

기말고사 대체 보고서			
학과	학번	이름	점수
화학과	2023160236	정원준	

<제 목 차 례>

1. 극지방의 빙하와 지구 온난화와의 관계를 설명하시오.	3
• 지구의 반사율(알베도)와 지구의 평형 온도 사이의 관계	3
• 빙하와 지구의 알베도 사이의 관계(대기 복사학)	4
• 르샤틀리에 원리를 이용한 양성피드백 예측	5
• 양성 피드백에 대한 과학적인 근거	6
• “ 빙하의 역설 ” : 빙하의 융해와 온난화 사이의 음성 피드백	7
• 결론	8
2. 잠수병을 정의하고 잠수병이 생기는 원인과 원리를 설명하시오.	9
• 잠수병의 정의와 증상	9
• 잠수병에 대한 직관적 접근 - Henry의 법칙	9
• 잠수병 - 생화학적 관점	10
• 잠수병의 해결	11
• 결론	12
3. 모발 중 암페타민 유도체의 정량분석을 하려고 한다. 어떠한 방법으로 실험을 하면 되는지 실험을 구상해 보시오.	13
• 서론	13
• GC/MS의 원리	13
• 실험 방법	18
• Chromatography-MS의 선행 연구 결과 분석(Kim et al., 2009)	18
• 항원-항체 반응과 키트에서의 응용	20

• 항원-항체 반응을 이용한 암페타민 정량분석 방법	21
4. 에어컨 작동 원리를 설명하시오.	22
• 에어컨이란 - 에어컨의 개관	22
• 에어컨의 구조	22
• 냉방 사이클과 열역학 법칙	23
• 냉매 조건	25
• 증기압축식 냉동 사이클에서 할로젠화 탄소(할로카본)의 냉매로서의 적합성에 대한 고찰	26
• 결론	27
5. 실험에 사용한 에탄올 병에 표시되어있는 NFPA 위험물 분류법을 설명하시오. 28	
• NFPA 위험물 분류법	28
참고 자료 및 출처(References)	31

1. 극지방의 빙하와 지구 온난화와의 관계를 설명하시오.

• 지구의 반사율(알베도)와 지구의 평형 온도 사이의 관계

* 이상적인 모델에 대한 유도는 Seo et al.(2010)의 방법을 참고하였다.

지구는 이상적인 흡수-방출체가 아니다. 따라서 지구는 태양에서 들어온 빛 중 일부만 흡수하게 된다. 이때 지구과학에서 입사된 복사 에너지 중 반사된 복사 에너지의 비율을 알베도(Albedo)라고 하며, α 로 표현한다. 이때 지구에서 알베도(α)는 약 30% 정도인 것으로 알려져 있다.

또한 지구는 복사 평형 상태에 있으므로, 태양으로부터 1AU 떨어진 지점의 단위 원에 전달되는 태양 복사 에너지인 태양 상수(S_0)를 이용하면 지구의 평형 온도를 구할 수 있다. 우선, 태양광에 대해 지구를 정사영시키면 주사되는 단면의 넓이는 지구의 단면의 넓이와 같다. 지구를 구로 근사하고 그 반지름을 $r_{지구}$ 라 하면 이는 $\pi r_{지구}^2$ 으로 표현할 수 있다. 따라서 지구의 한쪽 반구면에 입사하는 태양 복사 에너지는 (식 1)과 같다.

$$E_{지구, 흡수} = \pi r_{지구}^2 (1 - \alpha) S_0 \quad (r_{지구} : \text{지구의 반지름}, \alpha : \text{지구의 알베도}, S_0 : \text{태양 상수}) \quad (\text{식 1})$$

이때 슈테판-볼츠만 법칙에 의해 반지름이 r 이고 온도가 T 인 구형의 복사원에서 방출되는 복사 에너지는 (식 2)와 같이 기술된다¹⁾.

$$E = 4\pi r^2 T^4 \quad (\text{식 2})$$

복사원을 지구로 바꾸면 앞서 정의한 물리량을 이용해서 (식 3)과 같이 바꿀 수 있다.

$$E_{지구, 방출} = 4\pi r_{지구}^2 \sigma T_{지구}^4 \quad (T_{지구} : \text{지구의 온도}, \sigma : \text{슈테판-볼츠만 상수}) \quad (\text{식 3})$$

이때 지구가 흡수하는 복사 에너지와 방출하는 복사 에너지의 양은 동일하며, 이를 복사 평형 (radiation equilibrium)이라고 한다. 따라서 (식 1)과 (식 3)의 양변은 서로 동일해야 한다. 고로 두 식을 연립하면 (식 4)를 얻을 수 있다.

$$E_{지구, 흡수} = E_{지구, 방출} \Rightarrow \pi r_{지구}^2 (1 - \alpha) S_0 = 4\pi r_{지구}^2 \sigma T_{지구}^4 \quad (\text{식 4})$$

(식 4)를 정리하면 지구의 평형 온도 $T_{지구}$ 에 대한 물리량들의 관계를 (식 5)로 얻을 수 있다.

$$T_{지구} = \left(\frac{S_0 (1 - \alpha)}{4\sigma} \right)^{1/4} \quad (\text{식 5})$$

이때 σ , S_0 는 물리학적 상수이므로 $T_{지구} = C \times (1 - \alpha)^{1/4}$ 의 형태로 식을 변형할 수 있다. 고로 지구의 평형 온도의 성질은 $(1 - \alpha)^{1/4}$ 를 따른다. 이를 그래프로 도시하면 [Figure 1]과 같다.

1) 복사의 형태로 방출되는 에너지라는 의미에는 변화가 없지만, 천문학에서는 이를 별의 광도로 활용하기도 한다. 따라서 지구과학에서 이를 복사 에너지에 대한 notation인 E가 아니라 Luminosity의 앞 글자를 따서 L로 표현하기도 한다.

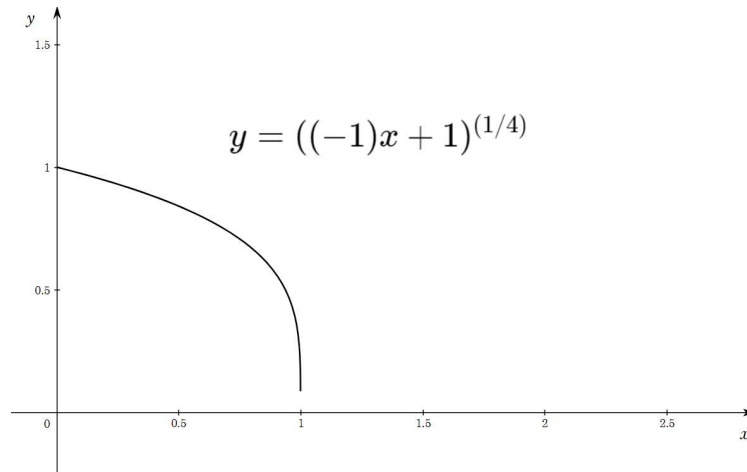


Fig.1 Graph of function $y = (1 - x)^{1/4}$ where domain is restricted within $0 \leq x \leq 1$

따라서 지구의 알베도가 증가할수록 지구의 평형 온도 $T_{지구}$ 는 감소하며, 알베도가 1(이상적인 반사체)에 도달한 경우에는 $T_{지구} = C \times 0$ 이므로 0K에 도달하게 된다. 이는 지구가 어떤 복사 에너지조차 흡수할 수 없으면 온도가 극심히 감소할 것이라는 직관적인 결론과 일치한다.

이때 Seo et al.(2010)은 태양광의 입사 방향과 위도를 고려하여 추가적인 보정을 시행했다. Fig.2에 제시된 것처럼 이 경우 지구의 평형 온도는 극지방의 알베도와 중위도 지방의 알베도에 따라 변동이 나타났으며, 중위도 지방의 알베도 또한 지구의 평형 온도에 복합적인 영향을 줌이 밝혀졌다. 하지만 알베도가 감소하는 경향성에서 지구의 평균 온도가 증가한다는 사실에는 변함이 없다.

	Polar		Polar and mid-latitude	
	Increase α	Decrease α	Increase α (polar), Decrease α (mid-latitude)	Decrease α (polar), Increase α (mid-latitude)
Mean	15.2781			
5%	15.1501	15.4313	15.6391	14.9249
10%	15.0414	15.6904	16.0303	14.5572
15%	14.9238	15.9746	16.4048	14.2459

Fig.2 Global mean temperature associated with the change of albedo(α) experiments

• 빙하와 지구의 알베도 사이의 관계(대기 복사학)

빙하와 지구의 알베도를 규명하기 위해서는 빙하에서 물은 3가지의 알베도 속성을 가짐을 확인해야 한다. 우선, 빙하 표면에 물이 눈(snow)의 형태로 존재할 수 있다. 또한, 빙하와 같이 물이 단순히 얼어붙은 상태(ice)로 존재할 수 있다. 마지막으로, 빙하가 녹아 만들어진 완전한 액체 상태의 물로 존재할 수 있다. Henneman과 Stefan(1997)은 실험을 통해 민물 호수에서 눈과 얼음의 알베도를 각각 0.83 ± 0.028 , 0.38 ± 0.0333 으로 밝혀냈다. 또한 Wikipedia(n.d.)에

따르면 바다(액체)의 알베도는 0.06, 해수의 결빙으로 만들어진 얼음의 알베도는 0.50~0.70인 것으로 나타났다.

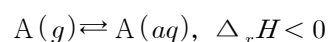
빙하가 녹는 것은 빙하에서 얼음과 눈이 모두 녹아 액체 상태가 되는 것을 의미한다. 이때 알베도는 0.8, 0.5~0.7에서 0.06으로 변화하므로 알베도가 매우 감소하게 된다. 따라서 앞서 제시한 Fig.1의 그래프에 의하면 선택된 영역에 대해 이상적인 구형의, 균질한 지구를 가정했을 때 계수를 제외한 여분의 인자는 1까지 폭증하게 된다. Seo et al.(2010)의 모델을 가정할 경우에도 Fig.2에서 polar의 α 가 감소하면 평형 온도는 증가하는 것으로 규명됐으므로 동일한 결론으로 합일한다.

요약하자면, (대기) 복사학의 관점에서 빙하가 녹으면 해당 지역에 대한, 그리고 지구 전체에 대한 알베도의 유의미한 감소가 일어나므로 평형 온도는 증가하는 경향을 갖는다.

• 르샤틀리에 원리를 이용한 양성피드백 예측

앞서 복사학에 대한 연구에서는 지구를 균질한 하나의 구로 간주했으나, 실제 지구는 복잡한 시스템으로 빙하가 녹는 현상과 지구 온난화를 단순히 복사 평형의 입장으로 귀결시키기에는 어려움이 있다. 이는 지구의 입장에서 상호작용을 배제하고, 표면만 간주한 것이기 때문이다. 따라서 빙하가 녹는 현상과 지구 온난화를 결부시키려면, 온도가 올라가면 빙하가 녹는다는 대전제 하에 빙하가 녹아서 발생하는 지구과학적 현상 X가 오히려 지구의 온도를 더 올린다는 양성 피드백(positive feedback)의 구조를 얻어야 한다.

우선, 온실 기체의 용해도를 대표적인 사례로 제시할 수 있다. 기체의 용해 과정은 대개 발열 반응이며, 다음과 같은 용해 평형의 구조를 얻는다.



이때 기체의 수용액에 대한 용해 과정이 발열 반응인 것은 분자 수준의 관점에서 살펴볼 수 있다. 용해 과정에는 분자간 인력이 중요하게 작용하며, 기체가 물 속으로 확산되면 분자의 극성 region을 물이 공격한다. 고로 기체 분자는 물 속에서 여러 분자들에 의해 둘러싸인 분자단의 형태를 갖게 되며, 이때 인력에 의해 에너지는 안정화된다. 고로 용해 과정의 반응 후 에너지가 반응 전 에너지보다 낮으므로 엔탈피 $\Delta_r H$ 는 음수이다.

이때 용액의 온도가 증가하면 역반응이 증가하는 이유는 르샤틀리에로 설명할 수 있다. 계의 입장에서 온도가 증가하면 반응은 계의 온도를 낮추는 방향으로 진행된다. 따라서 발열 반응과 흡열 반응 중 흡열 반응이 더 높은 자발성을 갖는다. 이때 흡열 반응인 것은 용해 과정의 역과정이므로 도리어 물에 녹아 있던 기체가 다시 공기 중으로 배출된다.

