

Icing의 특성 및 형성과정

윤 병 만 (명지대학교 토목환경공학과 교수)

1. 개 요

Icing이란 호수나 바다에서 바람에 의해 생성된 물보라(spray) 또는 공기중에 있는 습기가 물체에 얼어 붙는 현상을 일컫는 말이다. Icing이란 용어가 국내에서는 아직 생소하고, 또 적절히 번역하기도 마땅치 않아 여기서는 그냥 원어로 표기하기로 하겠다.

추운 지방에서는 이 icing 현상으로 인해 구조물, 선박, 비행기 등이 종종 피해를 입기 때문에 이들 피해를 줄이기 위해 공학자들이 icing에 관심을 기울이고 있다. Icing은 습기의 공급원에 따라 atmospheric type과 spray type으로 나눌 수 있다. Spray icing은 호수나 바다에서 파도가 깨지면서 발생하는 물보라에 의하여 형성되며 주로 선박이나 해안구조물에 피해를 주고 atmospheric icing은 대기중의 작은 물방울 또는 freezing rain 등이 물체에 얼어붙어서 형성되며 주로 육상구조물과 비행기에 피해를 입히고 있다. 여기서는 대기중의 습기로 인해 형성되는 atmospheric icing을 중점적으로 소개하기로 하겠다.

추운 지방에서는 철탑과 전선에 icing의 발생으로 하중이 증가하여 전선이 끊어지거나 철탑이 붕괴되는 사고가 종종 발생한다. 이는 icing의 무게로 인한 사하중의 증가도 물론 원인이 되지만 icing의 형성으로 인한 풍하중의 증가도 큰 몫을 하고 있다. Atmospheric icing이 항공기의 운항에 영향을 준다는 사실은 1982년 Washington D.C에서 여객기가 Potomac 강에 추락한 사건이후 널리 알려지기 시작하였다. 항공기의 경우에는 icing의 형성으로 항공기의 무게가 증가하는 것보다는 icing의 형성으로 인한 항력의 증가 및 양력

의 감소 등이 더 큰 문제를 발생시키게 된다. 이밖에도 atmospheric icing은 헬리콥터나 우주선에서도 공학적인 문제를 야기시키고 있다.

2. Atmospheric icing의 특성

Atmospheric icing은 그 생성과정과 특성에 따라 dry rime, wet rime 그리고 glaze icing으로 구분할 수 있다. Dry rime icing은 공기중의 과냉각된(supercooled) 작은 물방울이 물체의 표면에 닿자마자 얼어붙을 때 형성된다. 물방울이 물체표면과 접촉 후 금방 얼지 않고 어느 정도 흘러간 후에 얼게되면 wet rime icing이 생성되게 된다. 또 물체표면에 도달한 물방울이 표면에 좀더 오래동안 얼지 않고 머물며 표면에 얇고 연속적인 막을 형성한 후에 결빙이 될 때 glaze icing이 생성된다. Glaze icing은 glare icing 또는 black icing이라 부르기도 한다.

Dry rime icing은 물체에 닿자마자 얼어붙기 때문에 비교적 많은 양의 공기를 함유하고 있다. 따라서 dry rime icing은 순수한 얼음($\rho = 0.91 \text{ g/cm}^3$)보다 가벼우며 ($\rho = 0.01 \sim 0.08 \text{ g/cm}^3$) 흰색을 띠게 된다. Wet rime icing은 dry rime icing에 비해 적은 양의 공기를 포함하게 되므로 밀도가 0.1에서 0.6 g/cm^3 로 dry rime보다 크며 우유빛을 띠게 된다. Glaze icing은 얼기 전에 물체의 표면에 막을 형성하여 흐르므로 공기를 거의 포함하지 않게 되어 그 특성이 순수한 얼음과 같다.

그림1은 표면조도(surface roughness)의 관점에서 rime icing과 glaze icing을 비교한 그림이다.

