

## 우주발사체 비행안전 분석시스템 개발

최규성\*, 고정환\*\*, 심형석\*\*\*, 노웅래\*\*\*\*

# Development of Flight Safety Analysis System for Space Launch Vehicle

Kyu-Sung Choi\*, Jeong-Hwan Ko\*\*, Hyung-Seok Sim\*\*\*, Woong-Rae Rho\*\*\*\*

### Abstract

Flight safety analysis, which includes risk estimation for the various abnormal flight modes in addition to normal flight, has to be performed necessarily to guarantee launch safety for the operation of space launch vehicles. For this purpose, a dedicated system has been developed such that all the necessary repetitive computations, result reports, and graphical presentations can be performed inside a single system for user convenience. In addition, the developed system is capable of representing computed results on a three dimensional Earth for the realistic presentation. The developed Flight Safety Analysis System will be employed for the launch operation of Korea Satellite Launch Vehicle-I.

### 초 록

비행안전분석은 우주발사체 발사운용시의 안전보장을 위하여 반드시 수행되어야 하며, 여러 가지 비정상 비행상황에 대한 위험분석을 포함한다. 비행안전 분석시스템은 요구되는 다양한 반복적 계산과 결과 생성 및 도시화를 한 시스템 내에서 처리할 수 있도록 하여 사용자 편의성을 증가시키도록 개발되었으며, 또한 삼차원 지구면 상에 결과를 표시하도록 하여 보다 실질적인 결과 표현이 가능하도록 하였다. 개발된 비행안전 분석시스템은 소형 위성발사체 발사운용을 위해 사용된다.

키워드 : Flight Safety(비행 안전), Risk Analysis(위험 분석), Expected Casualty(인명 피해), Space Launch Vehicle(우주발사체)

## 1. 서 론

다량의 연료를 싣고 장거리를 비행하는 우주 발사체의 발사에 있어 사전 안전 분석은 필수적

이다. 우주발사체 비행안전측면에서 비행안전 분석은 정상 및 비정상 비행(조기연소종료, 비행중 단시시스템 작동, 폭발 및 파괴 등)으로 인해 발생 되는 낙하물 또는 파편들의 낙하점 및 낙하분산

접수일(2007년12월18일), 수정일(1차 : 2008년 10월 23일, 2차 : 2008년 10월 27일, 게재 확정일 : 2008년 11월 1일)

\* 임무설계팀/kschoi@kari.re.kr

\*\* 임무설계팀/jko@kari.re.kr

\*\*\* 임무설계팀/aeroshs@kari.re.kr

\*\*\*\* 임무설계팀/rwr@kari.re.kr

영역을 계산하여 인명, 선박 그리고 항공기 등에 미치는 영향을 분석하는 과정이다. KSLV-I 발사시의 비행안전분석을 위하여 개발된 비행안전 분석시스템(FSAS:Flight Safety Analysis System)은 비행안전 분석에 필요한 틀(파편의 낙하영역, 발사체의 위험도 분석, 비행안전영역설정, 파괴선 설정 등)을 효율적으로 제공하고 계산결과는 3차원 지구상의 세계 지도에 제시하도록 구성되었다. 본 시스템은 크게 세계지도를 포함한 소프트웨어 부분과 분석알고리즘을 제공하는 모듈로 구성되어 있다. 소프트웨어는 초기데이터(인구데이터, 선박데이터, 항공기 데이터, 세계지도, 발사체 정보, 비정상 모드별 파편정보, 바람데이터, 외란 프로파일 등)를 구조화하여 분석 알고리즘 모듈과 연계시켜 지도상에 결과 전시를 하며 세계지도는 상용프로그램인 구글어스와 유사한 방식으로 개발되어 사용자에게 편의성을 제공하고 있다. 분석알고리즘 모듈은 비정상기동모듈, 정상궤적에서의 실패모드모듈, 인명피해모듈, 충돌확률모듈, 진공낙하점 모듈, 공력을 고려한 낙하점 모듈, 바람 및 공력 모듈, 6자유도 모듈 등을 포함하고 있어 다양한 비정상 시나리오를 적용하여 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 결과를 산출한다. 이외에도, FSAS는 측정된 바람 데이터 등을 이용한 비행안전 모델의 수정 및 보완 기능도 가지고 있으며, 발사체의 형상, 기본궤도, 비정상 비행 궤도의 데이터를 이용하여 분석을 수행한다. 본 논문에서는 우주발사체 비행안전 분석을 위해 적용된 비행안전분석법에 대하여 기술한 후, 구현된 시스템의 구성과 기능에 대하여 설명한다.