이때 방출되는 기체가 CO₂, CH₄ 등의 온실 기체라면 지구 온난화가 가속될 것이라는 사실을 직관적으로 이해할 수 있다. 그렇다면 대기 중 온실 기체의 분압이 증가하면 온실 효과가 증가하여 다시 빙하의 용해가 가속된다. 따라서 일련의 과정은 양성 피드백의 형태를 갖는다고 추정할 수 있다.

- 양성 피드백에 대한 과학적인 근거

상술한 내용은 기초화학적인 예상이기애 이에 수반되는 관측적 근거가 필요하다. 구체적으로 위의 가설이 참이라면 지구의 온도가 증가함에 따라 빙하 비율의 감소가 가속되는 현상이 나타날 것이다. Trusel et al.(2018)은 Greenland의 관측 자료를 이용하여 지구 온난화 경향성에 따른 빙하의 면적(비율) 변화를 탐구하였으며, 그 결과는 Fig.3, Fig.4와 같다.

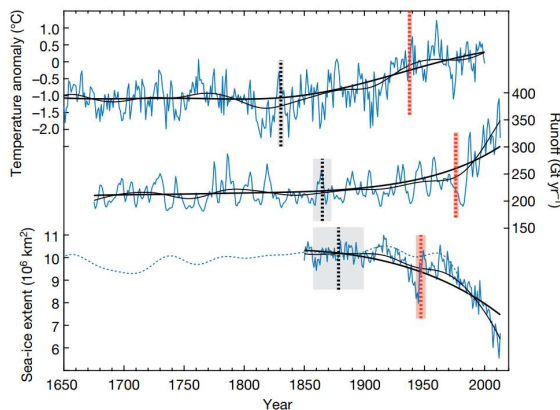


Fig.3 Sea-ice extent by temperature anomaly

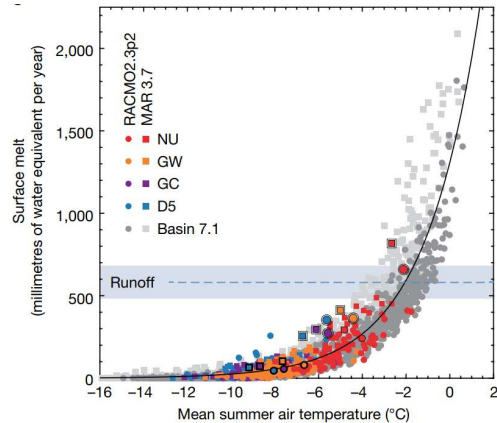


Fig.4 Correlation between summer air temperature and melting of glacier surface

Fig 3에서 temperature의 anomaly 값이 지속적으로 증가함에 따라 sea-ice extent는 지속적으로 감소하며, 그 추세에 주목하면 최고차항의 계수가 음수인 이차함수와 유사하게 감폭이 지속적으로 증가함을 확인할 수 있다. 일련의 결론은 Fig 4에도 유효하게 적용된다. Greenland의 여러 observation point의 데이터를 취합한 전체적인 경향성은 빙하의 융해 현상이 Greenland의 평균 여름 기온이 높아짐에 따라 가속됨이 뚜렷하게 나타나며, 구체적인 관측 (코어) 지점은 Fig 5에 명시하였다. 따라서 Trusel et al.은 Greenland에서 일어나는 일련의 반응들이 지구 온난화²⁾에 대해 단순히 선형적으로 비례하는 것이 아닌 비선형적(이차함수적 증가) 개연성을 갖는다는 사실에 주목하였다.

2) 원문에서는 Arctic warming이라는 표현을 사용하며 지구 온난화 현상으로 인한 Greenland의 변화에만 초점을 두었다. 하지만 많은 선행 연구에서 arctic warming과 global warming 사이에는 비례하는 상관관계가 있음을 밝혔으며 해당 논문에서도 일련의 논리 구조를 차용하여 결론을 전개하고 있으므로 arctic warming과 global warming을 명확하게 구분하지는 않았다.

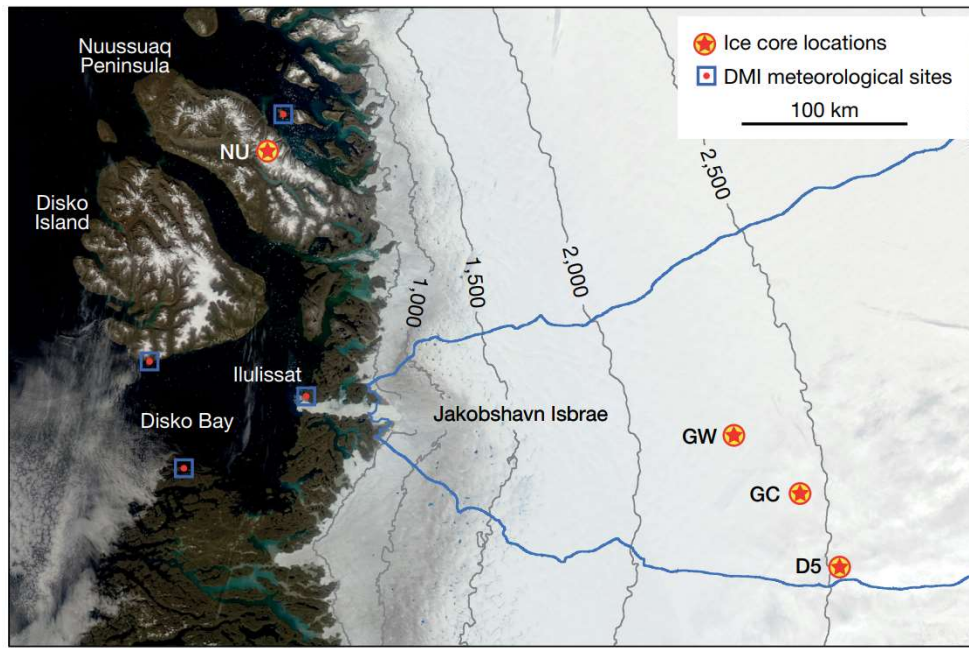


Fig.5 Locations of observation (of ice core) in Greenland

• “ 빙하의 역설 ” : 빙하의 융해와 온난화 사이의 음성 피드백

거시적인 관점에서 범지구적인 빙하의 융해는 지구 온난화를 가속시키지만 동시에 국부적인 융해는 빙하의 융해를 억제하는 역할을 갖는다. Yoon et al.(2022)는 Pine Island Glacier에 대한 관측 자료를 기반으로 해수의 열이 빙하에 전달되어 그 융해가 가속되지만 빙하가 융해됨에 따라 특별한 와류와 조류를 만들어 해수의 열전달을 억제한다고 시사했다. 따라서 일련의 과정으로 수괴들 간의 열의 재분배가 일어나며, 이는 국부적으로 빙하의 융해를 억제하게 된다.

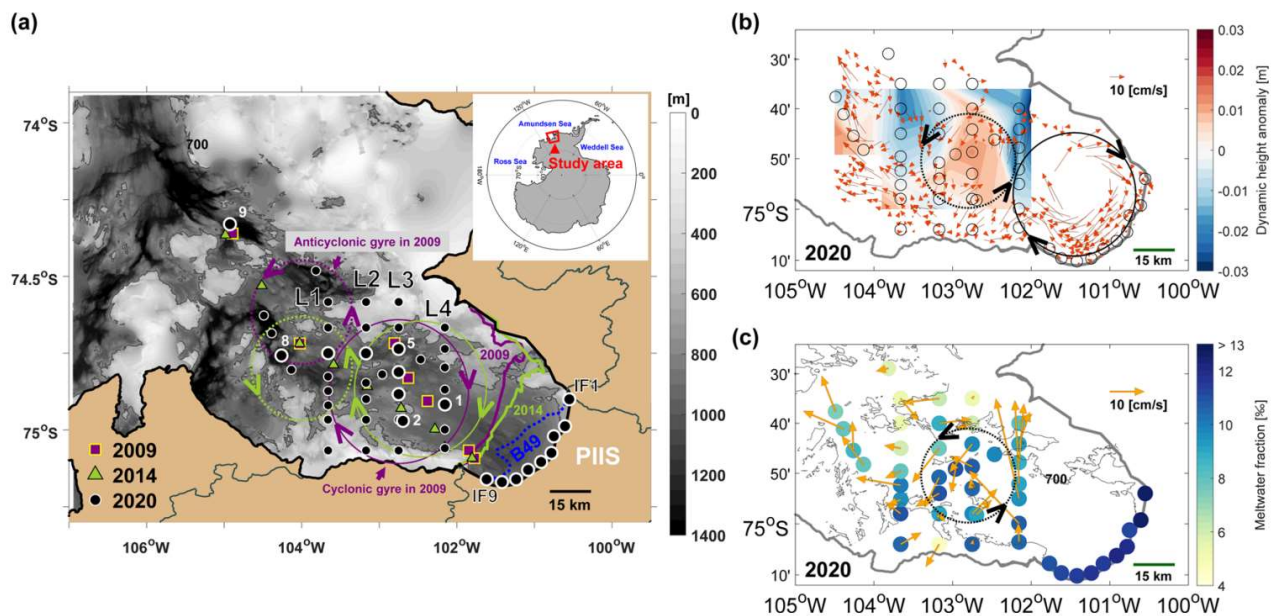


Fig.6 Circulation, 2020

Fig.6은 제시된 빙하 주변의 시간에 따른 관측 데이터를 기반으로 한 순환류 변화를 묘사한다. 이때 빙하의 용해로 인한 용해수와 해수 간의 온도 차이로 인해 순환이 발생한다. 이때 시계 방향 순환의 경우 표층의 따뜻한 해수를 아래로 수송하는 흐름을 만드므로 표층의 열을 심층으로 순환시키는 기작을 한다. 반면 반시계 방향 순환의 경우 아래의 차가운 해수를 위로 수송하는 흐름을 만드므로 표층수의 온도를 오히려 낮추는 기작을 한다. 이때 Fig.6a의 cycle을 자세히 보면 빙하 경계면(IF1~IF9) 근처에서는 시계 방향 순환으로 인해 열이 전달되어 용해가 지속되어 왔음을 알 수 있으며, 원의 회전 중심은 점차 경계면 쪽으로 진행하고 있음을 확인할 수 있다.

반면, 다소 거리가 있는 지점에서의 반시계 방향의 흐름은 표층 해수의 온도를 낮추는 역할을 한다. 이때 Fig.6c의 흐름을 보면 반시계 순환은 빙하 경계면에서 바깥 방향으로 뺏어나가는 조류를 만들어 외부의 따뜻한 물이 경계면과 접촉하는 것을 방해한다. 따라서 빙하에 전달되는 열의 양이 감소하므로 빙하의 용해 속도가 감소한다. 일련의 과정은 거시적으로 Fig.7에 묘사되어 있다.

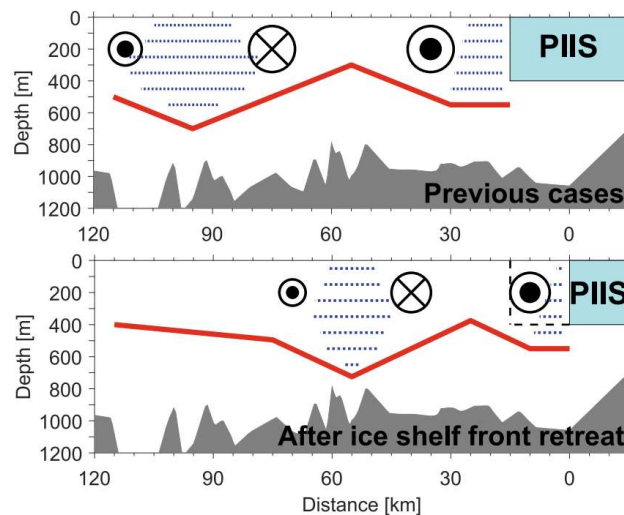


Fig.7 Schematic Fig representing the location of the double-gyre and related meltwater distribution in PIB

• 결론

복사학의 관점에서 빙하의 용해는 지구의 알베도를 감소시켜 평형 온도를 증가시킨다. 하지만 이는 거시계의 설명이고, 지구 시스템의 관점에서 결론에 대한 구체적인 해석이 요구된다. 이때, arctic warming 현상과 그 비선형적 관계를 통해 빙하의 용해는 지구 온난화를 촉진하는 양성 피드백 구조를 갖추을 인지할 수 있다. 하지만, 빙하의 용해는 주변 순환의 흐름을 바꾸어 빙하 용해를 억제하기도 한다. 따라서 일련의 억제 기작에도 불구하고 온난화에 대한 기작이 더 크기 때문에 지구 온난화가 촉진된다는 복합적 모형을 제시할 수 있다.

