(만점 = 8)

과제	설명	배점
1	표 E2_1	**합계 = 1.0점** **0.6점** θ 와 전압 값으로 두 열을 채우면 **0.2점** 단위를 넣으면 **0.2점** 측정값을 올바른 유효 숫자 개수로 나타내면 [**-0.1점** 단위가 빠질 때마다 **-0.1점** 두 변수 이상에서 유효 숫자 개수를 틀리게 나타내면 **-0.1점** 각도 간격 $\delta\theta > 2^\circ$ 이면]

θ (도)	전압 (mV)	$\cos\theta$
60.0	432	0.500
59.5	426	0.508
59.0	427	0.515
58.5	431	0.522
58.0	435	0.530
57.5	438	0.537
57.0	440	0.545
56.5	440	0.552
56.0	440	0.559
55.5	438	0.566
55.0	434	0.574
54.5	430	0.581
54.0	425	0.588
53.5	423	0.595
53.0	426	0.602
52.5	431	0.609
52.0	435	0.616
51.5	437	0.623
51.0	439	0.629
50.5	439	0.636
50.0	438	0.643
49.5	437	0.649
49.0	431	0.656
48.5	428	0.663
48.0	424	0.669
47.5	421	0.676
47.0	422	0.682
46.5	425	0.688
46.0	430	0.695
45.5	433	0.701
45.0	435	0.707
44.5	436	0.713
44.0	437	0.719
43.5	436	0.725
43.0	434	0.731
42.5	431	0.737
42.0	425	0.743
41.5	424	0.749
41.0	420	0.755
40.5	419	0.760
40.0	420	0.766
39.5	424	0.772
39.0	428	0.777
38.5	431	0.783
38.0	433	0.788
37.5	434	0.793
37.0	434	0.799
36.5	434	0.804
36.0	433	0.809
35.5	431	0.814
35.0	429	0.819
34.5	426	0.824
34.0	422	0.829
33.5	419	0.834

33.0	417	0.839
32.5	417	0.843
32.0	419	0.848
31.5	421	0.853
31.0	424	0.857
30.5	427	0.862
30.0	429	0.866
29.5	430	0.870
29.0	431	0.875
28.5	432	0.879
28.0	431	0.883
27.5	431	0.887
27.0	430	0.891
26.5	429	0.895
26.0	427	0.899
25.5	425	0.903
25.0	421	0.906
24.5	419	0.910
24.0	416	0.914
23.5	414	0.917
23.0	414	0.921
22.5	414	0.924
22.0	415	0.927
21.5	416	0.930
21.0	419	0.934
20.5	421	0.937
20.0	423	0.940
19.5	424	0.943
19.0	426	0.946
18.5	427	0.948
18.0	427	0.951
17.5	428	0.954
17.0	428	0.956
16.5	429	0.959
16.0	428	0.961
15.5	428	0.964
15.0	428	0.966
14.5	427	0.968
14.0	427	0.970
13.5	426	0.972
13.0	425	0.974
12.5	423	0.976
12.0	423	0.978
11.5	422	0.980
11.0	420	0.982
10.5	419	0.983
10.0	418	0.985
9.5	417	0.986
9.0	416	0.988
8.5	416	0.989
8.0	414	0.990
7.5	413	0.991
7.0	413	0.993
6.5	413	0.994
6.0	412	0.995
5.5	411	0.995
5.0	410	0.996
4.5	-	-
4.0	-	-

각도 눈금의 한쪽(LHS)에서 $\theta \sim 4^\circ$ 에서 60° 까지 0.5° 간격으로 잰 입사각에 대한 반사 세기. 독립 변수 $\cos\theta$ 를 표 E2_1에 추가해야 한다. (쓰인 Ti 코팅 에탈론은 #15 이다.)

