

제로 길이 스프링 및 슬링키 코일

제로 유효 길이 스프링(ZLS)은 스프링의 길이에 비례하여 힘이 작용하는 스프링입니다, $F = kL$ 의 경우 $L > L_0$ 여기서 L_0 은 용수철의 최소 길이이자 펴지지 않은 길이입니다. 그림 1은 ZLS의 힘 F 과 스프링 길이 L 사이의 관계를 보여 주며, 여기서 선의 기울기는 스프링 상수 입니다. k

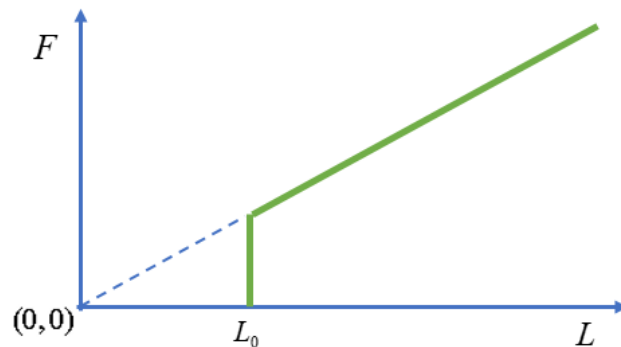


그림 1: 힘 F 과 스프링 관계 L

ZLS는 지진학에 유용하며 중력 가속도 변화를 매우 정확하게 측정할 수 있습니다. 여기서는 무게가 Mg 를 초과하는 균질 ZLS를 고려하겠습니다. 이에 해당하는 무차원 비율을 정의합니다, $\alpha = kL_0 / (Mg) \leq 1$ 를 정격하여 스프링의 상대적인 부드러움을 특성화합니다. "슬링키"로 알려진 장난감은 이러한 ZLS일 수 있습니다(반드시 그런 것은 아님).

A.1 길이 ΔL 의 미신축 ZLS 스프링의 세그먼트가 다음과 같다고 가정합니다. 0.5pt
힘에 의해 늘어난 F , 무중력 조건에서, 이 길이 Δy 는 얼마입니까?
의 함수인 F , ΔL 및 스프링의 매개 변수로 이 세그먼트를 수 있나요?

A.2 길이 세그먼트에 대해, 이를 늘리는 데 필요한 일 ΔW 를 다음에서 계산합니다. 0.5pt
원래 길이 ΔL 를 길이 늘립니다.
 $0 \leq L \leq L_0$

파트 A: 통계(3.0점)

이 문제에서는 용수철의 한 지점을 용수철이 펴지지 않은 상태에서 용수철 바닥으로부터의 거리로 표시합니다. 스프링이 늘어나지 않았을 때 스프링의 바닥으로부터의 거리로 표시합니다. 특히 용수철의 모든 지점에 대해 용수철이 늘어날 때 변하지 않은 상태로 유지됩니다.

A.3 스프링을 상단 끝에 매달아 그 아래로 뻗어 있다고 가정합니다. 2.0pt
자신의 무게, 평형 상태에서 매달린 용수철의 총 길이 H 얼마인가요?
 L_0 및 α 로 답을 표현하세요.

파트 B: 역학(5.5점)

실험에 따르면 스프링을 정지 상태로 매달았다가 놓으면 위쪽부터 서서히 수축하는 반면 아래쪽은 고정된 상태로

이론



Q1-2

영어(공식)

유지됩니다(그림 2 참조). 시간이 지남에 따라 수축하는 부분은 단단한 덩어리로 움직이며 스프링의 회전이 더 누적되는 반면, 정지된 부분은 더 짧아집니다. 스프링의 모든 지점은 움직이는 부분이 때만 움직이기 시작합니다. 하단 끝

의 스프링이 완전히 접혀서 펴지지 않은 길이에 도달해야만 움직이기 시작합니다.

L_0 . 그 후 수축된 스프링은 중력의 영향을 받아 딱딱한 물체가 되어 넘어지지 않고 계속 아래로 똑바로 떨어집니다.

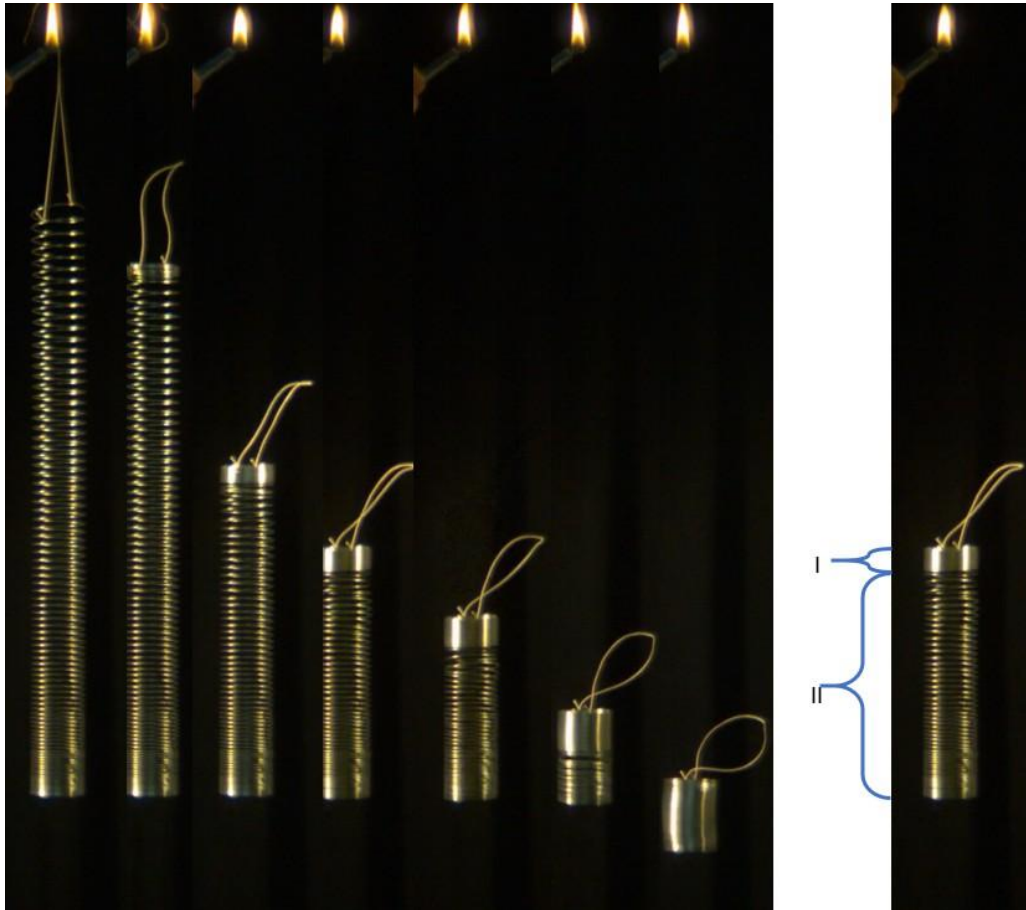


그림 2: 왼쪽: 슬링기가 자유 낙하하는 동안 촬영한 일련의 사진. 오른쪽: 스프링이 자유 낙하하는 동안 움직이는 부분 I과 정지된 부분 II.

문제의 나머지 부분에서는 이 설명된 모델을 기반으로 솔루션을 작성해야 합니다. You 는 공기 저항을 무시할 수 있지만 L_0 을 무시해서는 안 됩니다.

- B.1** 스프링이 풀리는 순간부터 다음이 될 때까지 걸리는 시간 t_c 을 계산합니다. 최소 길이로 완전히 축소됩니다 L_0 . 답을 다음 중 하나로 표현하세요.
 $L_0 g$ 및 α
 $k=1.02 \text{ N/m}$, $L_0=0.055 \text{ m}$ 인 스프링에 대해 t_c 의 수치를 .
 와 $M=0.201 \text{ kg}$ 을 9.80 m/s^2 로 가정합니다.

2.5pt



Q1-4

영어(공식)

- B.2** 이 작업에서 l 은 파트 I 사이의 경계 좌표를 나타내는 데 사용됩니다. (그림 2에서 움직이는 부분)과 II(정지된 부분)로 나뉩니다. 특정 순간에 정지된 부분은 여전히 존재하지만 질량은 $m(l) = L M_0$ 이며, 움직이는 부분은 다음과 같은 알려진 순간 속도 $v_l(l)$ 로 움직입니다. 이 순간 Sh_0 은 다음과 같습니다. ($\sqrt{\frac{A}{A+B}}$ 정지된 부분이 있는 동안) 움직이는 부분의 속도는 v_l (입니다). $= \frac{A}{A+B}$ 상수 A 및 B 을 $L_0 g$ 및 α 로 표현합니다.

2.5pt

- B.3** B.2에 근거하여, 용수철의 움직이는 부분의 최소 속도 $v_{(분)}$ 을 다음에서 구하십시오.의 동작 과정, 발사 후와 지면에 닿기 전을 촬영합니다. Express $L_0, \alpha A, B$ 에 대한 귀하의 답변입니다.

0.5pt

파트 C: 에너지학(1.5점)

- C.1** 열을 발생시켜 손실된 기계 에너지의 양 Q 을 계산하세요, 스프링이 풀리는 순간부터 스프링이 닿기 직전까지 ground. L_0, Mg, α 로 답을 표현하세요.

1.5pt

전자레인지의 물리학

이 문제에서는 전자 레인지에서 마이크로파가 발생하고 음식을 데우는 데 사용되는 것에 대해 설명합니다. 마이크로파 방사선은 "마그네트론"이라는 장치에서 생성됩니다. 파트 A는 마그네트론의 작동에 관한 것이고, 파트 B는 음식에 마이크로파가 흡수되는 것에 관한 것입니다.

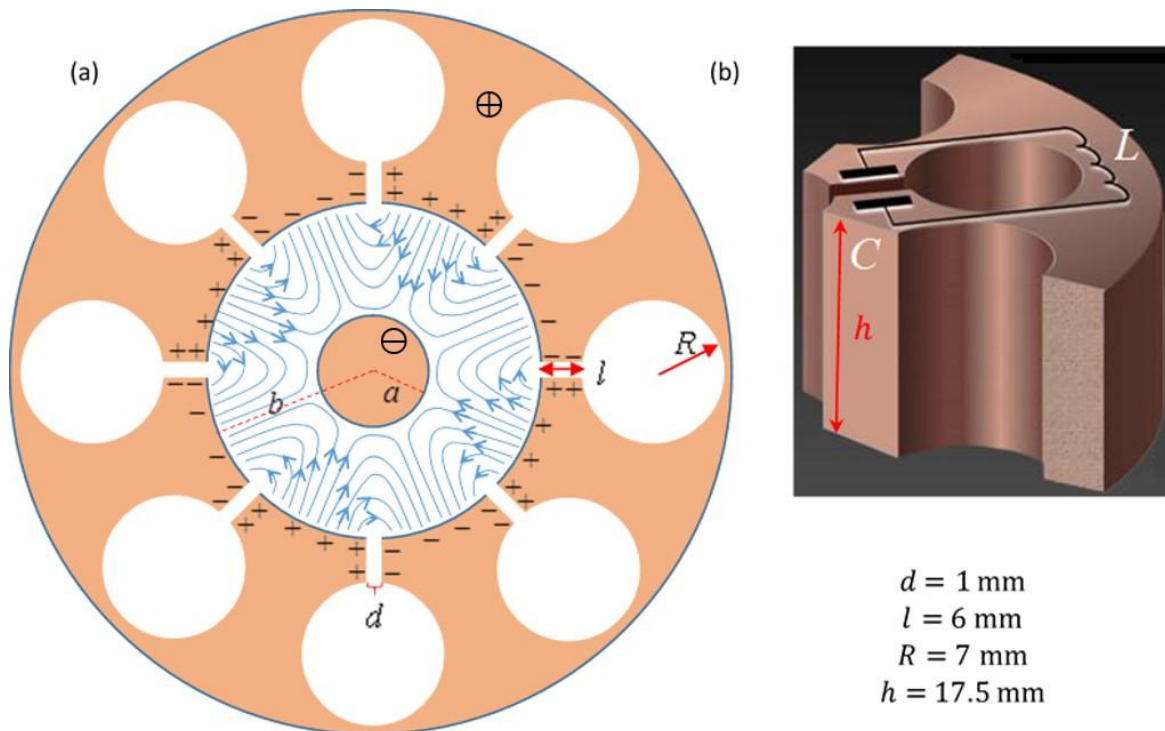


그림 1

파트 A: 마그네트론의 구조 및 작동(6.6점)

마그네트론은 마이크로파 방사선을 펄스(레이더 애플리케이션용) 또는 연속적으로(예: 전자 레인지) 발생시키는 장치입니다. 마그네트론에는 자체 증폭 발진 모드가 있습니다. 마그네트론에 정적(비교대) 전압을 공급하면 이 모드가 빠르게 여기됩니다. 이렇게 생성된 마이크로파 방사선은 마그네트론 밖으로 전송됩니다.

