서론

그림 1은 자이로스코프를 보여 준다. 자이로스코프는 방향과 각속도를 측정하거나 유지하는 데 쓰이는 장치이다. 짐벌에 장착된 회전 바퀴로 이루어져 있어 그 축이 어느 방향이든 자유롭게 향할 수 있다. 회전하고 있을 때에는 각운동량 보존에 따라 장착대를 기울이거나 돌려도 축의 방향이 변하지 않는다.

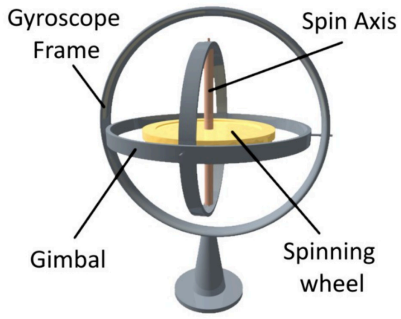


그림 1. 자이로스코프

자이로스코프의 바탕이 되는 물리는 각운동량 보존 원리이다. 이는 외부 돌림힘이 작용하지 않으면 계의 각운동량이 일정하게 유지된다는 것이다. 자이로스코프에서 회전하는 바퀴는 큰 각운동량을 만든다. 외부 힘이 자이로스코프의 축 방향을 바꾸려 하면, 자이로스코프는 각운동량 때문에 이 방향 변화에 저항한다. 이 거동은 자이로 효과로 기울기가 안정화되어 균형을 잡으면서 축 둘레로 도는 팽이와 같다.

자이로스코프의 거동은 강체 회전에 대한 오일러 방정식에서 유도된 운동 방정식으로 기술된다. 이 방정식들은 돌림힘과 회전 속도를 다루며, 여러 조건에서 자이로스코프가 어떻게 그리고 왜 그렇게 움직이는지를 설명한다. 이 때문에 자이로스코프는 정확한 방향 정보가 중요한 항공기, 우주선, 선박의 항법 장치 같은 응용에 필수적이다. 그 밖에도 자가 균형 스쿠터 같은 자동 균형 이동 수단이나 첨단 로봇공학에서는 자이로스코프와 가속도계를 함께 써서 균형을 동적으로 조절하고 유지한다.

실험 준비 안내

1. 정전기 방지 매트를 책상 위에 놓는다.
2. 그림 1과 같이 A자 모양 스탠드 바닥에 별 손잡이 세 개를, 옆면에 손잡이를 돌려 끼운다.

3. 

그림 1

4. 진동과 잡음을 줄이는 정전기 방지 매트 위에 A자 모양 스탠드를 놓는다.
5. 자이로스코프 본체의 수직 스탠드를 스탠드에 끼운다.
6. 알루미늄 관을 중심축에 끼우고 제공된 별 손잡이로 단단히 고정한다. 장치는 그림 2와 같은 모습이 되어야 한다.

