

## 엔진 흡입구 나셀의 조류충돌에 대한 충격거동 해석

공창덕\* · 이승현\*\* · 박현범\*\* · 윤재휘\*\*

### Impact Structural Behavior by Bird Strike on Engine Inlet Nacelle

Changduk Kong\* · Seunghyeon Lee\*\* · Hyunbum Park\*\* · Jaehuy Yoon\*\*

#### ABSTRACT

It is well known that the aircraft engine inlet should be safely designed against the bird strike at the aircraft development stage. The aircraft accident is increasing for FOD(Foreign Object Damage), especially bird of runway circumference. The aircraft accident due to bird strike brings about economic loss which is connected with the life of passengers. In this study, MSC/DYTRAN has been utilized to analyze the aircraft engine inlet against the bird strike. In order to validate the proposed method for the bird strike analysis, this study was performed with comparison of precedence study results.

#### 초 록

항공기 엔진 흡입구는 개발시에 조류 충돌에 대한 충분한 안전성을 검토하여 설계 되어야 한다. 항공기의 속도가 점차 증가함에 따라 FOD(Foreign object damage)에 따른 항공기의 사고가 증가하고 있다. 특히 이착륙시 활주로 주변 새들에 의한 항공기 사고는 경제적 손실을 비롯해 탑승객의 생명과 연결되는 중요한 문제이다. 본 연구에서는 유한 요소 상용 코드인 MSC/DYTRAN을 이용해 엔진 흡입구 나셀 구조에 대한 조류 충돌 해석을 수행하였다. 해석 결과의 타당성 검증을 위해 선행 연구 결과와 비교한 후 조류 충돌 해석 결과의 거동을 분석하였다.

Key Words: Bird Strike(조류 충돌), Impact analysis(충돌 해석), Engine Inlet Nacelle(엔진 흡입구 나셀), Foreign object damage(외부이물손상)

#### 1. 서 론

근래의 항공기는 제트엔진의 발달로 음속에 가까운 속도로 운항을 한다. 항공기 운항속도의 증가로 인해 여러 가지 이점을 가지지만 이는 상대적으로 조류나 활주로상의 이물질이 항공기에 부딪힐 경우 충격에너지의 증가로 치명적인 항공기 사고를 초래한다. 특히 조류충돌 사고는

† 2007년 6월 1일 접수 ~ 2007년 6월 20일 심사완료

\* 종신회원, 조선대학교 항공우주공학과

\*\* 학생회원, 조선대학교 항공우주공학과  
연락처, E-mail: cdgong@chosun.ac.kr

항공기의 이착륙 시 주로 발생하는 사고로 항공기 탑승객의 인명에 대한 위협과 함께 고가의 항공기에 있어서, 치명적이지 않을 수 없다. 따라서 이러한 치명적인 손상을 최소화하기 위해 각종 실험을 통한 항공기의 조류충돌에 대한 저항성을 살피고자 많은 연구가 수행되었다.

FAA(Federal Aviation Administration)에서는 조류충돌에 대한 항공기의 인증을 마련하여 시행하고 있다. 기본적으로 운항중인 항공기의 어떤 부위에서도 4 lb의 조류 충돌 시 항공기는 착륙할 수 있어야 한다. 또한 제트엔진에서는 중형 및 대형 조류에 대한 엔진의 성능 테스트를 통과 하여야 한다. 엔진의 종류에 따라 조류의 숫자와 질량을 달리하여 조류가 항공기 엔진으로 유입되었을 시 추력감소가 본래 성능의 25%이하 여야 한다[1]. 또한 엔진뿐만이 아니라 전체적인 항공기 구조에도 각종 인증조건이 따른다. 이러한 인증조건은 항공사로서는 비용 면에서 상당한 부담이 아닐 수 없다. 따라서 항공기 구조물에 대한 조류충돌 시 손상을 예측하는 것이 아주 중요하다. Fig. 1은 실제 항공기 엔진의 조류충돌 테스트 시설을 보여준다.

