

조류충돌 해석을 통한 헬리콥터 복합재 로터 블레이드 구조 건전성 평가

박제홍¹, 장준환^{2*}

¹한서대학교 항공전자공학과, ²유한대학교 기계공학과 기계설계전공

Structural Integrity Assessment of Helicopter Composite Rotor Blade by Analyzing Bird-strike Resistance

Jehong Park¹, Jun Hwan Jang^{2*}

¹Dept. of Avionics Engineering of Hanseo University

²Dept. of Mechanical Engineering of Yuhan University

요약 조류 충돌은 항공 운항에서 안전에 관한 가장 중요한 설계 요인이며 고정익 및 회전익 항공기에 심각한 손상을 가하는 원인 중 하나로 분류된다. 본 연구를 통해 조류 충돌 과정을 오일러-라그랑지안 기법을 적용하여 헬리콥터에 장착된 복합재 블레이드의 응답을 MSC.DYTRAN 소프트웨어로 모사하였다. 임의의 라그랑지안 오일러리안(ALE) 방법과 적절한 상태 방정식을 선정하여 조류 모델링에 적용하여 복합재로 구성된 로터 블레이드의 앞전의 조류충돌 구조 건전성을 입증하였다. 조류충돌 해석을 적용하기 위해서 블레이드 앞전 물성치와 조류의 강도와 물성의 차이가 크기 때문에, 충돌 후 조류의 파편을 유체로 가정하여 Euler 요소로 적용하였다. 조류충돌 해석을 통해 설계된 로터 블레이드의 앞전 구조는 조류 충돌에 대해 새의 크기(50.8mm)를 적용하여 TSAI-FILL 파괴기준으로 1.18의 여유마진을 확인하였다. 복합재 블레이드의 조류충돌 해석 결과는 충분히 신뢰성을 가진 것으로 평가되며 다양한 해석조건으로 시험을 대체할 것으로 평가할 수 있다. 향후 제시된 방법으로 다양한 하중 조건, 다양한 조류 모델링을 적용하여 로터 블레이드의 구조 안정성을 평가할 수 있다.

Abstract Bird-strike is one of the most important design factors for safety in the aviation industry. Bird-strikes have been the cause of significant damage to aircraft and rotorcraft structures and the loss of life. This study used DYTRAN software to simulate the transient response of an Euler-Lagrangian composite helicopter blade that has been impacted by a bird. The Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) method and a suitable equation of state were applied to model the bird. ALE was applied to the bird-strike analysis due to the large difference between the properties of the blade and bird. The debris of the bird was assumed to be a fluid and applied as Euler elements after the collision. Through the analysis of bird impacts, the leading-edge of the rotor blade (50.8 mm) was used to identify a positive margin of 1.18 based on the TSAI-FILL criteria. The results are assessed to be sufficiently reliable and may be evaluated to replace tests with various analysis conditions. The structural stability of the rotor blade could be assessed by applying various load conditions and different modeling methods in the future.

Keywords : Bird-Strike, Rotor Blade, Composite Material, Non-Linear Impact Analysis, Dytran, Helicopter

*Corresponding Author : Jun Hwan Jang(Yuhan Univ.)

email: bulbearj@gmail.com

Received May 14, 2019

Accepted August 2, 2019

Revised June 4, 2019

Published August 31, 2019

1. 서론

항공기는 안전하게 비행할 수 있도록 설계하고 제작해야 하며 조류 충돌과 같은 내부 또는 외부 요인이 안전운항을 방해할 수 있는 상황에서 생존해야 한다. 항공기의 안전을 위협하는 조류충돌은 1세기 이상 동안 발생하고 있으며, 항공기 개발에 조류충돌에 대한 검증은 필수 단계가 되고 있다. 이러한 검증 요건을 해결하기 위해 많은 항공기 제조업체들은 제품 개발 분야에서 시뮬레이션 기술로 눈을 돌리고 있다. Fig. 1은 조류충돌로 인해 항공기가 비상착륙하는 과정이며, 조류충돌 피해의 대표적인 사례이다. 조류 떼가 두 개의 엔진 내부로 충돌하여 엔진 고장을 유발시켰으며 이로 인해 허드슨 강에 항공기가 비상착륙하였다. 조류충돌은 치명적인 손상을 유발하여 충돌 및 사망에 이를 수 있기 때문에 많은 공항들은 사고를 줄이기 위해 시설 주변에 있는 조류의 개체 수를 줄이기 위한 변화를 이행하고 있다. 더불어 항공기 제작사들은 여전히 조류충돌 시험을 수행하고 조류충돌 이벤트에 견딜 수 있는 구조물을 설계할 것을 요구받고 있다.



