엔진케이스의 블레이드 컨테인먼트

김지수*† · 박기훈* · 성옥석*

Blade Containment

Jeesoo Kim*† · Kihoon Park* · Okseok Sung*

ABSTRACT

On the basis of the paper described herein, rotor blade failure in the compressor, gas generator turbine, and power turbine and the resulting internal damage is contained within the peripheral hardware and engine casings. For the safety reason, the blade containment was regulated by aviation authority. For reducing the weight of the case, a heaviest single component of a jet engine, the blade containment capability was analyzed by engine manufacturer. The procedure established for containment design involves an energy balance method based on the comparison of the kinetic energy of released blade and the strain energy of the containment zone. The LS-DYNA simulation can also be introduced to predict behavior of released blade and case. All of the analytic and numerical result are described ...

초 록

본 논문에서 Compressor 및 turbine 에서의 Blade failure등의 내부파손이 이를 둘러싸고 있는 케이스 내부에 머무르게 하는 엔진설계의 방법에 대한 이론 및 Simulation 등을 기술 하였다. 가장 무거운 부품 중에 하나인 케이스의 두께 최적화는, 항공기의 안정성뿐만 아니라 항공 효율을 높이기 위한 경량화의 목적을 위해서도 매우 중요한 설계목표 이다. 이러한 목적을 위하여 이론적 접근방법으로 에너지 밸런스 방법을 사용하였으며, 파손된 블레이드의 거동특성 및 영향성 평가를 위한 유한요소해석을 위하여 LS-DYNA가 사용 되어졌다.

Key Words: Blade Containment, Blade failure, Turbine case, LS-DYNA, Energy Balance Method

1. 서 론

전 세계 모든 항공기관련 제작사들은 미연방 항공청(FAA) 혹은 유럽항공연합(JAA)의 항공안정성 평가를 받아야 하며, 그중 가장 중요한 요구조건중의 하나가 Blade containment 이다. 이는 파손된 블레이드가 엔진 케이스 내부에 머무르게 하는 규정으로, 승객 및 승무원들의 안전을 위하여 반드시 엔진설계에 적용 되어야 한다. 이

* 삼성테크윈 파워시스템 연구소
† 교신저자, E-mail: jeesoo89.kim@samsung.com

러한 안정성 목적뿐만 아니라, 각 엔진 제작사는 엔진의 경량화를 목적으로 단일품목으로 가장 무거운 부품인 케이스의 두께를 최적화하여 엔진효율을 높이기 위한 노력을 기울인다. 상기와 같은 안정성 검증 및 최적화라는 목적을 위해 실험적 그리고 해석적으로 보여야 하며, 해석적 접근을 위해 기본적으로 에너지 밸런스 방법을 사용하며, 파손 블레이드의 거동특성을 보이기 위하여 유한요소해석 방법이 소개되어지기도 한다.

본 논문에서는 기존에 수행 되어진 에너지 밸런스 방법을 이용한 계산 방법 및 결과를 소개하며, 이에 대해 유한요소 해석 결과와 비교함으로써 보다 나은 파손 블레이드의 거동 특성을 보이고자 한다.

해석적 접근을 위한 에너지 밸런스 방법은 파손된 블레이드의 운동에너지와 이와 충돌하는 케이스의 연신에너지의 비교를 통해 해석 대상이 되는 케이스의 안정성을 평가하게 되며, 최적의 두께 산출을 위한 기본 자료로 사용되어진다.

유한요소해석 방법을 위해 LS-DYNA가 사용되어졌으며, 충돌하는 블레이드의 초기 속도와 질량으로 운동에너지와 충돌하중이 산정되어진다. 이를 통한 케이스의 변형에너지로의 변환 및 일정 연신에너지에 다다르면 케이스 파손에 이르는 메커니즘이 사용 되어졌다.

이러한 계산 및 해석 방법을 통해 파손된 블레이드를 포함하기 위한 케이스의 안정성 및 두께가 제시되어지며, 이를 통해 안정성 및 경량화의 목적 달성을 위한 기초자료로 사용되어진다.

2. 에너지 밸런스 방법

본 연구에서 사용되어지는 에너지 밸런스 방법은, 파손된 블레이드의 운동에너지와 이를 포함하게 될 케이스의 연신에너지와의 비교를 통해 적정 안정성 마진을 갖는지에 대한 평가를 기본으로 한다.