하지만 이러한 실험 조류충돌 실험은 많은 시간과 비용을 야기 시킨다[2]. 그러나 최근에는 유한요소 해석의 발달로 유한요소 해석프로그램을 이용한 해석이 가능해졌다. McCarthy 등은 비선형 유한 요소 프로그램을 사용하여 캐노피(Canopy)의 조류 충돌 거동을 해석하였고[3], Storace[4, 5], Alexander[6] 등은 유체 유동의 개념을 이용한 조류-하중 모델을 사용하여 항공기 엔진 팬 블레이드의 조류 충돌 현상을 NONSAP, NASTRAN 등을 사용하여 해석하였다. 국내에서도 문창오 등[2]이 윈드쉴드의 조류 충돌 특성을 상용 유한 요소 프로그램인 MSC/DYTRAN을 사용하여 해석하였으며 실제 시험을 통해 비교하였다.

본 연구에서는 항공기 운용 중에 심각한 현상인 조류 충돌 현상 중에서 항공기 엔진 흡입구 나셀(Nacelle)의 조류 충돌에 대해 상용 유한요소 프로그램을 이용하여 해석하였다.

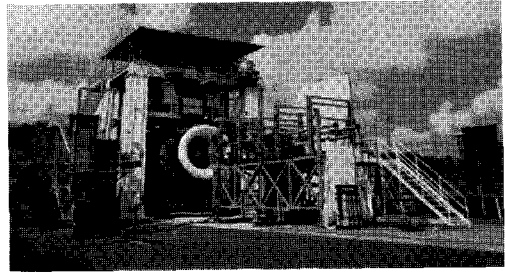


Fig. 1 Engine inlet test facility of Rolls-Royce plc

유한요소 해석은 참고논문과 동일한 상용 프로그램을 이용하여 해석을 수행하였다. 조류충돌에 관련한 해석적 방법은 크게 세 가지로 분류된다. 그 중 Lagrangian bird모델은 초기 시도된 모델로 조류를 라그랑지 요소로 모델링 하였기 때문에 요소의 대변형을 요구하는 해석특성상 결과값의 해석오차가 크게 나타나는 단점이 있었다. 최근에는 유체-구조 연성해석(Fluid-Structure Interaction Analysis)법의 발달로 인해 ALE알고리즘(Arbitrary Lagrange-Eulerian algorithm)과 SPH알고리즘(Smooth particle Hydrodynamics algorithm)을 이용한 해석이 주를 이룬다.

본 연구에서는 항공기 엔진 나셀 구조를 유한요소 모델링하고 조류를 유체로 가정하여 해석하는 ALE알고리즘을 사용하여 조류 충격 해석을 수행하고 충격 거동에 대해 분석하였다.

## 2. 해석 방안의 타당성 검증

항공기 조류 충돌에 관한 접근은 해석적 접근을 바탕으로 충돌 시험을 통해 해석 결과와 시험 결과를 통상 비교 검토한다. 본 연구에서는 수치 해석적 접근을 수행하였으므로 적용한 유한 요소 프로그램인 MSC/DYTRAN을 이용한 조류 충돌 해석의 타당성 검증을 위하여 선행 연구 결과와 비교 검토하였다.

일반적으로 자연에 존재하는 조류는 종류가 매우 다양하여 밀도와 크기가 다르다. 선행 연구 결과에 따르면 조류 충돌 시험을 위해 실제 조류 대신 쉽게 구할 수 있는 닭을 많이 사용하여

다[7]. 조류 형상은 원통형 형상으로 가정하여 구현하였으며 결정된 조류 형상을 바탕으로 강체 평판에 대한 충돌 해석을 수행하고 그 결과를 선행 연구 결과[2]와 비교하여 신뢰성 검증을 시도하였다. 유한요소 해석은 유한요소 프로그램인 MSC/DYTRAN에서 제공하는 ALE알고리즘을 사용하여 해석하였다. Fig. 2는 ALE알고리즘의 전반적인 개념을 그림으로 나타낸 것이다. 연계면(Coupling surface)은 구조물에 해당하는 라그랑지 요소와 조류(Euler Material)에 해당하는 오일러 물성을 연결하는 역할을 하며, 오일러 요소는 유체에 해당하는 조류의 이동공간의 확보를 위해 존재한다.

