다중구조관리자 특성이 반영된 확률모델 기반의 몬테카를로 신뢰도 해석 기법 연구

Reliability Analysis of a System with Redundancy Management Based on Monte-Carlo Probability Model

김 성 수*, 박 상 혁, 김 성 환, 최 기 영, 박 춘 배, 하 철 근

(Sung-Su Kim¹, Sanghyuk Park¹, Sung-Hwan Kim¹, Keeyoung Choi¹, Choon-Bae Park¹, and Cheol-Keun Ha²)

¹Inha University

²University of Ulsan

Abstract: Critical systems with high reliability feature fault tolerant redundancy. Conventional analytical reliability analysis methods that use the Reliability Block Diagram do not adequately reflect characteristics of the redundancy management system and are not suitable for this applications. This paper uses Monte-Carlo method to calculate the reliability of complicated redundant systems. The method was first validated for cases with analytical solutions. Then, the tool was successfully applied to analyze reliability of the flight control systems with a voter as redundancy management system.

Keywords: reliability, redundancy, monte-carlo, reliability block diagram

I. 서론

고신뢰도를 요구하는 비행제어시스템과 같이 고장허용(fault tolerant) [1] 기능이 포함된 시스템은 신뢰도 요구조건을 만족하도록 설계하기 위해 다양한 해석기법을 적용하여 신뢰도 성능을 검증한다. 고장허용 시스템은 신뢰도를 높이기 위한 하나의 방안으로 하드웨어 여분방식과 해석적 여분방식을 적용한다. 하드웨어 여분방식은 동일한 기능을 수행하는 모듈을 2개 이상 구성하는 것으로 이를 다중구조 시스템이라 한다. 전자부품으로 구성된 하드웨어 다중구조 시스템의 일반적인 설계 지침과 신뢰도 해석방법은 MIL-HDBK-338B, "Electronic Reliability Design Handbook" [2]에서 제시하고 있다.

신뢰도를 만족시키기 위한 다중구조 시스템의 설계는 RBD (Reliability Block Diagram) 기법을 이용하여 신뢰도를 해석하고 그 결과에 따라 다중구조의 수준을 결정하게 된다[3-5]. RBD 기법은 하드웨어의 직렬구조, 병렬구조에 대한 수치 모델을 구성하고 블록형태의 단위모듈을 이용하여 구성된 시스템의 신뢰도를 해석하는 것이다. 시스템의 신뢰도는 전적으로 하드웨어의 신뢰도에 종속되기 때문에, 이 기법을 이용하면 서로 다른 다중구조 시스템의 신뢰도 차이[6]를 명확히 파악할 수 있어 다중구조 시스템 설계과정에서 매우 유용하게 사용된다.

하지만 RBD 해석기법에 적용되는 수치 모델은 다중구조를 구성하는 모든 하드웨어에서 고장이 발생할 경우를 가정하여 신뢰도 해석을 수행한다. 이러한 가정이 성립하기 위해서는 다중구조를 구성하는 시스템의 고장탐지 능력이 100% 가능해야 한다. 그러나 이러한 고장탐지는 현실적으로 불가능하기 때문에 RBD 해석기법의 신뢰도 해석 결과는 고장탐지 능력을 반영하지 못함으로 인해, 해석 결과에 허수가 포함될 수 있다.

다중구조 시스템의 고장허용 기능을 최대한 발휘하기 위해서는 여분의 하드웨어와 더불어 이를 뒷받침 할 수 있는 다중구조 관리자(RM: Redundancy Management) [7]와 고장허용 프로그램의 역할이 매우 중요하다. 다중구조 관리자는 대표적으로 신호선택기(voter)를 사용하고, 고장허용 프로그램은 고장 탐지/분리/재구성(FDI: Fault Detection & Isolation)을 수행하는 해석적 방법을 말한다. 기존의 RBD 해석기법은 여분의 하드웨어가 구성된 형태에 따라 신뢰도를 해석하기 때문에, 다중구조 관리자가 포함된 현실적 시스템의 신뢰도를 반영하는데 한계가 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해 확률모델 기반의 몬테카를로(monte carlo) 해석기법을 신뢰도 해석과정에 적용[8-10]한다.