2.1 파손 블레이드의 운동에너지

파손된 블레이드의 운동에너지는 일반적인 운동에너지 기본 공식을 따르며, 이를 적용 블레이드에 대한 식으로 치환하면 Eq.1과 같이 정리되어 질 수 있다.

$$E = \frac{WR^2(RPM)^2}{844,863} \times 1.06 \quad (1)$$

E=Fragment Kinetic Energy (ft-lf)
W=Fragment Weight (lbf)
RPM=Maximum rotor Speed, (rev per minute)
R=Radius to Fragment Center of Gravity (in)

Eq.1의 마지막 항에 사용되어진 1.06은 파손된 블레이드의 무게 및 무게중심의 다양성을 포함하기 위해 6%의 마진을 적용 하였다.

Eq.1의 식이 적용된 엔진설계결과의 예를 Table 1.에서 보여주며, 이하 사용되어질 계산결과 예는 당사에서 설계되어진 엔진의 Blade Containment 해석의 결과를 보여준다.

Table 1 파손블레이드 운동에너지

Rotor Stage	소재	무게 W (lbf)	무게중심 R (in)	운동에너지 E (ft-lbf)
1	AM355	0.0374	2.8006	813
2	AM355	0.0200	2.7677	424

2.2 케이스의 연신에너지

케이스의 연신에너지 계산을 위해 인성계수(TM, modulus of toughness)와 유효두께를 사용하게 된다. 일반적으로 인성계수의 계산은 stress-strain 그래프에서 Rupture까지의 포함 면적으로 계산되어지며, 이는 Eq.2로 표현 되어질 수 있다.

$$TM = \left(\frac{\sigma_{ult} + \sigma_{0.2\%yield}}{2}\right) \times \left(\frac{\%elongation}{100\%}\right) \quad (2)$$

TM=Modulus of Toughness
σ_{ult}= Ultimate Strength
$\sigma_{0.2\%yield}$= 0.2% Yield Strength
$\%elongation$= Elongation at Fracture, %

유효두께 계산을 위해 최소두께 면적을 블레이드 코드로 나눈 값을 사용한다. 상기에 계산된 TM과 유효두께를 이용하여 블레이드 형상과 연관 지어 케이스의 최대 수용 에너지를 계산하게 된다. Table 2. 에서는 케이스의 최대수용에너지 계산 결과를 보여준다.

Table 2 케이스 최대수용 에너지

Rotor Stage	TM (KSI)	유효두께 (in)	최대수용에너지 (ft-lbf)
1	10.816	110.3	1,341
2	10.815	98.8	599

2.3 케이스의 에너지 마진

케이스의 에너지 마진은 일반적으로 사용되어지는 마진개념을 그대로 사용하게 된다. 즉, 블레이드의 운동에너지와 케이스의 수용에너지의 비로 마진을 산정하며, 수식으로 표현하면 Eq.3과 같다.

$$Margin = \left(\frac{E_{tc}}{E} - 1\right) \times 100\% \qquad (3)$$

$Margin$=Energy Margin
E=106%의 파손 블레이드 운동에너지
E_{tc}=케이스의 최대수용 에너지

Eq .3을 이용한 최종 에너지 마진, 즉 파손 블레이드가 케이스 내부에 포함될 가능성에 대한 수식을 통한 계산 결과는 Table 3과 같다.

Table 3 에너지 마진

Rotor Stage	E (ft-lbf)	E_{tc} (ft-lbf)	에너지 마진
1	813	1,341	65%
2	424	599	41%

Table 3.에서의 결과와 같이 에너지 마진에 대한 계산결과를 통해 파손 블레이드의 케이스 내부에 포함을 증명할 수 있다.

3. 유한요소해석

본 연구에서 파손 블레이드와 케이스의 거동특성을 조사하기 위해 LS-DYNA가 사용 되어졌으며, 해석을 위한 조건으로 Rotor Stage 1의 파손 블레이드 및 케이스가 사용 되어졌다.

3.1 유한요소 모델링

파손 블레이드의 케이스 내부에서의 거동을 묘사하기 위해 Figure 1.에서와 같이 LS-DYNA 모델이 구축되어졌다. 9,088개의 8-node solid hexahedron 요소가 사용 되어졌으며 총 node수는 14,205개 이다. 단일 블레이드에 대한 고려만 이루어 졌으며, 케이스 두께 방향으로 3개의 요소를 배치함으로써 Solid element의 rotation자유도의 부재를 해결 하였다.

