값이 회로의 요구 조건에 만족하지 못할 경우, 회로 수정을 하여 주어진 환경에서도 동작할 수 있도록 개선하는 것이 수행하는 목적이다. [3]. 본 논문에서는 이와 같은 WCCA 의 3 가지 방법인 EVA (Extreme Value Analysis: 이하 EVA), RSS (Root-Sum Square Analysis, 이하 RSS) 및 MCA (Monte-Carlo Analysis, 이하 MCA)의 방법에 대한 소개 및 분석 기법간의 특성 차이를 기술하고, 실제 설계에 적용된 사례를 기술한다.

## II. Worst Case Circuit Analysis 기법 및 분석 절차

### 2-1 Worst Case Circuit Analysis 기법

WCCA는 구성 요소의 변동성을 고려하여 최악의 시나리오, 즉 극한의 환경 또는 작동 조건에서 회로 성능을 결정하는 기술이다. 환경 조건은 각 회로 구성 요소에 가해지는 외부 응력으로 정의되며 온도, 습도가 포함될 수 있다. 작동 조건에는 외부

전기 입력이 포함되지만 구성 요소 품질 수준, 부품 간의 상호 작용 및 구성 요소 노후화로 인한 드리프트와 같은 요소도 고려해야 한다. [3] WCCA를 통해 정격 부품 매개변수에 대해 실제 적용된 부품 응력을 평가할 수 있다. 이는 설계 요구 사항을 충족하기 위해 충분한 부품 응력 감소를 보장하는데 도움이 될 수 있다. WCCA는 안전 또는 비용적으로 중요한 모든 회로에 대해 고려해야 한다. WCCA의 성능과 그 결과의 구현은 제조업체에 대한 비용적, 법적 및 안전 위험을 줄일 수 있는 설계 문제와 대안을 식별하는데 도움이 될 수 있으며, 거의 모든 작동 조건에서 만족스러운 성능을 보장하는데 도움이 될 수 있다. 서론에서 소개한 분석 기법별 차이는 표1과 같다.

표 1. 분석 방법 상호 참조

Table 1. Analysis method cross reference

Analysis Method	Advantage	Disadvantage
Extreme Value Analysis	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Easiest way to estimate worst-case performance</li> <li>■ No statistical input of parameters of circuit components required for analysis</li> <li>■ The database only needs to provide the fluctuation parameters of the extreme conditions.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Calculating the most conservative estimation results under worst case conditions</li> <li>■ Insufficient information to evaluate the risk in the event of a circuit failure</li> </ul>
Root-Sum Square Analysis,	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Provides more realistic worst case performance analysis results for EVA analysis</li> <li>■ No knowledge of probability density functions of circuit components required</li> <li>■ Provides a limit value for Pass or Fail of the analysis result in percentage units</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Requires standard deviation probability distribution data for circuit components.</li> <li>■ Analysis under the assumption that the sensitivity of circuit components is constant (sensitivity change not reflected)</li> <li>■ Approximating the performance variability analysis of a circuit to a normal distribution</li> </ul>
Monte-Carlo Analysis	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ EVA and RSS analysis Provides more realistic worst case performance analysis results</li> <li>■ Provide additional information applicable to risk assessment</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Computer required for analysis</li> <li>■ CPU operation for analysis takes a lot of time</li> <li>■ Requires knowledge of probability density functions for circuit components</li> </ul>

#### (1) Extreme Value Analysis 기법

분석을 수행하기 위해서는 관심 요소를 기준으로 하는 함수 형태의 모델 설정을 수행해야 한다. 그림1의 회로에 대하여 Gain 값의 EVA 수행을 하기 위한 수식은 다음과 같이 정의된

다.

$$G = -\frac{R4}{R3} \times (1 + \frac{R2}{R1}) \quad (1)$$

분석을 위한 편 미분을 수행한다. 그림1의 회로 Gain 분석은 저항이 주요 변화 인자이므로 저항에 대하여 편미분을 수행한다. 분석 시 저항이 아닌 다른 인자에 대한 분석 필요 시 그 인자 기준으로 편미분을 수행 할 수 있다. 본 논문에서는 저항의 온도에 따른 변화 값이 있는 부품을 기준으로 수행하므로 인자는 각 저항을 인자로 하여 분석을 수행한다. EVA 분석을 위하여 Gain의 변화율을 구하면 수식은 아래와 같이 정의된다.

$$\sigma G = (\frac{\delta G}{\delta R1} \sigma R1) + (\frac{\delta G}{\delta R2} \sigma R2) + (\frac{\delta G}{\delta R3} \sigma R3) + (\frac{\delta G}{\delta R4} \sigma R4) \quad (2)$$

Gain에 대한 EVA 분석결과는 표7과 같다. 분석 결과를 반영한 Gain의 범위는 아래 식과 같이 정의 된다.

$$Gain(EVA) = G \pm \sigma G \quad (3)$$

EVA 분석을 통한 Gain 값의 분석은 가장 간단하면서, 가장 보수적인 결과가 나오는 방법으로 빠른 시간 안에 결과를 확인할 수 있는 방법이다. 그리고 다른 방법과는 다르게 통계적인 접근이 필요하지 않아 간단하나, 보수적인 결과로 인해 해석 결과가 요구조건을 만족하지 않을 가능성이 높다.

