



J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 47(5), 319-325(2019)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2019.47.5.319

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

항공기 복합재 레이돔에 대한 조류충돌해석 및 시험

원문섭¹

Bird Strike Analysis and Test of Composite Aircraft Radome

Moon-Seob Won¹

Agency of Defense Development

ABSTRACT

The main purpose of this study is to compare the bird strike analysis result of the radome composed of composite laminate and sandwich structure attached to aircraft with test result. First of all, we generated bird model which has water properties through SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics) method. And then bird strike analysis was conducted with initial velocity of bird measured from bird strike test. From analysis result we investigated whether structural failure occurred or not onto the radome and compare maximum displacement of the radome structure with test result. Also reliability of numerical analysis model was confirmed through time-dependent pressure trend on this collision process matched existing research result. Furthermore, we confirmed that failure behavior of the radome can be affected by density of the particles in the bird model.

초 록

본 논문의 목적은 항공기에 장착되는 복합재 라미네이트 및 샌드위치구조를 가지는 레이돔에 대한 조류충돌해석을 수행하고 해석결과와 시험결과를 비교 및 분석하기 위함이다. 먼저 SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)법을 통해 물의 특성을 가지는 조류를 모델링하였으며, 조류충돌 시험을 통해 조류가 충돌할 때의 속도를 입력하여 조류충돌해석을 수행하였다. 해석결과를 통해 레이돔의 파손 여부를 조사하고 최대 변형량을 시험결과와 비교하였으며 충돌과정에서의 압력변화추이가 기 연구되었던 결과와 일치함을 확인하였고, 이를 통해 수치해석모델의 신뢰성을 확보하였다. 또한 조류모델을 이루는 입자의 밀도가 레이돔의 파손 형상에 영향을 미친다는 사실을 확인하였다.

Key Words : Bird Strike Analysis(조류충돌해석), Composite Material(복합재), Smoothed Particle Hydrodynamics(입자 완화 유체동역학)

1. 서 론

항공기의 구조는 기동자세, 관성, 착륙형상 등에서 입력되는 여러 종류의 설계하중에 대해 치명적인 파

손이 발생하지 않도록 설계되어야 한다. 그러나 기록 [1]을 통해서 항공기 사고의 약 20%를 차지하는 것은 조류가 캐노피나 엔진 흡입구에 충돌함으로 인한 것임을 확인할 수 있다. 따라서 조류가 기체구조를

† Received : January 22, 2019 Revised : April 3, 2019 Accepted : April 13, 2019

¹ Researcher

¹ Corresponding author, E-mail : xellos0304@add.re.kr, ORCID 0000-0002-6819-7490

© 2019 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

관통하여 사람이나 주요 장비에 직간접적인 피해를 입히지 않도록 설계하는 것은 감항성 인증에서 꼭 점검되어야 하는 항목이다.

조류충돌에 대한 구조의 영향성을 확인하기 위해서는 실물에 대한 조류충돌시험이 요구되는데, 이 때 실제 조류를 사용하거나 젤라틴(Gelatin)과 같이 조류와 비슷한 유체거동을 할 수 있는 물질을 조류 대신 이용하는 경우가 있다[2]. 그러나 조류충돌시험을 수행하기 위해 필요한 시험시설을 제작하는 데에는 많은 비용과 시간이 소모되기 때문에 이를 대체할 수 있는 조류충돌해석기법에 대한 연구가 다방면으로 이루어지고 있다.

조류충돌거동에 대한 연구결과가 최초로 발표된 것은 Wilbeck[3,4]에 의한 것으로 그의 이론에 따르면 조류충돌 후의 조류는 충돌면을 따라 유체와 같은 거동을 한다. 충돌점에서 피충돌체인 구조물에 발생하는 응력이 조류의 항복응력에 비해 매우 크기 때문에 조류는 대변형 또는 조각파단(Body Slicing)을 일으키게 되는데 이러한 거동은 조류의 강도가 아닌 밀도에 의한 영향이 지배적이다. 이러한 거동특성으로 인하여 조류충돌을 수압충돌로 분류하고 있으며 구조해석을 수행함에 있어서도 유체-구조간 상호작용을 해석할 수 있도록 FSI(Fluid-Structure Interaction) 법을 통해 결과를 산출해야 한다.