일반적인 전자 레인지 마그네트론은 단단한 구리 원통형 음극(반경 a)과 주변 양극(반경 b) 구성됩니다. 후자는 원통형 구멍이 뚫려 있는 두꺼운 원통형 껍질 모양을 하고 있습니다. 이러한 공동을 "공진기"라고 합니다. 공진기 중 하나는 마이크로파 에너지를 외부로 전송하는 안테나와 연결되어 있으며, 다음에서는 안테나에 대해서는 설명하지 않겠습니다. 모든 내부 공간은 진공 상태입니다. 그림 1(a)에 표시된 것처럼 공진기가 8개인 일반적인 마그네트론을 예로 들어보겠습니다. 단일 공진기의 3차원 구조는 그림 1(b)에 나와 있습니다. 여기에 표시된 바와 같이, 8개의 캐비티는 각각 인덕터-커패시터(LC) 공진기 역할을 하며 작동 주파수는 $f = 2.45 \text{ GHz}$ 입니다.

그림 1(a)의 페이지 바깥쪽을 가리키는 마그네트론의 세로축을 따라 정적 균일 자기장이 적용됩니다. 또한 양극(양극 전위)과 음극(음극 전위) 사이에 일정한 전압이 인가됩니다. 음극에서 방출된 전자는 양극에 도달하여 전하를 띠게 되고, 전하의 부호가 서로 반대인 진동 모드로 여기됩니다.



Q2-2

영어(공식)

인접 공진기. 공동의 진동은 이러한 진동을 증폭시킵니다.

위에서 설명한 프로세스는 음극 사이의 공간에 앞서 언급한 주파수(그림 1(a)의 파란색 선, 정전기는 표시되지 않음)로 교대 전기장을 생성합니다.

정전압이 인가되어 발생하는 정전기장 외에도 양극과 음극이 교대로 전기장을 형성합니다. 정상 상태에서 양극과 음극 사이의 교류 전기장의 일반적인 진폭은 대략 다음과 같습니다.

정전기장입니다. 음극과 양극 사이의 공간에서 전자의 움직임은 정전계와 영향을 모두 받습니다. 이로 인해 양극에 도달한 전자는 정전계에서 얻은 에너지의 약 80%를 전달하게 됩니다. 방출된 전자 중 소수는 음극으로 돌아와 추가 전자를 방출하여 교류장을 더욱 증폭시킵니다.

각 공진기는 커패시터와 인덕터로 생각할 수 있습니다(그림 1(b) 참조). 커패시터는 주로 공진기 표면의 평면 부분에서 발생하고 인덕터는 원통형 부분에서 발생합니다. 공진기의 전류가 원통형 캐비티 표면에 매우 가깝게 균일하게 흐르고 이 전류에 의해 생성되는 자기장의 세기가 이상적인 무한 솔레노이드의 배라고 가정해 보겠습니다. 공진기 형상을 정의하는 다양한 길이가 그림 1(b)에 나와 있습니다. 그리고

진공 투과도와 투자율은 각각 $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ 및 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ (H/m)}$ 입니다.

A.1 위의 데이터를 사용하여 단일 공진기의 주파수 f_{est} 를 추정합니다. (Your 결과는 실제 다를 수 있습니다($f=2.45\text{GHz}$). 실제 값을 사용하세요. 질문의 나머지 부분)

0.4pt

아래의 과제 A.2는 마그네트론 자체를 다루지는 않지만 관련 물리학을 소개하는 데 도움이 됩니다. 음의 y 축을 따라 향하는 균일한 전기장 ($\vec{E} = -E_0 \hat{y}$)과 양의 x 축을 따라 향하는 균일한 자기장의 영향을 받아 자유 공간에서 움직이는 전자를 생각해 보겠습니다,

$\vec{B} = B_0 \hat{x}$ (E_0 및 B_0 양수, $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ 은 기존 방식으로 방향이 지정된 단위 벡터입니다). t 시점의 전자 속도를 $\vec{v}(t)$ 로 표시해 봅시다. 전자의 드리프트 속도 $\vec{v}_D$ 전자의 평균 속도로 정의됩니다. m 및 $-e$ 으로 각각

A.2 다음 두 경우 각각에서 $\vec{v}_D$ 을 찾으십시오. 또한 답안에서 시간 간격 0 동안 전자의 궤적(실험 프레임 내)을 시트에 표시합니다 <math>t < \frac{4\pi m}{e B_0}</math>:
1.에서 $t=0$ 전자 속도는 $\vec{v}(0) = (3E_0/B_0)\hat{x}$ 입니다,
2. $t=0$ 에서 전자 속도는 $\vec{v}(0) = -(3E_0/B_0)\hat{x}$ 입니다.

1.5pt

전자의 질량과 전하를 나타냅니다.

이제 마그네트론에 대한 논의를 다시 시작하겠습니다. 음극과 양극 사이의 거리는 다음과 같습니다.

15mm. 앞서 언급한 교번 필드로 인한 에너지 손실로 인해 최대 운동량인 각 전자의 에너지는 $K_{\text{max}} = 800 \text{ eV}$ 를 초과하지 않습니다. 정적 자기장 강도는 $B_0 = 0.3 \text{ T}$ 입니다.

- 31

A.3 전자 운동 궤적의 최대 반지름 r 을 다음에서 수치적으로 추정하십시오. 이 기준 프레임을 대략 관성적인 것으로 간주하여 이 동작이 대략 원형인 기준 프레임을 설정합니다.

0.4pt

전자 질량과 전하량은 $m = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ 및 $-e = -1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ 입니다.

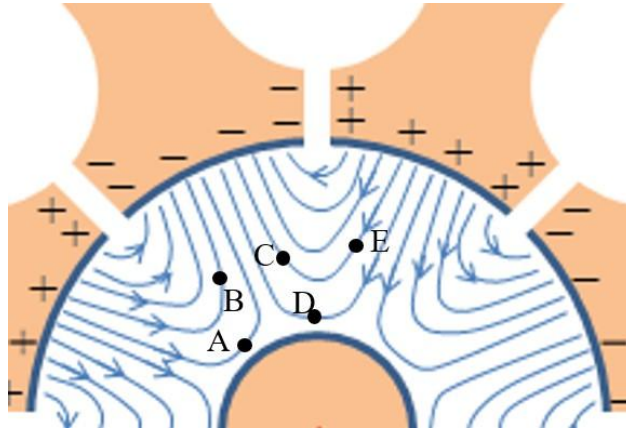


그림 2

- A.4** 그림 2는 특정 시점의 양극과 1.2pt 음극 사이의 교류 전기장 선을 보여줍니다(정전계는 표시되지 않음). 에 표시
 답안지에는 A, B, C, D, E에 위치한 전자 중 양극을 향해 표류하는 전자와 음극을 향해
 표류하는 전자, 그리고 그 순간 반경에 수직인 방향으로 표류하는 전자가 적혀 있습니다.

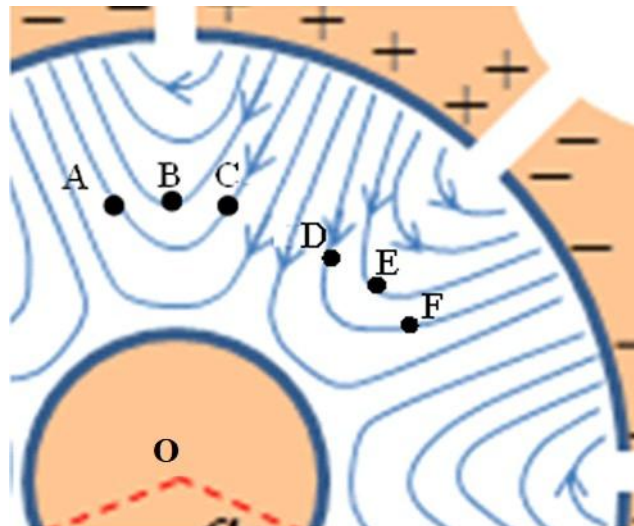


그림 3

그림 3은 특정 양극과 음극 사이의 교류 전기장 선(없음)을 보여줍니다. 그 순간 6개의 전자의 위치는 A, B, C, D, E, F로 표시되며 모든 전자는 음극에서 같은 거리에 있습니다.

- A.5** 그림 3에 표시된 상황을 생각해 보세요. 여섯 개의 전자 쌍 AB, AC, BC, DE, DF, EF, 각각의 드리프트가 다음을 유발하는지 답안지에 표시하십시오. 위치 벡터 사이의 각도(음극의 중심 O에서 측정)가 그 순간에 증가하거나 감소하는 각도입니다.

1.2pt

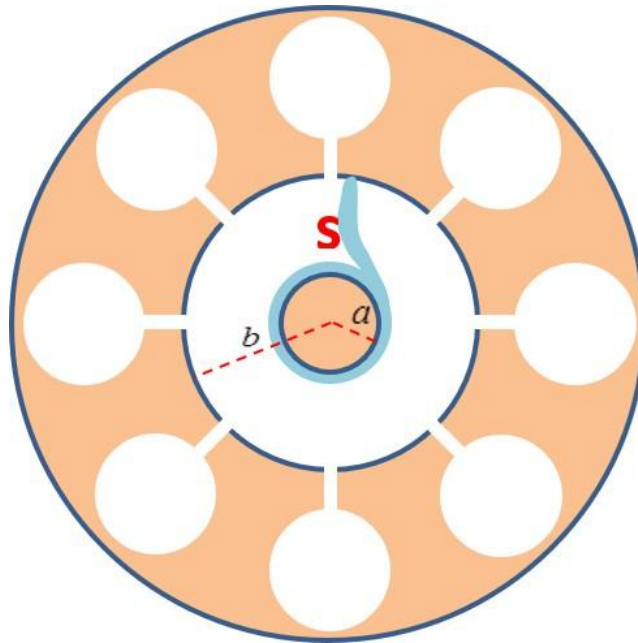


그림 4

과제 A.5에서 발견한 패턴은 음극과 양극 사이의 공간에 있는 전자를 스포크에 집중시키는 집중 메커니즘 역할을 합니다. 그림 4는 S로 표시된 스포크 중 하나를 보여줍니다.

- A.6** 답안지에 그 순간의 다른 스포크를 묘사합니다. 화살표로 표시의 회전 방향을 구하고 평균 각속도를 계산합니다 m_s .

0.8pt

음극과 양극의 중간에 있는 총 전기장이 음극에서 양극까지의 방사형 선을 따라 평균 정적 값과 같고 스포크가 해당 영역에서 대략 방사형이라고 근사화합니다. 음극 및 양극 반경(및 , 각각)은 그림 4에 정의되어 있습니다.

- A.7** 작동에 필요한 정전압 V_0 에 대한 대략적인 식을 구합니다. 를 설명된 방식으로 마그네트론에 연결합니다. (이 표현은 마그네트론 작동에 필요한 최소값에 대한 근사치를 제공하며, 최적의 전압은 다소 높습니다.)

1.1pt

파트 B: 마이크로파 복사와 물 분자의 상호작용(3.4점)

이 부분에서는 조리, 즉 순수하거나 짠 물과 같은 손실 유전체 물질을 가열하는 데 마이크로파 복사(마그네트론 안테나에서 식품 챔버로 방사)를 사용하는 방법을 다룹니다.