2

표 E2_2

θ (도)	전압 (mV)	$\cos\theta$
-60.0	426	0.500
-59.5	432	0.508
-59.0	437	0.515
-58.5	439	0.522
-58.0	441	0.530
-57.5	441	0.537
-57.0	440	0.545
-56.5	438	0.552
-56.0	434	0.559
-55.5	426	0.566
-55.0	421	0.574
-54.5	421	0.581
-54.0	427	0.588
-53.5	432	0.595
-53.0	435	0.602
-52.5	438	0.609
-52.0	439	0.616
-51.5	439	0.623
-51.0	437	0.629
-50.5	434	0.636
-50.0	429	0.643
-49.5	422	0.649
-49.0	418	0.656
-48.5	420	0.663
-48.0	425	0.669
-47.5	431	0.676
-47.0	434	0.682
-46.5	436	0.688
-46.0	436	0.695
-45.5	436	0.701
-45.0	436	0.707
-44.5	433	0.713
-44.0	431	0.719
-43.5	426	0.725
-43.0	421	0.731
-42.5	413	0.737
-42.0	417	0.743
-41.5	420	0.749
-41.0	423	0.755
-40.5	428	0.760
-40.0	431	0.766
-39.5	431	0.772
-39.0	433	0.777
-38.5	432	0.783
-38.0	433	0.788
-37.5	431	0.793
-37.0	422	0.799
-36.5	425	0.804
-36.0	417	0.809
-35.5	416	0.814
-35.0	414	0.819
-34.5	414	0.824
-34.0	419	0.829
-33.5	421	0.834
-33.0	425	0.839
-32.5	427	0.843
-32.0	428	0.848

합계 = 1.0점

0.6점 θ 와 전압 값으로 두 열을 채우면

0.2점 단위를 넣으면

0.2점 측정값을 올바른 유효 숫자 개수로 나타내면

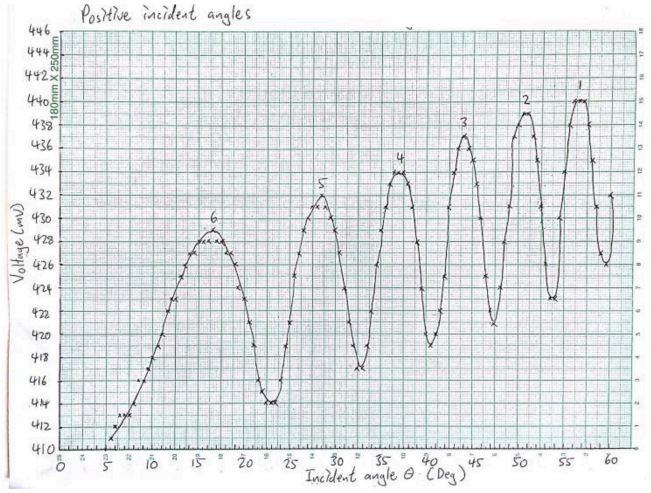
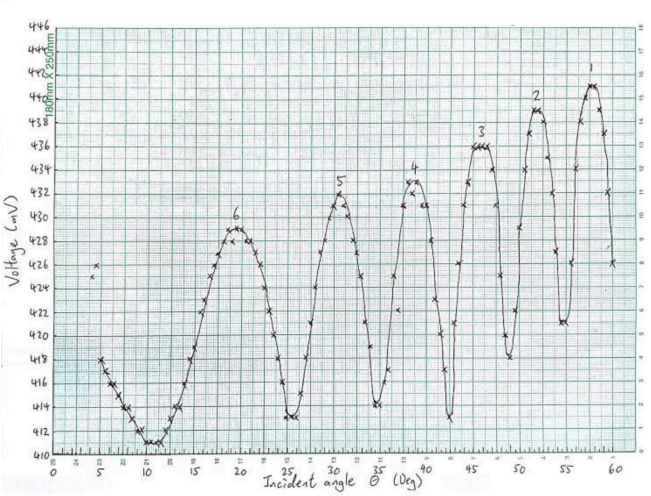
[**-0.1점** 단위가 빠질 때마다

-0.1점 두 변수 이상에서 유효 숫자 개수를 틀리게 나타내면

-0.1점 각도 간격 $\theta > 2^\circ$ 이면]

-31.5	430	0.853
-31.0	431	0.857
-30.5	432	0.862
-30.0	431	0.866
-29.5	430	0.870
-29.0	428	0.875
-28.5	427	0.879
-28.0	424	0.883
-27.5	421	0.887
-27.0	418	0.891
-26.5	415	0.895
-26.0	413	0.899
-25.5	413	0.903
-25.0	413	0.906
-24.5	416	0.910
-24.0	418	0.914
-23.5	420	0.917
-23.0	422	0.921
-22.5	424	0.924
-22.0	426	0.927
-21.5	427	0.930
-21.0	428	0.934
-20.5	428	0.937
-20.0	429	0.940
-19.5	429	0.943
-19.0	428	0.946
-18.5	429	0.948
-18.0	428	0.951
-17.5	427	0.954
-17.0	426	0.956
-16.5	425	0.959
-16.0	423	0.961
-15.5	422	0.964
-15.0	419	0.966
-14.5	418	0.968
-14.0	416	0.970
-13.5	414	0.972
-13.0	414	0.974
-12.5	413	0.976
-12.0	412	0.978
-11.5	411	0.980
-11.0	411	0.982
-10.5	411	0.983
-10.0	411	0.985
-9.5	412	0.986
-9.0	412	0.988
-8.5	413	0.989
-8.0	414	0.990
-7.5	414	0.991
-7.0	415	0.993
-6.5	416	0.994
-6.0	416	0.995
-5.5	417	0.995
-5.0	418	0.996
-4.5	426	0.997
-4.0	425	0.998

