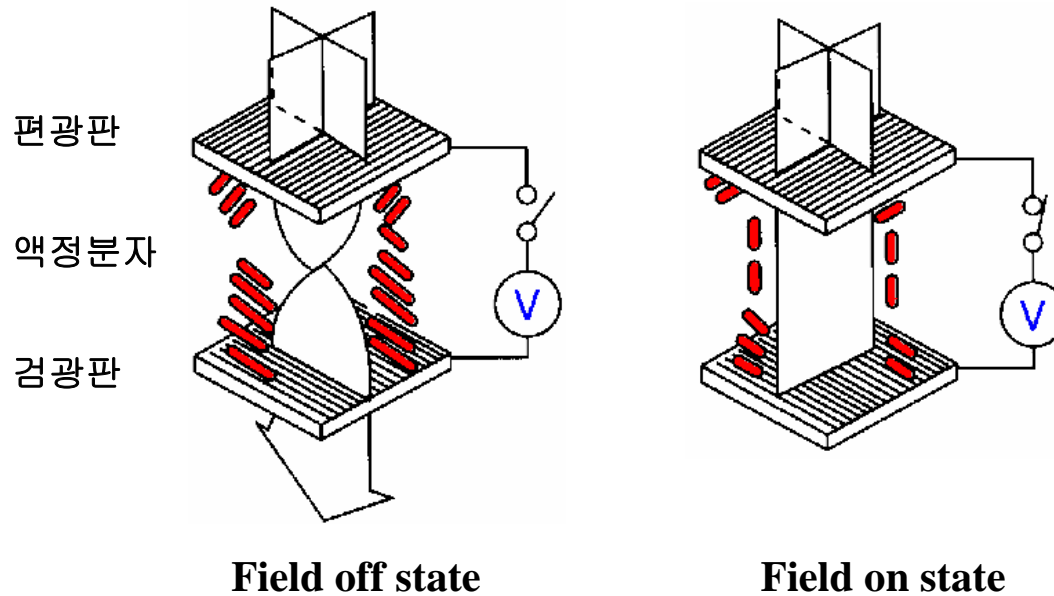


LCD의 기하학적 광특성과 편광측정 시스템

세심광전자기술(주)

양병관

LCD의 기본 구조



- **LCD**는 광특성을 전기적으로 제어할 수 있는 전기**광학소자**
 - 편광의 표현
 - 편광의 변화
 - 광특성의 측정

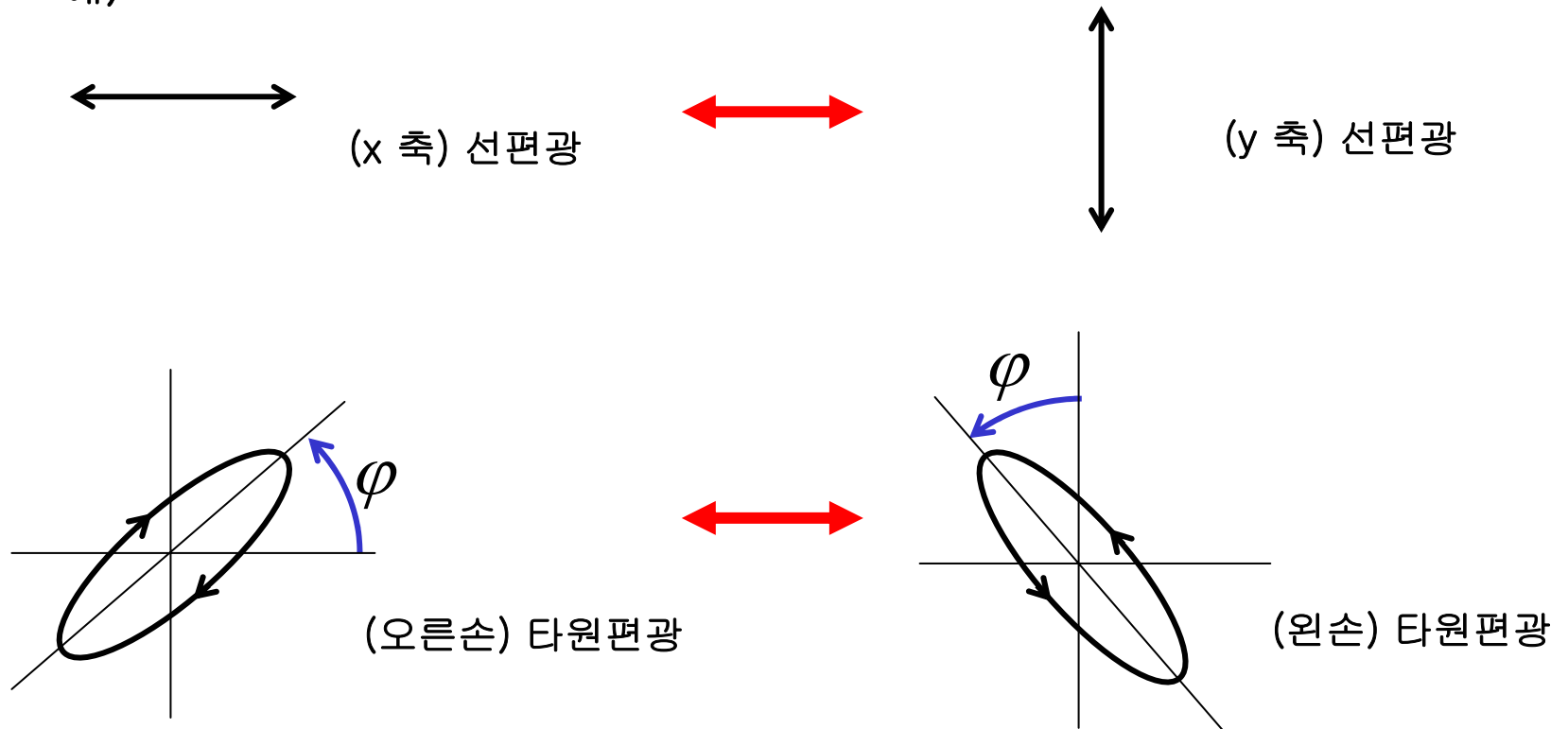
목차

- LCD의 기하학
 - 편광
 - 편광의 표현
 - 존즈 벡터
 - 스톡스 변수
 - 뽀앙카레 공
 - 광부품의 기하학
 - 위상판의 기하학적 회전변환
 - 액정셀의 기하학적 회전변환
- 회전변환의 측정
 - 편광상태의 측정
 - 회전변환의 측정
- LCD Optical Design System

편광

- 빛: 전기장과 자기장이 서로 결합하여 진행되는 횡파
- 편광: 빛을 정면에서 봤을 때 전기장 끝선이 그리는 모양에 따라 정의

예)



* 빛이 앞으로 진행해서 나오는 경우

편광의 존즈벡터 표현

* 편광 상태의 변화는 존즈연산으로 구한다.

- 편광된 빛만 표현 가능

- 존즈벡터(Jones vector) : $E = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} e^{i(kz - \omega t)}$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (\text{파수:wavenumber})$$

- 빛의 밝기 I : $I \propto (|E_x|^2 + |E_y|^2)$

예)

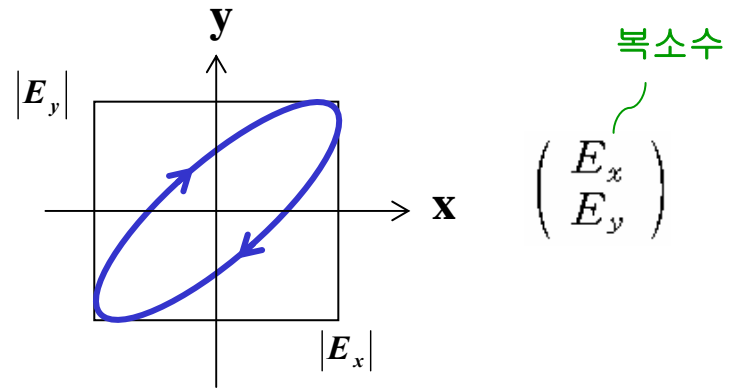
x축 선편광: $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$

45도 선편광: $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$

오른손 원편광: $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} i \\ 1 \end{pmatrix}$

왼손 원편광: $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} i \\ -1 \end{pmatrix}$

- 일반적인 경우



편광의 스토크스 벡터 표현

* 편광 상태의 변화는 물러연산으로 구한다.

