

일반물리학실험 보고서

스넬의 법칙

학과 :

학번 :

이름 :

공동실험자 :

담당 교수 :

담당 조교 :

실험 날짜 : 2019.12.02(월)

제출 날짜 : 2019.12.09.(월)

1. 실험 목적

백색광과 사각 프리즘을 사용하여 빛의 굴절에 대한 스넬의 법칙을 이해한다. 나란한 광선을 얇은 볼록 렌즈와 오목 렌즈에 입사시켜 광선의 진행 경로를 관찰한다. 이로부터 볼록 렌즈와 오목렌즈의 차이점을 배운다.

2. 실험 원리

(1) 스넬의 법칙

빛이 투명한 매질 1에서 매질 2로 진행을 할 때 빛은 굴절이 되며 굴절이 되는 각도는 스넬(Snell)의 법칙을 따른다. 스넬의 법칙은 입사각이 θ_1 , 굴절각이 θ_2 , 그리고 각각의 매질에서의 굴절률을 n_1 , n_2 라고 할 때

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (\text{유도는 부록 참고})$$

로서, 굴절각은 입사각과 물질의 굴절률에 따른다는 것을 나타낸다. 빛의 굴절률은 빛의 진동수에 따라 달라지므로 주어진 각으로 물질이 입사하는 백색광은 구성 성분의 진동수에 따라 다른 색으로 분리되어 제각기 다른 각도로 굽어진다.

빛이 굴절률이 큰 물질에서 작은 물질로 진행하면 입사각보다 더 큰 각도로 굴절되고 특정 입사각에서는 굴절각이 90° 가 되는 현상이 발생한다. 이 특정 입사각을 임계각(critical angle, θ_c)이라고 하고, 입사각이 임계각보다 크면 굴절된 빛은 없고 완전 내부 반사가 일어난다. 만일 입사각이 정확히 임계각과 같아서 굴절각이 90° 가 되면 스넬의 법칙은 다음과 같다.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin 90^\circ$$

여기서 공기의 굴절률 $n_2 = 1$ 이라고 할 때, 다시 쓰면 다음과 같다.

$$n_1 = \frac{1}{\sin \theta_c}$$

(2) 얇은 렌즈의 초점 거리

렌즈의 두께가 물체와의 거리, 상과의 거리 및 렌즈 굴절면의 곡률 반지름보다 매우 얇아서 렌즈의 두께 효과를 무시할 수 있는 렌즈를 얇은 렌즈라고 한다. 얇은 렌즈의 초점 거리는 다음과 같다.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q}$$

여기서 p 는 렌즈부터 물체까지의 거리이고, q 는 렌즈부터 상까지의 거리이다. 물체의 크기에 대한 상의 크기를 나타내는 렌즈의 비율은

$$M = -\frac{q}{p}$$

로 표현이 된다. 여기서 음의 부호는 도립상을 나타낸다.

3. 실험 기구 및 재료

광원, 사각 프리즘, 사각 볼록 렌즈, 사각 오목 렌즈, 볼록 렌즈, 광학대, 각도기, 종이

4. 실험 방법

(1) 스넬의 법칙

- ① 광원을 흰 종이 위에 놓고 백색광 한 줄기가 보이도록 맞춘다.
- ② 사각 프리즘을 놓고 빛이 평행한 부분을 지나도록 조정한다.
- ③ 사각 프리즘의 모양을 그리고 들어가는 빛, 나가는 빛의 경로를 그린다.
- ④ 사각 프리즘을 제거하고 빛이 들어간 점과 나간 점을 연결하여 그린다.
- ⑤ 빛이 들어간 점에서 사각 프리즘의 면과 수직인 직선을 긋는다.
- ⑥ 입사각과 굴절각을 재고 기록한다.
- ⑦ 입사각의 크기를 몇 번 더 바꾸어 위 과정을 반복한다
- ⑧ $\sin\theta_1$ 과 $\sin\theta_2$ 와의 관계 그래프를 그리고, 그 기울기로부터 공기의 굴절률을 1이라 가정하여 아크릴 사각 프리즘의 굴절률을 구한다.