(예를 들어 수프에 대한 우리의 모델입니다).

전기 쌍극자는 두 개의 동일하고 반대되는 전하 q 및 $-q$ 작은 거리의 구성입니다 d 를 분리합니다. 전기 쌍극자 벡터는 음전하에서 양전하를 가리키며, 그 크기는 다음과 같습니다. $p=qd$.

시간 의존적 전기장 $\vec{E}(t) = E(t)\hat{x}$ 는 상수 $\vec{p}(t)$ 의 단일 쌍극자에 적용됩니다. 크기 $p_0 = |p(t)|$. 쌍극자와 전기장 사이의 각도는 $\theta(t)$ 입니다.

- B.1** 선거에 의해 가해지는 토크 $\tau(t)$ 의 크기 모두에 대한 식을 작성합니다. 트라이 필드와 필드에서 쌍극자로 전달되는 전력 $H_i(t)$ 입니다, $p_0, E(t), \theta(t)$ 및 그 도함수의 관점에서.

0.5pt

물 분자는 극성이므로 전기 쌍극자로 취급할 수 있습니다. 액체 상태의 물 분자는 수소 결합이 강하기 때문에 독립적인 쌍극자로 취급할 수 없습니다. 그보다는 편광 벡터 $\vec{P}(t)$ 를 참조해야 하는데, 이는 쌍극자 모멘트 밀도(물 분자 앙상블의 단위 부피당 평균 쌍극자 모멘트)입니다. 편광 $\vec{P}(t)$ 은 (마이크로파 방사선의) 국부적으로 적용된 교류 전기장 $E(t)$ 와 평행하며, 국부 교류 전기장과 진폭에 비례하는 진폭으로 시간에 따라 진동하지만 위상 지연 δ 을 갖습니다.

물 속 특정 위치의 국부 교류 전기장은 $\vec{E}(t) = E_0 \sin(mt)\hat{x}$ 이며, 여기서 $m = 2\pi f$ 입니다, 편광 $\vec{P}(t) = \beta \epsilon_0 E_0 \sin(mt - \delta)\hat{x}$ 를 발생시키고, 여기서 무차원 상수 β 다음과 같은 성질을 갖습니다. 물.

- B.2** 단위 부피 ab-당 시간 평균 전력 $\langle H(t) \rangle$ 식을 구합니다. 물에 흡수됩니다. 해당 동안의 시간 종속 주기 변수 $f(t)$ 의 시간 평균입니다. T 로 정의됩니다:

0.5pt

$$\langle f(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) dt \quad (1)$$

이제 물을 통한 방사선의 전파를 고려해 보겠습니다. 상대 유전 상수 ϵ_r 의 물(전자기장 주파수에서)은 ϵ_r 이며, 이에 해당하는 물의 굴절률은 다음과 같습니다. $n = \sqrt{\epsilon_r}$ 입니다. 전기장의 순간 에너지 밀도는 $\frac{1}{2} \epsilon_r \epsilon_0 E^2$ 로 주어집니다. 시간 평균 전기장과 자기장의 에너지 밀도가 동일합니다.

- B.3** 시간 평균 복사 에너지 플럭스 밀도를 $I(x)$ (평균)으로 표시하겠습니다. 단위 면적당 방사선 전력 흐름). 여기 x 에서 침투 깊이를 확인할 수 있습니다. 로 설정하면 방사선은 x 방향으로 전파됩니다. 표현식 찾기 $I(x)$ 에 대한 플럭스 밀도 $I(x)$ 의 의존성을 x 에서 확인할 수 있습니다. 물에서의 플럭스 밀도 표현인 $I(0)$ 이 결과에 나타날 수 있습니다.

1.1pt

위상 지연 δ 은 물 분자 간의 상호 작용의 결과입니다. 이는 $\tan \delta = \epsilon_i / \epsilon_r$ 관계를 통해 무차원 유전 손실 계수 ϵ_i 및 상대 유전 상수 ϵ_r (둘 다 복사 각 주파수 m 및 온도에 따라 달라짐)에 따라 달라집니다. δ 이 충분히 작을 때, 물속의 침투 깊이 x 에서의 전기장은 다음과 같이 주어집니다:

$$\vec{E}(x, t) = \vec{E}(0) e^{-\frac{1}{2} n k_0 x \tan \delta} \sin(n k_0 x - mt) \quad (2)$$

이론



Q2-6

영어(공식)

여기서 $k_0 = m/c$ 및 $c = 3.0 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ 은 진공 상태에서의 빛의 속도입니다.

B.4 $\tan \delta \approx \sin \delta$ 근사값을 사용하고 코피에 대한 식을 구합니다.
 ϵ_r 다른 매개변수와 관련하여 작업 B.2에 정의되어 있습니다.

0.6pt

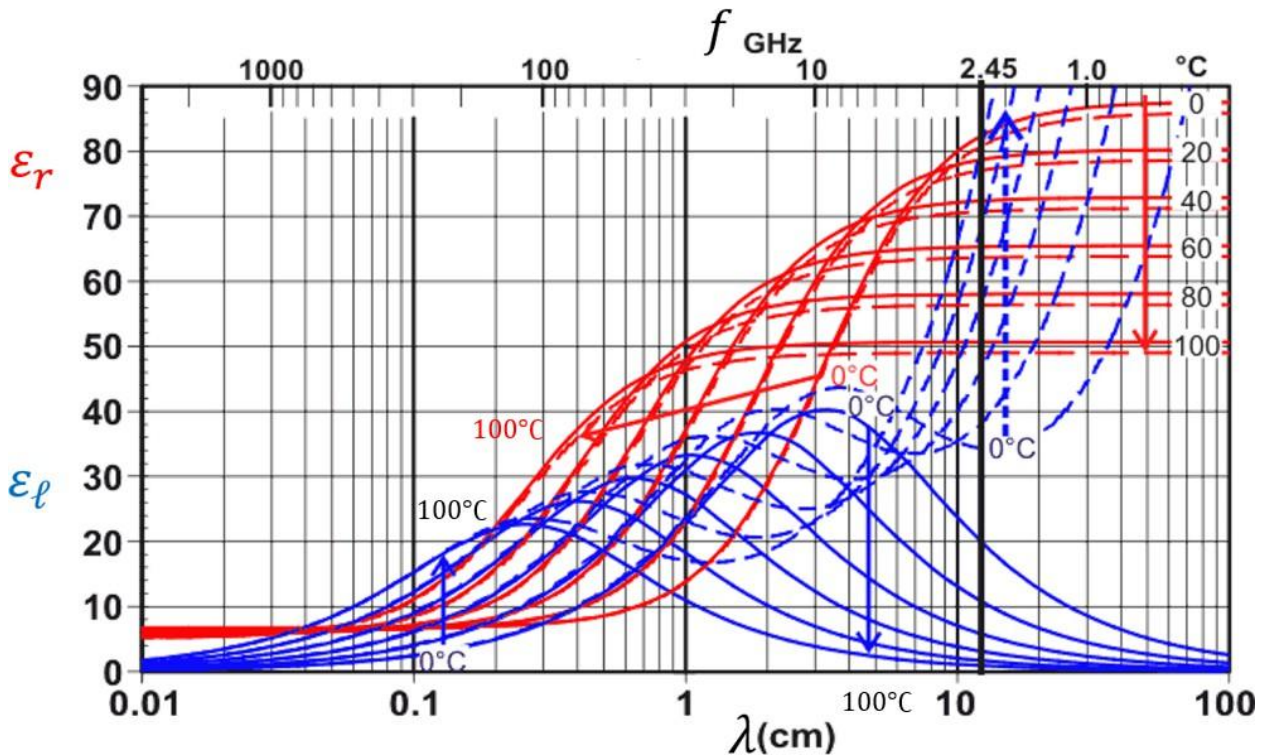


그림 5. 화살표는 0° C에서 다음과 같이 온도에 따른 곡선의 변화를 나타냅니다.
 100° C.

그림 5는 여러 온도에서 순수한 물(실선)과 물 속의 소금 물은 용액(점선)에 대한 파장 또는 주파수의 함수로서 (파란색) 및 (빨간색)을 나타냅니다. 각도 주파수 ω (°) (-1은 굵은 세로선으로 표시되어 있습니다. 아래에서는 이 주파수에서의 마이크로파 방사만을 고려합니다.

B.5 그림 5를 사용하여 다음 질문을 해결하세요:

0.7pt

- 20° C의 물의 경우, 침투 깊이 $x_{1/2}$ 당 전력을 구합니다.
단위 볼륨은 $x=0$ 의 값의 절반으로 줄어듭니다.
- 답안지에 침투 여부 표시 2. 마이크로파 방사선의 물속 침투 깊이는 온도에 따라 증가, 감소 또는 동일하게 유지됩니다.
- 수프(물은 소금 용액)에 대한 마이크로파 방사선의 침투 깊이가 온도에 따라 증가하는지, 감소하는지 또는 동일하게 유지되는지 답안지에 표시하십시오.

열음향 엔진

열음향 엔진은 열을 음향 파워, 즉 음파로 변환하는 장치로 일종의 기계 작동 방식입니다. 다른 많은 열 기계와 마찬가지로 역으로 작동하여 냉장고가 될 수 있으며, 소리를 사용하여 차가운 곳에서 뜨거운 저장소로 열을 펌핑합니다. 높은 작동 주파수는 열 전도를 줄이고 작업 챔버를 가둘 필요가 없습니다. 다른 많은 엔진 유형과 달리 열 음향 엔진은 작동 유체 자체를 제외하고는 움직이는 부품이 없습니다.

열음향 기계의 효율은 일반적으로 다른 엔진 유형보다 낮지만 설치 및 유지보수 비용에서 이점이 있습니다. 이는 태양열 발전소 및 폐열 활용과 같은 재생 에너지 응용 분야에 대한 기회를 창출합니다. 본 분석에서는 외부 장치에 전력을 공급하기 위한 추출 또는 변환은 무시하고 시스템 내에서 음향 에너지를 생성하는 데 초점을 맞출 것입니다.

파트 A: 닫힌 튜브의 음파(3.7점)

길이가 L 이고 단면적 S 인 단열 튜브의 축이 x 방향을 따라 있다고 가정해 보겠습니다. 튜브의 두 끝은 $x = 0$ 및 $x = L$ 에 있습니다. 튜브는 이상적인 기체로 채워져 있으며 양쪽 끝이 밀봉되어 있습니다. 평형 상태에서 기체는 온도 T_0 , 압력 p_0 및 질량 밀도를 갖습니다.

ρ_0 . 점도는 무시할 수 있고 기체 운동이 x 방향으로만 이루어진다고 가정합니다. 기체 속성은 수직인 y 및 z 방향에서 균일합니다.

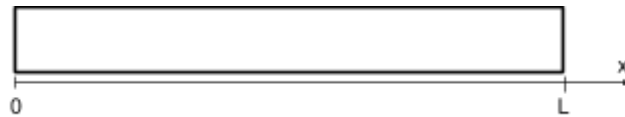


그림 1

- A.1** 정상 음파가 형성되면 기체 요소는 x 방향으로 진동합니다. 각도 주파수 m . 진동의 진폭은 각각에 따라 다릅니다. 요소의 평형 위치 x 를 튜브를 따라 설정합니다. 세로 변위 평형 위치에서 각 기체 원소의 x 는 다음과 같이 주어집니다.

0.3pt

$$v(x,t) = a \sin(kx) \cos(mt) = v_{(1)(x)} \cos(mt) \quad (1)$$

(v 에서 가스 요소의 변위에 대해 설명합니다).

여기서 $a \ll L$ 은 양의 상수, $k = 2\pi/\lambda$ 은 파수, λ 은 파장. 이 시스템에서 가능한 최대 파장 $\lambda_{\text{최대}}$ 은 얼마입니까?

이 질문에서는 $\lambda = \lambda_{\text{최대}}$ 의 진동 모드를 가정합니다.