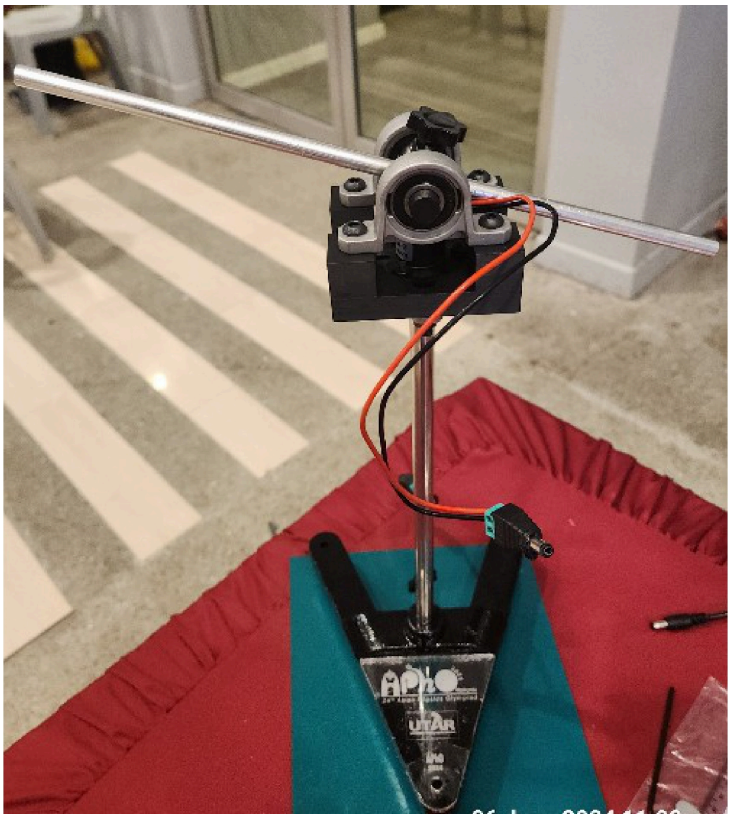


그림 2

7. 그림 3과 같이 바닥의 전선 잭을 조절식 전원 어댑터에 연결한다.



그림 3.

8. 모터에 공급하는 전원의 극성을 바꾸려면, 제공된 드라이버로 이 연결 잭의 전선을 바꿔 끼우면 된다.

모터 설치

1. 모터를 알루미늄 관에 돌려 끼우고, 그림 4와 같이 모터의 DC 잭을 수직 스탠드의 DC 잭에 연결한다.

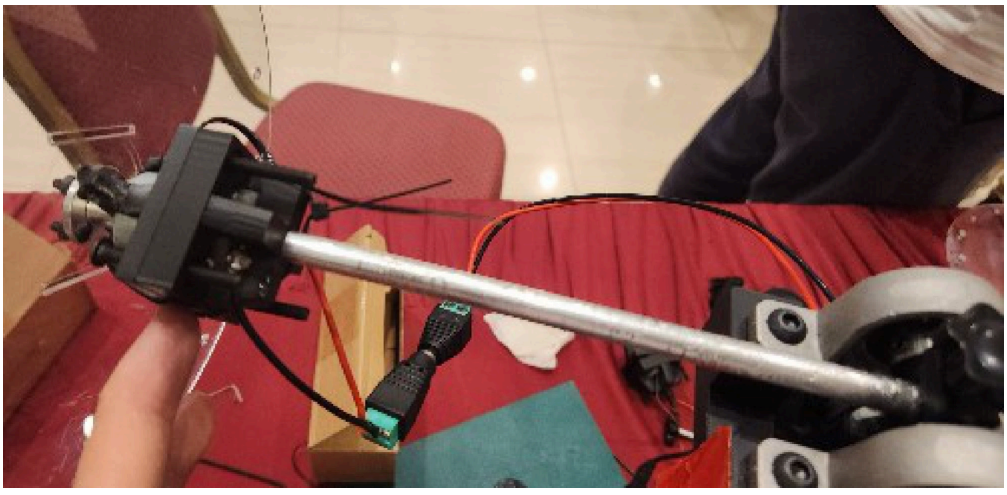


그림 4

2. 그림 5와 같이 제공된 M3 볼트와 너트로 커플러를 원판에 붙일 수 있다.



그림 5

3. 그런 다음 커플러를 모터 축에 끼우고 그림 6과 같이 옆면의 고정 나사로 잠근다.