2. 잠수병을 정의하고 잠수병이 생기는 원인과 원리를 설명하시오.

• 잠수병의 정의와 증상

잠수병은 감압병의 일종으로, 높은 압력에서 오래 체류하던 사람이 급격한 압력 감소를 겪었을 때 나타나는 신체 기전을 통칭하는 말이다. 경우에 따라 감압병은 고압 환경에서 얻는 질병과 감압 과정에서 나타나는 기전을 통칭하기도 하며, 감압 과정에서 나타나는 신체 기전만을 고려하기도 한다. 본 보고서에서는 감압 과정에서 나타나는 기전만을 감압병으로 간주하겠다.

Heo와 Hwang(2002)는 감압병의 원리와 신체 기전을 [Table 1]과 같이 정리하였다.

발생 원인	<ul style="list-style-type: none"> • 깊은 물 속에서 위로 올라올 때 • 감압실 • 고압환경을 유지하기 위한 중간 과정
원인	<ul style="list-style-type: none"> • 폐내의 가스 팽창, 질소 기포 형성
생체 작용	<ul style="list-style-type: none"> • 기흉 • 공기전색 • 순환기와 조직손상을 동반한 감압증상 • 동통성 관절 장애 • 질식 • 마비 • 비감염성 골 괴사

[Table 1] Causes and symptoms of decompression sickness

• 잠수병에 대한 직관적 접근 - Henry의 법칙

성분 A와 성분 B가 섞여 있는 용액을 생각하자. 이때, 성분 B의 몰분율이 매우 작은 경우 용질의 휘발성과 무관하게 성분 B의 증기압은 성분 B의 몰분율 χ_2 에 비례한다. 이를 Henry의 법칙이라고 한다. 이때 외부 압력이 증가하여 성분 B의 증기압이 증가한 상황을 가정해 보자. 그렇다면 Henry의 법칙 $P_B = k\chi_B$ 에서 P_B 가 증가하므로 용액 속 B의 몰분율 χ_2 또한 비례하여 선형적으로 증가한다. 이때 용매의 양은 변화하지 않는 경우를 상정하면 χ 는 기체의 용해도로 간주할 수 있다. 즉, 외부 압력이 2배, 3배...로 증가하면 용해도 또한 이에 비례하여 증가한다는 것이다.

이 역과정을 생각해 보면, 고압의 상황에서 저압의 상황으로 계의 열역학적 조건이 변화할 경우 헨리의 법칙에 의해 물분율(용해도)이 급격하게 감소함을 추론할 수 있다. 이는 탄산 음료 캔을 예로 직관적으로 이해할 수 있다. 탄산 음료의 경우 뚜껑을 따기 전까지는 내부의 이산화 탄소가 고압으로 존재하나, 뚜껑을 따는 순간 캔 내부의 이산화 탄소 기체는 외부와 평형을 이루며 압력이 급격히 감소한다. 따라서 내부의 음료에 녹아 있던 이산화 탄소 기체의 용해도가 감소하며 기포나 가스의 형태로 캔 밖으로 방출되게 된다. 이 과정에서 캔 내부에 있는 기체가 급격하게 확장하면서 특유의 캔 따는 소리가 나게 된다.

잠수병의 원리 또한 이와 유사하다. 압축된 공기통을 들고 깊은 곳으로 잠수하는 상황을 생각해 보자. 사람은 깊은 물 속에서도 대사 과정이 일어나기에 산소를 소비한다. 하지만, 생체는 산소를 주로 요구하므로 다른 기체는 사용되지 않으며, 따라서 혈장에 용해된 상태로 체내를 순환한다. 이때 압력이 급격하게 감소하면 탄산음료의 사례처럼 기포가 형성되며, 이들 기포는 신경을 자극하거나 혈관을 막는 등 인체에 해가 되는 기작을 수행한다. 이로 인해 인간은 복합적인 생체 기전을 겪게 되는데, 이들의 총체가 잠수병인 것이다.

• 잠수병 - 생화학적 관점

하지만 기포의 발생과 생물학적 기전 사이의 추가적인 관계성을 규명할 필요가 있다. 하지만 인간을 이용하여 잠수병의 기전을 분석하는 것은 물고문과 다를 것이 없다. 따라서 생화학자, 의학자 등 연구자들은 유사한 동물인 쥐가 활용된다. Bigley et al.(2007)은 쥐의 모델을 이용하여 염증성 사이토카인과 adhesion molecule을 이용한 잠수병 기작을 규명했으며, 그 거시적인 메커니즘은 Fig.8에 제시했다.

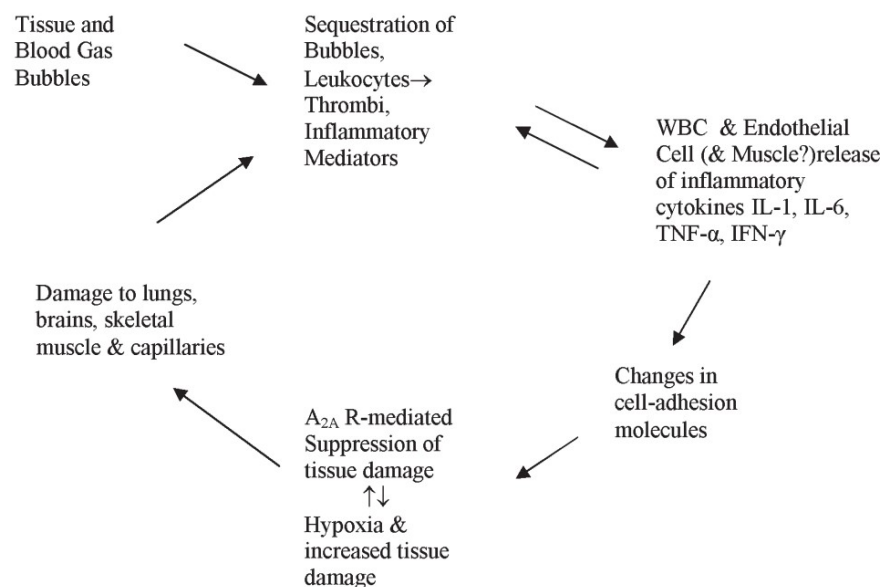


Fig.8 Roles of receptors and molecules in rat model

Bigley et al.의 모델에 의하면 잠수병의 대응 기작은 염증 반응의 기작과 상당히 유사하다. 우선, 앞서 언급한 기작에 의해 감압 과정에서 혈관에 기포가 생성된다. 이후 생성된 기포는 혈관 내 격리 과정이 일어나며, 기포를 인지한 백혈구는 혈전을 생성하고 immune cell을 호출한다. 따라서 이에 대응하기 위해 WBC, endothelial cell은 inflammatory cytokine IL-1, IL-6 등을 분비한다. 이때 inflammatory cytokine은 T_H cell이나 macrophage에서 분비되며, 세포 자살을 유도하거나 innate immune response를 유도한다. 일련의 과정에서 세포 내 연결을 담당하는 cell-adhesion molecule의 배열에 변화가 생기게 되며, 앞선 cytokine과 더불어 이는 tissue damage를 trigger하는 인자로 작용한다. 따라서 tissue damage는 체내 여러 기관의 손상이나 오기능을 유발하게 되며, 이들이 잠수병의 호소되는 증상으로 발현되는 것이다.

• 잠수병의 해결

잠수병을 가장 직접적으로 해결하는 방법은 고압 산소 치료이다. 고압 산소 치료를 통해 혈중 산소 농도를 다시 올리면 산소가 우선적으로 소비되면서 cytokine 분비가 완화되고, 따라서 신체가 원래의 상태를 찾아가게 된다.

또 다른 방법으로 일시적으로 signaling pathway를 조작하는 방법이 있다. Tang et al.(2020)은 실험군의 쥐에 BTP2를 처리한 결과 잠수병의 증상이 유의미하게 감소했다고 밝혔다. BTP2는 특정 Ca^{2+} 채널을 억제하는 화학 물질로 cytokine이 매개하는 signaling pathway를 방해한다. 따라서 약물이 개발된다면 약물을 복용하여 감압병의 증상을 약화시킬 수 있다.

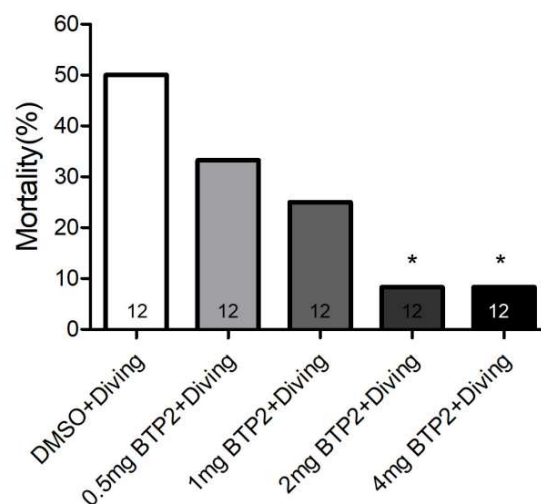


Fig.9 Effect of BTP2 on the mortality of decompression sickness

BTP2를 쥐에 처리했을 때 치사율이 낮아진다는 사실은 **Fig.9**의 쥐들로부터 확인되었다. 이때 BTP2의 양은 2mg을 처리한 이후로는 큰 치사율 감소가 나타나지 않는 것으로 보아 특정 양까지만이 유효한 것으로 사료된다. 다만 signaling pathway를 억제하는 물질은 과복용할 경우 독극물로 작용할 수 있기에 적당한 효용에 대응되는 용량을 찾는 것이 중요할 것으로 사료된다.

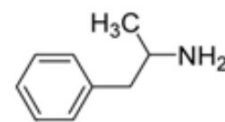
- **결론**

잠수병이 발생하는 원인은 체내에서 소비되지 않아 혈장에 녹아 있는 기체의 Henry의 법칙에 따른 감압 과정에서의 기포 발생이다. 이때 발생한 기포로 인한 생체 기작은 염증 반응과 유사하며, 감염원이 없음에도 인체가 과하게 반응하다 보니 여러 손상을 야기한다. 따라서 잠수병을 해결하기 위해서는 고압의 산소로 혈액을 포화시켜 올바른 생체 기작이 일어나도록 하거나, cytokine으로 인한 signaling pathway를 방해하여 인체의 과한 대응을 방해해야 한다.

3. 모발 중 암페타민 유도체의 정량분석을 하려고 한다. 어떠한 방법으로 실험을 하면 되는지 실험을 구상해 보시오.

• 서론

순수한 암페타민은 도파민-노르에피네프린 재흡수 억제제이자 도파민 분비 촉진제로, 각성제의 역할을 한다. 따라서 암페타민과 유사한 분자 구조를 포함하는 암페타민 유도체들은 모두 마약류의 성격을 갖게 된다. 과학자들은 인간의 안전과 스포츠 등 상황에서의 공정성 등을 유지하기 위해 마약의 섭취 여부를 검사해야 한다. 본 탐구에서는 기체 크로마토그래피와 질량분석법을 이용한 Kim et al.(2009)의 방법을 통해 암페타민 유도체의 정량분석 방법을 제시하고자 한다.



Amphetamine
(AP, MW=135)

Fig.10 Structure of
Amphetamine

• GC/MS의 원리

(1) GC의 원리

GC(Gas Chromatography)는 mobile phase로 gas를 사용하는 chromatography의 방식을 의미한다. 이때 여러 성분으로 구성된 시료를 GC에 투입하면 mobile phase에 의해 운반되며 다른 방식의 chromatography와 같이 stationary phase와의 상호작용으로 인해 구성 성분들로 분리되게 된다. 따라서 GC를 이용할 때에는 mobile phase와 stationary phase는 명확히 구분(혼합되지 않아야)되어 독립적으로 존재해야 한다. 이때 GC의 각 지점에서 나타나는 평형은 다음과 같다.

$$A(\text{mobile}) \rightleftharpoons A(\text{stationary})$$

이때 이 평형의 평형 상수 $K = \frac{[A(\text{stationary})]}{[A(\text{mobile})]}$ 를 성분 A와 mobile phase, stationary phase에 대한 분배 계수(partition coefficient)로 정의한다. 이때 화학종의 종류가 달라지면 phase와 시료의 상호작용 또한 변화하게 된다. 따라서 partition coefficient는 전제된 상황에서 물질의 고유한 특성이며, 그 차이는 chromatography에서 각 성분을 분리하는 원동력이 된다.