- 비편광된 빛도 표현 가능

- 스토크스 변수 (Stokes parameter)

* $\langle \rangle$ 는 시간평균.

$$S_0 = \langle |E_x|^2 \rangle + \langle |E_y|^2 \rangle$$

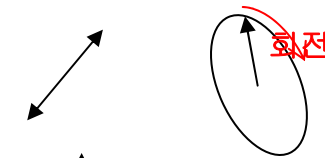
$$S_1 = \langle |E_x|^2 \rangle - \langle |E_y|^2 \rangle$$

$$S_2 = 2|E_x||E_y| \langle \cos(\varphi_x - \varphi_y) \rangle$$

$$S_3 = 2|E_x||E_y| \langle \sin(\varphi_x - \varphi_y) \rangle$$

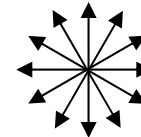
- 편광인 경우

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2$$



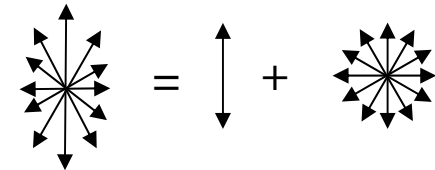
- 비편광인 경우

$$0 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2$$



- 부분편광인 경우

$$S_0^2 > S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 \neq 0$$



- 편광도 (Degree of polarization)

$$\frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} = \frac{\text{편광된 부분의 에너지}}{\text{전체 에너지}}$$

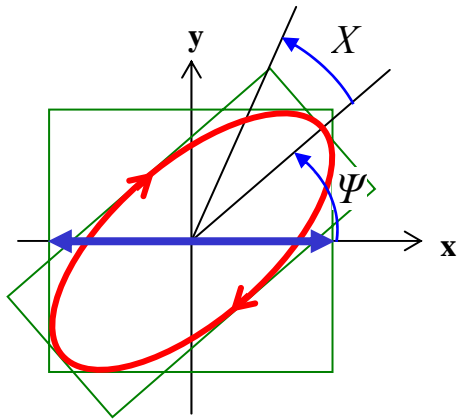
편광의 포앵카레 공 표현

- 포앵카레 공(Poincaré sphere), 편광부분만 가지고 정의 ← LCD는 편광된 빛만 쓴다.

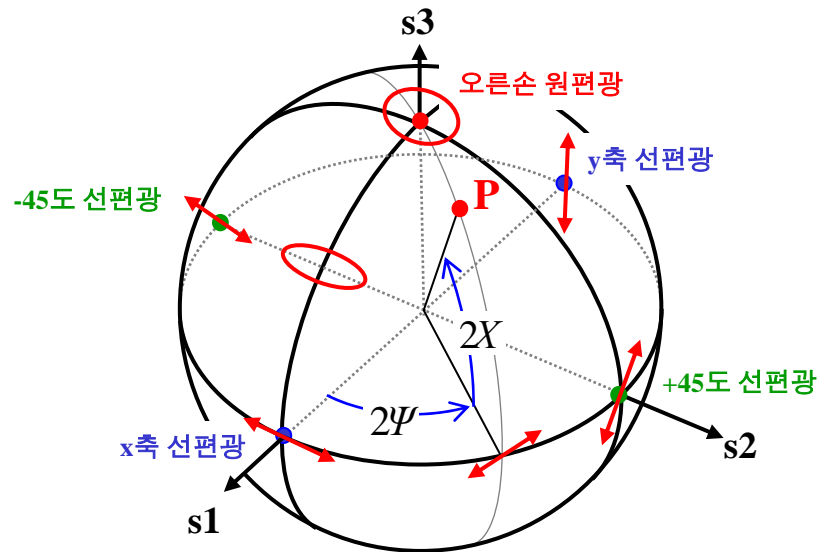
$$s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 = 1 \quad s_i = \frac{S_i}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}} \quad i=1,2,3$$

- 타원편광의 포앵카레 공(Poincaré sphere) 표현

- 공의 원점을 중심으로 서로 마주 보는 두 점: 직교하는 편광
- 자오선 위의 편광: 편광타원의 주축이 같은 편광
- 위도선 위의 편광: 편광타원의 주축이 회전한 편광



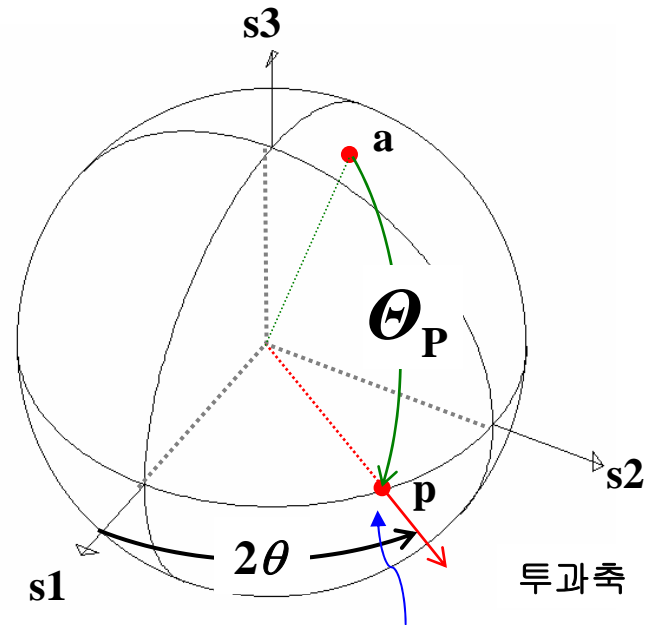
* 빛이 진행하여 앞으로 나오는 경우



투과도

-투과축이 y 축 방향으로 θ 만큼 회전한 (이상적인) 편광판에
편광 \mathbf{a} 가 입사한 경우의 투과도

$$\begin{aligned} \text{투과도 } I &= \frac{1 + \mathbf{a} \cdot \mathbf{p}}{2} \\ &= \cos^2\left(\frac{\theta_P}{2}\right) \end{aligned}$$



- * 편광판의 뽕앙카레 점은 투과축의 방위각을 2배한 적도선 위의 점
- * 투과율을 직관적으로 그 정도는 예측할 수 있다.

투명 매질의 기하학

액정셀, 위상판과 같이 빛을 흡수하지 않는 매질

- 투명 매질(U)의 쾨안카레 공에서의 기하학적 특성
 - 회전변환

$$U = \begin{pmatrix} U_{11} & U_{12} \\ -U_{12}^* & U_{11}^* \end{pmatrix}$$

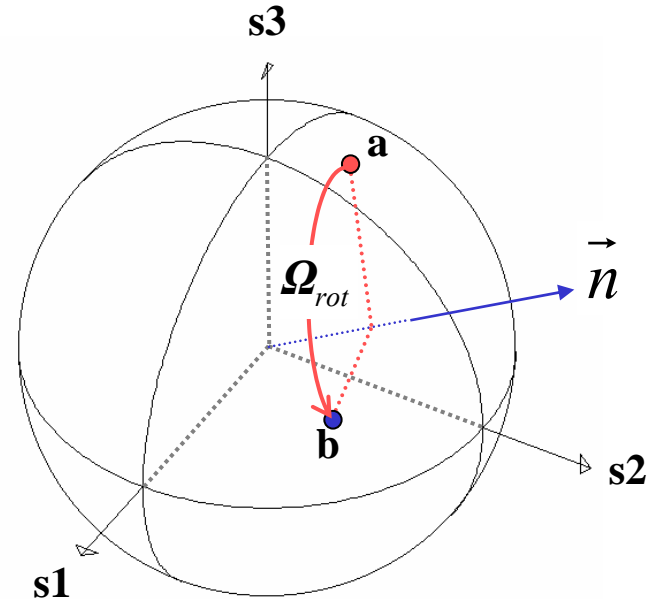
$$\cos\left(\frac{\Omega_{rot}}{2}\right) = Re(U_{11})$$

$$n_1 \sin\left(\frac{\Omega_{rot}}{2}\right) = Im(U_{11})$$

$$n_2 \sin\left(\frac{\Omega_{rot}}{2}\right) = Im(U_{12})$$

$$n_3 \sin\left(\frac{\Omega_{rot}}{2}\right) = -Re(U_{12})$$

$$\mathbf{b} = U \mathbf{a} \quad \longleftrightarrow$$



회전축: 매질의 고유편광
회전각: $2 * (\text{고유값의 위상지연})$

* $\det(U)=1$ 인 경우.

