

# 항공기 안전핀 파손확률 계산 방안

이상욱\*, 이승규\*, 신정우\*, 김태욱\*, 김성찬\*, 황인희\*, 이제동\*\*

\*한국항공우주연구원

\*\*국방과학연구소

e-mail: lsg@kari.re.kr

## Method for Failure Probability Assessment of Aircraft Safety Pin

Sang-Wook Lee\*, Seung-Gyu Lee\*, Jeong-Woo Shin\*, Tae-Uk Kim\*,  
Sung-Chan Kim\*, In-Hee Hwang\* and Jedong Lee\*\*

\*Korea Aerospace Research Institute

\*\*Agency for Defense Development

### 요 약

안전핀은 기계적으로 과도한 힘이 작용할 때, 파손되어 다른 구성품 및 사람을 보호하는 역할을 하며 이는 전자/전기 시스템에서 Fuse와 같은 역할이다. 안전핀은 재설기의 구동시스템 또는 항공기 Pushback Bar 등에 사용된다. 본 논문에서는 항공기 착륙장치에 적용된 안전핀의 역할과 파손 확률 계산 방안에 대해 소개하고자 한다.

### 1. 서론

항공기 추락시 착륙장치에 의해 조종사 및 승객이 다치거나 연료계통으로부터 연료가 누출되어 화재로 이어져서는 안 된다. 이를 방지하는 방법은 크게 2가지가 있다. 첫 번째, 추락시 항공기 기체나 승객에게 가해지는 힘을 줄이기 위해 착륙장치가 에너지를 충분히 흡수/소산시킨다. 두 번째, 과도한 힘이 가해질 때 안전핀을 활용하여 착륙장치의 Failure Mode를 조정한다.<sup>(2)</sup> 항공기 추락시 설계 시 고려된 이상의 과도한 힘이 작용한다고 가정했을 때, 안전핀은 추락시 파손되면서 착륙장치의 Failure Mode를 조정하거나 추가적인 에너지 흡수장치를 작동시키는 중요한 역할을 한다.

Boeing 757/737/767/747, Airbus A330/340, Lockheed L1011의 착륙장치가 두 번째 방법을 적용하여 추락시 착륙장치의 Failure Mode를 조정하는 예이다. Silorsky의 S-58은 안전핀이 파손되면서 착륙장치의 추가적인 에너지 흡수장치가 작동된다. 안전핀 외에도 Shear Pin, Shear Bolt, Fuse Pin 등의 다양한 용어가 있지만 이들은 모두 과도한 힘이 가해질 때, 파손되는 역할을 한다.

안전핀은 추락시 좀 더 안전한 착륙을 위해 고안되었다. 하지만, 추락시에만 파손되어야 한다는

제약조건을 가진다. 불확실성으로 인해 안전핀이 정상 운용조건에서도 파손되거나 추락시에 파손되지 않을 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 안전핀이 정상 운용조건에서 파손될 확률과 추락시 파손되지 않을 확률을 평가하여 착륙장치가 설계자의 의도대로 운용될 확률을 평가하였다.

### 2. 본론

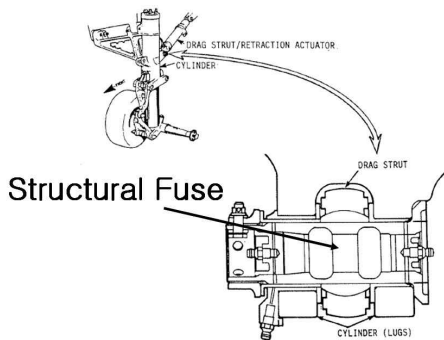
#### 2.1. 안전핀

안전핀은 전자부품 중 Fuse와 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, 안전핀은 파손된다.

안전핀이 파손될 때의 힘과 파손되는 위치를 조정하기 위해 Under-Cut이 안전핀 외/내부에 만들어지기도 하며 주로 300M으로 제작되어 진다. 안전핀을 파손시키는 하중크기의 분산을 줄이기 위해 시험을 통해 안전핀의 재료 및 형상이 결정되며 공차를 최소화함으로써 관리한다.<sup>(2)</sup>



[그림 1] 안전핀 예시



[그림 2] 착륙장치에 안전핀이 적용된 예시

## 2.2 시스템 파손조건 정의

착륙장치 요구도에는 각 운용상태에서의 Weight Condition, Sink speed, Lift 등이 제시되어 있다. 이를 바탕으로 성능해석을 통해 정상운용상태에서 착륙장치에 작용하는 최대의 힘과 추락시 착륙장치에 작용하는 힘을 예측할 수 있다.

