

# 착륙장치용 Structural Fuse 파손확률 계산 및 개선 방안

이승규<sup>†</sup> · 김태욱\* · 황인희\* · 이정선\*\* · 조정준\*\* · 박종영\*\*\*

## Assessment for Failure Probability of Landing Gear Structural Fuse and Improvement Measure

Seunggyu Lee, Tae-Uk Kim, In-Hee Hwang, Jeong-Sun Lee, Jeong Jun Jo and Chong-Yeong Park

**Key Words :** Rotorcraft(회전익), Landing Gear(착륙장치), Structural Fuse, Failure Probability(파손확률)

### Abstract

The reason for crashworthy landing gear is to contribute to the overall aircraft design goals in the event of a crash. One of crashworthy landing gear design approaches is inclusion of structural fuse. Structural fuse is used to control the mode of failure of landing gear. If structural fuse doesn't work at desired condition, other unexpected accidents can occur. In this paper, failure probability is calculated for landing gear structural fuse and improvement measure is introduced to improve failure probability of structural fuse.

#### 기호설명

G : 한계상태식  
R : 저항요소  
L : 하중요소  
Xi : 확률변수  
P<sub>f</sub> : 파손확률  
n : 시뮬레이션 수행시 파손된 경우의 수  
N : 시뮬레이션 총 수행 수  
β : 신뢰도 지수

### 1. 서론

항공기 추락시 착륙장치에 의해 조종사 및 승객이 다치거나 연료계통으로부터 연료가 누출되어 화재로 이어져서는 안 된다. 이를 방지하는 방법은 크게 2 가지가 있다. 첫 번째, 추락시 항공기 기체나 승객에게 가해지는 힘을 줄이기 위해 착륙

장치가 에너지를 충분히 흡수/소산시킨다. 두 번째, 과도한 힘이 가해질 때 structural fuse 와 같은 것을 활용하여 착륙장치의 mode of failure 를 조정한다.[2] 두 번째 방법에 structural fuse 가 사용된다. Structural fuse 는 추락시 파손되면서 착륙장치의 failure mode 를 조정하거나 추가적인 에너지 흡수 장치를 작동시키는 중요한 역할을 한다.

Boeing 757/737/767/747, Airbus A330/340, Lockheed L1011 의 착륙장치가 두 번째 방법을 착륙장치에 적용하여 추락시 착륙장치의 failure mode 를 조정 한 예이다. Silorsky 의 S-58 은 structural fuse 가 파손되면서 착륙장치의 추가적인 에너지 흡수장치가 작동된다. Structural fuse 외에도 shear pin, shear bolt, fuse pin 등의 다양한 용어가 있지만 이들은 모두 과도한 힘이 가해질 때, 파손되는 역할을 한다.

Structural fuse 는 추락시 좀 더 안전한 착륙을 위해 고안되었다. 하지만, 추락시에만 파손되어야 한다는 제약조건을 가진다. 불확실성으로 인해 structural fuse 는 정상운용조건에서도 파손되거나 추락시에 파손되지 않을 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 structural fuse 가 정상 운용조건에서 파손될 확률과 추락시 파손되지 않을 확률을 평가하여 착륙장치가 설계자의 의도대로

<sup>†</sup> 회원, 한국항공우주연구원 세부계통팀

E-mail : lsg@kari.re.kr

TEL : (042)860-2282 FAX : (042)860-2006

\* 한국항공우주연구원

\*\* 위아 주식회사

\*\*\* 국방과학연구소

운용될 확률을 평가하였다. 또한, structural fuse 의 failure probability 를 개선하기 위한 방안을 제시하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 Structural fuse

Structural fuse 는 전자부품 중 fuse 와 같은 역할을 하는 기계부품이다. 좀 더 중요하고 비싼 부품이 파손되는 것을 방지하거나 더 큰 사고로 이어지는 것을 방지하기 위해 설계자가 정한 하중보다 큰 하중이 가해질 때, structural fuse 는 파손된다.

