



FENSAP-ICE를 이용한 고세장비 날개 결빙해석

정경진,^{*1} 이재훈,² 강인모¹

THE ICE ANALYSIS OF HIGH ASPECT RATIO WING USING FENSAP-ICE

K.J. Jung,^{*1} J.H. Lee² and I.M. Kang¹

Icing is one of the most serious hazards for aircraft. The amount and rate of icing depend on a number of meteorological and aerodynamic factors. Of primary importance are amount of liquid water content of droplets, their size, the temperature of aircraft surfaces, the collection efficiency, and the extent of supercooled droplets.

In this study, in-flight icing analysis of low Reynolds number high aspect ratio wing is carried out by using FENSAP-ICE. Each liquid water contents with altitude is obtained from FAR 25 Appendix-C. And the collection efficiency is calculated to check out the ice accretion position of wing with two angles of attack. The degradation of aerodynamic characteristics of aircraft are figured out by investigating the accretion of rime and glaze ice.

Key Words : 결빙해석(Ice Analysis), 고세장비 날개(High Aspect Ratio Wing), 공력특성(Aerodynamic Characteristics)

1. 서 론

결빙현상은 항공기에 대하여 가장 치명적인 비행성능을 좌우하는 현상으로써, 구름의 작은 물방울(Droplet) 또는 빙결 온도이하에서도 액체 상태로 존재하는 과냉각 물방울(Supercooled Droplet : SLD)이 기체표면에 충돌 후 결빙되어 얼음이 쌓이는 현상을 의미한다. 구름의 물방울은 기후조건에 의하여 순간적으로 얼어붙어서 제빙장치가 없는 기체 표면에서 서리 얼음(Rime ice)을 형성하거나, 녹지 않고 정체점 이후로 흘러서 유리 얼음(Glaze ice)을 형성하기도 한다. 결빙은 온도가 0°C 근처일 때나 또는 -40°C와 같은 낮은 온도일 때 가장 심각하다[1].

결빙 양과 비율은 기후 및 공력 조건에 따라 좌우되며, 가장 중요한 요소는 물방울의 수분함유량(LWC:Liquid Water Content), 크기, 기체의 표면온도, 수집율(Collection Efficiency) 그리고 과냉각 물방울의 존재여부에 따라 결정된다.

본 연구에서는 FENSAP-ICE를 이용하여 항공기가 비행을 위하여 구름을 통과할 때 저레이놀즈수 3차원 날개에 발생하

는 결빙해석을 수행하였으며, 결빙에 따른 성능저하를 확인할 수 있었다. 또한 같은 비행조건에서 Rime과 Glazed 결빙조건에 따라서 생성되는 얼음 형상을 통하여 항공기 성능저하를 야기하는 결빙특성을 파악하였다.

2. 결빙해석 방법

각국에서는 결빙해석을 위하여 여러 가지 해석 프로그램을 개발하여 적용하고 있다. 미국에서는 NASA에서 개발한 2D 및 Quasi-3D에서 적용가능한 LEWICE를 사용하고 있으며, 프랑스에서는 2, 3차원용 ONERA 프로그램을 개발한 바 있다. 영국에서는 3차원 점성해석이 가능하고 Lagrangian Particle Tracking 기법을 적용한 ICECREMO를 사용하고 있으며, 캐나다에서는 Bombardier사의 CANICE 및 현재 상용으로 판매되고 있는 FENSAP-ICE를 활용하고 있다[2].

아래의 Fig. 1은 FENSAP-ICE[3]를 이용한 결빙해석 절차를 나타낸 그림으로써 항공기 형상을 기반으로 격자를 생성하고 2차원 및 3차원 Euler 또는 Navier-Stokes 코드를 이용하여 유동장을 해석하여 유동장 변수를 획득한 이후에 Droplet Impingement를 통하여 Collection efficiency 분포를 계산하여 Impingement 패턴을 산출한다. 위에서 계산한 유동장 변수 및 열전달 양을 고려하여 물방울 궤적의 분포 및 속도자료를 이