조류를 모델링하는 기법에 대해서도 여러 가지 방법이 연구되고 있다. 먼저 충돌해석을 포함한 구조해석에서 가장 일반적인 Lagrangian 모델링을 통해 조류를 모델링하여 충돌해석을 수행한 연구[5,6]결과가 발표된 바 있다. 이 경우 가장 직관적인 해석 결과를 도출해낼 수 있으나 충돌 시 발생하는 요소 뒤틀림 현상은 해의 정확도, 수렴성에 등에 부정적인 영향을 가져올 수 있다. 이를 보완하기 위해 조류를 Euler 모델로 생성하여 충돌해석을 수행한 연구결과[7,8]도 있다. Euler 모델은 유한요소가 특정 공간좌표에 고정된 상태에서 시간 단계(Time Step)에 따른 지배 방정식을 풀어가는 방식으로써 Lagrangian 모델에 대한 앞서 언급한 단점들을 해소할 수 있다.

본 연구에서는 유체역학적 특성을 가지는 비연속적 입자로 조류를 모델링하여 충돌해석을 수행하였으며, 유도된 결과와 시험 측정값의 차이가 특정 변수에 대하여 어떤 유의미한 경향을 가지는지 고찰해 보았다.

II. 본 론

2.1 SPH법에 대한 이론적 배경

초기에 SPH법은 천체물리학 이론을 수치해석적으로 분석하고 통계학적으로 접근하기 위해 사용되었다[9,10]. 그리고 최근에는 우주파면이 위성구조체에

초고속으로 충돌했을 때의 손상을 분석하기 위해 SPH법이 적용된 사례가 있다[11]. 그 외에도 유체의 유동, 댐구조물 등 다양한 분야의 구조해석을 위해 사용되고 있다[12-14]. 최근에는 미 Boeing사에서 SPH법을 이용하여 복합재 조류충돌 구조해석을 수행[15]하는 등 항공분야에서의 SPH법을 통한 구조해석이 일반화되고 있는 추세이다.

SPH법은 일반적인 정적구조해석에서 사용되고 있는 Lagrangian 모델링과는 다른 무요소법으로서 격자 기반의 방식과 비교하여 확연한 장단점을 가진다. 입자 기반 방식은 공간에 의존적이지 않기 때문에 동적인 유체를 표현함에 있어 격자 기반의 방식보다 유리하다. 또한 외부 물체와의 상호작용을 세밀하게 표현하기 유용하기 때문에 충돌해석을 수행하는 데에 적합하다. 본 연구에서는 SPH법을 적용하기 위해 입자 기반으로 모델링한 조류가 Lagrangian 모델인 항공기 레이돔과 커플링되며 입자의 속도가 질량의 형태로 반영되어 충돌현상을 발생시킨다. 기존의 격자 기반 방식인 Lagrangian 기법에서는 재료의 물리적인 변형이 요소망에 변위를 발생시키며 이동한다. 그러나 SPH법은 본질적으로 무요소법에 해당하기 때문에 요소망의 얽힘이 발생하지 않기 때문에 충돌 현상에 의해 발생하는 국부적인 구조물의 대변형 혹은 파손을 보다 현실적으로 묘사하는 것이 가능하다. SPH법은 공간에 이산 분포된 입자에 정의된 값으로부터 완화커널함수(Smoothing Kernel function)를 이용해 임의의 지점에서 값을 얻는 방법으로, 특정 지점에서의 값을 모든 입자로부터의 영향에 가중치를 두어 계산한다. SPH법에 대한 상세한 수학적 접근 [16]은 본 논문에서는 다루지 않지만 원리의 이해를 위해 몇 가지 수식을 아래에 소개하였다. 먼저 SPH법은 스칼라 함수의 적분 보간법을 이산화한 아래의 식 (1)을 기반으로 한다.

$$f(r) = \sum_i \frac{m_i}{\rho_i} f(r_i) W(r-r_i, h) \quad (1)$$

위의 수식에서 $f(r_i)$, m_i , ρ_i 는 i 번째 입자에 대한 스칼라 값, 질량 그리고 밀도를 나타낸 것이며 i 는 Smoothing Kernel function(W)의 범주에 포함된다. 다시 말해 위의 수식은 불연속적인 값을 연속적인 스칼라 함수 $f(r)$ 로 근사하고 있다.

일반적으로 SPH법은 상태방정식을 이용하여 압축에 의한 유체의 압력을 결정한다. 본 연구에서는 Gruneisen 상태방정식을 사용하였으며 아래와 같이 압력(p)가 결정된다.