## 2. 비행안전 분석 방법

일반적으로 비행안전분석은 다음과 같은 절차를 진행한다. 우선, 발사체의 폭발 또는 분해시 발생하는 파편을 단위면적, 질량, 모양 등이 유사한 그룹별로 나누고 각 파편그룹에 대한 불확실성 모델을 추정한다. 그리고 비정상 비행모드는 비행궤적을 따라 폭발 및 분해가 일어나는 경우와 횡방향 기동으로 인해 예상낙하점이 파괴선을

벗어나는 비정상 턴으로 나누어 각각의 실패 확률을 산출한다. 이후 앞에서 산출된 실패 확률과 불확실성 모델을 통해 발사체의 현재 상태벡터(속도, 위치)를 수정한 후, 예상낙하점 계산모듈을 통하여 빠르고 정확하게 낙하점들을 계산한다. 마지막으로, 발사체의 비정상 비행시 파편의 낙하분산영역을 추정하여 인명 피해(Expected Casualty, Ec)와 선박, 항공기에 미치는 영향을 분석하게 된다. 또한 비행중단시스템 작동시 지연되는 시간이 있으므로 사전에 정해진 낙하한계선(impact limit line)을 통과하기 전에 파괴선(destruct line)을 결정하여 비행안전 통제원에게 제공하는 역할을 하게 된다. 전체적인 비행안전 분석 절차는 아래 그림과 같다.[1]

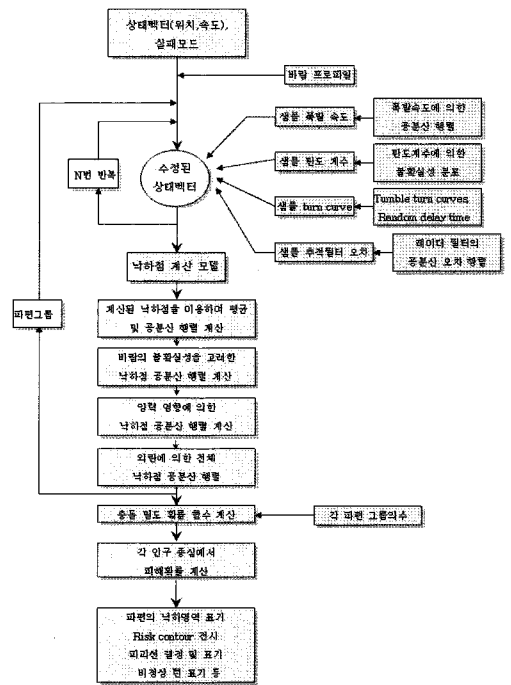


그림 1. 비행안전 분석 절차

### 2.1 파편모델

파편 데이터는 각 실패모드에 따라 다르게 생성되므로 모드별로 생성되는 파편 그룹 및 특성들이 우선 구성되어야 한다. 발사체 파괴 또는 폭발시 생성된 파편은 아래의 특성들이 유사한

파편들끼리 모아서 동일 그룹으로 분류한다.

- 중량
- 최대 단면적
- 탄도계수
- 증분속도(모드별)
- 모양

## 2.2 파편의 불확실성 모델

발사체의 파편그룹이 구성되면, 발사체의 분해(breakup), 폭발 및 FTS 작동으로 인해 발생된 파편의 낙하점 및 낙하분산영역을 예측하는 모델을 구성하게 된다. 여기에는 6가지의 불확실성 모델을 내포하고 있는데 그 중 4가지는 비선형 지배방정식을 반복적으로 계산하여 그 결과를 통계학적으로 해석하는 Monte Carlo 시뮬레이션을 사용하고, 나머지 2가지는 선형 모델을 사용한 공분산 해석을 적용하여 분산영역을 구해낼 수 있다. 6가지의 불확실성 모델은 다음과 같다.[7]

