

터보팬 엔진 블레이드의 MIL-E-5007D 요구도 기반 비선형 조류충돌 해석

김기하^a · 김동현^{b,*} · 최준규^c · 김상조^d · 김유일^d

Nonlinear Bird Strike Analysis of Turbofan Engine Blade Based on MIL-E-5007D Specification

Ki-Ha Kim^a · Dong-Hyun Kim^{b,*} · Joongyu Choi^c · Sangjo Kim^d · Youil Kim^d

^aGraduate School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University, Korea

^bSchool of Aerospace and Software Engineering, Gyeongsang National University, Korea

^cRaonXSolutions Co.,Ltd., Korea

^d3rd Directorate, Agency for Defense Development, Korea

*Corresponding author. E-mail: dhk@gnu.ac.kr

ABSTRACT

In this study, non-linear bird strike analyses on a turbofan engine blade with high rotating speed have been performed using the Smooth Particle Hydrodynamics (SPH) bird model. For the bird shape and density, an automatic calculation technique based on the semi-empirical data was established and applied, and the bird strike test model was analyzed in order to perform preliminary verification of the present nonlinear bird strike analysis approach. For a designed engine blade, various engine operation conditions required by MIL-E-5007D have been successfully considered and analyzed numerically, and structural integrities for each requirement are evaluated.

초 록

본 연구에서는 고속으로 회전하는 터보팬 엔진 블레이드에 대해 SPH 조류 모델을 활용한 비선형 조류 충돌해석을 수행하였다. 조류 형상과 밀도는 데이터에 기반한 자동계산 기법을 구축 및 적용하였으며, 기존 조류충돌 시험 모델에 대한 해석을 수행하여 비선형 충돌해석 기법의 사전 검증을 수행하였다. 국내에서 설계된 엔진 블레이드에 대해 MIL-E-5007D에서 요구하는 다양한 엔진 운용상황에 따른 조류 충돌 해석을 수행하고 결과를 제시하였으며, 각 요구조건에 대한 충돌 후 건전성을 평가하였다.

Key Words: Bird Strike(조류 충돌), SPH(Smooth Particle Hydrodynamics), Turbo Fan Engine Blade (터보팬 엔진 블레이드)

Received 28 June 2023 / Revised 26 September 2023 / Accepted 30 September 2023

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

1. 서 론

[이 논문은 한국추진공학회 2023년도 춘계학술대회(2023.5.24.~26, 라마다프라자 제주호텔) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

항공기 운용 중 새와 충돌하는 현상은 과거부



Fig. 1 Cases of bird strike for engine.

터 현재까지도 빈번하게 발생하여 왔으며, 이 중 엔진으로 유입되는 조류충돌 사고는 Fig. 1의 사례와 같이 엔진 블레이드에 심각한 파손이나 변형을 유발할 수 있다. 또한, 조류충돌 이후 엔진 고장이나 성능저하 현상이 발생하는 경우 항공기의 운항 안전성에도 심각한 문제를 초래할 수 있다. 따라서 독자적인 엔진 개발과정에서 MIL-E-5007D에서 요구하는 모든 항목 사항에 대한 신뢰도 높은 해석 및 평가 기술의 구축은 그 중요성이 매우 크다고 할 수 있다.

군용엔진의 조류충돌(Bird Strike) 건전성 요구도는 MIL-E-5007D Bird Ingestion 부분에 5개의 항목으로 명시되어 있다. 참고로 MIL-E-5007D Bird Ingestion의 (a)항목은 엔진 최대 정격 회전속도(maximum rated speed) 상태의 이륙속도에서 2~4 ounce (0.057~0.113 kg)의 작은 새 최대 16마리가 동시에 충돌하는 상황과 2 lb (0.907 kg)의 중간크기 새 한 마리가 충돌하는 조건이다. (b) 항목은 엔진 최대 연속 회전속도(maximum continuous speed) 상태의 순항속도에서 (a) 항목과 동일한 조류 충돌상황에 대한 것이다. (c) 항목은 하강비행 속도와 그에 대응하는 엔진 회전속도(associated engine speed) 상태에서 (a) 항목과 동일한 조류 충돌상황에 대한 것이다. (a), (b) 및 (c) 항목은 조류충돌 후 엔진 부품의 손상이 있더라도 엔진 꺼짐(flameout) 현상이 없어야 하고, 제조사가 엔진 스펙(engine specification)에 명시한 시간 이내에 조류충돌

Table 1. Items of MIL-E-5007D bird ingestion.

Item	Engine operations	Bird Ingestion
(a)	Maximum engine rated speed (Take-off flight speed)	Bird weighing 2~4 ounces (Max. of 16 at a time)
(b)	Maximum continuous speed (Cruise flight speed)	
(c)	Associated engine speed (Descent flight speed)	Bird weighing 2 lb (one at a time)
(d)	Maximum engine rated speed (Most critical flight speed)	Bird weighing 4 lb

이전 운전상태로 회복(recover) 가능해야 함을 규정하고 있다. (d) 항목은 항공기의 최대 임계 비행속도(엔진 최대 정격 회전속도, maximum rated speed) 조건에서 4 lb (1.814 kg) 중량의 조류와 충돌 시 엔진 고장이 없어야 하며, 항공기에 손상(damage)을 초래하지 않아야 함을 규정하고 있다. 참고로 MIL-E-5007D Bird Ingestion 요구도를 Table 1에 표 형태로 제시하였다.

반면 민간용 고정익 및 회전익 엔진에 대한 조류충돌 요구도는 2023년 4월 개정된 FAA (Federal Aviation Administration) AC 33.76-1B Bird Ingestion Certification Standards에 상세히 규정되어 있다. 해외 선진 엔진제작사의 경우는 막대한 예산을 투입하여 시제작 엔진에 대해 조류 충돌시험을 실제로 수행하는 사례가 있다. 하지만 설계 과정에서는 해석적 방법을 통해 조류 충돌 안전성을 확인하는 것이 유일한 방안이다.

조류충돌 해석은 유기 생명체인 조류의 점성 유체 특성을 반영한 충돌 조건과 형상 및 재료의 비선형성, 대변형, 파손 등의 현상을 모사하기 위해 비선형 동적 충격 해석(nonlinear transient impact dynamic analysis), 접촉경계조건(contact boundary condition), 유체-구조 연성(fluid-structure interaction, FSI) 및 재료파손 모델(material failure model) 등과 같은 복잡한 비선형 모델링 기법의 적용이 필요하다.