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu [1 + (1 - \frac{\gamma_0}{2})\mu - \frac{\alpha}{2} \mu^2]}{[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2}]^2} + (\gamma_0 + \alpha \mu) E \quad (2)$$

위의 상태방정식에서 C 는 충격속도(Shock Velocity, u_s)와 입자속도(Particle Velocity, u_p)의 관계선도의 절편을 나타내며 γ_0 는 Gruneisen Gamma, μ 는 ρ/ρ_0-1 을 의미한다. 아래의 식은 충격속도와 입자속도의 관계식을 보여주고 있다. 해당 식의 입력 변수는 물에 대한 음속(Sound Speed, C_0) 1,647 m/s 및 Hugoniot 계수인 S_1 은 1.921을 사용하였다[17].

$$u_s = C_0 + S_1 u_p + S_2 \left(\frac{u_p}{u_s}\right) u_p + S_3 \left(\frac{u_p}{u_s}\right)^2 u_p \quad (3)$$

위의 상태방정식에서 압력을 계산하기 위해 밀도를 매 시간 단계마다 다시 계산해야 한다. 본 해석에서는 유체를 약한 압축성 유체로 가정하며 이 때 밀도의 변화는 아래의 연속 방정식을 통해 산출된다.

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \sum_j m_j \vec{v}_{ij} \nabla W(r_{ij}, h) \quad (4)$$

2.2 조류충돌시험 계획 및 결과

2.2.1 시험계획

조류충돌 안전성 요구도는 FAA(Federal Aviation Regulations)와 STANAG(NATO Standardization agreement) 4671를 참고하였다. 위의 규격서에 따라 사용한 조류의 중량은 2 lb이며 충돌속도는 항속과 같이 110 knot로 설정하였다.

시험을 수행하기 위해 Fig. 1과 같이 시험치구 및 레이돔을 세팅하였다. 시험치구는 조류충돌에 의해 변위가 발생하지 않도록 고정하였고 항공기 동체의 체결영역을 그대로 모사하여 볼트를 통해 레이돔과 체결할 수 있도록 하였다. 충격튜브(Impact Tube)를 통해 발생하는 조류의 충돌 위치는 레이돔에 가장 치명적인 파손을 발생시킬 수 있도록 선정하였으며 충격 순간속도는 조류충돌 요구조건을 고려하여 결정하였다. 고속카메라를 설치하여 프레임 분석을 통해 충돌속도를 계산할 수 있음은 물론 조류 및 레이돔의 시간에 따른 거동을 면밀히 분석할 수 있도록 하였다. 디지털 이미지의 교정을 위해 설치한 두 대의 추가 고속카메라는 레이돔 거동의 분석을 도와준다. 레이돔 전방영역에는 일정한 간격의 격자무늬를 생성하여 보다 정확한 변위관찰이 가능하도록 하였다.