1 정회원, 국방과학연구소

2 정회원, 대한항공연구소

* TEL : 042) 821-4796

* Corresponding author, E-mail: charley@add.re.kr

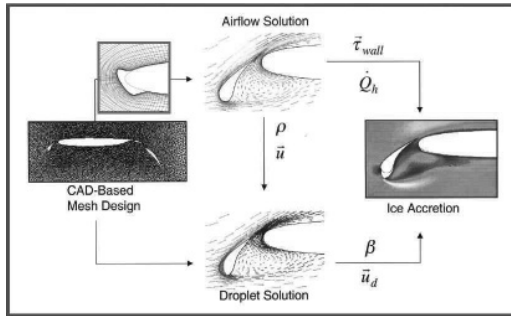


Fig. 1 Icing analysis of FENSAP-ICE

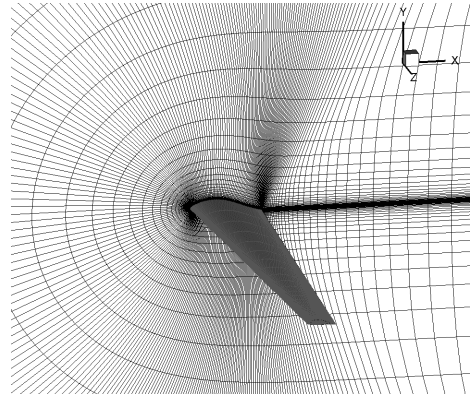


Fig. 2 Grid system of high aspect ratio wing

용하여 최종적으로 날개 및 기체에 적층되는 결빙의 두께 및 형태를 결정하게 된다. 이 형상을 기반으로 기존의 격자를 변형하여 유동장을 재해석하여 공력 특성을 변화를 파악하게 된다.

2.1 FENSAP : Flow Solver

In-flight 결빙 해석절차는 결빙이 없는 형상에 대한 유동의 해를 획득하는 것으로부터 시작하여 대부분 결빙이 생성됨으로부터 야기되는 공력성능 감소를 평가하기 위하여 결빙이 부착된 형상을 재해석함으로써 완결된다. FENSAP은 정상/비정상 압축성 3차원 Navier-Stokes 방정식을 풀어서 유동장 해석을 수행한다. 점성/비점성 유동 해석이 가능하며 난류모델은 1-equation 및 2-equation 모델을 사용할 수 있다. Glaze ice 일 경우 중요한 벽면에서의 Heat flux는 고체 표면상에서 에너지 방정식을 풀어서 2차의 정확도로 계산가능하다.

2.2 OptiGrid : 3D Grid Adaptation/Reconstruction

초기 격자로부터 OptiGrid는 각 에지의 질을 Error의 크기를 이용하여 평가하며 해의 영역(Solution Domain)에서 Error를 감소시키기 위하여 격자를 수정한다. Optigrd는 충격파, 경계층과 같이 유동의 물리적인 특성이 급격하게 변하는 장소의 격자를 Refine하거나 Coarse하게 하게 노드 점을 움직이고 에지를 서로 바꿈으로써 적응하도록 한다.

2.3 DROP3D : Impingement Solver

DROP3D는 3차원 Eulerian droplet impingement 모듈로써, 내/외부 유동의 물방울의 충돌을 계산할 수 있다. DROP3D는 Fine-grain을 대상으로 편미분 방정식을 풀어서 Droplet 속도와 농도를 계산한다. 따라서 Single-shot에 대하여 Collection efficiency 분포와 충돌 패턴, Shadowing 특성 그리고 Impingement limit을 결과로서 제시한다.

2.4 ICE3D : Ice Accretion & Water Runback

ICE3D는 얼음 형성의 복잡한 열역학에 대한 Fine-grain 편미분 방정식에 기반한 3차원 착빙 모듈로써, 복잡한 3차원 표면의 착빙 형상과 Water film thickness를 제공가능하다. ICE3D는 형상이 변경된 3차원 격자를 보여주며, FENSAP를 재구동하여 착빙으로 인한 성능 감소를 계산할 수 있다.

3. 해석 결과

저 레이놀즈수 에어포일 형상을 추출하기 위하여 최적화 과정을 통하여 최적설계를 수행하였으며[4], 평균액적의 크기는 20 μ m이며 액적 분포는 실제 구름조건과 유사한 결과를 제시하는 Langmuir-D 분포를 사용하였으며 결빙 노출시간은 326.4초로 선정하였으며, 층운인 Continuous Maximum보다 좀더 결빙이 심한 적운인 Intermittent Maximum인 경우를 고려하였으며 해석조건은 다음과 같다.