Fig. 1. US Airway Emergency Landing in Hudson River

선진 연구자들의 조류충돌 시뮬레이션에 관한 연구 중에 Steve 외[1]는 보잉 787의 트레일링 엣지의 조류충돌에 대한 모델링 검증 절차와 설계 효율성에 대한 연구를 수행하였으며, Yulong, Li 외[2]는 항공기 치수 분석과 유사성 이론을 통해 버드 임팩트 로드에서 따른 항공기 구조물의 모델 유사성 법칙을 연구하였다. Guida, M. 외[3]는 견고한 대상에 대한 조류 충격에 대한 방법의 정확성을 보여주고 그 후에 조류 충돌 해석의 결과를 비교하였다. Sebastian[4]은 조류충돌 해석에 대한 전반적인 개요와 소프트웨어, 모델링 방법, 임팩터 기하학, 중량 및 속도에 대한 상세한 정보를 조사하였다. Ivancevic, D.와 Smojver, I.[5]는 연구는 항공 구조 복합 품목의 손상 모델링에 초점을 맞추어 손상 예측 절차 제시하여 항공기 날개 플랩을 모사하여 유한요소모델에서 입증하였다.

Yijing GUO[6] 외는 SPH를 적용하여 충돌 시 항공기 수직 꼬리 충돌 방지 충격 성능에 대한 표준 요구 사항을 충족할 수 없었음을 증명하였다. Brian E. 외[7]는 미국 내에서 민간용 헬리콥터와의 야생 동물 공격을 조사하고 가장 빈번한 항공기에 대한 야생 공격은 조류가 97% 이상 차지한다고 분석하였다.

Dayong 외[8]는 헬리콥터 복합 조종석의 구조적 균열 성과를 평가하기 위해 SPH 커플링 모델이 개발하고 실험적으로 검증하였고 Sebastian Heimbs 외[9]는 탐조 등의 조류충돌 저항과 군용 헬기의 외부 장비의 장착물을 성공적으로 모사한 사례를 보여 주었다. 본 논문에서는 Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) 방법에 의한 조류충돌 해석의 이론은 살펴보고, 복합재료 구성된 로터 블레이드의 실제 구조물을 모사하여 블레이드의 앞전에 조류를 충돌시켜 구조물의 파단 여부를 확인하고 파단 지수 분포를 시각적으로 확인한다. 더불어 타 기종의 블레이드 조류 충돌 시험값을 근거로 조류 충돌에 적용된 힘을 예측한다.

2. 이론

2.1 Hydrodynamic Theory

조류충돌은 목표물에 부딪치는 물의 분출로 근사화할 수 있으며, 초기 충격과 꾸준한 흐름의 두 단계로 나눌 수 있다. 초기 충격 압력(Hugoniot 압력)은 방정식 (1)에 의해 주어지며, 안정적인 흐름 압력(정체 압력)은 Bernoulli에 따라 계산되고 식 (2)에 의해 구한다.

$$Hugoniot : P_{shock} = \rho_0 v_{shock} v_{impact} \quad (1)$$

$$Stagnation pressure : P_{stagnation} = \frac{1}{2} \rho_0 v_{impact}^2 \quad (2)$$

Hugoniot 압력은 충격에 대한 최대한의 값을 제공하고, 흐름이 안정화될 때는 정체 압력이 예상 값을 제공하기 때문에 이론적으로 이러한 두 가지 압력이 중요하다. 또한 질량은 압력 방정식의 변수가 아니기 때문에 압력이 발사체의 크기와 무관하다는 점을 인식해야 한다. 그래서 큰 발사체의 힘과 에너지가 더 많은 피해를 주는 반면, 압력 결과는 다른 무게의 새에게 같다. 정체 압력을 계산하는 데 필요한 변수 값은 쉽게 구할 수 있다. 반면에 Hugoniot 압력은 충격 속도와 충격 속도에 따라 달라지며, 충격 속도 자체도 충격 속도에 따라 달라진다. 조류충돌은 Fig. 2과 같이 4가지 과정으로 분류할 수 있다[10].