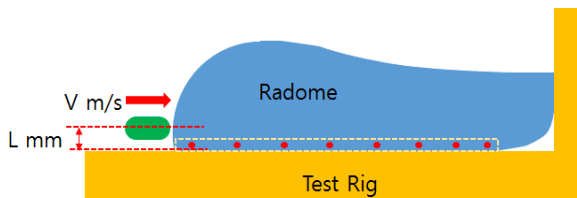


Fig. 1. Schematic image of bird strike impact test setup

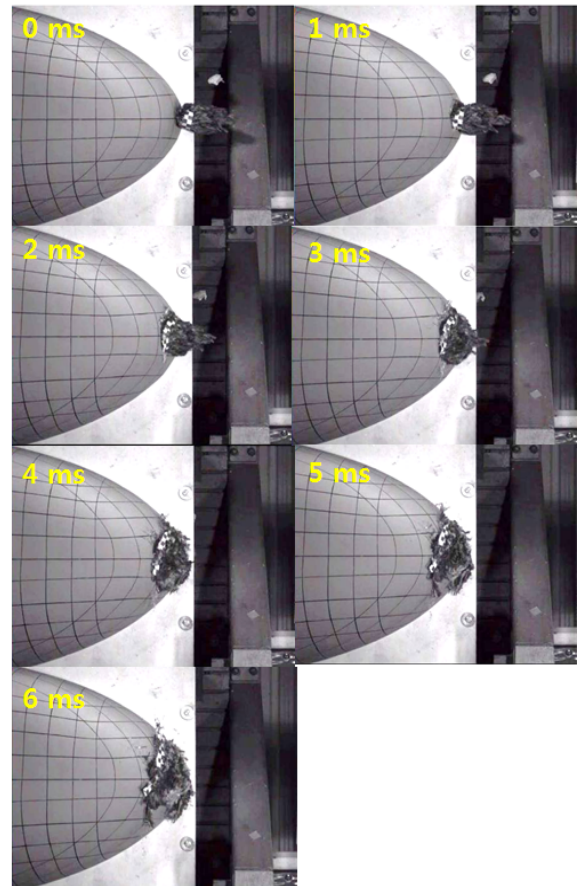


Fig. 2. Behavior of radome after impact

2.2.2 시험결과

Figure 2는 충돌시점부터 1 ms 간격으로 조류와 레이돔에 발생하는 거동을 고속카메라로 촬영한 모습입니다. 레이돔에 측정된 최대 변위는 충돌 후 3.8 ms에서 관측되었으며 그 후 조류는 레이돔의 표면을 따라 흘러지는 거동을 보였다. 충돌시험이 종료된 후 레이돔에 대한 구조검사를 수행한 결과 전방 체결부 위쪽에 작은 크랙이 발생하였으나 치명적인 구조손상으로 분류되지 않는 크기였다. 따라서 조류가 레이돔을 관통하여 내부 장비에 심각한 수준의 타격을 주지 않는다는 것을 시험을 통해 입증할 수 있었다.

2.3 수치해석모델 및 충돌해석 결과

2.3.1 수치해석모델

수치해석모델은 MSC.Patran을 통해 작성하였다. 레이돔의 경우 고강도 특수섬유 또는 유리섬유가 포함된 두 종류의 라미나(Lamina)와 허니콤 코어(Honeycomb Core)로 구성되어 있다. 해당 재료들은 레이돔의 강도 요구조건 및 안테나 전파성능 등을 고려하여 영역을 나누어 라미네이트(Laminate) 혹은 샌드위치(Sandwich) 구조의 형태로 적용된다. 요소망은 Fig. 3과 같이 조류의 충돌점을 중심으로 초기충격 및 그

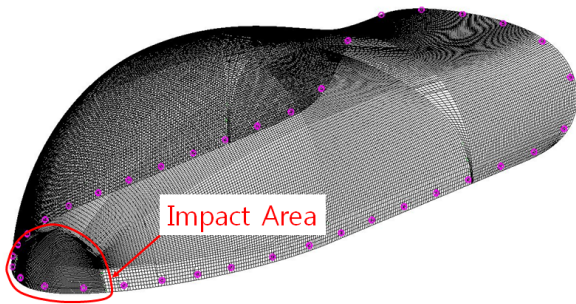


Fig. 3. Detail finite element model of radome

후의 정상유동거동을 확인할 수 있는 영역까지 정밀도를 증가시켰다. 레이돔 구조물은 2차원 셸(Shell)요소를 사용하였으며 RBE2를 통해 시험치구와의 체결부를 구현했다. 시험치구는 레이돔-동체 사이의 체결위치를 그대로 반영하여 제작했기 때문에 각각의 체결부에 대해 면내(In-Plane) 자유도의 구속조건을 추가하였다. 또한 치구와 레이돔 구조의 접촉면에 대해 수직방향의 구속을 추가로 추가하였다. Table 1은 유한요소모델 생성에 사용된 요소정보를 정리한 것이다.

레이돔 구조물의 파손은 기본적으로 Tsai-Wu 판단방정식에 근거하여 발생하도록 설정하였으며 길이방향, 너비방향에 대한 파손강도를 입력하였다. 그리고 각각의 섬유방향에 대한 변형을 허용치를 입력하여 해당 변형율을 초과했을 때 요소가 분리되도록 하였다.

조류모델은 물의 특성을 가지고 거동할 수 있도록 입자요소망(Regular Mesh)으로 모델링하였다. 조류의 형상에 따라 해석결과가 달라질 수 있는데, 본 연구에서는 반구형 원통(Hemispherical Ended Cylinder) 형태의 모델을 사용하는 것으로 결정하였다. 조류모델의 기하학적인 형상은 충돌해석 결과에 큰 영향을 미친다[18]. Meguid는 조류를 원통(Cylinder), 반구형 원통(Hemispherical Ended Cylinder), 타원체(Ellipsoid)의 세 가지 경우로 모델링함과 동시에 각각의 형상에 대한 종횡비(Aspect Ratio)를 다르게 하여 충돌해석을 수행하였다. 해석결과를 통해 조류모델의 기하학적 형상에 따라 초기 접촉면적의 차이가 발생하고 이는 최대 충돌압력의 크기에 최대 약 47%에 해당하는 차이를 발생시킴을 입증하였다.