조류충돌 해석은 그 중요성 때문에 과거부터 다양하고 많은 연구들이 수행되어 왔으며, 본 논

문과 관련된 몇 가지 사례를 요약하면 다음과 같다. 2006년 Ryabov 등[1]은 LS-DYNA를 활용하여 Lagrangian, SPH(smooth particle hydrodynamics) 및 ALE(arbitrary Lagrangian-Eulerian) 접근법으로 팬 블레이드의 조류 충돌 해석을 수행하고 그 결과를 비교하였으며, 해석 기법에 따른 장·단점을 분석하였다. 2010년 박일경 등[2]은 LS-Dyna의 ALE 기법을 이용한 조류 모델과 외연적 유한요소해석을 적용하여 금속재와 복합재료가 적용된 소형항공기 주익 앞전 모델에 대한 조류 충돌해석을 수행하고 각 해석모델의 조류 충돌 시 거동을 분석하고 비교하였다. 주익 앞전 모델에 금속재와 복합재료를 적용한 경우 각 모델에 대한 조류충돌 후 특성을 분석하였다. 2016년 김주훈[3]은 SPH 기법을 이용하여 다양한 파라미터에 대한 영향 평가를 강제 및 탄성체 평판 조류충돌 조건들에 대해 수행하였다. 2021년 박정후[4]는 SPH 기법을 활용하여 조류충돌 해석 과정에서 조류 모델의 형상을 결정하는 매개변수가 미치는 영향을 회전익 항공기의 윈드실드 모델에 대한 조류충돌 시험과 해석을 통해 비교 분석하였다. 2022년 Cwiklak 등[5]은 LS-DYNA를 활용하여 조류 모델링에 따른 영향을 실험과 비교하여 평가하였다. 충돌시험은 원통-반구 끝단(cylinder with hemispheric ends) 형태의 젤라틴 소재 조류 모델로 수행되었으며, 시험결과와 비교 평가를 통해 SPH 모델링 기법의 타당성을 입증하였다.

기존 선행 연구 중 조류충돌 해석 분야에서 가장 혁신적인 사례 중 하나는 2016년 Muir 및 Friedmann 등[6]이 수행한 성과를 들 수 있다. 이들 연구와 기존 연구의 차별성은 대부분 연구 사례가 조류충돌 해석과 시험에만 국한되어 있지만, 이들은 조류충돌로 손상 변형된 터보팬(turbo fan) 엔진 블레이드에 대해 후속적인 성능 및 안정성 해석을 최초로 수행하였다는 점이다. 구체적으로는 60%, 75% 및 100% 출력조건에서 엔진 성능의 변화, 강제진동응답(forced vibration response) 수준 및 공력탄성학적(aeroelastic response) 응답 특성까지 해석하고 분석하였다. 이러한 연구가 중요한 이유는

MIL-E-5007D Bird Ingestion 규정을 충족시키기 위해서는 블레이드 자체의 구조 건전성뿐만 아니라 조류충돌 후 엔진의 꺼짐(flameout) 유무와 이전 운전상태로 회복(또는 운항상태 유지) 여부에 대한 검증결과를 제시해야 하기 때문이다.

이상의 연구사례를 검토해 볼 때 국내에서는 아직 자체 설계한 엔진 블레이드에 대해 MIL-E-5007D Bird Ingestion 요구도를 모두 고려한 해석결과를 찾아볼 수 없었다. 또한 조류충돌 이후 손상 변형된 블레이드에 대한 진동, 공력탄성학적 안정성 및 성능평가와 관련된 연구는 높은 중요성에도 불구하고 국내 수행 사례는 아직 없는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 군용 터보팬 엔진의 조류충돌 후 변형된 블레이드에 대한 성능평가, 강제진동 및 공력탄성학적 안정성 평가 기술 확보를 목표로 선행적으로 필요한 조류충돌 해석을 수행하였다. 이의 결과로 국내에서 개발 중인 터보팬 엔진 블레이드에 대해 조류충돌 해석 기법을 검증하고 MIL-E-5007D에서 요구하는 다양한 조류충돌 조건에 대한 해석 및 손상 변형 특성을 분석하였다. 아울러 본 연구팀은 조류충돌 이후 손상 변형된 블레이드 형상에 대한 전산유체역학 성능해석 및 진동-공탄성 안정성 해석기술 구축 연구를 추진하고 있다.

2. 조류 충돌해석 모델링 기법

2.1 터보팬 엔진 블레이드 및 조류 물성치

Table 2에는 티타늄합금(Ti-6AL-4V) 재질의 터보팬 엔진 블레이드의 비선형 재료 물성치를 제시하였다. 비선형 충돌해석을 위해 신뢰도가 검증된 LS-Dyna를 활용하였으며 Johnson-Cook 비선형(탄소성) 재료 모델을 적용하였다[7]. Table 3는 SPH 조류 모델에 적용한 관련 물성치를 나타내고 있다[8].

2.2 조류 형상

조류충돌 해석 모델링을 수행하기 위해서는 선행적으로 대상 조류 무게에 대한 형상과 크기가 결정되어야 한다. Eqs. (1)~(2)는 다양한 조

류의 실측 데이터를 기반으로 구축되었고 조류 충돌 해석 분야에서 주로 활용되고 있는 반경험적(semi-empirical) 관계식이다[9]. 본 논문에서도 MIL-E-5007D 요구도의 조류 질량에 해당하는 등가 크기 및 밀도를 구하기 위해 활용하였다.

$$\rho = -0.063 \times \log_{10}(m) + 1.148 \quad (1)$$

$$\log_{10} D = 0.335 \times \log_{10}(m) + 0.900 \quad (2)$$

위 식과 더불어 효율적이면서 정량적인 충돌

해석을 위해서는 조류의 등가형상(equivalent shape)이 필요하다. 서론에서 언급한 기존 연구 사례 등을 분석해 볼 때 충돌해석을 위한 대표적인 등가 조류 형상으로는 일반적으로 원기둥, 타원형 및 원기둥-반구형 등이 있다. 본 논문에서는 해석에 고려한 등가 조류 형상을 선택한 후 질량(m)를 입력하면, 등가 밀도(ρ)와 지름(D)을 자동으로 계산하는 코드를 제작하여 활용하였다.

Table 2. Ti-6Al-4V material properties.

Density (kg/m ³)	4,420
Strain Rate Correction	First-Order
Initial Yield Stress (MPa)	1,098
Hardening Constant (MPa)	1,092
Hardening Exponent	0.93
Strain Rate Constant	0.014
Thermal Softening Exponent	1.1
Melting Temperature (°C)	1604.9
Reference Strain Rate (1/sec)	1.0
Gruneisen Coefficient	1.23
Velocity Curve Intercept, C1 (mm/sec)	5.13x10 ⁶
First Slope Coefficient, S1	1.028
Slope Coefficient, S2 (sec/mm)	0.0
Shear Modulus (GPa)	42.0
Specific Heat Constant Pressure (mJ/kg°C)	5.8x10 ⁵

Table 3. Bird material parameters and equation of state (EOS) coefficients [8].