(2) Root-Sum Square Analysis 기법

EVA와 동일하게 그림1 회로에 대한 RSS 분석을 수행하기 위한 Gain의 변화율을 구하면 수식은 아래와 같이 정의 된다.

$$\sigma G = \sqrt{(\frac{\delta G}{\delta R1} \sigma R1)^2 + (\frac{\delta G}{\delta R2} \sigma R2)^2 + (\frac{\delta G}{\delta R3} \sigma R3)^2 + (\frac{\delta G}{\delta R4} \sigma R4)^2} \quad (4)$$

RSS 분석은 많은 수의 독립 변수가 통계적으로 결합된 경우이며, 정규 분포라는 중심 극한 정리를 기반으로 한다. Data sheet를 통하여 제공되는 저항의 변화율은 균일 분포 함수로 제공되므로 3σ 표준 편차로 변환하기 위하여 변화율을 √3 으로 나누어 수식(4)에 적용 반영한다. 이를 위하여 3σ (99.7% 확률) 기준으로 분석이 필요하다. 수식(4)에서 각 편미분의 제곱값은 결국 각 변수에 대한 표준 편차가 되므로 σG 값이 표준편차σ가 되며 Gain 범위는 수식(5)와 같이 정의된다.

$$Gain(RSS) = G \pm 3 \times \sigma \quad (5)$$

위와 같이 RSS 분석 방법은 통계적 접근 방식을 적용하여

EVA 분석 보다 현실적인 평가를 제공한다.

(3) Monte Carlo 분석 기법

Monte Carlo 분석 기법은 RSS 분석 기법과 달리 소자 Random 변수의 분포가 정규분포가 아닐 때 구 할 수 있는 방법으로 Monte Carlo 알고리즘에 따라 정해진 수의 샘플을 만들어 분석하는 방법이다. EVA나 RSS 분석과는 달리 회로 시뮬레이션 소프트웨어에서 제공하는 Monte Carlo 툴을 사용한다. 분석하는 Tools로 대표적인 P-SPICE의 Advanced Analysis Option을 이용하여 분석한다. Monte Carlo 분석 기법은 Model Parameter 및 Tolerance값에 의한 특정 값을 랜덤하게 변화 시켜 가면서 회로 응답의 변화량을 측정하는 분석 방법으로 해석을 실행하기 전 Tolerance 및 각 인자 값을 미리 설정하고, 각 소자의 변수의 변화의 순간에 통계적 Data를 제공하는 방법이며, 회로가 실제 운용 상태에서 변화에 대한 예측이 가능하다.

2-2 Worst Case Circuit Analysis 절차

(1) 분석 접근 방법 결정

분석을 수행하기 위한 사전 단계로 분석 수행 범위 (예, 대상 전체 Vs 주요 구성 부분) 및 분석 신호에 대한 정의 및 분석을 위한 가용 자원을 사전 식별하는 단계이다.

(2) 분석데이터 확보

분석을 수행하기 위한 데이터를 확보하기 위한 절차이며, 확보 필요한 주요 Data는 아래와 같다.

- 성능 요구사항 및 규격
- 회로도 및 블록 다이어그램
- 상호 연결 목록 및 와이어링 다이어그램
- 전체 부품리스트
- 운용 환경 관련 자료
- 분석 대상의 형상 정보
- 열해석 자료

(3) 분석계획 수립

분석을 수행하기 위한 대상 구체화 작업 수행

- 기능 분할 및 작동 관련 내용 정리
  - 분석 범위 선정
  - 분석을 위한 부품 파라미터에 대한 데이터베이스 작성
- 부품 제작 업체 제공 데이터 및 필요 시 데이터를 추가 작성하여 데이터베이스를 작성한다. 부품 매개변수와 변동의 원인과의 관계는 아래 표와 같으며, 이를 토대로 부품 타입에 따른 데이터베이스가 작성되어야 한다.[3]

■ 분석 방법 식별

적용 부품에 대한 매개 변수 확보와 장비의 구성 및 복잡성을 고려하여 EVA 및 RSS, MCA 항목 특성을 고려한 분석 방법을 식별한다.

(4) 분석수행

분석 수행은 필요에 따라 외부 Stress를 인가하는 Worst Case Stress 분석 및 Worst Case Performance 분석을 수행한다. Stress 인가 항목은 사용 장비의 운용 조건을 고려하여 분석한다.

(5) 문서작성

문서작성은 분석 결과를 반영하여 작성한다. 문서 작성은 절차 수행 산출물을 모두 정리하여 작성해야 하며, 분석 중 문제가 발견되면 잠재적 수정 방안 및 솔루션을 제안한다.