입자의 밀도는 단위 길이에 대해 10개, 20개, 30개, 40개의 입자가 포함되도록 하였는데 그 이유는 입자의 밀도가 해석결과에 영향을 미칠 수 있기 때문이

Table 1. Model contents of radome FEM

Model	Element (QUAD4)	Node	MPC (RBE2)
Radome	56339	56834	38

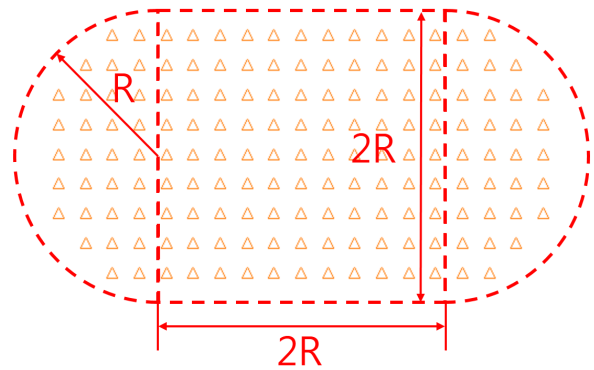


Fig. 4. Bird finite element model and geometric parameters

Table 2. Analysis cases in relation to the number of particles in bird model

Case	#1	#2	#3	#4
N/unit length	10	20	30	40
N	136	1095	3925	9015

다. 일반적으로 SPH법을 통해 완화 입자(Smoothed Particle)와 Lagrangian 요소망 사이의 상호작용을 해석할 때 Lagrangian 요소의 크기에 비해 입자의 간격이 너무 넓은 경우 잘못된 해석결과가 산출될 수 있다. 따라서 본 연구에서도 조류모델을 이루는 입자 개수(N)를 증가시키며 결과의 추이를 확인하였다. Fig. 4는 단위 길이당 20개의 입자가 포함된 조류모델의 측면도 및 형상정보를 나타낸 것이며 Table 2는 수행한 구조해석의 경우의 수를 조류모델의 입자수에 대해 분류한 표이다.

시험 지지대(Test Rig)와 접촉하는 면에 대해서는 면에 수직인 방향의 변위를 제한하였으며 볼트 체결부의 경우 면내 변위를 제한하는 경계조건을 적용하였다.

2.3.2 충돌해석 결과

조류충돌해석의 수행은 MSC.Nastran SOL700 모듈을 사용하였으며 LS-PrePost 4.3을 통해 결과를 분석하였다. 조류의 초기속도는 충돌시험 시 고속카메라를 통해 획득한 값을 사용하였다. 먼저 조류모델의 최적화된 입자밀도를 확인하기 위해 Table 2와 같이 네 종류의 조류모델을 생성하여 각각 레이돔에 충돌시켜본 뒤 시험결과와 비교하였다. 먼저 Fig. 5는 조류모델의 입자밀도가 레이돔에 발생하는 최대변위에 어떤 영향을 미치는지에 대한 결과를 나타낸 그래프이다. 세로축은 정규화(Normalization)된 변위를 나타내며 조류충돌시험의 결과로부터 얻은 최대 변위

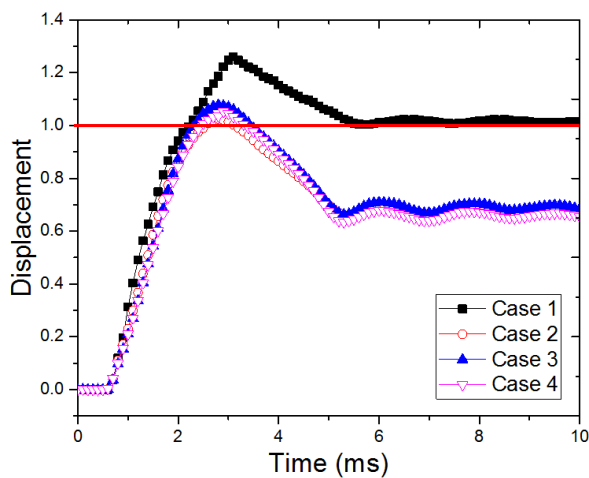


Fig. 5. Maximum nodal displacement trends in relation to particle density of bird models

값을 1.0으로 두어 기준으로 삼았다. Case 1의 경우 최대 변위가 시험 값과 큰 차이를 보이는 것을 확인하였고 이는 레이돔, 조류모델이 가지는 각각의 평균 절점 거리가 적절한 시험결과를 나타낼 수 없음을 나타낸다. 충돌위치에서 레이돔모델의 평균 절점거리는 약 3.0~5.0 mm이며 조류모델의 경우 약 8.0~10.0 mm이다. 보다 정확한 해석결과를 얻기 위해서는 조류모델의 절점거리가 두 배 이상 작아져야 한다. 이는 점-면 간의 접촉문제에서 더 높은 안정성을 가지기 위함이다. 다시 말해 Lagrangian 요소망을 가지고 있는 피충돌체에 접촉하는 조류 모델의 요소망 밀도가 높을수록 더 많은 미소 질량이 하나의 Lagrangian 요소와 접촉하기 때문에 더 정확도 높은 결과가 산출된다.