Material Density (kg/m ³)	942.8
Gruneisen Coefficient	0.0
Velocity Curve Intercept, C1 (mm/sec)	1.48x10 ⁶
First Slope Coefficient, S1	1.92
Slope Coefficient, S2 (sec/mm)	0.0
Shear Modulus (GPa)	2.0

3. 해석결과 및 검토

3.1 조류충돌 해석 기법 검증

본 연구에서는 가장 적합한 조류충돌 해석 모델링 기법을 결정하기 위해 다양한 모델링 매개변수에 대한 영향성을 평가하였으나, 지면 관계상 일부 결과만 제시하였다. 본 논문에서 원기둥-반구형 등가 형상을 적용한 이유는 과거 다양한

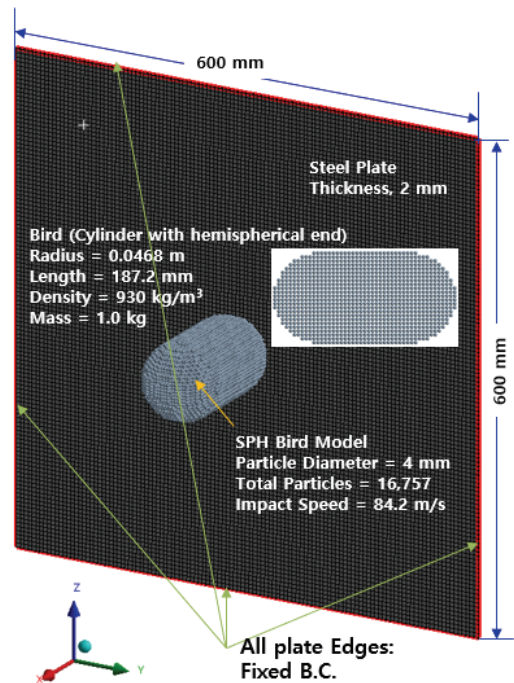


Fig. 2 Finite element model of Q235 steel plate and SPH bird model.

조류충돌 시험조건에 대한 검증해석 과정에서 3 가지 형상에 대한 해석을 모두 수행하고 상대평가한 결과 통계적으로 시험결과에 가장 근접한 결과를 나타내었기 때문이다. 유사한 이유로 조류충돌 해석과 관련된 다른 참고문헌들에서도 이 형상을 조류충돌 해석에 가장 많이 활용한 것으로 판단된다.

조류 충돌해석 기법 검증을 위해 비교 가능한 충분한 모델링 정보 및 시험결과[10]가 제시되어 있는 모델을 선정하였다. Fig. 2는 평판 조류충돌 시험조건에 대한 모델링 정보를 보여주고 있다. 모든 모서리의 변위 및 회전 자유도가 구속된 평판은 600 mm × 600 mm × 2 mm 크기의 강재(Q235 재질)로 질량 1.0 kg의 조류가 84.2 m/s 속도로 충돌하는 조건이다. 등가 조류 형상은 양 끝단이 반구인 원기둥 형상으로 고려하였고 이 경우 반지름은 46.8 mm, 길이는 187.2 mm, 등가 밀도는 930 kg/m³ 이며, 나머지 물성치는 Table 3에 제시된 값을 적용하였다. 충돌 대상 평판의 유한요소 구조모델은 13,924개의 shell 요소를 가지며, SPH 조류 모델은 4 mm 지름의 입자 16,757개로 구성되어 있다. Fig. 3은 조류충돌 시 시간에 대한 변위 응답을 참고문헌의 시험계측 및 해석결과와 상호 비교한 것으로 유사한 경향을 나타내고 있으며, 조류충돌 후 완전 소형변형 상태가 유발됨을 확인할 수 있다. 참고로 해석에 활용한 수치해석 서버 사양은

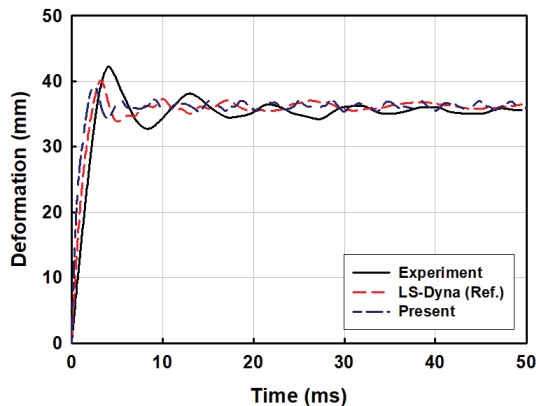


Fig. 3 Comparison of deformation responses for Q235 steel plate due to bird strike.

Intel(R) Core(TM) i9-12900K 3.20 GHz CPU 및 64.0 GB RAM으로 구성되어 있으며, 총 16개의 물리적 core를 병렬처리하여 약 2.48 시간이 소요되었다.

Fig. 4는 조류충돌해석 기법의 추가 검증을 위해 선정한 또 다른 시험조건[11]에 대한 해석 모델을 보여주고 있다. 평판은 알루미늄 합금 재질이며, 두께 4.06 mm 및 6.35 mm인 두 종류의 모델에 대한 해석을 수행하고 시험결과와 비교하였다. 충돌시험 조류의 질량은 1.81 kg으로 MIL-E-5007D 요구도의 (d) 항목에 해당하는 조류 질량에 해당하고 이는 군용엔진 조류충돌 요구도에서 고려해야 가장 무거운 중량이다. 이전 검증해석과 마찬가지로 SPH 조류모델 형상은 원기둥-반구로 고려하였고, 반지름 49.0 mm, 길이 287.0 mm, 등가 밀도는 942.8 kg/m³ 이다. 평판은 모든 모서리가 완전하게 구속되어 있으

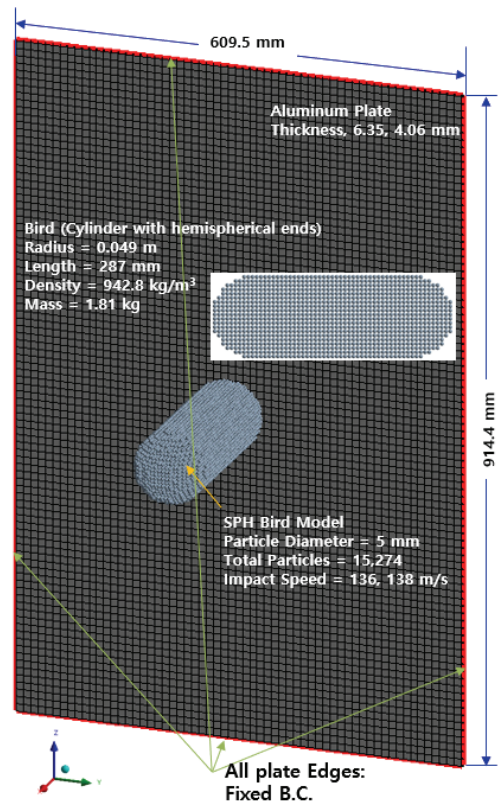
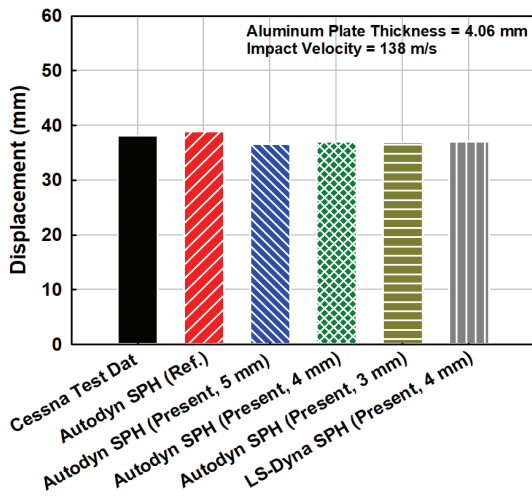