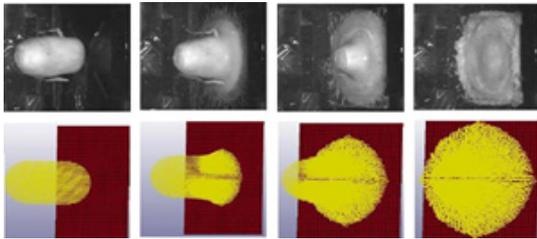


Fig. 2. Bird-strike progressive process [11]

- 1) 충돌 과정, 초기 압축파가 형성되고 반대 방향으로 전파한다.
- 2) 방출 과정, 주변에 위치한 조류 입자들이 방사상으로 방출한다.
- 3) 정상유동 과정, 조류 입자들이 고정된 유선 방향으로 흐른다.
- 4) 충격 종결, 모든 조류 입자들이 타겟 표면으로 도달하고 압력은 0으로 떨어진다.

조류를 물과 연관시킴으로써 얻을 수 있는 다른 유용한 정보는 조류 매체의 압력-밀도 관계를 설명하는 데 사용되는 상태 등식이다. 몇 가지 등식이 사용 가능하며, 새의 충돌에 가장 일반적으로 사용되는 공식은 다음과 같이 정의되는 3차의 다항식이다.

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3, \mu = \frac{\rho}{\rho_0}^{-1} \quad (3)$$

여기서 계수는 초기 밀도 ρ_0 , 물에서의 소리 속도 및 실험 상수 k 이다.

2.2 조류 모델링을 위한 Arbitrary Lagrangian Eulerian(ALE) Method

임의의 시간 Lagrangian 요소 형상 함수에 의한 절점의 이동 과정과 Euler Element의 Advection 과정이 순차적으로 진행되는 모델로 Fluid Structure Interaction(FSI) 현상에 대한 해석에 적용할 수 있다. 즉, Eulerian 및 Lagrangian 기법에 연관된 각각의 공간 영역 및 재료 영역에 계산을 위한 mesh를 다루기 위해 참조 영역이 필요하다. 참조 영역은 Fig. 3에서 나와 있듯이 재료 입자들과 독립적이며 Eulerian 기법의 공간 영역과 유사하다. 그러나 공간영역에 독립적인 속도 w 를 가지고 임의적으로 움직일 수 있다. v 를 재료 입자의 속도라고 하면, $w=0$ 일 때, ALE 영역은 Eulerian 영역이 되고, $w=v \neq 0$ 일때 Lagrangian 영역이 된다.

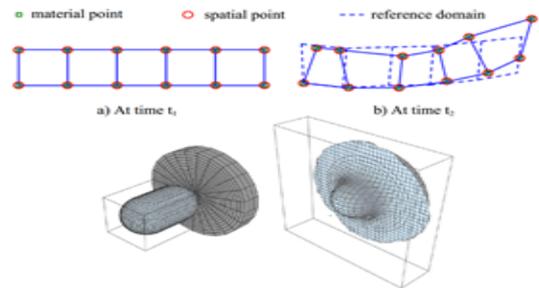


Fig. 3. Arbitrary Lagrangian Eulerian(ALE) Method[10]

일반적으로, 1차 함수 $f(x,t)$ 의 재료 도함수 또는 총 시간 도함수는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{df}{dt} = \frac{df}{dt} [D_h] \{L_h\} T = q^* \quad (4)$$

요소와 재료 사이에 상대 속도가 없기 때문에 convection 영역은 제거된다. 그러나 Eulerian 관점에서 조류로 표현된 재료는 고정된 요소에 걸쳐서 이동하기 때문에, convection 영역의 변수 u 는 재료 속도 v 로 대체하여 표현한다. ALE 방정식의 변수 u 는 재료와 요소 사이의 상대속도로 ALE 기법의 지배 미분 방정식은 일부 수정되어야 하고 참조 영역의 임의 속도에 대해 고려해야 한다.