이제 와 사이에 위치한 좁은 가스 소포가 있다고 가정해 보겠습니다. $x \rightarrow x + \Delta x$ ($\Delta x \ll L$). 과제 A.1의 변위 파의 결과로 소포는 축을 따라 진동하고 부피 및 기타 열역학적 특성의 변화를 겪습니다.

다음 작업에서는 열역학적 속성에 대한 이러한 모든 변화가 교란되지 않은 값에 비해 작다고 가정합니다.



Q3-2

영어(공식)

- A.2** 소포 부피 $V(x,t)$ 는 $V_0 = S\Delta x$ 의 평형값을 중심으로 진동합니다. 형식을 가지고

0.5pt

$$V(x, t) = V_{(0)} + V_{(1)}(x) \cos(mt).$$

(2)

- A.3** 음파의 결과로 기체의 총 압력이 다음과 같은 형태를 취한다고 가정합니다.

0.7pt

$$p(x,t) = p_0 + p_1(x) \cos(mt).$$

(3)

기체 소포에 작용하는 힘을 고려하여 진폭 $p_1(x)$ 를 계산합니다.
의 압력 진동을 선행 순서로, 위치 측면에서 x , 등식
리브리엄 밀도 ρ_0 , 변위 진폭 a 및 파동 k
및 m

음향 주파수에서는 가스의 열전도도를 무시할 수 있습니다. 우리는 가스 소포의 팽창과 수축을 순수한 단열로 취급하여 $pV^\gamma = \text{const}$, 여기서 단열 상수는 무엇입니까?

- A.4** 위의 관계와 이전 작업의 결과를 사용하여 표현식을 얻습니다.
속도 $c = m/k$ 를 먼저 주문합니다. Express
 p_0, ρ_0 및 단열 상수 γ 에 대한 귀하의 답변입니다.

0.3pt

- A.5** 단열 팽창과 접촉으로 인한 기체 온도의 변화는 다음과 같은 형태를 취합니다.

음파

의 결과인 0.7pt의 가스 온도 변화는 다음과 같은 형태를 취합니다:

$$T(x,t) = T_0 + T_1(x) \cos(mt).$$

온도 진동의 진폭 $T_1(x)$ 을 T_0, γ 의 관점에서 계산합니다,
 a, k 및 x

(4)

- A.6** 이 작업의 목적만을 위해 튜브와 기체 사이에 약한 열 상호작용이 있다고 가정합니다.

튜브

와 기체 사이에 1.2pt의 약한 열 상호작용이 있다고 가정합니다. 결과적으로 정상 음파는 다음과 같이 유지됩니다.

거의 변하지 않지만 가스는 튜브와 소량의 열을 교환할 수 있습니다. 점도로 인한 가열은 무시할 수 있습니다.

그림 2의 각 지점(튜브의 가장자리에 있는 A, C, 중앙에 있는 B)에 대해 해당 지점에서 튜브의 온도, 압력, 밀도, 속도, 변위, 진폭, 파장, 주파수, 속도, 파동, 리브리엄 밀도, 변위 진폭, 파동, 및 m

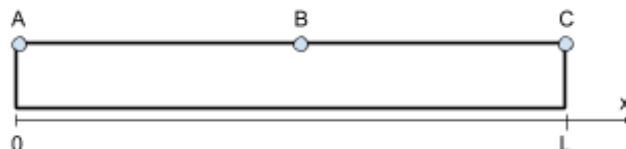


그림 2

파트 B: 외부 열 접촉으로 인한 음파 증폭(6.3점)

튜브 내부에 얇은 간격의 고체 플레이트 스택을 배치합니다. 스택의 플레이트는 튜브를 따라 가스의 흐름을 방해하지 않도록 튜브 축에 평행하게 정렬됩니다. 스택의 중심은 $x_0 = L/4$ 에 위치하며, 튜브 축을 따라 $l \ll L$ 폭에 걸쳐 전체 단면을 채웁니다. 스택의 오른쪽과 왼쪽 가장자리는 온도 차이 τ 로 유지됩니다. 스택의 왼쪽 가장자리는

$x_H = x_{(0)} - l/2$ 는 외부 열 저장소에 의해 $T_H = T_0 + \tau/2$ 의 온도로 유지되고, 동시에 오른쪽 가장자리인 $x_C = x_0 + l/2$ 는 $T_C = T_0 - \tau/2$ 의 온도로 유지됩니다.

플레이트 스택은 가장자리 사이에 일정한 온도 구배를 유지하기 위해 약간의 세로 열 흐름을 허용하여 $T_{\text{플레이트}}(x) = T_0 - x - x_0 \tau$.

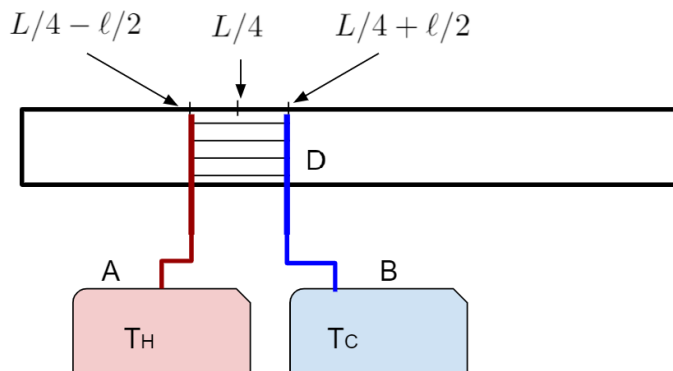


그림 3. 시스템 스케치. (A)와 (B)는 각각 고온 및 저온 열 저장소를 나타냅니다. (D)는 스택을 나타냅니다.

플레이트 스택과 가스 사이의 열 접촉이 튜브의 음파에 미치는 영향을 분석하려면 다음과 같은 가정을 합니다:

- 이전 부분과 마찬가지로 열역학적 속성에 대한 모든 변화는 교란되지 않은 값에 비해 작습니다.
- 이 시스템은 가능한 가장 긴 파장의 기본 정재파 모드로 작동합니다. 플레이트 스택의 존재에 따라 약간만 수정됩니다.
- 스택은 파장 $l \ll \lambda_{\text{최대}}$ 보다 훨씬 짧으며 변위 및 압력 노드 모두에서 충분히 멀리 위치할 수 있으므로 변위 $v(x, t) \approx v(x_0, t)$ 및 압력 $p(x, t) \approx p(x_0, t)$ 는 스택의 전체 길이에 걸쳐 균일한 것으로 간주할 수 있습니다.
- 스택 안팎으로 이동하는 소포에 의해 발생하는 가장자리 효과는 무시할 수 있습니다.
- 플레이트 스택의 끝 부분, 즉 뜨거운 저장소와 차가운 저장소 사이의 온도 차이는 절대 온도에 비해 작습니다: $\tau \ll T_0$.
- 스택, 기체, 튜브를 통한 열 전도는 모두 무시할 수 있는 수준입니다. 열 전달의 유일한 중요한 원인은 기체의 움직임으로 인한 대류와 기체와 스택 사이의 전도입니다.



Q3-4

영어(공식)

- B.1** 원래 $x_0 = L/4$ 에 있는 스택 영역의 특정 가스 소포가 있다고 가정해 보겠습니다. 소포가 스택 내에서 이동함에 따라 스택 근처 부분의 국부 온도는 다음과 같이 변경됩니다:

$$T_{\text{(env)}}(t) = T_{(0)} - T_{\text{st}} \cos(mt).$$

(5)

0.4pt

- B.2** 가스가 열을 전달할 수 있는 임계 온도 차이 τ_{cr} 는 어느 정도입니까? 뜨거운 저수지에서 차가운 T_0, γ, k, l 로 τ_{cr} 을 표현하세요.

1.0pt

- B.3** 열 흐름에 대한 일반적인 근사 식 dQ_t 을 작은 가스의 부피와 압력 변화율의 선형 함수입니다. Ex- 부피 변화율 dV_t , 압력 비율로 답을 누르십시오. 소포 압력 및 부피의 교란되지 않은 평형 값인 p_0, V_0 를 변경합니다. 단열 지수 γ . (물 열에 대한 식을 사용할 수 있습니다. 일정한 부피에서의 용량 $c_v = \frac{5}{2}R$, 여기서 R 기체 상수입니다.)

0.8pt

소포와 스택 사이의 제한된 열 유량으로 인해 소포의 압력과 부피 진동 사이에 위상차가 발생합니다. 이것이 어떻게 작동하는지 살펴보겠습니다.

스택에서 소포로 유입되는 열 플럭스가 소포와 스택의 이웃 요소 사이의 온도 차이에 비례하도록 하고, 대략 $dQ = \cos \beta V_0 (T_0 - T_{\text{st}}) dt$. 여기서 β 는 각각 작업 A.5와 B.4에서 기체 소포와 이웃 스택의 온도 진동 진폭이며 $\beta > 0$ 는 상수입니다. 기계의 작동 주파수에서 이 열 흐름으로 인한 가스 온도의 변화가 다음 두 가지에 비해 미미하다고 가정합니다.

T_1 및 T_{st} .

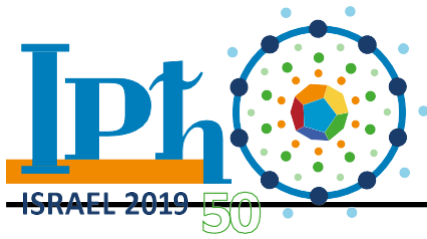
- B.4** 작업량을 계산하기 위해 스택과의 열 접촉으로 인한 이삿짐의 부피 변경을 고려합니다. 스택과의 열 접촉으로 인한 소포의 부피 변화를 고려할 것입니다. 스택의 영향을 받는 소포의 압력과 부피는 다음과 같이 표현됩니다:

$$\begin{aligned} p &= p_0 + p_a \sin(mt) - p_b \cos(mt), \\ V &= V_0 + V_a \sin(mt) + V_b \cos(mt). \end{aligned} \quad (6)$$

p_a 와 p_b 이 주어지면 계수 V_a 와 V_b 를 구합니다. 답을 다음 중 하나로 표현하세요. $p_a, p_b, p_0, V_0, \gamma, \tau, \tau_{\text{cr}}, \beta, m, a, l$

- B.5** 단위 음량당 음향 작업에 대한 대략적인 식을 구합니다. 한 사이클에 걸쳐 가스 소포에 의해 덕트화됩니다. 스택의 볼륨에 걸쳐 통합을 사용하여 한 사이클 동안 가스에 의해 생성된 총 작업 $W_{\text{(합계)}}$ 를 구합니다. 익스프레스 $W_{\text{총}}$ $\gamma, \tau, \tau_{\text{cr}}, \beta, m, a, l$ 및 S

0.8pt



Q3-5

B.6

왼쪽에서 전달된 열 $Q_{(중)}$ 에 대한 대략적인 식을 구합니다.
 $x=x_{(0)}$ 을 한 주기에 걸쳐 오른쪽으로 이동합니다. 용어로 답을 표현하세요.
 의 $\tau, \tau_{CR}, \dots, \beta m a S l$
 (힌트: 대류로 인한 열 전류는 $j=Q_d$ 공식을 사용할 수 있습니다.)

0.8pt

B.7

열음향 엔진의 효율 η 을 찾아보세요. 효율은 다음과 같이 정의됩니다.
 생성된 음향 작업과 핫 레지스터에서 끌어낸 열의 비율입니다.
 voir. 다음 사이의 온도 차이 τ 로 답을 표현하세요.
 뜨거운 저장소와 차가운 저장소, 임계 온도 차이 τ_c 및
 카노 효율 $\eta_c = 1 - T_c / T_H$

0.6pt

영어(공식)



이론 시험은 5시간 동안 진행되며, 총 30점입니다.

시험의 시작과 끝은 벨 소리로 안내됩니다. 시험 시작을 알리는 신호 벨이 울리기 전에 문제가 들어 있는 봉투를 열어서는 안 됩니다. 매 시간마다 경과된 시간이 안내되며, 시험의 종료를 알리는 벨소리가 울리기 15분 전에도 안내될 것입니다.