각도 눈금의 다른 쪽(RHS)에서 $\theta \sim -4^\circ$ 에서 -60° 까지 0.5° 간격으로 잰 입사각에 대한 반사 세기. 독립 변수 $\cos\theta$ 를 표 E2_2 에 추가해야 한다. (쓰인 Ti 코팅 에탈론은 #15 이다.)

3	**그래프 E2_1**  **그래프 E2_2**  그래프 E2_1 과 E2_2 는 각각 양(LHS)과 음(RHS)의 입사각에 대해 세기와 $\|\theta\|$ 사이의 관계를 보여 준다. 모든 그래프에 마루 번호도 표시하였다.	**합계 = 0.9점** **0.4점** 자료점을 나타내면 (두 그래프 모두) **0.1점** 단위를 나타내면 (두 그래프 모두) **0.1점** 축 이름을 나타내면 (두 그래프 모두) **0.1점** 축 눈금 이름을 나타내면 (두 그래프 모두) **0.2점** 매끄러운 곡선 (두 그래프 모두) [**위 항목이 두 그래프 모두에 나타나지 않으면 점수의 절반을 감점한다**]

4	그래프 E2_1 과 E2_2 를 참고할 것.	**합계 = 0.2점** **0.2점** 알맞은 마루 번호로 마루에 이름을 붙이면 (두 그래프 모두) [**-0.1점** 마루 번호 순서가 틀리면]
5	식 (1)로부터, 마루는 두 빔의 전체 위상차가 2π 의 정수배와 같은 보강 간섭에 해당한다. 즉 $$2kL\cos\theta_m + \phi_s = 2m\pi, \qquad (2)$$ 여기서 $m = 1, 2, \ldots$ 는 간섭 차수이고 θ_m 은 반사 세기가 마루가 되는 입사각이다. 따라서 간섭 차수 m 대 $\cos\theta_m$ 그래프는 직선이 되며, 그 기울기는 공기 간극 간격 L 과, 절편은 반사 위상 ϕ_s 와 관련된다. 간섭 차수는 마루 번호와 함께 차례로 바뀌므로, 마루 번호 대 $\cos\theta$ 그래프도 간섭 차수 대 $\cos\theta$ 그래프와 같은 기울기의 직선이 된다. 다만 y 절편은 간섭 차수 대 $\cos\theta$ 그래프에 대해 y 축을 따라 옮겨진다. 따라서 반사 세기 대 $\cos(\theta)$ 그래프에서 세기 마루가 같은 간격으로 놓이도록 $X(\theta) = \cos(\theta)$ 를 독립 변수로 골라야 한다. 나아가 마루 번호 대 $\cos(\theta)$ 그래프는 직선을 주며, 이를 써서 Ti 코팅 에탈론의 공기 간극 간격 L 과 Ti 의 반사 위상 ϕ_s 를 얻을 수 있다.	**합계 = 0.3점** **0.2점** 올바른 식(즉 식 (2))을 유도하면 **0.1점** m 이 정수인 점
6	독립 변수 $X(\theta) = \cos(\theta)$ 표 E2_1 과 E2_2 를 참고할 것	**합계 = 0.4점** **0.2점** 올바른 독립 변수 $X(\theta)$ **0.2점** 표 E2_1 과 E2_2 에서 $X(\theta)$ 의 값을 계산하면

7

이상적으로는 완벽한 광학 정렬에서 음(RHS)의 입사각에 대한 마루 위치가 양(LHS)의 입사각에 대한 것과 같아야 한다. 그러나 광학계의 어긋남 때문에 마루 위치에 치우침이 있을 수 있으므로, 음과 양의 입사각을 평균하여 마루 위치를 정하는 편이 낫다. 짝을 지은 뒤 다음 표를 얻는다:

표 E2_3

마루 번호 (LHS)	θ_{LHS} (도)	마루 번호 (RHS)	θ_{RHS} (도)	$\lvert\theta\rvert_{\text{avg}}$ (도)	$\cos\lvert\theta\rvert_{\text{avg}}$	m
6	16.50	6	-19.25	17.875	0.952	11
5	28.50	5	-30.75	29.625	0.869	10
4	36.50	4	-38.50	37.500	0.793	9
3	44.00	3	-45.75	44.875	0.709	8
2	51.25	2	-51.75	51.500	0.623	7
1	56.50	1	-57.75	57.125	0.543	6

θ_{LHS} 는 **표 E2_1** 에서 얻은 마루 위치를, θ_{RHS} 는 **표 E2_2** 에서 얻은 마루 위치를 뜻한다. $\lvert\theta\rvert_{\text{avg}}$ 는 $\lvert\theta\rvert_{\text{LHS}}$ 와 $\lvert\theta\rvert_{\text{RHS}}$ 의 평균이다.

합계 = 0.6점

0.2점 마루와 그에 해당하는 LHS/RHS 입사각을 찾아내면

0.2점 마루를 서로 맞추면

0.2점 독립 변수의 평균을 계산하면

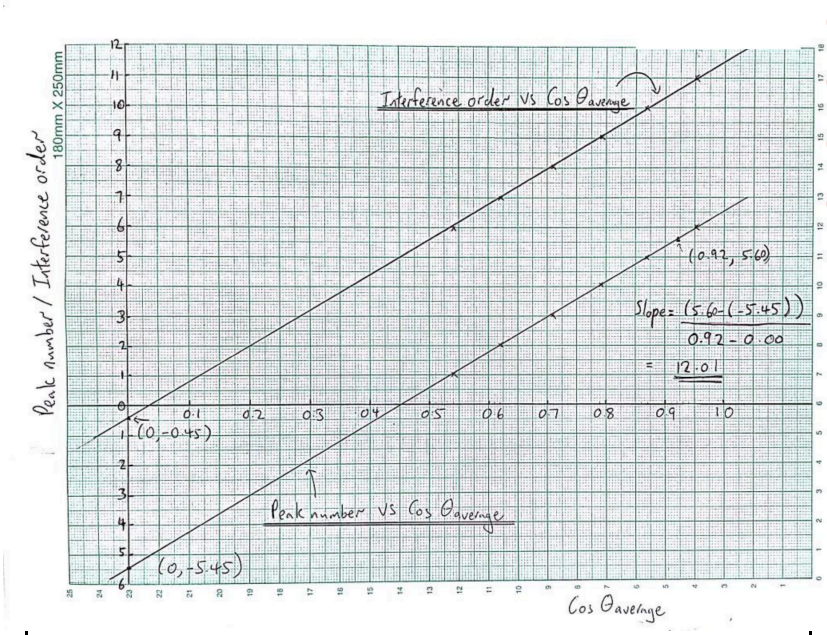
[**-0.1점** 단위가 빠질 때마다

-0.1점 마루 번호와 간섭 차수를 뺀 나머지에서 유효 숫자 개수를 틀리게 나타내면

-0.1점 마루 번호를 잘못 짝지으면]

8

그래프 E2_3



마루 번호 대 $\cos\theta_{\text{average}}$

기울기는 12.0 이다

합계 = 0.6점

0.3점 자료점을 나타내면

0.1점 단위를 나타내면

0.1점 축 이름을 나타내면

0.1점 축 눈금 이름을 나타내면

[**-0.2점** $\cos\theta$ 대 마루 번호 또는 간섭 차수로 그리면(즉 x-y 축이 뒤바뀌면)]