- 레이더 필터의 측정 에러  
우주센터 내에서 비행안전 분석을 실시간으로 계산 할 경우 레이더 필터의 측정에러를 고려하여야 한다. 그러므로 상태 벡터(위치,속도)에 포함된 측정에러는 예측모델(칼만 필터등)를 통해서 예측 가능하다. 예측된 상태벡터와 레이더에서 측정된 상태벡터 사이의 관계를 이용하면 상태벡터를 보정할 수 있는 공분산 행렬을 얻을 수 있다.
- time delay  
FTS를 작동시키기 위해 지상에서 발사체에 보내 응답하는데 소요되는 시간이다. 발사체가 궤적에서 벗어나거나 회전하는 비정상 기동에서 중단명령을 보내는데 지연되는 시간은 대략 3-5초 정도이다. time delay를 고려한 비정상 턴의 상태벡터에 대한 공분산 행렬을 구하게 된다.
- 폭발시 발생하는 파편의 증분속도  
발사체가 폭발하면서 발생하는 파편은 증분속도와 방향에 의해서 낙하점 분산 영역에 영향을 주게 된다. 속도의 크기는 Maxwellian 확률 분포에 부합한다는 가정하에 폭발시 생성된 압력에

의해서 결정된다.

- 탄도 계수의 불확실성  
각 파편의 모양과 크기는 자유 낙하시 가해지는 공력에 영향을 주게 된다. 이 관계를 나타내는 탄도 계수( $\beta$ )는 발사체 분해 및 폭발시 불확실성을 띠고 있으므로 파편 그룹내에 있는 로그 평균 탄도계수( $\bar{\beta} = 10^{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log_{10} \beta_i}$ )를 구하여 최대, 최소가  $3\sigma$ 에 포함되도록 한다. 이 범위내에 있는 탄도 계수 값은 가우스 분포에 맞추어 형성된다고 가정하여 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 파편의 분산 영역을 구해내게 된다.
- 양력 효과(lift effect)  
파편의 자유낙하시 움직이는 면의 수직방향으로 양력이 작용하게 된다. 양력은 대체적으로 평편한 판일 경우  $\sigma_{L/D} = 0.01$ , 평평하지 않은 물체의 경우  $\sigma_{L/D} = 0.03$ , tumbling하는 파편의 경우  $\sigma_{L/D} = 0.05$ 로 가정하게 된다.

- 바람  
바람의 불확실성에 의한 영향은 고도에 따른 표준편차에 의해 파편의 낙하영역에 영향을 미치게된다. 발사체의 파편이 낙하시 한 고도 구간을 지날 때 걸리는 시간과 고도 구간별 바람의 속도 성분(동쪽, 북쪽방향)을 적용하여 수직수평좌표계(E-N좌표계)에서 바람에 의한 공분산 행렬을 구하게 된다.[5]

## 2.3 실패모드

부스터가 없는 일반적인 발사체의 비행 실패 사례들을 분석한 결과, 비행안전 분석 관점에서 발사체의 비행실패는 크게 3가지의 실패모드로 나눌 수 있다.

- 궤도상에서 추력중단
  - 엔진이상으로 자동 중단
  - FTS에 의한 추력 중단
- 궤도상에서 폭발 및 분해
  - 공력에 의한 분해
  - FTS에 의한 폭발
  - 액체 엔진 폭발

- 고체 엔진 폭발
- 비정상 기동
  - 유도제어 실패(자세 reference 손실)
  - TVC 손상
  - 피치 및 요 자세 에러

## 2.4 비정상 기동 모사

비정상 턴(malfunction turn)의 불확실성은 발사체의 회전시 발생하는 증분 속도를 계산하여 예측 가능하다. 아래 그림처럼, TVC의 각이  $\alpha$ 만큼 어긋난 상태에서 추력이 가해지면 속도 벡터는 x방향을 따라 초기 속도 벡터로부터  $\theta$ 만큼 오프셋이 발생하면서 안정된 상태에 이르게 된다.