시험 응시 중

- 제공된 펜만 사용하세요.
- 각 문제 번호와 일치하는 답안지(A로 표시됨)에 마지막 답을 적습니다. 각각의 문제에 여분의 빈 계산용지(W로 표시됨)에 자세한 풀이를 적습니다. **현재 풀고 있는 문제 번호와 풀이 과정을 작성한 계산용지가 맞는지 확인하십시오. (상단의 문제 번호를 확인하십시오.)** 어느 계산용지는 쓴 것 중 채점이 되지 않기를 원하는 것은 X 표시를 하십시오. 각 계산용지의 앞면만 활용하십시오.
- 풀이 과정을 작성할 때 최대한 간결하게 작성하십시오: 방정식을 사용하거나, 논리 연산자를 사용하고, 생각하는 내 용을 간단하게 작성하십시오. 긴 문장을 쓰는 것을 피한다.
- 전 단계의 문제를 풀지 않았더라도 다음 단계의 문제를 풀 수도 있습니다.
- 허가 없이 시험장을 벗어날 수 없습니다. 화장실에 가려고 하면 "화장실", 물을 마시고 싶으면 " H_2O ", 종이가 더 필요하거나 다른 도움이 필요하면 "도움!" 깃발을 들고 감독관에게 알려 주시기 바랍니다.

시험 종료 후

- 시험이 종료되는 즉시 답안 작성을 중지해야 합니다.
- 각 문제에 대해 작성한 용지를 다음 순서대로 정렬합니다: 겹장(표지, C), 문제지(문제, Q), 답안지(답안, A), 계산용지(워크시트, W), 추가용지(추가시트, Z).
- 한 문제에 해당하는 모든 계산용지는 해당 문제의 봉투에 함께 넣으세요. 또한 빈 종이도 함께 제출하세요. 수험 번호가 각 봉투의 투명한 창을 통해 보일 수 있도록 넣으세요. 일반 지시사항 페이지는 큰 봉투 안에 넣으세요. 어떤 종이라도 시험장 밖으로 가지고 나갈 수 없습니다.
- 사용한 필기구는 책상 위에 그대로 두고 나가세요.
- 봉투가 수거될 때까지 책상에서 대기하십시오. 봉투가 수거되면 감독관이 시험장 밖으로 안내해 줄 것입니다.

유효 길이가 0 인 스프링과 슬링키

$L > L_0$ 일 때 $F = kL$ 유효 길이가 0 인 스프링 (zero effective length spring; ZLS) 이 있습니다. 여기서 L_0 은 늘어나지 않았을 때 스프링의 최소 길이를 의미합니다. 그림 1 은 유효 길이가 0 인 스프링 (ZLS) 에 대한 힘 F 과 스프링의 길이 L 의 관계를 나타낸 것입니다. 직선의 기울기는 용수철 k 이다.

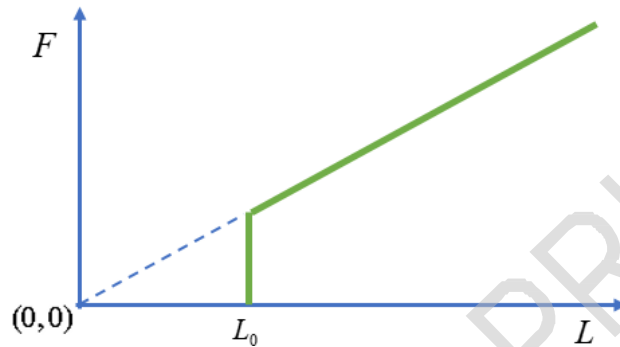


그림 1 : 힘 F 와 스프링의 길이 L 사이의 관계

ZLS 는 지진계를 만드는 데 유용하게 사용되며, 이것으로 또한 중력가속도 g 의 변화를 매우 정확하게 측정할 수 있습니다. 본 문제에서는 스프링의 무게 M 가 L_0 보다 크고 균일한(균질한) ZLS 를 고려합니다. 스프링의 상대적 부드러움(부드러움)을 나타내기 위해 차원이 없는 비율 $\alpha = kL_0/Mg < 1$ 을 정의합니다. (반드시 그렇지는 않지만) 슬링키(slinky) 는 ZLS 의 한 예라 할 수 있습니다.

파트 A : 정지 상태 (정적) (3.0 점)

A.1 늘어나지 않은 상태의 ZLS 스프링에서 길이가 Δl 인 부분을 생각해 봅시다. F 을 작용했을 때 이 때 이 부분의 길이 Δy 를 F , Δl 와 용수철 상수로만 나타내시오. (단, 중력은 작용하지 다.) 0.5pt

A.2 위와 같이 중력을 무시할 때, 길이가 Δl 인 ZLS 의 일부분에 대해 원래의 길이 Δl 로부터 길이가 Δy 가 될 때까지 힘이 한 일 ΔW 를 계산합니다. 0.5pt

이후 본 문제 전체에서 스프링의 각 지점을 특정하기 위한 변수로서 스프링이 늘어나지 않은 상태에서 바닥으로부터의 위치 l ($0 \leq l \leq L_0$) 을 사용합니다. 따라서 스프링이 늘어나더라도 스프링 각 지점을 나타내는 변수인 l 은 변하지 않습니다.

A.3 스프링의 위쪽 끝을 매달고 스프링이 자체 무게에 의해 늘어나도록 하였습니다. 매달린 평형상태에 있을 때, 전체 길이 H 는 얼마인가? L_0 과 α 를 표현하시오. 2.0pt

파트 B : 움직이는 상태 (역학) (5.5 점)

그림은 매달린 상태로 정지한 스프링을 자유롭게 놓았을 때의 움직임을 보여줍니다. 스프링의 위쪽 부분은 점차 수축하지만 아래쪽 부분은 정지 상태를 유지합니다(그림 2 참조). 수축된 부분은 한 덩어리처럼 움직이며, 시간이 지남에 따라 스프링의 코일이 하나씩 더해지면서 수축 부분이 커집니다. 스프링 코일의 모든 점은 위쪽에서 수축된 부분이 도달한 후에야 움직이기 시작합니다. 반면, 정지 상태에 머물러 있는 부분은 점점 짧아집니다. 스프링 바닥(하단)은 전체 스프링이 수축되어 늘어나지 않은 최초 길이 L_0 가 되었을 때 움직이기 시작합니다. 그 후, 중력의 영향으로 수축된 스프링은 회전하지 않고 강체처럼 똑바로 떨어집니다.



그림 2 왼쪽 그림: 자유 낙하하는 스프링을 촬영한 사진을 시간순으로 배열한 그림. 오른쪽 그림: 스프링이 자유 낙하하는 동안 움직이는 부분 I과 고정된 부분 II.

아래 문제에서는 위에서 설명한 모델을 바탕으로 답을 구해야 합니다. 공기 저항은 무시할 수 있지만, $L_{(0)}$ 은 무시하면 안 됩니다.

B.1 $L_{(0)}$ 과 α 를 이용하여 표현해 주세요. $k=1.02 \text{ N/m}$ 와 $M=0.201 \text{ kg}$ 이고 g 가 9.80 m/s^2 일 때, t_c 의 값을 계산하시오. 2.5pt

B.2 이 l 은 부분 I(그림 2에서 움직이는 부분(움직이는 부분))과 부분 II(그림 2에서 정지 상태인 부분(정지 부분))가 만나는 경계선의 좌표로, 앞에서 정의한 바와처럼 늘어나지 않은 상태를 기준으로 정한 위치입니다. 특정 순간에, 정지 상태인 부분이 전적으로 존재하며 그 질량은 $m(l) \approx M$ 이고, 움직이는 부분은 균일한 순간 속도 $v_l(l)$ 로 움직인다. 이 때 (여전히 정지 상태에 있는 부분이 남아 있을 때) 움직이는 부분의 속도 $v_l(l) = Al+B$ 임을 보이시오. $AB=L_0, g\alpha$ 를 이용하여 나타내시오. 2.5pt

B.3 스프링을 놓았을 때부터 스프링이 땅에 닿을 때까지의 움직이는 부분(움직이는 부분)의 도 변합니다. B.2의 결과를 이용하여 최소 속도 $v_{(분)}$ 을 구하시오. 답을 L_0, α, AB 를 이용하십시오. 0.5pt



파트 C: 에너지 구하기(에너지학)(1.5점)

- | | | |
|-----|--|-------|
| C.1 | 스프링을 놓았을 때부터 스프링이 땅에 닿기 직전까지 열 에너지로 변환되어 손실되는 적 Q 의 양을 계산하시오. 답을 L_0, α, Mg 를 이용하여 표현하시오. | 1.5pt |
|-----|--|-------|

DELEGATION PRINT

전자레인지의 물리학

이 문제에서는 전자레인지에서 마이크로파 복사 (마이크로파 방사)의 발생과, 음식을 가열할 때 이를 이용하는 것에 대해 논의합니다. 마이크로파 복사는 "마그네트론 (마그네트론)"이라 불리는 장치에서 발생합니다. 파트 A는 마그네트론의 작동과 관련이 있으며, 파트 B는 음식에서 마이크로파의 흡수를 다룹니다.

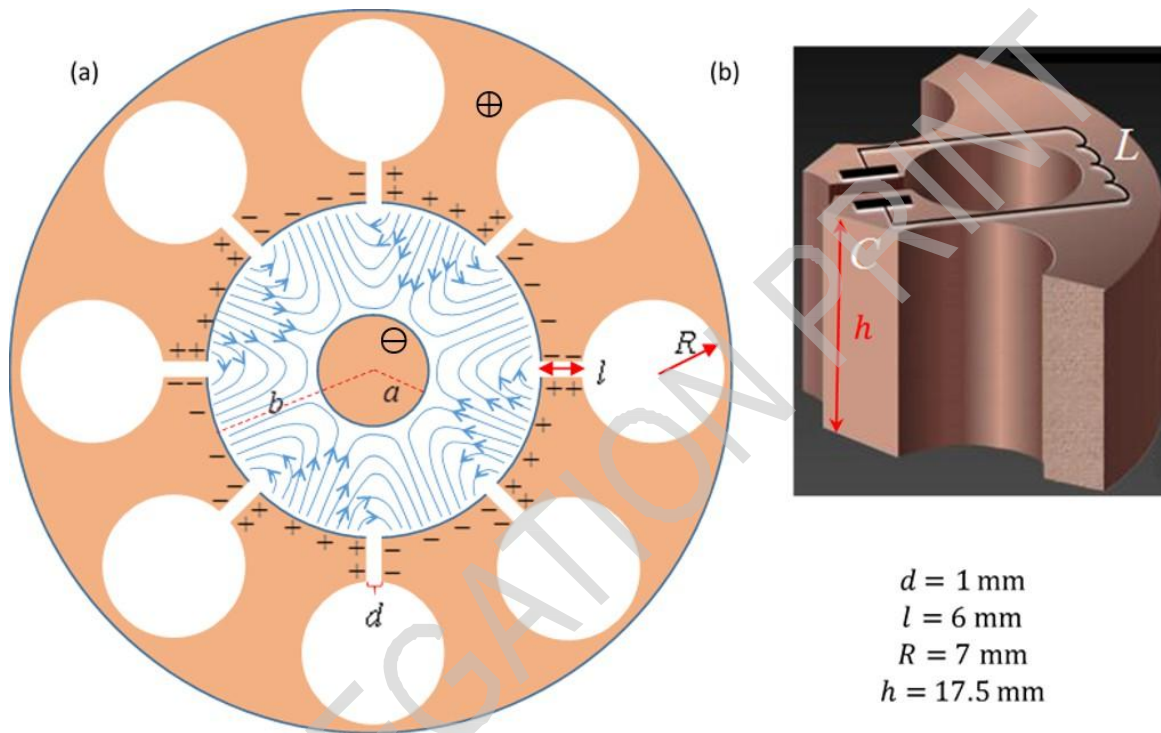


그림 1

파트 A : 마그네트론의 구조와 작동 (6.6 점)

마그네트론은 펄스 형태(예, 레이더에 적용) 또는 연속적(예, 전자레인지에 적용)으로 마이크로파를 만들어내는 장치입니다. 마그네트론은 자기중폭 진동(자기 중폭 진동) 모드를 가지고 있습니다. 마그네트론에 정적인 (직류) 전압을 걸면, 금방 이러한 자기중폭 진동 모드가 여기(여기)되어 특정 진동수의 마이크로파가 발생합니다. 이렇게 생성된 마이크로파 복사는 마그네트론 밖으로 전달(전송)됩니다.