시험결과와 가장 근접한 최대변위는 Case 2에서 얻을 수 있었으며 Case 3와 4에서 얻은 결과는 이와 유사하였다. 따라서 본 해석에서 원하는 결과를 얻기 위한 조류모델 절점의 평균 거리는 4.3~4.7 mm인 것을 알 수 있으며 이는 레이돔 모델의 평균 절점거리와 유사한 값이다.

Figure 6은 레이돔과 조류모델의 충돌과정에 따른 유한요소모델의 변위 및 압력분포를 나타낸 것이다. 조류모델의 입장에서 보면 Fig. 6(a)에서 Fig. 6(b)로 가는 과정에서 충격력에 의한 압축하중이 작용하고 발생한 압력은 Regular Mesh가 유체특성에 따라 거동하도록 한다. 최대 변위에 도달한 뒤 조류모델은 변형된 레이돔 표면을 따라 흐르며(Fig. 6(d)) 그 후 레이돔은 복원되며 영구변형을 가지게 된다. 압력집중영역은 조류와 레이돔의 접촉 영역부터 조류가 거동하는 방향(+z)으로 길게 형성된다. 또한 경계조건을 적용한 레이돔 하단 플랜지 영역에서 창(Window) 영역 사이에 해당하는 영역에도 압력이 집중되는 것을 확인할 수 있었다.

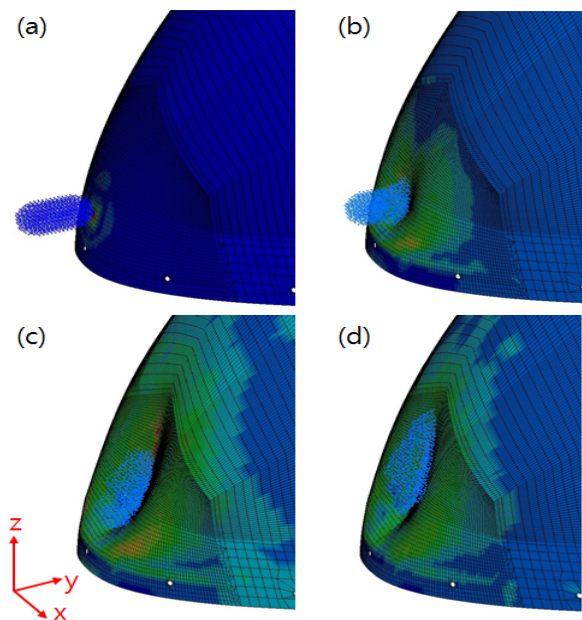


Fig. 6. Pressure distribution and displacement right after contact(a), during impact(b), at maximum displacement phase(c) and at steady flow phase(d) in case 2

최대 변위는 Case 1의 경우 3.1 ms, 나머지의 경우에는 2.8~2.9 ms에서 나타났다. 최대변위의 절대 값은 시험결과와 구조해석결과가 일치하는 것이 확인되지만 최대 변위가 발생할 때까지의 시간은 약 1.0 ms의 차이를 보였다. 에너지 관점에서 볼 때 해석결과가 시험으로부터 얻은 최대 변위와 유사하다는 것은 조류모델과 레이돔의 물리적 특성이 올바르게 반영되었다는 의미로 볼 수 있다.

구조해석에 사용한 조류모델은 단순 반구형 원통 모델이며 이를 이루는 입자 요소의 분포는 균일성(Uniformity)을 가지고 있다. 그러나 실제 조류의 경우 해석에 사용된 조류모델과 같이 균일한 물의 특성을 가지지 못할 뿐만 아니라 형상 또한 차이가 있다. 따라서 충돌 시점에 동일한 운동량을 레이돔에 전달하는 과정에서 충돌시간(Δt)에 차이가 발생할 수 있다. Fig. 7은 충돌 직후부터 6 ms에 이르기까지 충돌영역의 변위 분포를 1 ms 간격으로 나타낸 것이다.

레이돔은 초기 충격을 받고 최대 변위에 도달한 뒤 점차 복원되려는 거동을 취한다. 최종적으로 레이돔에는 영구변형이 발생한 뒤 약 4.5 ms 이후 거의 일정한 변위를 나타내게 된다. 레이돔에 발생하는 변위는 충돌압력에 의해 발생하기 때문에 충돌압력의 시간에 따른 추이와 절점변위의 추이는 서로 유기적인 관계를 가진다. 이에 대한 이해를 돕기 위해 Case 2에서 레이돔에 속한 충돌영역의 절점에 발생하는 압력추이를 Fig. 8에 표기하였다.

