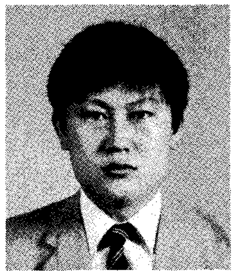
광학개론 (4)

평면에서의 반사와 굴절



삼양광학공업주식회사
부설연구소 정해빈

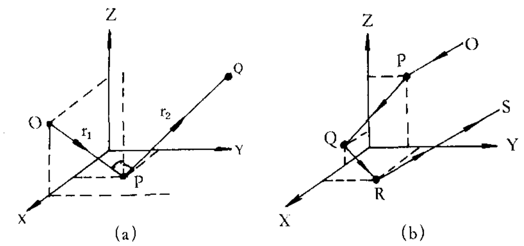
5. 평면에서의 반사와 굴절

일반적인 형태를 갖는 물체 표면에서의 반사나 굴절을 다루기에 앞서서 가장 간단하고 경험적으로도 우리 생활주변에서 손쉽게 접할 수 있는 평면에서의 반사나 굴절의 문제를 먼저 다뤄보기로 하자.

5. 1 평면경에서의 반사

평면경에서의 반사문제를 다루기 전에 거울면에서의 반사와 일반적인 면에서 방향성이 없이 일어나는 난반사를 구별할 필요가 있다. 거울면에서 반사가 일어나는 경우에는 평행광이 입사하면 평면에서의 반사법칙이 성립하게 되며, 그 결과 반사된 광선이 도달하게 되는 반사면 각 부분 부분에서는 반사의 법칙이 성립하지만 면의 요철에 따라 반사된 빛은 그 방향에 일정함을 잃게되어 애초의 광선과는 달리 일정한 방향을 향하지 못하고 흩어지게 된다. 실제에 있어서는 완전한 평면은 존재하지 않으므로 어느 정도는 난반사가 일어나게 되나 여기에서는 문제를 보다 단순하게 하기 위하여 반사면(거울면)이 완전히 매끄럽다는 가정하에서 논의를 진행하도록 하겠다.

그림 5−1의 (a)에서 하나의 광선 op가 xy−평면에서 반사되는 경우를 생각해보자. 반사의 법칙에 의하면 반사된 광선 PQ는 입사평면내에 있게 되며, P점에서의 법선에 대하여 입사광과 동일한 각도를 이루게 된다. 이때 반사 전후의 이 두 광선의 방향을 벡터[1]를 사용하여 나타내보기로 하자. 즉, 광선의 경로 OPQ를 x, y, z 방향으로 나눠주면, 광선 OP의 방향은 반사후 단순히 Z 방향만이 바뀌게 되므로 결국 Z−성분의 부호만이 반대로 됨을 알 수 있다. 즉, 입사광선의 방향이 단위벡터 $\vec{r_1}=(x, y, z)$로 나



〈그림 5−1〉 평면경에서의 반사

타내진다면 이에 대응하는 반사광선은 $\vec{r_2}=(x, y, -z)$로 나타내지게 된다. 그림 5−1의 (b)에서 보듯이 세 개의 거울이 서로 수직으로 만나서 이루어진 코너 반사경(corner reflector)에서

는 이러한 반사가 순차적으로 3개의 면에서 일어나게 된다. 이때, 반사과정에 관여된 각 광선의 방향을 단위벡터로 나타내보면 다음과 같다.

광선 OP	(x, y, z)
광선 PQ	(−x, y, z)
광선 QR	(−x, −y, z)
광선 RS	(−x, −y, −z)

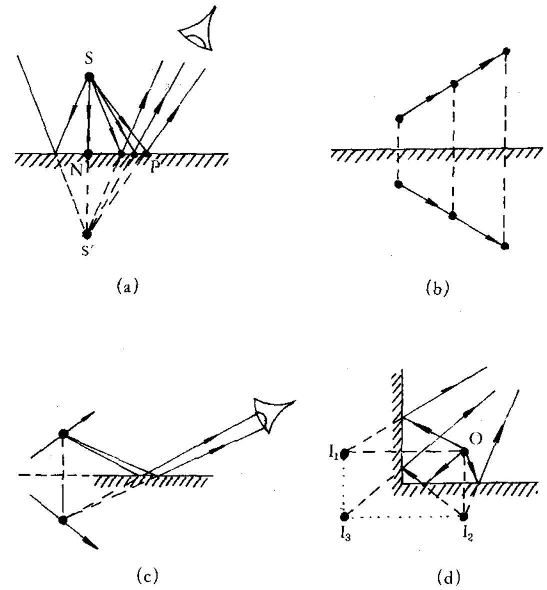
즉, 이 광선은 원래 오던 방향으로 되돌아 나가게 된다.