일반적인 전자레인지의 마그네트론은 구리로 된 원통형 음극 (반지름)과 이를 둘러싸는 양극 (반지름)으로 구성됩니다. 양극은 두꺼운 원통 겹질 형태로, 드릴로 뚫린 원통 모양의 여덟 개의 공동(cavity)을 가지고 있습니다. 이러한 공동은 마이크로파 공진기(resonator) 역할을 합니다. 공진기들 중 하나는 마이크로파 에너지를 외부로 전달하는 안테나에 연결되는데 문제에서는 안테나를 무시한다. 그림 1 (a)와 같이 8 개의 공진기가 있는 일반적인 마그네트론을 생각해 봅시다. 공진기 1 개의 3차원 구조는 그림 1 (b)와 같습니다. 여기서 모든 내부 공간은 진공 상태입니다. 그림에 표시된 것과 같이 8 개의 공동은 각각 공명 진동수 $f=2.45 \text{ GHz}$ 인 인덕터-축전기 (LC) 공진기로 작동한다.

마그네트론의 길이 방향 축을 따라 일정하고 균일한 자기장이 가해지며, 그림 1(a)에서 자기장의 방향은 종이면에서 나오는 방향입니다. 또한, 양극 (양전위)과 음극 (음전위) 사이에는 일정한 전압이 가해진다. 음극에서 방출된 전자는 양극에도 달하는데, 인접한 두 공진기마다 전하의 부호가 반대가 되도록 양극을 대전(전하) 시키고 시간에 따라 전극의 부호가 번갈아 가며 바뀌는 진동 모드를 이룹니다. 공진기의 발진 혹은 공명은 이러한 진동을 증폭시킵니다.

양극과 음극 사이에 가해진 직류 전압에 의해 발생하는 직류(정적) 전기장에 더해, 진동수 $f=2.45 \text{ GHz}$ 인 교류 (교류) 전기장 (그림 1 (a)의 파란색 선, 직류 전기장은 그리지 않음)이 . 정상 상태 (정상 상태) 에

서, 이러한 교류 전기장의 진폭은 직류 전기장의 약 1 입니다. 음극과 양극 사이 공간에서 전자는 직류 전기장과 교류 전기장의 영향을 동시에 받아 운동합니다. 이 과정에서 결과적으로 음극에서 양극에 도달하는 전자가 직류 전기장에 의해 얻은 에너지의 약 85%가 교류 전기장으로 전이(전달) 됩니다. 음극에서 방출된 전자 중 적은 수는 다시 음극으로 되돌아오기도 하는데, 이는 추가로 전자를 방출시킴으로써 교류 전기장을 더욱 증폭시킵니다.

각 공진기는 축전기와 인덕터가 연결된 회로로 생각할 수 있습니다(그림 1 (b) 참조). 전기용량(커패시턴스)은 주로 공진기 표면의 평평한(평면) 부분에서 생기고, 인덕턴스(인덕턴스)는 주로 원통 부분에서 생깁니다. 공진기에서 전류가 원통형 공동 표면을 따라 균일하게 흐르고, 이 전류에 의해 생성되는 자기장의 세기는 무한한 길이의 이상적인 솔레노이드에서의 자기장 세기의 0.6 배라고 가정해 봅시다. 공진기의 모양과 길이는 그림 1 (b)에 주어져 있습니다. 진공의 유전율은

$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}$ 이고, 투자율은 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$ 이다. —

- A.1** 위의 데이터를 이용하여 개별 공진기의 진동수 f_{EST} 를 추정하십시오. (계산 결과는 실제 값인 0.4pt
 $f = 2.45 \text{GHz}$ 와 다를 수 있다. 뒷 부분의 문제에서는 실제 값을 사용하십시오.)

아래의 A.2에서는 마그네트론 자체에 대해서는 다루지 않지만, 이와 관련된 물리를 이해하는 데 도움이 됩니다. y

축 음의 $\vec{E} = -E_0 \hat{y}$ x $\vec{B} = B_0 \hat{x}$
 방향으로 균일한 전기장과 축 양의 방향으로 균일한 자기장이 걸려있는 자유공간에서
 운동하는 전자를 고려해 보자 (과 $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ 은 양수이고는 일반적인 단위벡터이다). 시간
 에서 전자의 속도를 $\vec{u}$ 라 하자. 일정한 속도로 흘러갈 때를 지칭하는 전자의 표류 속도 (드리프트 속도)는
 평균 속도로 정의되며 과는 각각 전자의 질량과 전하량이다. m $-e$

- A.2** 아래의 두 경우에 대해 u_D 를 각각 구하십시오. 또한 답지에 시간 간격 $0 < t < \frac{4\pi m}{eB_0}$ 동안 1.5pt
 실 좌표계에서) 전자의 궤적을 평면 상에 수치를 표시하여 정확하게
 1. $t = 0$ 일 때 전자의 속도가 $\vec{u}(0) = (3_{E(0)/B(0)}) \hat{x}$ 인 경우
 2. $t = 0$ 일 때 전자의 속도가 $\vec{u}(0) = -(3_{E(0)/B(0)}) \hat{x}$ 인 경우

이제 마그네트론에 대한 논의를 계속해봅시다. 음극과 양극 사이의 거리는 15mm입니다. 앞서 언급한 교류 전기장

의 에너지 손실 때문에 각 전자의 최대 운동 에너지 $K_{\text{최대}} = 800 \text{ eV}$ 를 초과하지 않는다고 가정해 보겠습니다. 직류(정적)
 장의 세기는 $B_0 = 0.3 \text{ T}$ 이다. 전자의 $m = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ 이고, 전하량은 $-e = -1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ 이다.

- A.3** 전자의 운동이 근사적으로 원운동으로 보이는 기준 좌표계를 생각하고 이 기준 좌표계가 근 0.4pt
 사적으로 관성 좌표계라고 가정해 보자. 근사적으로 전자의 표류 속도만 고려하면 된다는
 을 확인하기 위해, 이 기준 좌표계에서 전자 운동 경로의 최대 반지름 r 의 값을 계산해
 오.

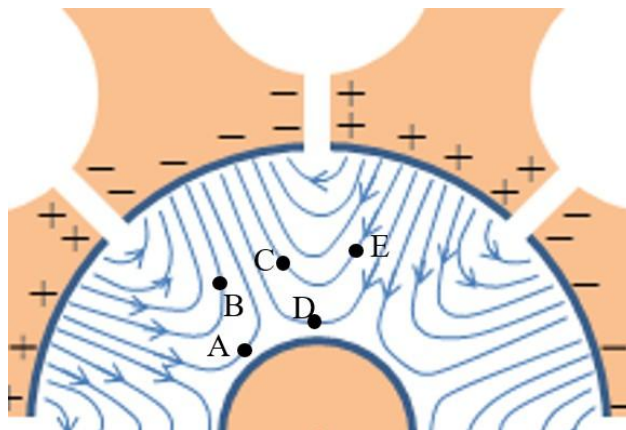


그림 2

A.4

그림 2는 어느 순간에 양극과 음극 사이의 교류 전기장의 전기력선을 보여줍니다. (직류 전기장을 표시하지 않음) 위에서 눈의 한 전자의 표류 속도를 구할 때 각각 A, B, C, D, E 지점에 위치한 전자가 양극을 향해 흘러갈지, 음극을 향해 흘러갈지, 아니면 반지름에 수직인 방향으로 흘러갈지 답안지에 표시하십시오.

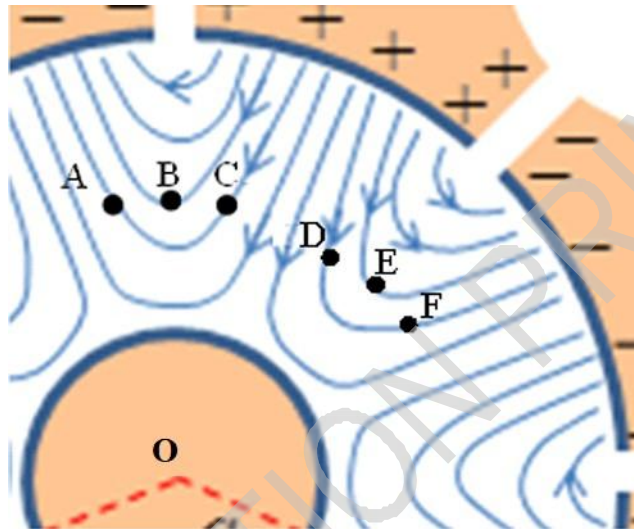


그림 3

그림 3은 어느 순간에 양극과 음극 사이의 교류 전기장의 전기력선을 보여줍니다. (직류 전기장을 표시하지 않음). 그 순간에 6개의 전자의 위치는 A, B, C, D, E, F로 표시하였습니다. 모든 전자는 음극으로부터 동일한 거리에 있습니다.

A.5

그림 3과 같은 상황을 생각해 봅시다. 각 전자쌍 조합 AB, AC, BC, DE, DF, EF에 대해 전자가 흐르는 방향에 따라 두 위치 벡터 사이의 (음극의 중심 O로부터 측정한) 각도가 증가하는지 감소하는지 답안지에 표시하십시오.

1.2pt

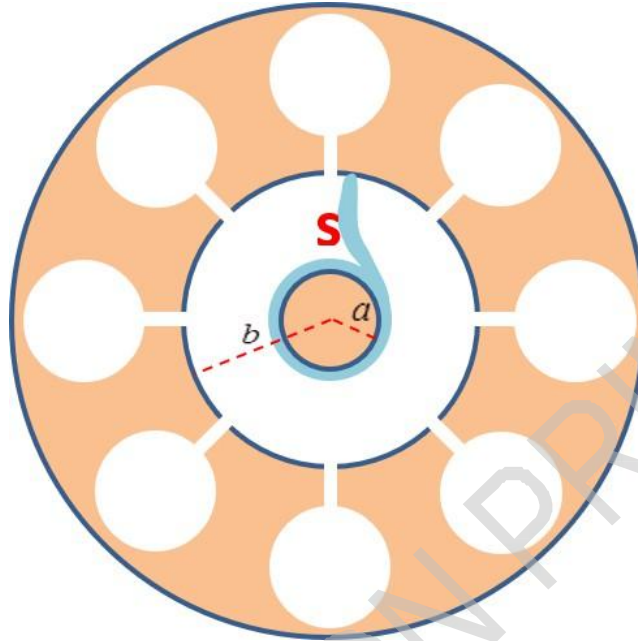


그림 4

A.5 에서 알아낸 규칙 (패턴)은 포커싱 (집중) 메카니즘으로 작용하여 음극과 양극 사이 공간에서 전자가 바퀴살 (스포크) 모양으로 모이도록 합니다. 그림 4 에서 S 로 표시된 것은 이렇게 형성된 몇 개의 바퀴살 중 하나를 나타낸다.

- A.6** 모두 몇 개의 바퀴살이 형성될지 생각해 보고 답안지에 모든 바퀴살을 그리시오. 바퀴의 방향을 화살표로 표시하고 평균 m_s 를 계산하시오. 0.8pt

음극과 양극 사이의 중간(반쯤)에서 교류 전기장과 직류 전기장을 합한 총 전기장의 크기가 음극에서 양극까지 반지름을 따라 직류 전기장을 평균한 값과 같다고 가정하자. 바퀴살은 근사적으로 반지름 방향이라고 가정합니다. 음극과 양극의 반지름 (a 와 b)은 그림 4 에 정의된 것과 같습니다.