해석의 검증을 위한 조류의 모델링은 참고문헌[2]과 동일하게 상용프로그램에서 제공하는 Hydro dynamic material을 사용하였고, 조류를 포함하는 오일러 영역은 8절점 솔리드 요소를 사용하였다. 조류의 물성과 모델링 방법은 참고

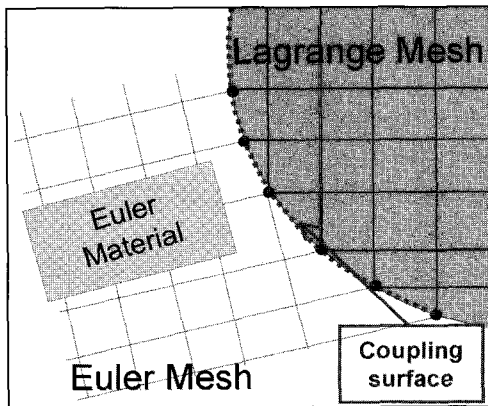


Fig. 2 Concept of ALE(Arbitrary Lagrange-Eulerian) algorithm in FEA

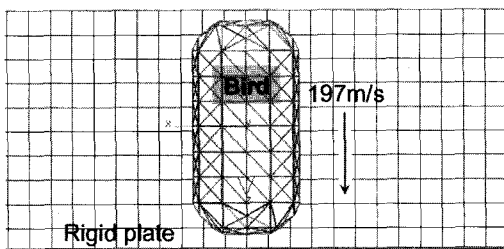


Fig. 3 Geometry of bird model

문헌[2]의 실험과 동일하게 하였다. Fig. 3은 유한요소 해석의 검증을 위한 유한요소모델을 도시한 것이다. 평판의 강체면에 197m/s의 속도로 수직충돌 한다고 가정하였으며, 이때 유체로 가정한 조류의 밀도는  $950\text{kg/m}^3$ 이다. Fig. 4(a)와 (b)는 각각 참고문헌[2]의 해석결과와 본 연구에서의 유한요소 해석 결과를 충격지점에서의 시간에 따른 압력 변화 그래프를 나타낸 것이다. 충돌초기에 높은 충격압력이 발생하고 일정시간 이후에는 정상상태 압력이 존재함을 알 수 있다. 참고문헌의 결과와 유사하게 충격압력과 정상상태 압력 값과 경향이 거의 일치함을 확인하였다.

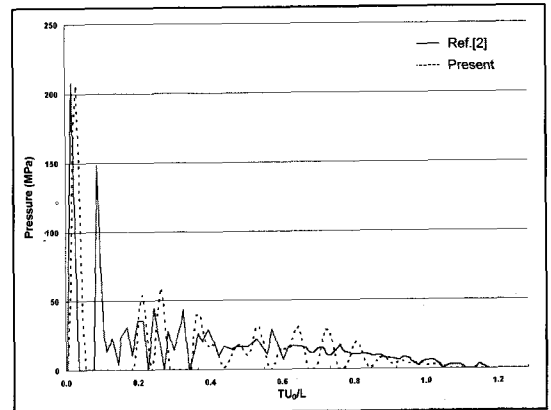


Fig. 4 Pressure curve at the impact point for the impact of a bird( $V=197\text{m/s}$ )