y 절편은 -5.45 이다

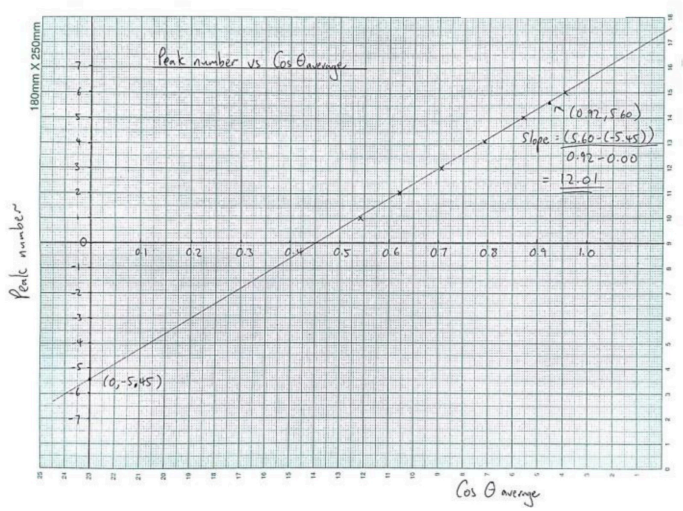
간섭 차수 대 $\cos\theta_{\text{average}}$

기울기는 12.0 이다
y 절편은 -0.45 이다

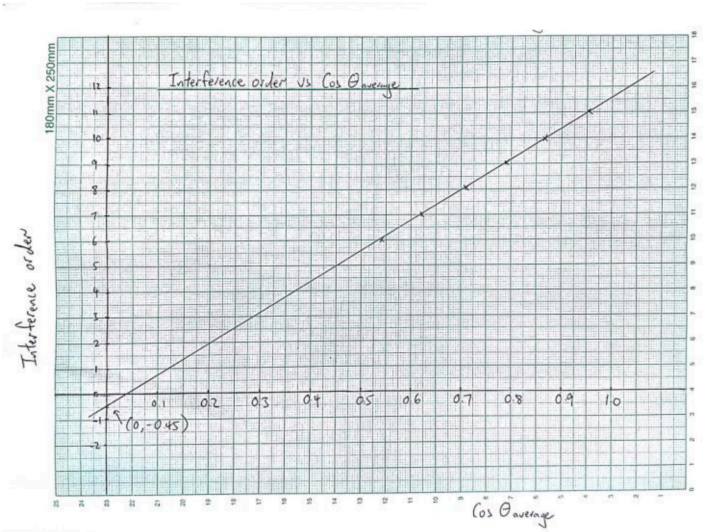
마루 번호를 $\cos|\theta|_{\text{avg}}$ 에 대해 그리고 자료점을 지나는 직선을 그으면, 그래프 E2_3 처럼 기울기와 y 절편을 얻을 수 있다. 간섭 차수 m 을 $\cos|\theta|_{\text{avg}}$ 에 대해 그릴 때도 같은 원리가 적용된다.
(기울기와 절편을 그래프로 구한 풀이도 인정한다.)

참고: 다음 그래프 E2_3a 와 E2_3b 처럼 이 두 그래프를 따로 그리는 것도 인정한다.

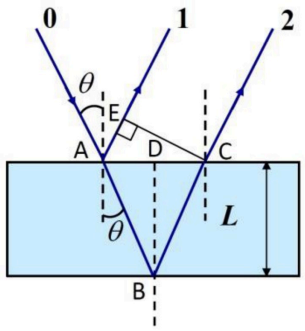
그래프 E2_3a



그래프 E2_3b



9	그래프 E2_3 을 참고할 것 **마루 번호 대** $\cos\theta_{\text{average}}$ 기울기는 12.0 이다 y 절편은 -5.45 이다	**합계 = 0.4점** **0.2점** 직선을 맞추면 **0.1점** 기울기 값을 구하면 **0.1점** y 절편 값을 구하면
10	과제 5+6 의 식 (2)는 입사각 θ_m 에서 보강 간섭 차수 m 마다 다음과 같이 더 간단한 꼴로 다시 쓸 수 있다: $$m = \frac{2L\cos\theta_m}{\lambda} + \frac{\phi_s}{2\pi}\,. \quad (3a)$$ 식 (3a)에서 $\frac{2L\cos\theta_m}{\lambda}$ 의 정수 부분을 간섭 차수로 볼 수 있다. 즉 $$m = \text{Trunc}\left(\frac{2L\cos\theta_m}{\lambda}\right). \quad (3b)$$ 그러면 $\frac{2L\cos\theta_m}{\lambda}$ 의 소수 부분은 다음과 같이 반사 위상과 관련된다 $$\phi_{s,n} \equiv \frac{\phi_s}{2\pi} = \text{Trunc}\left(\frac{2L\cos\theta_m}{\lambda}\right) - \frac{2L\cos\theta_m}{\lambda}. \quad (3c)$$ 간섭 차수 m 을 찾는 더 간단한 방법은, 그래프 E2_3 의 마루 번호 대 $\cos\theta$ 그림에서 얻은 y 절편의 정수 부분의 절댓값을 마루 번호에 바로 더하는 것이다. 즉 m = 마루 번호 + |그래프 E2_3 의 y 절편의 정수 부분|. 그러면 m 대 $\cos\theta$ 그림의 y 절편이 규격화된 반사 위상 $\phi_{s,n} = \phi_s/2\pi$ 를 바로 준다. $\phi_{s,n}$ 은 이제 $(-1, 0)$ 안에서 정의되며, 이는 $(-2\pi, 0)$ 으로 고른 ϕ_s 에 해당한다. m 은 표 E2_3 을 참고할 것.	**합계 = 1.2점** **0.3점** 올바른 식(즉 식 (3a))을 유도하면 **0.3점** m 의 식(즉 식 (3b))을 얻으면 **0.2점** 규격화된 반사 위상의 식(즉 식 (3c))을 얻으면 **0.2점** 반사 위상의 범위를 정의하면 **0.2점** 간섭 차수를 표 E2_3 에 넣으면

