

技術論文

DOI:10.5139/JKSAS.2010.38.11.1105

Part2 : 착빙 조건 변화에 따른 결빙 형상의 정량적 분석

손찬규*, 오세종**, 이관중***

Part2 : Quantitative Analyses of Accumulated Ice Shapes
with Various Icing Conditions

Chankyu Son*, Sejong Oh** and Kwanjung Yee***

ABSTRACT

Ice shapes accumulated on the aircraft surfaces are categorized into rime and glaze ice, which are highly dependent on various parameters such as ambient temperature, liquid water contents (LWC), mean volumetric droplet diameter and freestream velocity. In this study, quantitative analyses on the ice accretion have been attempted in a systematical manner and the key findings are as follows. First, the increase of freestream velocity can cause tremendous change in the ice accumulation such as the growth of ice accretion area, ice heading direction and maximum thickness of ice horn. Second, LWC is found to be linearly proportional to the ice accretion area. Third, the effects of ambient temperature on incoming water mass seem to be relatively small in comparison with LWC and freestream velocity. Finally, it was shown that MVD has only a little influence on ice shapes. However, it may increase the ice accretion area by increasing the droplet impacting range.

초 록

착빙현상은 크게 서리얼음과 유리얼음으로 구분되며 대기온도 뿐 아니라 자유류 속도, 대기 중 수증기 함유량, 수증기 입자의 크기는 결빙형상에 영향을 미친다. 본 논문에서는 결빙 형상에 영향을 미치는 외기조건에 의해 변화하는 결빙형상을 체계적, 정량적으로 분석하여 다음과 같은 결과 확인하였다. 먼저, 자유류 속도의 증가는 결빙면적, 얼음 진행 방향, 최대 두께를 모두 증가시키고 결빙형상을 가장 크게 변화시켰다. 둘째, LWC와 결빙면적은 선형적인 관계가 있음을 알 수 있었다. 셋째, 대기온도가 수증기 유입량에 미치는 영향은 LWC, 자유류 속도에 의한 영향에 비해 적어 결빙면적의 변화가 가장 작게 나타났다. 넷째, MVD가 결빙 형상에 미치는 영향은 선정한 외기 조건 중에 가장 미미하였다. 단, 입자가 표면에 충돌하는 영역을 증가시켜 결빙면적에 영향을 주었다.

Key Words : Aircraft icing(항공기 착빙), Ice accumulated shapes(결빙 형상), Ice accumulated area(결빙 면적), Ice heading direction(얼음 진행 방향), Maximum thickness of ice(얼음의 최대두께)

† 2010년 8월 13일 접수 ~ 2010년 10월 25일 심사완료

* 정회원, 부산대학교 항공우주공학과 대학원

** 정회원, 부산대학교 항공우주공학과

*** 정회원, 부산대학교 항공우주공학과
교신저자, E-mail : daedalus@pusan.ac.kr
부산시 금정구 장전동 산 30번지

I. 서 론

빙점 이하에서 결빙하지 않고 존재하는 수증기 입자(Supercooled Liquid Droplet)가 비행 중인 항공기와 충돌하여 항공기의 외부 구조물에

얼음 층을 형성하는 현상을 항공기 착빙(Aircraft Icing)이라 한다. 항공기 착빙현상은 크게 서리얼음(Rime Ice)과 유리얼음(Glaze Ice)으로 구분할 수 있다[1]. 서리얼음은 수증기 입자가 항공기 외부 표면에 충돌 후 즉시 결빙한다. 불투명하며 표면의 형상을 따라 완만한 얼음 층을 형성한다. 이에 반해 유리얼음은 표면에 충돌한 입자가 표면과 충돌 후 열 교환을 이루며 표면을 따라 흐르게 된다. 흐르던 물(Runback Water)이 대류에 의한 열전달이 활발한 표면에서 결빙하기 때문에 얼음 뿔(Ice Horn)을 형성한다[2].

이러한 결빙 현상은 비행 속도(V_{∞}), 대기 중 수증기 함유량(LWC : Liquid Water Content), 대기 온도(T_{∞}), 수증기 입자의 크기(MVD : Mean Volumetric Droplet Diameter) 등의 외기조건에 의해 영향을 받는다. 외기조건 변화가 서리얼음 또는 유리얼음으로 날개의 표면 거칠기 및 날개 형상에 변형을 초래하여 날개의 공기역학적 성능을 저해하고 항공기 사고를 유발하는 원인이 된다[3]. 날개의 공기역학적 성능의 감소와 항공기 사고를 예방하기 위해 항공기는 FAR Appendix C[4]에 의해 Anti/De-icing 장치를 적용하고 있다[5].

외기조건 변화에 따른 결빙 현상의 특징과 결빙 강도를 파악하는 연구는 Anti/De-icing 장치의 설계에 기초적인 자료로 활용될 수 있다[6]. 결빙 면적, 얼음의 최대 두께와 발생 위치의 획득은 Anti/De-icing 장치의 적용 범위를 결정하고 표면에서 요구되는 열용량을 산출하기 위해 요구된다[7].

이에 따라 본 연구에서는 외기조건에 영향을 따라 변화하는 결빙 현상을 획득하고 획득한 결빙 현상을 체계적, 정량적으로 분석함으로써 외기조건과 결빙 현상의 관계를 파악하는 연구를 수행하였다.

Part1에서 수행한 내용을 바탕으로 외기조건을 변화시켜 결빙 현상을 획득하였다. 대기온도, LWC, MVD, 자유류 속도를 결빙 현상에 영향을 미치는 외기조건으로 설정하고 각각의 인자마다 서리얼음과 유리얼음의 형상이 나타나는 조건으로 나누어 결빙 현상을 획득하였다. 획득한 결빙 현상을 Part1에서 선정한 기준을 통해 정량적으로 분석하였다. 정량적 분석의 기준은 결빙 면적(σ_{area}), 얼음 뿔의 진행방향(θ_{horn}), 얼음 뿔의 최대 두께(δ_{max}), 익형 면에서 측정된 얼음의 두께(t)로 선정하였다.

수행한 결과를 통해 결빙 현상과 외기조건과의 관계를 정성적, 정량적으로 분석하였다.

II. 본 론

2.1 결빙 현상 획득 조건

결빙 현상을 획득하기 위해 본 연구에서 사용한 수치해석 기법은 참고문헌에 자세히 기술되어 있다[8-9].