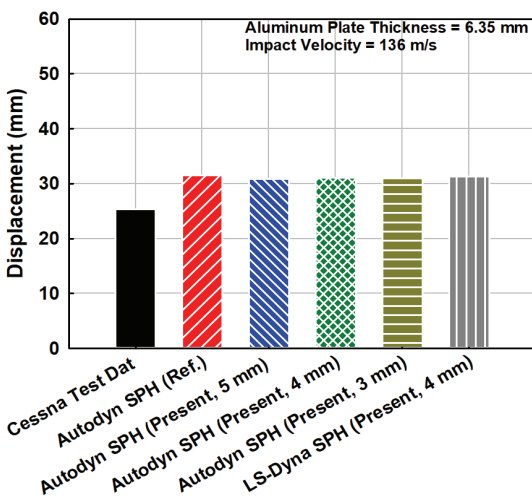
Fig. 4 Finite element model of aluminum plate with bird strike.

며, 조류충돌 속도는 4.06 mm 두께 평판의 경우는 138 m/s, 6.36 mm 두께 평판의 경우는 136 m/s이다. 이 모델의 경우는 SPH 조류 모델의 주요 매개변수 중 하나인 입자 크기에 따른 영향성 평가결과를 포함하였다.

Fig. 5(a)는 4.06 mm 두께의 알루미늄 평판에 138 m/s로 속도로 조류가 충돌 시 유발되는 최대 변위 수준을 충돌시험 결과와 비교한 결과이다. 충돌해석 시 SPH 조류모델 입자 크기를 다



(a) Case 1 (t=4.06 mm, V=138.0 m/s)



(b) Case 2 (t=6.35 mm, V=136.0 m/s)

Fig. 5 Comparison of maximum displacement for different bird strike conditions.

르게 설정한 후 충돌해석 전문 프로그램인 LS-Dyna 및 Autodyn을 활용하여 각각 해석을 수행하고 비교 평가를 수행하였다. SPH 조류 모델의 경우 3~5 mm 정도의 입자 크기 범위에서는 거의 유사하게 수렴된 충돌해석 결과를 나타내고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 5(b)는 두께 6.35 mm 알루미늄 평판에 136 m/s의 속도로 조류가 충돌하는 조건에 대한 비교결과이다. 이 경우는 참고문헌 포함 충돌해석 결과가 시험보다 평균적으로 다소 큰 보수적인 변형량을 나타내었으며, 이전과 마찬가지로 3~5 mm 정도의 입자 크기 범위에서는 거의 유사하게 수렴된 충돌해석 결과를 나타내고 있다.

3.2 엔진 운용 조건에서 터보팬 엔진 블레이드 조류 충돌해석 (MIL-E-5007D, 3.2.5.6.1 Bird Ingestion 조건)

본 절에서는 개발 중인 터보팬 엔진 블레이드에 대한 비선형 조류충돌 해석을 MIL-E-5007D Bird Ingestion 요구도에 따라 수행하고 결과를 분석하였다. 이후 제시한 모든 충돌해석 결과는 신뢰성이 입증된 LS-Dyna 프로그램을 활용하였으며, Fig. 6은 해석 대상 엔진 블레이드의 조류충돌 해석 모델을 보여주고 있다. 엔진 블레이드는 총 135,119개의 tetrahedron 요소로 구성되어

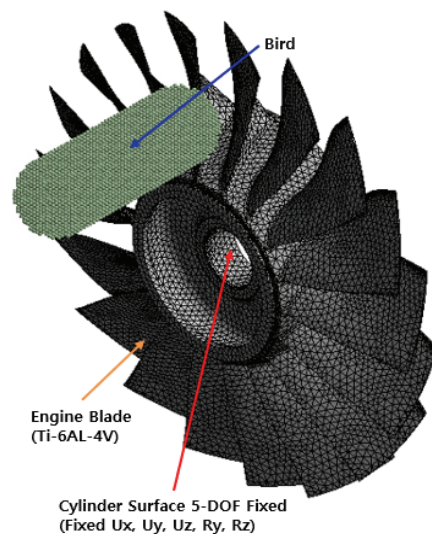
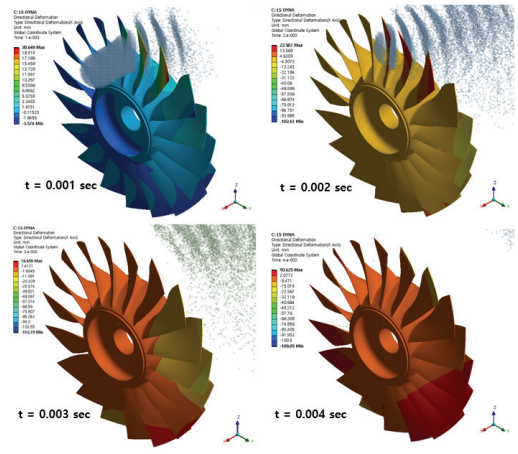


Fig. 6 Finite element model of the engine blade and SPH bird model.

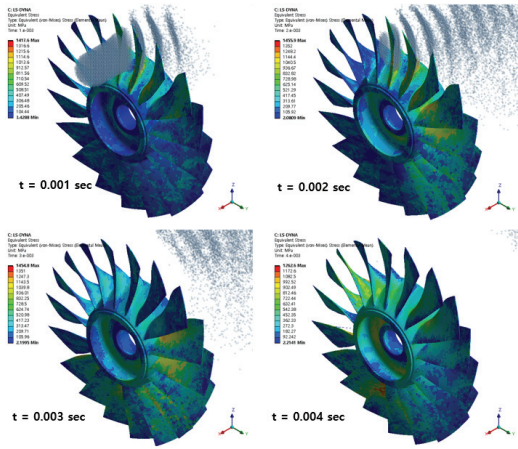
있고, SPH 조류 모델의 입자 크기는 5 mm 이다. 충돌 조류의 질량은 MIL-E-5007D 요구도 해석조건에 따라 다르게 적용하였다. 또한 조류의 등가 형상은 원기둥-반구 형태로 가정하였고, 재질 특성은 Table 3에 제시한 물성치를 기반으로 shock EOS linear 모델링 기법을 적용하였다. 조류의 충돌 위치는 조류모델의 직경을 고려하여 가능한 블레이드의 끝단 위치로 설정하였으며, 이는 블레이드 스패 길이 방향으로 약 60% 지점에 해당한다.