이러한 평면경은 물체와 1 : 1 크기의 상을 생기게 하여 우리들로 하여금 자신의 얼굴을 비춰볼 수 있게 하거나 뒤돌아보지 않고도 뒤를 볼 수 있게 해준다. 그림 5−2의 (a)에 보인 것과 같이 점광원 S에서 평면경을 향한 광선은 반사하여 물체의 상을 형성하게 된다. 반사의 법칙에 의하면 삼각형 SNP와 S′NP는 서로 닮은꼴이 된다. 따라서 모든 반사된 빛은 상점 S′에서 나오는 것처럼 보이게 되며, 이 점의 위치는 법선 SN상에 물체까지의 거리 $\overline{SN}$과 같은 깊이에 있게 된다. 결국 관찰자는 이 위치에 마치 물체가 있는 것처럼 보게 되나 이 위치에 실제 광선이 모이는 것은 아니므로 우리는 이러한 상을 허상이라고 부른다 즉, 이 허상 S′은 스크린위에 투영될 수 없으며, 다만 물체가 거기에 있는 것으로 느껴질 뿐이다.

크기(일정한 면적)를 갖고 있는 물체위의 모든 점들은 각각 개별적으로 위에서 말한 상들을 형성하게 된다. 이때, 각 물체점들은 거울면에 대한 법선상에 각 상점들을 갖게 된다 이러한 상점의 위치는 눈이 놓이게 되는 위치와는 아무 연관이 없음에 유의하기 바란다 그림 5−2에 의하면 상의 크기와 물체의 크기가 동일하리라는 것을 쉽게 알 수 있다. 이때, 물체의 상하는 바뀌지 않으나 좌우는 바뀌게 된다.

그림 5−2 (c)에서 거울이 물체의 바로 아래에 있지 않은 경우를 생각해보자.이러한 경우에도 눈의 위치에 따라서는 거울을 통해 물체를 볼 수 있다. 우리가 거울로 전신을 비춰볼 때는 전신 크기의 1/2이 되는 거울만 가지면 되는 것도 이 때문이다.

그림 5−2 (d)에서는 두 장의 거울을 서로



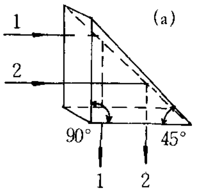
〈그림 5−2〉 평면경에서의 결상

수직하게 놓았을 때 여러개의 상이 맺히게 되는 것을 나타내고 있다. 이때, 상 I_1과 I_2는 거울면에서 한 번만 반사하여 생긴 상이며, 세번째 상 I_3는 두 개의 거울에 의해 두번 반사되어 생긴 상이다. 이와 같이 두 장의 거울을 설치할 경우에는 두 거울간의 각도에 따라서 생기는 상의 수가 달라지게 된다.

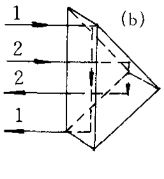
5.2 프리즘의 종류와 용도

프리즘이란 평면만으로 이루어진 광학소자(optical element)로서 반사나 굴절 등을 이용하여 빛의 경로를 바꿔주는데 사용한다. 프리즘에서 반사를 이용할 때에는 전반사를 이용하므로 일반적인 거울면에서와는 달리 반사면에서 일어나지 않는다는 장점을 지니게 된다. 일반적인 평면경에서는 반사도를 높여주기 위한 목적으로 흔히 알미늄이나 은 등의 금속막을 증착시켜서 반사면으로 사용하는데, 일반적으로 금속막은 빛의 일부를 흡수하게 되므로 광량의 손실이 있게 된다. 프리즘의 재료로서는 비교적 좋은 광학특성을 가지면서도 값이 싼 BK7 유리가 주로 사용되지만 이보다 굴절률이 높은 BaK 4나 란타늄 플린트 계열의 유리 등도 용도에 따

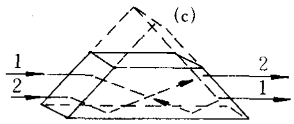
라 사용된다. 유리의 굴절률이 높아지면 임계각이 작아져서 비교적 쉽게 전반사가 일어난다는 장점이 있기 때문이다. 또한, 프리즘의 각 면에 대한 코팅은 굴절(투과)이 일어나는 면은 반사도를 줄이기 위한 무반사 코팅(AR coating : Anti —Reflection coating)을 해주게 되나 반사면에는 어떠한 코팅도 해주어서는 안된다.