- A.7** 앞에서 설명한 방식과 같이 마그네트론을 작동시키는데 필요한 직류 전압 V_0 에 대한 근사적인 값을 구하시오. (구한 값은 마그네트론 작동에 필요한 최소값에 대한 근사치이며 실제 최적 전압은 이보다 다소 높습니다.) 1.1pt

파트 B : 마이크로파 복사와 물 분자 사이의 상호 작용 (3.4점)

이 파트에서는 음식 조리를 위한 마이크로파 복사(마그네트론 안테나에 의해 음식이 있는 곳으로 방사됨)의 사용, 다시 말해 순수한 물이나 소금물(국물, 수프 등)과 같이 에너지 손실이 있는(손실성) 유전체 물질의 가열에 대해 다룹니다.

전기 쌍극자 (전기 쌍극자)는 두 개의 반대 전하 q 와 $-q$ 가 작은 거리 d 만큼 떨어져 있는 것입니다. 전기 쌍극자 음(-) 전하에서 양(+) 전하 방향이며, 크기는 $p=qd$ 입니다.

크기 $p_0 = p(t)$ 로 일정한 단일 쌍극자 모멘트 $\vec{p}(t)$ 에 시간에 의존하는 전기장 $\vec{E}(t) = E(t)\hat{x}$ 이 가해진다고 가정합니다. 쌍극자와 전기장 사이의 각도는 $\theta(t)$ 입니다.

- B.1** 전기장에 의해 쌍극자에 가해지는 돌림힘 $\tau(t)$ 의 크기와 전기장에 의해 쌍극자에 일률 $H_i(t)$ 를 각각 $p_0, E(t), \theta(t)$ 와 이들의 미분으로 표현하는 식을 0.5pt

물 분자는 극성이 있어 전기 쌍극자로 다룰 수 있습니다. 액체 상태의 물에서는 분자 사이의 강력한 수소 결합으로 인해, 이들



을 독립적인 쌍극자로 취급할 수 없으며 쌍극자 모멘트 밀도 (dipole moment density; 물 분자 집합의 단위 부피당 평균 쌍극자 모멘트)인 편극 벡터 (polarization vector) $\vec{P}(\vec{r}, t)$ 를 생각해야 합니다. $\vec{P}(\vec{r}, t)$ 의 방향은 (마이크로 복사에 의한) 국소적 교류 전기장 $\vec{E}(\vec{r}, t)$ 와 평행하며, 교류 전기장의 진폭에 비례하는 진폭을 갖고 진동하지만, 전기장과 편극 사이에는 위상 지연 (phase lag) δ 이 있습니다.

물 내부의 어떤 위치에서 국소적 교류 전장은 $\vec{E}(\vec{r}, t) = E_0 \sin(mt) \hat{x}$ 로 주어지고, 여기서 $m = 2\pi f$ 이다. 이로 인한 편극은 $\vec{P}(\vec{r}, t) = \beta \epsilon_0 E_0 \sin(mt - \delta) \hat{x}$ 이고, 여기서 β 는 물의 특성으로 차원이 없는 상수이다.

- B.2** 단위 부피당 물에 의해 흡수되는 시간 평균 일률 $\langle H(t) \rangle$ 을 구하시오. 주기 함수 $f(t)$ 의 한 주기 T 동안의 시간 평균은 다음과 같이 정의됩니다:

0.5pt

$$\langle f(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) dt. \quad (1)$$

예) 마이크로파 복사의 진행을 생각해 봅시다. 물의 상대 유전율이 (해당 전자기파 진동수에서) ϵ_r 일 때, 물의 굴절률 $n = \sqrt{\epsilon_r}$ 이다. 전기장에 의한 순간 에너지 밀도는 $\frac{1}{2} \epsilon_r \epsilon_0 E^2$ 이다. 전자기파에서 전기장에 의한 시간 평균 에너지 밀도

와 자기장에 의한 시간 평균 에너지 밀도는 서로 같습니다.

- B.3** 시간 평균 복사 에너지 선속 밀도 (시간 평균 복사 에너지 플럭스 밀도)를 $I(x)$ (단위 면적당 평균 복사 일률)로 나타내자. x 은 물 속으로 침투하는 깊이입니다, x 방향으로 전파됩니다. 선속 밀도 $I(x)$ 를 x 에 따라 나타내는 식을 구하시오. 수면에 서의 선속 밀도 $I(0)$ 을 써서 나타내도 됩니다.

1.1pt

물 분자 사이의 상호 작용의 결과로 위상 δ 이 발생합니다. 위상 지연은 차원이 없는 유전 손실 계수 ϵ_i 와 상대 유전율 ϵ_r (둘 다 복사의 m 와 온도에 의존) 에 의존하며 $\tan \delta = \epsilon_i / \epsilon_r$ 의 관계가 있습니다. 위상 지연 δ 이 충분히 작을 때, 침투 깊이 x 에서 전장은 다음과 같이 주어집니다:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = E_0 e^{-k_0 x} \sin(k_0 x - mt) \hat{x} \quad (2)$$

여기서 $k_0 = m/c$ 이고, 진공에서 빛의 속력은 $c = 3.0 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ 이다.

- B.4** $\tan \delta \approx \sin \delta$ 외 근사를 이용하여 B.2 에서 정의된 차원 없는 계수 β 를 문제에 제시된 다른 물성 변수로 표현해 보시오.

0.6pt

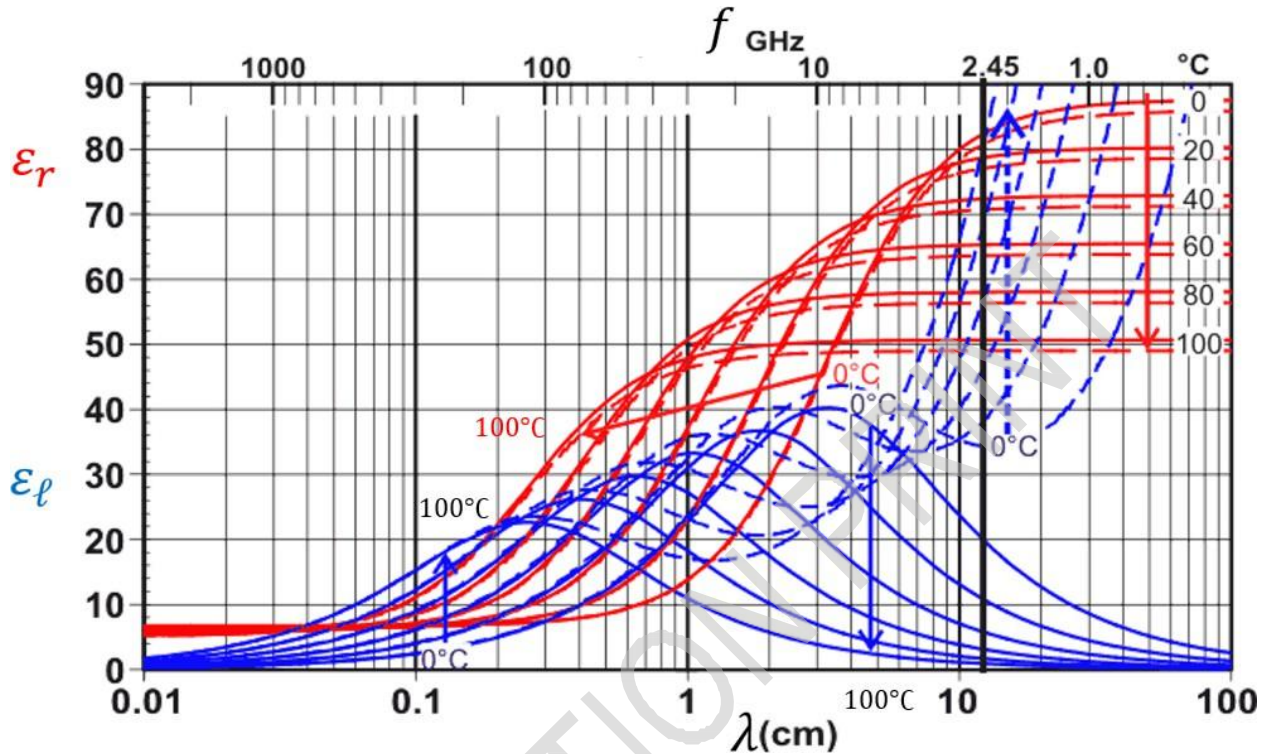


그림 5. 화살표는 0°C 부터 100°C 까지의 온도 변화에 따른 곡선의 이동 방향을

그림 5 는 여러 온도에서 순수한 물 (실선)과 묽은 소금 용액 (점선)에 대해 ϵ_l (파란색)과 ϵ_r (적색)을 파장 또는 진동수의 함수로 나타낸 것이다. $m=2\pi \cdot 2.45 \cdot 10^9 \text{s}^{-1}$ 은 붉은 수직선으로 표시하였습니다. 아래에서는 이 진동수의 마이크로파 복사만

B.5 그림 5 를 활용하여 다음 문제를

0.7pt

20°C 의 물에 대해 단위 부피당 일률이 $x=0$ 에서의 값에 비해 절반으로 줄어드는 침

투 깊이가 $X(1/2)$ 를 구하시오.

- 순수한 물에 입사할 때 마이크로파 복사의 침투 깊이가 온도에 따라 증가하는지, 감소하는지 또는 동일한지 여부를 답안지에 표시하시오.
- 묽은 (묽은 소금 용액)로 입사할 때 마이크로파 복사의 침투 깊이가 온도에 따라 증가하는지, 감소하는지 또는 동일한지 여부를 답안지에 표시하시오.

열-소리 기관(열 음향 엔진)

열-소리 기관은 열을 기계적인 일인 소리 에너지 또는 음파로 변환하는 장치입니다. 다른 많은 열기관과 마찬가지로 열-소리 기관도 역으로 작동하면 냉각고가 될 수 있고, 소리를 이용해 저온 열 저장소(축열조)에서 고온 열저장소로 열을 방출할 수도 있습니다. 열-소리 기관의 높은 작동 주파수는 열전도를 감소시켜 작업 챔버를 외부와 차단(단열) 할 필요성을 줄여줍니다. 다른 많은 엔진과 달리 열-소리 기관은 내부의 유체를 제외하고는 움직이는 부분이 없습니다.

열-소리 기계의 효율은 일반적으로 다른 종류의 열기관보다 낮지만, 설치 및 유지 보수 비용이 낮다는 장점이 있습니다. 이는 태양열 발전소 및 폐열(폐열) 활용 등의 재생 에너지 응용에 활용될 수 있습니다. 이 문제에서는 외부 기관을 구동하기 위한 전력 추출이나 변환은 무시하고 시스템 안의 소리 에너지 생성에만 초점을 맞춥니다.

파트 A. 닫힌 관의 음파 (3.7 점)

x 방향을 따라 놓인 L 와 S 의 열적으로 절연된 관을 생각해 봅시다. 관의 두 $x=0$ 및 $x=L$ 에 있습니다. 관은 이상 기체로 채워져 있고 양쪽 끝이 막혀 있습니다. 평형 상태에서 기체의 온도는 T_0 , 압력 p_0 , 질량 밀도 ρ_0 이다. 기체의 점성은 무시할 수 있으며, 기체의 운동은 x 방향으로만 일어나고, 기체의 성질은 수직인 y 과 z 방향으로는 균일하다고 가정합니다.



그림 1

- A.1** 정상파가 형성되면, 기체 요소는 각 진동수 m 로 x 방향으로 진동합니다. 진동의 진폭은 a 에 따라 각 요소의 평형 x 에 따라 달라집니다. 각 기체 요소(가스 요소)의 평형 x 를 기준으로 할 때 길이 방향의 변위 (변위)는 다음과 같습니다. 0.3pt

$$v(x,t) = a \sin(kx) \cos(mt) = v_{(1)}(x) \cos(mt) \quad (1)$$

(v 는 기체 요소의 변위이다)

$a \ll L$ 는 양의 상수, $k=2\pi/\lambda$ 는 파수(파장), λ 는 파장입니다. 이 시스템에서 가능한 최대 파장 $\lambda_{\text{최대}}$ 은 얼마인가?

아래의 모든 $\lambda = \lambda_{\text{최대}}$ 로 진동한다고 가정합니다.