엔진 블레이드의 재질은 Ti-6AL-4V로 고려하였으며, 관련 물성치는 Table 2에 제시되어 있다. 충돌해석 과정에서 재료의 탄소성 비선형 거동 특성을 반영하기 위해 Johnson-Cook 모델을 적용하였다. 엔진 블레이드의 경우 회전속도를 반영하기 위해 회전축 면에 회전 축방향 회전 자유도를 제외한 5-DOF(U_x, U_y, U_z, R_y, R_z) 구속 경계조건을 적용하였다. 엔진 블레이드 회전 속도 및 조류 충돌 속도는 국방과학연구소에서 요청한 엔진 운용조건에 따라 설정하였다. 상세 수치는 보안상 제시가 불가능하여 이륙 조건(Case A)에서의 조류 충돌 속도를 $V_{take-off}$, 엔진 회전속도를 $\omega_{take-off}$ 로 정의하고 다른 조건들은 이 값을 기준으로하여 무차원화된 형태로 기술하였다.

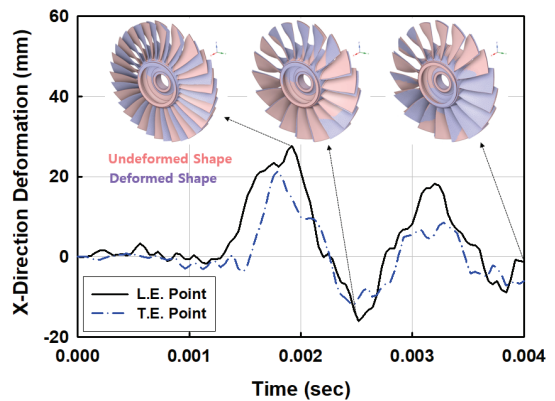
Fig. 7(a)는 MIL-E-5007D (a)항목 조건에 대한 충돌해석 결과로 조류의 충돌속도는 이륙속도이고 엔진 회전속도는 최대 정격 회전속도조건이다. 시간에 따른 X 방향 변형량 분포도를 나타내고 있으며, Fig. 7(b)는 동일조건에서 시간에 따른 von-Mises 응력 분포도를 나타내고 있다. 조류 충돌 시점부터 SPH 입자들이 고속회전하는 블레이드와 충돌로 분산되는 것을 확인할 수 있으며, 조류의 충돌에너지가 블레이드 구조로 전달되어 변형이 유발되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 7(c)는 조류충돌 시 최대 변형량이 유발되는 블레이드 끝단의 앞전과 뒷전에서 시간에 따른 X-방향(충돌방향) 변형량 응답을 나타내고 있다. 1.92 ms에서 약 27.554 mm의 최대 변형량이 유발되는 것을 확인할 수 있으며, 선별된 시점에서 블레이드의 구조변형 분포 형상을 충돌 전 원래 형상과 비교한 결과를 그래프 상단에 추가로 제



(a) X-direction deformation contour



(b) von-Mises stress contour



(c) X-direction deformation responses

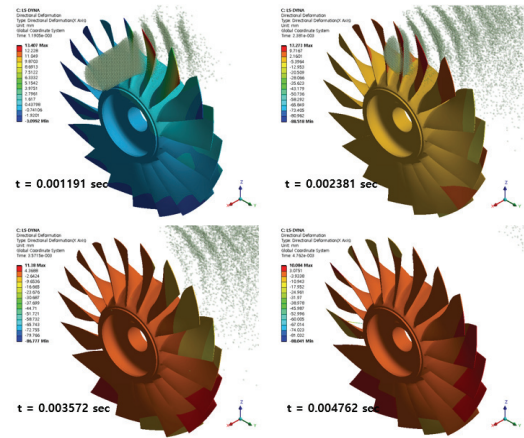
Fig. 7 Bird strike analysis results of the engine blade (Case A).

시하였다. 엔진 블레이드에 조류가 충돌하는 경우 충돌속도 및 엔진 회전속도에 따라 각 블레이드가 받는 손상 영향은 다양하게 발생할 수 있다. 조류 충돌 후 각 블레이드는 서로 정도가 다른 탄소성 변형이 발생하게 된다. 이 경우는 조류 충돌 후 4 ms 지나면 해당 블레이드의 변형이 상당 부분 복원되며 블레이드 파손 현상은 발생하지 않았다. Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2660 v3 2.60 GHz, 128.0 GB RAM 서버로 총 20개의 물리적 core를 병렬 연산처리하여 4.0 ms의 충돌 해석에 약 12시간이 소요되었다.

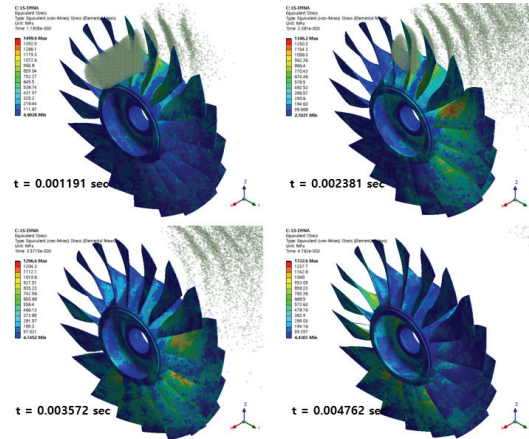
참고로 MIL-E-5007D 규정에 따르면 충돌해석으로 다수의 블레이드에 소성변형이 발생한 블레이드에 대해 CFD 해석을 수행하여 엔진 내부 유동 불안정성에 따른 엔진 꺼짐(flameout) 현상 초래 가능성, 지속적 비행이 가능한 추력 성능, 진동 및 공력탄성학적 불안정 발생 등과 같이 후속된 문제가 없음을 입증하여야 하는데, 이와 관련된 내용은 후속 연구로 진행 중이다.

Fig. 8은 MIL-E-5007D (b)항목 조건에 대한 충돌해석 결과로 조류의 충돌속도는 순항속도이고, 엔진 회전속도는 최대 연속 회전속도 조건이다. Fig. 8(a)는 시간에 따른 X-방향(조류 충돌 방향) 변형량 분포도를 나타내고 있으며, 조류 충돌 속도는 $0.79V_{take-off}$ 이며, 엔진 회전속도는 $0.84\omega_{take-off}$ 이다. Case A와 유사하게 조류 충돌 시점부터 SPH 입자가 빠르게 분산되는 것을 확인할 수 있으며, 블레이드의 조류충돌 탄소성 변형분포가 각기 다르게 유발되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8(b)는 해당 조류 충돌 조건에서 von-Mises 응력 분포도를 나타내고 있는데, 개별 블레이드에 작용하는 다른 조류충돌 에너지와 탄성복원 특성이 다르게 나타나기 때문에 다른 응력분포 패턴을 나타내게 된다.