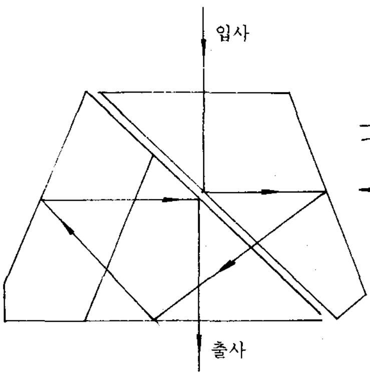
(a) 직각 프리즘



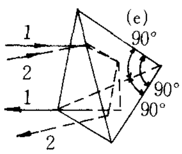
(b) 직각 프리즘
(Porro Prism)



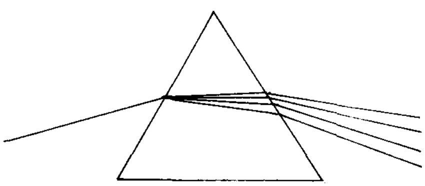
(c) 더브(Dove) 프리즘



(d) 루프(roof) 프리즘과 보조 프리즘



(e) 코너 큐브
(corner cube)



(f) 분산 프리즘

〈그림 5-3〉 프리즘의 종류

흔히 쓰이는 프리즘의 종류를 열거해보면 그림 5-3과 같다. (a)는 직각프리즘으로 전반사를 이용하여 광선의 경로를 90°로 변환시키는데 사용한다. 주로 잠망경 등에 2개가 한 조가 되어 사용된다.

(b)는 직각 프리즘을 통해 2번의 반사가 일어나도록 하여 광선의 경로를 180° 바뀌게 하며, 상의 상하 또는 좌우를 바꿔주는 역할을 한다. 쌍안경이나 지상망원경 등에서 대물렌즈에 의해 생기는 상하좌우가 거꾸로 된 도립상을 서로 직각으로 교차된 한쌍의 프리즘을 사용하여 각각 상하와 좌우를 바로 잡아 정립상을 볼 수 있도록 하는데 사용된다. 이러한 용도의 프리즘을 특별히 포로(Porro)프리즘이라 부르고 있다.

(c)는 더브(Dove) 프리즘이라 불리우는 것으로 이것도 상의 상하 또는 좌우를 바꿔주는 역할을 하게 된다. 이러한 형태의 프리즘은 비교적 높은 굴절률을 필요로 하기 때문에 란타늄 플린트 유리가 사용된다. 광선의 경로를 바꿔주는 방식이 포로 프리즘과는 다른 점에 유의하기 바란다.

(d)는 루프 프리즘(roof prism) 또는 다하—펜찬 프리즘이라 불리우는 것으로 2개의 프리즘이 한 조가 되어 이 역시 상의 상하좌우를 바꿔주는 역할을 한다. 앞서의 포로 프리즘이 비교적 부피가 큰 재래형의 쌍안경에 사용되는데 비해서 이 프리즘은 일직선 형태로 된 컴팩트형 쌍안경에 사용된다. 컴팩트형 쌍안경의 가격이 포로 프리즘을 사용한 쌍안경에 비해서 2배 정도 비싼 것은 이 프리즘의 루프면 제작이 어려워 그 가격이 비싸기 때문이다.

(e)는 코너 큐브(corner cube)라 불리우는 것으로 5. 1절의 코너 반사경과 마찬가지로 반사를 일으키는 각 면이 서로 직각을 이루고 있어서 A면에 입사한 빛은 어떠한 방향에서 입사하던지 반사후 최초의 방향으로 되돌아가는 성질이 있다. 앞서 말한 코너 반사경의 경우는 3개의 반사경을 서로 직각이 되도록 조정하는 일과 일단 조정된 반사경들이 움직이지 않도록 고정하는 일이 어렵기 때문에 코너 반사경보다는 코너 큐브가 널리 쓰인다. 레이저를 이용하여