표 2. 영향을 받는 매개 변수와 변동의 원인  
Table 2. Affected Parameter VS. Source of variation

Component Type	Environmental Parameter Affected Source of Variation	Parameter Affected
Resistor	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Temperature</li> <li>■ Humidity</li> <li>■ Aging</li> <li>■ Life</li> <li>■ Vacuum</li> <li>■ Mechanical</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Resistance</li> <li>■ Resistance</li> <li>■ Resistance</li> <li>■ Resistance</li> <li>■ Resistance</li> <li>■ Resistance</li> </ul>
Capacitor	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Temperature</li> <li>■ Aging</li> <li>■ Mechanical</li> <li>■ Electrical</li> <li>■ Vacuum</li> <li>■ Humidity</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Capacitance, ESR</li> <li>■ Capacitance, ESR</li> <li>■ Capacitance</li> <li>■ Voltage Coefficient</li> <li>■ Capacitance</li> <li>■ Capacitance</li> </ul>
Bipolar/Field Effect Transistor	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Temperature</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ HFE , VBE , ICBO, RDSON , VTH</li> </ul>
Rectifier/Switching Diode	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Temperature</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ VF , TS , IR,</li> </ul>
Linear ICs	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Temperature</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Voltage , Current Offset</li> </ul>
Digital ICs	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Temperature</li> <li>■ Rise/Fall time</li> <li>■ Propagation Delay</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Propagation Delay</li> </ul>

III. Worst Case Circuit Analysis 절차 수행

3-1 Worst Case Circuit Analysis 사전 절차

본 장에서는 2.2에 기술된 절차에 따라 분석하는 절차를 실제 회로 예를 통하여 소개한다.

(1) 분석회로

분석 절차를 위한 예는 그림(1)과 같이 2단의 Gain 필터를 이용한 회로를 이용하여 수행하며 분석을 위한 조건은 아래 표와 같은 조건에서 절차를 수행한 결과를 기술한다.

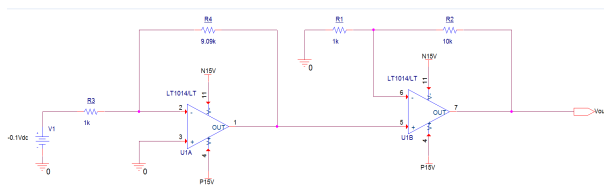


그림 1. 분석회로  
Fig. 1. Analysis circuit

회로를 구성하는 부품은 표(3)과 같다.

표 3. 부품 및 회로 적용 내용  
Table 3. Components and Circuit Application

Item	Part Identification and Circuit Condition	Application
Component	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ R1/R2/R3/R4</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ P/N : M55342E06BXXXBR</li> <li>■ Tolerance : 0.1%</li> <li>■ R1 : 1 KΩ ■ R2 : 10 KΩ</li> <li>■ R3 : 1 KΩ ■ R4 : 9.09 KΩ</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ U1 OP-AMP</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ P/N : 5962-89677022A</li> </ul>
Circuit Condition	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Input Condition</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ - 0.1~-0 VDC Input</li> </ul>

분석 전 적용 부품의 파라미터를 이용한 데이터베이스를 구축하기 위하여 표2에서 Resistor 및 OP Amp에 해당되는 항목에 대하여 영향 받는 환경 조건을 고려하여 구축한다. 그림1의 회로는 총 2단의 회로로 구성되며, 각 회로의 Gain 및 Gain Error율 (%) Offset 값으로 변화율을 구한다. 위 회로에서 1단 Gain은 -R3/R4 이며 2단 Gain은 1+(R2/R1)으로 Gain은 -10이 된다.

(2) 매개 변수 분석

본 단계에서는 회로의 변동을 유발하는 매개 변수에 대한 데이터 분석을 하는 단계이다. 회로에 적용된 M55342E 계열[5]의 매개변수를 표 4에 기술 하였다. 표 4에서 제공된 매개 변수를 운용온도 (-40°C~85°C) 조건을 반영하여 저항의 Tolerance를 고려할 경우 온도에 의한 Tolerance는 저항온도 계수 (Resistance temperature coefficient Ratio, 이하 RTCR)를 반영하여 아래 수식과 같이 계산된다. 계산 기준은 표4의 RTCR ± 25 ppm/°C 및 기준 주위 온도 조건(Room temperature, 이하 room temp)25°C, 최고 운용 온도 (Max operation temperature, 이하 max op temp) 85°C를 고려하여 변화율은 수식(6)에 의하여 구한다.

$$High\ Temp\ Variable(\%) = \pm(\max\ op\ temp - room\ temp) \quad (6)$$

$$\times RTCR \times 100(\%)$$

수식 (6)에 의하여 구한 High Temp Variable(%) 값은 0.15%이다. 주위 온도 조건 25°C, 최저 운용 온도 (Min operation temperature, 이하 min op temp)-40°C를 고려하여 변화율은 수식(7)에 의하여 구한다.

$$Low\ Temp\ Variable(\%) = \pm(room\ temp - min\ op\ temp) \quad (7)$$

$$\times RTCR \times 100(\%)$$

수식 (7)에 의하여 구한 Low Temp Variable(%) 값은 0.16%이다. 표 4의 Thermal shock에서 Resistance to bonding exposure

까지의 7항목에 대한 Resistance Value Ratio Limit 를 적용한 변화 값 ETC Variable은 수식(8)와 같이 계산한다.

$$ETCVariable(\%) = \pm \sqrt{(4 \times 0.1\%)^2 + (3 \times 0.2\%)^2} = 0.72\% \quad (8)$$

수식 (6)-(8)에 의하여 Variable 값 및 저항의 Data sheet 제 공 변화 값을 반영한 결과는 표 5와 같다.