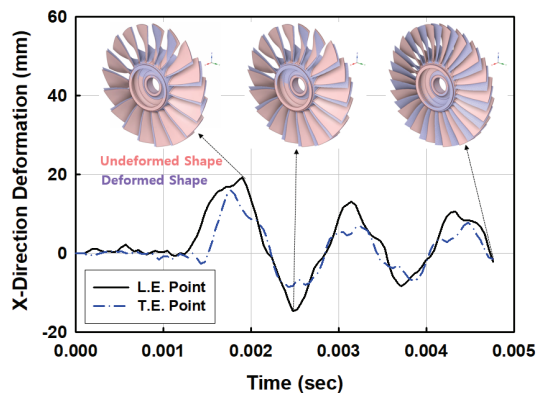
참고로 조류충돌 상황에서 특정 블레이드에 유발되는 최대 응력 수준은 극도로 짧은 시간 순간적으로 극한강도 수준이나 그 이상까지도 나타날 수도 있다. 하지만 이는 구조가 고속 충돌 현상을 경험할 때 순간적으로 큰 충격에너지가 구조 내부로 응력 충격파(stress shock wave) 형태로 전파되는 과정에서 매우 짧은 순간 나타



(a) X-direction deformation contour



(b) von-Mises stress contour



(c) X-direction deformation responses

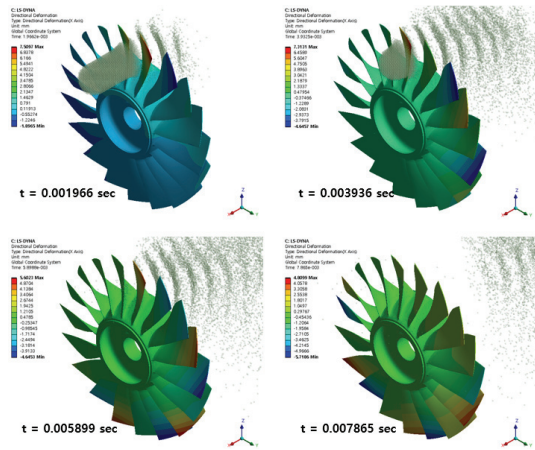
Fig. 8 Bird strike analysis results of the engine blade (Case B).

나는 현상일 뿐이다. 순간 초과 응력으로 국부적으로 미소 균열이 발생할 수도 있겠지만, 완전 구조파손을 초래하지는 않는다는 것은 경험적으로 잘 알려진 사항이다. 반면 비선형 충돌해석 조건이 매우 가혹하여 실제로 구조에 영구적인 파손을 초래하는 수준에 해당하는 경우는 비선형 충돌해석 결과로 구조의 일부가 실제 떨어져 나가는 현상이 모사되게 된다. Fig. 8(c)는 시간에 따른 X-방향 변형량 응답을 나타내고 있다. 1.9048 ms에서 약 19.157 mm의 변형량이 발생하였다.

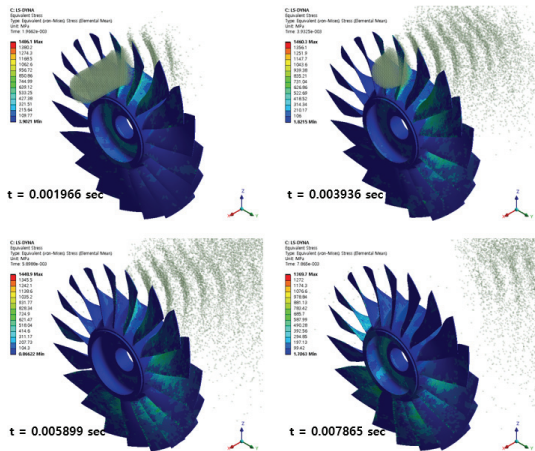
Fig. 9는 MIL-E-5007D (c)항목 하강비행 조건에 대한 충돌해석 결과이다. 이 경우 조류충돌 속도는 $0.39V_{take-off}$ 이고, 엔진 회전속도는 $0.51\omega_{take-off}$ 으로 이전 조건들에 비해서는 다소 완화된 충돌해석 조건에 해당한다. Fig. 9(a)는 시간에 따른 X-방향 변형량 분포도를 나타내고 있다. Fig. 9(b)는 von-Mises 응력 분포도를 나타내고 있으며, Fig. 9(c)는 시간에 따른 X-방향 변형량 응답을 나타내고 있다.

Fig. 10은 MIL-E-5007D (d)항목 조건에 대한 충돌해석 결과로 조류의 충돌속도는 최대 임계 비행속도, 엔진 회전속도는 최대 정격 회전속도 조건이다. 이 경우 조류 충돌 속도는 $1.44V_{take-off}$ 이며, 엔진 회전속도는 $1.00\omega_{take-off}$ 이다. Fig. 10(a)는 시간에 따른 X-방향 변형량 분포도를 나타내고 있으며, Fig. 10(b)는 서로 다른 시간 순간에서 von-Mises 응력 분포도를 나타내고 있으며, Fig. 10(c)는 블레이드 끝단에서 시간에 대한 X-방향 구조변형 응답을 나타내고 있다.

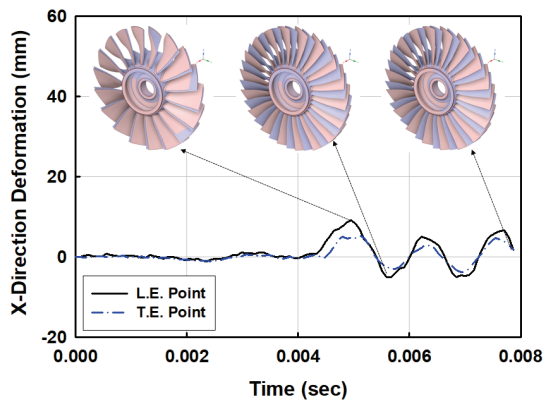
Fig. 10(a)는 시간에 따른 X-방향 변형량 분포도를 나타내고 있으며, Fig. 10(b)는 서로 다른 시간 순간에서 von-Mises 응력 분포도를 나타내고 있으며, Fig. 10(c)는 블레이드 끝단에서 시간에 대한 X-방향 구조변형 응답을 나타내고 있다. 1.6771 ms에서 최대 약 14.372 mm의 변형이 유발되는 것을 확인할 수 있다. 이 조건에서 조류의 충돌 속도는 이륙조건(Case A) 보다 높은 상황이지만, 이 경우는 충돌 물체가 너무 빨리 지나가 버리는 효과 때문에 오히려 블레이드 구조와 충돌에너지를 상호 교환하는 시간은 줄어들