본 논문에서는 다중구조 시스템의 신뢰도 해석을 위해 적용할 수 있는 확률 모델 기반의 몬테카를로 신뢰도 해석 기법의 타당성을 검증하였다. 타당성이 입증된 확률 모델 기반의 신뢰도 해석기법을 신호선택기가 고려된 3중 다중구조 시스템에 적용하여 신뢰도 상관관계를 살펴보았다. 확률모델을 이용하여 신뢰도를 해석할 경우 복잡한 수치 모델을 구성하지 않고 쉽게 다중구조의 신뢰도를 해석할 수 있다. 또한, 신호선택기와 같은 다중구조 관리 프로그램의 구조에 따른 신뢰도를 상호 비교할 수 있어 현실적인 신뢰

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 8. 20., 수정: 2011. 9. 5., 채택확정: 2011. 9. 25.
김성수, 박상혁, 김성환, 최기영, 박춘배: 인하대학교 항공우주공학과
(kss275@hanmail.net/newhuyki@hanmail.net/dokgogizon@hotmail.com/
kchoi@inha.ac.kr/parkcb@inhatec.ac.kr)

하철근: 울산대학교 항공우주공학과(cha21c@paran.com)

※ 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었음(계약번호 UD100048JD).

도 해석 근거를 제공할 수 있다.

II. 신뢰도 해석 RBD 모델

시스템의 신뢰도(Reliability: $R(t)$)는 정해진 시간(t) 동안 고장 없이 정상동작하는 확률로써 0과 1사이의 값으로 표현된다. 이때 고장율(λ)은 지수분포를 따른다고 가정한다. 단일모듈의 신뢰도는 식 (1)과 같다. 그림 1과 같은 직렬시스템의 신뢰도 RBD 모델은 식 (2)와 같고, 그림 2와 같은 병렬시스템의 신뢰도 RBD 모델은 식 (3)과 같고, 그림 3과 같은 스위치 구조의 신뢰도 RBD 모델은 식 (4)와 같다.

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1)$$

직렬 시스템의 신뢰도 특징은 어느 하나의 부품고장이 전체 시스템의 신뢰도를 결정하게 된다. 따라서 의도된 임무기간 중에 직렬 시스템이 성공적으로 작동하기 위해서는 모든 부품이 정상 동작하여야 한다.

$$R_{SS} = R_1 \cdot R_2 \cdot \dots \cdot R_N = \prod_{i=1}^N R_i \quad (2)$$

$$= e^{-\lambda_1 t} \cdot e^{-\lambda_2 t} \cdot \dots \cdot e^{-\lambda_N t} = e^{-\left(\sum_{i=1}^N \lambda_i\right) t}$$

여기서 λ : 고장율, t : 운용시간, N : 모듈의 수이다.

병렬 시스템의 신뢰도 특징은 시스템 내의 모든 부품에서 고장이 발생할 경우 시스템 고장으로 나타난다. 따라서 그림 2와 같은 병렬 시스템이 정상 동작하는 상태는 시스템 내에 존재하는 N 개의 부품 중 적어도 한 개 이상이 동작하는 상태를 말한다. 병렬 시스템의 신뢰도 모델에는 고장발생 확률에 대한 불신뢰도 $Q(t)$ 가 사용된다.

그림 1. 직렬 시스템.

Fig. 1. Serial system.

그림 2. 병렬 시스템.

Fig. 2. Parallel system.

그림 3. 대기 시스템.

Fig. 3. Standby system.

$$R_{SP} = 1 - Q_1 \cdot Q_2 \cdot \dots \cdot Q_N = 1 - \prod_{i=1}^N Q_i \quad (3)$$

$$= 1 - \prod_{i=1}^N (1 - R_i)$$

대기 시스템의 신뢰도 특징은 병렬 시스템과 유사한 구조이지만, 유휴 상태로 대기하고 있는 부품이 존재하고, 고장을 감지해서 전환하는 별도의 추가 장치가 존재한다.

$$R_{SB} = e^{-\lambda t} \left[1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \dots + \frac{(\lambda t)^{n-1}}{(N-1)!} \right] \quad (4)$$

III. 신뢰도 해석 수치 모델

병렬 다중구조 시스템의 신뢰도 해석은 식 (5)와 같이 단위 모듈의 고장발생확률에 대한 교집합으로 정의된 불신뢰도 $Q(t)$ 로 표현된다. 시스템에서 신뢰도 $R(t)$ 와 불신뢰도 $Q(t)$ 의 합은 항상 1이다.