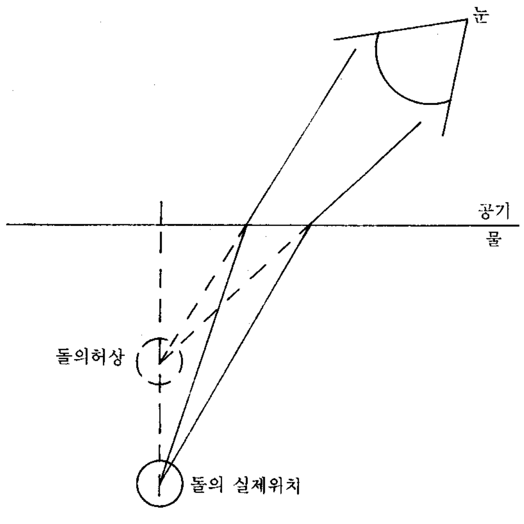
달과 지구간의 거리를 측정하기 위해 달에 이러한 코너 큐브를 설치하고 돌아온 일은 널리 알려져 있다 이러한 거리의 측정외에 간섭계 등의 레이저 기기에서 정렬(alignment)에 이용되고 있다.

(f)는 세 변이 이루는 각도가 60도로 되어 정삼각기둥의 형태를 하고 있다. 백색광을 그 파장에 따라(결국 그 색에 따라) 나눠주는 역할을 하므로 분산 프리즘이라 한다. 이러한 분산 프리즘은 비교적 값 싼 분광기기 등에서 파장을 분류해내기 위한 분산소자(dispersive element)로서 사용된다. 앞에서의 프리즘들이 빛의 반사를 이용하고 있는데 반해서 이 프리즘은 빛의 굴절–특히 파장에 따라 굴절률이 다르고, 굴절률에 따라 굴절각이 다른 성질–을 이용하고 있다.

이밖에도 많은 종류의 프리즘들이 그 용도에 맞춰 사용되고 있다.

5. 3 평면에서의 굴절

평면에서의 굴절문제를 다루기 위해서 냇물의 깊이가 실제보다 얕게 보이는 현상을 생각해보자. 그림 5–4에서와 같이 물속의 한 점(여기에서는 물속에 있는 돌)에서 나온 빛은 물과 공기의 경계면에서 굴절되어 관찰자의 눈에 들어오게 된다. 그 결과 관찰자는 이 돌의 위치를 실



〈그림 5–4〉 물속에 든 물체의 떠보임.

제 깊이에 있는 것으로 보는 것이 아니라 이와 같이 굴절되어 눈으로 들어온 빛들의 연장선들이 만나는 점 O에 돌이 있는 것으로 보게 된다. 만약, 이 돌이 냇물의 바닥에 놓여 있다면 이 사람은 물의 깊이를 실제 깊이보다 낮게 보게 된다. 물론 이때의 상 O′도 허상이 된다.

반대로 물속에 있는 물고기가 물밖에 있는 물체를 보면 실제보다 수면에서 멀리 떨어져 있는 것으로 보게 될 것이다.

이와 같이 물–또는 액체–속의 물체가 떠보이는 효과는 생물 현미경에서 해상력을 높이기 위하여 커버유리와 피관찰물 사이에 기름(주로 세다유(cedar oil)가 사용된다)을 넣어 구경수(N. A;numerical aperture)를 크게 해주는데 이용되고 있다.

5.4 평행평면판

서로 평행한 2개의 평면으로 이루어진 광학소자를 평행평면판(parallel plate)이라 한다. 이러한 평행평면판은 광학적으로 빛의 경로를 평행하게 이동시켜 주는 역할을 하거나, 광학적인 필요와는 무관하게 어떤 기기내의 상태를 유지시키거나 (예를 들어 진공장치의 창), 특정부위를 보호(예를 들어 CCD 소자에서의 창)하기 위하여 사용되는 수가 있다. 이러한 경우 이러한 평행평면판도 광학계의 일부를 형성하게 되므로 렌즈계 설계시에 고려해 넣어야 한다.