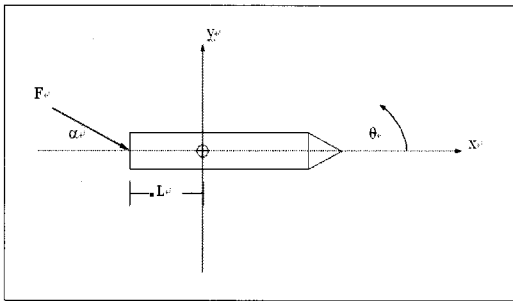


그림 2. 추력벡터에 의한 발사체 운동

그림 2에서 x-y평면과 수직축에 대해 관성모멘트(I)와 각 속도의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$I\ddot{\theta} = LF \sin \alpha$$

(F:추력, L:중력중심에서 노즐까지의거리)  
위의  $\theta$ 에 대한 운동방정식을 적용하여 각 김벌각( $\alpha_i$ )에 대한 비정상턴 속도( $V_{mft}$ )를 계산하게 되면 비정상 턴의 상태벡터에 대한 공분산 행렬을 설정할 수 있다.

## 2.5 파편의 낙하분산영역

위에 언급된 파편의 불확실성을 고려하여 파편의 낙하점을 계산하면 파편의 낙하분산영역을 나타낼 수 있다. 다음 그림은 파편의 분산영역을

설명하는 전형적인 예이다.[8]

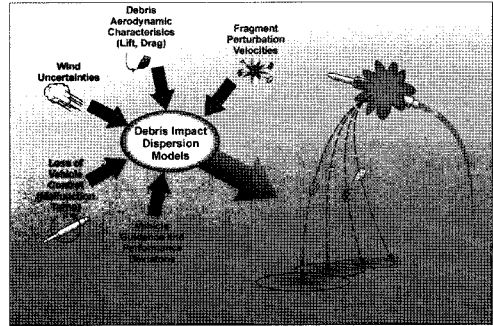


그림 3. 파편의 낙하 분산영역

## 2.6 충돌 확률밀도함수 및 $E_c$ 계산

낙하점 분산은 지표면에 낙하할 가능성을 나타내는 통계 모델을 이용해서 생성할 수 있다. 위에서 언급한 4가지 불확실한 변수(레이더 필터의 측정어러, time delay, 파편의 증분속도, 탄도 계수의 불확실성)들은 몬테카를로 시뮬레이션을 이용해서 상태벡터(속도, 위치)를 계산하여 공분산을 구하고 나머지 2가지(바람과 양력)의 불확실한 변수에 의한 공분산을 합하여 낙하점의 전체 공분산을 계산 할 수 있다. 불확실한 변수들은 가우시안 성격을 띠므로 낙하점의 공분산은 정규분포를 나타나게 된다. 계산된 전체 공분산을 각각의 비정상 모드를 적용하여 비행시간에 대한 충돌 확률 밀도 함수를 구하면 다음과 같다.[6] 우선, 각 파편그룹의 평균 낙하점( $\bar{\lambda}, \bar{\delta}$ )과 표준편차( $\sigma_\lambda, \sigma_\delta$ )를 계산하고,

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_i, \quad \bar{\delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i$$

$$\sigma_\lambda = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\lambda_i - \bar{\lambda})^2}$$

$$\sigma_\delta = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\delta_i - \bar{\delta})^2}$$

파편들의 평균낙하점과 표준편차의 상관관계계수( $\rho_{\lambda\delta}$ )를

$$\rho_{\lambda\delta} = \frac{\sum_{i=1}^n [(\lambda_i - \bar{\lambda})(\delta_i - \bar{\delta})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\lambda_i - \bar{\lambda})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\delta_i - \bar{\delta})^2}}$$

산출한다.