상술했듯 GC에서 mobile phase는 기체이며, 따라서 mobile phase로 사용되는 기체는 여러 조건을 충족해야 한다. 우선, 시료와 mobile phase 사이의 반응성이 없어야 한다. 또한 순도가 높은 기체를 쉽게 얻을 수 있어야 한다. 더불어 시료 분자의 확산을 저해하고 평형에 의해 분석이 지배 되도록 해야 한다. 따라서 mobile phase이자 carrier gas로는 inert gas인 He나 Ar 또는 반응성이 낮은 N₂를 사용한다. 이때 mobile phase의 순도가 낮아지면 실험 오차가 발생할 확률이 증가하므로 gas의 filtration을 통해 reduction과 dehydration을 시키고 사용하는 경우가 많다.

이때 carrier gas를 통해 전달 및 도달하는 관을 column이라고 하며, column에서는 stationary phase로 액체를 사용하여 분배시키거나 고체를 사용하여 흡착시키는 2가지 방법이 있다. 이때 GC에서는 stationary phase로 특정 용액이나 순수한 액체를 택하여 사용하는 경우가 많다. 일련의 액체 또한 stationary phase이므로 기체와 같이 반응성이 낮아야 되며, 비휘발성이고 증기 압력이 낮아야 되는 등 여러 물리적 조건이 요구된다.

일련의 내용들을 포함하여 GC의 모식적인 구조를 나타내면 다음과 같다. (P566)

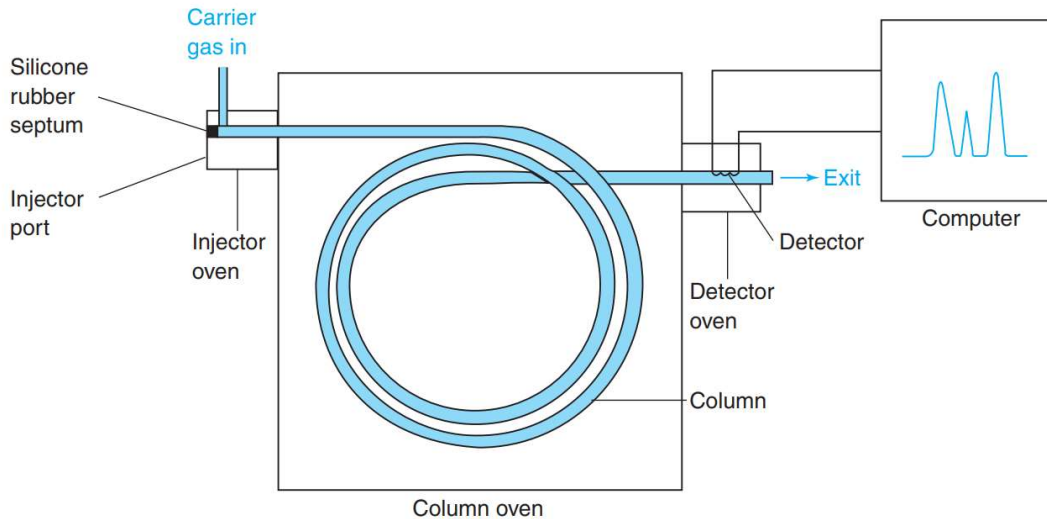


Fig.11 Schematic diagram of a gas chromatography device

우선 GC로 분리할 시료들은 최대한 균질하게 가공하여 대개 syringe에 넣어 사용한다. 시료의 투입 유속 또한 syringe를 통해 직접 조정하기도 하나, 현대의 장비는 automatic injector를 통해서 mobile phase의 유속과 시료의 유속 모두 조정하기도 한다. 일련의 시료는 column을 지나며 partition coefficient의 차이로 인해 분리되며, 분리된 시료들은 시간에 따라 detector에 감지되며 그 spectrum을 그린다. 따라서 컴퓨터에서는 시간에 따른 detector의 intensity(peak)를 검출할 수 있으며, 그 물리적 성질을 추론할 수 있다.

(2) MS의 원리와 GC-MS

이때 GC-MS의 경우 GC의 data만을 곧바로 컴퓨터로 불러오는 것이 아닌, mass spectroscopy(MS)의 과정 또한 거친 후 MS의 detector에서 불러온다. 따라서 GC-MS는 GC를 이용하여 혼합 시료를 분리하고 이를 MS를 통해 세부적인 분자량을 규명하는 실험 장치로 이해할 수 있다. 이때 GC-MS의 구조는 Fig.12에 나타내었다.

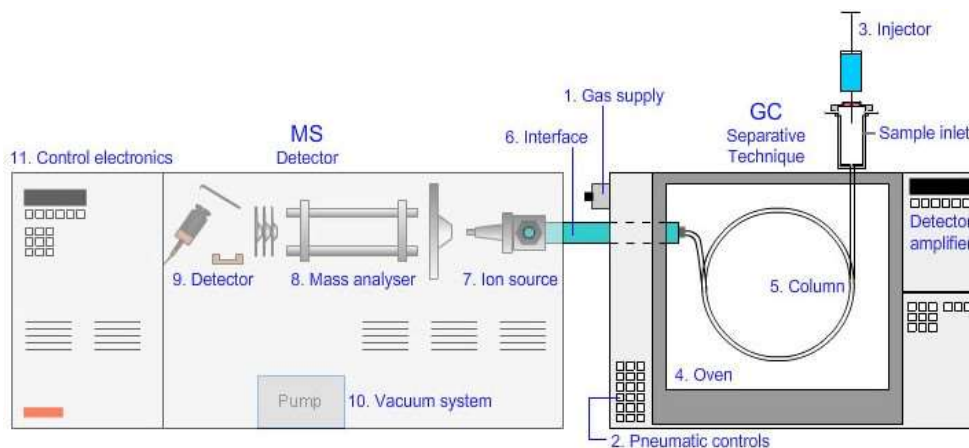


Fig.12 Schematic Diagram of GC-MS

GC에서 얻은 시료는 interface를 통해 MS로 전달된다. 전달된 시료는 ion source에 의해 이온화³⁾되며, 이는 MS는 자기장에 의한 회절($F=qvB\sin\theta$ 이용)을 원리로 이용하기에 분자가 이온화돼야만 이온종의 전하량이 존재하여 효과적으로 분석이 가능하다. 일련의 과정은 **Fig.13**에 자세히 묘사하였다. GC에서 mass analyzer는 2개의 자석으로 구성되어 있으며, (장치가 작동되면) 효과적인 자기장을 부여한다.

로런츠 힘 $F=qvB\sin\theta$ 에서 입자의 초기 입사 속도는 동일하기에 θ 와 v 는 동일하며 B 값 또한 동일한 장비에서 유지된다. 따라서 입자의 회절이 발생할 때 로런츠 힘 $F=qvB$ 가 구심력으로 작용하게 되며, 따라서 $qvB = \frac{mv^2}{r}$ 이다. 따라서 $\frac{m}{q} = \frac{rB}{v}$ 로 기술할 수 있으며, 전기장에 의한

퍼텐셜 에너지 $qV = \frac{1}{2}mv^2$ 이므로 $v = \sqrt{\frac{2qV}{m}}$ 를 만족한다. 따라서

$$\frac{m}{q} = \frac{rB}{\sqrt{\frac{2qV}{m}}} = \frac{B^2 r^2}{2V} = \frac{qB^2 |\vec{d}|^2}{8V} \quad (\because \text{총 변위 } |\vec{d}| = 2r)$$

로 기술되고, detector는 일련의 연산을 통해 $\frac{m}{q}$ 또는 $\frac{m}{e}$ 에 대한 스펙트럼을 얻을 수 있으며, 이는 분자량과 동등하다. 이중 하나의 예시를 **Fig.14**에 첨부하였다.

3) MS에 투입된 시료를 어떤 기체와 충돌시켜 이온화시키는지 또한 연구 과정에서 중요한 영향을 미친다. 하지만, 본 탐구에서 암페타민 유도체는 모두 유사한 분자 구조를 가져 일정 범위에서 물리적 성질이 유사하며, 고분자스케일까지 도입되지 않으며 EI의 방법을 특징적으로 변화시킬 지점 또한 없다. 따라서 본 보고서에서는 MS에서의 이온화 과정(EI)에 대한 내용은 생략한다 (abb.).

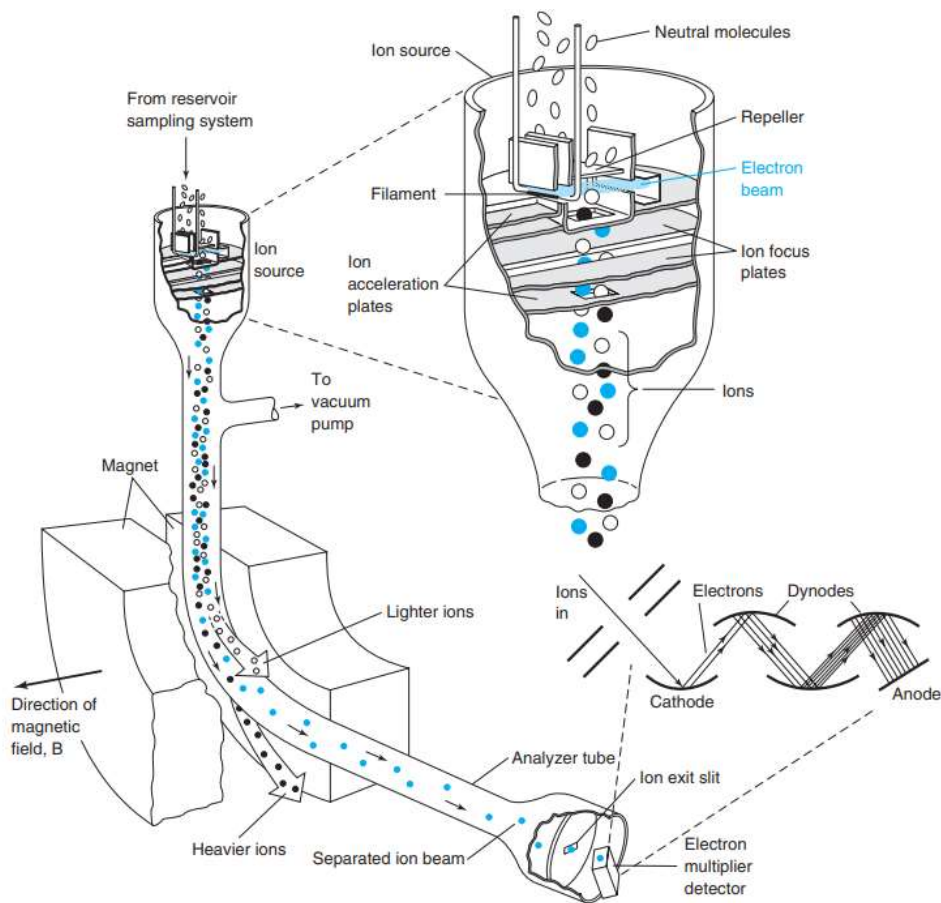


Fig.13 Schematic diagram of Mass Analyzer

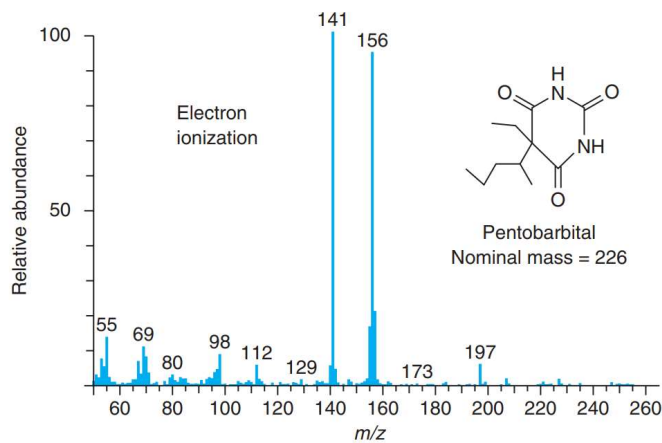


Fig.14 Mass spectrum of pentobarbital

따라서 GC-MS의 과정이 모두 완료되면 GC 스펙트럼과 MS 스펙트럼을 모두 얻을 수 있다. 그 예시를 Fig.15에 나타냈다. 또한 분리축을 극자 1쌍을 사용하는 것이 아닌 2쌍을 사용하면 그 해상도를 높일 수 있는데, MS에 일련의 개선이 일어난 경우 이를 GC-MS/MS라 한다. 그 대략적인 구조는 Fig.16에 나타냈다.