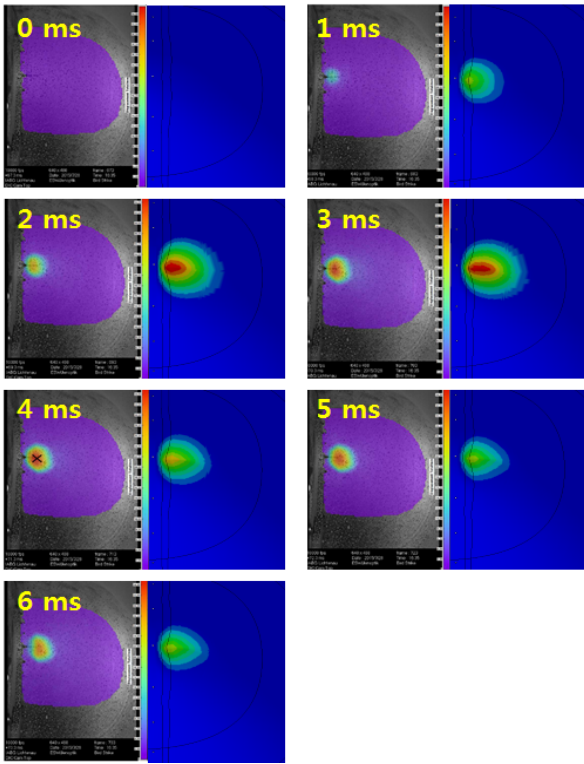


Fig. 7. Displacement contour at impact area from impact test and FEA

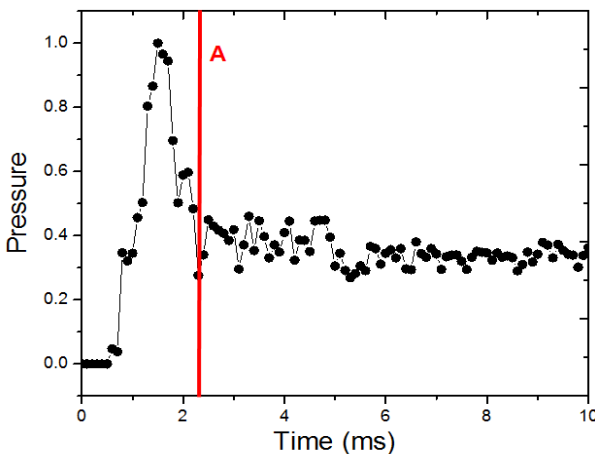


Fig. 8. Pressure at the node that represent the maximum displacement by time

충돌 시작지점부터 A 위치에 이르는 영역을 초기 충격(Initial Shock), 그 이후의 영역을 정상 유동(Steady Flow) 영역으로 정의할 수 있다. 이는 조류충돌 현상이 발생할 때 충돌영역에서 일반적으로 발생하는 압력 추이와 같다. Fig. 9는 Wilbeck의 실험결과 나타낸 그래프[19]로써 조류의 속도를 달리하여 충돌실험을 했을 때의 압력 추이 그래프이다. Fig. 8을 해당 그래프와 대조했을 때 초기 충격과 정상 유동영역이 확연히 나타남을 알 수 있다. 정상 유동영

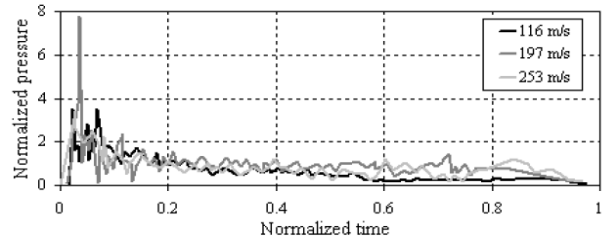


Fig. 9. Pressure at the impact point by time with respect to the impact velocity

역으로 접어들며 조류는 레이돔의 표면을 따라 흐르게 되고 레이돔 형상이 복원되려는 거동을 보인다.

III. 결론

본 논문에서는 레이돔의 조류충돌시험 결과를 쉽게 모사할 수 있도록 수치해석모델을 통한 조류충돌 해석을 수행하고, 그 결과를 시험결과와 비교 및 분석하였다. 무요소법인 SPH법을 이용하여 조류를 모델링하였으며 Regular Mesh의 밀도에 따른 해석결과를 분석하였다. 그 결과 단위 길이당 0D 요소의 개수가 20개 이상일 때 최대 변위 발생량이 수렴하는 것을 확인하였다. 또한 시험을 통해 얻은 최대 변위의 절대 값이 해석결과가 일치하였으며 거동의 형상, 압력분포 추이 등에서 충돌해석이 시험을 충분히 모사하고 있음을 알 수 있었다. 조류충돌시험의 경우 시험을 준비하고 실행하는 과정에서 발생하는 비용도 문제가 되지만 같은 시편으로 반복시험을 할 경우 손상이 누적된다. 따라서 반복시험에서 큰 시간적, 금전적 비용이 발생하게 되는데, 본 연구결과를 토대로 시험결과에 상응하는 수치해석모델을 생성하고 그 신뢰성을 확보하는 과정을 통해 추가 충돌시험을 수행하지 않아도 높은 정확도의 결과를 얻을 수 있을 것으로 전망된다.