수치해석 기법을 이용하여 획득한 결빙 현상의 정량적 분석방법은 Part 1과 동일하다. 외기조건 변화에 따라 NACA0012의 익형에 결빙하는 현상을 획득하였고 결빙현상에 영향을 주는 외기인자를 다음과 같이 설정하였다. 또한 각 인자별로 서리얼음과 유리얼음이 형성되도록 구성하였다.

○LWC(Liquid Water Content)

LWC는 대기 중 수증기 함유량을 나타낸다. 자유류의 단위체적당 포함된 액적의 질량을 의미한다. 대기온도에 변화를 주어 서리얼음과 유리얼음이 생성 되도록 하였다. 식(1)[10-11]은 대기에서 날개 표면에 유입되는 수증기의 양으로 LWC가 증가할수록 날개 표면에 유입되는 수증기량이 증가한다.

$$\dot{m}_{com} = LWC \cdot V_{\infty} \beta \Delta s$$

(1)

LWC : Liquid water content

V_{∞} : Free-stream velocity

β : Collection efficiency

Δs : Length of control volume

서리얼음과 유리얼음이 발생하는 대기온도를 각각 -20°C 와 -5°C 로 구성하고 Table 1과 같이 LWC를 0.25, 0.75, 0.1, 1.25, 1.5g/m³로 변화시켜 결빙현상을 획득하였다.

Table 1. The flow conditions with various LWC

	Rime	Glaze
α°	4	
Chord	NACA0012/0.5334m	
$T_{\infty}(^{\circ}\text{C})$	-20	-5
$V_{\infty}(\text{m/s})$	50	
LWC(g/m ³)	0.25, 0.5, 0.75, 0.1, 1.25, 1.5	
MVD(μm)	20	
$\tau(\text{s})$	300	

○ 대기온도(T_{∞})

대기온도는 결빙현상에 큰 영향을 미치는 요소로 식(2)와 같이 대기온도와 빙점(0°C , T_{ice})의 온도차이 만큼 검사체적에 유입되는 에너지에 영향을 미친다. 또한 얼음 표면의 온도인 평형온도(Equilibrium Temperature)[12]를 결정하는 주요

한 요소이다.

대기온도를 -3, -6, -9, -12, -15, -18, -21°C로 구성하여 결빙형상을 획득하였다. 또한 자유류 속도를 각각 66, 120m/s로 나누어 식(2)[10-11]의 외부에서 유입되는 에너지양의 변화에 따라 서리얼음과 유리얼음의 변화를 살펴보았다. 결빙 형상을 획득한 조건은 Table 2와 같다.

$$\dot{E}_{com} = \dot{m}_{com} \left[C_{p,w,s} (T_{\infty} - T_{ice}) + \frac{V_{\infty}^2}{2} \right]$$

$C_{p,w,s}$: Specific heat of water at constant pressure (2)

T_{∞} : Ambient temperature

T_{ice} : Temperature of ice

V_{∞} : Freestream velocity

Table 2. The flow conditions with various T_{∞}

	Rime	Glaze
α°	4	
Chord	NACA0012/0.5334m	
$T_{\infty}(^{\circ}C)$	-3, -6, -9, -12, -15, -18, -21	
$V_{\infty}(m/s)$	66	120
LWC(g/m3)	0.6	
MVD(μm)	15	
$\tau(s)$	384	

○자유류 속도(V_{∞})

자유류 속도는 식(1)과 같이 외부에서 유입되는 수증기량에 영향을 주고 식(2)와 같이 대기로부터 날개 표면에 유입되는 운동 에너지와 밀접한 관계가 있다.

자유류 속도의 증가는 표면에 유입되는 운동 에너지를 증가시켜 얼음 뿔을 형성한다. 또한 입자의 항력은 자유류 속도에 영향을 받기 때문에 입자의 부착위치를 변화시키는 요인이 된다.

대기 온도에 변화를 주어 서리얼음과 유리얼음이 생성되도록 하였다. 서리얼음과 유리얼음의 생성 조건은 각각 -10°C와 -25°C이다. 자유류 속도에 의한 결빙 형상의 영향을 파악하기 위해 33, 48, 64, 81, 101, 129m/s로 변화를 주었다. 자세한 외기조건은 Table 3과 같다.

Table 3. The flow conditions with various V_{∞}

	Rime	Glaze
α°	4	
Chord	NACA0012/0.5334m	
$T_{\infty}(^{\circ}C)$	-25	-10
$V_{\infty}(m/s)$	33, 48, 64, 81, 101, 129	
LWC(g/m3)	0.6	
MVD(μm)	15	
$\tau(s)$	384	

○MVD(Mean Volumetric Droplet Diameter)

MVD는 대기 중 수증기 입자의 직경을 의미한다. 입자의 크기의 변화는 입자에 작용하는 항력에 영향을 주어 날개와 충돌하는 위치를 변화시킨다. 이에 따라 날개의 영향을 받지 않는 위치에서의 입자 간격과 날개 표면에 충돌되는 위치에서의 입자간 간격의 비인 부착률(Collection Efficiency, β)에 영향을 주어 식(1)에서와 같이 날개 표면에 유입되는 수증기량을 변화시킨다. 수증기 입자의 크기를 각각 20, 30, 40, 50, 60, 70 μm 로 설정하였다. 지름이 50 μm 이상의 큰 액적을 SLD(Supercooled Large Droplet)라 한다. SLD 상태에서 입자는 날개와 충돌할 때 표면에서 터지며 결빙한다(Splash effects)[12-13]. 그러나 현재 개발된 코드는 이러한 현상을 고려하지 못하는 제약이 있어 본 논문에서는 입자의 크기에 의한 궤적의 변화가 결빙 형상에 미치는 영향을 분석 하고자 하였다. 자세한 착빙조건은 Table 4와 같다.

Table 4. The flow conditions with various MVD

	Rime	Glaze
α°	4	
Chord	NACA0012/0.5334m	
$T_{\infty}(^{\circ}C)$	-20	-5
$V_{\infty}(m/s)$	50	
LWC(g/m3)	0.5	
MVD(μm)	20, 30, 40, 50, 60, 70	
$\tau(s)$	300	

2.2 외기 조건 변화에 의한 결빙 형상 획득 및 결빙 형상의 정량적 분석

2.2.1 LWC(Liquid Water Content)

○Rime ice conditions

Fig. 1은 LWC의 변화에 따라 -20°C에서 결빙하는 얼음의 형상을 나타낸 그림이다. 현 조건에서 낮은 대기온도로 결빙 형상은 서리얼음 형태의 매끈한 형상을 가진다. LWC의 증가는 식(1)과 같이 날개 표면에 유입되는 수증기량을 증가시켜 결빙하는 얼음 양을 증가시킨다. 증가된 수증기 양은 Fig. 2와 같이 결빙된 얼음 면적을 증가시킨다. Fig. 2의 점선으로 표현한 직선은 LWC가 0.25g/m³과 1.5g/m³에서의 얼음 면적을 이은 직선으로 각각의 LWC에서 획득한 결빙면적을 이은 실선과 비교해 볼 때, LWC와 결빙면적은 선형적으로 비례함을 알 수 있다.