Fuse load 와 파손되는 위치를 조정하기 위해 under-cut 이 structural fuse 외/내부에 만들어지기도 하며 주로 300M 이 사용되어 진다. Structural fuse 의 fuse load 분산을 줄이기 위해 시험을 통해 외경 및 내경이 결정되며 공차를 최소한으로 관리한다.[2]



Fig 1. Example of structural fuse

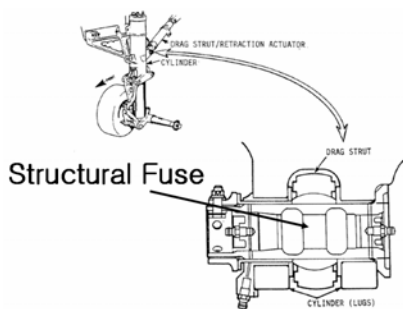


Fig 2. Example of landing gear with structural fuse

### 2.2 System fail condition

착륙장치 요구도에는 각 운용상태에서의 weight condition, sinking speed, lift 등이 제시되어 있다. 이를 바탕으로 성능해석을 통해 정상운용상태에서

착륙장치에 작용하는 최대의 힘과 추락시 착륙장치에 작용하는 힘을 구할 수 있다.

착륙장치에 작용하는 힘을 이용하여 정상운용상태와 추락시 structural fuse 에 힘과 응력을 구할 수 있다.

Structural fuse 의 M.S.(Margin of Safety)를 계산하고  $MS < 0$  일 때를 structural fuse 의 파손조건으로 정하였다.

System fail 조건은 착륙장치가 설계자의 의도대로 작동하지 않을 때이며 아래와 같이 정의하였다.

Table 1. System failure condition

System failure condition	Event	Fail criteria
1	정상운용상태에서 structural fuse 가 파손됨.	$MS < 0$ @ Normal
2	추락시 structural fuse 가 파손되지 않음.	$MS > 0$ @ Crash

### 2.3 불확실성

Structural fuse 에 작용하는 불확실성은 다음과 같다. 첫째, Structural fuse 제작시 발생하는 제작공차이다. Structural fuse 는 원통형의 비교적 간단한 형상을 지닌다. Structural fuse 의 형상을 결정하는 치수는 외경, 내경, 길이, under-cut 형상 등이다. Structural fuse 내의 응력은 지지하는 구조물과 structural fuse 에 힘을 가해주는 구조물의 형상의 영향을 받으므로 지지 구조물과 힘을 가해주는 구조물의 제작공차 역시 고려된다. 두 번째, structural fuse 가 조립되면서 생기는 오차이다. 세 번째는 structural fuse 의 물성치이다. 만약, structural fuse 가 열처리 통해 제작된다면 열처리에 따라 물성치가 변할 수 있다. 네 번째는 structural fuse 에 작용하는 힘이다. 설계 단계에서 structural fuse 에 작용하는 힘을 예측하고 시험을 통하여 검증하지만 실제 다양한 조건에서 운용될 때의 힘은 쉽게 예측할 수 없다.

### 2.4 신뢰도 해석 기법

시스템의 저항요소를 R, 하중요소를 L 이라고 할 때, 시스템의 파괴여부는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$G = R - L \quad (1)$$

R 과 L 은 시스템에 따라서 다양하게 표현된다. 본 논문에서 R 은 structural fuse 의 ultimate strength 이며 L 은 structural fuse 에 작용하는 stress 이다. 만약  $G < 0$  이라면 시스템은 파괴된다. 이와 같은 설계기준식을 한계상태식(Limit State Equation)이라고 한다. 불확실성으로 인해 R, L 을 확률변수로 모델링한다면 한계상태식은 확률변수를 독립변수로 갖는 함수가 된다.