11	그래프 E2_3 을 참고할 것: 그래프 E2_3 으로부터 m 대 $\cos\theta$ 의 기울기는 12.01 이다. 직선의 기울기가 $2L/\lambda$ 와 같으므로 L 의 값을 다음과 같이 얻을 수 있다 $$L = \lambda \times \text{기울기}/2 = 0.650 \times \frac{12.01}{2} = 3.903\ \mu\text{m}.$$ y 절편이 규격화된 반사 위상이다 $$\phi_{\text{s,n}} = -0.450 \text{ 또는 } \phi_{\text{s}} = -2.828\ \text{rad}.$$	**합계 = 1.4점** **0.4점** 자료점을 나타내면 **0.3점** 직선을 맞추면 **0.4점** 공기 간극 간격의 값을 구하면 **0.3점** y 절편 값을 구하면 [**-0.1점** $\phi_{\text{s,n}}$ 이 $(-0.9, -0.1)$ 밖이면]
	부록: 이상적인 공기 간극 에탈론에 대한 경로차 계산:  빔 1과 2의 경로차는 다음과 같다: $$\text{AB} + \text{BC} - \text{AE} = \frac{2L}{\cos\theta} - 2L\sin\theta\tan\theta = 2L\cos\theta. \quad (4a)$$ 이것이 식 (1)에 쓰인 경로차이다. 식 (1)로 경로차를 곧바로 계산해도 되지만, 식 (4a)를 쓴 경우의 절반만 점수를 준다. 레이저 빔과 각도 눈금 사이의 각 α 만큼의 어긋남은	N/A

	각도 눈금에서 바로 읽은 입사각 θ 에 대한 α 의 보정에 해당한다. 따라서 입사각은 이제 $\theta+\alpha$ 이다. 그러므로 각 α 만큼 어긋났을 때 빔 1과 2 사이의 보정된 경로차는 다음과 같다: $$\mathrm{AB}+\mathrm{BC}-\mathrm{AE}=2L\cos(\theta+\alpha). \quad (4b)$$ 따라서 완벽하게 정렬된 이상적인 경우와 비교했을 때 각 α 만큼의 어긋남에 대한 경로차의 보정은 다음과 같다: $$\Delta=2L\cos(\theta)-2L\cos(\theta+\alpha)\sim 2L\sin\theta\sin\alpha. \quad (4c)$$ 그러므로 어긋남에 의한 반사 위상의 오차는 $2\pi\Delta/\lambda$, 또는 2π 로 규격화하면 Δ/λ 이다. 이제 $L=5\mu\mathrm{m}$, $\theta=30^\circ$, $\lambda=0.650\ \mu\mathrm{m}$ 를 써서 식 (4c)로 $\alpha=1^\circ$ 어긋남에 의한 반사 위상의 오차를 구할 수 있다: 식 (4c)로 구한 Δ 의 값은 다음과 같다: $$\Delta=2\times(5.00\times10^{-6})\times\sin30^\circ\times\sin1^\circ$$ $$=0.0873\times10^{-6}\ \mathrm{m}.$$ 이제 위상 오차는 $2\pi\Delta/\lambda$, 또는 Δ/λ 이다 $\sigma_{\phi_S}=2\pi\times(0.0873\times10^{-6})/(0.650\times10^{-6})=0.843$ rad, $\sigma_{\overline{\phi_S}}=0.134$ (2π 로 규격화).	