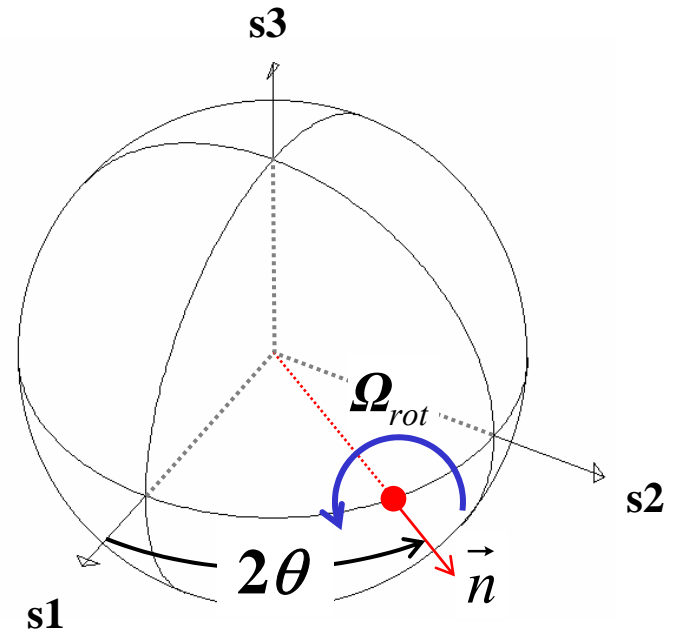
(선형) 위상판

- (느린) 광축이 y 축 방향으로 θ 만큼 회전한 경우

파장의 함수

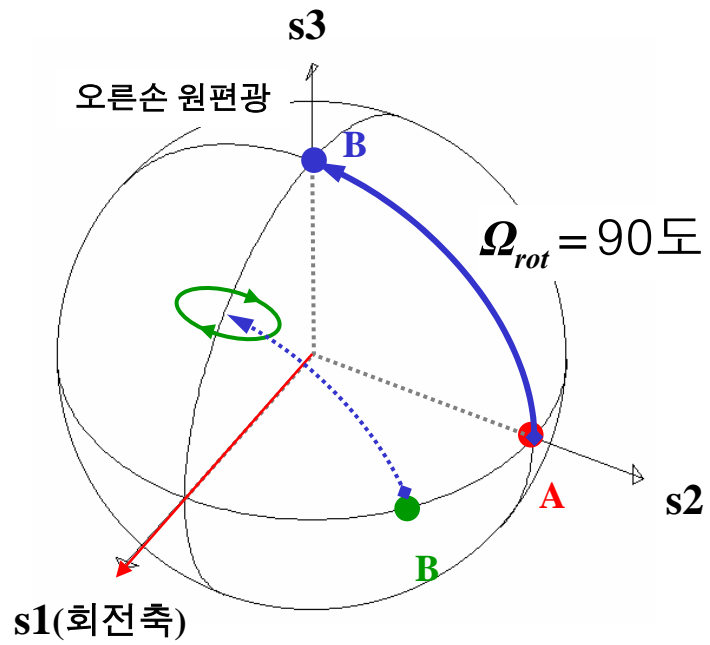
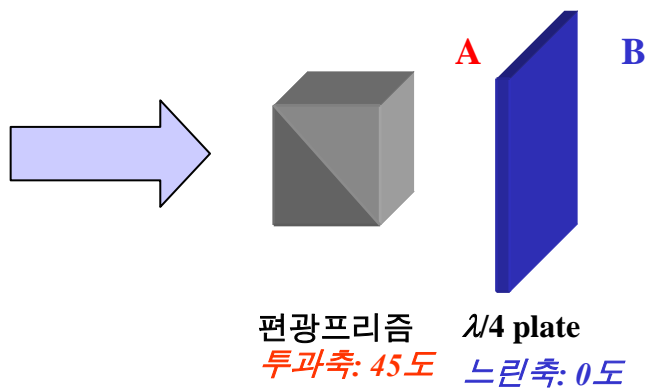
$$n_3 = 0, \Omega_{rot} = \text{위상차}$$

$\lambda/4$ 판의 경우 90도



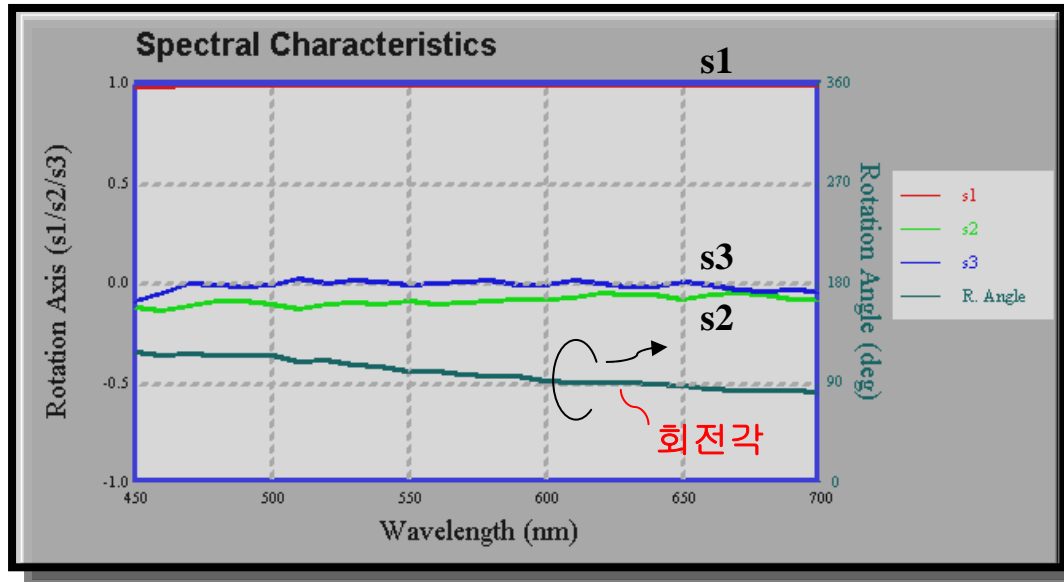
- * 회전축: 느린 광축의 방위각의 2배 한 적도선 위의 점
- * 회전각: 위상차,

$\lambda/4$ 판 <예>

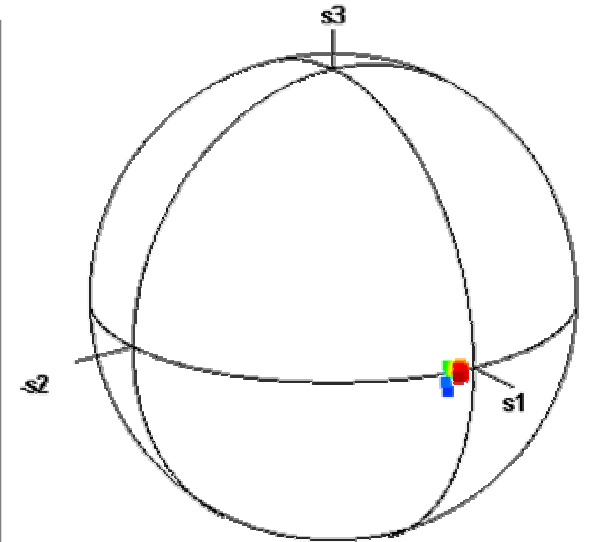


측정예 (위상판: $\lambda/4$ 판@633)

- 회전각/회전축



- 회전축



균일하게 꼬인 액정 셀

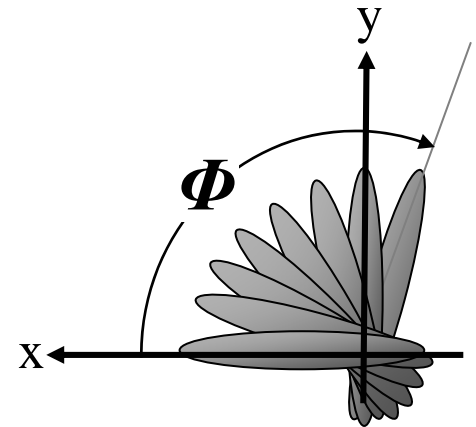
- 트위스트 각이 Φ 인 액정셀의 존즈행렬

$$M = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ -M_{12}^* & M_{11}^* \end{pmatrix}$$

$$u \equiv \frac{\pi d}{\Phi \lambda} \left(\frac{n_e}{\sqrt{1 + w \sin^2(\theta_0)}} - n_o \right)$$
$$w = \left(\frac{n_e}{n_o} \right)^2 - 1 .$$

$$M_{11} = \frac{1}{\sqrt{1 + u^2}} \sin(\Phi) \sin(\Phi \sqrt{1 + u^2}) + \cos(\Phi) \cos(\Phi \sqrt{1 + u^2})$$
$$+ i \frac{u}{\sqrt{1 + u^2}} \cos(\Phi) \sin(\Phi \sqrt{1 + u^2})$$

$$M_{12} = \frac{1}{\sqrt{1 + u^2}} \cos(\Phi) \sin(\Phi \sqrt{1 + u^2}) - \sin(\Phi) \cos(\Phi \sqrt{1 + u^2})$$
$$+ i \frac{u}{\sqrt{1 + u^2}} \sin(\Phi) \sin(\Phi \sqrt{1 + u^2})$$



좌표변환 (꼬임의 중심 좌표)