$$Q_{parallel}(t) = P(C_{1f}(t) \cap \dots \cap C_{Nf}(t)) \quad (5)$$

$$Q(t) + R(t) = 1 \quad (6)$$

여기서 $Q(t)$: 불신뢰도(고장확률)

$R(t)$: 신뢰도

$P(C_{Nf})$: N 번째 단위모듈 고장확률

여기서 식 (5)와 같은 모델은 병렬시스템을 구성하는 N 개의 모듈이 모두 고장날 경우를 가정한 것이고, 이는 RBD 기법을 이용한 신뢰도 해석 과정에서 동일하게 적용된다. 이론적으로 N 개의 모듈이 모두 고장날 확률을 신뢰도 해석의 기준으로 삼는것은 매우 타당해 보이지만, 대부분의 현실적인 다중구조 시스템은 신호선택기를 적용하여 고장에 대처한다. 가장 대표적인 신호선택기는 N 개의 시스템에서 다수의 신호를 참으로 선택(majority voter)하는 방식과 중간값을 선택[11,12]하는 방식이 있다. 이러한 신호선택기를 사용할 경우 N 개의 모듈 중에서 최종 2개의 모듈만 존재할 경우 참값을 선택하는 것은 매우 어렵고, 만약, 단일채널모니터링(ILM: In-Line Monitoring) 기법이 적용될 경우 제한적인 고장 검출 기능이 가능해 진다. 따라서 다중구조 시스템의 신뢰도 해석은 이러한 신호선택기의 특징을 반영할 수 있도록 해석 모델을 재구성해야 한다.

신호선택기를 고려한 신뢰도 해석 모델을 구성하기 위해 다중구조 시스템의 가장 기본 구성이 되는 3중 다중구조를 대상으로 하였다. 신호선택기가 포함된 3중 다중구조는 그림 4와 같고 이러한 시스템을 TMR (Triple Modular

그림 4. 신호선택기가 있는 3중 다중구조.

Fig. 4. TMR system with voter.

표 1. TMR 시스템의 고장 발생 조합.

Table 1. Failure combination of TMR.

고장 발생 정도	고장의 조합
하나의 모듈 고장	$A_F B_N C_N, A_N B_F C_N, A_N B_N C_F$
두 개의 모듈 고장	$A_F B_F C_N, A_N B_F C_F, A_F B_N C_F$
세 개의 모듈 고장	$A_F B_F C_F$
N : 정상동작, F : 비정상 동작	

Redundancy)이라 하고, 좀 더 일반화된 N 개의 모듈로 구성된 다중구조 시스템을 NMR (N-Modular Redundancy)라고 한다.

3중 다중구조 시스템에서 단위 모듈의 고장 발생 경우의 수는 7로써 표 1에 표현된 것처럼 하나의 모듈에서 고장이 발생하거나, 두 개의 모듈에서 고장이 발생하거나, 세 개의 모듈 모두 고장이 발생하는 경우이다. 3중 다중구조 시스템에서 일반적으로 적용되는 신뢰도 해석 대상은 3개의 모듈에 고장이 발생하는 경우이고, 신호선택기가 포함된 현실적 구조의 신뢰도 해석 대상은 3개의 모듈 중에서 2개 이상의 모듈에서 고장이 발생할 경우이다. 즉, 다중구조를 구성하는 신호선택기의 기능에 따라 신뢰도 해석 모델이 달라져야 한다. 이와 같이 시스템 구조를 고려한 신뢰도 해석 수치 모델은 다음과 같이 구성할 수 있다. 단, 신뢰도 해석에 필요한 수치 모델을 구성하는데 있어 단위 모듈의 신뢰도는 모두 동일하다고 가정하였다. 여기서 $P(C_{Nf})$ 는 N 번째 모듈이 고장날 확률이다.

$$R_1(t) = R_2(t) = R_3(t) \quad (12)$$

우선 3개의 모듈이 모두 고장날 확률모델은

$$Q_{triple,3f}(t) = P(C_{1f}(t) \cap C_{2f}(t) \cap C_{3f}(t)) \quad (13)$$

이고, 이를 신뢰도 해석에 필요한 수치 모델로 재구성하면 다음과 같다.