R, L 이 확률변수 X 로 표현된다고 할 때, 파괴확률을 계산하기 위해 한계상태식을 식 (2)와 같이 다중 적분해야 한다. 하지만 이것은 거의 불가능하며 대신에 근사적인 방법을 사용하여 적분값을 구하고 있다.

$$P_f = \int_{g(x) \leq 0} f_g(x) dx \quad (2)$$

where,  $P_f$  : Fail Probability

근사적인 방법에는 크게 모의실험법, 민감도와 모멘트를 이용하는 방법, 실험계획법을 이용한 방법이 있다. 모의 실험법은 한계상태식의 독립변수 중 확률변수의 분포특성을 가정하고, 가정한 확률 독립변수들의 분포특성에 맞게 무수히 많은 난수를 발생시켜 이 중에서 한계상태식을 위반하는 경우를 세어 구조물의 파괴확률을 계산하는 방법이다. 대표적인 방법으로 몬테칼로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation)이 있다. 만약 N 번의 실험 중 n 개가 한계상태식을 위반하였다면 파괴확률은 식 (3)과 같다.

$$P_f \approx \frac{n}{N}$$

where, n : number of fail  
N : number of simulation

민감도와 모멘트를 이용하는 방법은 한계상태식을 테일러 급수 전개하여 1 차 또는 2 차로 근사하여 파괴확률을 구하는 방법이다. 대표적인 방법으로는 개선된 일계이차모멘트법(AFORM, Advanced First-Order Reliability Method), 이계이차모멘트법(SORM, Second-Order Reliability Method)이 있다. 일계이차모멘트법은 확률변수들의 평균값에서 한계상태식까지의 가장 짧은 거리인 신뢰도 지수( $\beta$ , Reliability Index)를 구하고 이용하여 파괴확률을 계산한다. 이계이차모멘트법은 일계이차모멘트법

에서 계산한 신뢰도 지수를 이용하지만 한계상태식의 비선형성을 고려하여 파괴확률을 구한다.

실험계획법을 이용하는 대표적인 방법은 피어슨 시스템(Pearson System)을 이용하는 방법이다. 피어슨 시스템은 특정한 조건을 만족하는 확률밀도함수들의 집합을 말하는데, 한계상태식의 통계 모멘트만 알고 있으면 한계상태식의 확률밀도함수를 근사할 수 있다.

### 3. 파손확률 계산

#### 3.1 신뢰도 평가 방법

Structural fuse 은 설계시 설계된 조건에서 파손되지 않을 경우 큰 사고로 이어질 수 있으므로 비교적 정확하게 파손확률을 구할 필요가 있다. 신뢰도 해석 기법 중 모의실험법은 계산량이 많지만 다른 방법에 비해 정확한 파손확률을 얻을 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 모의실험법의 대표적인 방법 중에 하나인 몬테칼로 시뮬레이션을 이용하여 structural fuse 의 파손확률을 계산하였다..

#### 3.2 확률변수 가정

설계시 가정한 불확실성을 확률변수로 가정하였다. 불확실성과 가정한 분포는 아래와 같다.

Table 2. Uncertainties and assumed distribution

불확실성	분포 특성	평균	표준편차
제작공차 1	정규 분포	Nominal dimension	공차/6
제작공차 2			
제작공차 3			
제작공차 4			
제작공차 5			
제작공차 6			
제작공차 7			
조립공차 1	정규 분포	Nominal dimension	공차/3
조립공차 2			
조립공차 3			
조립공차 4			
조립공차 5			
조립공차 6			
조립공차 7			
외력 1		하중해석	평균값/60
외력 2		결과값	평균값/100

물성치		규격서의 값	평균값/50
-----	--	--------	--------

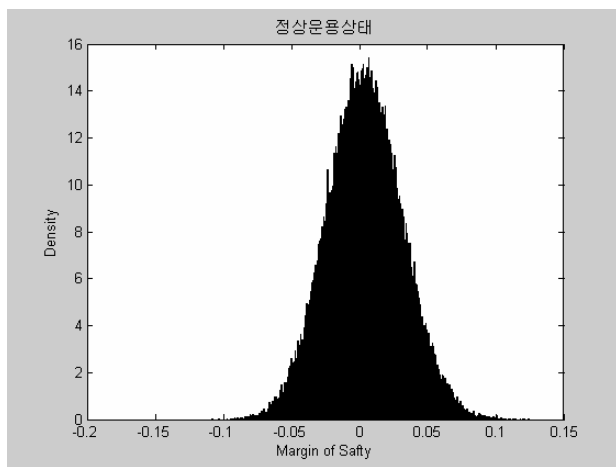
모든 확률변수를 정규분포로 가정하였다. 제작공차 및 조립공차의 경우 각 확률변수의 평균값은 nominal 치수로 정의하였다. 제작공차를 확률변수로 정의할 때는 도면 공차의 1/6 을 표준편차로 정의하였다.[1] 부품들이 조립될 때, 생기는 조립공차의 경우는 공차/3 을 표준편차로 정의하였다. 본 논문에서 연구한 structural fuse 의 재료는 MMPDS 에서 제공하는 물성치 값을 사용하였다. Structural fuse 의 ultimate strength 의 분포특성은 MMPDS 에 제시되어 있지 않다. 많은 실험 결과를 통해 static strength 의 분포는 정규분포로 잘 표현된다고 알려졌다.[1] 따라서, 본 논문에서도 물성치(ultimate strength)를 정규분포로 가정하였다.