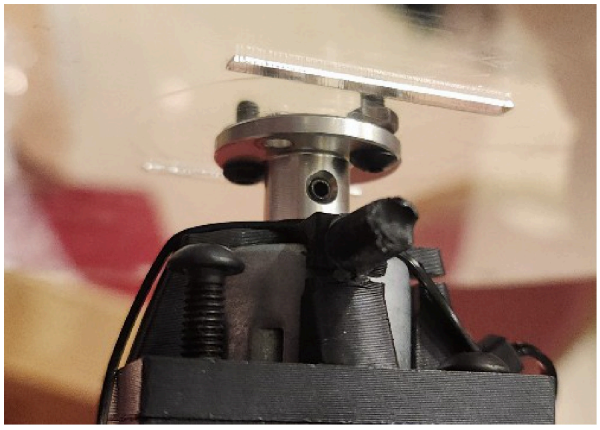


그림 6

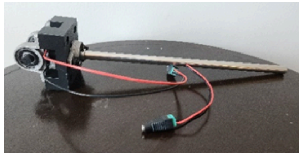
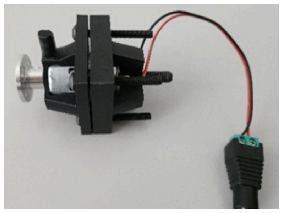
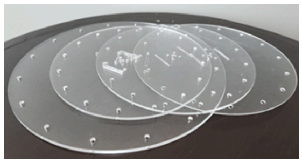
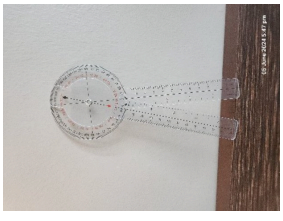
26 mm 원판 설치

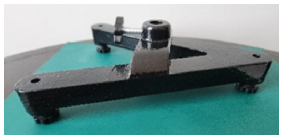
1. 26 mm 원판을 와셔 두 개 사이에 끼운다.
2. 그림 7과 같이 제공된 M6 나사로 알루미늄 관에 고정한다.



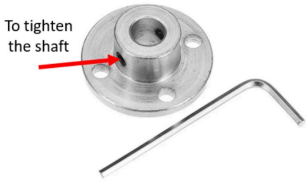
그림 7

기구/재료

자이로스코프 본체 수직 스탠드 1개	조절식 전원 어댑터 1개	케이스와 커플러가 있는 DC 모터 1개
		
두께 2 mm, 3 mm, 4 mm인 지름 20 cm 회전 원판. 지름 26 cm 균형추 원판.	측각기(각도자) 1개	스톱워치
		
정전기 방지 매트	알루미늄 관	스탠드

		
볼트와 너트, 육각 렌치, 드라이버, 전선 타이, 케이블 타이, 양면 테이프, 자, 모터 축 커플러		

원판을 DC 모터에 장착하려면 커플러에 연결하여 단단히 조여야 한다.



부품의 질량

지름 20 cm × 두께 2 mm 회전 원판 → 65 ± 1 g

지름 20 cm × 두께 3 mm 회전 원판 → 89 ± 1 g

지름 20 cm × 두께 4 mm 회전 원판 → 131 ± 1 g

지름 26 cm × 두께 4 mm 회전 원판 → 231 ± 1 g

케이스를 포함한 DC 모터 → 94 g

알루미늄 관의 질량은 실험 전체에서 무시할 수 있다.

주의!!!

1. 조절식 전원 어댑터를 켜기 전에 손잡이가 OFF에 있는지 확인하라. 높은 전압을 DC 모터에 공급하면 모터가 탄다. 구동 전압을 6 V 이하로 제한하라. 6 V를 넘겨 구동하면 모터가 과열되어 탈 수 있다. *제대로 조작하지 않은 데 대한 벌칙으로 참가자가 직접 DC 모터를 납땜하여 교체해야 한다.
2. 장치를 오랫동안(10분 이상) 계속 작동시키지 마라. 각 실험이 끝나면 모터를 쉬게 하라.
3. 실험을 시작할 때나 모터가 돌아가는 동안에는 안정될 때까지 스탠드를 잡고 있어라. 실험 중에 강한 진동이 생긴다.
4. 회전 원판은 안전상 위험할 수 있으니, 돌아가는 동안 맨손으로 만지지 말고 전원을 끈 뒤 완전히 멈출 때까지 기다려라.

5. DC 모터의 배선은 가늘므로 연결부를 매우 조심스럽게 다뤄라.
6. 3D 프린팅된 DC 모터 홀더는 깨지기 쉬우므로, 이 부품을 조절할 때 무리한 힘을 쓰지 마라. 부품이 부러질 수 있다.

파트 A: 받침대 수평 맞추기와 스탠드를 정확히 연직으로 세우기 [총점 = 1.0]

수평 조절 기능이 있는 스탠드가 제공된다. 실험을 하려면 수평계 없이 자이로스코프 실험 키트의 수직 기둥이 완전히 연직이 되도록 맞춰야 한다. 이 목적을 위해 제공된 모든 기구를 사용해도 된다.