$$(n_2 = n_1 \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}, n_1 = 1)$$

(2) 프리즘

- ① 광원을 흰 종이 위에 놓고 하나의 백색광이 보이도록 맞춘다.
- ② 사각 프리즘의 삼각 모서리를 프리즘으로 사용한다. 빛의 투과를 크게 하기 위해 프리즘 끝 부분에 빛이 지나도록 한다.
- ③ 프리즘을 돌려서 투과한 빛의 각(θ_2)을 가능한 크게 하고 빛이 여러 가지 색으로 나누어 지게 한다.
- ④ 스넬의 법칙을 사용하여 빨강색, 초록색, 보라색에 대한 프리즘의 굴절률을 구한다.

$$(n_2 \frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1} = n_1, n_2 = 1)$$

(3) 완전 반사

- ① 광원을 흰 종이 위에 놓고 백색광 한 줄기만 보이도록 맞춘다.
- ② 실험2와 같이 사각 프리즘을 놓는다. 광선이 삼각 꼭짓점에 너무 가깝게 입사하지 않도록 유의한다.
- ③ 프리즘을 통과하여 굴절되는 빛이 거의 사라지도록 사각 프리즘을 돌린다.
- ④ 사각 프리즘의 표면을 따라 모양을 그리고 빛이 들어간 지점, 내부 반사가 된 지점, 나오는 지점을 정확히 표시한다(빨강, 초록, 보라 각각의 색에 대하여 표시한다.).
- ⑤ 사각 프리즘을 제거하고 들어간 빛과 반사된 빛을 그리고 $2\theta_c$ 를 각도기로 재고 빨강, 초록, 보라 세 가지 색에 대한 임계각 θ_c 를 각각 기록한다.
- ⑥ 세 가지 색에 대한 굴절률을 계산하고 실험 2의 결과와 비교한다.

$$(n_1 = \frac{1}{\sin\theta_c})$$

(4) 볼록 렌즈와 오목 렌즈

- ① 광원을 흰 종이 위에 놓고 세 개의 나란한 빛이 사각 볼록 렌즈를 비추도록 한다. 렌즈의 표면을

따라서 렌즈 모양을 그린 후, 들어가는 빛과 나가는 빛을 그리고 화살표로 빛의 진행 방향을 표시한다.

② 렌즈 중심으로부터 초점(빛이 교차하는 지점)까지의 거리를 재고 기록한다.

③ 광원을 흰 종이 위에 놓고 세 개의 나란한 빛이 사각 오목 렌즈를 비추도록 한다. 렌즈의 표면을 따라서 렌즈 모양을 그린 후, 들어가는 빛과 나가는 빛을 그리고 화살표로 빛의 진행 방향을 표시한다.

④ 렌즈를 통과하여 나가는 빛의 연장선을 나가는 반대 방향, 즉 렌즈 방향으로 렌즈를 통과하도록 두고 렌즈 중심으로부터 초점(연장선의 교차점)까지의 거리를 재고 기록한다.