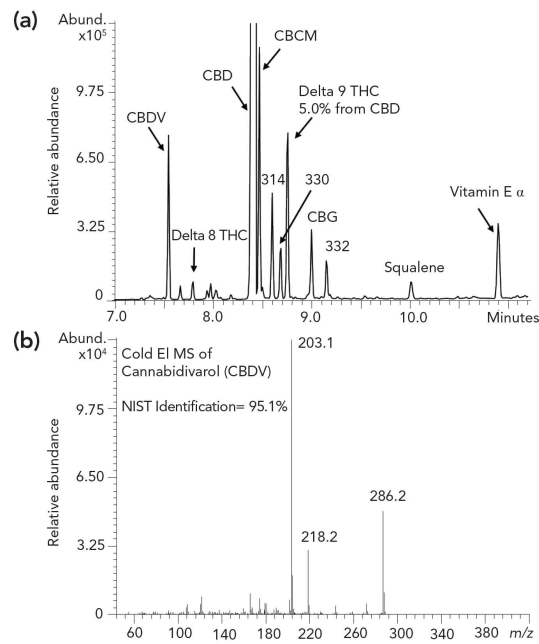


Fig.15 Example of GC-MS spectrum

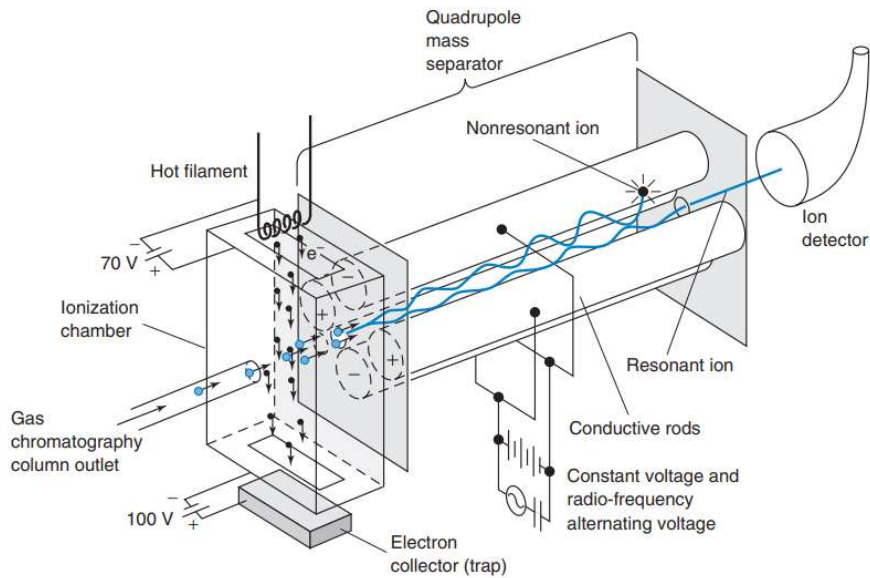


Fig.16 Schematic diagram of MS in GC-MS/MS

따라서 GC-MS 또는 GC-MS/MS는 시료를 구성하는 성분의 특성과 분자량을 이해하여 원하는 물질의 양과 종류를 빠르게 특정할 수 있다는 장점이 있다.

• 실험 방법

Kim et al.(2009)는 GC-MS/MS를 이용하여 모발 중 암페타민 유도체를 분석하는 수사 기법을 개발했다. 우선 분석하고자 하는 표준 물질을 대상으로 standard calibration curve(w/w)를 제작한다. 이때 암페타민 유도체의 경우 복용량이 상이하므로 그 스케일 안에서 상응하는 피크를 분석할 수 있도록 유의한다. 동시에 동위원소로 치환된 내부 표준 물질의 피크 또한 함께 얻어 그 면적비로 calibration curve를 도식했다.

그 다음 실제 사람의 머리카락을 취하여 실험을 진행한다. 우선 시료를 증류수와 acetone을 이용하여 세척한다. 다음으로 시료의 균질성 확보를 위해 시료는 자동분쇄기를 이용하여 매우 작게 빻는다. 균질화된 시료는 bath를 이용하여 메탄올에서 추출하고, 그 상층액을 여과하고 증발시켜 잔사를 얻는다. 이후 벽에 대한 흡착성이 높은 아민기를 제거하기 위해 HFPA 시약을 처리한다. 이를 다시 건조시킨 후 ethyl acetate에 녹여 자동 injector에 투입한다.

이후 질량분석기에서는 정밀한 측정을 위해 MRM 방법을 사용한다. precursor 이온과 그 반응으로부터 만들어지는 product 이온을 모두 모니터링하여 질량분석을 진행한다. 따라서 분석의 감도를 높이기 위해서는 복합 반응이 잘 일어나야 하므로 precursor 이온-product 이온 쌍과 그 에너지 조건을 최적화해서 사용해야 하며, 이는 최대 피크가 나타나도록 실험 조건을 조작하면서 얻을 수 있다. 이로부터 얻어지는 피크는 앞서 기준시료를 활용하여 도식한 calibration curve와 비교하여 특정 암페타민 유도체의 농도(w/w)를 분석할 수 있다.

나아가 분리-검증이라는 일련의 큰 틀을 유지하면 GC 이외의 다른 크로마토그래피를 도입할 수 있다. Kim et al.(2009)는 LC-MS의 방법을 사용하여 암페타민 유도체의 정량분석을 가능하게 하는 방법을 고안하였다. 또한 Jakobsson과 Kromstrand(2014)는 UHPLC-MS/MS를 이용한 암페타민의 분석 방법을 고안하였다. 따라서 chromatography - MS의 큰 틀을 유지하되, chromatography 과정에서 column이나 mass spectroscopy에서 MRM 방식을 변화시키면서 해결안을 찾을 수 있을 것으로 사료되며, 이는 실험적 관점에서 규명할 수 있을 것으로 보인다.

• Chromatography-MS의 선행 연구 결과 분석(Kim et al., 2009)

하술할 내용은 Kim et al.(2009)의 크로마토그래피와 질량분석(MS)을 통한 정량분석에 대한 신뢰도 등 결과의 분석이다.

Analyte	Calibration range (ng/mg)	Slope	y-intercept	Linearity ^a (r ²)	LOD ^b (ng/mg)	LOQ ^c (ng/mg)
AP	0.05-20.0	0.2292	0.0249	0.9993	0.007	0.023
MA	0.05-20.0	0.8608	-0.0051	0.9995	0.005	0.016
MDA	0.05-5.0	0.6371	0.0632	0.9981	0.006	0.018
MDMA	0.05-20.0	0.7419	-0.0178	0.9995	0.003	0.008
NKT	0.05-20.0	0.7625	-0.0468	0.9997	0.001	0.002

^aLinearity is described by the coefficient of determination (r²) for the calibration curve.

^bLimit of detection (LOD) and ^climit of quantification (LOQ) were based on the concentration corresponding to 3 and 10 standard deviations from the mean of six replicates of QC samples.

Fig.17 Sensitivity and calibration results

탐구 결과 5가지의 암페타민 유도체에 대한 calibration curve는 1에 가까운 높은 선형도(r^2 , r : residual)를 보였으며 y 절편 또한 0에 가깝게 나타나 column-암페타민 유도체 상호작용이나 carrier gas-암페타민 상호작용은 적게 나타남을 확인할 수 있었다. 또한 측정의 정확도를 평가하기 위해 규명된 농도를 가진 시료의 농도 조성을 실험 방법을 통해 추적한 결과 Fig.18과 같았다.

No	Analyte	Molecular weight	Retention time (min)	MRM transitions		CE (eV)
				precursor ion (m/z)	product ion (m/z)	
1	AP	331	4.98	<u>240.2</u> *	<u>192.0</u>	8.0
				240.2	168.9	10.5
2	AP- d_8	339	4.95	<u>243.2</u>	168.9	11.5
3	MA	345	6.03	<u>254.2</u>	<u>209.9</u>	8.5
				210.2	168.9	9.0
4	MA- d_{11}	356	5.97	<u>260.3</u>	<u>212.9</u>	8.0
5	MDA	375	7.97	<u>135.2</u>	<u>77.0</u>	13.0
				162.2	131.0	10.5
6	MDA- d_5	380	7.88	<u>136.2</u>	<u>78.0</u>	13.0
7	MDMA	389	8.90	<u>254.2</u>	<u>209.9</u>	7.5
				210.2	168.9	8.5
8	MDMA- d_5	394	8.87	<u>258.3</u>	<u>212.9</u>	8.0
9	NKT	420	9.49	<u>384.2</u>	<u>171.0</u>	10.0
				356.2	338.8	6.0
10	NKT- d_4	424	9.47	<u>388.2</u>	<u>175.0</u>	10.0

Fig.18 GC-MS/MS information of five analytes

Fig.18에서 나타나듯 내부표준용액(동위원소로 치환된 암페타민, 암페타민- d)과 표준물질을 첨가한 시료(암페타민 유도체로만 표기)에서 큰 차이가 나타나지 않으며, 시료에 따라 -2%~20%의 정확도와 정밀도를 보이는 것으로 나타난다. 따라서 Kim et al.이 제작한 표준물질의 정량 범위에 대해서는 위 측정 방법이 유효하다고 볼 수 있으며, 따라서 치사량에 다다르지 않는 암페타민 유도체의 복용 범위에 대해 일련의 실험을 설계하면 그 타당성을 확보할 수 있다.

요약하자면 표준 물질을 첨가한 모발 시료와 내부 표준물질의 결과값을 대조하면 높은 유사도를 보이기에 일련의 실험은 타당하며, 검량의 범위와 한계를 잘 설정하면 매우 유효한 실험값을 얻을 수 있다고 간주할 수 있다. 하지만 동시에 일련의 방법은 GC와 MS라는 첨단 기자재를 사용하기에 고립된 실험실에서 진행해야 하며, 따라서 첨단 기자재가 부족한 조건(비도심 지방이나 개발도상국)에서 마약 문제가 발생할 경우 표본 조사에 적용하기 어렵다는 한계를 갖는다.

- 항원-항체 반응과 키트에서의 응용

앞서 설명했듯 Kim et al.(2009)의 방법은 첨단 기자재를 사용할 수 있는 경우 높은 정밀도와 정확도를 보유한 분석 방법으로 간주할 수 있다. 하지만 대규모의 표본조사가 필요한 경우 또는 장비가 결여되어 있는 환경에서는 GC-MS/MS 또는 LC-MS/MS를 활용하기 어렵다. 따라서 현재 일련의 상황에서는 암페타민 유도체의 존재 여부를 탐지할 수 있는 키트를 활용하고 있으며, 키트에서 존재 여부가 확인된 시료에 대해서 정밀한 조사를 진행하게 된다.

이때 임신 테스트기, 코로나-19 진단 키트 등 여러 키트에서 사용되는 항원-항체 반응은 우리 몸에서 항원-특이적 면역 작용을 통해 항원을 제거하는 반응과 유사성을 갖는다. 생화학과 화학공학에서 사용되는 항원-항체 반응 모두 항체는 항원-특이성을 가지며, 항체의 경우 쉽게 얻을 수 있는 쥐나 돼지의 항체를 사용하는 경우가 잦다. 이때 항원 특이성이란 하나의 항체는 항원의 특정 구조를 인식해서 결합하는 특이적인 반응성을 가짐을 의미한다.

항원-항체 반응을 이용한 키트의 기본적인 구조는 다음과 같이 설명할 수 있다. 우선, 검출하고자 하는 시료 X에 결합하는 항체 ①이 있다. 만일 검출하고자 하는 물질 X가 존재한다면 물질 X와 항체 ①은 항원-항체 복합체를 이루게 되는데, 이 X-① 복합체를 인식하고 결합하는 특정 물질 Y가 있다. 하지만 시료 X가 존재하지 않는 경우 항체 ①은 X와 결합하지 못한 채로 키트를 진행하게 되는데, 이 항체를 인식하여 결합하는 특정 물질 Z가 존재한다. 이때 항체 ①에 색소를 달아두고 검사선에 물질 Y, 종료선에 물질 Z를 순차적으로 배열하는 상황을 가정하자. 그렇다면 물질 X가 존재하지 않는 경우 항체 X는 종료선까지 mobile phase 위에서 진행하게 되며 종료선에서 결합 물질 Z와 결합하여 종료선의 색을 나타내게 된다. 하지만 물질 X가 존재하는 경우 물질 X는 항체 ①과 결합하고, 이 X-① 복합체는 검사선의 물질 Y와 결합하여 검사선의 색을 나타내게 된다. 일련의 과정을 Fig.19에 묘사하였다.