*이 장치의 수평을 맞추는 것은 이후 모든 파트에 매우 중요하므로, 신중히 수행하고 맞춘 뒤에는 그 상태를 유지하라.

A.1. 수평계 없이 자이로스코프 실험 키트의 수평을 맞추는 방법을 보이도록 장치를 그려라. 그림에 부품을 표시하고, 모든 부품을 자세한 정보와 함께 표시하라. **[0.6]**

A.2. 장치에서 작용하는 힘을 표시하라. **[0.2]**

A.3. 다음 두 요인 중 스탠드가 연직인지를 가장 정밀하게 판단할 수 있게 해 주는 것은 무엇인가? **[0.2]**

(a) 팔의 길이가 같음

(b) 팔의 길이가 다름

(c) 원판의 크기

(d) 원판의 두께

(e) 원판의 무게

(f) DC 모터의 무게

(g) DC 모터에 걸어 준 전압

파트 B: 회전 속도의 영향 [총점 = 6.5]

목표: 자이로스코프의 각속도가 안정성과 세차 주기에 어떤 영향을 주는지 조사한다.

재료: 자이로스코프 실험 키트, 조절식 전원 어댑터, DC 모터, 측각기, 스톱워치, 20 cm(두께 3 mm) 회전 원판, 자.

이 파트에서는 팔의 균형을 맞추지 않고 자유롭게 매달리도록 둔다.

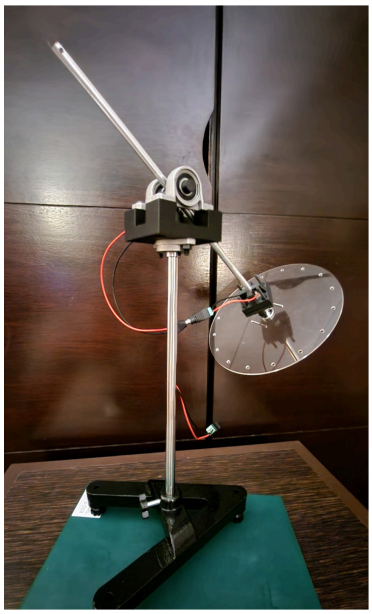


그림 2

과정:

1. 지름 20 cm, 두께 3 mm인 회전 원판을 DC 모터에 고정하고, 그림 2와 같이 자이로스코프 팔의 한쪽에 수직 방향으로 장착한다.

결과:

B.1.	얻은 값들을 계산된 세차 주기(s)와 함께 표로 정리하라.	**[1.5]**

B.2.	세차 주기의 표준편차와 표준오차를 계산하라. 사용한 자료 한 세트에 대해 식과 함께 과정을 보여라.	**[0.8]**

B.3.	세차 주기를 구동 전압에 대해 오차 막대와 추세선을 포함하여 그려라.	**[0.9]**

분석:

B.4.	위 실험 결과를 이용하여 세차 주기와 DC 모터 구동 전압 사이의 관계를 구하라.	**[0.2]**

B.5.	DC 모터의 성능 특성이 표 1과 같이 주어져 있다. 세차 각속도와 DC 모터 회전수 사이의 관계를 구하라.	**[1.0]**

표 1

전압 (V)	전류 (A)	회전수 (rpm)
3.7	176 mA	7200
4.8	185 mA	9700
6.0	205 mA	12600
7.4	230 mA	15600
9.6	245 mA	19800
12.0	298 mA	24500

주의: 전압을 6 V 이상으로 올리지 마라. 이 표는 참고용이며 그대로 재현하기 위한 것이 아니다.

B.6.	그림 2와 같이 균일한 고리의 관성 모멘트가 $I = mR^2$ 으로 주어져 있다. 질량이 M, 반지름이 R 이라고 하자.	