**표 4.** 변화의 환경적 소스 Vs 저항 값 변화를 제한 치  
**Table 4.** Environmental Source of Variation Vs Resistance Value Ratio Limit

Environmental Source of Variation	Resistance Value Ratio Limit (%)
■ Temperature	■ Resistance temperature coefficient : ± 25ppm/°C
■ Life	■ Qualification (2000 hours @70°C) : ±0.5% ■ Failure Level (10000 hours @70°C) : ±2%
■ Thermal shock	■ ±0.1% (Random)
■ Low temperature operation	■ ±0.1%(Random)
■ Short time overload	■ ±0.1%(Random)
■ High temperature exposure	■ ±0.1%(Random)
■ Moisture resistance	■ ±0.2%(Random)
■ Resistance to soldering heat	■ ±0.2%(Random)
■ Resistance to bonding exposure	■ ±0.2%(Random)
■ FR level in percent per 1000 hours	■ ±0.01%

**표 5.** 변화의 환경적 소스 Vs 저항 값 변화를 제한 치 (분석용)  
**Table 5.** Environmental Source of Variation Vs Resistance Value Ratio Limit (For Analysis)

Environmental Parameter Affected Source of Variation	Resistance Value Ratio Limit (%)
■ Initial Tolerance (25°C)	■ ±0.1%
■ High Temp Variable (%)	■ ±0.15%
■ LowTemp Variable (%)	■ ±0.16%
■ ETC Variable (%)	■ ±0.72%

운용 온도 조건 -40~85°C 운용 조건에서 분석을 하기 위하여 85°C 조건 (High Temp Tolerance ) 및 -40°C 조건 (Low temp Tolerance )에서 표5 결과 값을 반영하면 수식(9)와 수식(10) 과 같이 분석된다.

$$High\ Temp\ Tolerance = \pm 0.1 \pm \sqrt{(\pm 0.15)^2 + (\pm 0.72)^2} \quad (9)$$

$$= \pm 0.873(\%)$$

$$Low\ Temp\ Tolerance = \pm 0.1 \pm \sqrt{(\pm 0.16)^2 + (\pm 0.72)^2} \quad (10)$$

$$= \pm 0.876(\%)$$

두 개의 온도 조건 중 Low Temp Tolerance 조건이 Worst Case 가 되므로, 회로 분석 시 저항 변화율은 Low Temp 조건으로 분석한다.

**(3) OP Amp 분석**

표3의 OP Amp인 5962-89677022A 계열의 부품 파라미터 중 표 2에서 Linear IC로 분류되는 OP-AMP의 변화 요소인 온도에 따른 운용 온도(-40~85°C) 조건에서 Offset의 값에 대한 Data는 표6과 같다.

**표 6.** OP AMP의Offset 전압 및 전류  
**Table 6.** Offset Voltage and Current of OP AMP

Item	Offset Value
■ Input Offset Voltage@ -55°C ≤ TA ≤ +125°C	■ ±550 uV
■ Input Offset Current @ -55°C ≤ TA ≤ +125°C	■ 5 nA

**3-2 Extreme Value Analysis**

Gain의 최대/최소 값을 구하기 위하여 수식(7) 에서 기 분석 한 저항의 최대 변화율을 고려하여 분석한다. 분석 결과 최대 변화율은 -40°C 운용 시 변화율 0.876%를 적용하여 분석한다. 분석은 관심 요소인 Gain 변화율에 구하기 위하여 수식(2)를 적용한다. 수식(2) 에서 R1 에 의한 변화는 수식(11)에 의하여 구 한다.

$$\left(\frac{\delta G}{\delta R1}\sigma R1\right) = \left(-\frac{R4}{R3} \times \frac{R2}{R1^2}\right) \times \left(R1 \times \frac{0.876}{100}\right) \quad (11)$$

수식(2) 에서 R2 에 의한 변화는 수식(12)에 의하여 구한다.

$$\left(\frac{\delta G}{\delta R2}\sigma R2\right) = \left(\left(\frac{R4}{R3} \times \frac{1}{R1}\right) \times \left(R2 \times \frac{0.876}{100}\right)\right) \quad (12)$$

수식(2) 에서 R3 에 의한 변화는 수식(13)에 의하여 구한다.

$$\left(\frac{\delta G}{\delta R3}\sigma R3\right) = \left(-\frac{R4}{R3^2} \times \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \times \left(R3 \times \frac{0.876}{100}\right)\right) \quad (13)$$

수식(2) 에서 R3 에 의한 변화는 수식(14)에 의하여 구한다.

$$\left(\frac{\delta G}{\delta R4}\sigma R4\right) = \left(\frac{1}{R3} \times \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \times \left(R4 \times \frac{0.876}{100}\right)\right) \quad (14)$$

수식 (11)-(14) 각각의 식에서 Gain 관련 Sensitivity 및 각 부

품의 표준편차를 구할 수 있다. 예로 R1 부품의 Sensitivity 및 표준편차 식은 아래와 같다.

$$Sensitivity = -\frac{R1}{R3} \frac{R2}{R1^2} \tag{15}$$

$$\text{표준편차} = R1 * 0.876\% \tag{16}$$

수식에 의한 EVA 분석을 위한 Sensitivity 및 표준편차는 아래 표7과 같다.