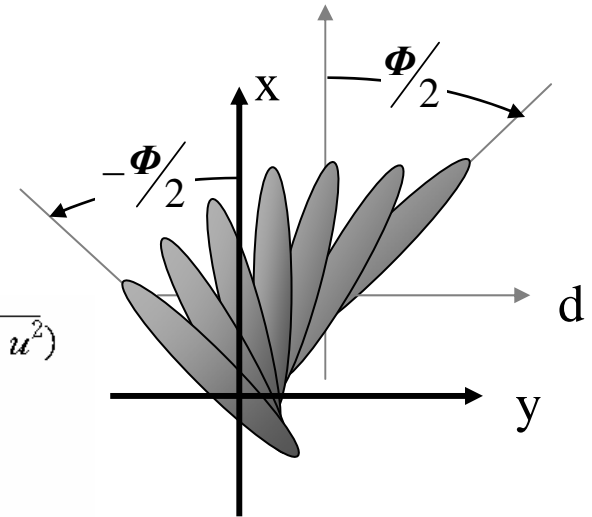
- 꼬임의 중심 좌표계에서 회전축의 n_2 성분이 0이다.
- 회전축/회전각은 파장에 따라 달라진다.

$$\cos\left(\frac{\Omega_{rot}}{2}\right) = \frac{1}{\sqrt{1+u^2}} \sin(\Phi) \sin(\Phi\sqrt{1+u^2}) + \cos(\Phi) \cos(\Phi\sqrt{1+u^2})$$

$$n_1 \sin\left(\frac{\Omega_{rot}}{2}\right) = \frac{u}{\sqrt{1+u^2}} \sin(\Phi\sqrt{1+u^2}),$$

$$n_2 = 0,$$

$$n_3 \sin\left(\frac{\Omega_{rot}}{2}\right) = \frac{-1}{\sqrt{1+u^2}} \cos(\Phi) \sin(\Phi\sqrt{1+u^2}) + \sin(\Phi) \cos(\Phi\sqrt{1+u^2})$$

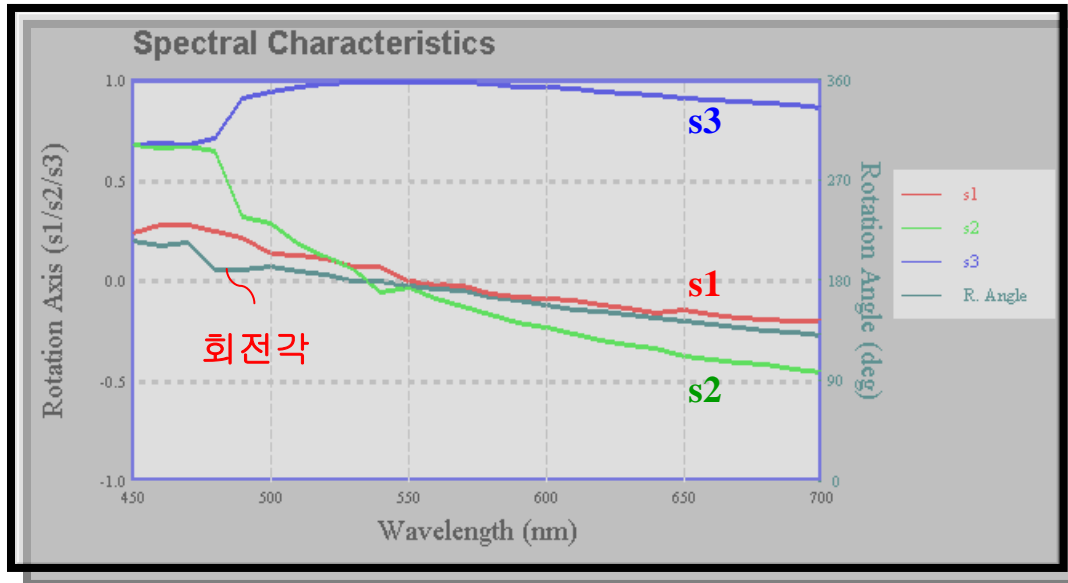


* 액정 분자가 대칭배향 구조를 하고 있으면 꼬임의 중심축을 기준으로하는 좌표계에서, 액정셀의 회전축은 인가전압과 상관없이 자오선을 따라 움직인다.

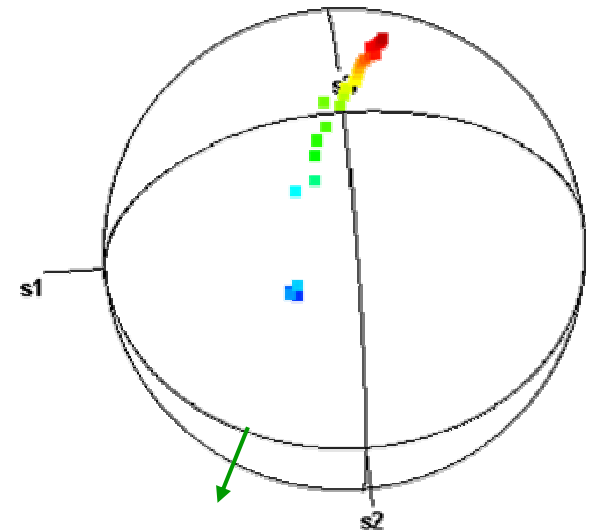
측정예 (액정셀: TN)

* 회전축이 자오선 위에 분포

- 회전각/회전축



- 회전축



액정분자의
꼬임의 중심축

1. 광좌표계

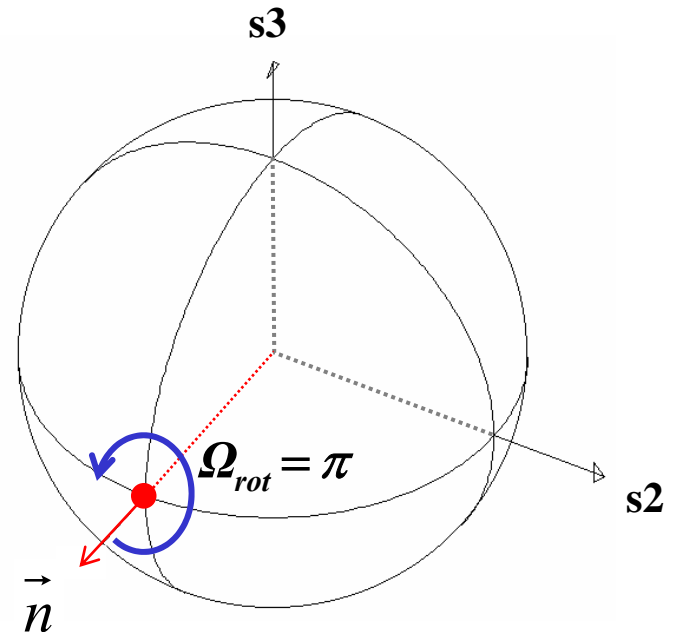
$$M_{ir} = \begin{pmatrix} i & 0 \\ 0 & -i \end{pmatrix}$$

$$n = s1, \Omega_{rot} = \pi$$

2. 고정좌표계

$$M_{ir} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

광좌표계의 경우



- $M_{\text{전체}} = M_{BA} \cdot M_{\text{ir}} \cdot M_{AB}$

M_{AB} : A에서 B로 진행할 때 액정셀의 존즈행렬

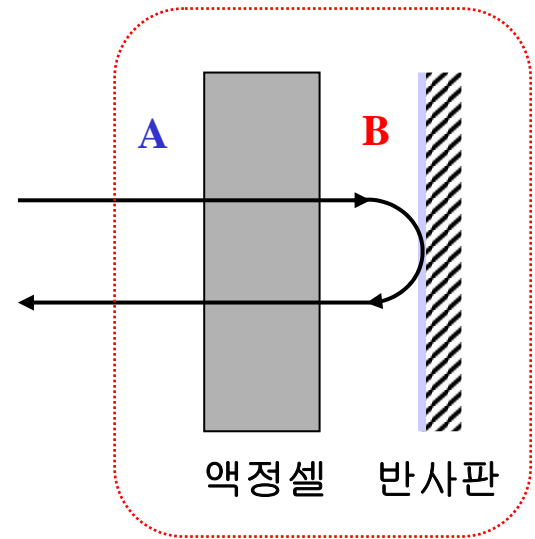
M_{ir} : 반사판의 존즈행렬

- 고정좌표계에서

$$M_{BA} = M_{AB}^T \text{ (회전축: } s_3 \text{ 성분의 부호만 바뀜)}$$

$$M_{\text{ir}} = I$$

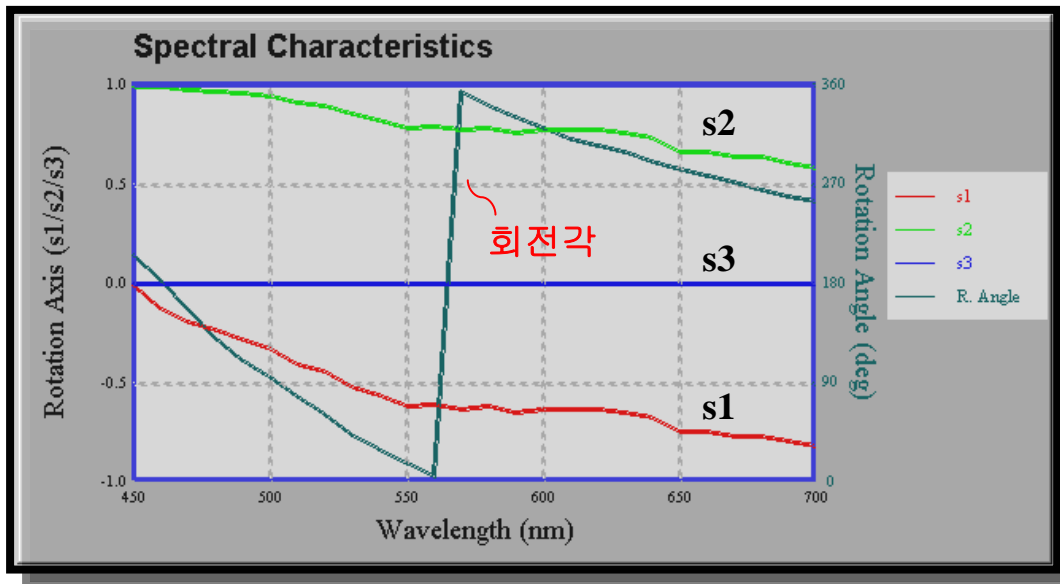
$$M_{\text{전체}} = M_{AB}^T \cdot M_{AB} \text{ (대칭행렬)}$$