5. 측정값

(1) 스넬의 법칙

입사각($^{\circ}$)	굴절각($^{\circ}$)
14	7
39	22
40	25
51	35
68	39

<표1 : 실험1(스넬의 법칙)에서 입사각과 반사각 : 공기->프리즘>

(2) 프리즘

색	입사각($^{\circ}$)	굴절각($^{\circ}$)
빨강	31	49.5
초록	31	49.8
보라	31	50

<표2 : 실험2(프리즘)에서 색깔에 따른 입사각과 반사각 : 프리즘 -> 공기>

(3) 완전 반사

색	임계각($^{\circ}$)
빨강	41
초록	41.5
보라	42

<표3 : 실험3(완전 반사)에서 색깔에 따른 임계각 : 프리즘-> 공기>

(4) 볼록 렌즈와 오목 렌즈

	초점 거리(cm)
볼록 렌즈	16
오목 렌즈	11

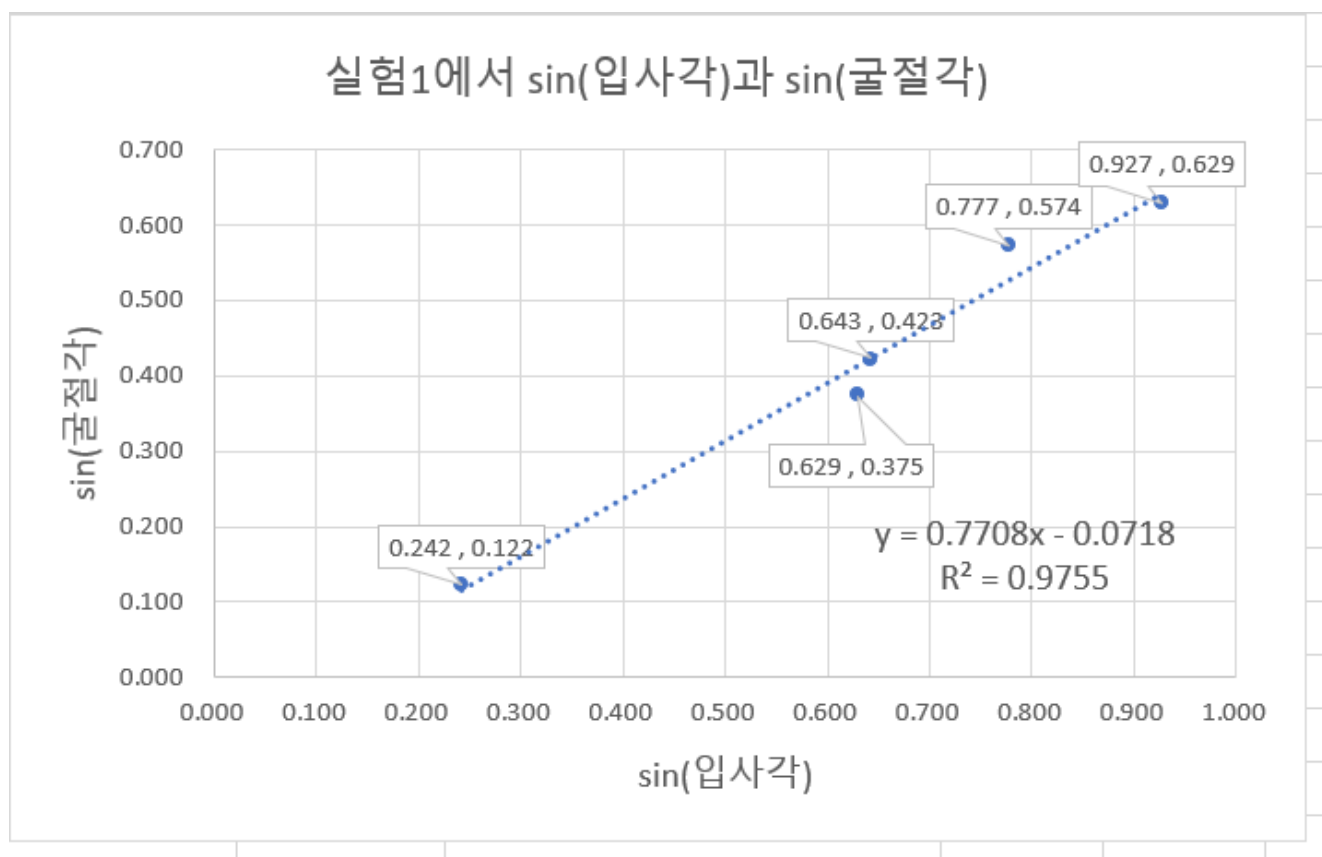
<표4 : 실험4(볼록 렌즈와 오목 렌즈)에서 각 렌즈의 초점 거리>

6. 실험 결과

(1)스넬의 법칙

입사각 (°)	굴절각 (°)	sin(입사각)	sin(굴절각)	굴절률	실제 굴절률 대비	이론 굴절각 (°)	이론 굴절각 대비
14	7	0.2419	0.1219	1.985	32.34%	9.28	-24.58%
39	22	0.6293	0.3746	1.680	12.00%	24.81	-11.31%
40	25	0.6428	0.4226	1.521	1.40%	25.37	-1.47%
51	35	0.7771	0.5736	1.355	-9.67%	31.20	12.16%
68	39	0.9272	0.6293	1.473	-1.78%	38.18	2.15%