Fig. 3은 얼음의 최대 두께와 진행 방향을 25%시위 길이를 기준으로 극좌표로 나타낸 그림

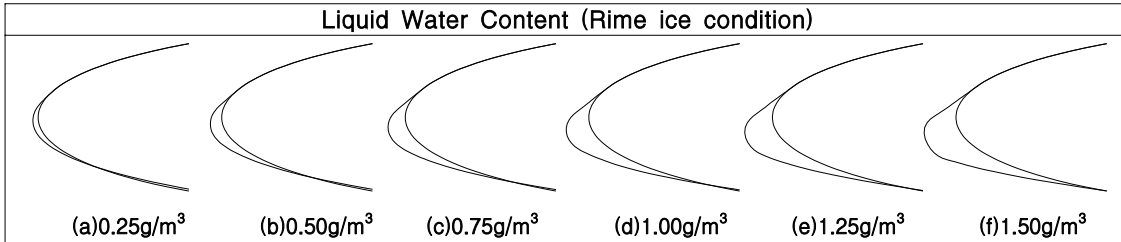


Fig. 1. Ice shapes in rime ice condition with varying LWC

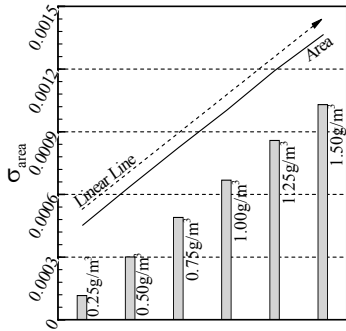


Fig. 2. Ice accumulated area

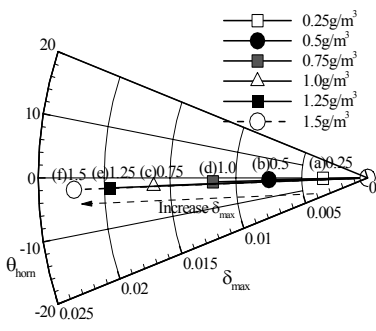


Fig. 3. Ice heading direction and max. thickness

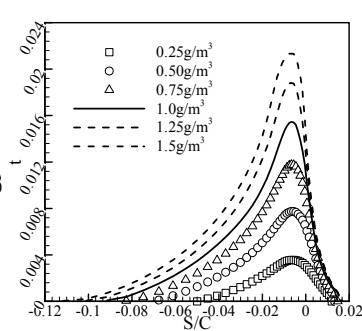


Fig. 4. Thickness of ice along airfoil surface

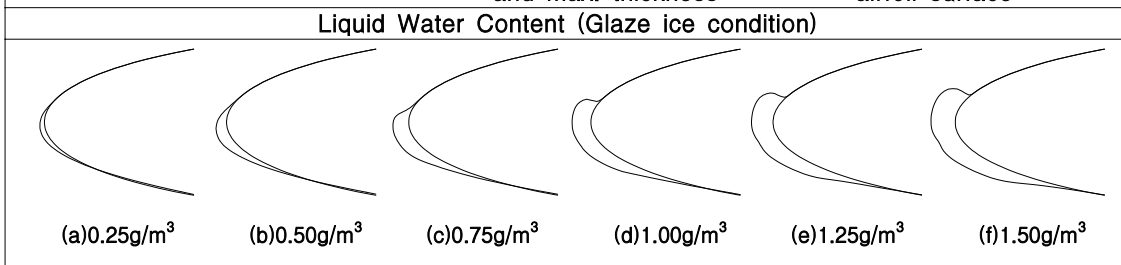


Fig. 5. Ice shapes in glaze ice condition with varying LWC

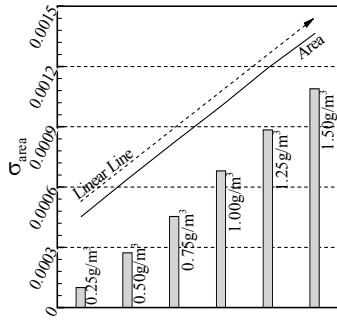


Fig. 6. Ice accumulated area

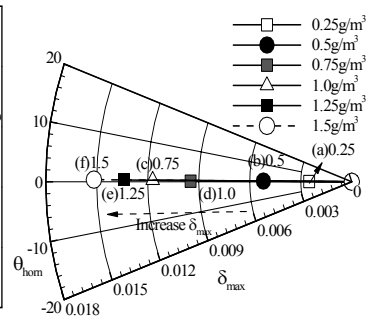


Fig. 7. Ice heading direction and max. thickness

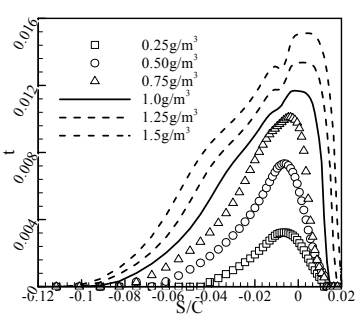


Fig. 8. Thickness of ice along airfoil surface

이다. 서리얼음 조건에서 얼음의 성장방향은 -2° 로 LWC의 증가와 무관하게 일정한 값을 갖는다. LWC는 얼음의 최대 두께, 얼음의 면적과 관계가 있으며 결빙의 진행 방향과는 무관하다. Fig. 4는 결빙이 발생하지 않은 익형면에서 얼

음이 결빙한 두께를 나타낸 그림이다. 가로축은 앞전을 기준으로 한 표면거리를 나타낸다. 뒷면의 경우 양의 값을 갖고 아랫면의 경우 음의 값을 갖는다. Fig. 4에서 충돌 한계(Impinging Limit)를 살펴 볼 때, 뒷면의 충돌 한계는 변화가 없으