일반적으로 ALE 방정식을 계산하기 위한 2가지 방식이 있다. 첫째, 완전 결합된 ALE 방정식을 계산하는 것이다. 해당 방법의 단점은 한 개의 요소에서 단일 재료에 대해서만 계산할 수 있다는 점이다. 둘째, 각 계산 단계를 두개의 연속된 상태로 나누는 것이다. 해당 방법에서, 재료와 mesh가 함께 움직이는 Lagrangian 단계를 우선 수행하고 Lagrangian 영역에서 참조 영역으로 맵핑된 결과를 계산하는 두번째 단계를 수행한다. 이는 완전히 결합된 ALE 방정식을 2단계로 나눠서 계산을 단순화한다. 그래서 Lagrangian 단계와 Eulerian 단계가 독립적이고 수행된다. 일반적으로, 해당 알고리즘은 완전 결합된 ALE 방정식을 계산하는 것보다 더 효율적이다. 그러나 지배 방정식을 분리시키면서 정확도가 떨어질 수 있다는 점과 두 번째 단계에서 사용되는 대부분의 advection 알고리즘은 결과의 급격한 구배를 고려하지 않을 수 있어 유의해야 한다.

3. 조류충돌 해석 프로시저

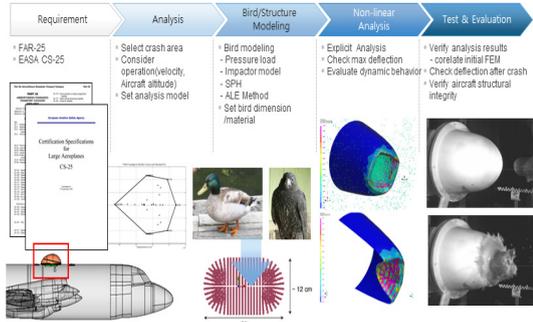


Fig. 4. Bird-strike Analysis and Test Procedure

고속으로 비행하는 항공기에서 조류충돌은 비행안전에 치명적인 영향을 끼칠 수 있다. 레이돔, 항공기 날개구조물과 같은 외부 장착물의 조류충돌에 대한 손상을 CFR25.571/JAR 25.631/FAR-25, EASA CS-25 또는 이와 동등한 규정에 따라 구조 안전성을 확보하고 개조 항공기 안정성을 보장하여야 한다. 일반적인 조류충돌해석과정은 Fig. 4과 같다. 각 나라별 지역별 속해있는 조류의 종류와 크기를 식별하고 요구도를 구체화해야 한다. 주요 요구도는 항공기가 운항하는 고도에서의 조류의 속도와 무게이다. 일반적으로 알려진 조류와 항공기의 충돌 지점을 여러 하중조건으로 모사한 후, 구형 또는 반구형으로 조류를 모델링한다. 충돌해석은 비선형으로 수행하며 시험 평가를 통해 항공기의 거동, 변형률을 측정하여 구조 건전성을 체크한다. 시험평가 결과를 입력하여 다시 해석모델의 Co-relation을 수행한다.

4. 조류충돌 해석을 위한 모델링

4.1 로터 블레이드의 형상

복합재료 블레이드 구조는 크게 세 부분의 형상 정보로 구분된다. 원심력을 지지하는 상하의 외팔보, 형상이 급격하게 변하는 천이구간, 마지막으로 익형 구간으로 나누어진다. Fig. 5는 선정된 위치에서의 복합재 블레이드 단면 형상을 보여준다. 2차원 단면해석을 수행하기 위해 일방향 복합재료로 구성된 스파와 박스, 심재 및 스킨으로 이루어있다. 박스 앞쪽에는 블레이드의 주 하중을 지지할 수 있는 일방향 유리섬유가 배치된다. 스킨의 경우 하중에 따라 복합재료의 적층 시퀀스를 최적화할 수 있지만 두께는 상대적으로 얇으며 제작상의 편리를 위해 적용되는 일반적인 적층순서를 따른다.