<표5 : 입사각과 반사각으로부터 굴절률을 구하고 실제 프리즘의 굴절률과 비교하였다. 그리고 표시된 입사각 대로 입사하였을 때 이론적인 굴절각(굴절률은 1.5라고 가정)을 구하고 실제 측정한 굴절각과 비교하였다.>



<그림1 : 실험1에서 sin(입사각) - 또는 $\sin\theta_1$, sin(굴절각) - 또는 $\sin\theta_2$ 와의 관계 그래프. 추세선 식은 $y=0.7708x-0.0718$ 이다.>

$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ 에서 $\frac{n_1 \sin \theta_1}{\sin \theta_2} = n_2$ 이므로, 그림1에서 구한 기울기값 0.7708을 활용하여

프리즘의 굴절률을 구하면 다음과 같다.

$$n_2 = \frac{n_1 \sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{1}{0.7708} = 1.297$$

따라서 실험 결과로부터 프리즘의 굴절률이 1.297임을 계산하였으며, 이는 실제 프리즘 굴절률 대비 -13.53%차이가 난다.

(2) 프리즘

색	입사각(°)	굴절각(°)	sin(입사각)	sin(굴절각)	굴절률
빨강	31	49.5	0.515	0.760	1.476
초록	31	49.8	0.515	0.764	1.483
보라	31	50	0.515	0.766	1.487

<표6 : 실험2(프리즘)에서 색깔에 따른 입사각과 반사각 및 sin(입사각), sin(굴절각), 굴절률 : 프리즘 -> 공기>

(3) 완전 반사

색	임계각(°)	sin(임계각)	굴절률	실험2 굴절률	실험2 굴절률 대비
빨강	41	0.656	1.524	1.476	3.241%
초록	41.5	0.663	1.509	1.483	1.765%
보라	42	0.669	1.494	1.487	0.479%

<표7 : 실험3(완전 반사)에서 색깔에 따른 임계각과 굴절률 및 실험2에서 구한 굴절률과의 비교 : 프리즘-> 공기>

(4) 볼록 렌즈와 오목 렌즈

	초점 거리(cm)	볼록 렌즈 대비	오목 렌즈 대비
볼록 렌즈	16	0.000%	45.455%
오목 렌즈	11	-31.250%	0.000%

<표8 : 실험4(볼록 렌즈와 오목 렌즈)에서 각 렌즈의 초점 거리의 비교>

7. 결과에 대한 논의

(1) 스넬의 법칙

표5에서 이론적인 굴절각을 보면 소수점이 존재하며, 1°의 정밀도를 가진 각도기로 잴 수 없는 각도이다. 즉 입사각과 굴절각의 소수점이 무시되어 오차가 발생하였을 것이다.

기타 부수적인 오차의 원인은 공기의 굴절률(1.0003)은 진공의 굴절률과 다르다는 점, 또, 입사각을 바꿀 때마다 굴절률이 바뀌는 것으로 보아 광선을 종이에 표시하는 동안 종이나 광원이 흔들렸을 수 있다(즉 굴절 광선을 표시할 때 입사 광선이 살짝 바뀌었을 가능성이 있다.).

또 그림1에서 구한 기울기를 통해

$$n_2 = \frac{n_1 \sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{1}{0.7708} = 1.297$$

임을 알 수 있으며

따라서 실험 결과로부터는 프리즘의 굴절률이 1.297임을 알 수 있으며, 이는 실제 프리즘 굴절률 대비 -13.53%차이가 난다.

따라서 오차를 감안하면 실험 원리에서 논의한 식

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \text{ (스넬의 법칙)}$$

이 성립함을 알 수 있다.

(2) 프리즘

표6에서 알 수 있듯, 같은 프리즘에 같은 입사각으로 입사하여도 빛의 진동수가 커질 수록 굴절각이 더 커지는 것을 알 수 있다. 스넬의 법칙을 적용하면 빛의 진동수가 커질수록 프리즘의 굴절률도 커진다는 것을 알 수 있다.