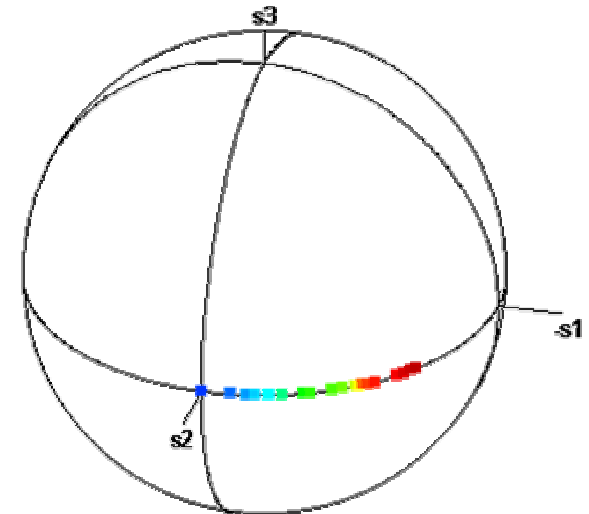
$n_3 = 0$

← 반사형 액정셀의 경우,
회전축이 적도선 위에 있다.

- 회전각/회전축



- 회전축



LCD Optical Design System

• 측정 모드

- 액정 표시소자에 쓰이는 부품의 **기하학적 광특성** 측정
 - 2단계 광소광법: 간단한 구조를 하면서 정확하다.
 - 가시광 전역의 스펙트럼 (450 nm ~ 700 nm, 10 nm간격)
 - 전압범위: 0 - 20V
- **측정자료를 파일로 저장**
- 측정가능 광부품
 - 위상판, 투과형/반사형 액정셀

회전축/회전각

• 디자인 모드

- **측정자료를 불러와서 액정패널** 구성
 - 투과형/반사형 액정 패널 설계
- 광특성 simulation
 - 밝기, 명암대비율, 색좌표

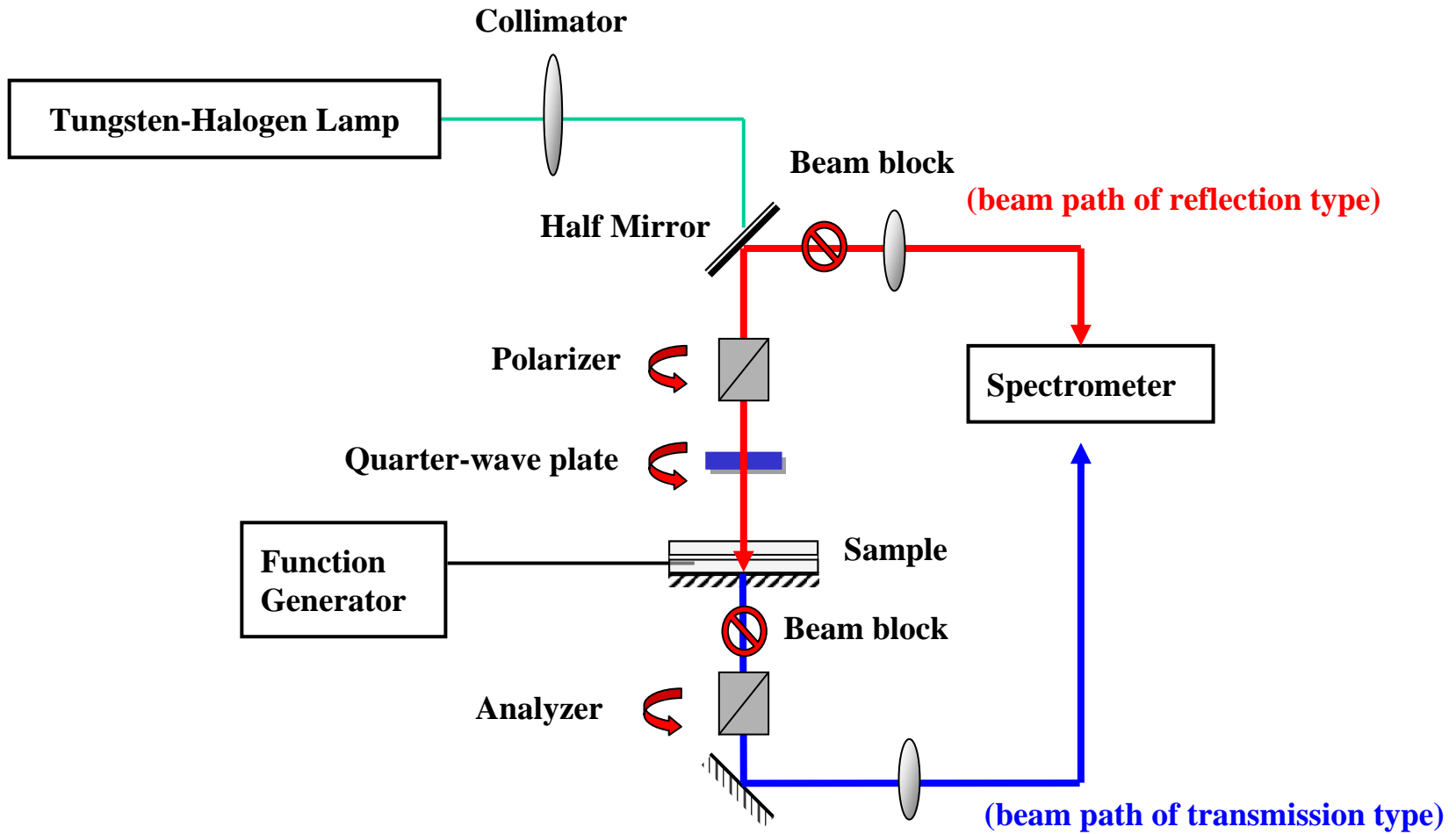
실측자료를 바탕으로 **simulation**하므로
panel의 광특성을 직접
측정한 것과 유사한 결과를 얻을 수 있음.

• 최적화의 길잡이

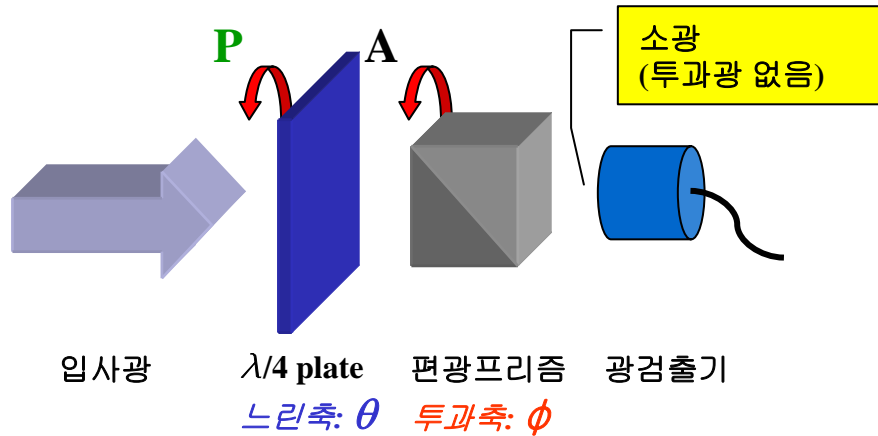
- 편광변화 및 투과율의 **시각화**
 - 보양카레 공 위에서 편광변화 표현
- 광특성을 **보면서** 설계

직관적으로 광특성을
분석할 수 있다.