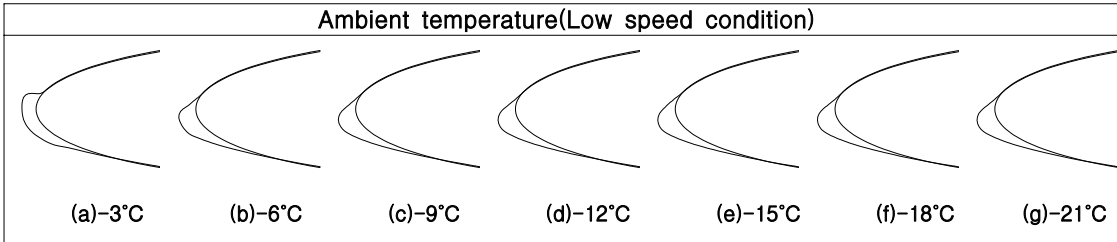


Fig. 9. Ice shapes in low speed condition with varying ambient temperature

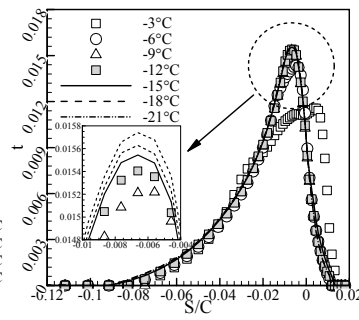
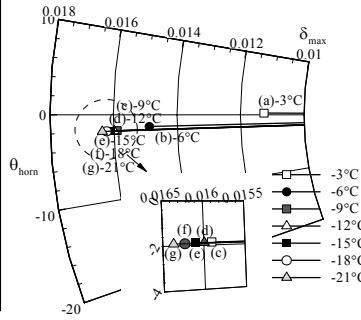
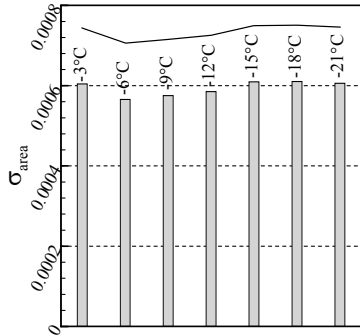


Fig. 10. Ice accumulated area Fig. 11. Ice heading direction and max. thickness Fig. 12. Thickness of ice along airfoil surface

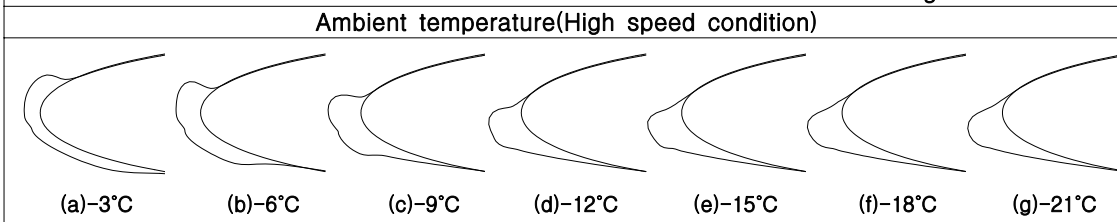


Fig. 13. Ice shapes in high speed condition with varying ambient temperature

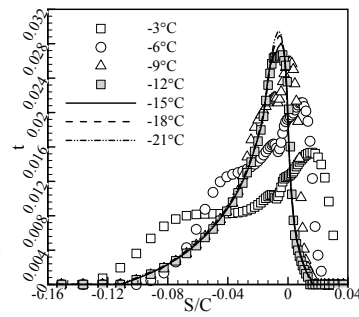
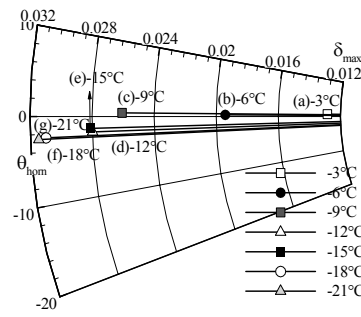
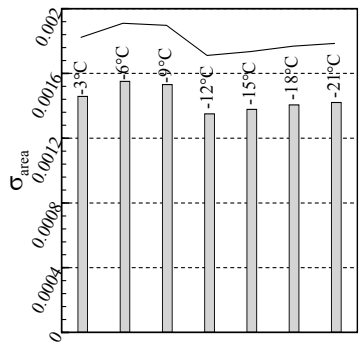


Fig. 14. Ice accumulated area Fig. 15. Ice heading direction and max. thickness Fig. 16. Thickness of ice along airfoil surface

며 최대 두께가 발생하는 위치에도 큰 차이가 없다. 그러나 아랫면의 충돌 한계는 $1.5\text{g}/\text{m}^3$ 의 경우 $0.25\text{g}/\text{m}^3$ 의 경우 보다 123% 아래쪽으로 진행되는 것을 볼 수 있다. 얼음의 최대 두께 증가와 표면 얼음 분포의 증가가 얼음면적을 증가시켰다.

○Glaze ice conditions

Fig. 5는 LWC의 변화에 따라 -5°C 에서 결빙하는 얼음의 형상을 나타낸 그림이다. 상대적으로 높은 대기온도 조건에서 유입되는 수증기량이 증가하여 유리얼음 형상이 생성된다. 이와 같은 경우 1이하의 결빙비(Freezing Fraction)를 갖게 되

고 대류에 의한 냉각이 충분하지 못하여 Runback을 생성한다. 생성된 Runback은 날개의 윗면과 아랫면으로 흐르고 서리얼음의 조건에서 결빙되지 않는 표면까지 얼음이 결빙한다. 또한 Runback은 대류에 의한 냉각 효과가 활발한 윗면에서 집중적으로 결빙되어 윗면에서 얼음 뿔을 형성한다.

Fig. 6과 같이 결빙 면적을 살펴보면 LWC의 증가는 유입되는 수증기량을 증가시켜 결빙면적을 증가시킨다. $0.25\text{g}/\text{m}^3$ 와 $1.5\text{g}/\text{m}^3$ 을 이은 점선과 각각의 LWC에서 계산된 면적 값을 이은 직선과 비교할 때 LWC와 결빙면적은 선형의 관계가 있다. LWC는 유리얼음이 생성되는 조건과 서리얼음이 생성되는 조건 모두 결빙 면적과 선형의 관계를 보이고 있다. 그러나 서리얼음의 완만한 형상에서 선형성이 보다 뚜렷하게 나타났다.

Fig. 7에서 유리얼음의 경우 수증기 유입량과 대기 온도의 증가로 서리얼음 조건인 Fig. 3에 비해 얼음이 성장하는 방향이 2° 위를 향하는 것을 볼 수 있다. 얼음 뿔을 형성하는 유리얼음 조건에서도 25% 시위길이를 기준으로 최대두께가 발생하는 얼음의 진행 방향은 0° 로 일정하게 나타났다.