굴절률 n 은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$n = \frac{c}{v}$$

그런데 맥스웰 방정식(Maxwell's equations)에 의해 빛의 속도는

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

이므로

굴절률은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$n = \sqrt{\frac{\epsilon \mu}{\epsilon_0 \mu_0}}$$

또

$$n = \frac{c}{v}, \quad v = f \lambda \text{ 이므로}$$

$$n = \frac{\lambda_c}{\lambda}$$

즉 실험에서 빛의 진동수가 커질수록 프리즘의 굴절률도 커진다는 것을 알았으므로,

$$n = \sqrt{\frac{\epsilon \mu}{\epsilon_0 \mu_0}}$$

식에 의해 유전율과 투자율이 빛의 파장에 따라 조금 달라진다는 것을 알 수 있다.

따라서 이 실험에서는 빛의 파장에 따라서 굴절률이 달라진다는 것을 알 수 있다.

(3)완전 반사

표7에서 이론적으로는, 완전 반사가 일어나는 각도가 파장이 짧아지면 짧아질수록 작아져야하나, 임계각이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 앞서 실험1 오차의 원인에서도 논의했듯이 각도기의

정확도가 1° 이기 때문에 그런 것으로 보인다. 실험2에서 구한 굴절률이 정확하다면 이론적인 임계각은 표9와 같다.

색	굴절률(실험2)	임계각(실험2) (°)	실험3 임계각(°)	실험2 대비 실험3
빨강	1.476	42.649	41	-3.867%
초록	1.483	42.401	41.5	-2.124%
보라	1.487	42.260	42	-0.615%

<표9 : 실험2의 굴절률로 구한 임계각과 실험3에서 측정한 임계각의 차이>

표9에서 알 수 있듯, 이론적인 임계각이 최대 0.389° 밖에 차이가 나지 않으며, 이는 각도기로 잴 수 없는 각도이다. 따라서 실험2에서 구한 각 색깔별 굴절률과 실험3에서 임계각을 이용해 구한 각 색깔별 굴절률이 오차가 발생한다고 할 수 있다.

따라서 오차를 고려하면 굴절률이 커질수록 임계각은 작아지고, 파장에 따라 임계각이 달라진다는 것을 알 수 있다.

(4) 볼록 렌즈와 오목 렌즈

표8에서 알 수 있듯 볼록 렌즈와 오목 렌즈가 같은 곡률을 가졌음에도 초점 거리가 차이를 보인다는 것을 알 수 있다. 오차의 원인은 볼록 렌즈와 오목 렌즈의 곡률이 미세하게 달랐을 수 있고, 특히 볼록 렌즈의 경우에는 빛의 굽기 때문에 어느 곳이 정확히 초점인지 알기 어려웠다.

오차를 고려하면 볼록 렌즈와 오목렌즈는 같은 곡률을 지니면 초점 거리가 동일하다는 것을 알 수 있다.

그리고 볼록 렌즈는 빛을 모으고, 오목 렌즈는 빛을 퍼뜨리는 성질을 가졌음을 알 수 있다.

8. 결론

(1)스넬의 법칙

사각 프리즘에 빛을 통과시켜 들어가는 빛, 나가는 빛의 경로를 그리고 입사각과 굴절각을 잰 후, $\sin\theta_1$ 과 $\sin\theta_2$ 와의 관계 그래프를 그리고, 그 기울기로부터 공기의 굴절률을 1이라 가정하여 아크릴 사각 프리즘의 굴절률을 구하였다.

그림1에서 알 수 있듯, $\sin(\text{굴절각})/\sin(\text{입사각})$ 은 0.7708이며, 따라서 프리즘의 굴절률은

$$n_2 = \frac{n_1 \sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{1}{0.7708} = 1.297$$

이다.

오차의 원인은 각도기의 정밀도(1°) 밖에 안되어 소수점까지 측정을 못하였다는 점, 굴절되어 나오는 광선을 표시할 때 프리즘이 움직여 입사각이 바뀐 것이다.

따라서 오차를 감안하면 실험원리에서 논의한 식

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \quad (\text{스넬의 법칙})$$

이 성립함을 알 수 있다.