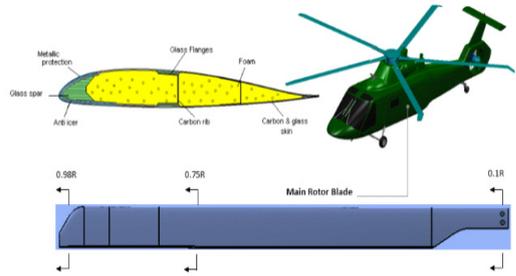


Fig. 5. Rotor Blade Configuration

4.2 조류 충돌해석을 위한 조건

조류 충돌해석을 수행하기 위해 조류의 크기, 질량, 밀도의 설정이 필요하다. 경제적인 해석결과를 추출하기 위해서 로터 블레이드의 적절한 충돌위치도 설정되어야 한다. 충돌속도는 헬리콥터와 새의 속도가 고려되어야 한다. 조류 충돌해석의 조건은 Table 1과 같다. 조류의 무게는 항공기의 비행특성과 각 나라의 조류 분포를 통해 설정되어야 하지만, 일반적으로 FAR 29.631에 언급된 2.2lbs를 적용한다. 조류의 형상은 원통형으로 모델링되며, 유체 연성을 부여하기 위해 Bulk modulus가 부여된다. 충돌위치는 Fig. 5에서 전체 블레이드 전체 길이의 75%~98% 사이 구간을 조류충돌 위치로 설정하였다.

Table 1. Bird-strike condition

Object		Condition
Blade	Type	Multi spar composite blade
	Radius	$R = 7.9(m)$
	RPM	$\Omega = 272(rpm)$
	Speed	$v = 225(m/s)$
Bird	Weight	$w = 0.9979kg (2.2 lbs)$
	Diameter	$D = 3.5(in)$
	Height	$t = 177.8mm(7 in)$
	Density	$\rho = 930(kg/m^3)$
	Bulk modulus	$E_{bulk} = 2.2 \times 10^9$

4.3 조류 충돌해석을 위한 블레이드 모델링

조류 충돌해석을 수행하기 위해 블레이드의 모델링은 Fig. 6, 7과 같다. 블레이드는 복합재와 금속재로 구성되어 있고, Fig. 7의 물성을 적용하였다. 여기서 Euler mesh는 조류가 블레이드에 충돌한 이후, 유체가 존재하는 영역이다. 유체의 영역을 설정하기 위한 격자를 만들어야 하는 번거로움이 있다. Arbitrary Lagrange-Euler 해석방법의 특징으로, 빠르고 효율적이며 정확하게 조류 충돌의 결과를 계산할 수 있다.

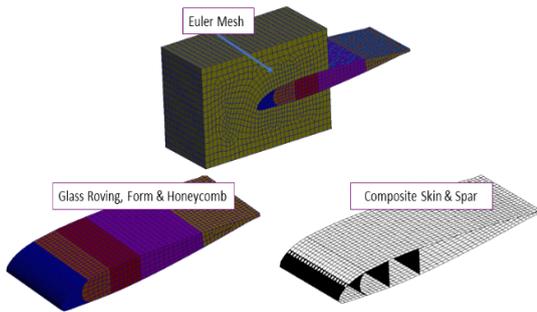


Fig. 6. Modeling of Rotor Blade FE modeling

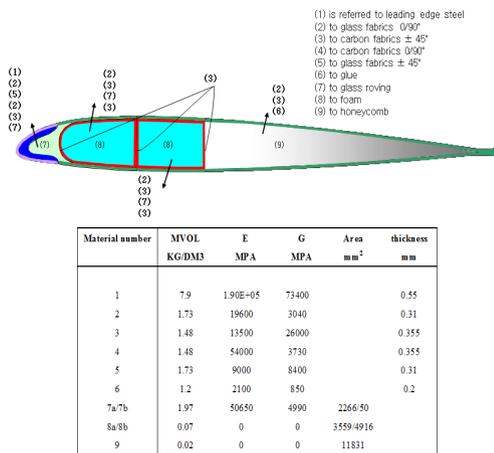


Fig. 7. Composite Blade Material Distribution

5. 조류충돌 해석 결과

5.1 조류충돌 해석 안전성 평가의 기준

블레이드는 복합재로 구성되었기 때문에, 복합재의 파괴 기준에 따라 해석 안전성을 평가할 수 있다. 파괴 기준(Failure criteria)는 Tsai-wu, Tsai-Hill, Max. Stress, Max. Strain 등이 있다. 본 논문에서는 항공 구조물의 특수성을 감안하여 가장 보수적인 기준인 Tsai-Hill의 파괴 기준을 적용하였다. Tsai-Hill은 가장 많이 사용하는 von-Mises Criterion를 이방성 재질에 적용하기 위하여 고안된 Hill Criteria를 수정 보완한 파괴 기준이다.

$$\left(\frac{\sigma_L \cdot SR}{\sigma_{LU}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_L \cdot SR}{\sigma_{LU}}\right)\left(\frac{\sigma_T \cdot SR}{\sigma_{LU}}\right) + \left(\frac{\sigma_T \cdot SR}{\sigma_{LU}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{LU} \cdot SR}{\tau_{LU}}\right)^2 < 1$$

(5)

여기서 SR은 Strength ratio이다.