### 3. 조류 충돌 해석

본 연구에서는 앞 절에서 유한요소 해석의 타당성 검증을 위해 참고문헌[2]의 자료를 바탕으로 유한요소해석을 수행한 해석결과를 바탕으로 임의의 항공기 엔진 흡입구에 대한 조류충돌을 모사하였다. 연구 대상 항공기의 엔진 흡입구의 형상이 작고 국내여건상 공항활주로 주변에 가장 많이 서식하는 조류가 참새이므로[8] 충격 모델로 비교적 질량과 크기가 작은 조류로 가정하였다. Fig. 5는 조류충돌의 대상체인 항공기 엔진 흡입구의 형상은 참고문헌[9]에서 얻을 수 있었다. 충돌지점은 흡입구 상단 중앙지점으로 가

정하였다. 엔진 흡입구 나셀의 모델링은 충격지점에서의 거동을 자세히 살피고, 해석시간을 줄이기 위해 4절점 쉘 요소를 밀도를 달리하여 요소를 생성하였다. 사용된 엔진 나셀의 물성치는 Table 1과 같다.

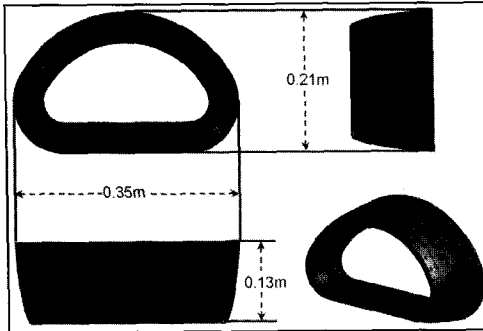


Fig. 5 Shape of the Engine Inlet

Table 1. Material Properties of Skin and Bird

	skin	bird
Density (kg/m <sup>3</sup> )	2810	950
Bulk Modulus (Pa)	7.03e10	2.2e9
Poison Ratio	0.33	
Yield stress (Pa)	5.03e8	
Thickness (mm)	1.5	
Diameter (m)		0.03
Length (m)		0.06
Mass (kg)		0.079
Initial velocity (m/s)		100

$$C^{-1} = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (1)$$

체적 계수는 체적 탄성률로, 아래 명시한 식에 의해 계산되었다. 여기서 C는 알루미늄의 압축률로서 체적탄성율의 역수이다.

Figure 6은 유한요소 해석을 위한 모델링 결과 모습이다. 조류의 형상은 50,000개의 솔리드 요소로 구성된 오일러 공간에 실린더의 형태로 흡입구 상단에 수직충돌과 경사충돌 한다고 가정하였다. 초기속도는 100m/s이며 실린더의 길이

와 직경의 비는 2로 하였다. 직경은 0.03m로 모델링하였으며 밀도는 950g/m<sup>3</sup>으로 충격해석에 사용된 조류의 질량은 0.079kg이다. 엔진흡입구와 오일러 요소의 경계조건은 앞 절에서 설명한 ALE algorithm이 정의 되었다.

수직충돌과 경사충돌의 해석조건에서 구조물의 두께를 달리 하여 유한요소 해석을 수행하였다. Fig. 6은 유한요소 해석을 위한 모델링 결과이다. 해석시간의 단축을 위해 충돌지점 부근에만 ALE 알고리즘을 적용하였다. Fig. 7은 조류충돌에 의한 충격지점에서의 압력 곡선결과를 나타내며 수직충돌과 경사충돌의 결과를 두께를 달리하여 해석결과를 도시하였다. 이때의 시간은 조류가 충돌시의 속도로 자신의 길이만큼 지나는데 소요되는 시간으로 무차원화 한 것이다.