표 7. Gain 저항 별 편미분 결과

Table 7. Partial differential result for each gain resistance

Component	Sensitivity	Component standard deviation
R1	-0.0909/Ω	8.76Ω
R2	0.00909/Ω	87.6Ω
R3	-0.099/Ω	8.76Ω
R4	0.0111/Ω	79.63Ω

수식에 의한 EVA 분석을 이용한 분석 결과의 Gain Error는 3.34 이다. OP-Amp의 동작 특성에 의한 Offset Voltage 특성은 부품의 변화율을 통한 최대/ 최소값을 이용하여 분석한다. 이를 위하여 식(10)에서 구한 저항의 최대 변화율이 0.876% 적용하여 최대 1차 Gain 값인 G1(Max) 값과 최소 1차 Gain 값인 G1(Min) 값을 구하고 이를 이용하여 Offset Voltage를 구한다. G1(Max)값은 수식(17)에 의하여 구한다.

$$G1(Max) = -\frac{R1(Max)}{R3(Min)} = -\frac{(9090 + (9090 \times \frac{0.876}{100}))}{(1000 - (1000 \times \frac{0.876}{100}))} \tag{17}$$

$$= -9.25$$

G1(Max) 조건에서 Offset Voltage는 수식(18)에 의하여 구한다.

$$\Delta Vos = (1 + G1(Max)) \times Vos + R4(Max) * Ios \tag{18}$$

$$= 5.64 mV$$

G1(Min)값은 수식(19)에 의하여 구한다.

$$G1(Min) = -\frac{R1(Min)}{R3(Max)} = -\frac{(9090 - (9090 \times \frac{0.876}{100}))}{(1000 + (1000 \times \frac{0.876}{100}))} \tag{19}$$

$$= -8.93$$

G1(Min) 조건에서 Offset Voltages는 수식(20)에 의하여 구한다.

$$\Delta Vos = (1 + G1(Min)) \times Vos + R4(Min) * Ios \tag{20}$$

$$= 5.46 mV$$

2단 Gain 값도 1단 Gain과 동일한 절차로 수행한다. 최대 2차 Gain 값인 G2(Max) 값은 수식(21)에 의하여 구한다.

$$G2(Max) = (1 + \frac{R2(Max)}{R1(Min)}) = 11.18 \tag{21}$$

G2(Max) 조건에서 Offset Voltage는 수식(22)에 의하여 구한다.

$$\Delta Vos = (1 + G2(Max)) \times Vos + R2(Max) * Ios \tag{22}$$

$$= 6.69 mV$$

최소 2차 Gain 값인 G2(Min)값은 수식(23)에 의하여 구한다.

$$G2(Min) = (1 + \frac{R2(Min)}{R1(Max)}) = 10.83 \tag{23}$$

G2(Min)조건에서 Offset Voltage는 수식(24)에 의하여 구한다.

$$\Delta Vos = (1 + G1(Min)) \times Vos + R4(Min) * Ios \tag{24}$$

$$= 6.50 mV$$

G1(Max), G2(Max) 조건에서 Offset Voltage는 수식(25)에 의하여 구한다.

$$\Delta Vos(Max) = (5.64 mV) * G2(Max) + 6.69 mV \tag{25}$$

$$= 69.74 mV$$

G1(Min), G2(Min) 조건에서 Offset Voltage는 수식(26)에 의하여 구한다.

$$\Delta Vos(Min) = (5.46 mV) * G2(Min) + 6.50 mV \tag{26}$$

$$= 65.63 mV$$

EVA 분석 결과 및 OP-Amp에 의한 Offset Voltage를 반영한 분석 결과는 표 8과 같다.

표 8. EVA 분석 결과

Table 8. EVA analysis result

Condition	Max	Normal	Min
Gain	103.34	100	96.66
Offset Voltage (mV)	69.74	-	65.63
Output (-0.1 V Input)	10.40 V	10.0 V	9.67 V

EVA 분석 결과 부품의 환경 요소를 반영한 출력 범위는 최대 입력 값인 -0.1 V 입력 시 9.67에서 10.40 V 범위가 출력되는 것으로 분석된다.

### 3-3 Root-Sum Square Analysis

그림 1의 RSS 분석은 Data sheet를 통하여 제공되는 저항의 변화율에 대한 변화가 필요하다. Data sheet를 통하여 제공되는 저항의 변화율은 균일 분포 함수로 제공되므로 표준 편차로 변환하기 위하여 수식 (10)의 결과 값인 ±0.876%를 √3 으로 나눈다. 따라서 적용되는 변화율 값은 0.50%가 된다. 분석을 위하여 사전에 구한 변화율을 적용하여 RSS Gain 변화율을 수식(4)를 이용하여 구한다.