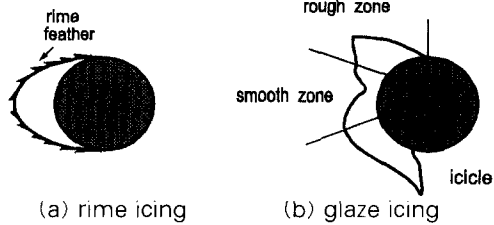


그림 1. 전형적인 icing의 형태

Rime icing은 표면조도가 비교적 작으며 전 표면에 걸쳐 일정하다. 반면에 glaze icing의 표면은 조도가 일정치 않고 거친 정도에 따라 두 부분으로 구별된다. 흐름의 정체선(stagnation line) 근처에는 매끄러운 영역(smooth zone)이 형성되고 매끄러운 영역밖으로 거친영역(rough zone)이 형성되어 있다. 이 거친 영역의 조도는 표면에 수집된 물방울의 표면장력에 의한 영향이라 알려져 있다.

3. Icing 형성과정

이 절에서는 rime icing과 glaze icing의 형성과정을 원형실린더 표면에 형성되는 icing을 예로 들어 설명하기로 하였다. Rime icing과 glaze icing의 형성단계별 모식도는 각각 그림2 및 그림3과 같다.

먼저 rime icing의 경우를 살펴 보면, 초기단계에서는 공기중의 작은 물방울이 실린더 표면에 도달하기 전에 이미 부분적으로 얼어 있기 때문에 표면에 닿자마자 얼어붙어서 실린더 표면에 얼어붙은 물입자의

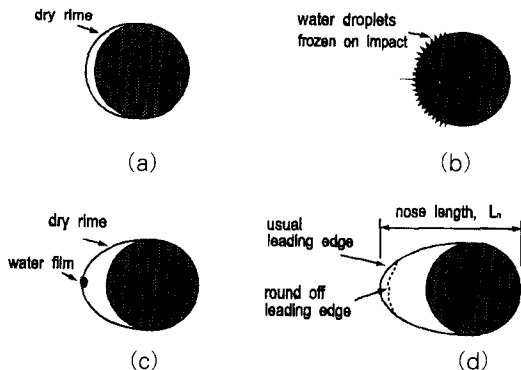


그림 2. Rime icing의 형태

형상을 볼 수 있다(그림2.a). 공기중의 물방울은 계속 표면에 접촉과 동시에 얼어붙어 실린더의 앞쪽 표면을 덮게된다(그림2.b). 이때까지의 icing은 모두 dry rime icing에 속한다. 그러나 이후로는 정체선 근처에 도달한 수분이 금방 얼지 않고 어느 정도 시간이 흐른 뒤에 얼게되어 이 부분에서는 wet rime icing이 형성되기 시작한다(그림2.c). 이 부분 밖에서는 계속 dry rime icing이 형성되며 소위 'rime-feather' 형상이 발달하게 된다. 그림2.d는 원형실린더에 형성되는 전형적인 rime icing의 형상이다. 일반적으로 rime icing의 leading edge는 뾰족한 모양을 갖게되나 정체선 부근에서 열전달이 충분치 않거나 공기중의 수분함량이 많게되면 정체선 부근에서 wet rime icing이 형성되어 뾰족한 leading edge가 형성되는 수도 있다.

Glaze icing의 경우, 초기단계(그림3.a)에서 실린더에 도달한 작은 물방울들이 서로 합쳐져서 정체선 부근에 연속적인 얇은 막을 형성한다. 이 얇은 막은 실린더 주변으로 퍼지면서 더 얇아져서 정체선 부근에 매끄러운 얼음을 형성하게 된다(그림3.b). 그러나 정체선에서 멀어지면 연속적인 막을 형성하기가 어려워져 실린더 표면에 거칠게 얼어붙거나 또는 중력이나 공기항력이 표면장력을 초과할 경우 다시 실린더 표면에서 떨어져 나가게 된다. 또 실린더 밑부분으로 흘러간 물방울은 중력의 영향으로 실린더에 매달려 있는 형태로 얼어붙기도 한다. 그림3.b의 매끄러운 부분에서 흘러온 물방울들이 거친 부분에 도달하면 더 이상 흘러가지 않고 그 자리에 머물면서 얼어붙거나 또는 표면에서 떨어져 공기중으로 돌아가게 된다. 이러한 현상의 영향으로 거친 부분이 점점 증가하여 거친 부분과 매끄러운 부분의 경계가 점차로 정체선 쪽으로 이동하게 되며 실린더 밑부분에서는 고드름(icicle)이 발달하기 시작한다(그림3.c). 그림3.d는 완전히 발달된 glaze icing의 전형적인 모습을 보여주고 있다. 이 단계에서는 양쪽에서 발달되어온 거친 부분이 거의 서로 마주치게 되며 그 사이에 골이 형성된다. 고드름은 급속히 거처서 매우 복잡한 형상을 띄게 된다.