라미나의 종방향, 횡방향의 응력을 Quadratic Interaction 형태로 적용하여 상대적으로 여타 라미나 강도 기준 중에서 가장 보수적인 결과이다. Fig. 8에서 복합재 블레이드의 조류충돌 해석 과정을 나타내었다. 식 (5)에서 얻은 여유마진을 허용값과 비교하여 설계의 적용 여부를 판단할 수 있다.

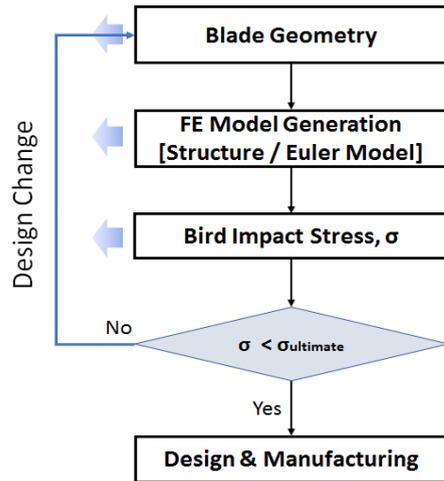


Fig. 8. Bird-strike Analysis Procedure

5.2 조류충돌 해석의 결과

Fig. 9는 시험을 통해 조류를 블레이드에 충돌시키는 과정을 나타내었다. 실험 결과를 이용하여 요소로 구성된 Euler 영역과 물성치를 보정할 수 있다. 시험조건은 블레이드 장착조건을 고려하여 끝단은 자유단이고, 다른 한쪽은 고정단이다. Hugoniot 압력에 의한 초기 충격부터 정상 유동의 발생까지 시험결과에 잘 나타나고 있음을 알 수 있다.

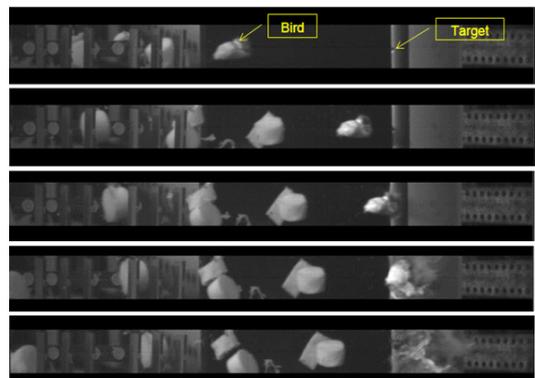


Fig. 9. Impact procedure of composite blade and bird[11]

Fig. 10과 같이 조류 충돌을 수행하기 위해 블레이드의 반경에서 최대속도가 발생하는 위치에서 조류를 충돌시킨다. 사각형 영역은 Euler 영역으로 충돌 시, 조류가 유체로 퍼져나가는 구간이다. 조류모델의 형태는 기존 연구자들의 연구결과를 반영하여 실린더 형태에 앞뒤에 반구가 연결된 캡슐 모양이다. 조류의 중량은 2.2 lb를 부여하였다. 조류충돌위치는 블레이드 앞전의 볼록한 부분이며 조류가 충돌하며 충격량을 최대화하고, 전달 에너지의 손실을 줄여 블레이드에 평행하게 날아오도록 설정하였다.

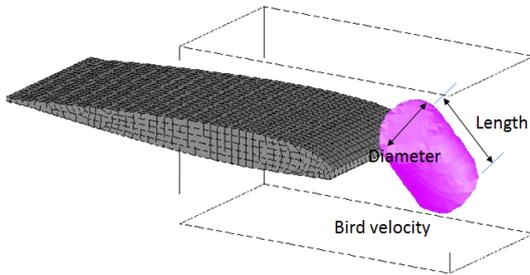


Fig. 10. Impact location of bird and composite blade

조류 충돌 후, 복합재의 파괴 기준으로 설정된 Tsai-Hill의 파괴 기준을 적용하여 블레이드의 방정식 (5)를 이용하여 Failure-Index를 구할 수 있다. Failure-Index는 Strength Ratio의 역수이다. Fig. 11와 Table 2에 나타난 바와 같이 가장 큰 Failure-Index는 0.4583으로 산출되었으며 안전여유는 1.18로 계산되어 구조 건전성을 확보한 것으로 평가하였다.