수식(4)에서 R1에 의한 변화는 수식(28)에 의하여 구한다.

$$\left(\frac{\delta G}{\delta R1}\sigma R1\right) = \left(-\frac{R4}{R3} \times \frac{R2}{R1^2}\right) \times \left(R1 \times \frac{0.50}{100}\right) \quad (27)$$

수식(4)에서 R2에 의한 변화는 수식(29)에 의하여 구한다.

$$\left(\frac{\delta G}{\delta R2}\sigma R2\right) = \left(\frac{R4}{R3} \times \frac{1}{R1}\right) \times \left(R2 \times \frac{0.50}{100}\right) \quad (28)$$

수식(4)에서 R3에 의한 변화는 수식(30)에 의하여 구한다.

$$\left(\frac{\delta G}{\delta R3}\sigma R3\right) = \left(-\frac{R4}{R3^2} \times \left(1 + \frac{R2}{R1}\right)\right) \times \left(R3 \times \frac{0.50}{100}\right) \quad (29)$$

수식(4)에서 R4에 의한 변화는 수식(31)에 의하여 구한다.

$$\left(\frac{\delta G}{\delta R4}\sigma R4\right) = \left(\frac{1}{R3} \times \left(1 + \frac{R2}{R1}\right)\right) \times \left(R4 \times \frac{0.50}{100}\right) \quad (30)$$

수식 (28)~(31) 각각의 Gain 관련 Sensitivity 및 각 부품의 표준 편차를 구할 수 있다. 예로 R1 부품의 Sensitivity 및 표준 편차는 수식(32)와 수식(33)과 같다.

$$Sensitivity = -\frac{R4}{R3} \frac{R2}{R1^2} \quad (31)$$

$$\text{표준편차} = R1 * 0.50\% \quad (32)$$

RSS 분석을 통하여 각 부품에 대한 Sensitivity 와 표준 편차를 구할 수 있다. 표9는 각 부품의 Sensitivity 및 표준 편차를 수식에 의하여 정리한 결과 이다. 위와 같이 계산된 Sensitivity 및 표준 편차 값은 부품 선정 시 사전 검토가 가능하도록 분석이 된다. 표9에서 보면 R3의 Sensitivity 값이 가장 크게 나온다. 위와 같은 분석을 토대로 결과가 만족하지 않을 때는 Sensitivity 값이 높은 R3 저항은 최우선적으로 교체하여 수정이 가능하다. 이와 같이 Sensitivity를 활용하여 최적의 부품 선정을 할 수 있다.

표 9. Gain 저항 별 편미분 결과

Table 9. Partial differential result for each gain resistance

Component	Sensitivity	Component standard deviation
R1	-0.0909/Ω	5Ω
R2	0.00909/Ω	50Ω
R3	-0.099/Ω	5Ω
R4	0.011/Ω	45.45Ω

수식(4)에 의하여 구한 값은 RSS 분석에 의한 Gain의 표준 편차는 ±0.953이다. RSS의 3σ 한계조건 (99.7%)를 적용 할 경우 Worst case 분석 값은 수식(34)와 수식 (35)에 의하여 구한다.

$$G(Max) = 100 + 3(0.953) = 102.86 \quad (33)$$

$$G(Min) = 100 - 3(0.953) = 97.14 \quad (34)$$

Gain 값의 평균은 100 이며 부품의 특성 오차에 의하여 97.14~102.86 사이에서 변경 될 경우 3σ 한계 조건 (99.7%)를 을 만족한다. 입력 값에 의한 출력 범위를 검증하기 위하여 추가적으로 부품 특성에 의한 Offset Voltage에 대한 추가 분석이 필요하다. 1차 Gain 회로 Offset Voltage 의 RSS 분석 결과는 수식(35)와 같다.

$$(\Delta Vos) = \sqrt{(1 + G1 \times Vos)^2 + (R4 \times Ios)^2} = 5.55 mV \quad (35)$$

2차 Gain 회로 Offset Voltage의 RSS 분석 결과는 수식(36)과 같다.

$$(\Delta Vos) = \sqrt{(1 + G2 \times Vos)^2 + (R2 \times Ios)^2} = 6.60 mV \quad (36)$$

1차 Gain 과 2차 Gain에서 구한 Offset Voltage를 적용하여

전체 회로의 Offset Voltage를 구하면 수식(37)과 같다

$$(V_{os}) = \sqrt{(5.55mV * G_1)^2 + (6.60mV)^2} = 50.88mV \quad (37)$$

표 10. RSS 분석 결과

Table 10. RSS analysis result

Condition	Max	Normal	Min
Gain	102.86	100	97.14
Offset Voltage (mV)	50.88 mV	-	-50.88 mV
Output (0.1V Input)	10.30 V	10.0 V	9.71 V

RSS 분석결과 -0.1 V 입력 시 9.71 V~10.30 V 범위 내에 존재 할 확률이 99.7% 이다. 만약 분석 결과의 변화 값이 요구 조건을 만족하지 못할 경우 Sensitivity 값이 큰 R3의 부품교체를 통하여 설계 변경이 가능하다.

### 3-4 Monte Carlo 분석 기법

P-Spice를 이용한 Monte Carlo 분석은 P-Spice Advanced Analysis Option을 이용하여 분석을 수행한다. 그림3. ~ 그림5. 는 RSS 분석 시 사용한 회로와 동일 회로에 대하여 Monte Carlo분석을 수행 하기 위한 절차이다. 그림2 와 같이 각 부품의 TCR 값 및 Tolerance를 설정한 후 그림3.에서 분석을 위한 값을 설정한다.