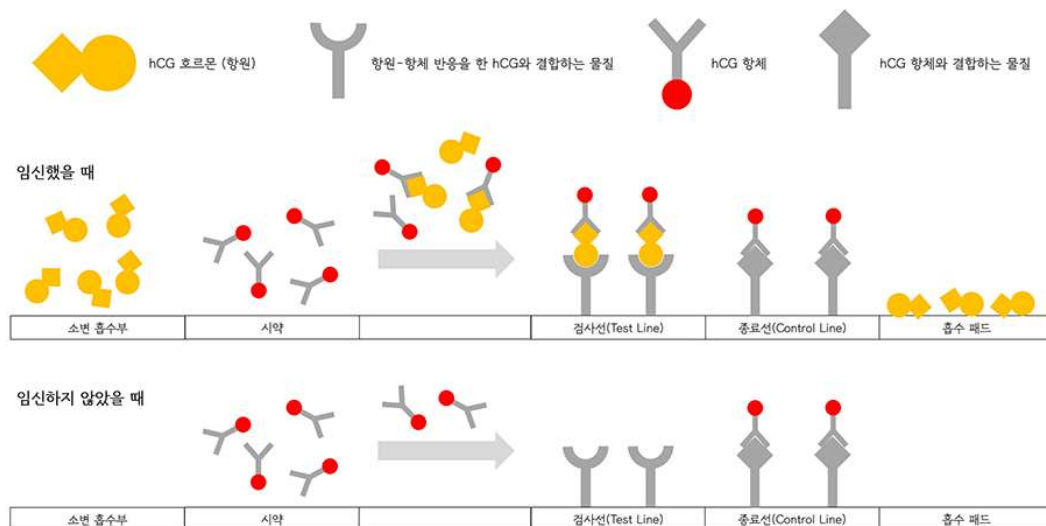


Fig.19 Schematic diagram of pregnancy-test kit

이때 암페타민 유도체의 진단 키트에도 비슷한 원리가 활용된다. ASAN 사의 암페타민 진단 키트에서는 생쥐를 바탕으로 얻은 암페타민 단일클론항체를 위와 동일한 과정에 활용하였다. 따라서 초기 시료를 소변으로 잡으면, 소변에서 체내를 순환하고 잔여한 암페타민을 검출할 수 있게 된다. 이때 암페타민단일클론 항체에는 금 입자를 결합시켜 색상을 나타내도록 하였다.

https://www.asanpharm.co.kr/bbs/board.php?bo_table=custo_02&wr_id=65&page=2

• 항원-항체 반응을 이용한 암페타민 정량분석 방법

이하 내용에서는 암페타민 유도체를 항원으로 하는 항원-항체 반응을 통한 새로운 분석법을 제안한다. 우선, 앞서 GC-MS/MS를 이용한 실험 방법과 같이 모발은 균질기를 이용해 균질화시키거나 균질기가 없을 경우 가능한 한 잘게 분쇄한다. 이후 시료는 메탄올을 추출 용매로 하여 bath에서 추출시키거나 상온 추출한다.

Test tube에는 존재하는 시료는 암페타민 검출 키트와 동일한 원리를 적용한다. 우선, 암페타민 유도체에 결합하는 항체를 얻어 test tube에 과량으로 존재하도록 한다. 또한 암페타민-단일클론항체를 인식하여 결합하는 결합 물질 역시 과량으로 존재하도록 한다. 이때 결합 물질에는 색소(발색단)를 부착하거나 광화학반응이 일어나도록 하는 특정 물질을 부착한다. 이는 암페타민 유도체가 존재하는 조건에서 암페타민이 단일클론항체에 결합하고, 일련의 복합체가 결합 물질까지 결합해서 충분히 무거워지도록 했을 때 다른 성분과의 질량, 크기 차이 및 색상 차이를 갖도록 하기 위함이다. 이때 일련의 시료를 원심분리⁴⁾시키면 색상을 띠는 큰 시료는 아래로 침전되게 되며 잔여하는 항체 및 결합 물질만 상층액에 존재하게 된다. 또한 암페타민이 상당한 양이 존재할 경우 색상을 띠는 결합 물질이 모두 암페타민과 결합하여 아래로 침전해 상층액은 투명해질 것이다.

따라서 항원-항체 반응이 완료된 뒤 농도에 따라 상층액의 흡광도를 calibration하면 농도에 따른 변화가 나타나게 될 것이다. 단, 이때 모발 시료를 활용하지 않을 경우 암페타민의 항원-항체 반응에 관련된 물질 이외의 물질들이 흡광도에 관여(matrix effect)할 수 있어 모발 시료에 표준 물질을 첨가하는 방향으로 calibration curve를 기술해야 할 것이다.

이때 일련의 방법의 정확도와 정밀도는 현재 정밀 측정에 사용되고 있는 (상술한) GC-MS/MS나 UHPLC-MS/MS 등의 방법으로 얻은 데이터와 비교하면 될 것으로 사료된다. 일련의 과정을 통해 얻은 residual 값이나 가설검정을 토대로 방법의 타당성을 분석할 수 있으며, 실험 과정에서 나타나는 문제점의 경우 반응의 특이성이나 질량 조건에 변화를 주어 해결하면 될 것으로 사료된다.

일련의 방식은 고가의 첨단 장비인 GC-MS/MS의 사용을 지양하고 비교적 쉽게 접할 수 있는 원심분리기와 분광광도기를 활용하면서도 키트와 달리 정량분석이 가능하다는 장점을 갖는다.

4) 실험의 사이즈를 줄이고 간편성을 확대하기 위해 vortex mixer를 사용하는 방안도 생각했지만 vortex mixer의 원심력으로 유의미한 성분 분리가 나타날지 명확하지 않아 원심분리기를 사용하는 방향으로 기술했다.

4. 에어컨 작동 원리를 설명하시오.

- 에어컨이란 - 에어컨의 개관

에어컨(AC)은 에어컨의 약자로, 공기의 조건을 조절하는 장비를 칭한다. 따라서 넓은 의미에서 에어컨은 뜨거운 바람을 내보내 공기를 따뜻하고 건조하게 하는 온풍기 또한 포함한다. 하지만 관용적으로 에어컨은 냉방기와 동일한 의미를 가져, 대개 공기의 온도를 내리는 장비를 의미한다. 따라서 본 보고서에서는 에어컨을 제습 기능과 냉방 기능을 가진 전자제품으로 정의하고 단어를 사용하도록 하겠다.

가장 먼저 에어컨을 개발한 사람은 미국의 엔지니어 윌리스 캐리어로, 그는 에어컨을 더위를 해결하기 위해서가 아닌 인쇄물의 품질을 유지하기 위한 건조 조건을 확보하기 위한 기계로 고안하였다. 이후 일련의 기술을 발전시키며 특정 공간을 냉각시키고 건조하는 장비로서 에어컨은 널리 범용되게 되었다.

에어컨의 원리는 후술하겠지만, 본 절에서도 에어컨의 원리를 간단히 소개하고 넘어가겠다. 에어컨은 냉매로 칭하는 물질의 액체-기체 상변화를 이용한다. 액체는 기체의 응축상으로, 어떤 물질이 탈응축되기 위해서는 에너지를 흡수하는 흡열 반응이 일어나야 한다. 고압에서 응축되어 생성된 액체 상태의 용매는 주위 공기와 최대한 접촉하도록 설계된 증발기에서 증발하며 공기를 냉각시킨다. 이때 기계적 장치에 의해 차가워진 공기는 에어컨이 설치된 공간으로 분사되고, 냉매는 다시 일련의 열역학적 순환에 참여하게 된다.

기술의 발전으로 현재 에어컨은 단순히 냉방 기능만을 담당하는 것이 아닌, 공기 청정, 냉/난방 겸용 등 다양한 기능을 겸한다. 동시에 기술적으로 에어컨의 부피를 축소시키기 위해 일련의 여러 동작들은 동일한 열역학적 장치를 공유하게 되며, 공학적으로 일련의 구조는 분류된다.

- 에어컨의 구조

많은 전자제품과 같이 에어컨은 일련의 회로에 의해 동작되며 이들은 하나의 중앙 제어 시스템으로 묶여 동작한다. 하지만 ‘화학적 원리에 대한 고찰’이라는 본 보고서의 취지에 부합하도록 열역학과 화학적 의미를 갖는 내용들에 대해서만 서술하겠다.

우선, 압축기가 있다. 압축기는 낮은 온도와 압력의 냉매를 높은 압력으로 압축시키는 부품을 의미한다. 다음으로, 응축기가 있다. 응축기는 압축기를 통해 나온 높은 온도와 압력의 냉매를 주위 공기와 연결되는 표면적을 최대화하여 효과적으로 열을 내보내며 액체로 응축하도록 하는 장비이다. 다음으로 감압 장치는 응축기를 통해 전달된 냉매의 압력을 낮추는 장치이다.

마지막으로 증발기는 팽창 밸브를 통해 얻어진 낮은 온도와 압력의 조건에서 냉매가 주위 공기와 연결되는 표면적을 최대화하여 효과적으로 열을 흡수하여 증발하도록 하는 장치이다(Kim et al., 1997). 단, 사이클에 따라 이중 일부 장비는 활용되지 않기도 한다(Hwang, 1996).

- 냉방 사이클과 열역학 법칙

상술한 내용의 구조에 따라 냉매가 액체 → 기체 → 액체 →..로 반복되는 냉방 사이클은 여러 양상을 갖게 된다. 이때 용매를 저압부에서 고압부로 이송하는 방식에 따라 사이클은 증기압축식 사이클과 흡수식 사이클로 구분된다(Oh, 1993)s.

우선, 증기압축식 사이클의 대략적인 구조는 Fig.20에 묘사하였다. 증기압축식 사이클에서는 증발기를 거쳐 만들어진 냉매 기체는 압축기를 통해서 그 압력이 증가하여 응축기로 보내진다. 이때 기체의 압력을 감소시키기 위해서는 기체가 $W = - \int P_{ex} dV$ 만큼의 일을 받아야 하며, 일련의 일은 전기적 에너지로부터 비롯된다.

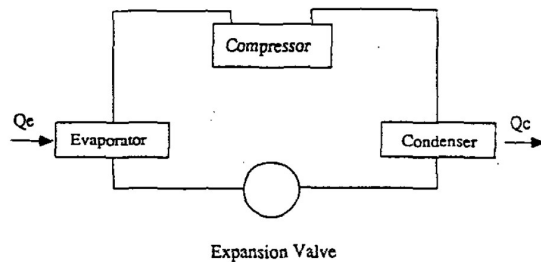


Fig.20 Schematic diagram of vapor-compression cycle

증기압축식 사이클에서 상전이가 일어나는 곳은 증발기(evaporator)와 응축기(condensor) 두 곳이다. 이때 냉매의 상변화가 일어나기 위해서는 냉매의 잠열(latent heat)을 이해해야 한다. 과학자들은 잠열을 물질의 성질과 귀결시키기 위해 specific latent heat의 개념을 도입했으며, 이는 단위 질량을 상변화시키는 데 필요한 열량으로 정의된다. 즉, $L = \frac{Q}{M}$ 로 정의할 수 있다.

이때 증기압축식 사이클에서 냉매의 양은 완벽하게 보존된다는 열역학적인 근사를 거치면, 증발기에서 냉매가 얻게 되는 열의 양 $Q = LM$ (L : 순수한 냉매의 잠열, M : 냉매의 질량)이다. 이때 증발기 주위의 기체는 접촉 열원이므로 상응하는 만큼의 열을 잃게 된다. 이때 $\Delta U = q + w$ 의 열역학 제 1법칙에서 $q < 0$ 이고 w 는 q 에 비해 매우 작으므로 기체의 내부 에너지 $\Delta U = nc_V \Delta T < 0$ 이 되게 된다. 이때 n, c_V 는 모두 양의 상수이므로 기체의 온도 $\Delta T < 0$ 이라는 결론에 도달할 수 있으며, 따라서 공기는 냉각된다.

하지만 흡수식 사이클에서는 냉각 과정의 원리가 다소 다르다. 흡수식 사이클에서는 압축기를 사용하는 대신 흡수기를 사용하며, 따라서 냉매 이외에 흡수액의 사용이 필요하다. 흡수식 사이클의 대략적인 과정은 Fig.21에 묘사하였다.