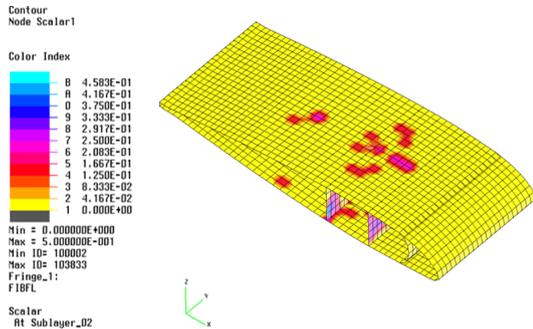


Fig. 11. Bird-strike analysis, failure index

Table 2. Analysis results in various conditions

Loadcase	Length /Diameter	Velocity (m/s)	TSAI-FILL F/I	M.S
1	25.4mm	127.5	0.2505	2.99
2	50.8mm	127.5	0.1126	7.87
3	25.4mm	197.2	0.3617	1.76
4	50.8mm	197.2	0.2002	3.99
5	25.4mm	255	0.3726	1.68
6	50.8mm	255	0.4583	1.18

5.3 시험결과를 이용한 조류충돌 하중의 산출

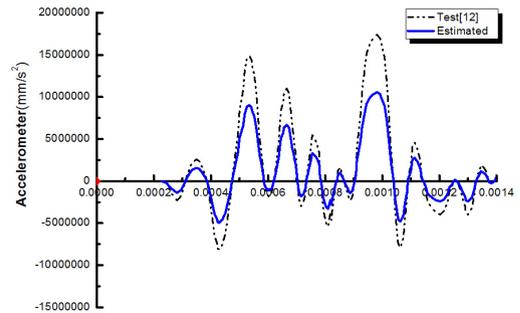
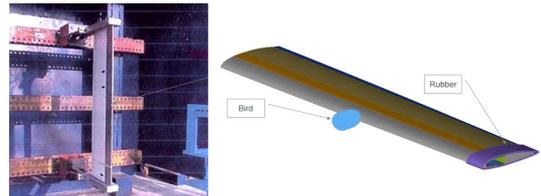


Fig. 12. Impact Load Estimate of Composite Blade and Bird

조류가 충돌하는 힘은 하중과 속도의 제곱과 충돌시간의 곱에 비례한다. 본 절에서는 블레이드 조류 충돌 시험값을 이용하여 블레이드에 장착되는 패스너의 하중은 식 (6)를 이용하여 선형적으로 계산하였다.

$$F_{Bird} = F_{Test} \cdot (m_{bird} / m_{test}) \times (v_{bird} / v_{test})^2 \times (t_{bird} / t_{test}) \quad (6)$$

여기서 F_{test} 는 기 수행한 조류충돌 하중, m_{test} 는 조류 질량, v_{test} 는 조류의 속도이다.

Fig. 12과 같이 블레이드를 치구로 고정된 후, 조류로 모사된 젤리를 블레이드의 앞전에 충돌시킨다. 이때 젤리의 속도는 조류의 속도 Table 2의 255m/s로 적용하였다. 실험을 통해 계측된 최대힘은 1730N이다. 식 (6)을 이용하면 조류의 충격 하중을 선형적으로 예측할 수 있다. 식 (6)을 통해 블레이드에 충돌하는 힘은 1060N으로 계산되었다. 하중의 크기는 블레이드의 원심력의 크기와 비교하여 5% 정도의 수준으로 조류 충돌로 인해 장착부의 구조 건전성에 큰 영향일 미치지 않는 것으로 파악되었다. 그리고 예측된 힘을 통해 로터 블레이드(rotor blade) 끝단의 밸런싱(balancing)을 조절하는 부분의 패스너(fastener)의 설계변경에 활용할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 복합재로 구성된 로터 블레이드의 실제 구조물을 모사하여 블레이드의 앞전에 조류를 충돌시켜

구조물의 파단 여부를 확인하였다. 파단지수를 계산하고, 복합재 블레이드의 파단지수 분포를 시각적으로 확인할 수 있었다.