References

- 1) Wright, S. E., and Dolbeer, R. A., "Percentage of wildlife strikes reported and species identified under a voluntary reporting system," 2005 Bird Strike Committee-USA/Canada 7th Annual Meeting, Vancouver, BC, 2005, p.11.
- 2) Park, C. Y., Jang, B. W., Kim, J. H., Kim, C. G., and Jun, S. M., "Bird strike event monitoring in a composite UAV wing using high speed optical fiber sensing system," *Composites Science and Technology*, Vol. 72, No. 4, 2012, pp.498~505.
- 3) Wilbeck, J. S., "Impact behavior of low strength projectiles," *Air Force Materials Lab Wright-*

Patterson AFB OH, No. AFML-TR-77-134, 1978.

4) Wilbeck, J. S., and Rand, J. L., "The development of a substitute bird model," *Journal of Engineering for Power*, Vol. 103, No. 4, 1981, pp. 725~730.

5) Airoidi, A., and Cacchione, B., "Modelling of impact forces and pressures in Lagrangian bird strike analyses," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, No. 10, 2006, pp.1651~1677.

6) Kong, C. D., and Lee, J. H., "A study on the structural behavior for the design of the small aircraft composite propeller blade by considering bird strike impact," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 25, No. 4, 1997, pp.72~85.

7) Nizampatnam, L. S., "Models and methods for bird strike load predictions," *Doctoral dissertation, Wichita State University*, 2007.

8) Moon, C. O., Woo, J. H., Oh, T. S., Hwang, C. H., and Park, C. Y., "Assessment of birdstrike resistant aircraft windshield," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and space Sciences*, Vol. 24, No. 2, 1996, pp.95~105.

9) Gingold, R. A., and Monaghan, J. J., "Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars," *Monthly notices of the royal astronomical society*, Vol. 181, No. 3, 1977, pp.375~389.

10) Lucy, L. B., "A numerical approach to the testing of the fission hypothesis," *The astronomical journal*, Vol. 82, 1977, pp.1013~1024.

11) Kang, P. S., Im, C. K., Youn, S. K., Lim, J. H., and Hwang, D. S., "A study on the damage of satellite caused by hypervelocity impact with orbital debris," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and space Sciences*, Vol. 40, No. 7, 2012,

pp.555~563

12) Kim, C. H., Lee, Y. G., and Jeong, K. L., "A study on the numerical simulation method of two-dimensional incompressible fluid flows using ISPH method," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 48, No. 6, 2011, pp.560~568.

13) Dalrymple, R. A., and Rogers, B. D., "Numerical modeling of water waves with the SPH method," *Coastal engineering*, Vol. 53, No. 2-3, 2006, pp.141~147.

14) Crespo, A. J., Gomez-Gesteira, M., and Dalrymple, R. A., "Modeling dam break behavior over a wet bed by a SPH technique," *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, Vol. 134, No. 6, 2008, pp.313~320.

15) Georgiadis, S., Gunnion, A. J., Thomson, R. S., and Cartwright, B. K., "Bird-strike simulation for certification of the Boeing 787 composite moveable trailing edge," *Composite Structures*, Vol. 86, No. 1-3, 2008, pp.258~268.

16) Monaghan, J. J., "Smoothed particle hydrodynamics," *Annual review of astronomy and astrophysics*, Vol. 30, No. 1, 1992, pp.543~574.

17) Cooper, P. W., "Acceleration, formation, and flight of fragments," *Explosives Engineering*, Wiley-VCH, 1996, pp.385~394.

18) Meguid, S. A., Mao, R. H., and Ng, T. Y., "FE analysis of geometry effects of an artificial bird striking an aeroengine fan blade," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35, No. 6, 2008, pp.487~498.

19) Lavoie, M. A., Gakwaya, A., Ensan, M. N., and Zimcik, D. G., "Validation of available approaches for numerical bird strike modeling tools," *International Review of Mechanical Engineering*, Vol. 1, No. 4, 2007, pp.380~389.