착륙장치에 작용하는 힘을 이용하여 정상운용상태와 추락시 안전핀에 작용하는 힘과 응력을 예측할 수 있다. 안전핀이 Shear Stress에 의해 파손된다고 가정하고 Shear Stress가 Ultimate Shear Strength 보다 클 때를 안전핀의 파손조건으로 정하였다. 시스템 파손조건은 착륙장치가 설계자의 의도대로 작동하지 않을 때이며 아래와 같이 정의하였다.

[표 1] 시스템 파손조건 정의

조건	Event	Stress Status
1	정상운용상태에서 안전핀이 파손됨.	$\sigma_s > F_{US} @ Normal$
2	추락시 안전핀이 파손되지 않음.	$\sigma_s < F_{US} @ Crash$

$\sigma_s$  : Shear Stress

$F_{US}$  : Ultimate Shear Strength

## 2.3 불확실성

안전핀에 작용하는 불확실성은 다음과 같이 가정하였다. 첫째, 안전핀 제작시 발생하는 제작공차이다. 안전핀은 원통형의 비교적 간단한 형상이다. 안전핀의 형상을 결정하는 치수는 외경, 길이, Under-Cut 형상 등이다. 두 번째, 안전핀이 조립되면서 생기는 오차이다. 세 번째는 안전핀의 재료물성치이다. 만약, 안전핀이 열처리 통해 제작된다면 열처리에 따라 물성치가 변할 수 있다. 네 번째는 안전핀에 작용하는 힘이다. 설계 단계에서 안전핀에 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 L이라고 할 때, 시스템의 파괴여부는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

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

R과 L은 시스템에 따라서 다양하게 표현된다. 본 논문에서 R은 안전핀의 Ultimate Shear Strength 이며 L은 안전핀에 작용하는 Shear Stress 이다. 만약  $G < 0$ 이라면 시스템은 파괴된다. 이와 같은 설계기준식을 한계상태식(Limit State Equation)이라고 한다. 불확실성으로 인해 R, L을 확률변수로 모델링한다면 한계상태식은 확률변수를 독립변수로 갖는 함수가 된다.

R, L이 확률변수 X로 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,  $P_f$  : 파괴확률

근사적인 방법에는 크게 모의실험법, 민감도 와 모멘트를 이용하는 방법, 실험계획법을 이용한 방법이 있다. 모의 실험법은 한계상태식의 독립변수 중 확률변수의 분포특성을 가정하고, 가정한 확률 독립변수들의 분포특성에 맞게 무수히 많은 난수를 발생

시켜 이 중에서 한계상태식을 위반하는 경우를 세어 구조물의 파괴확률을 계산하는 방법이다. 대표적인 방법으로 몬테칼로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation)이 있다. 만약 N번의 실험 중 n개가 한계상태식을 위반하였다면 파괴확률은 식 (3)과 같다.

$$P_f \approx \frac{n}{N} \quad (3)$$

민감도와 모멘트를 이용하는 방법은 한계상태식을 테일러 급수 전개하여 1차 또는 2차로 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 일계이차모멘트법에서 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. 수치계산

안전핀은 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 안전핀의 파손확률을 계산하였다.

#### 3.1 확률변수 가정

설계시 가정한 불확실성을 확률변수로 가정하였다. 불확실성과 가정한 분포는 아래와 같다. 모든 확률변수를 정규분포로 가정하였다. 각 확률변수의 평균값은 Nominal 치수로 정의하였다. 외경1은 안전핀의 외경이며 외경2는 안전핀을 작동시키기 위한 부

품의 외경이다. 외경2에 의해 안전핀에 작용하는 힘이 변한다. 외경과 같은 치수공차를 확률변수로 정의할 때는 도면 공차의 1/6을 표준편차로 정의하였다.<sup>(1)</sup> 부품들이 조립될 때, 생기는 조립공차의 경우는 공차/3을 표준편차로 정의하였다. 안전핀의 Ultimate Shear Strength의 분포특성은 규격집에 제시되어 있지 않아 상수로 가정하였다.