복합재 블레이드의 앞전 구조는 조류충돌 발생 시 구조 내부로 관통을 허용하지 않는 요구조건을 적용하였다. 조류충돌 해석결과 설계된 앞전 구조는 충분한 강도와 안전율을 가지고 있음을 보였다.

복합재 블레이드의 조류충돌해석 결과는 신뢰성을 가진 것으로 평가되며 다양한 해석조건으로 시험을 대체할 것으로 평가할 수 있다. 차후 제시된 방법으로 다양한 하중 조건, 다양한 조류 모델링을 적용하여 로터 블레이드의 구조 안정성을 평가할 수 있다.

References

- [1] T. Kurtoglu, I. Y. Tumer, D. C. Jensen, "A functional failure reasoning methodology for evaluation of conceptual system architecture", *Research in Engineering Design*, Vol.21, No.4, pp.209-234, Oct. 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s00163-010-0086-1>
- [2] L. Yulong, Z. Yongkang, and X. Pu, "Study of Similarity Law for Bird Impact on Structure", *Chinese Journal of Aeronautics*, vol 21, pp. 512-517, 2008
- [3] M. Guida, "SPH - Lagrangian study of bird impact on leading edge wing", *Composite Structures*, vol 93, pp. 1060-1071, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2010.10.001>
- [4] S. Heimbs, "Computational methods for bird strike simulations: A review", *Computers & Structures*, vol 89(23), pp. 2093-2112, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2011.08.007>
- [5] D. Ivancevic, and I. Smojver, "Hybrid approach in bird strike damage prediction on aeronautical composite structures", *Composite Structures*, vol 94(1), pp. 15-23, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.07.028>
- [6] Y. Guo, P. Jia, and G. Hong, "Research on Bird Strike Simulation of Composite Leading Edge", *AASRI Procedia*, vol 3, pp. 674-679, 2012
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aasri.2012.11.107>
- [7] B.E.Washburn, P.J. Cisar, and T.L. DeVault, "Wildlife strikes to civil helicopters in the US, 1990-2011 Transportation Research Part D", *Transport and Environment*, pp. 83-88, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2013.06.004>
- [8] D. Hu, "Experiment and numerical simulation of a full-scale helicopter composite cockpit structure subject to a bird strike", *Composite Structures*, vol 149, pp. 385-397, 2016
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.04.035>

- [9] S. Heimbs, "Numerical Analysis of Bird Strike Resistance of Helicopter Searchlight", *Procedia Structural Integrity*, pp. 689-696, 2017. 5
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.07.044>
- [10] J.H. Kim, "Study on bird modeling and bird strike analysis using smoothed particle in Aerospace engineering", KAIST, 2016
- [11] Zana Eren, "Modeling of Bird Strike on a Composite Helicopter Rotor Blade", 58th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference., AIAA. pp. 1-11, 2017
DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2017-1991>
- [12] F. Bianchi, "Analysis with RADIOSS of a bird strike onto a helicopter blade and onto a rotor control chain", Altair HTC09 Ludwigsburg, 2009.

박 제 홍(Je-Hong Park)

[정회원]



- 2002년 2월 : 항공대학교 공과대학원 전자공학과 (공학석사)
- 2002년 2월 : 항공대학교 공과대학원 전자공학과 (공학박사)
- 2002년 2월 ~ 2018년 2월 : 대한항공기술연구원 책임연구원
- 2018년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 항공전자공학과 교수

<관심분야>

시스템 엔지니어링, 복합재료 제조

장 준 환(Jun Hwan Jang)

[정회원]



- 2002년 2월 : 인하대학교 공과대학원 자동차공학과 (공학석사)
- 2013년 8월 : 충남대학교 공과대학원 메카트로닉스공학과 (공학박사)
- 2007년 4월 ~ 2016년 2월 : 대한항공기술연구원 과장
- 2016년 2월 ~ 2019년 2월 : 방위사업청 항공기사업부 공업사무관
- 2019년 3월 ~ 현재 : 유한대학교 기계공학과 기계설계전공 교수

<관심분야>

항공기 기체설계, 최적설계, 피로