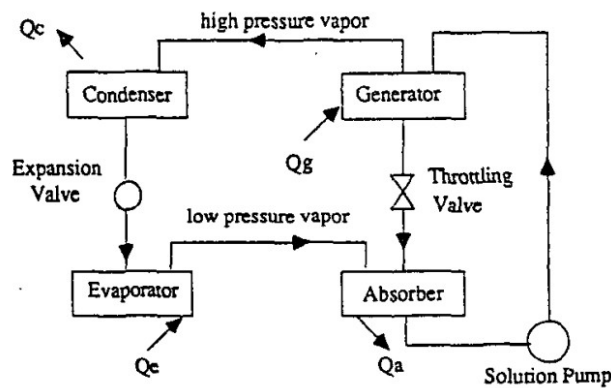


Fig.21 Schematic diagram of absorption cycle

구체적인 작동 원리는 냉매와 흡수액 사이의 상호작용으로 설명할 수 있다. 우선, 흡수기에는 흡수액이 존재하며, 증발기에는 냉매가 존재한다. 이때 흡수기와 증발기는 관으로 연결되어 있으며, 따라서 증발기로부터 발생한 냉매 증기는 흡수액에 의해 흡수된다. 이때 기체의 용해 과정은 용매화 과정을 통해 용액 시스템의 에너지를 안정화시키므로 발열 반응이다. 따라서 냉매 증기의 용해 과정에서 흡수열이 발생하게 되며, 따라서 흡수액에 대한 냉매 기체의 포화 용해도는 감소한다. 이때 용액 펌프로 인해 펌핑된 냉매는 외부로부터 가열되어 냉매 기체가 지속적으로 유지되는 조건에 이른다. 이는 흡수액의 끓는점이 용매의 끓는점보다 높아 가능한 일종의 증류 방법이다. 고로 흡수기와 방출기 사이에는 과량의 냉매 증기가 존재하게 되며, 이들은 용액 펌프 - 발생기 - 응축기를 거쳐 액화된 후 팽창 밸브를 거쳐 증발기로 되돌아간다. 따라서 증발기의 냉매가 다시 증발기로 돌아오는 열역학적인 사이클이 만들어진다. 일련의 과정은 Fig.22에 더 상세하게 묘사하였다.

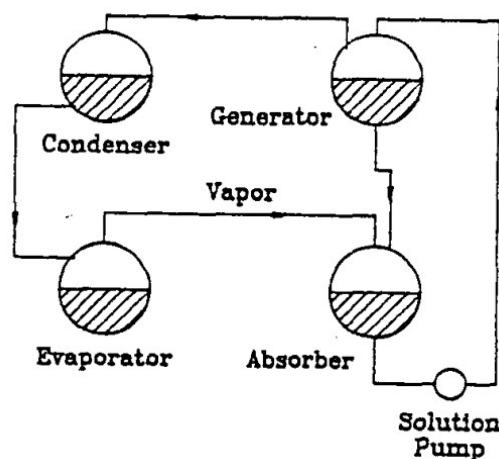


Fig.22 Example of Absorption cycle, where the refrigerant is water and solution is LiBr-water

따라서 흡수식 사이클을 갖춘 에어컨은 난방과 냉방 모두에 활용될 수 있다. 증발기에서 냉매가 기화하는 과정에서 기화열 흡수가 발생하므로 이는 주변 공기를 냉각시켜 냉방에 활용할 수 있다. 또한 응축기에서 발생하는 액화열과 흡수기에서 냉매의 용해열은 냉방에 활용이 가능하다.

일련의 열역학에 대한 논의는 Fig.23에서 정리할 수 있다.

종류	증기압축식	흡수식
열 방출($Q < 0$)	응축기	응축기, 흡수기
열 흡수($Q > 0$)	증발기	증발기

Fig.23 Source of endothermic, exothermic reaction in AC.

• 냉매 조건

앞서 언급한 냉방 사이클을 수행하기 위해서는 증기압축식 사이클에서의 냉매, 그리고 흡수식 사이클에서의 흡수액과 냉매는 특정한 열역학적 조건을 만족해야 한다.

냉매에는 여러 열역학적 조건이 요구된다. 에어컨은 냉매의 액체-기체 변환을 통한 냉방 사이클을 그 원리로 한다. 따라서 냉매가 에어컨의 가동 조건에서 고체상이 가능하다면 장치가 막혀 망가질 것이다. 따라서 냉매는 가동 조건에서 유체상으로 존재해야 한다. 또한 냉매가 상태 변화 과정에서 흡수하는 열량이 많을수록 냉방 효과는 극대화된다. 따라서 앞서 증발에 대해 정의한 잠열이 큰 용매가 선호된다. 이외에도 에어컨 내부의 여러 장치는 금속으로 구성되기에, 금속과 반응해서도 안 되며, 연소 등 반응을 일으키지 않는 - 안정성이 높은 화합물이 냉매로 채택돼야 한다.

더불어 냉매의 압축 조건 또한 효과적인 고려의 대상이 된다. 냉매를 압축시키는 데 너무 높은 압력이 필요한 경우 증기압축식 사이클에서 전성비가 감소한다.

흡수식 사이클에서 냉매는 더 다양한 조건들이 부여된다. 우선, 용해 과정에서 효과적인 발열 반응을 이끌어내기 위해 냉매는 흡수액과의 친화력이 상당히 좋아야 한다. 또한 generator에서 흡수액은 기화하지 않지만 냉매는 기화해야 한다. 따라서 냉매의 끓는점은 흡수액보다 낮아야만 유사-증류 과정이 가능하다. 따라서 흡수액은 냉매보다 끓는점이 구별 가능할 정도로 높아야 하며, 따라서 LiBr 등의 물질이 사용된다.

현대 사회에 도래하며 에어컨에 사용되는 물질에 환경윤리적 조건 또한 부여된다. 이는 과거 에어컨의 냉매로 사용했던 할로카본(염화플루오린화 탄소)가 오존층을 분해한다는 메커니즘이 부여된 이후의 시대적 흐름을 반영한 결과이다. 대표적인 냉매인 프레온 가스는 광화학반응에 의해 염소 자유 라디칼을 생성하는데, 그 반응식은 Fig.24에 제시하였다.

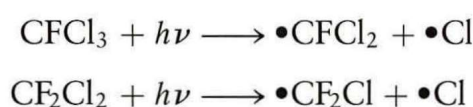


Fig.24 Reaction mechanism of free chlorine radical production

이후 생성된 염소 자유라디칼은 Fig.25의 메커니즘을 토대로 오존을 분해하게 된다.

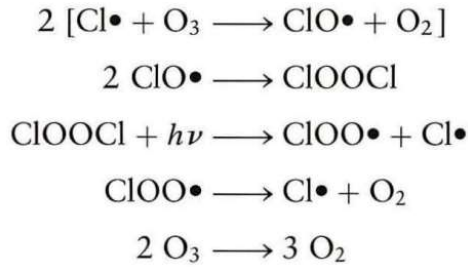


Fig.25 Decomposition of ozone by chlorine free radicals

다른 CFCs 용매들도 유사한 반응을 일으키므로 일련의 용매 사용은 환경화학적으로 금지의 대상이 되었다.

미국의 화학회사 듀폰⁵⁾은 일련의 물질들을 분류하기 위해 냉매에 대한 명명법을 제안하였다⁶⁾. 우선, 냉매의 이름에는 냉매(Regrigerant)를 의미하도록 첫 글자인 R을 대문자로 작성한다. 이후 하이픈(-) 뒤에 세 자리의 숫자를 작성하게 된다. 백의 자리 수는 탄소 수에서 1을 감한 것을 사용하고, 십의 자리 수는 수소 수에 1을 더한 것을, 그리고 1의 자리 수는 플루오르의 수를 나타낸다. 만일 이성질체가 존재하는 경우 이성질체를 만드는 분자 내 탄소 원자의 개수에 따라 차례대로 a, b..의 알파벳을 붙인다. 따라서 R-뒤에 제시된 R-숫자에 90을 더하면 원래 냉매의 화학식을 유추할 수 있다.

예를 들어 유명한 냉매 CCl_2F_2 를 생각해 보자. 분자 내 탄소 원자의 개수는 1이고, 플루오르의 개수는 2, 수소의 개수는 0이다. 따라서 R-숫자 표기에 따르면 이는 R-12(a)로 기술할 수 있다.

• 증기압축식 냉동 사이클에서 할로젠화 탄소(할로카본)의 냉매로서의 적합성에 대한 고찰

증기압축식 냉동 사이클에서 많이 사용되는 냉매는 프레온가스 등 할로카본이다. 본 절에서는 앞서 살펴본 냉매의 조건들을 기반으로 할로카본이 증기압축식 냉동 사이클의 용매로 채택되기 적합한 이유를 논하겠다. 우선, 할로젠 원소인 플루오린과 염소는 전기 음성도가 높다는 특성이 있다. 따라서 할로젠 원소와 비할로젠 원소와의 결합은 그 세기가 강해지게 된다. 따라서 할로젠화 탄소의 경우 결합으로 인해 분자 전체의 에너지가 상당히 안정화되는 특성을 띠게 된다. 더불어 탄소를 할로젠으로 충분히 포화시키면 분자 간 상호작용의 세기를 줄일 수 있다. 따라서 할로젠화 탄소는 다른 물질들에 비해 높은 휘발성을 갖게 된다.

5) 공식화된 것도 아닌, 화학 회사인 듀폰의 명명법을 사용하는 것은 이전의 명명법은 CFC, HCFC 등 준말이 너무 많아 일련의 체계를 직관화하기 위한 것으로 알려져 있다.

6) 적은 분자량을 가진 경우 위의 명명법을 비교적 엄격하게 적용되나, 큰 분자량을 가진 경우 임의성을 갖는 방식으로 규칙이 변화된다.

• 결론

에어컨은 냉매가 액체 상태에서 기체 상태가 되는 과정에서 발생하는 기화열 흡수를 통해 증발기 주변 공기를 냉각시키고, 이를 기계적 장치를 통해 에어컨 밖으로 내보내며 공간을 냉각시킨다. 이때 냉매를 액체 상태로 만드는 과정 및 기계적 장치에 따라 일련의 냉방 사이클은 증기압축식 사이클과 흡수식 사이클로 구분할 수 있다⁷⁾.

증기압축식 사이클에서는 압축기⁸⁾를 활용하여 액체를 냉각시키며, 이 과정에서 기계적인 일이 필요하게 된다. 따라서 전기 에너지는 기체의 부피를 감소시키는 일을 하기 위해 공급된다.

반면 흡수식 사이클에서는 흡수기라는 장치를 사용한다. 흡수식 냉방 사이클에서는 흡수액에 대한 냉매 기체(증기)의 용해 평형을 원리로 한다. 따라서 냉매 기체가 흡수액에 용해될 때, 그리고 냉매 기체의 응축 과정에서 에너지가 방출되므로 흡수식 냉방 사이클을 사용하는 에어컨은 설계를 통해 난방에도 활용할 수 있다. 이때 전기 에너지는 용매를 발생기로 수송하는 용액 펌프, 그리고 발생기를 가열시키는 과정에 투입된다. 이는 용매-흡수액 혼합물의 분리 과정을 포함하기에, 용매의 끓는점은 흡수액의 끓는점보다 월등히 낮아야 한다.

흡수식 사이클과 증기압축식 사이클 모두에서 냉매는 반응성이 낮으며, 온도 범위에서 안정한 액체로 존재해야 한다. 이는 기계 설계의 관점에서 냉매와 에어컨 내부 장치와의 반응을 방지하고 내부에 부산물이 생겨 에어컨이 오동작하는 것을 방지하기 위함이다. 따라서 과거에는 할로젠 기체로 포화시킨 탄소를 증기압축식 사이클의 냉매로 사용했지만 오존층 파괴 문제가 밝혀진 후 다른 냉매로 대체하여 사용하고 있다.

7) 경우에 따라 에어컨의 냉방 사이클을 여러 단계의 단열 과정을 통해 만들어진 스텔링 기관에 비유하는 경우가 있다. 스텔링 기관은 밀폐된 실린더 안에서 기체가 가열 - 팽창 - 냉각 - 수축하는 과정을 통해 동작하는 열기관이다. 하지만 에어컨에서는 기계 장치가 기체를 외부로 방출하는 추가적인 일을 수행하며, 더불어 균일 상에서의 과정이 아닌 고압 유체와 기체를 모두 포함하는 여러 상에서 일어나는 반응이기에 스텔링 기관에 완전히 적용하기는 어려운 부분이 있다. 따라서 본 보고서에서는 앞서 서술한 것과 같이 냉매의 $\Delta U = q + w$ 에서 압력과 부피 조건이 변하지 않으므로 기체의 팽창 일이 흡수/방출된 열의 크기에 비해 매우 작다고 근사하여 내부 에너지 변화 $\Delta U = nc_V \Delta T$ 는 열량의 흡수/방출에 의해 발생한다고 논리를 전개했다.