[표 2] 불확실성과 확률변수

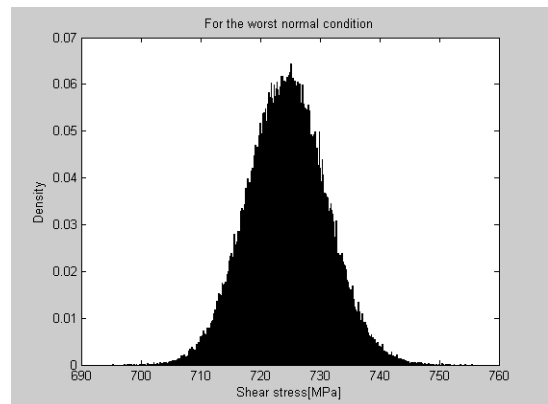
불확실성	분포 특성	평균	표준편차
외경1	정규 분포	Nominal dimension	공차/6
외경2			공차/3
조립공차1			
조립공차2			
조립공차3			
조립공차4			
조립공차5			
조립공차6			
조립공차7			

#### 3.2 안전핀 응력분포

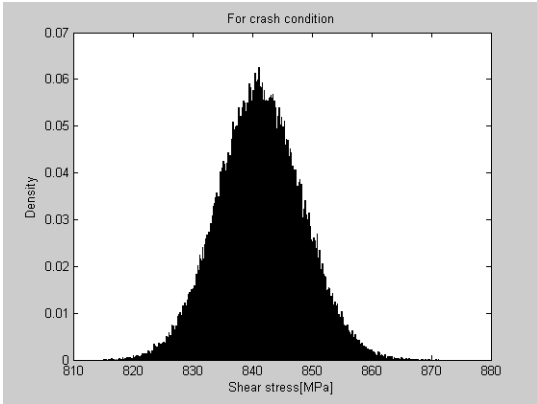
각 조건에 대해 해석에 사용한 하중 조건과 안전핀의 응력분포는 아래와 같다.

[표 3] 하중조건

조건	하중
1	정상운용시 structural fuse가 받는 최대 하중
2	추락시 structural fuse가 받는 하중



[그림 3] 조건 1에서의 응력분포



[그림 4] 조건 2에서의 응력분포

안전핀의 Ultimate Shear Strength를 827 MPa로 가정했을 때, 아래와 같은 결과를 얻을 수 있다.

[표 4] 각 조건의 발생확률

Cond.	Event	확률[%]
1	정상운용시 안전핀이 파손됨.	0.00
2	추락시 안전핀이 파손되지 않음.	최대 6.46

몬테칼로 시뮬레이션 100,000 번 수행

조건 2에 대해 몬테칼로 시뮬레이션 100,000 번 수행했을 때 1.85 %의 파손확률을 얻었다. 하지만, 몬테칼로 시뮬레이션은 수행할 때마다 파손확률이 달라지므로 95% 신뢰구간 내에서 실제로는 최대 6.46 %의 파손확률을 가질 수 있다.

착륙장치가 설계자의 의도대로 동작하지 않을 확률은 조건 1과 2의 파괴확률 합과 같다. 본 논문에서 연구한 안전핀 정상운용시 파손될 확률은 0 %이며 추락시 파손하지 않을 확률은 최대 6.5 %이다. 따라서, 착륙장치가 설계자의 의도대로 동작하지 않을 확률은 최대 6.5 % 이다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 착륙장치에 장착되어 항공기 추락시 착륙장치로 인해 발생할 수 있는 더 큰 사고를 방지하기 위한 안전핀의 설계를 평가할 수 있는 방안으로 파손확률 계산을 제안하였다. 안전핀 파손을 정상운용시 파손과 추락시 미파손으로 정의하였고 각 조건에 대한 파손확률의 합으로 정의하였다. 안전핀 파손에 영향을 주는 불확실성은 안전핀의 형상

과 재료물성치 등으로 정의하였고 파손확률 계산 방안으로는 몬테칼로 시뮬레이션을 제안하였다.

본 논문에서 제시된 방안에 따라 안전핀의 파손확률을 계산하고 파손확률에 영향을 많이 주는 설계 인자를 선별하여 해당 설계 인자를 주의깊게 관리해야 할 것이다.

#### 후기

본 연구는 지식경제부 한국형헬기 민군겸용 구성품 개발사업 수행결과의 일부이며, 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

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