서리얼음 조건에서 Fig. 12와 같이 윗면의 충돌한계가 변화가 없는 것과 달리 유리얼음의 조건에서는 Runback의 영향으로 LWC가 $0.25\text{g}/\text{m}^3$ 에서 $1.5\text{g}/\text{m}^3$ 으로 증가할 경우 얼음에 덮힌 구간이 윗면에서 67.5%, 아랫면에서 154% 증가하였다.

2.2.2 대기 온도(T_∞)

○Low speed conditions

Fig. 9는 $66\text{m}/\text{s}$ 의 조건에서 온도에 따라 결빙 형상을 나타낸 그림이다. 대기 온도가 낮아짐에 따라 얼음 뿔을 형성하는 형태의 유리얼음 형상에서 점차 서리얼음의 매끈한 곡선으로 바뀐다.

Fig. 10은 결빙면적을 나타낸다. -3°C 에서는 얼음 뿔로 인해 대기 중 수증기 입자와 접촉하는 전면의 면적이 증가한다. 또한 동일한 수증기 유입량을 갖더라도 대기 온도가 높기 때문에 표면에서 결빙시킬 수 있는 얼음양이 적어져 Fig. 11과 같이 최대두께는 감소하여 Runback을 생성하고 Fig. 12와 같이 두께를 유지하는 얼음의 분포가 넓게 나타난다.

서리 얼음의 형상이 나타나는 -15°C 이하의 대기 온도 조건에서는 Fig. 9와 같이 결빙형상에 큰 변화가 없다. Fig. 10의 결빙 면적, Fig. 11의 최대 두께, 얼음의 진행방향과 Fig.12의 얼음의 분포 또한 변화가 없이 나타난다. 서리얼음이 발생

하는 대기온도가 주어진 조건에서는 -15°C 이고 서리얼음이 발생하는 조건에서는 결빙형상의 변화가 나타나지 않는다.

○High speed conditions

Fig. 13은 $120\text{m}/\text{s}$ 의 자유류 속도에서 결빙하는 얼음의 형상을 대기온도의 변화에 따라 나타낸 그림이다. 자유류가 갖고 있던 운동에너지의 증가는 앞선 조건의 -15°C 에서 생성되는 서리얼음에 비해 더 낮은 온도인 -18°C 에서 서리얼음을 형성한다. 얼음 뿔이 형성된 유리얼음의 경우 언급한 것과 같이 전면 면적을 증가시켜 Fig. 14와 같이 얼음 뿔이 형성되지 않는 -12°C 에 비해 -9°C 에서 면적이 증가한다. Fig. 15를 보면 온도가 낮아질수록 최대두께가 증가하고 결빙의 방향은 아래를 향하게 된다. -18°C 이하에서 최대두께와 결빙 방향이 일정하게 유지된다. Fig. 16에서와 같이 결빙된 얼음의 분포를 살펴보면 높은 대기 온도에서 얼음의 최대 두께는 작으나 얼음의 두께를 유지하고 있는 범위가 증가한다. 이에 반해 온도가 낮아질수록 최대 두께가 증가하고 결빙 범위가 좁아지는 경향이 나타났다. 이와 같이 최대 두께와 결빙의 분포의 차이는 Runback의 영향에 의해 발생되었다. 높아진 대기온도는 표면에서 결빙시킬 수 있는 얼음량을 줄여 Runback이 생성되게 하고, 이와 같은 Runback은 표면을 타고 흘러 서리얼음에서는 결빙하지 않던 구간까지 넓게 결빙하도록 하였다.

대기온도는 표면에 날개 표면에 유입되는 수증기의 질량변화에 영향을 주지 않는다. 그러나 온도의 변화가 초래하는 얼음의 형상변화는 수증기가 부착되는 위치에 영향을 주어 부착률을 변화시킨다. 유리얼음 영역과 같이 형상변화가 뚜렷한 온도 구간에서 결빙면적의 차이를 나타내었다. 그러나 서리얼음이 발생하는 낮은 온도 구간에서는 형상의 변화가 없어 결빙면적의 변화가 발생하지 않았다. 결빙 면적에 가장 큰 영향을 미치는 외부 유입량의 변화가 없어 온도의 변화에 따라 결빙 면적의 변화폭은 크지 않고, 그 경향성 또한 뚜렷하게 나타나지 않았다.

2.2.3 자유류 속도(V_∞)

○Rime ice conditions

Fig. 17은 -25°C 에서 자유류 속도의 변화에 따른 결빙형상을 나타낸 그림이다. 낮은 대기 온도 조건으로 서리얼음의 형상이 결빙한다. 이때, 각 패널에 유입되는 수증기가 모두 결빙하여 서리얼음의 매끈한 형상을 보인다. Fig. 18과 같이 자유류 속도의 증가로 유입량이 증가하고 결빙되는 얼음의 면적이 증가한다. 또한 Fig. 19와 같이 앞

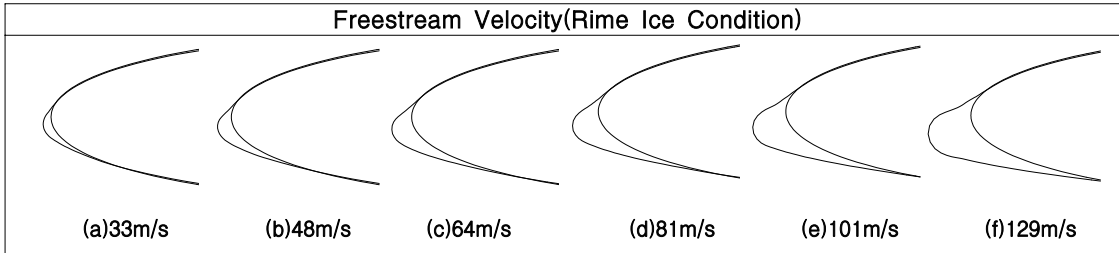


Fig. 17. Ice shapes in rime condition with varying freestream velocity

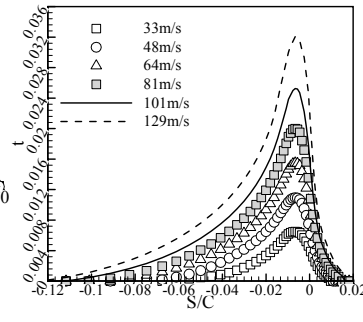
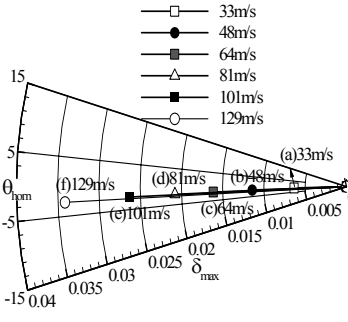
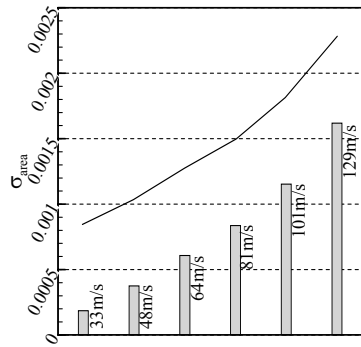