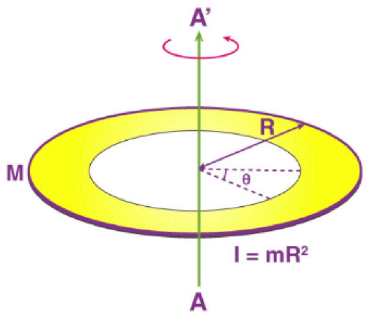


그림 2. 균일한 고리의 관성 모멘트.

(i)	회전축 AA'에 대한 균일한 원판의 관성 모멘트 식을 유도하라.	**[0.5]**

(ii) 지름 20 cm, 두께 3 mm인 회전 원판의 관성 모멘트를 계산하라. **[0.2]**

(iii) 세차 각속도가 다음과 같이 주어져 있다. **[1.0]**

$$\omega_p = \frac{mgr}{I \cdot \omega_s}$$

여기서
m 은 관계된 질량,
r 은 받침점에서 계의 질량중심까지의 거리,
I 는 회전 원판의 관성 모멘트(관성 모멘트가 오로지 회전 원판에서만 온다고 가정),
ω_s 는 자이로스코프의 회전 속도이다.
이 실험에 관계된 모든 외력을 그림으로 그리고 표시하라. 각운동량으로부터 이 장치의 세차 각속도 식을 유도하라.

(iv) 모터를 6 V로 구동할 때, 표 1의 모터 회전수를 바탕으로 이론적인 세차 각속도를 계산하라. **[0.4]**

파트 C: 자이로스코프 팔 길이의 영향 [총점 = 2.1]

목표: 자이로스코프 팔의 길이 변화가 세차 운동에 미치는 영향을 조사한다.

재료: 자이로스코프 실험 키트, 조절식 전원 어댑터, DC 모터, 측각기, 스톱워치, 20 cm(두께 3 mm) 회전 원판, 자.

과정:

1. 앞의 장치를 바탕으로, 자이로스코프 팔을 고정하는 별 손잡이를 푼다.
2. 자이로스코프 팔의 길이를 조절하여 장치 중심으로부터 12 cm가 되게 한다.
3. 별 손잡이를 조인다.
4. 자이로스코프 구동 전압을 약 4.5 V로 맞추고 안정될 때까지 기다린다.
5. 스톱워치로 회전 주기를 측정하여 기록한다.
6. 12 cm에서 22 cm 사이의 여러 길이에 대해 실험을 반복한다.

*이 실험에서 오차 분석은 필요하지 않다.

주의: 알루미늄 관이 항상 들려 있어 홀더에 닿지 않도록 하라.

결과:

C.1.	얻은 값들을 계산된 세차 각속도(rad/s)와 함께 표로 정리하라.	**[1.2]**

C.2.	세차 각속도를 측정한 길이에 대해 그려라.	**[0.8]**

C.3.	팔 길이에 따른 세차 운동의 변화를 고르라. (a) 팔 길이가 늘어나면 세차 각속도가 커진다 (b) 팔 길이가 늘어나면 세차 각속도가 작아진다 (c) 팔 길이가 늘어나도 세차 각속도는 그대로이다	**[0.1]**

파트 D: 자이로스코프 원판 무게의 영향 [총점 = 3.7]

목표: 자이로스코프 원판의 무게 변화가 세차 운동에 미치는 영향을 조사한다.

재료: 자이로스코프 실험 키트, 조절식 전원 어댑터, DC 모터, 측각기, 스톱워치, 20 cm 회전 원판(두께 2 mm, 3 mm, 4 mm).

이 파트에서는 팔의 균형을 맞추지 않고 자유롭게 매달리도록 둔다.

과정:

1. 앞의 장치를 바탕으로, 자이로스코프 팔을 고정하는 별 손잡이를 푼다.
2. 자이로스코프 팔의 길이를 조절하여 회전 원판이 장치 중심으로부터 다시 15 cm가 되게 한다.
3. 별 손잡이를 조인다.
4. 회전 원판을 두께 2 mm인 것으로 바꾼다.
5. 파트 B의 3~6단계를 반복한다.
6. 두께 4 mm인 회전 원판으로 실험을 반복한다.