(a) X-direction deformation contour

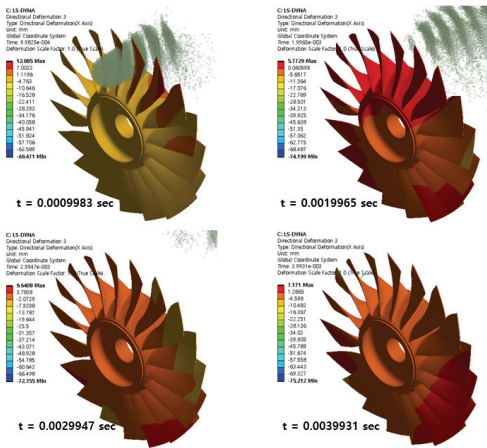


(b) von-Mises stress contour

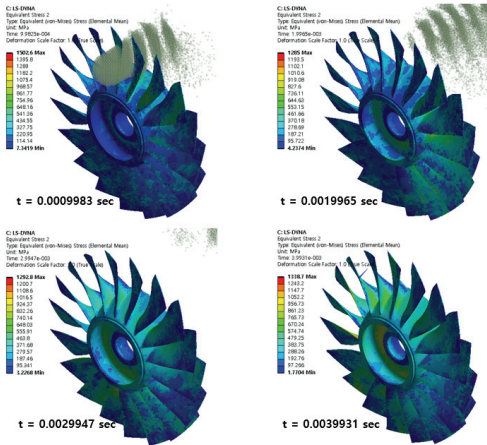


(c) X-direction deformation responses

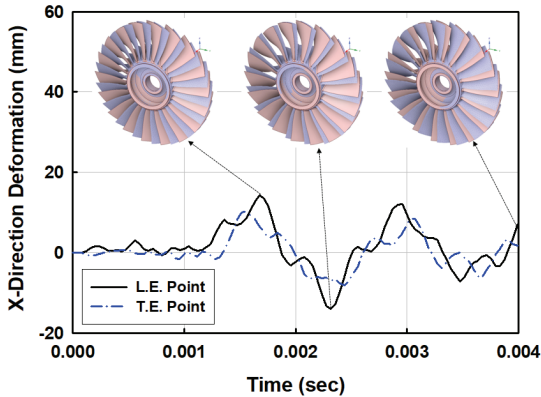
Fig. 9 Bird strike analysis results of the engine blade (Case C).



(a) X-direction deformation contour



(b) von-Mises stress contour



(c) X-direction deformation responses

Fig. 10 Bird strike analysis results of the engine blade (Case D).

게 되어 최대 변형량 수준은 오히려 이륙조건보다 상대적으로 조금 낮은 수준을 나타내고 있다.

참고로 만약 평판에 정면으로 충돌하는 경우라면 분명 더 높은 충돌 속도에서 더 큰 변형과 응력 수준을 나타내었을 것이다. 하지만 고속 회전하는 엔진 블레이드의 경우는 회전속도 상대 효과 및 끝단이 날카롭고 곡면 블레이드 면에 대한 충격 현상이라는 점이 평판 충돌과는 다른 비선형 특성을 나타내는 요인이다.

Fig. 11은 MIL-E-5007D Bird Ingestion (a)요구도 항목에서 다수 조류가 충돌하는 상황에 대한 해석모델을 보여주고 있다. SPH 조류 모델의 입자 직경은 5 mm이고, 조류 모델당 내부 입자수는 14,231개 이다. 총 16개의 SPH 조류형상 원통-반구형으로 모델링 하였다. 조류의 크기 및 블레이드 면적을 고려하여 블레이드에 작용하는 충돌 효과가 가능한 크게 나타나도록 배치하였다. 각 조류의 크기는 지름 39 mm, 길이 107 mm이고, 질량은 0.1134 kg, 등가 밀도는 1,018.6 kg/m³ 이다. 충돌 속도 및 엔진 회전속도는 이전 이륙조건(Case A)과 동일하다.

Fig. 12(a)는 다수 조류가 충돌하는 조건(Case E)에서 X-방향 변형량 분포도를 나타내고 있으며, Fig. 12(b)는 von-Mises 응력 분포도를 나타

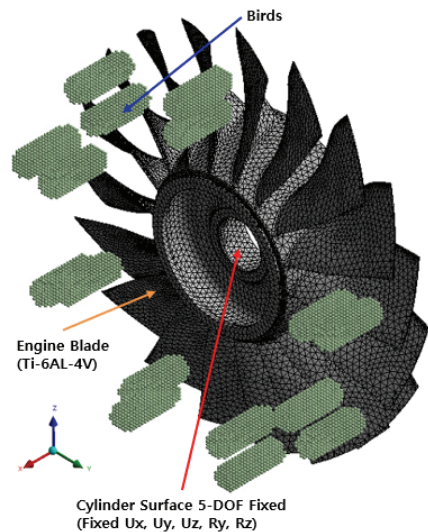
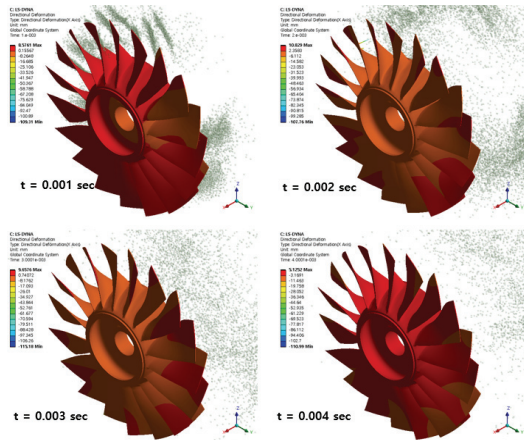
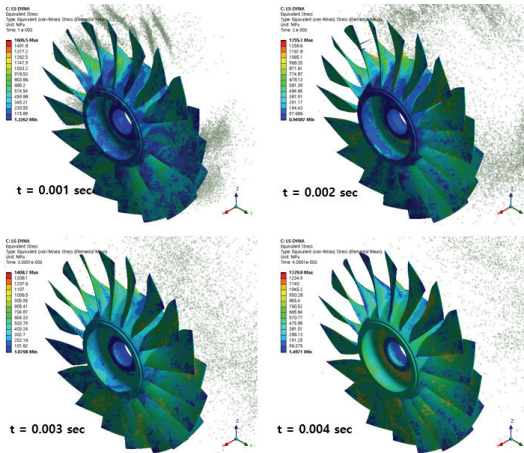


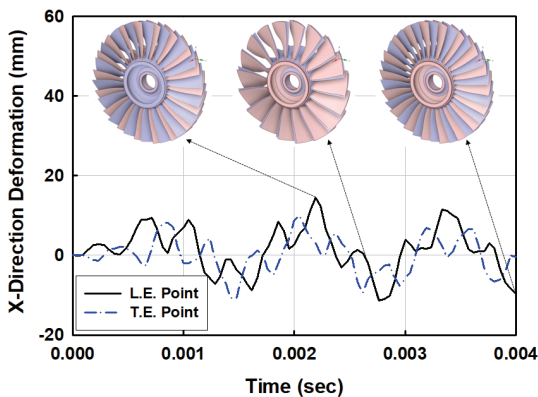
Fig. 11 Finite element model of the engine blade with numerous birds strike.



(a) X-direction deformation contour



(b) von-Mises stress contour



(c) X-direction deformation responses

Fig. 12 Numerous birds strike analysis results of the engine blade (Case E).