Conditions	7825 ft	13,000 ft
Temperature(K)	272.65	262.39
Pressure (kPa)	75.7	61.9
Velocity (m/s)	71.41	75.14
Mach No.	0.2157	0.2314
Re No.	4.81E6	4.97E6
LWC (g/m3, IM)	1.828	2.185

해석을 위한 격자를 Fig. 2에 나타내었으며 C-H 형태의 격자를 사용하였으며 309x61x93으로 총 175만개의 셀이 존재한다.

In-flight 받음각이 0, 4도일 때의 날개형상에 대하여 결빙 해석을 수행하였으며, 공력특성의 변화를 파악하기 위하여 받

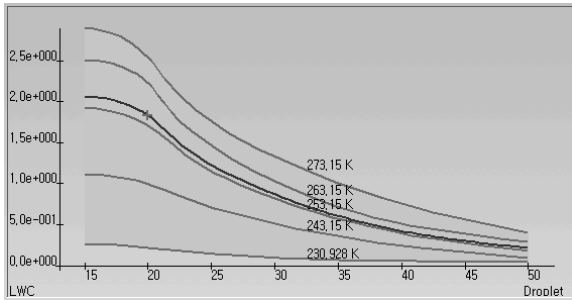


Fig 3 LWC vs. Droplet size



Fig 6 Ice thickness (H=7825 ft, Rime, IM)

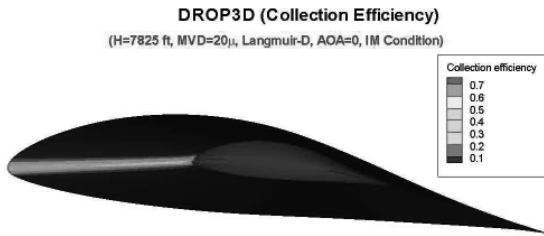


Fig 4 Collection efficiency (H=7825 ft, IM)



Fig 5 Ice thickness (H=7825 ft, Glaze, IM)

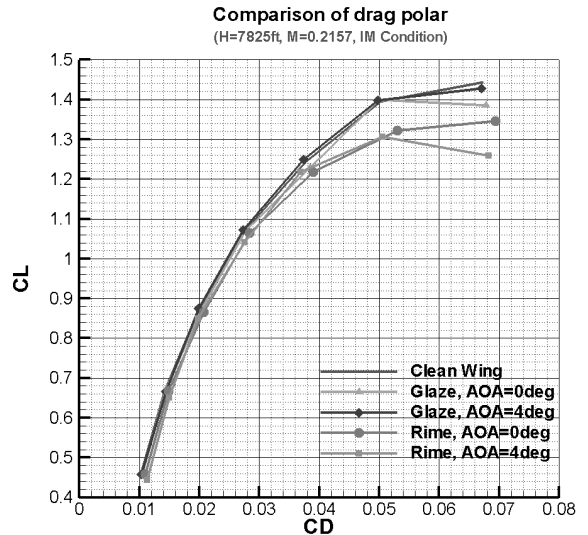


Fig. 7 Drag polars due to ice (H=7825 ft, IM)

음각을 -4도에서 2도 간격으로 8도까지 변화시켜가며 유동해석을 수행하였다.

3.1 고도 7825 ft일 때의 해석결과

고도 7825 ft에 대하여 결빙해석을 수행하였으며, Fig. 3과 같이 FAR 25 Appendix-C에 의거하여 LWC=1.828 g/m³를 적용하였으며 이는 고도에 따라 다른 값을 갖는다. 따라서 정확한 해석을 위해서는 비행고도에 적합한 LWC 값을 사용하여야 한다.

Intermittent 조건에서의 수집율을 Fig. 4에 도시하였으며, 2차원과는 달리 날개 끝단에서 보다 높은 값을 보인다. 이는

일반적으로 큰 물체보다는 작은 물체에 대하여 수집율이 크기 때문이다. 주어진 결빙시간에 대하여 Glaze와 Rime 조건에 대한 결빙 두께를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 적용한 결빙 조건에 대하여 Rime 조건일 때가 Glaze 조건을 적용하였을 때 보다 최대 9배 정도로 많은 얼음이 부착된 것을 알 수 있었다.