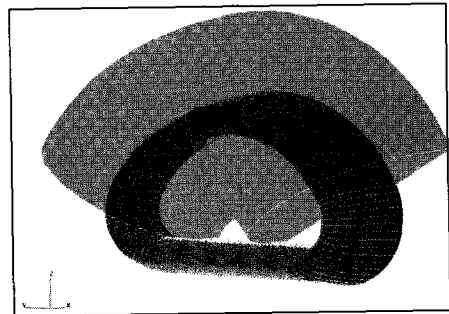
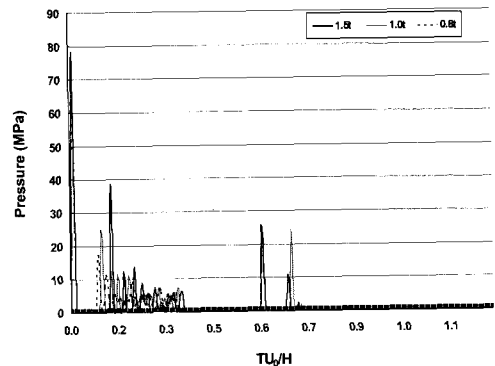
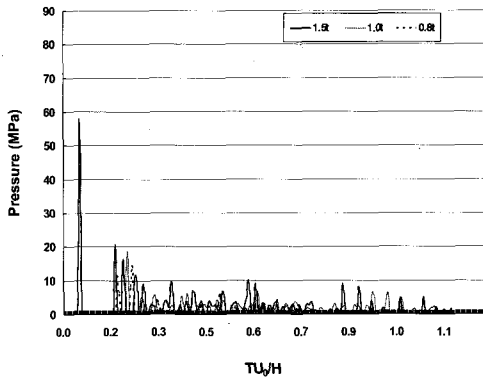


Fig. 6 Engine Inlet and Eulerian Mesh for Bird Impact Analysis



(a) Pressure Curve at Impact Angle, 90°



(b) Pressure Curve at Impact Angle, 30°

Fig. 7 Pressure Curve at the Engine Inlet Impact Point for the Impact of a Bird(V=100m/s)

충격각도가 90°인 경우 앞 질의 예제에서와는 달리 초기 충격압력은 뚜렷하게 나타나지만 충동이 이루어지는 동안의 정체압력은 나타나지 않았다. 이는 90°의 수직충돌의 경우 충격지점의 형상이 평판이 아닌 곡률반경이 비교적 작은 형상이기 때문에 조류가 초기 접촉 발생 후 두 갈래로 나뉘이기 때문에 전형적인 정체압력의 발생이 나타나지 않은 것으로 판단된다. 30°의 경사충돌의 경우 초기 충격압력과 정체압력이 잘 나타나고 있으며, 경사충돌의 경우 충동이 시작되어 끝나는 시점까지의 조류의 유효길이가 실제 조류의 길이보다 다소 길어지므로 정체압력이 수직 충격에 비해 더 오랫동안 존재하는 것을 알 수 있다.

일반적으로 90° 수직충돌의 경우 구조물에 응력이 더 크게 작용될 것으로 예상할 수 있으나 본 연구에서의 결과를 보면 수직충돌의 경우 보다 경사충돌 시 구조물의 응력이 더 크게 작용됨을 확인할 수 있었다. 이는 압력분포에서도 확인할 수 있었듯이, 수직충돌보다 경사충돌 시 조류의 질량이 분산되지 않고 한 곳에 집중되어 응력이 더 크게 나타난다고 판단하였다. 두께에 따른 수직충돌과 경사충돌의 해석결과를 Table 2에 정리하였다.

Table 2. Max. Stress and Displacement

Impact angle	Case1 (1.5t)		Case2 (1.0t)		Case3 (0.8t)	
	Stress (Mpa)	Disp. (mm)	Stress (Mpa)	Disp. (mm)	Stress (Mpa)	Disp. (mm)
90°	139	0.0997	303	0.226	358	0.415
30°	351	0.779	502	4.75	503	7.67

Figure 8, 9, 10에 각 Case에서의 조류와 구조물의 변형 형상을 나타내었다. Table 2의 결과와 마찬가지로 응력분포를 보면 각 Case마다 수직충돌의 경우보다 경사충돌의 경우가 더 큰 응력이 발생한 것을 확인할 수 있으며 Case1의 경우 응력이 구조물의 허용응력 범위 안에서 발생하며, 변위가 상당히 적은 것으로, 조류충돌에 대한 충분한 안전율을 확보한 것으로 판단된다.