Fig. 18. Ice accumulated area

Fig. 19. Ice heading direction and max. thickness

Fig. 20. Thickness of ice along airfoil surface

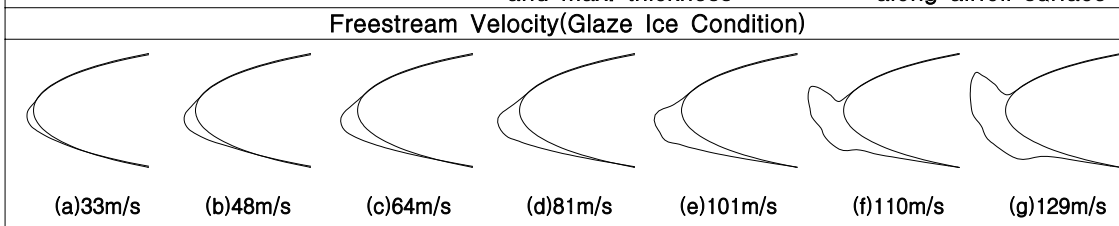


Fig. 21. Ice shapes in glaze condition with varying freestream velocity

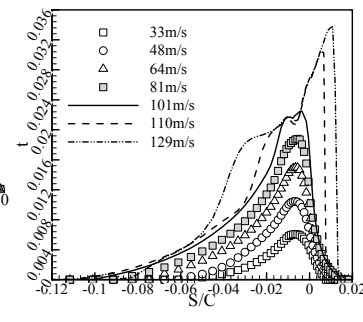
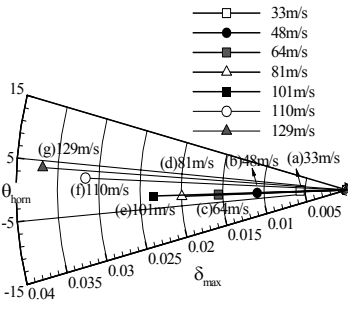
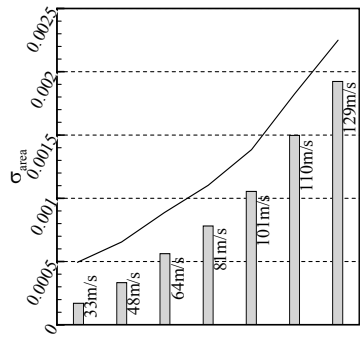


Fig. 22. Ice accumulated area

Fig. 23. Ice heading direction and max. thickness

Fig. 24. Thickness of ice along airfoil surface

선 서리얼음 조건과 동일하게 결빙이 일어나는 방향이 -2.6° 로 일정하게 유지되고 얼음의 최대두께만 증가한다. Fig. 20에서와 같이 속도가 증가할 경우 충돌 한계의 위치가 넓은 분포를 갖는

다. LWC와 대기 온도 변화에 의한 서리얼음은 윗면의 결빙범위는 일정하고 아랫면의 결빙 범위가 증가하는 형상이나 자유류 속도의 변화는 윗면과 아랫면 모두 결빙 분포를 변화시킨다. 윗면