$$R_{triple,3f}(t) = 1 - Q_{triple,3f}(t) = 1 - (1 - R(t))^3 \quad (14)$$

3개의 모듈 중에서 2개 이상의 모듈이 고장날 확률모델은

$$Q_{triple,2f} = P(C_{1f}(t) \cap C_{2f}(t)) + P(C_{1f}(t) \cap C_{3f}(t)) + P(C_{2f}(t) \cap C_{3f}(t)) - 2P(C_{1f}(t) \cap C_{2f}(t) \cap C_{3f}(t)) \quad (15)$$

이고, 이를 신뢰도 해석에 필요한 수치 모델로 재구성하면 다음과 같다.

$$R_{triple,2f} = 1 - Q_{triple,2f} = 3[1 - (1 - R(t))^2] - 2[1 - (1 - R(t))^3] \quad (16)$$

3개의 모듈 중에서 1개 이상의 모듈이 고장날 확률모델은

$$Q_{triple,1f} = P(C_{1f}(t)) + P(C_{2f}(t)) + P(C_{3f}(t)) - P(C_{1f}(t) \cap C_{2f}(t)) - P(C_{1f}(t) \cap C_{3f}(t)) - P(C_{2f}(t) \cap C_{3f}(t)) + P(C_{1f}(t) \cap C_{2f}(t) \cap C_{3f}(t)) \quad (17)$$

이고, 이를 신뢰도 해석에 필요한 수치 모델로 재구성하면

다음과 같다.

$$R_{triple,1f} = 1 - Q_{triple,1f} = 3[1 - (1 - R(t))] - 3[1 - (1 - R(t))^2] + [1 - (1 - R(t))^3] \quad (18)$$

IV. 확률모델 기반 신뢰도 해석기법

하드웨어의 신뢰도는 식 (1)과 같이 고장확률의 함수로 정의된다. 이러한 원리를 바탕으로 다중구조의 신뢰도 분석에 고장확률모델을 구성하여 몬테카를로 해석기법을 적용한다. 하드웨어의 수명주기(life cycle) 동안 고장을 분포는 그림 5와 같은 육조곡선의 형태로 표현된다. 하드웨어의 사용시간에 따라 감소형, 일정형, 증가형 고장을 함수로 표현되는데 일반적으로 시스템이 정상동작하여 적용되는 시점은 일정형 고장을 함수 구간이다. 이 구간은 우발고장 기간으로서 내용수명으로 정의되고, 신뢰도 확률에 따라 고장 발생확률은 균등분포(uniform distribution)로 표현된다. 따라서, 확률모델 기반의 몬테카를로 신뢰도 해석을 위한 고장 발생 모듈은 균등분포함수를 적용하는 것이 타당하다.

정리 1: 중심극한정리(central limit theorem)

평균이 μ 이고 분산이 σ^2 인 임의의 모집단에서 n 개의 표본을 추출할 경우 n 이 충분히 크다면, 모집단의 확률분포형태와 상관없이 표본평균($\bar{X}$)의 확률분포는 평균 $E(\bar{X}) = \mu$ 이고, 표준편차 $\sigma(\bar{X}) = \sigma/\sqrt{n}$ 인 정규분포에 근사하게 된다. 이는 표본평균이 서로 독립 확률변수들의 합으로 간주할 수 있다.

정리 1에 근거하여 참고문헌[13]에서 증명한 것처럼 몬테카를로 신뢰도 해석에 필요한 반복실행 횟수는 95% 신뢰도 구간에서 약 300회를 수행한다.

하드웨어 고장확률을 이용한 몬테카를로 신뢰도 해석 기법의 구성은 그림 6과 같다. 우선 하드웨어 고장율(failure rate)에 근거하여 고장확률을 입력하고, 이 확률에 따라 0과 1사이의 균등분포 난수를 발생시킨다. 하드웨어의 고장확률은 고장율 또는 고장간평균시간(MTBF: Mean Time to Failure)을 식 (1)에 적용하여 정한다. 발생된 난수로부터 시

그림 5. 육조 곡선.

Fig. 5. Bath curve.

그림 6. 몬테카를로 시뮬레이션 구성도.

Fig. 6. Configuration of monte-carlo simulation.

그림 7. 수치모델과 확률모델의 신뢰도 비교-3개 모듈 고장.

Fig. 7. Math model vs probability model- 3module failure.

그림 8. 수치모델과 확률모델의 신뢰도 비교-2개 이상 모듈 고장.

Fig. 8. Math model vs probability model- more then 2module failure.