$xx+\Delta x$ ($\Delta x \ll L$) 사이의 좁은 범위에 놓인 기체 덩어리 (parcel) 를 생각해 봅시다. 문제 A.1 의 수식 (1) 에 주어진 변위 파동에 따라, 이 기체 덩어리 (parcel) 는 x 축을 따라 진동하면서 부피를 비롯한 다른 열역학적 특성들이 변화합니다.

다음 문제들에서 기체 덩어리의 열역학적 특성 변화는 외부의 작용이 없어 교란되지 않았을 때의 (교란되지 않은) 값과 비교하여 작다고 가정합니다.

- A.2** 기체 덩어리 (소포)의 부피 $V(x,t)$ 는 $V_0 = S\Delta x$ 의 평형값을 중심으로 진동하는데, 다음 수식으로 0.5pt

$$V(x,t) = V_0 + V_1(x) \cos(mt). \quad (2)$$

$V_1(x)$ 를 V_0 , a , k 및 x 로 표현하시오.

A.3

기체 덩어리의 진동으로 발생한 음파에 의해, 기체의 중 압력이 다음과 같은 근사적 형태를 취한다고 가정하자.

0.7pt

$$p(x, t) = p_0 - p_1(x) \cos(mt). \quad (3)$$

기체 덩어리 (소포)에 작용하는 힘을 고려하여, 위치 x , 평형 밀도 ρ_0 , 변위 진폭 a , 파동 파동 km 를 이용하여 압력 진동의 진폭 $p_{(1)}(x)$ 을 가장 중요한 차수 (첫번째항)까지 (to 선형 순서) 계산하시오.

음파의 진동수에서는 기체의 열전도도를 무시할 수 있습니다. 따라서 기체 덩어리 (소포)의 팽창과 수축을 관계식 $pV^\gamma = \text{const}$ 를 만족하는 단열 과정으로 취급하자. γ 는 단열

A.4

위의 관계식과 이전 문제들의 결과를 이용하여, 관에서 음파의 속력 $c = m/k$ 에 대한 γ 를 구하시오. p_0, ρ_0 과 단열 상수 γ 를 사용하여 답을 표현하시오.

0.3pt

A.5

단열 팽창 및 수축으로 인한 기체 온도의 변화는 음파의 작용에 의해 다음과 같은

0.7pt

$$T(x, t) = T_0 - T_1(x) \cos(mt). \quad (4)$$

온도 변화(진동)의 진폭 $T_1(x)$ 를 T_0, γ, k 및 x 를 사용하여 표현하시오.

A.6

이 문제 A.6 에서만 관과 기체 사이에 약한 열 상호 작용이 있다고 가정하자. 약한 열 상호 작용이 있어도 정상파는 거의 변하지 않지만, 기체는 관과 소량의 열을 교환할 수 있습니다. 점성 때문에 발생하는 열은 무시합니다. 그림 2 의 각 지점(관 가장자리의 A 와 C, 중앙의 B)에 대해, 그 지점에서 관의 온도가 오래 지남에 흐르는 동안 증가하는지, 감소하는지 또는 동일하게 유지되는지 설명과 함께 답하시오.

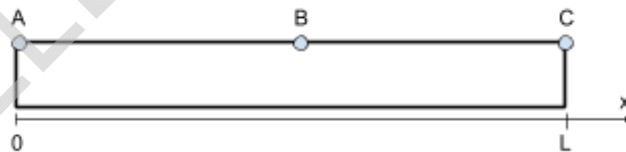


그림 2

파트 B: 외부 열 접촉이 유도하는 음파 증폭 (6.3 점)

적당한 간격을 두고 쌓은 얇고 단단한 판들의 더미 (고체 스택)가 관 내부에 놓여 있습니다. 판들의 더미(스택)는 관의 축 방향을 따라 흐르는 기체의 흐름을 방해하지 않도록 관의 축과 평행하게 정렬합니다. 판 더미 (스택)의 중심은

$x_0 = L/4$ 에 위치하며 관 축을 따라 가로길이 $l \ll L$ 의 길이에 걸쳐 있고, 관 전체를 채웁니다. 판 더미 (스택)의 오른쪽 및 왼쪽 모서리는 온도차 τ 로 유지됩니다. $x_H = x_0 - l/2$ 에서 판들의 왼쪽 모서리는 외부 열 저장소 (저장고) 에 의해 온도 $T_H = T_0 + \tau/2$ 로 유지됩니다. 동시에, $x_C = x_0 + l/2$ 에 있는 오른쪽 가장자리는 온도 $T_C = T_0 - \tau/2$ 로 유지됩니다.

다.

관 축의 l 방향으로 판을 따라 약간의 열 흐름이 있으며, 각 부분의 온도가 $T_{\text{판}}(x) = T_0 - \frac{x-x_0}{l}\tau$ 으로, 온도 기울기 가 일정하게 유지됩니다.

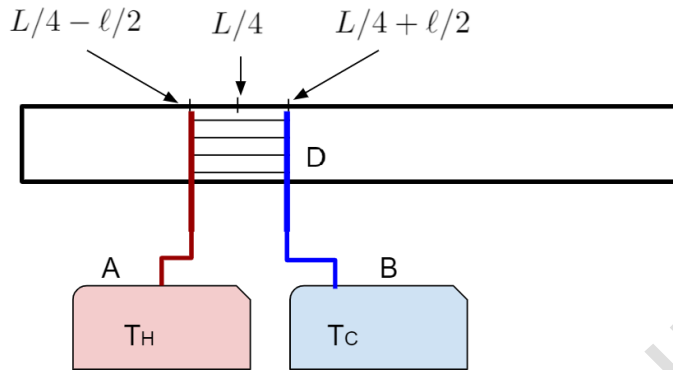


그림 3. 시스템 스케치. (A)와 (B)는 각각 고온 열 저장소(저장고)와 저온 열 저장소를 나타냅니다. (D)는 판들의 더미 (스택)를 나타낸다.

판 더미(스택)와 기체 사이의 열 접촉이 관의 음파에 미치는 영향을 분석하기 위해 다음을 가정합니다.

- 이전 문제들과 마찬가지로 열역학적 모든 특성의 변동은 외부에 의해 교란되지 않은 값에 비해 작습니다.
- 이 시스템은 가능한 가장 긴 파장의 기본 정상파 모드에서 작동합니다. 하지만 판 더미(스택)가 있으면 약간 달라집니다.
- 판들은 길이가 파장보다 훨씬 짧으며 ($l \ll \lambda_{\text{최대}}$), 변위와 압력의 마디 (노드)로부터 충분히 멀리 위치하고, 변위 $v(x, t) \approx v(x_0, t)$ 와 압력 $p(x, t) \approx p(x_0, t)$ 는 판들의 전체 길이에 걸쳐 균일하다고 볼 수 있습니다.
- 기체 덩어리(소포)가 판 더미(스택) 안쪽으로 움직이면서 발생하는 가장자리 효과를 무시할 수 있습니다.
- 판들의 양끝점, 즉 고온 열저장소(저장고)와 저온 열저장소 사이의 온도 차이는 외부에서 교란되지 않았을 때의 절대 온도와 비교하여 매우 작다: $\tau \ll T_0$
- 판더미(스택)나 기체를 통해 또는 관을 따라 발생하는 열 전도는 거의 무시할 수 있습니다. 열 전달의 유일한 중요한 원천은 기체의 운동으로 인한 대류(대류)와 기체와 판더미(스택) 사이의 열 전도입니다.

B.1 판 더미 (스택) 영역에서 원래 $x_0 = L/4$ 에 있던 기체 덩어리 (소포)를 고려해 보겠습니다. 기체 덩어리 (소포)가 판 더미 (스택) 내에서 움직일 때, 가까이 있는 판 더미 (스택)의 국소적 온도는 다음과 같이 변합니다: 0.4pt

$$T_{\text{ENV}}(t) = T_0 - T_{\text{ST}} \cos(mt). \quad (5)$$

T_{ST} 를 a, τ, l 로 표현하세요.

B.2 임계 온도차 $\tau_{\text{(CR)}}$ 이상이어야 하며, 기체가 고온 열저장소(저장고)에서 저온 열저장소로 열을 운반할 수 있을까? $\tau_{\text{(CR)}}$ 을 T_0, γ, kl 로 표현하시오. 1.0pt

B.3 기체의 작은 덩어리 (소포)로 들어가는 열 흐름 dQ_t 의 일반적인 근사식을 부피와 압력 변화와 화살들의 1차항으로 구하시오. 부피 dV , 압력 변화 dP , 기체 덩어리 (소포)의 압력과 부피에 대한 평형 값 p_0, V_0 및 단열 상수 γ 로 표현하시오. (일정한 부피의 몰 열 $c_v = \gamma R / (\gamma - 1)$ 으로 정할 수 있습니다. R 은 기체 상수입니다.) 0.8pt

기체 덩어리(소포)와 판 더미(스택) 사이의 열 흐름 때문에 기체 덩어리(소포)의 압력과 부피 진동 사이에 위상 차이가 발생한다. 이것이 어떻게 일(work)을 생성하는지 살펴보겠습니다.



판 더미 (스택)에서 기체 덩어리 (소포)로 들어가는 열 다발 (heat flux)은, 서로 인접한 기체 덩어리 (소포)와 판 더미 (스택) 사이의 온도차에 비례하여 실질적으로

$\frac{dq}{dt} = -\beta V \left(T_{st} - T_{(1)} \right) \cos(mt)$ 로 주어집니다. TT 은 각각 문제 A.5 의 기체 덩어리 (parcel) 와 B.1 의 인접한 판 더미의 온도 변화 (oscillation) 의 진폭이고, $\beta > 0$ 은 상수이다. 이 장치로 구동되는 기계 작동의 진동수에서, 이 열 흐름의 결과로 인한 기체 온도의 변화가 $T_{(1)}$ 및 $T_{(st)}$ 에 비해 매우 작다고 가정한다.

B.4	일 (work) 을 계산하기 위해 판 더미 (stack) 와의 열 접촉이 만드는 움직이는 기체 덩어리 (parcel) 의 부피 변화를 생각해 봅시다. 판 더미 (스택) 의 영향을 받는 기체 덩어리 (소포) 의 압력과 부피를 다음과 같이 표현해 봅시다: $p = p_0 + p_a \sin(mt) - p_b \cos(mt),$ $V = V_0 + V_a \sin(mt) + V_b \cos(mt).$ p_a, p_b 는 주어졌다고 생각하고, 계수 V_a 와 V_b 를 구하십시오. 답은 $p_a, p_b, p_0, V_0, \gamma, \tau, \tau_{cr}$ 입니다, β, γ, m, a 으로 표현하세요.	1.9pt
B.5	한 주기 동안 기체 덩어리 (소포)가 생성하는, 단위 부피당 소리를 만드는 일 (어쿠스틱 work) w 의 근사적 표현식 (근사 표현식) 을 구하십시오. 판 더미 (스택) 의 부피에 대해 적분하여 기체가 생성하는 전체 전력 $W_{(tot)}$ 을 구하십시오. $W_{(tot)}$ 을 $\gamma, \tau, \tau_{cr}, \beta, m, a$ 로 표현하세요.	0.8pt
B.6	한 주기 $x = x(0)$ 평면의 왼쪽에서 오른쪽으로 운반된 열 $Q_{(합계)}$ 에 대한 근사적 표현식 (근사식) 을 구하십시오. 답을 $\tau, \tau_{cr}, \beta, m, a, S$ 로 표현하십시오. (힌트: 대류에 의한 열전류 () 공식 $j = Q_{(합계)}^d$ 를 사용할 수 있습니다.)	0.8pt
B.7	열-소리 기관의 효율 η 을 구하십시오. 효율은 소리로 발생하는 일 (음향 작업) 과 고온 열 저장소 (축열소) 에서 공급된 열량의 비율로 정의된다. 고온 열 저장소 (축열소) 와 저온 열 저장소 사이의 온도차 τ , 임계 온도차 $\tau_{(CR)}$ 및 카르노 효율 $\eta_c = 1 - T_c / T_H$ 로 답을 표현하십시오.	0.6pt