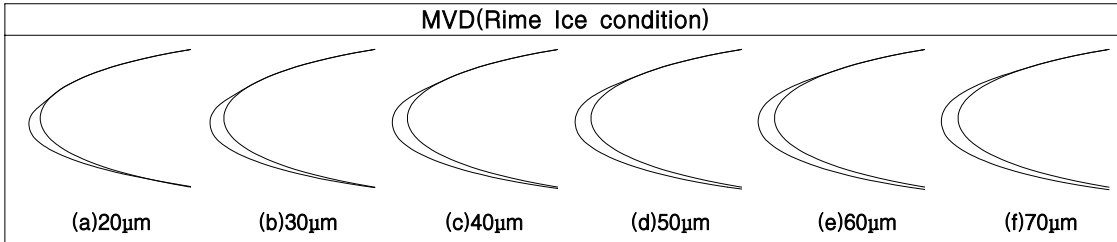


Fig. 25. Ice shapes in rime condition with varying MVD

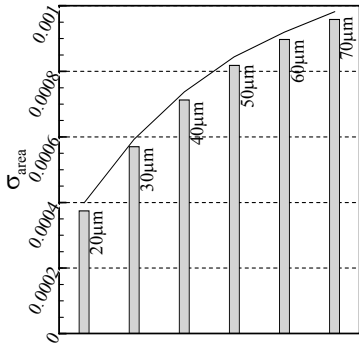


Fig. 26. Ice accumulated area

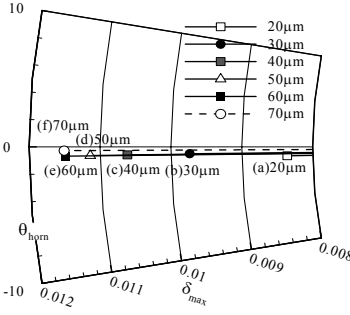


Fig. 27. Ice heading direction and max. thickness

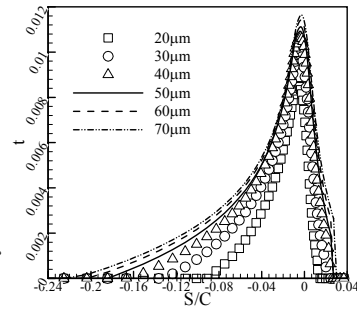


Fig. 28. Thickness of ice along airfoil surface

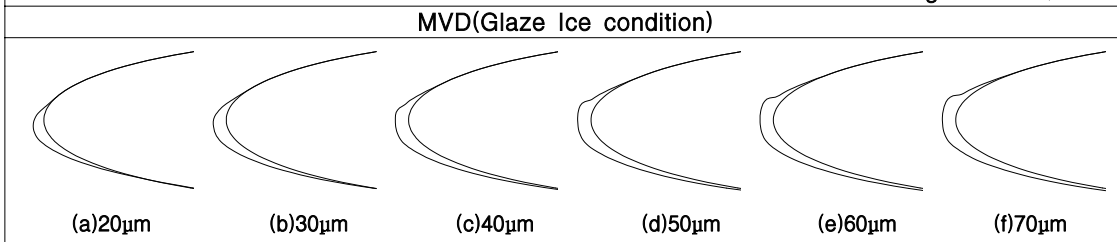


Fig. 29. Ice shapes in glaze condition with varying MVD

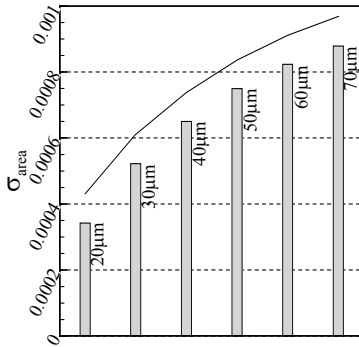


Fig. 30. Ice accumulated area

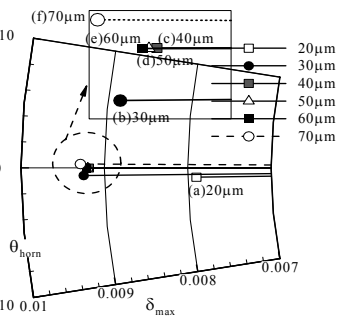


Fig. 31. Ice heading direction and max. thickness

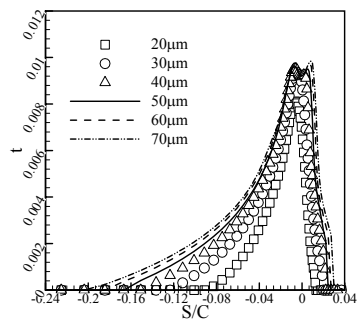


Fig. 32. Thickness of ice along airfoil surface

의 경우 33m/s에서 129m/s로 증가하면 윗면은 76.4%, 아랫면은 124% 증가한다. 이는 자유류 속도의 변화가 입자에 작용하는 항력에 영향을 주어 충돌한계가 바뀐 결과이다.

○Glaze ice conditions

Fig. 21은 유리얼음이 발생하는 -10°C에서 속도에 따른 결빙형상을 나타낸 그림이다. 속도가 증가할 경우 유입되는 수증기량이 증가하고 운동

에너지가 증가하여 Fig. 21 (f), (g)와 같이 얼음 뿔이 성장하는 형상을 갖는다.

자유류 속도의 변화는 Fig. 22와 같이 결빙면적을 증가시킨다. 온도가 낮은 유리얼음 조건에서 발생한 얼음 뿔은 수증기 입자와 충돌하는 전면 면적을 증가시켜 유입되는 면적을 크게 증가시킨다. Fig. 22와 Fig. 18의 129m/s 조건에서 온도가 낮은 조건의 결빙 면적이 19%증가 하였다. 또한 자유류 속도가 33m/s와 129m/s로 증가한 경우 면적이 11.6배 증가하였다. Fig. 23의 얼음의 최대 두께와 진행 방향을 살펴보면 얼음의 진행방향은 6.6°로 증가하고 최대 두께는 6.64배 증가하였다. Fig. 24의 표면에서 얼음의 두께도 날개 표면의 전 구간에서 증식한 것을 확인 할 수 있다.

유리 얼음 조건에서 자유류 속도는 결빙 형상에 영향을 주는 외기 조건 중에서 가장 큰 변화를 주는 요인이다. 얼음의 진행 방향, 면적, 최대 두께를 모두 변화시켜 형상의 변형이 가장 크게 발생하였다.

자유류 속도가 증가하여 유동 조건이 더 이상 비압축성으로 가정할 수 없는 영역이 될 경우 패널 기법을 적용한 현재 해석코드로는 해석에 어려움이 발생한다. 압축성 효과로 정체점에서 온도가 상승하여 Runback이 발생하는 비율이 증가하여 결빙비가 떨어진다. 따라서 현재 조건보다 증가한 자유류 속도 영역에서는 압축성 효과 고려할 수 있는 모델이 필요하다.

2.2.5 MVD(Mean Volumetric Droplet Diameter)

○Rime ice conditions

Fig. 25는 -20°C 서리얼음으로 결빙하는 대기 온도 조건에서 입자의 반지름을 각각 20, 30, 40, 50, 60, 70 μ m로 변화시켜 얻은 결빙형상을 나타낸 그림이다. 입자가 증가하면 항력의 영향으로 입자가 그리는 유적선(Path line)이 보다 직선에 가까운 형태를 가진다. 그로 인해 얼음의 분포가 익형의 전면에 넓게 나타난다. 또한 초기 입자간 간격과 충돌 시 입자간 간격의 비인 부착률에 영향을 주어 유입되는 수증기량이 증가하게 된다. Fig. 26과 같이 얼음의 면적이 증가하고 입자의 크기가 작은 영역에서 얼음 면적의 증가 폭이 커진다. 예를 들어 20 μ m에서 40 μ m로 증가한 경우 결빙 면적은 90.4%가 증가한다. 그러나 50 μ m에서 70 μ m로 증가한 경우 17%의 결빙 면적 증가를 나타내었다.

Fig. 27의 최대두께와 결빙 방향을 나타낸 그림에서도 입자의 크기가 작은 구간이 최대 두께의 변화폭이 작은 것을 알 수 있다.

Fig. 28의 결빙 분포를 살펴보면 서리얼음 조건에서 입자의 크기가 증가할수록 윗면과 아랫면 모두 결빙의 분포가 넓게 나타났다. 20 μ m에서 70 μ m로 증가한 경우 윗면에서 114%증가하고 아랫면에서 103%증가한 얼음의 분포 범위를 나타내었다. 최대 두께도 증가하나 변화 폭이 작게 나타났다. 결빙 분포의 변화는 Runback의 영향이 아닌 수증기 입자가 부착되는 위치에 기인한 것으로 최대 두께의 변화는 미미하였다.

○Glaze ice conditions

Fig. 29는 -5°C 유리얼음으로 결빙하는 대기 온도 조건에서 입자의 반지름을 각각 20, 30, 40, 50, 60, 70 μ m로 변화시켜 얻은 결빙형상을 나타낸 그림이다. 앞의 조건과 같이 입자의 궤적에 의해 결빙하는 형상이 달라진다. Fig. 30의 결빙 면적을 살펴보면 서리얼음의 Fig. 26과 비교할 때, 10%이내의 증가를 보여 입자 크기의 변화는 서리얼음과 유리얼음의 결빙 양에 큰 차이를 나타내지 않는다. 입자의 크기변화가 Fig. 31과 같이 유리얼음 조건에서 보다 위로 결빙하도록 한다. 그러나 그 차이가 미미하여 Fig. 29와 같이 나타난 형상은 정량적 분석을 통해 확인 가능한 차이를 만들었다. Fig. 32에서 결빙의 분포가 넓게 나타나 얼음 면적을 증가시켰다. 그러나 최대 두께와 얼음의 진행 방향은 큰 변화가 없어 형상의 변화를 정량적 분석을 통해 판단할 수 있다.