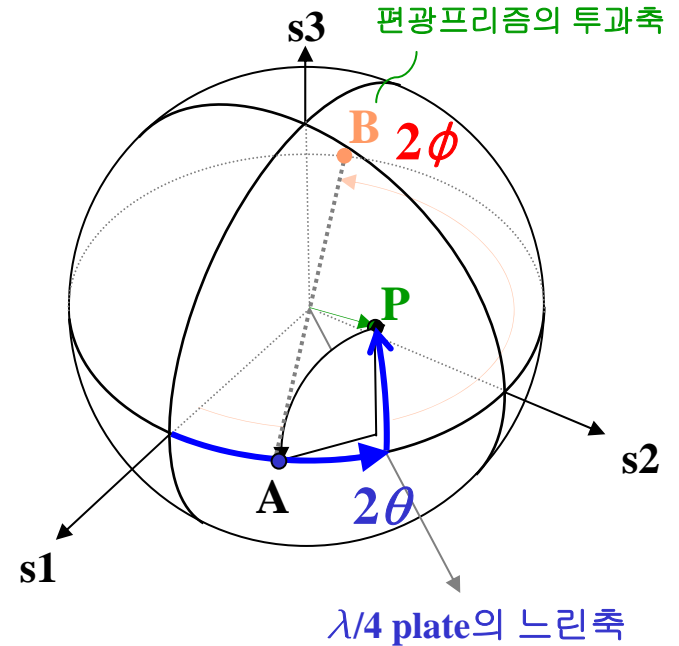
기본구조



• 소광법



- ① 편광프리즘을 돌려 광신호의 최소화.
- ② $\lambda/4$ plate를 돌려 광신호의 최소화
- ③ 소광되도록 1,2를 반복.



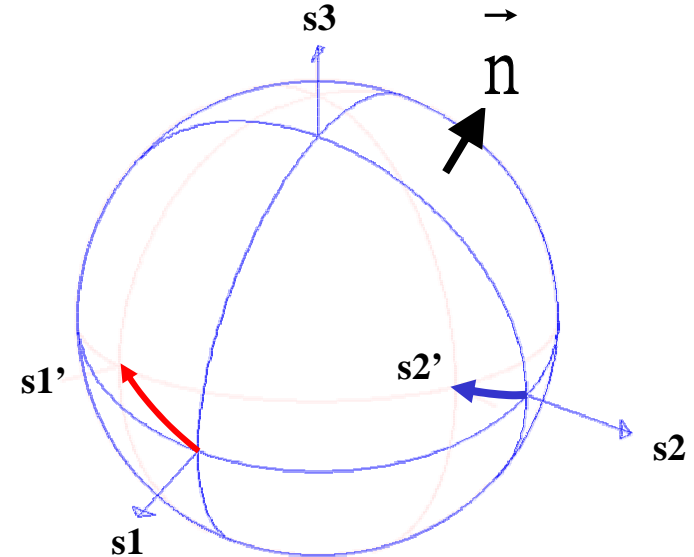
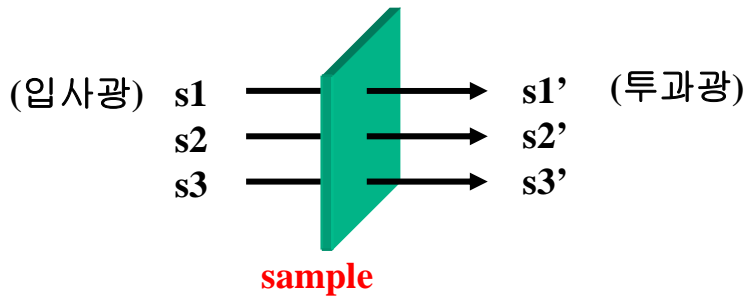
• 소광조건에서

$$P(\text{방위각, 위도각}) = (2\theta, 2\theta - 2\phi + \pi)$$

회전축/회전각의 결정

서로 직교하는 3개의 편광 입사시킴

각각에 대응하는 투과된 빛의 편광상태 결정



$$\cos(\Omega_{rot}) = \frac{1}{2}(e_1 \cdot e'_1 + e_2 \cdot e'_2 + e_3 \cdot e'_3)$$

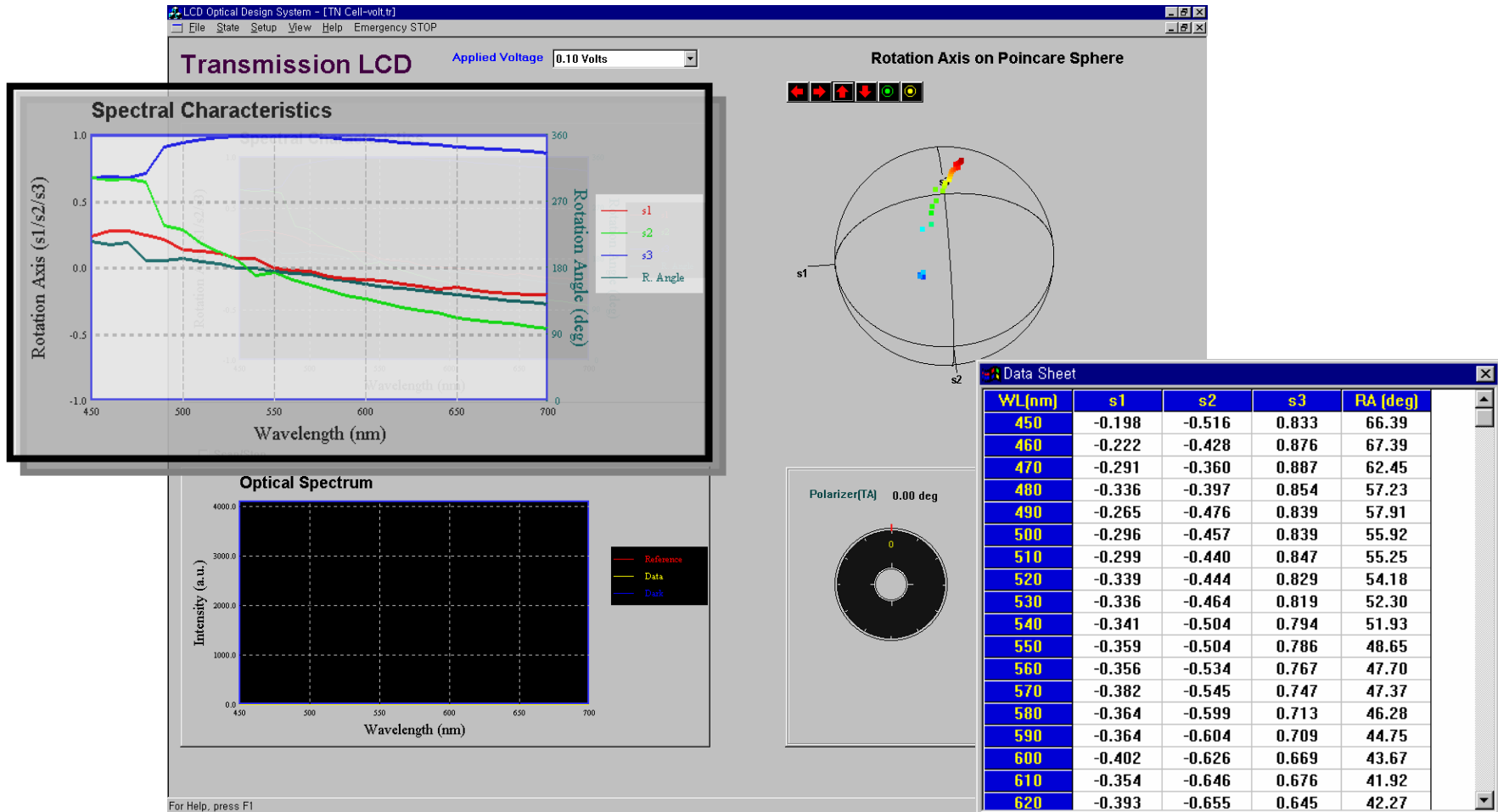
$$n_x \sin(\Omega_{rot}) = \frac{1}{2}(e'_2 \cdot e_3 - e'_3 \cdot e_2)$$

$$n_y \sin(\Omega_{rot}) = \frac{1}{2}(e'_3 \cdot e_1 - e'_1 \cdot e_3)$$

$$n_z \sin(\Omega_{rot}) = \frac{1}{2}(e'_1 \cdot e_2 - e'_2 \cdot e_1)$$

측정 (투과형 TN cell)

- 인가전압 범위: 0-20V
- 파장 범위: 450 nm ~ 700 nm, 10 nm간격



**측정자료
로딩**

편광타원

#	Component	OA (deg)
1	Ideal Polarizer	45.00
2	Test Sa	
3	Ideal Pol	
4	Load Retardation Film	
5	Load Tr. Cell	
6	Load Ref. Cell	
7	Delete Component	