먼저 이러한 평행평면판이 평행광속(parallel beam)에 놓여있을 때 어떤 역할을 하는가를 살펴보면 그림 5–5에서와 같이 원래의 빛보다 d만큼 평행이동하여 진행함을 알 수 있다. 이때 이 값을 그 평행평면판의 두께 t와 광속에 대해 수직으로부터 기울어진 각도 ϕ로써 나타내주면, 삼각형 ABE에서

$$d = l\sin(\phi - \phi') \qquad (5-1)$$

이다. 삼각함수에 관한 공식에 의하면 $\sin(\phi - \phi') = (\sin\phi\cos\phi' - \sin\phi'\cos\phi)$이므로 이것을 이용하여 (5–1)식을 써보면,

$$d = l(\sin\phi\cos\phi' - \sin\phi'\cos\phi) \qquad (5-2)$$

이다. 이때 l값은 삼각형 ABC에서,

$$\ell = \frac{t}{\cos\phi} \qquad (5-3)$$

이므로 이것을 (5−2)식에 대입해주면

$$d = t\left(\frac{\sin\phi\cos\phi'}{\cos\phi'} - \frac{\sin\phi'\cos\phi}{\cos\phi'}\right) \qquad (5-4)$$

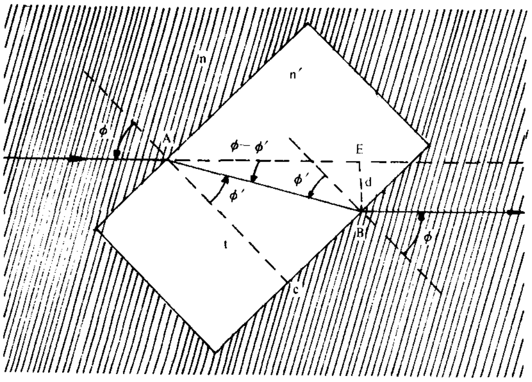
이다. 또, 스넬의 법칙으로 부터,

$$\sin\phi' = \frac{n}{n'}\sin\phi \qquad (5-5)$$

를 얻게 된다. 이것을 (5−4)식에 대입하면,

$$d = t\sin\phi\left(1 - \frac{n}{n'}\ \frac{\cos\phi}{\cos\phi'}\right) \qquad (5-6)$$

이 된다. (5−6)식에서 알 수 있듯이 ϕ 값이 0도에서 상당히 큰 각도가 될 때까지 d값은 ϕ에 대략적으로 비례하게 된다. 따라서 평행평면판을 회전시켜 줌으로써 이 회전각에 비례하여 빛의 경로를 이동시켜 줄 수 있다.



〈그림 5−5〉 평행광속에 놓인 평행평면판

두번째로 평행평면판이 집속광속(converging beam)내에 놓여있을 때의 역할에 대해서 생각해보자. 이때에는 상이 맺히는 위치가 달라질 뿐만 아니라 구면수차가 발생하게 된다. 따라서 이러한 평행평면판을 포함한 전체 광학계를 가지고 수차를 보정해주어야 한다. 그림 5−6을 가지고 생각해보면 광선이 공기중을 지나올 때보다 평행평면판을 지나올 때 높이 S만큼 위에서 원래의 광선에 평행하게 진행된다. 그 결과 광축상에서는 공기중을 지나온 광선보다 d만큼 먼 곳에 도달하게 된다. 광선의 그 평면에의 입사각을 i, 평행평면판의 두께를 t, 평행평면판의 굴절률을 n이라 하고 이들을 써서 이 d값을 표시해보자.

스넬의 법칙에서

$$\sin i = n\sin i' \qquad (5-7)$$

이 성립하고,

$$s = t(\tan i - \tan i') \qquad (5-8)$$

이며,

$$d = \frac{s}{\tan i} = t\left(1 - \frac{\tan i'}{\tan i}\right) \qquad (5-9)$$

이다. 이제 $(\tan i'/\tan i)$의 값을 구해보면,

$$\frac{\tan i'}{\tan i} = \frac{\sin/\cos i'}{\sin i/\cos i} \qquad (5-10)$$

이다. 이때, 여기에 (12−7)식을 대입해주면,

$$\frac{\tan i'}{\tan i} = \frac{\cos i}{n\cos i'}$$

이다. 삼각함수의 공식을 이용하면,

$$\sin^2 i = n^2(1-\cos^2 i')$$

$$n^2\cos^2 i' = n^2 - \sin^2 i \qquad (5-11)$$

$$\cos i' = \frac{1}{n}\sqrt{n^2-\sin^2 i} \qquad (5-12)$$

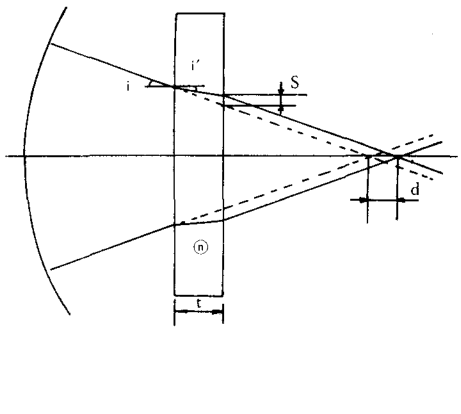
로 얻을 수 있다. (5−11) 식과 (5−12) 식을 (5−9)식에 대입해주면,