Fig. 7에는 고세장비 날개에 대하여 받음각이 0, 4도로 비행 시 Glaze, Rime 결빙이 발생한 경우에 대한 공력특성을 비교하기 위하여 Drag Polar를 도시하였다. Glaze 결빙 조건에서는 두 받음각에 대하여 공력특성의 변화가 작으나, Rime인 경우에는 많은 공력특성의 손실이 발생함을 알 수 있다.

3.2 고도 13,000 ft일 때의 해석결과

Fig. 8에 Intermittent 조건에서의 날개 스펠방향으로의 수집률을 도시하였다. 받음각 0도인 경우에는 스펠방향으로 고도



Fig 8 Collection efficiency (H=13 kft, IM)



Fig 9 Ice thickness (H=13 kft, Glaze, IM)



Fig 10 Ice thickness (H=13 kft, Rime, IM)

고도 13,000 ft에서의 결빙으로 인한 공력특성 변화를 파악하기 위하여 받음각 0도에서 결빙된 날개형상에 대한 Drag polar를 그림 11과 같이 도시하였다. 고도 7825 ft와 마찬가지로 Rime 조건에서 공력특성이 나쁘게 나타남을 알 수 있다. 7825 ft와 거의 같은 분포를 가지나, 받음각이 4도인 유동조건에 대하여는 0도에 비하여 아래쪽으로 수직축이 편중됨을 Fig. 8을 통하여 알 수 있다.

그림 9, 10에는 Glaze와 Rime 조건에서의 스펠방향으로 결

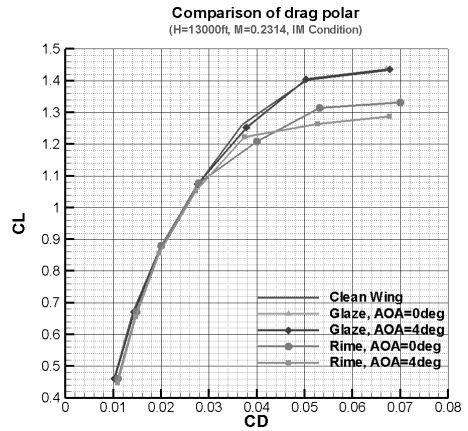


Fig 11 Drag polars due to ice (H=13 kft, IM)

빙 두께를 도시하였으며, 약 9.2배 만큼 더 결빙이 되었음을 알 수 있다. 또한 Rime 결빙의 경우 스펠방향으로 Leading edge에 집중적으로 결빙이 발생하였음을 보이고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

상용 결빙해석 S/W인 FENSAP-ICE를 이용하여 고 세장비를 갖는 저 레이놀즈수 날개에 대하여 결빙해석을 수행하였다. 각 고도별에 해당하는 LWC를 FAR 25 Appendix-C에 의거하여 구하여 항공기가 받음각 0, 4도로 비행할 때 날개에 착빙되는 부위를 파악하기 위하여 Collection efficiency를 획득하였다. 2차원 에어포일 결빙해석에서는 파악할 수 없는 스펠방향 Collection efficiency에 대한 분포 특성을 3차원 고세장비 날개의 결빙해석을 통하여 파악하였다.

Rime과 Glaze 결빙에 따라 생성되는 얼음 형상을 통하여 항공기 성능 저하를 야기하는 결빙현상을 비행고도에 따라 파악하였다.

참고문헌

- [1] 2009, *Icing Course : Effective Use of CFD for In-flight Icing Certification*, Univ. of Nevada Las Vegas, April 13-17.
- [2] 2002, Myers, T.G. et al., "Slowly accreting ice due to supercooled water impacting on a cold surface," *Physics of Fluid*, Vol 14, No. 1, January.
- [3] 2008, *FENSAP-ICE Refrence Manual*, NTI.
- [4] 2007, 정경진 외 2인, "저레이놀즈수 에어포일 형상 최적 설계 연구," *한국항공우주학회 추계학술대회*.