시스템의 고장을 결정하고 다중구조 관리 소프트웨어의 영향을 고려하여 신뢰도를 분석한다. 시스템 고장의 판단은 생성된 난수가 초기 입력값인 고장 발생확률에 포함되는 것을 기준으로 정상/고장을 판단한다.

확률모델에 의해 발생된 모듈의 고장은 다중구조관리 소프트웨어의 구조에 따라 시스템 고장으로 전이되는지 판별하여 신뢰도 분석 결과에 반영한다. 시스템의 신뢰도는 시간에 대한 함수이므로 해석기간 (t) 범위 내에서 시간간격을 정하고 그림 6과 같은 과정을 300회 반복수행하여 다중화 수준이 고려된 신뢰도를 도출한다.

고장 확률모델에 근거한 몬테카를로 신뢰도 해석기법의 타당성을 확인하기 위해 신뢰도 수치 모델과 확률모델의 신뢰도 해석 결과를 비교하였고, 그 결과는 그림 7, 그림 8과 같다. 그림 7은 3중 다중구조 시스템에서 3개의 모듈이 모두 고장날 경우로써 수치모델 식 (14)와의 비교 결과이고, 그림 8은 3중 다중구조 시스템에서 2개 이상의 모듈이 고장날 경우로써 수치모델 식 (16)과의 비교 결과이다. 두 경우에서 확인할 수 있듯이 수치모델 또는 확률모델에 근거한 몬테카를로 신뢰도 해석기법의 해석 결과가 동일하여, 본 논문에서 제시한 확률모델 신뢰도 해석기법의 타당성을 확인하였다. 신뢰도 해석에 확률모델을 사용하는 이유는 복잡한 수치모델을 구성할 필요없이 단위모듈의 고장을 정보로부터 신뢰도를 구할 수 있다. 그리고 기존의 RBD 해석기법이 전적으로 하드웨어 다중구조에 대한 해석결과인데 반해, 확률모델을 사용할 경우 다중구조 관리자에 의한 시스템 구조를 신뢰도 해석에 반영할 수 있는 장점이 있다.

V. 확률모델 기반 신뢰도 해석 결과

해석기법으로서 타당성이 입증된 고장 확률모델 기반의 신뢰도 해석기법을 신호선택기가 포함된 3중 다중구조 시스템의 신뢰도 해석에 적용하여, 다중구조 수준과 신뢰도의 상관관계를 검토하였다.

그림 9. 3중 다중구조 신호선택기[12].

Fig. 9. Triple modular redundancy voter[12].

그림 10. 다중구조 신뢰도 해석 모델.

Fig. 10. Redundant system for reliability analysis model.

신뢰도 해석에 사용된 신호선택기는 3중 다중구조에서 가장 일반적으로 사용되는 중간값 신호선택기로서, 그 구조는 그림 9와 같다. 중간값 신호선택기는 3개의 모듈이 모두 정상일 경우 3개의 입력 신호 중에서 중간값을 출력으로 선택한다. 고장검출은 중간값 출력신호와 3개의 입력신호를 각각 비교하여 그 차이가 설정된 문턱값(threshold)보다 클 경우 고장으로 판단하고 그 입력을 시스템에서 제외한다. 하나의 고장 신호가 제외되면 나머지 두 개의 신호는 평균값을 취하여 출력하고, 이때 두 개의 모듈로는 고장판별이 어렵기 때문에 이러한 신호선택기가 적용된 다중구조를 1차 고장허용 시스템으로 정의한다. 이러한 신호 선택기는 고장 검출, 고장의 분리 그리고 재구성이 가능한 3중 다중구조의 능동적 신호선택기에 해당한다. 추가적으로 1차 고장 이후 2개의 모듈만 존재할 경우 해석적 여분방식(analytical redundancy method)를 적용하여 개별 모듈의 고장을 검출하고 분리할 수 있다면, 수치모델 식 (14)와 같은 3개의 모듈이 모두 고장날 경우인 이상적 구조의 시스템 신뢰도를 확보할 수 있다.

확률모델 기반의 신뢰도 해석기법을 활용하여 신뢰도 설계 요구조건을 만족시키기 위한 다중구조 시스템을 구성하였다. 시스템의 다중구조 수준은 그림 10과 같다. 전원부는 2중구조, 통합형비행제어시스템(IFCS: Integrate Flight Control System)은 3중구조, 작동기 신호선택기는 2중구조, 서보모터 단일구조이다. 그림 9에 제시된 중간값 신호선택기는 통합형비행제어시스템에 소프트웨어 방식으로 구현되었다.