Figure 11은 유한요소 해석결과 충격지점에서의 조류의 변형된 형상을 보여준다. 앞에서의 응력과 변위에 관한 결과에서 판단되는 충돌 시 조류의 형상을 확인할 수 있었다. 수직충돌의 경우 조류가 구조물에 접촉이 이루어진 후 점차 두 갈래로 나뉘어 흘러가는 반면, 경사충돌의 경우 조류의 전체가 충격지점에 충격이 가해지는 것을 확인할 수 있었다.

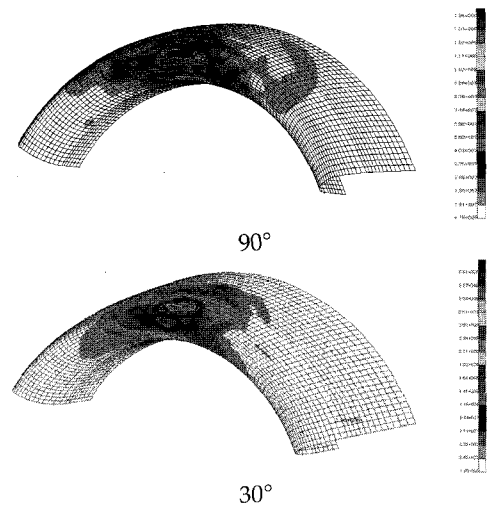


Fig. 8 Stress Contour of the Engine Inlet (Case1)

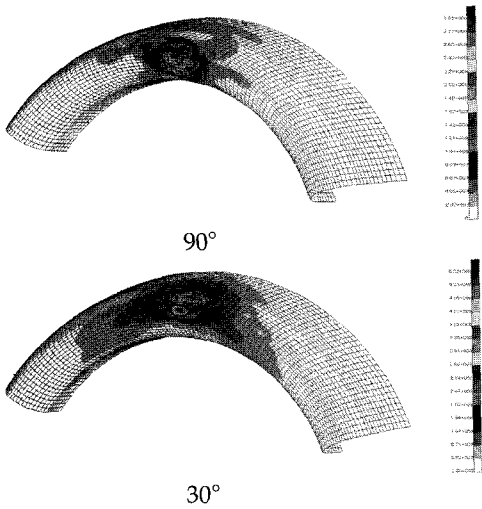


Fig. 9 Stress Contour of the Engine Inlet (Case2)

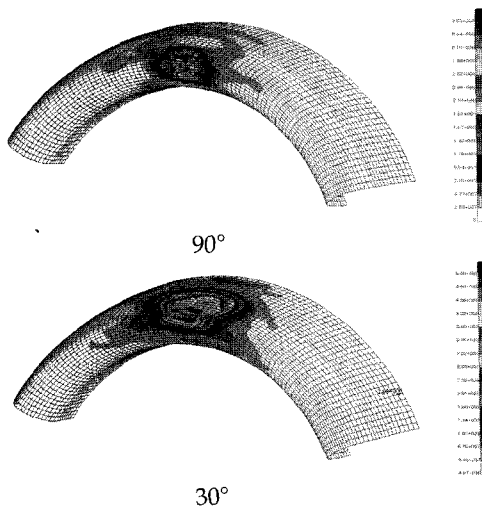


Fig. 10 Stress Contour of the Engine Inlet (Case3)