수증기 입자의 크기 변화는 표면에 충돌하는 입자의 부착 위치를 변화시켜 결빙 형상에 영향을 주었다. 그러나 표면에 유입되는 양을 크게 변화시키지 않아 최대 두께와 진행방향이 유지되어 형상의 변화가 크지 않았다. 결빙 형상을 변화시키는 외기 조건 중에서 변화의 영향이 가장 작게 나타났다.

보다 정밀한 결빙 형상을 획득하기 위해서 실제 결빙 환경은 다양한 입자 분포를 가지기 때문에 이를 고려할 수 있는 모델이 필요하다. 또한 SLD와 같이 큰 입자에 의한 효과를 고려할 수 있는 모델의 적용이 필요하다[13-14].

III. 결 론

개발된 코드를 이용하여 착빙조건의 변화에 의해 2차원 날개에 결빙하는 얼음의 형상을 획득하였다. 결빙 형상에 영향을 주는 외기조건을 LWC, MVD, 자유류 속도, 대기온도로 선정하고 각각 서리얼음과 유리얼음이 형성되도록 구성하였다. 구성된 조건에 의해 획득한 결빙형상을 정량적으로 분석하기 위한 기준을 설정하였고 정

량적 분석의 기준을 얼음의 최대 두께, 얼음의 진행 방향, 얼음 면적, 표면에서의 얼음 두께로 선정하였다. 착빙 조건이 결빙 형상에 미치는 영향을 정량적으로 분석한 결과 다음과 같은 내용을 확인하였다.

1) 자유류 속도 : LWC, MVD, 대기온도, 자유류 속도 중에서 결빙 형상을 가장 크게 변화시키는 요인은 자유류 속도로 자유류 속도의 증가는 결빙 면적, 얼음의 진행 방향, 결빙 분포를 모두 증가시켰다. 자유류 속도는 표면으로 유입되는 수증기의 양, 표면에 유입되는 에너지, 입자의 부착 위치에 영향을 주는 요인으로 유리얼음이 발생하는 조건에서 33m/s에서 129m/s로 자유류 속도가 증가할 경우 얼음의 진행방향은 6.6°, 얼음의 최대 두께는 6배, 결빙 면적은 11배 증가하였다.

2) LWC : 대기 중에 존재하는 수증기의 함유량이 증가함에 따라 표면에 유입되는 수증기량이 증가한다. 그 결과 수증기 함유량의 증가는 결빙 면적의 증가로 이어졌다. 이때 수증기 함유량과 결빙면적은 선형으로 비례하는 관계에 있으며 대기 온도가 낮은 서리얼음 조건에서 선형성이 강하게 나타났다.

3) 대기 온도 : 대기 온도는 결빙형상에 영향을 미치는 요소이나 대기온도의 변화가 결빙 면적에 큰 영향을 미치지 않았다. 대기온도가 증가할수록 얼음의 최대두께가 감소하고 얼음의 방향이 위를 향하는 경향을 보였다. 대기온도의 증가는 결빙비를 떨어뜨려 Runback을 형성하였다. 형성된 Runbak 만큼 최대두께가 감소하고 표면을 따라 흐르던 Runback이 익형의 뒷면에서 결빙하여 방향을 위로 향하도록 하였다.

4) MVD : 수증기 입자의 크기 변화는 결빙 형상을 변화시킨다. 입자 크기의 변화는 입자의 항력에 영향을 주어 충돌 위치, 얼음의 분포 범위, 결빙 형상에 영향을 미친다. 그러나 결빙 형상을 변화시키는 외기 조건 중에서 영향이 가장 작게 나타났다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1) 반기성, "겨울철 항공기 안전에 영향을 주는 착빙(icing)", 항공진흥 통권 제40호, 2005, pp. 158~174.

2) Kind R. J., Potapczuk M. G., Golia F. C., Shah A. D., "Experimental and Computational Simulation of In-flight Icing Phenomena", *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 34, No. 5-6, pp. 527~345.

3) Gent, R. W., Dart, N. P., Cansdale, J. T., "Aircraft Icing", *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, Vol. 358, No. 1778, pp. 2873~2911.

4) Fedral Avation Administration, "FAA Inflight Aircraft Icing Plane", U.S. Department of Transportation, Washington D.C., April 1997.

5) 정성기, 이창훈, 신성민, 명노신, 조태환, 정훈화, 정재홍, "KC-100 항공기의 표면발생 Icing 형상 및 공력 영향성 연구", *한국항공우주학회지*, 제38권, 제6호, 2006, pp. 519~628.

6) 신훈범, 정인면, 정주현, 최태훈, "결빙강도 예측을 위한 수치방법 연구", *한국항공우주학회 춘계학술발표회 논문집*, April, 2008, pp. 553~557.

7) Sogin, H. H., "A Design Manual For Thermal Anit-Icing Systems", *Wright Air Deveoopment Center*, 616,AF33616444, December, 1954.

8) 백선우, 이관중, 오세종, "2차원 날개의 서리얼음 형상 예측", *한국전산유체공학회지*, 제14권, 제1호, 2009, pp. 45~52.

9) 손찬규, 오세종, 이관중, "2차원 에어포일의 유리얼음 형상 예측 코드 개발", *한국항공우주학회지*, 제38권, 제8호, 2010, pp. 747~757.

10) Wright W. B., "Users Manual for the Improved NASA Lewis Ice Accretion Code LEWICE 1.6", NASA/CR-198355, June, 1995.

11) Gary A. R., Brian M. B., "Users Manual for the NASA Lewis Ice Accretion Prediction Code (LEWICE)", NASA/CR-185129, May, 1990.

12) Messinger, B. L., "Equilibrium Temperature of an Unheated Icing Surface as Function of Airspeed", *Journal of the Aeronautical Sciences*, Vol. 20, No. 1, 1953, pp. 29~42.

13) Dean, M., Thomas, R., Ben, B., Frank, M., Walter, J., S., "NASA/FAA/NCAR Supercooled Large Droplet Icing Flight Research: Summary of Winter 96-97 Flight Operations", NASA/TM-1998-206620, January, 1998.

14) Wright W. B., "Further Refinement of the LEWICE SLD Model", NASA/CR-2006-214132, May, 2006.