$$d = t\left(1 - \frac{\cos i}{\sqrt{n^2-\sin^2 i}}\right) \qquad (5-13)$$

의 최종식을 얻는다. 그러나, 통상적인 경우에는 i가 작아 각도를 라디안값으로 나타냈을 때, $\cos i = 1$, $\sin i = 0$로 볼 수 있으므로 이러한 조건에서의 (5−13)식의 근사식은

$$d = t\left(1 - \frac{1}{n}\right) \qquad (5-14)$$

이 된다. 이것은 두께 t인 평행평면판이 집속광



〈그림 5−6〉 집속광속과 평행평면판〉

속내에 놓이면 그 상이 맺히는 위치가 원래보다 d만큼 뒤로 가게 되며, 그 평행평면판의 두께와 굴절률에 관계가 있음을 알 수 있다

두께가 10mm이고 굴절률이 1.5인 평행평면판에서의 입사각에 따른 상의 위치를 구해보면 표 5-1과 같다. 이 표에서 보듯이 집속각이 크면 클수록(즉, 실제적으로는 사용되는 렌즈의 F-넘버가 작으면 작을수록) 그 차이가 커지게 된다. 이러한 현상은 결국 구면수차의 형태로서 나타나게 되므로 광학계의 일부로서 평행평면판이 들어가는 경우에는 설계시에 이에 의한 효과가 고려되어야 한다. 이러한 예로서는 쌍안경에서의 프리즘(프리즘도 실제적으로는 평행평면판과 동일한 효과를 나타낸다), 현미경을 써서 관찰할 때의 커버유리(cover glass), 복사기에서 원고를 놓는 유리판 등을 들 수 있다.

주 1. 벡터는 그 크기와 방향을 가지는 양이라고 정의된다. 예를 들어 바람의 경우 동풍 5m/초의 경우와 북풍 5m/초의 경우는 그 크기는 같으나 방향이 다르게 된다. 단위벡터는 그 크기가 단위(예를들어 1m/초)인 벡터로 그 방향만을 나타내 주게 된다. 벡터를 써서 빛의 반사를 다룰 때에는 그 방향만이 중요하게 되므로 단위 벡터를 써서 다뤄주게 된다.

〈표 5-1〉 평행평면판에서 입사각에 따른 결상위치의 변화
(두께 t=10mm, 굴절률 n=1.5)

t	theta	n	shift
10	1	1.5	3.333897
10	1.5	1.5	3.334603
10	2	1.5	3.33559
10	2.5	1.5	3.336861
10	3	1.5	3.338414
10	3.5	1.5	3.34025
10	4	1.5	3.342369
10	4.5	1.5	3.344774
10	5	1.5	3.347463
10	5.5	1.5	3.350436
10	6	1.5	3.353697
10	6.5	1.5	3.357243
10	7	1.5	3.361078
10	7.5	1.5	3.3652
10	8	1.5	3.369612
10	8.5	1.5	3.374314
10	9	1.5	3.379307
10	9.5	1.5	3.384595
10	10	1.5	3.390175
10	10.5	1.5	3.396048
10	11	1.5	3.40222
10	11.5	1.5	3.408689
10	12	1.5	3.415458
10	12.5	1.5	3.422526
10	13	1.5	3.429897

t	theta	n	shift
10	13.5	1.5	3.437573
10	14	1.5	3.445553
10	14.5	1.5	3.453843
10	15	1.5	3.462441
10	15.5	1.5	3.47135
10	16	1.5	3.480573
10	16.5	1.5	3.490111
10	17	1.5	3.499965
10	17.5	1.5	3.510141
10	18	1.5	3.520638
10	18.5	1.5	3.53146
10	19	1.5	3.542608
10	19.5	1.5	3.554086
10	20	1.5	3.565894
10	20.5	1.5	3.578038
10	21	1.5	3.59052
10	21.5	1.5	3.603341
10	22	1.5	3.616504
10	22.5	1.5	3.630012
10	23	1.5	3.64387
10	23.5	1.5	3.658079
10	24	1.5	3.672642
10	24.5	1.5	3.687563
10	25	1.5	3.702845