파편들의 평균낙하점, 표준편차 그리고 상관관계 계수를 적용하여 특정 인구 중심( $\lambda, \delta$ )에서 각 파편에 대한 충돌확률 밀도함수  $P_I(\lambda, \delta)$ 는 다음과 같다.

$$P_I(\lambda, \delta) = \frac{e^{\left\{ \frac{-1}{2(1-\rho_{\lambda\delta}^2)} \left[ \frac{(\lambda - \bar{\lambda})^2}{\sigma_\lambda^2} - \frac{2\rho_{\lambda\delta}(\lambda - \bar{\lambda})(\delta - \bar{\delta})}{\sigma_\lambda\sigma_\delta} + \frac{(\delta - \bar{\delta})^2}{\sigma_\delta^2} \right] \right\}}}{2\pi\sigma_\lambda\sigma_\delta\sqrt{1-\rho_{\lambda\delta}^2}}$$

위에서 계산된 파편 그룹별 낙하물의 인구밀집 지역에 대한 충돌확률을 이용하여 예상인명피해  $E_C$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$E_C_{ij} = P_{Iij} A_{Ci} N_{Fi} \frac{N_{Pj}}{A_{Pj}}$$

여기서,  $E_C_{ij}$  = 인구밀집지역(j)에 대한 파편 그룹(i)의 예상인명피해,  $P_{Iij}$  = 인구밀집지역(j)에 대한 파편그룹(i)의 충돌확률,  $A_{Ci}$  = 낙하물에 의한 각 파편(i)의 피해면적,  $N_{Fi}$  = 파편그룹의 파편수(i),  $N_{Pj}$  = 인구밀집지역(j)의 인구수,  $A_{Pj}$  = 인구밀집지역(j)의 면적

## 2.7 파괴선(destroy line) 결정

파괴선(destroy line)은 낙하한계선(impact limit line)내에 위치하며 비정상 비행으로 발생된 파편중 지상에 상당한 영향을 미치는 파편이 낙하한계선을 통과하는 것을 방지하는 경계선이다. 순간낙하점이 파괴선을 통과하게 되면 비행중단 명령을 발사체의 비행중단 시스템에 보내게 된다. 그러므로 파괴선은 발사전 지상에서 FTS를 작동시키는데 소요되는 시간과 비정상 탄 분석을 통하여 매초마다 시뮬레이션을 시행하여 경계점들을 연결하여 파괴선을 결정하게 된다.

## 3. 비행안전 분석시스템 구성

위에 언급된 비행안전 분석 방법에 따라, 비행안전 분석시스템은 다양한 발사체의 궤적 및 파편 모델을 적용하여 비행안전 분석을 수행할 수 있도록 구성되었다. 시스템 구성은 내부적으로 최적화된 알고리즘 모듈 및 초기데이터 인터페이스를 구축하여 분석툴에서 결과를 산출하여 전자지도 상에 전시하게 된다. 전자지도는 전 세계를 포함하고 있으며 Vector Map 형식으로 이루어져 있다. 시스템 구성도는 아래와 같다.

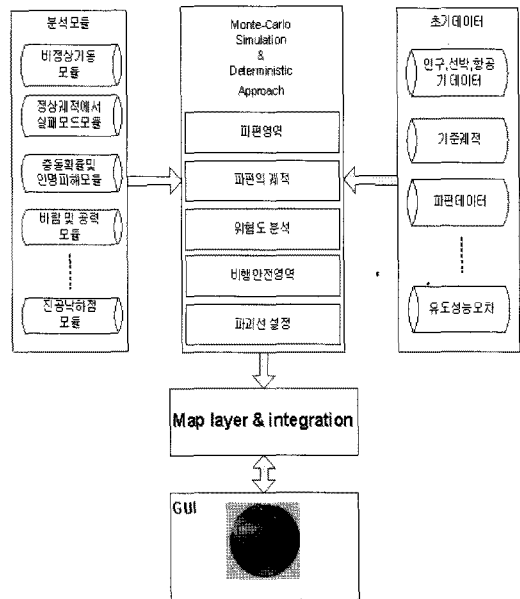


그림 4. FSAS 시스템 구성도

## 4. 비행안전 분석시스템 기능

본 시스템은 우주발사체 비정상 비행시의 파편해석에 중점을 두고 개발되어 왔지만 위성의 재진입시 공력의 영향으로 부서짐으로 인한 파편의 낙하영역 예측과 항공기의 비정상 작동으로 발생하는 파편들의 낙하점을 예측할 수 있다. 현재 개발된 FSAS는 향후 필요시 기능을 추가할 수 있도록 구성되었으며, 현재까지 구현된 기능들은 다음과 같다.