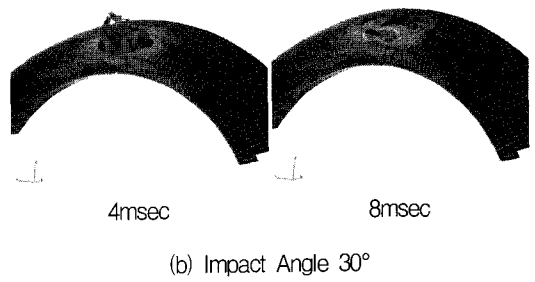
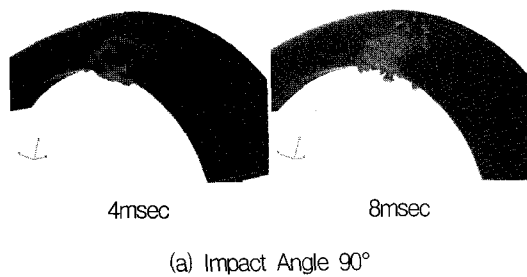


Fig. 11 Deformed Shape of a Bird

4. 결 론

본 연구에서는 항공기 운용 중 조류 충돌 현상이 항공기 구조에 미치는 영향에 대해 수치 해석 연구를 수행하였다. 국내 조류분포와 조류 충돌사고 중 가장 빈번히 일어나는 항공기 부위에 관한 문헌[8]을 조사하여 공항주변에서 가장 많이 서식하는 조류를 충격체로 정의하고, 조류 충돌 대상 구조는 조류 충돌시 엔진에 영향을 미칠 수 있는 엔진 흡입구 나셀 부위로서 수직 충격과 경사충돌의 경우를 구조물의 두께를 달리하여 각 Case별로 조류충돌 시 충격부위 거동을 확인 하였다.

본 연구를 통해 수행된 조류 충돌에 관한 해석적 기초 연구 결과를 바탕으로 정확한 대상체가 주어진다면, 다양한 조류의 종류별 해석, 즉 충격체의 질량별로 다양한 해석을 수행하고 추후 조류 충돌 시험을 병행하여 해석 결과의 시험 결과를 비교 검증하여야 할 것이다. 이러한 연구 결과를 바탕으로 항공기 설계 단계에서 외부 충격 물체에 의한 손상에 대해 충분한 안전율을 고려한 설계를 수행하는데 활용할 수 있을 것이다.

참고 문헌

1. Carlos Alberto Huertas-Ortecho, "Robust Bird-Strike Modeling Using LS-DYNA", Thesis of Master, UNIVERSITY OF

- PUERTO RICO MAYAGUEZ CAMPUS, 2006
2. 문창오, 우종호, 우태식, 황철호, 박찬익, "항공기용 Windshield의 조류충돌 저항성 평가", 한국항공우주학회지, 제24권, 제2호, 1996, pp.95-105
  3. McCarthy, R. E., "Finite Element Analysis of a Bird-Resistant Monolithic Stretched Acrylic Canopy Design for the F-16 Aircraft"; AIAA aircraft Systems and Technology Conference, Dayton, Ohio, August 1981
  4. Albert F., Storace, "Foreign Object Impact Design Criteria", AFAPL-TR-78-81, 1982.
  5. Albert F., Storace, R. P. Nimmer, and R. Ravenhall "Analytical and Experimental Investigation of Bird Impact on Fan and Compressor Blading", Journal of Aircraft, Vol. 21, No 7, July 1984, pp.520-527
  6. Alexander, A. "Interactive Multi-Mode Blade Impact Analysis", Journal of Engineering for Power, Vol. 104, 1982, pp. 286-295
  7. Wilbeck, J. S., "Impact Behavior of Low Strength Projectiles", Air Force Materials Lab. Rept. AFML-TR-77-134, July 1978
  8. 정병주, "항공기 조류충돌 예방시스템 구축방안에 관한 연구", 제주대학교 석사학위논문, 2006.
  9. 공창덕, "흡배기구 손실예측 및 이를 고려한 항공기 가스터빈의 장착 성능모사 연구", 한국추진공학회지, 제10권 4호, 2006, pp.100-108