**회전변환의
뽀앙카레 공
표현**

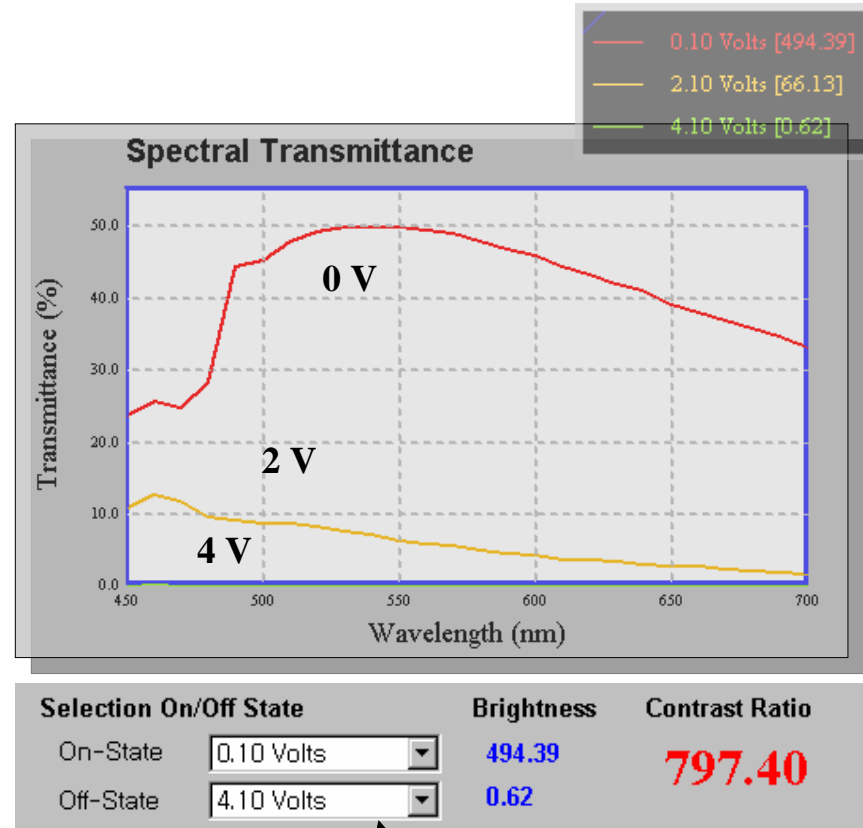
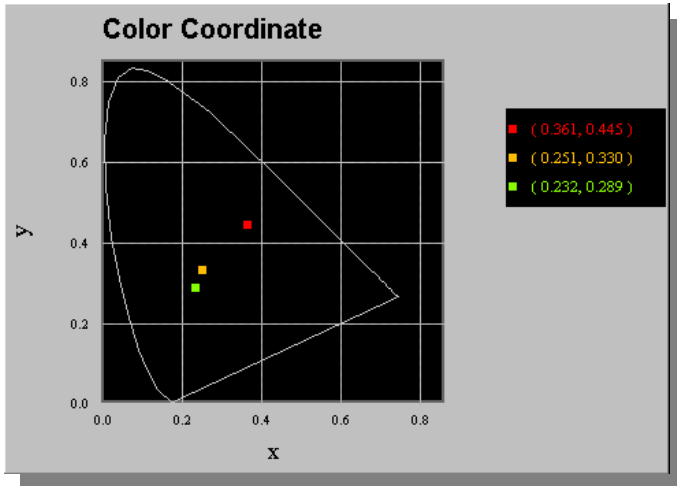
**투과율
스펙트럼**

**패널의
색좌표계**

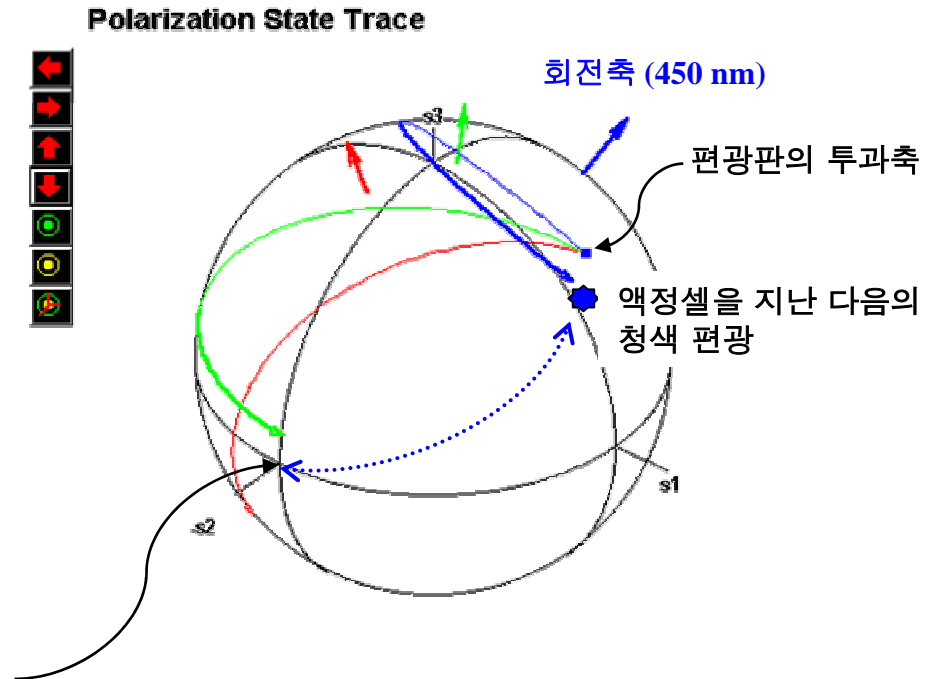
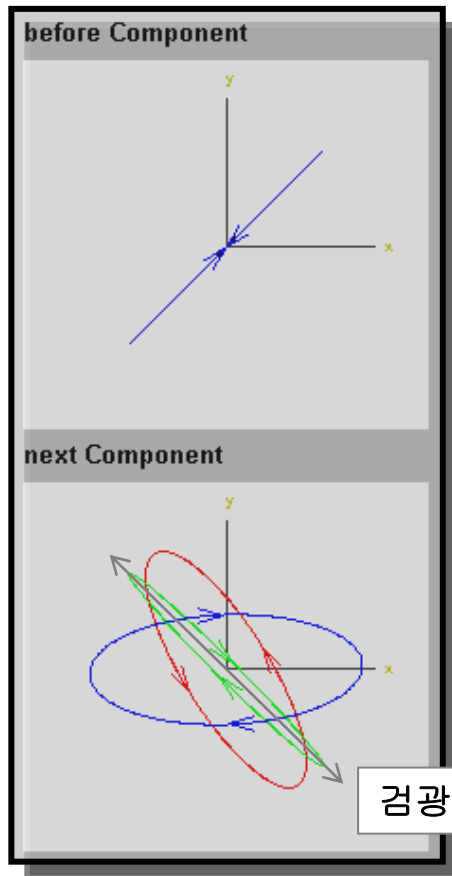
Design Example

- Normally White Mode TN Cell

#	Component		OA [deg]
1	Ideal Polarizer	POL	45.00
2			
3	Test Sample	TR	Fixed
4			
5	Ideal Polarizer	POL	-45.00



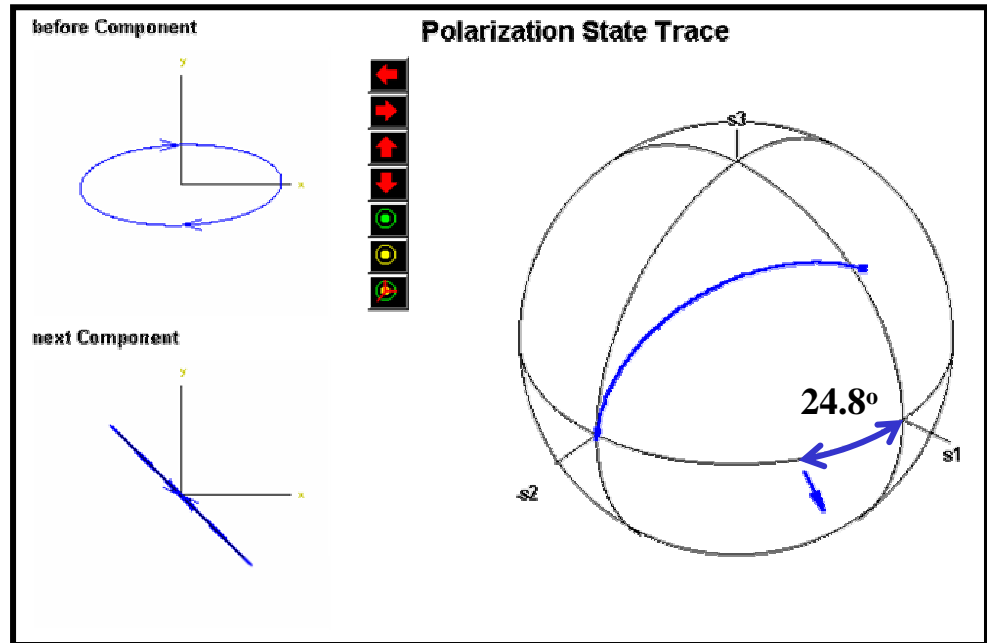
- 액정셀 앞/뒤에서의 편광상태



Design Example <계속>

- 청색파장의 최적화

#	Component		OA (deg)
1	Ideal Polarizer	POL	45.
2			
3	Test Sample	TR	Fixed
4	QWP-632.8nm	RET	-12.4
5	Ideal Polarizer	POL	-45.