### ● 초기데이터 전시

많은 초기데이터들의 값들이 정확하게 입력되었는지 특히 격자별 인구분포 및 선박밀도를 확

인할 수 있으며 생성된 파편의 특성, 시간에 따른 폭발속도 등을 그래프 및 전자지도에서 확인할 수 있다.

- **궤도상에서의 실패모드분석 툴**

정상궤도상에서의 비행실패에 대한 분석툴로서, 폭발이 있을 경우 생성되는 파편 그룹 및 각 그룹별 폭발속도를 산출하며 엔진정지의 경우 외부의 영향없이 낙하하면서 공력하중으로 인해 부서질 때의 파편을 생성하여 파편의 궤적을 분석한다.

- **비정상 궤도분석 툴**

특정실패시간에서 제어장치 이상으로 발사체가 비정상 턴(malfunction turn) 기동을 할 경우에 대한 분석툴이다. 비정상턴의 궤적은 여러 방향 및 여러 각도의 궤적을 생성하여 파편영역 분석의 초기데이터로 전달된다. 궤적 생성시 공력하중의 경계조건을 넘지않으면 파편의 생성없이 부서지지 않은 채로 낙하하는 궤적 및 낙하점을 분석하게 된다.

- **파편영역분석 툴**

파편영역분석 툴은 여러 가지 비행실패 모드에서 산출된 파편정보를 넘겨받아 4가지 불확실한 변수(탄도계수의 불확실성, 유도성능오차, 폭발시 파편의 증분속도, FTS(Flight Termination System)를 작동시키기 위해 지상에서 발사체에 보내 응답하는데 소요되는 시간)에 의한 낙하영역분산을 몬테카를로 시뮬레이션을 이용해서 계산하고 나머지 2가지(바람과 양력)의 불확실한 변수에 의한 분산을 합하여 낙하영역의 전체 분산을 계산한다. 불확실한 변수들에 의해 낙하영역은 2차원 정규분포를 갖는다.

- **위험도 분석 툴**

위험도 분석 툴은 비행안전 분석의 최종결과를 제시하는 모듈이다. 다른 툴에서 계산된 파편의 분산영역을 토대로 각 비정상 모드에 대한 각 파편 그룹의 평균 낙하점과 불확실성을 나타내는 표준편차를 계산한다. 파편 그룹별 낙하물의 인구밀집 지역에 대한 충돌확률을 계산한 후, 최종적으로 예상인명피해 (Ec)를 계산한다. 또한, 주거지역 외에도 파편 그룹별 낙하물의 선박밀도격자에 대한 충돌확률을 이용하여 선박에 탑승중

인 사람의 인명피해(Es)를 분석한다.

- **비행안전영역설정 툴**

비행안전을 위한 위험 영역은 발사체의 비정상 기동시 개인, 선박 및 항공기를 보호하기 위해 설정된다.(발사장 주변 소개영역 - 비정상 비행시 이 영역 내에 일반인이 한 사람이라도 존재할 경우 예상인명피해확률이 기준을 초과하는 점들을 연결하는 영역, 선박소개영역- 파편에 의한 선박 피해를 구하여 그 값이 안전 기준값 이하로 되는 지점들을 연결되는 영역, 항공위험영역- 파편에 의한 항공기 피해를 구하여 그 값이 안전 기준값 이하로 되는 지점들을 연결되는 영역)

- **위험 프로파일 툴**

위험프로파일은 위험도분석툴에서 산출된 인명피해 결과를 이산적으로 사상자수에 대한 발생확률로 도시화한다. 이 프로파일은 재산손실 및 인명피해 정도를 쉽게 인지하게 하기 위하여 사용된다.