Property	Value
Color	Default
Designator	RES1
Graphic	FLAT
ID	R10MAX
Implementation Path	...
Implementation Type	...
Location X-Coordinate	...
Location Y-Coordinate	...
MAX_TEMP	RTMAX
Name	R10MAX
Part Reference	R1
PCB Footprint	AXIS05
POWER	SMAK
Power Pins Visible	F
PreRoute	DEFAULT
Spice Template	R@RESDES %1 %2 TOL
Reference	R1
SLOPE	RESMAX
Source Library	C:\CADDENCE\SPICE_16
Source Package	R1
Source Part	R10MAX
TCT	0.00005
TCI	0
TOLERANCE	0.01%
Value	0.001
VOLTAGE	R10MAX

그림 2. TCR 및 Tolerance 설정

Fig. 2. TCR and Tolerance Settings

총 수행 횟수를 5000 으로 설정하고 시험을 위한 변수의 분포는 Uniform 형태로 설정 한 후 시뮬레이션을 수행한다. 최종 모니터링 값은 출력 값을 기준으로 분석한다.

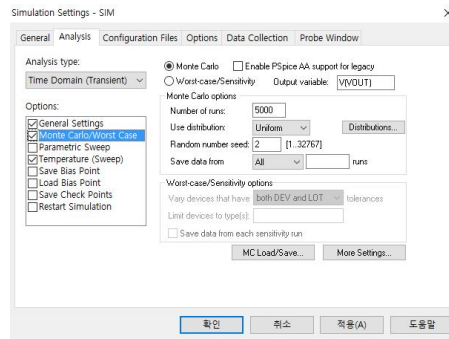


그림 3. Monte Carlo분석을 위한 설정

Fig. 3. Setup for Monte Carlo analysis

RSS 분석 결과와 동일한 조건에서 분석하기 위하여 온도 조건을 그림5와 같이 -40°C로 설정한다.

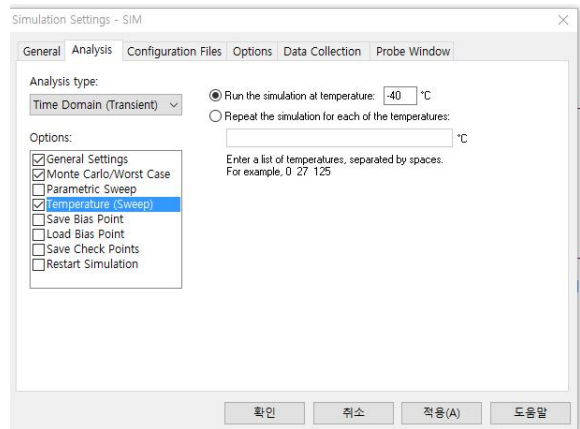


그림 4. 분석을 위한 온도 조건 설정

Fig. 4. Setting temperature conditions for analysis

그림 2~그림 4에서 설정한 기준으로 분석한 MCA 결과는 그림5와 같다.

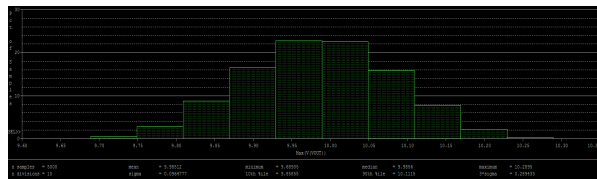


그림 5. Monte Carlo 분석 결과

Fig. 5. Monte Carlo analysis results

시뮬레이션 수행 결과의 출력 전압의 3σ 값은 ±0.289V 이다. 저항에 의한 영향 및 OP-AMP의 Offset Voltage에 의한 변화를 고려한 분석 결과는 표11과 같다.



표 11. MCA 분석 결과

Table 11. MCA analysis result

Condition	Max	Normal	Min
MCA 분석 결과	10.29 V	10 V	9.71 V
Offset Voltage (mV)	50.88 mV	-	-50.88 mV
Output (0.1V Input)	10.34 V	10.0 V	9.66 V

분석 결과 RSS 분석 결과와 거의 유사한 결과를 확인 할 수 있다.