Design Example (반사형)

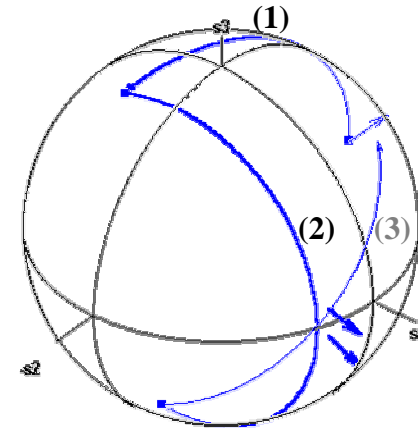
#	Component		OA (deg)
1	Ideal Polarizer	POL	45.00
2	QWP-632.8nm	RET	-5.00
3			
4			
5	Test Sample	REF	Fixed
6			
7			
8	QWP-632.8nm	RET	-5.00
9	Ideal Polarizer	POL	45.00
10			

(1)

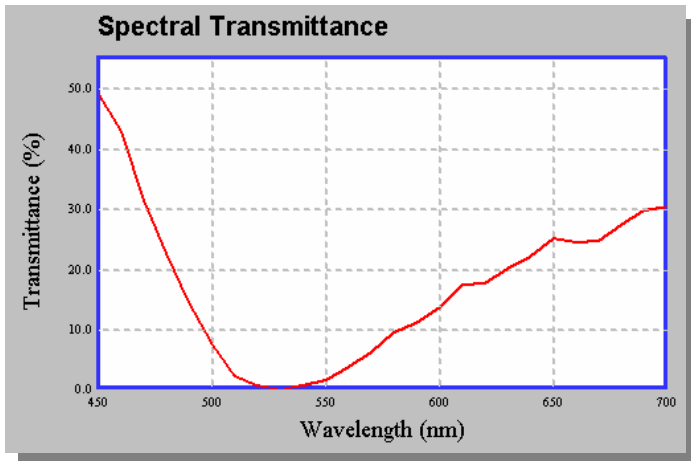
(2)

(3)

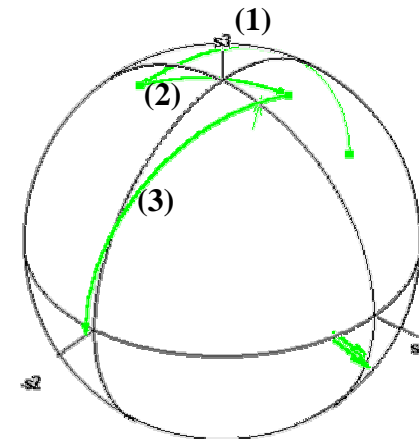
반사형 Panel (TN cell+mirror)



청색(450 nm)빛의 편광진화



투과율 스펙트럼



녹색(530 nm)빛의 편광진화

최적화

- 패널을 구성한 모든 부품의 광축을 바꿔가면서 시뮬레이션
- 투과율, 밝기, 명암대비비, 색좌표

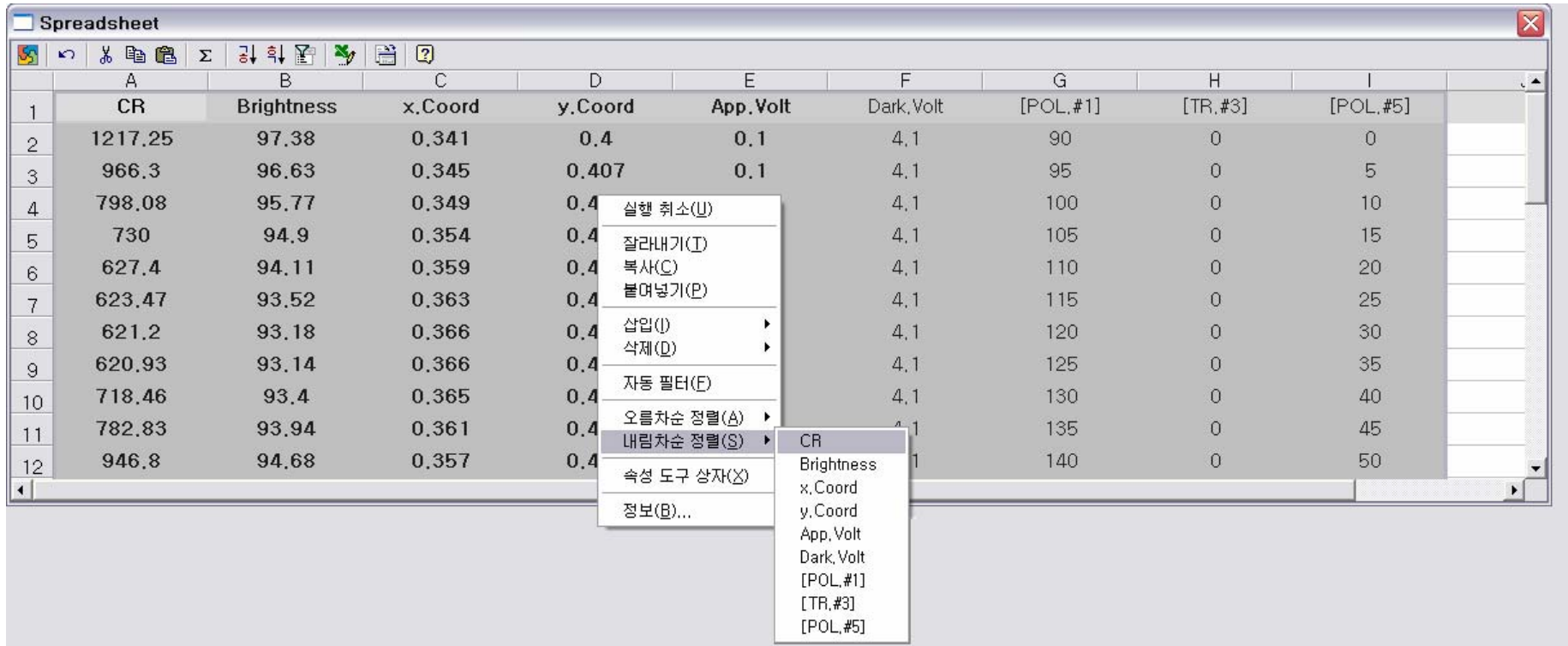
Component List

The screenshot shows the 'Optimization' window with a 'Component List' table. The table has columns for 'From Axis', 'To Axis', and 'Delta Axis'. The first row is '[POL #1]' with values 0, 180, and 10. The second row is '[TR #3]' with 'Fixed' in all three columns. The third row is '[POL #5]' with values 0, 180, and 10. A red box highlights the first three rows. Arrows point from the text 'Initial position' to the 'From Axis' column, 'Final position' to the 'To Axis' column, and 'Unit angle' to the 'Delta Axis' column. On the left side of the window, there are input fields for 'White-state' (90.0), 'Dark-state' (10.0), and 'Contrast Ratio' (200.0), each with a green indicator light. A 'Run' button is at the bottom left.

	From Axis	To Axis	Delta Axis
[POL #1]	0	180	10
[TR #3]	Fixed	Fixed	Fixed
[POL #5]	0	180	10

최적화 결과

- 명암대비비, 밝기 등에 따라 정렬
- 엑셀로 변환 됨



	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	CR	Brightness	x.Coord	y.Coord	App.Volt	Dark.Volt	[POL,#1]	[TR,#3]	[POL,#5]
1									
2	1217.25	97.38	0.341	0.4	0.1	4.1	90	0	0
3	966.3	96.63	0.345	0.407	0.1	4.1	95	0	5
4	798.08	95.77	0.349	0.4		4.1	100	0	10
5	730	94.9	0.354	0.4		4.1	105	0	15
6	627.4	94.11	0.359	0.4		4.1	110	0	20
7	623.47	93.52	0.363	0.4		4.1	115	0	25
8	621.2	93.18	0.366	0.4		4.1	120	0	30
9	620.93	93.14	0.366	0.4		4.1	125	0	35
10	718.46	93.4	0.365	0.4		4.1	130	0	40
11	782.83	93.94	0.361	0.4		4.1	135	0	45
12	946.8	94.68	0.357	0.4		4.1	140	0	50

결론



- **LODS**는 패널 설계에서 좀더 직관적인 방법을 제시한다.
광부품의 특성을 시각화한다.
편광상태의 변화를 기하학적으로 나타낸다.

이것은 신개념의 설계기법이다.