## 5. Graphical User Interface

알고리즘 분석 툴에서 산출된 파편의 낙하영역, 낙하궤적, 위험도, 비행안전영역, 파괴선등은 OpenGL 라이브러리를 통해 3차원 지구상에 전시되고 지구상의 카메라 위치를 다양하게 움직여 궤적 관찰이 가능하다. 일례로, 시작화면에서 인구데이터 및 다양한 궤적을 화면에 전시하여 데이터가 올바르게 입력되었는지 확인할 수 있다. FSAS의 메인 메뉴에서 전체적인 기능을 관리하고 데이터를 설정하는 화면은 아래와 같다.

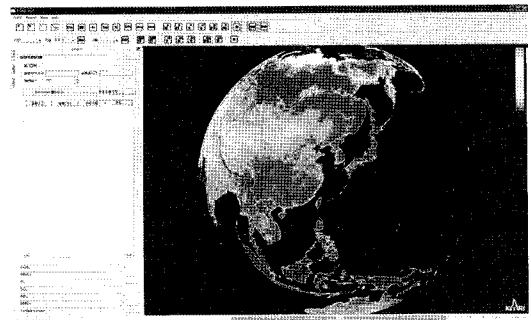


그림 5. FSAS 메인 화면

위의 메인화면상에서 Landscan에서 제공하는 세계인구분포를 나타낼 수 있으며 격자크기를 조정하여 국가 및 지역별 인구분포 전시가 가능하다.(그림 6)

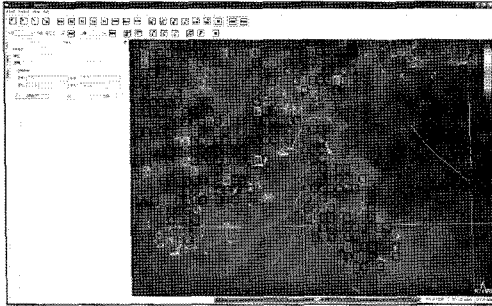


그림 6. 인구분포

또한, 생성된 여러 궤적을 다각도로 표현가능하다. 아래 그림은 특정비행실패시간에 비정상기동을 하는 궤적을 전시하고 있다.

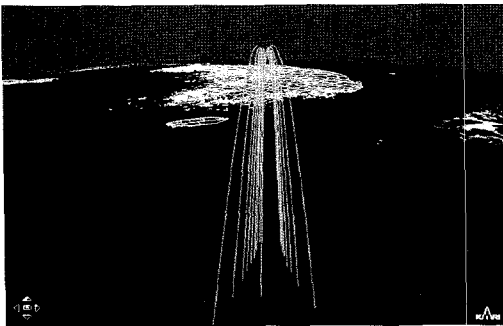


그림 7. 궤적전시

초기데이터와 알고리즘 모듈을 연결하여 분석틀을 실행하면 각각의 분석 결과를 얻게된다. 아래에 나타내는 모든 그래프는 임의로 생성된 궤적에서 산출된 결과물이다.

1) 여러 외란에 의해 고도별 낙하분산영역이 발생게 되는데, 그림8은 유도성능오차와 바람에 의해 발생된 파편의 낙하영역을 보여주고 있다.

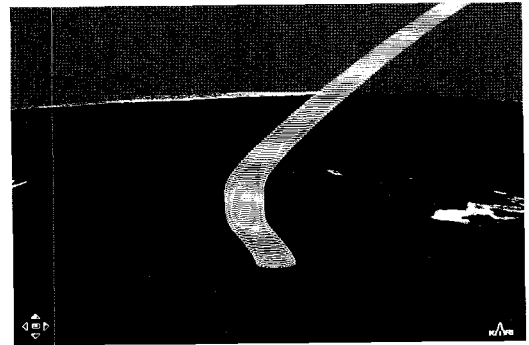


그림 8. 고도별 낙하분산영역

2) 충돌확률 - 관심지역 및 격자의 크기를 결정하여 각 격자별 파편의 충돌확률을 전시한다.

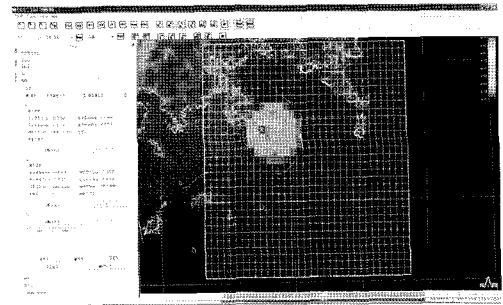


그림 9. 격자별 충돌확률

3) 공중경계영역 - 발사장 주변 및 예정낙하물 주변의 항공기 경계영역을 전시한다.