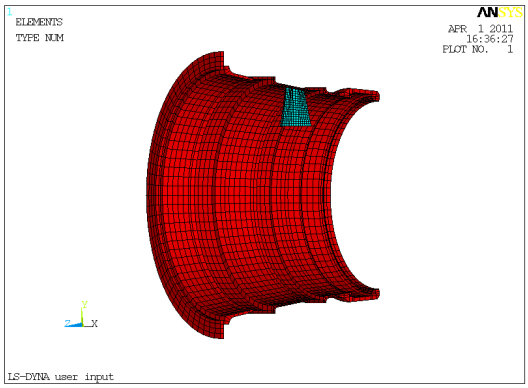

Fig. 1 블레이드 및 케이스 모델링

소재반응특성으로 MAT3이 사용되어졌으며, 블레이드의 경우 Bilinear kinematic이 케이스의 경우 10%의 파손변형율을 갖는 Plastic knematic이 사용 되어졌다.

3.2 해석결과

케이스의 파손에너지를 찾기 위하여, 파손 블레이드의 속도를 달리 하며 해석 하였다. 이는 파손 블레이드의 운동에너지를 단계적으로 높여 일정 에너지 이상에서 케이스의 파손을 검증하는 작업을 수행 하였다. 그 결과 엔진의 실제 회전수(RPM)의 2.3배에서 케이스의 파손이 해석 되어졌

다. Figure 2에서 케이스 파손 에너지 이후에서의 블레이드 및 케이스의 거동을 보여주고 있다.

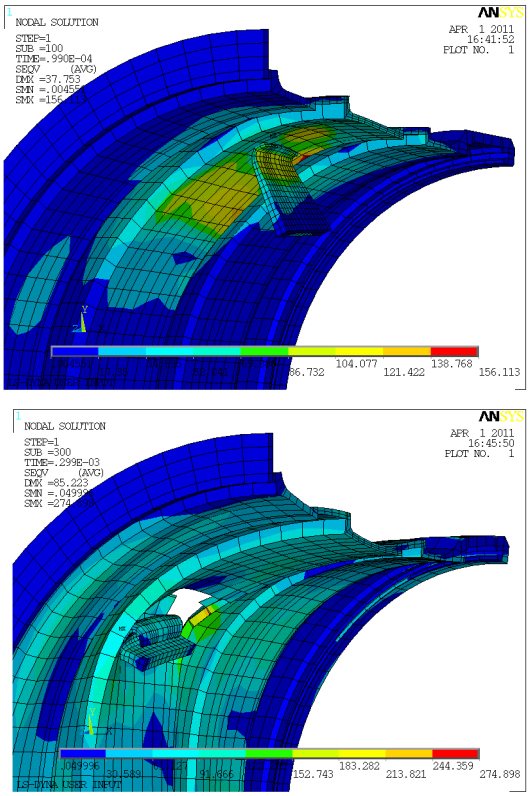

Fig. 2 LS-DYNA simulation result

4. 결과 및 고찰

케이스에서의 블레이드 컨테인먼트 확인을 위해 에너지 밸런스의 해석적 접근을 통한 안정성 검증 결과가 이루어 졌으며, 예로 Rotor Stage 1, 2에서 각각 65% 와 41%의 안정성 마진을 보임을 확인 하였다.

Stage 2의 형상 및 운용조건을 이용한 LS-DYNA simulation이 수행 되어졌으며, 속도의 2.3배 즉 기준의 5.29배의 에너지에서 케이스의 파손에 이르는 결과를 얻었다.

에너지 밸런스의 계산을 근거로 한 결과와 비교하면, 41% 대비 429%의 마진을 갖는 차이를 나타내었다. 이는 해석적 접근에서는 실제 파손 블레이드의 형상정보, 즉 sharpness가 고려되어지며, 보수적 결과 도출을 위하여 파손 블레이드가 직각으로 충돌하는 기준을 통해 결과가 얻어진 반면, simulation을 통해 얻어진 결과는, 블레이드 자체가 변형을 통하여 흡수되는 에너지, 케이스의 입사각이 비스듬한 효과, 그리고 실제 파손 블레이드의 형상 부적용 등에 의해 계산보다는 높은 수준의 케이스 컨테인먼트를 보여주는 결과를 얻었다.

Simulation을 통해 보여주는 블레이드의 케이스 충돌 거동은 기존의 수식을 통해 알 수 없는 실제 거동특성을 이해하는데 많은 도움을 줄 수 있다. 반면, 상기의 해석을 통해 도출된 결과를 시험을 통한 계산결과와 연동 짓기 위해서는 보다 많은 수치해석 변수가 적용 되어야 함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Astrid Krus, and Jorg Frischbier, "Containment and penetration simulation in case of blade loss in a low pressure turbine," DYNAmore LS-DYNA Forum 2002