8) 압축기 또한 고정식 압축기와 여러 열역학적 조건에 대응해서 사용하는 가변용량 압축기가 존재한다. 하지만 가변용량 압축기는 에너지 효율을 증진시킬 수 있다는 장점이 있지만, 기술 개발이 비교적 더디고 용량의 보정을 위한 다른 기계적 장치가 많이 사용된다. 일련의 과정에서 물성이나 화학적 현상이 응용되는 부분은 아니기에 본 보고서에서는 생략했다(Kwon and Chun, 2007).

5. 실험에 사용한 에탄올 병에 표시되어있는 NFPA 위험물 분류법을 설명하시오.

• NFPA 위험물 분류법

NFPA 위험물 표기법은 미국화재예방협회(National Fire Protection Association)에서 위험 물질을 체계적으로 분류하고 대응하기 위해 만들어진 분류법이다. NFPA 위험물 분류법은 물질의 위험성을 효과적으로 전달되기 위해 중심에 대해 4개의 영역으로 분할되어 있는 마름모를 사용한다.

이때 마름모의 경우 4분할된 부분 중 위에 있는 부분부터 시계 방향으로 적색, 황색, 백색, 청색의 순서를 갖는다. 우선, 적색은 인화성에 대한 정보를 포함한다. 다음으로 황색은 물질의 불안정성이나 반응성에 대한 정보를 포함한다. 또한 청색은 접촉/노출에 대한 정보를 포함한다. 이때 적색, 황색, 청색은 마름모에 숫자를 표현하며, 이들 숫자는 안전성에 대한 의미를 갖는다. 이들의 구체적인 의미는 다음과 같다(Wikipedia, n.d.).

청색 - 건강 관련 정보

- 4. 매우 짧은 신체적 노출로도 사망 혹은 심각한 부상을 야기할 수 있음(예 : 시안화수소)
- 3. 매우 짧은 신체적 노출로도 일시적 혹은 만성적 부상을 야기할 수 있음(예 : 기체상태의 염소).
- 2. 만성적 접촉이 아닌 지속적/일반적 접촉으로 일시적 장애 혹은 부상을 유발할 수 있음.(예 : 클로로포름).
- 1. 노출시 경미한 부상을 유발할 수 있음. (예 : 송진/테레빈 유).
- 0. 건강상 위험이 되지 않으며, 특별한 주의가 필요하지 않음(예 : 라놀린).

적색 - 인화성

- 4. 평상적인 대기 환경에서도 즉시 혹은 완전히 증발하거나, 공기중에 확산되어 불타게 됨. 인화점 섭씨 23도 아래인 물질. (예 : 프로판 가스).
- 3. 일반적인 대기환경에서 연소할 수 있는 액체/고체류. 인화점 23도 이상 38도 이하인 물질.(예 : 가솔린).
- 2. 발화가 일어나려면 상대적으로 더운 환경에 위치하거나 지속적으로 가열되어야 함. 인화점 섭씨 38도 이상 93도 이하인 물질. (예 : 경유).
- 1. 충분히 가열되었을 경우 발화함. 인화점 섭씨 93도 이상인 물질. (예 : 콩기름).
- 0. 타지 않음(예 : 물).

황색 - 불안정성/반응성

- 4. 일반적인 대기 환경(기온/기압)에서도 폭발할 수 있는 물질 (예 : 니트로글리세린, RDX).
- 3. 반응에 직접적인 원인이 필요하거나, 충분히 가열되었거나, 큰 충격을 받으면 폭발하는 물질. 혹은 물과의 반응성이 높은 물질(예 : 불소).
- 2. 기온/기압 상승시 화학적 변화를 수반할 수 있고, 물과 쉽게 반응하거나, 물과 혼합시 폭발할 가능성이 있는 물질(예 : 나트륨).
- 1. 일반적으로 안정적이거나, 기온/기압 상승시 불안정해질 수 있는 물질. (예 : 아세틸렌).
- 0. 화기에 노출되어도 일반적으로 안정적이며, 물과 반응하지 않음. (예 : 헬륨).

상술한 내용은 0~4까지의 번호를 붙이는 대략적인 기준을 의미하며, 실제로는 더 복잡한 과정을 거쳐 서술이 이루어진다. 예를 들어, 건강지수(청색)의 경우 0은 ‘특별한 주의가 필요하지 않은 물질’로 간략하게 설명되어 있다. 하지만 실제로는 생체독성평가에서 호흡기/감각 기관에 자극이 되지 않는 물질로 밝혀지거나, 생물학적 치사도 LD50>2000mg을 충족하는 물질만으로 특정하는 등 협회 차원에서의 논의와 수치화된 기준을 적용하여 인덱스를 부여한다.

마지막으로 백색의 경우 위에서 언급하지 않은 물질의 성질을 다룬다. 예를 들어, 물과 높은 반응성을 갖는 알칼리 금속의 경우 ㄴ를 이용하여 표기한다. 또한 강한 산화제의 경우 OX/OXY의 표기를 통해 산화성을 가짐을 표현한다.

실험실에서 많이 사용하는 에탄올을 통해 NFPA 코드를 분석해 보자. Fig.26에서는 absolute ethanol(pure ethanol)의 NFPA 다이아몬드를 나타냈다(Sigma-Aldrich, 2014).



Fig.26 NFPA code of absolute ethanol

해당 분류에 의하면 순수한 에탄올의 건강 지수는 2로, 지속적이고 일반적인 접촉으로는 문제를 일으킬 수 있는 특성을 갖는다. 이는 실험실에서 고농도의 에탄올과 접촉했을 때 화학적 부상, 피부 통증 등이 어렵지 않게 발견된다는 점에서 납득할 수 있는 인덱스이다. 또한 에탄올의 인화성 지수는 3으로, 일반적인 대기 환경에서 쉽게 연소할 수 있는 물질임을 의미한다. 이는 에탄올은 램프의 발화액으로 사용될 정도로 높은 인화성을 가지고 있다는 점에서 또한 성질을 잘 표현하는 인덱스이다. 또한 에탄올의 반응성(안정성) 지수는 0이다. 이는 순수한 에탄올은 수소 결합이 가능하기에 에너지적 안정화가 나타난다는 점에서 가능한 설명이다⁹⁾.

이때 NFPA 위험물 표기법은 미국화재예방협회에서 개발된 표기법이기에 인화성/가연성 등 화재에 대한 속성에 높은 가중치를 부여하는 경향이 있다. 하지만 NFPA 표기법에서 위험성을 강조하지 않았다고 해서 해당 물질을 임의로 섭취하거나, 피부에 바르는 등 부주의하게 취급해도 된다는 의미는 아니다. 당연하지만 증류수의 NFPA 코드의 인덱스들은 모두 0이다(IrvineScientific, 2014). 하지만 실제 실험실 조건에서 증류수는 실험실의 다른 기체가 용해될 수도 있으며, 물과의 반응성이 매우 높은 물질들(염화 코발트, 알칼리 금속 등)이 주변에 존재할 수 있다.

즉, NFPA 코드와 MSDS는 실험 안전을 위해 필수적으로 참고해야 하는 최소한의 기준이라고 볼 수 있다. 따라서 실제 실험실에서는 시료의 분리 보관, 충분한 환기 등 기본적인 규약들을 지켜야 한다.

9) 경우에 따라 순수 에탄올의 반응성 지수를 1로 분류하기도 한다. 시약 회사에 따라 absolute ethanol에 대한 index를 030으로 기재하는 경우 또한 발견됐다.

참고 자료 및 출처(References)

- Bigley, N.J., Perymon, H., Bowman, G.C., Hull, B.E., Stills, H.F. & Henderrson R.A. (2007). Inflammatory cytokines and cell adhesion molecules in a rat model of decompression sickness. *Journal of Interferon & Cytokine Research*, 28(2), 55-63.
<https://doi.org/10.1089/jir.2007.0084>
- Campbell, N.A., Urry, L.A., Cain, M.L., Wasserman S.A., Minorsky P.V. & Reece J.B. (2018). Biology, a global approach. Pearson. 1098-1122.
- Harris, D.C. (2006). Quantitative Chemical Analysis. Freeman. 378-423.
- Harris, D.C. (2006). Quantitative Chemical Analysis. Freeman. 501-555.
- Harris, D.C. (2006). Quantitative Chemical Analysis. Freeman. 588-627.
- Henneman, H.E. & Stefan, H.G. (1999). Albedo models for snow and ice on a freshwater lake. *Cold Region Science and technology*, 29(1), 31-48.
[https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(99\)00002-6](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(99)00002-6)
- Hur Y.G. & Hwang H.S. (2002). A review of symptom & rehabilitative therapy for patients with the decompression sickness. *Journal of Korean Physical Therapy Science*, 9(1), 159-166.
- Hwang, H.S. (1996). Development trend of CFCs alternatives. *The Magazine of the Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea*, 25(1), 5-27.
<https://doi.org/10.1002/dta.1637>
- Jakobson Gerd. & Kronstrand R. (2014). Segmental analysis of amphetamine in hair using a sensitive UHPLC-MS/MS method. *Drug Testing and Analysis*, 6(51), 22-29.
- Kim, J.Y., Shin, S.H., Ko, B.J., Chung, J.C., Suh, Y.J. & In, M.K. (2009). Simultaneous determination of amphetamine derivatives and norketamine in hair by GC-MS/MS. *Analytical Science & Technology*, 22(3), 210-218.
- Korea Electrical Products Safety Association. (2007). Principles of heat pump. *Safety*21, 8, 54-57.
- Korea Meteorological Administration. (n.d.). Forecasters' training textbook for beginners - Remote exploration.
- Kwon, Y.C. & Chun, C.K. (2007). Temperature characteristics of condenser and evaporator of air-conditioner applying variable capacity compressor under cooling condition. *Journal of Korea Academia-Industrial cooperation study*, 8(6). 1325-1331.
- Nelson, D.L. & Cox M.M. (2004). Principles of biochemistry. Freeman. 157-189.
- Oh, M.D. (1993). Air-conditioning technology using absorption heat pump. *The Magazine of the Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea*, 22(5), 348-370.

- Oxtoby, D.W., Gillis, H.P. & Butler, L.J. (2016). Principles of Modern Chemistry. 441-473.
- Oxtoby, D.W., Gillis, H.P. & Butler, L.J. (2016). Principles of Modern Chemistry. 480-562.
- Oxtoby, D.W., Gillis, H.P. & Butler, L.J. (2016). Principles of Modern Chemistry. 589-609.
- Seo, Y.W., Chu, J.E. & Ha, J.K. (2010). On response of surface equilibrium temperature for change of surface characteristics: An EBM study. *The Korean Journal of Quaternary Research*, 24(2). 1-11.
- Sigma-Aldrich. (2014). Ethanol, pure-Safety Data Sheet.
<https://dept.harpercollege.edu/chemistry/sds/Ethanol%20Absolute.pdf>
- Tang, S.E., Laio, W.I., Wu, S.Y., Pao, H.P., Huang, K.L. & Chu, S.J. (2020). The blockade of store-operated calcium channels improve decompression sickness in rats. *Frontiers in Physiology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.01616>
- Trusel, L.D., Das, S.B., Osman, M.B., Evans, M.J., Smith, B.E, Fetweis, X., McConnell, J.R., Noel, B.P.Y. & Broeke, M.R. (2018). Nonlinear rise in Greenland runoff in response to post-industrial Arctic warming. *Nature*, 564. 104-108.
<https://doi.org/10.1038/s41586-018-0752-4>
- Yoon, S.T., Lee, W.S., Nam, S.H., Lee, C.K., Yun, S.K., Heywood, K., Boehme, L., Zheng, Y., Lee, I.H., Choi, Y., Jenkins, A., Jin, E.K., Larter, R., Wellner, J., Dutrieux, P. & Bradley, A.T. (2022). Ice front retreat reconFigs meltwater-driven gyres modulating ocean heat delivery to an Antarctic ice shelf. *Nature Communications*, 13(206).
<https://doi.org/10.1038/s41467-022-27968-8>
- Zhang, Y., Gao, T., Kang, S., Shanguan, D. & Luo, X. (2021). Albedo reduction as an important driver for glacier melting in Tibetan Plateau and its surrounding areas. *Earth-Science Reviews*, 220. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103735>