(2)프리즘

사각 프리즘의 삼각 모서리에 빛을 통과시켜 빛이 여러 가지 색으로 나누어 지게 한 다음 입사각과 굴절각을 잰 후, 스넬의 법칙을 이용하여 굴절률을 계산하였다.

표6에서 알 수 있듯, 빨간빛의 굴절률은 1.476, 초록빛의 굴절률은 1.483, 보라색의 굴절률은 1.487이다.

이 실험에서 빛의 진동수가 커질 수록(빛의 파장이 짧아질수록) 굴절률이 증가함을 알 수 있다.(부가적으로 빛의 파장에 따라 유전율과 투자율도 조금 달라짐을 알 수 있다.)

(3)완전 반사

사각 프리즘에 빛을 통과시켜 빛이 여러 가지 색으로 나누어지게 한 다음 굴절되는 빛이 거의 사라지도록 하고 각 색깔에 대한 임계각을 재어 굴절률을 계산하고, 실험2의 결과와 비교하였다.

오차의 원인은 표9에서 알 수 있듯, 각 색깔별 임계각의 차이가 1° 미만이라 각도기로 재기 어려운 것이 크다.

따라서 표7에서 측정한 임계각은 빛의 진동수가 늘어날수록 증가하지만, 오차를 감안하면 임계각은 빛의 진동수가 늘어날수록 작아진다는 것을 알 수 있다.

(4) 볼록 렌즈와 오목 렌즈

나란한 세 빛줄기를 볼록 렌즈와 오목 렌즈에 통과시켜 초점을 찾은 다음, 초점거리를 재고 볼록 렌즈의 초점거리와 오목 렌즈의 초점거리를 비교하였다.

표8에서 알 수 있듯, 실험에 사용한 볼록 렌즈와 오목 렌즈의 곡률이 비슷함에도 불구하고, 초점거리가 많이 차이가 났는데, 이는 볼록 렌즈에 빛을 통과시켰을 때 빛줄기의 굽기로 정확한 초점을 찾기 힘들었다는 점이 크다.

따라서 오차를 감안하면, 곡률이 같은 볼록 렌즈와 오목 렌즈의 초점 거리는 동일하며, 볼록 렌즈는 빛을 모으고, 오목 렌즈는 빛을 퍼뜨리는 성질을 가졌음을 알 수 있다.

9. 부록

(1) 스넬의 법칙 증명

$n_2 > n_1$ 이라 가정한 두 매질의 경계면을 가로지르는 파가 있을 때 같은 두 광선이 매질 n_1 에서 매질 n_2 로 입사했을 때 파장이 다르므로, 두 매질에서 파들이 다른 방향으로 진행해야만 파면들이 정렬 상태를 유지 할 수 있다. 즉, 파의 마루가 정렬 상태를 유지하도록 하기 위해서는 파는 경계면에서 굴절해야 한다.

이때

$$l = \frac{\lambda_1}{\sin\theta_1}, l = \frac{\lambda_2}{\sin\theta_2}, \lambda_1 = \frac{\lambda_{vac}}{n_1}, \lambda_2 = \frac{\lambda_{vac}}{n_2} \text{ 이므로}$$

$$\frac{\lambda_{vac}}{n_1 \sin\theta_1} = \frac{\lambda_{vac}}{n_2 \sin\theta_2}$$

인데, 위 식은 다음 경우에만 성립하게 된다.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

따라서 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ (스넬의 법칙)이다.

10. 참고 문헌

(1)일반물리학실험, 5판, 부산대학교 물리학교재편찬위원회, 청문각,2019

(2)대학물리학,4판, Randall D.Knight(심경무 외 옮김),청문각,2019

(3)완자 고등 물리 2, 비상교육 편집부, 비상교육, 2013

(4)부산대학교 일반물리학실험실, <https://gplab.pusan.ac.kr/gplab/index..do>

(5)연세대학교 일반물리학실험실, <http://phylab.yonsei.ac.kr/>

(6)분산(광학)- wikipedia

[https://ko.wikipedia.org/wiki/%EB%B6%84%EC%82%B0_\(%EA%B4%91%ED%95%99\)](https://ko.wikipedia.org/wiki/%EB%B6%84%EC%82%B0_(%EA%B4%91%ED%95%99))