### 3.3 System failure probability

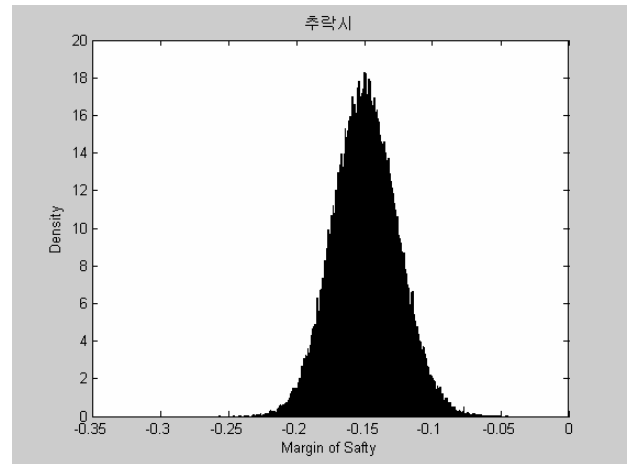
위에서 제시한 각 system failure condition 에 대해 응력해석에 사용한 하중조건과 MS 의 분포는 아래와 같다.

**Table 3. Load condition for each system failure condition**

System failure condition	Load
1	정상운용시 structural fuse 가 받는 최대 하중
2	추락시 structural fuse 가 받는 하중



**Fig 3. M.S. distribution for normal operation (const. inner dia.)**



**Fig 4. M.S. distribution for crash (const. inner dia.)**

Structural fuse 의 MS 분포를 기준으로 했을 때, 위에서 제시한 각 system failure condition 에 대한 확률은 아래와 같다.

**Table 4. System failure probability (Const. inner dia.)**

System failure condition	Event	Probability[%]
1	정상운용시 structural fuse 가 파손됨.	44.85 ~ 45.27
2	추락시 structural fuse 가 파손되지 않음.	0.00

몬테칼로시뮬레이션 100,000 번 수행

위 결과는 몬테칼로 시뮬레이션 100,000 번 수행한 결과이며 95 % 신뢰수준에서 일어날 확률이다.

추락시 structural fuse 가 파손되지 않을 확률은 0 %이며 설계자의 의도를 만족한다. 하지만, 정상운용시 structural fuse 가 파손될 확률은 최대 45.27 %로 설계자의 의도를 만족시키지 못 한다.

## 4. 개선 방안 적용 및 결과

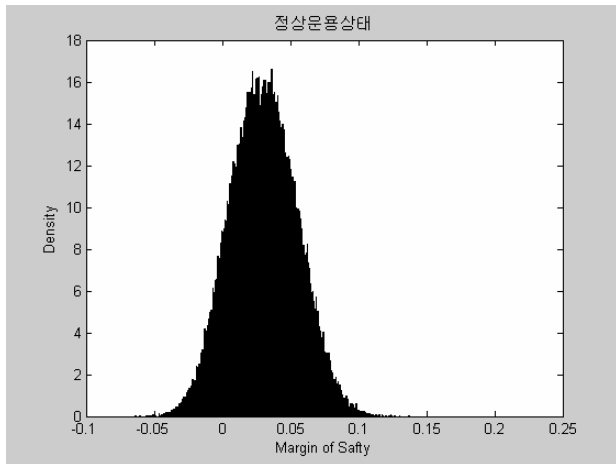
Structural fuse 는 열처리에 따라 다른 ultimate strength 를 지닌다. 따라서, 열처리 후 측정된 ultimate strength 에 따라 structural fuse 의 제작치수를 다르게 적용하였다. 실제 제작여건상 ultimate strength 를 2 가지 이상으로 분류하는 것은 무리가 있으므로 2 가지 범위로 분류하였고 이에 따라 structural fuse 의 제작치수를 다르게 하였다.