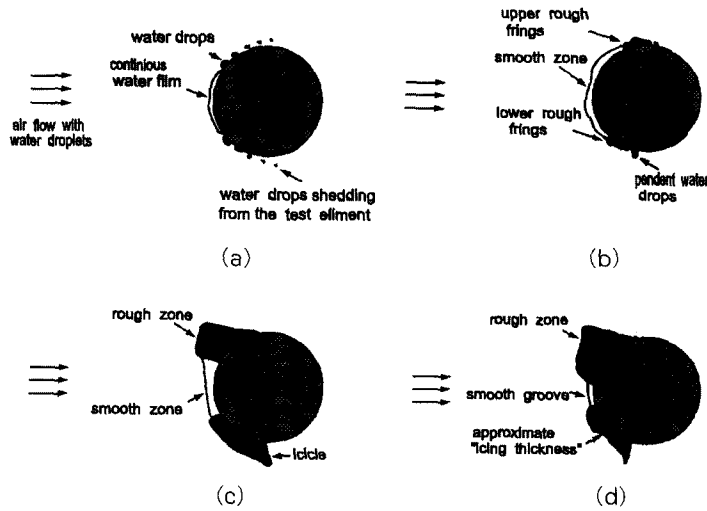


그림 3 Glaze icing의 형성단계

4. Icing 모형

Icing은 두가지 과정을 거쳐 형성된다. 즉, 공기중의 물방울이 물체표면까지 운반되는 질량전달(mass transfer)과정과 표면에 도달된 물방울이 어는 열전달(heat transfer)과정이다.

공기중의 작은 물방울은 물체의 표면에 도달하여 금방 얼어붙거나 어느 정도 표면을 따라 흐른 뒤에 얼어붙거나 또는 표면을 흐르다 다시 표면에서 떨어져 나가거나 한다. 이러한 현상은 기온, 풍속, 공기의 수분함량, 물방울의 입경분포, icing이 형성되는 물체의 모양과 표면조도, 공기와 물체표면간의 열전달 특성 등에 의해 지배를 받는다. 이러한 요소를 고려하여 단위 투영면적(unit frontal area)에 단위시간당 얼어붙는 icing의 양(I)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = n E V w$$

여기서,

c = 단위투영면적에 단위시간당 형성되는 양

n = 결빙율(freezing fraction) 즉, 표면에 도달하는 수분중 표면에 얼어붙는 양의 비율

E = 수집율 (collection efficiency) 즉, 공기흐름이 물체주변에서 굴절되지 않았을 경우에 표면에 도달되는 수분양에 대한 실제 도달되는 수분양의 비

V = 풍속

w = 공기중의 수분함량

위의 변수들 중 수집율 E 는 물체주변에서 물방울의 궤적에 영향을 받으며 결빙율 n 은 물체표면에서의 열전달 과정에 지배를 받는다.

5. 결 언

본 고에서는 우리나라에서는 아직 생소한 icing의 특성과 형성과정을 간단히 알아보았다.

우리나라에서는 icing에 의한 피해가 전혀 없다고 생각하는 사람이 많으나 피해의 원인이 icing에 의한 것으로 파악되지 않았거나 보고되지 않아서 그렇지 사실은 icing에 의한 피해가 발생하는 것으로 알고 있다. 특히 북한 지역에서는 그 피해가 더욱 심하리라 여겨진다.

우리 기술진의 극한지 진출과 통일을 대비하여 이제는 icing과 같은 극한지에서 발생하는 문제에도 관심을 기울일 때가 되지 않았나 하는 생각이다. ●