비행제어시스템의 신뢰도 설계 요구조건은 프레데터(predator) 무인기의 비행제어시스템 신뢰도로 알려진 7.8×10^{-5} (failure in time)이다. 배터리-통합비행제어시스템-

그림 11. 다중구조에 대한 신뢰도 해석.

Fig. 11. Reliability analysis of redundancy system.

서보모터로 구성된 단일구조일 경우 시스템의 고장율은 설계 요구조건에 약간 모자란 8.9×10^{-5} (failure in time) 임을 확인하였다. 따라서 요구조건을 만족시키기 위한 다중구조 수준을 결정하기 위해 신뢰도의 상관관계를 비교하여 적절한 시스템 구조를 결정하였다.

신뢰도 요구조건을 만족시키는 다중구조 수준을 결정하기 위해 배터리와 작동기 신호선택기는 2중구조로 고정시키고, 통합형비행제어시스템을 3중으로 구성하여 신호선택기의 구조에 따른 신뢰도 변화를 분석하였다. 설계 요구조건이 되는 기준 신뢰도를 포함하여 5가지 다중구조 구성에 대한 신뢰도를 분석하였고, 그 결과는 그림 11과 같다.

다중구조 구성은 ① 3중구조에서 모든 모듈이 고장날 경우, ② 2중구조에서 모든 모듈이 고장날 경우, ③ 3중구조에서 2개 이상의 모듈이 고장날 경우, ④ 단일구조일 경우, ⑤ 3중구조에서 1개 이상의 모듈이 고장날 경우이고, ⑥ 설계 요구조건에 대한 기준 신뢰도를 추가하였다. 일반적인 다중구조 시스템의 신뢰도 해석은 ⑥의 기준 신뢰도에 대해서, ④ 단일구조, ① 3개의 구성 모듈에서 모두 고장이 발생하는 3중구조, ② 2개의 구성 모듈에서 모두 고장이 발생하는 2중구조에 대한 신뢰도 결과를 비교하여 시스템 설계에 반영한다. 하지만 신호선택기의 구조를 고려할 경우 1차 고장허용 시스템이 적용된 ③ 3중구조에서 2개 이상의 모듈이 고장날 경우와 ⑤ 3중구조에서 1개 이상의 모듈이 고장날 경우와 같이 다중구조와 비슷한 유형이지만 신호선택기가 없는 시스템의 신뢰도를 추가하였다. 일반적으로 다중구조 시스템을 설계하는데 있어 ①, ②는 설계 요구조건을 만족시키는 범위에 속한다. 하지만 이와 같은 다중구조는 단일모듈에서도 완벽한 고장검출 기능이 요구됨으로 인해 현실적인 시스템의 신뢰도를 반영한다고 볼 수 없다. 이러한 이유로 인해 3중구조에서 중간값 신호선택기의 특성이 반영된 ③의 결과가 보다 현실적인 신뢰도 해를 제시하고 있음을 확인하였다.

VI. 결론

본 논문에서는 다중구조 시스템 설계과정에서 요구되는 신뢰도 해석기법에 대해 연구하였다. 일반적인 신뢰도 해석 기법으로 RBD가 사용되고 있지만, 여기서 제시하는 신뢰도는 이상적인 시스템 고장의 해이기 때문에, 신호선택기가 포함된 다중구조의 현실적 신뢰도 해를 구하기 위한 고장 확률모델을 적용한 몬테카를로 신뢰도 해석기법을 제안하였다. 제안된 기법은 신뢰도 수치모델을 구성하여 그 결과와 비교함으로써 해석결과의 타당성을 입증하였다. 확률모델에 의한 신뢰도 해석 기법을 적용하여 다중구조 구성과 신뢰도의 상관관계를 검토하여 신호선택기의 영향이 반영된 현실적인 신뢰도 해석 결과를 얻을 수 있었다. 이러한 결과를 토대로 신호선택기를 포함한 다양한 고장허용 프로그램이 반영된 다중구조 시스템의 신뢰도 해석에 매우 유용한 기법으로 활용될 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] Giorgio Turconi · Italtel spa · Milan, Ermelinda Di Perna · Italtel spa · Milan, "A design tool for fault tolerant systems," *Proc. Annual Reliability and Maintainability Symposium*, pp. 317-326, 2000.
- [2] MIL-HDBK-338B *Electronic reliability design handbook*, Department of Defense, 1998.
- [3] A. Abd-Allah, "Extending reliability block diagrams to software architectures," Technical Report USC-SCE-97-501, 1997.
- [4] A. Einstein, "Reliability block diagrams analysis and tactics," Technische Universiteit Eindhoven, 2007.
- [5] S. S. Kim, S. H. Park, S. H. Kim, K. Y. Choi, C.-K. Ha, and C.-B. Park, "Development of Reliability Block Diagram Analysis Tool for H/W Redundancy Structure based on Unit Module," *KSAS*, vol. 37, no. 6, pp.