#### IV. Worst Case Circuit Analysis 방안 선택

본 논문에서 WCCA를 위하여 EVA, RSS 분석, P-Spice를 이용한 Monte Carlo 적용하여 예제 회로에 대한 분석 하는 예를 기술 하였다. 3장에서 Gain 회로를 통하여 분석한 결과와 같이 각 분석 방법은 적용되는 부품의 데이터 확보 여부에 따라 분석 방법이 적용되어야 한다. 기존에 우주 및 항공기 탑재 장비 적용 회로에는 높은 신뢰성이 요구되며 극한의 운용 환경을 견디어야 고신뢰성 부품을 적용하였다. 일반적으로 고 신뢰성 부품 (High-Reliability Part)로 분류되는 S 등급(Class S) 이상의 집적 회로(Microcircuit), JANS 등급 이상의 반도체 소자 (Discrete Semiconductor), 그리고 ER (Established Reliability) 등급 R 수준 이상의 수동(Passive) 소자들이 적용되어 왔다. 그와 같은 예로 NASA MIL-STD-975 및 GSFC PPL(Preferred Part List) 21의 2 등급(Grade 2) 이상을 부품을 선정하였다. 그러나 최근 들어 상용 부품(COTS, Commercial Off The Shelf) 시장의 급속한 성장과 함께, 일부부품에 대해서는 고 신뢰성 부품으로서 검증되지않은 부품을 사용해할 경우가 빈번하게 생기고 있다. 따라서 이와 같은 COTS 제품을 적용하기 위해서는 사전에 분석이 필요하다. 일반적으로 COTS 제품은 고신뢰도 부품과 비교하여 충분한 Data Base 확보가 불가능 하므로 이를 고려한 분석을 적용한다. 항공 전자 장비에 적용되는 부품 선정 시 최소 RSS 분석을 위한 Data 확보가 가능한 부품 적용을 사전에 고려하여 부품 선정을 해야 보다 신뢰도 있는 사전 분석이 가능하다. 이와 같이 RSS 분석을 위한 데이터 확보가 가능한 부품 선정 시 1차적인 분석은 RSS 분석을 통하여 수행하고, Monte Carlo 분석을 통하여 재검증 수행 시 성능에 대한 사전 분석이 가능함을 확인 하였다.

#### V. 결 론

항공전자장비의 각 부품은 지상 운용장비 보다 높은 신뢰성이 요구됨으로, 운용 환경 및 시스템 설계 관점에서 신뢰도에 대한 사전 분석을 통하여 관련 리스크를 최소화해야 한다. 따라서, 각 구성 부품의 설계 수명 동안 허용 오차, 온도, 환경 등 다양한 메커니즘으로 인해 변동이 있을 수 있다는 점을 감안할 때 회로가 의도한 대로 작동할지 여부를 결정하는 수단이 WCCA이다. 4장에서 기술한 내용과 같이 WCCA 분석 방법은 구성 부품의 분석을 위한 Data Base 확보 여부에 따라 분석을 수행하는 것이 효율적이다. 따라서 설계 단계에서 부품 선택 시 이를 고려하는 것도 필요하다. WCCA 를 수행함으로써 적용 부품의 변수가 가장 Worst 한 값으로 변경되더라도 회로의 요구사항에 만족함을 증명할 수 있으며, 설계 부품에 대한 효율적인 선정이 가능하다. 그리고 장비의 성능에 대한 사전 검증 및 각종 환경/EMI 시험에 대한 사전 분석이 가능하다. 본 논문에 소개된 WCCA 분석은 현재 일부 위성 탑재 장비에 적용되어 수행되고 있으나, 항공전자장비나 엄격한 규격이 요구되어지는 장비에 적용하여 사전 검증을 수행 할 경우 비용 및 일정을 감소시킬 수 있다.

#### References

- [1] ECSS-Q-30-01A : Space product assurance: worst case circuit performance analysis, Mar. 2005.
- [2] MIL STD-785B : Reliability Program for Systems and Equipment Development and Production, September 1980
- [3] B. Johanson, D. Russell, and W. Swavely, "Worst Case Circuit Analysis Application Guidelines," Reliability Analysis Center, 201 Mill Street Rome NY 13440-6916, 6528, Mar. 1993.
- [4] Y. K. Lee, K. H. Kwon, D. Y. Kim and S. K. Lee, "Introduction and Application of Worst Case Analysis in Space Environment, " *Aerospace Engineering and Technology*, Vol. 7, No. 2, pp. 58-66, Nov. 2008.
- [5] MIL-PRF-55342H w/ Amendment 1: Resistors, chip, fixed, film, non established reliability, established reliability, general specification for, " , 15 October 2007



**천 영 호 (Young-Ho Cheon)**

1997년 2월 : 전북대학교 전자공학과 (공학사)  
1999년 2월 : 전북대학교 전자공학과 (공학석사)  
2001년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원 항공드론연구소 수석 연구원  
※관심분야 : 항공기용 임무컴퓨터, 항공기용 다기능 시험기, 항공기용 비행제어 컴퓨터



**우 희 승 (Hui-seung Woo)**

2012년 2월 : 광운대학교 전자공학과 (공학사)  
2011년 10월 ~ 현재 : LIG넥스원 항공드론연구소 선임 연구원  
※관심분야 : 항공전자, 항공기용 비행제어 컴퓨터



**서 인 범 (Inn-beom Seo)**

2010년 2월 : 강원대학교 전기전자공학과 (공학사)  
2012년 2월 : 강원대학교 전기전자공학과 (공학석사)  
2018년 7월 ~ 현재 : LIG넥스원 항공드론연구소 선임 연구원  
※관심분야 : 항공기용 비행제어 컴퓨터



**안 태 식 (Tae-Sik Ahn)**

2001년 2월 : 경북대학교 전자전기공학 (공학사)  
2011년 8월 : 경북대학교 통신공학 (공학석사)  
2011년 11년 ~ 현재 : LIG넥스원 항공드론연구소 수석연구원  
※관심분야 : 항공전자, 항공기 탑재 컴퓨터, 항공용 비행제어컴퓨터