주의: 오차 분석은 필요하지 않다.

결과:

D.1.	얻은 값들을 계산된 세차 각속도(rad/s)와 함께 표로 정리하라.	**[1.7]**

D.2.	파트 B를 포함하여 측정한 모든 두께에 대해 세차 각속도를 구동 전압에 대해 그려라.	**[1.1]**

D.3.	원판 무게에 따른 세차 운동의 반응으로 옳은 것을 고르라. (a) 원판 무게가 늘어나도 자이로스코프의 세차 운동은 변하지 않는다. (b) 원판 무게가 늘어나면 자이로스코프는 더 빨리 세차한다. (c) 원판 무게가 늘어나면 자이로스코프는 더 느리게 세차한다.	**[0.1]**

D.4.	주어진 원판의 질량을 참고하지 말고, 실험 측정값을 바탕으로 원판들의 질량을 계산하라. 관성 모멘트가 오로지 원판에서만 온다고 가정하라.	**[0.8]**

파트 E: 외력에 의한 돌림힘 [총점 = 3.5]

목표: 외부 돌림힘이 자이로스코프의 거동에 어떤 영향을 주는지 이해한다.

재료: 모터가 달린 자이로스코프, 20 cm(두께 2 mm) 회전 원판, 스테인리스 볼트와 너트, 스톱워치, 측각기.

과정:

1. 20 cm(두께 2 mm) 회전 원판을 설치한다.
2. 지름 26 cm의 균형추 원판을 자이로스코프 팔의 반대쪽 끝에 붙인다.
3. 별 손잡이를 풀고 팔이 수평으로 균형을 이룰 때까지 팔 길이를 조절한다.
4. 이 파트의 실험 동안 팔 길이가 변하지 않도록 별 손잡이를 조인다.
5. DC 모터에 5 V를 걸고, 세차 각속도와 지레 각이 모두 안정될 때까지 기다린다.
6. 세차 운동이 일어나지 않는지 관찰하여 확인한다.
7. 전원 어댑터를 끈다.
8. 스테인리스 볼트와 너트를 균형추 원판에 몇 개 더한다. 원판 둘레에 뚫린 구멍에 단단히 조인다.
9. 스톱워치로 회전 주기를, 측각기로 지레 각을 측정하여 기록한다.
10. 볼트와 너트의 개수 변화에 따른 각의 변화를 측정한다.
11. 볼트와 너트의 개수를 달리하여 측정을 반복한다.
12. 결과에 오차 계산을 포함한다.

결과:

E.1.	얻은 값들을 계산된 세차 각속도(rad/s)와 오차 추정과 함께 표로 정리하라.	**[1.3]**

E.2.	측정한 볼트·너트 세트 개수에 대해 세차 각속도를 그려라. 선형 추세선을 포함하라.	**[0.8]**

E.3.	측정한 볼트·너트 세트 개수에 대해 지레 각을 그려라.	**[0.8]**

분석:

E.4.	실험 자료를 이용하여 볼트·너트 한 세트의 질량을 구하라.	**[0.5]**

E.5. 이제 나사를 회전 원판에 더하면 세차 운동의 방향이 반대가 되고 세차 각속도도 이전 결과와 달라지는 것을 볼 수 있다. 어떤 매개변수가 영향을 받는가? m, g, r, I, ω_s 중에서 고르라. 둘 이상이면 영향이 큰 것부터 작은 것 순으로 나열하라. **[0.1]**

파트 F: 장동 현상 [총점 = 1.5]

목표: 충격량이 자이로스코프의 장동 진동수와 감쇠에 어떤 영향을 주는지 그 특성을 관찰한다. 장동은 기울기의 주기적인 변화이다.

재료: 자이로스코프 실험 키트, 조절식 전원 어댑터, DC 모터, 측각기, 스톱워치, 20 cm 회전 원판(두께 2 mm), 26 cm 균형추 원판.