595-601, Jun. 2009.

- [6] S. S. Kim and C. B. Park, "Design for flight control system focused on reliability," *KSAS*, vol. 33, no. 6, pp. 33-40, Nov. 2005.
- [7] D. S. Kim, "FCS flight safety and redundancy management-triple redundant sensor simultaneous fault detection and isolation," Gyeongsan National University master paper, Dec. 2005.
- [8] T. H. Kim, K. H. Chung, and T. K. Oh, "Monte-carlo approach to develop probabilistic reliability assessment program," *KIEE*, pp. 533-535, Nov. 2008.
- [9] T. Y. Son, "Development of an algorithm for system reliability calculation based on monte carlo simulation," Sungkyunkwan University master paper, Dec. 2009.
- [10] B. Korver, "The Monte-Carlo method and software reliability theory," *TR94-1*, Feb. 1994.
- [11] J. M. Ahn, S. S. Lim, J. S. Ko, and C. S. Kim, "Comparative analysis of voting algorithm for redundant flight control system," *KSAS06-2302*, pp. 321-324, Nov. 2006.
- [12] J. M. Kim, J. H. Park, S. A. Jang, C. B. Park, and I. S. Rhee, "Realization of sensor fault and voter model for design of fault tolerance flight control system," *KSAS06-1105*, Apr. 2006.
- [13] P. Zarchan, "Comparison of statistical digital simulation methods," *AGARD-AG-273*, 1998.

김 성 수

2002년 조선대 항공우주공학과(공학사) 졸업. 2005년 인하대 대학원 석사. 2011년 동 대학 박사. 2011년~현재 인하대학교 항공우주공학과 박사후과정. 관심분야는 비행제어시스템, 신뢰성 공학, 고장허용 시스템.

박 상 혁

2006년 인하대 항공우주공학과(공학사) 졸업. 2008년 동 대학원 석사. 2008년~현재 인하대학교 항공공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 유도탄 유도제어, 최적제어, 무인기 시스템.

김 성 환

2001년 인하대 항공우주공과(공학사) 졸업. 2003년 동 대학원 석사. 2003년~현재 인하대학교 항공공학과 박사과정 재학중. 2005년~2006년 한국항공우주연구원 스마트무인기 비행시험 수행. 관심분야는 비행제어시스템, 임베디드 소프트웨어, 실시간 운영체제, 편대비행 알고리즘.

최 기 영

1987년 서울대 항공우주공학과(공학사) 졸업. 1989년 동 대학원 석사. 1994년 Stanford University(Ph.D in Aeronautics and Astronautics) 졸업. 1993년~1999년 Advanced Rotorcraft Technology, Inc, Senior Aerospace Engineering. 2000년~현재 인하대학교 교수. 관심분야는 최적제어, 무인기 항법/제어, 회전익 시뮬레이션.

박 춘 배

1974년 서울대 항공우주공학과(공학사) 졸업. 1976년 동 대학원 석사. 1976년~1980년 공군사관학교 교관(전임장사). 1989년 서울대학교 항공우주공학과(공학박사) 졸업. 1980년~현재 인하대학교 교수. 2007년~현재 인하공업전문대학 총장. 관심분야는 항공전자, 비행제어, 시뮬레이터.

하 철 군

1984년 서울대 항공공학과 졸업. 1986년 동 대학원 석사. 1993년 미국 워싱턴대 항공우주공학과 박사. 1993년~현재 울산대학교 항공우주공학과 교수. 관심분야는 강건 디지털제어 이론 및 적용, 적응적 지능제어, 무인기(UAV)의 자동항법 및 유도제어.