**Table 5. Ultimate strength and inner diameter**

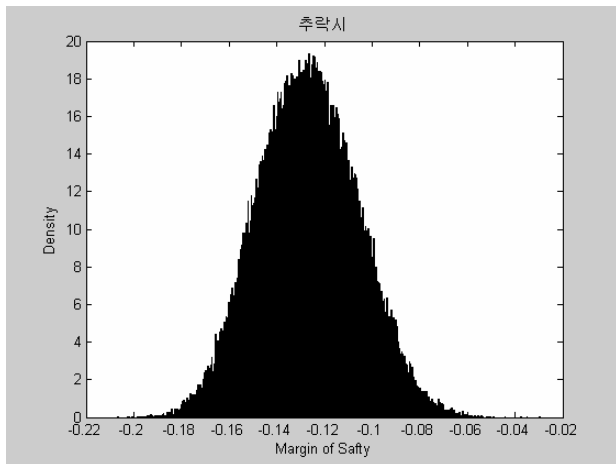
Ultimate Strength	내 경
1310 MPa 미만	D1
1310 MPa 이상	D2

D1 < D2

열처리 결과로 재료의 ultimate strength가 평균값보다 작을 경우 내경을 줄여 structural fuse 내의 응력수준을 낮추었다. 이와 같이 ultimate strength에 따라 내경을 다르게 적용했을 때의 각 system failure condition에 대한 M.S.의 분포와 일어날 확률은 아래와 같다.



**Fig 5. M.S. distribution for normal operation**



**Fig 6. M.S. distribution for crash**

**Table 6. System failure probability**

System failure condition	Event	Probability[%]
1	정상운용시 structural fuse가 파손됨.	8.88 ~ 12.54
2	추락시 structural fuse가 파손되지 않음.	0.00

몬테칼로시뮬레이션 100,000 번 수행

위 결과는 몬테칼로 시뮬레이션 100,000 번 수행한 결과이며 95 % 신뢰수준에서 일어날 확률이 다.

열처리 후 ultimate strength에 따라 제작 내경을 다르게 적용한 결과 추락시 structural fuse가 파손되지 않을 확률은 그대로 0 %를 유지하면서 정상운용시 structural fuse가 파손될 확률은 45.27 %에서 12.54 %로 줄일 수 있었다.

### 5. 결 론

항공기 추락시 인명 피해를 줄이고 항공기 전체의 파손 정도를 줄이기 위해 착륙장치에 structural fuse가 사용된다. Structural fuse가 설계자가 원하는 상황에서 파손되지 않거나 설계자가 원하지 않는 상황에서 파손될 경우 예상치 못한 다른 사고로 연결될 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 각 상황에 대해 structural fuse의 파손확률을 계산하였다.

Structural fuse의 내경을 일정하게 유지했을 때는 정상운용시 structural fuse가 파손될 확률이 약 45.27 %로 높은 편이었다.

정상운용시 structural fuse가 파손될 확률을 줄이기 위해 열처리 후 ultimate strength 값에 따라 structural fuse의 내경을 다르게 적용하였다. 그 결과 추락시 structural pin이 파손되지 않을 확률은 0%로 유지하면서 정상운용시 structural fuse가 파손될 확률을 약 12.54 %로 낮출 수 있었다.

### 후 기

본 연구는 지식경제부 한국형 헬기 민군겸용 구성품 개발 산업 위탁 연구 결과 중 일부입니다. 지원에 감사 드립니다.

### 참고문헌

- (1) Dimitri B. Kececioglu, Ph.D., P.E., 2003, "Robust Engineering Design-By-Reliability With Emphasis On Mechanical Components & Structural Reliability VOLUME 1", DEStech Publications
- (2) SAE AIR4566, 1992, "Crashworthy Landing Gear Design"