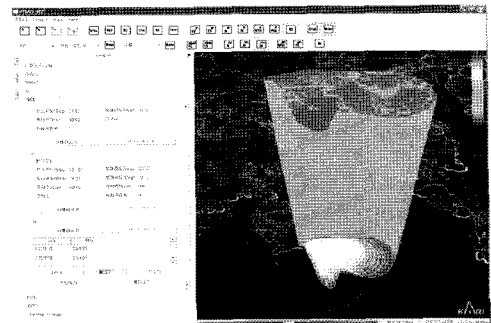


그림 10. 공중경계영역

4) 위험 프로파일 - 위험 프로파일은 이산적으로 손실 또는 사상자수에 따른 충돌확률을 도시화한다. 또한, 재산손실 및 인명피해 정도를 일반인도 인지하기 쉽게 나타낼 수 있는 장점을 지니고 있다.

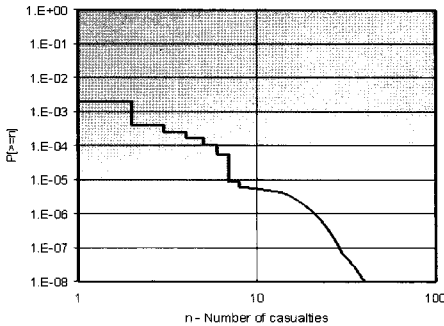


그림 11. 위험 프로파일

이밖에 시스템 기능에 설명된 결과를 전시하며 특정실폐시간에서 데이터를 전시하여 발사체의 비정상 상태를 확인하고 특정실폐시간별, 실패모드별, 격자별 파편의 낙하영역들을 저장하여 원하는 격자내에서 인명피해 및 충돌확률 등을 빠르게 전시 가능하다.

## 6. 결론

본 논문에서는 우주발사체에서 발생할 수 있는 비정상 비행시나리오에 따라 파편을 생성하여 파편의 궤도 및 위험도 분석이 가능한 비행안전분석 시스템에 대해 설명하였다. 개발된 시스템은 소형위성발사체의 비행위험도 분석에 사용될 예정이며, 필요한 분석 기능은 추후에 추가될 수도 있도록 개발되었다. 현재 본 시스템은 시간별, 파편그룹별, 격자별, 실패모드별로 반복된 계산이 많기 때문에, 전체결과를 산출하는데 많은 시간이 소요되고 있고 이에 따라 향후 연산기능을 강화하는 방안으로 연산병렬처리기능 도입과 분석모듈 최적화 방안을 강구하여 개량해 나갈 예정이다.

## 참고문헌

1. 최규성, 고정환, 심형석, 노용래, "우주발사체 비행안전 분석 방법론", 한국항공우주학회 추계학술발표회 논문집, 2006, pp. 498~501.
2. 최규성, 고정환, 심형석, 노용래, "우주발사체 비행안전분석 툴", 한국항공우주학회 추계학술발표회 논문집, 2007, pp. 374~377.
3. Victor H.L.Cheng, Gerald M. Diaz, "Flight Safety Analysis Tool for Space Vehicle Operations in the National Airspace", 2003.
4. James M. Benn, "The Risk Analysis Software Integration System", Technical Report No.16.4-04, 2000.
5. Luis Feliper Robledo, "Analysis and Integration of a Debris Model In The Virtual Range Project", 2002.
6. David E. Outka, Robert A. LaFarge, "Mission Hazard Assessment for STARS Mission 1 in the Marshall Islands Area", SAND93-0218, 1993.
7. Mark Y.Y. Lin, Erik W.F. Larson, Jon D. Collins, "Determination of debris risk to the public due to the Columbia breakup during reentry", technical report No. 03-517-01, 2003.
8. J.D. Collins, S.L. Carbon & C.P. Brinkman, "A Progress Report on Maximum Probable Loss", First IAASS Conference, 2005