낸다. Fig. 12(c)는 최대 변위가 유발되는 블레이드의 끝단 앞전과 뒷전에서의 변위 응답을 보여주고 있으며, 유발되는 최대 변위는 2.1905 ms 시간 순간에서 약 14.569 mm 이다. 이는 단일 조류가 충돌하는 조건(Case A)에 비해 약 13 mm 감소한 결과이다. 사실 다수의 조류가 충돌하는 상황은 랜덤 특성으로 인해 그 배치 조합이 매우 다양할 수 있고 블레이드의 크기 및 회전속도에 따라 다르게 나타날 가능성도 존재한다. 따라서 이 항목의 요구도에 대해서는 유사한 지점에 시간 지연 간격으로 연속 충돌하는 경우와 다른 배치 조합 등에 대한 평가가 추가로 필요한 사항이다. 이번 연구에서는 비교적 짧은 기간에 필수적인 MIL-E-5007D Bird Ingestion 요구도에 대한 해석이 우선이었던 사유로 다양한 조건에 대한 충돌해석을 소화해야 하는 일정 때문에 이에 대한 다양한 해석이 수행되지는 못하였다.

다수 조류의 충돌 상황은 실제 충돌시험을 계획하더라도 실제적인 실험 구현은 상당히 난해할 것이고, 다양한 상황에 대한 모든 시험은 현실적으로 불가능할 것이라는 판단된다. 따라서 충돌해석 결과 및 평가에 대한 의존성이 가장 큰 조건에 해당할 것이고 한 번이라도 시험평가를 수행할 수 있다면 상호 검증체계 확보가 가능할 것이다. 이에 대해서는 향후 다양한 충돌

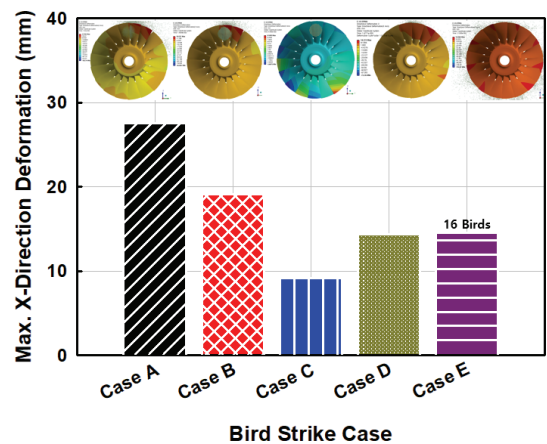


Fig. 13 Comparison of maximum X-direction deformation according to bird strike cases.

상황과 조건에 대한 해석을 수행한 후 수치 경험적으로 가장 가혹한 조건에 대한 보다 면밀한 분석, 평가 및 경험 축적이 필요한 부분이다.

Fig. 13은 국내에서 개발 중인 터보팬 엔진 블레이드에 대해 MIL-E-5007D Bird Ingestion에서 요구하는 항목에 대한 충돌해석을 수행한 결과 중 순간 최대 변형량을 상대 비교한 것이다. 모든 충돌 조건에 대해 블레이드에 심각한 파손은 관찰되지 않았으며, MIL-E-5007D (a)항목 요구도에서 가장 큰 변형량이 도출되었다. 두 번째로 변형량이 큰 조건은 (b)항목 요구도에서 발생하는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내에서 개발 중인 터보팬 엔진 블레이드에 대해 MIL-E-5007D Bird Ingestion에서 요구하는 주요 항목에 대한 비선형 조류충돌 해석 기법을 구축하고 특성을 분석하였다. 다양한 조건에 대한 충돌해석 및 분석 결과 블레이드에 심각한 파손은 관찰되지 않았다. MIL-E-5007D 요구도 사항 중 조류충돌 이후 손상변형된 블레이드 형상에 대한 엔진의 성능, 진동 및 공력탄성학적 안정성 평가와 관련된 다학제 (multidisciplinary) 해석 및 특성 분석 등은 후속 연구로 수행하고자 한다.

후 기

이 논문은 2022년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원(UE221062JD) 및 협조로 수행되었으며, 이에 감사를 표하는 바입니다.

References

1. Ryabov, A.A., Romanov, V.I., Kukanov, S.S., Shmotin, Y.N., and Chupin, P.V., "Fan Blade Bird Strike Analysis Using Lagrangian, SPH and ALE Approaches," 6th European LS-DYNA Users' Conference, pp. 2.79-2.88, 2006.
2. Park, I.K., Kim, S.J., Choi, I.H., Ahn, S.M., and Yeo, C.H., "Analytical Study for the Safety of the Bird Strike to the Small Aircraft Having a Composite Wing," Transaction of the Korean Society of Mechanical Engineers - A, Vol. 34, No. 1, pp. 117-124, 2010.
3. Kim, J.H., Study on bird modeling and bird strike analysis using Smoothed Particle Hydrodynamics, Master Thesis, Department of Aerospace Engineering, KAIST, 2016.
4. Park, J.H., Bird Strike Analysis on a Rotary-Wing Aircraft Windshield: Experiment and Numerical Simulation, Master Thesis, Department of Aerospace Engineering, Gyeongsang National University, 2021.
5. Cwiklak, J., Kobialka, E., and Gos, A., "Experimental and Numerical Investigations of Bird Models for Bird Strike Analysis," Energies, Vol. 15, Issue 10, No. 3699, 2022.
6. Muir, E.R. and Friedmann, P.P., "Forced and Aeroelastic Responses of Bird-Damaged Fan Blades: A Comparison and Its Implications," Journal of Aircraft, Vol. 53, No. 2, pp. 562-577, 2016.
7. Badshah, S., Naeem, A., Rafique, A.F., Haq, I.U., and Malik, S.A., "Numerical Study on the Critical Frequency Response of Jet Engine Rotors for Blade-Off Conditions against Bird Strike," Applied Sciences, Vol. 9, Issue 24, No. 5568, 2019.
8. Jang, S.Y., Parametric Study on the Bird Strike Impact Behavior of Fiber Meta Laminated Blade Considering Operational Loads, Mater Thesis, Department of Aerospace Engineering, Inha University, 2022.

1. Ryabov, A.A., Romanov, V.I., Kukanov, S.S., Shmotin, Y.N., and Chupin, P.V., "Fan Blade Bird Strike Analysis Using Lagrangian,

-
9. Budgey, R., "The Development of a Substitute Artificial Bird by the International Birdstrike Research Group for Use in Aircraft Component Testing," International Bird Strike Committee, IBSC25/WP-IE3, pp. 543-550, 17-21 April 2000.
 10. Hu, D., Song, B., Wang, D., and Chen, Z., "Experiment and numerical simulation of a full-scale helicopter composite cockpit structure subject to a bird strike," *Composite Structures*, 149, pp. 385-397, 2016.
 11. Walvekar, V., *Birdstrike Analysis on Leading Edge of an Aircraft Wing using a Smooth Particle Hydrodynamics Bird Model*, Mater Thesis, Department of Mechanical Engineering, Wichita State University, 2007.