과정:

1. 앞 실험에서 원판에 달았던 볼트와 너트를 모두 뺀다.
2. 별 손잡이를 풀고 팔이 수평으로 균형을 이룰 때까지 팔 길이를 조절한다.
3. 별 손잡이를 조인다.
4. DC 모터에 4 V를 걸고 안정될 때까지 기다린다.
5. 원판이 (사람을 향한 면 기준) 반시계 방향으로 도는지 확인한다.
6. 균형추를 빠르게 눌렀다 놓아 충격량을 준다.
7. 변화를 관찰한다. 중요하다고 생각되는 매개변수를 기록한다.
8. 알루미늄 관의 길이를 바꾸어, 회전 원판의 각이 수평보다 높아지는 불균형 상태를 만든다.
9. 5~6단계를 반복한다. 원판이 도는 동안 회전 팔의 회전 원판 쪽을 잡아 더 높이 들어 올린다.
10. 잡은 것을 놓고 원판의 운동을 관찰한다.
11. 회전 원판을 수평보다 낮게 하여 7~9단계를 반복한다.

결과 및 분석:

F.1.	수평보다 낮은 각과 수평보다 높은 각에 대해 관찰한 장동 운동을 그려라.	**[0.4]**

분석:

F.2. 관찰한 현상을 이해하기 위해 강체 동역학에 대한 일반적인 오일러 방정식에서 출발할 수 있다.

$$I_1\dot{\omega}_1 + (I_3 - I_2)\omega_2\omega_3 = \tau_1 \qquad \text{Eq-1}$$
$$I_2\dot{\omega}_2 + (I_1 - I_3)\omega_3\omega_1 = \tau_2 \qquad \text{Eq-2}$$
$$I_3\dot{\omega}_3 + (I_2 - I_1)\omega_1\omega_2 = \tau_3 \qquad \text{Eq-3}$$

여기서 I_1, I_2, I_3 는 주축에 대한 관성 모멘트, ω_1, ω_2, ω_3 는 이 축들에 대한 각속도 성분, τ_1, τ_2, τ_3 는 외부 돌림힘의 성분이다.

(i)	설정한 전압에서 원판이 축 3 방향으로 대칭이라고 가정하라. 겉보기 돌림힘이 없는 기준틀을 생각하자. 이 기준틀에서 식 1~3을 풀어 장동 진동수 식을 구하라.	**[1.0]**

(ii)	F.2의 유도 과정 중 장동이 단순조화운동임을 보이는 부분을 밝혀라.	**[0.1]**

파트 G: 자이로스코프의 자가 균형 응용 [총점 = 1.7]

서론: 자가 균형 자이로스코프는 각운동량의 원리를 이용하여 방향과 균형을 자동으로 유지하는 장치이다. 축이 어느 방향이든 자유롭게 향할 수 있는 회전 바퀴 또는 회전자로 이루어져 있다. 회전하는 동안 각운동량 보존에 의해 축은 같은 방향을 계속 향하려 한다. 자가 균형 자이로스코프의 응용은 매우 광범위해서 선박과 항공기의 안정화 플랫폼, 오토바이와 자전거의 안정성 향상, 로봇의 균형과 정밀한 운동 제어 등을 포함한다.

목표: 각운동량과 자이로 안정화의 원리를 시연하고 이해한다. 이 시제품을 설계하고 제작하면서 자이로스코프가 여러 조건에서 어떻게 방향과 균형을 유지하는지 탐구하고, 항공우주의 항법 장치, 자동차 안정화, 로봇 균형 기구 같은 실제 기술에서의 응용을 이해하게 된다.

G.1	가진 부품으로 시제품을 만들어 자가 균형 자이로스코프의 능력을 시연해 보라. 사용한 모든 부품을 표시하고, 움직이는 부분과 고정된 부분을 분명히 밝혀라. 장치의 안전성도 고려 대상이다. 이 실험에서는 커플러를 떼어 내고, 원판을 바꾸고, DC 모터 클램프를 고정하는 볼트 네 개를 빼서 제공된 부품으로 새 장치를 만드는 것이 허용된다. 시제품을 그리고 표시하라.	**[1.7]**