

광디스크 기관의 성형에 관하여

윤 경 환

1. 서 론

최근 디지털 방식의 음악재생 매체인 compact disk player나 컴퓨터의 주변장치로서 이제는 없어서는 안될 CD-ROM (Compact disk read-only memory)의 실용화와 함께 광학원반(optical disk)은 우리 생활 주위에서 이미 친밀해진 상태이다. 더 많은 데이터를 더욱 확실하게 전달할 수 있는 기억매체의 필요성에 따라 광학원반은 자기매체와 꾸준한 경쟁을 하며 그 중요성은 점차 커지고 있다. 이와 같은 추세를 살펴보면 표 1에 보이는 바와 같이 전세계적으로 CD계통 디스크의 최근 몇 년간 생산량은 꾸준히 증가하는 경향을 보이며 앞으로의 수요 또한 같은 경향을 보일 것으로 전망된다. 특히, 최근에는 새로운 형태의 DVD(digital versatile disc)와 같은 매체의 출현과 함께 관심이 집중되고 있는 대상이기도 하다.

이번 특집에서는 이러한 광디스크의 원리와 기관 제조에 관해 알아보려고 한다.

2. 광학디스크의 종류 및 기능

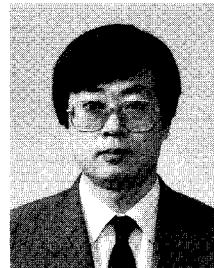
광디스크는 그 용도에따라 읽기 전용(read only memory), 쓰기 전용(write once read many, WORM) 및 쓰기와 읽기가 가능(magneto-optical disk, MOD)한 세가지 형태로 분류한다.

그 용도가 어떠한 광디스크의 기록면을 보호하기 위해서는 투명한 플라스틱 보호막층인 기관(disk substrate)이 필요하며 그 재료로는 video disk(V.D.)에서는 PMMA를 사용하였으나 이제는 폴리카보네이트(polycarbonate)가 주류를 이루고 있다. 이러한 디스크 기관의 필요성과 그 중요성을 알기 위해서는 우선 광디스

크의 기록 및 읽기의 원리를 이해하는 것이 필요하며 각각의 원리를 간단히 설명하고자 한다.

다음의 그림 1에 나타난 compact disk의 단면과 읽기 장치의 개략도에서 알 수 있는 바와 같이 광디스크의 기록면에 투사된 레이저광은 우선 beam splitter와 볼록렌즈인 pickup lens를 통해 두께가 1.2 mm인 플라스틱 기관을 통과한 후 초점이 금속 박막의 기록면에 모아져 반사한 후 다시 기관을 거쳐 렌즈를 통과 후 beam splitter에서 90도 꺾여 감지기(detector)에 의해 신호를 판단하게 된다. 이때 기록면에서의 반사율(또는 반사율의 변화)에 의해 각 점의 데이터는 0과 1의 디지털신호로 변화되어 읽히게 된다. 예를 들어 반사되던 1, 반사율이 작으면 0으로 모든 데이터를 미리 정한 코드에 의해 유용한 데이터로 변환, 재생할 수 있는 것이다. 이때 기록면에 쓰이는 알루미늄 금속막은 얇고 외기의 조건에 약하고 그 자체만으로는 강도가 충분치 못해 그대로 쓸 수가 없어 투명한 기관을 사용하는 것이 필수적이다.

한편, WORM은 한 번 데이터를 기록하고 더 이상 변경이 불가능하여 영구보관용으로 쓰이며 사용되는 원리는 기록하는 과정에서 금속막층을 녹여서 제거(ablation)하거나 상변화(phase change)를 주어 그림 2에 보



윤경환

- 1976~ 서울대학교 기계공학과(학사) 1980
- 1980~ 서울대학교 기계공학과(석사) 1982
- 1983~ Cornell Uni., 기계공학과 1989 (박사)
- 1989~ Cornell Uni., Post Doc & 연구교수 1993
- 1993~ 단국대학교 기계공학과, 현재 조교수

On The Manufacturing Process of a Optical Disk Substrate

단국대학교 공과대학 기계공학과(Yoon, Kyunghwan, Dept. of Mechanical Engr., Dankook University, San 8, Hannam-Dong, Yongsan-Ku, Seoul 140-714, Korea)

표 1. CD 세계수요, 공급현황

(단위:백만 piece)

구분	'94	'95	'96	'97	'98
수요*	2,500	3,000	3,800	4,600	5,400
공급**	3,500	4,200	4,900	5,500	6,000

*수요는 Understanding & Solution Ltd. 및 일본전파신문 자료.

**공급은 S사 추정치.

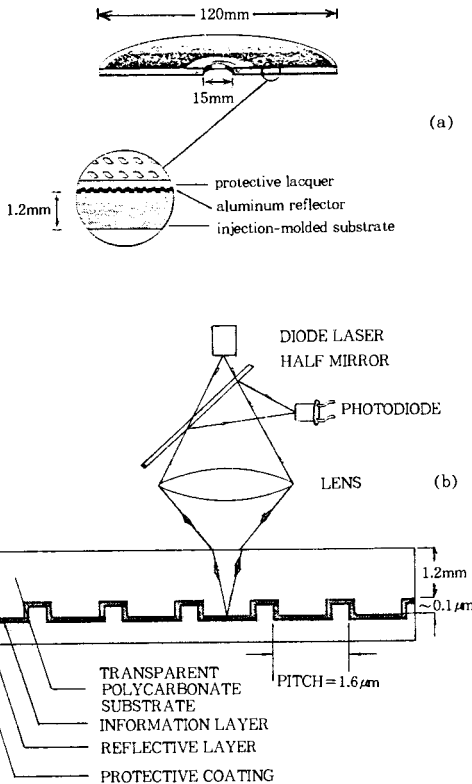


그림 1. A schematic diagram(a) and a principle of readout system(b) for a compact disk.

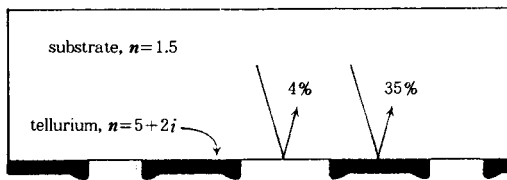


그림 2. The reflectance variation of a write-once system.

이는 바와같이 반사율의 차이가 생기게 하여 데이터를 판독할 수 있다.

마지막으로 쓰고 지울 수 있는 광자기 디스크의 원리를 그림 3(a),(b)에 보이며 자성 박막층을 디스크 면에 수직하게 자화시켜 편광된 입사광이 Kerr effect(또는 Kerr rotation)에 의해 편광축이 그림 4와 같이 회전하

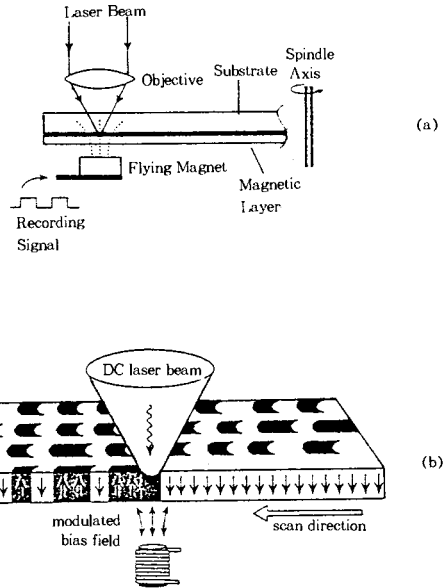


그림 3. Recording(a) and overwriting(b) mechanisms of a magneto-optical disk.

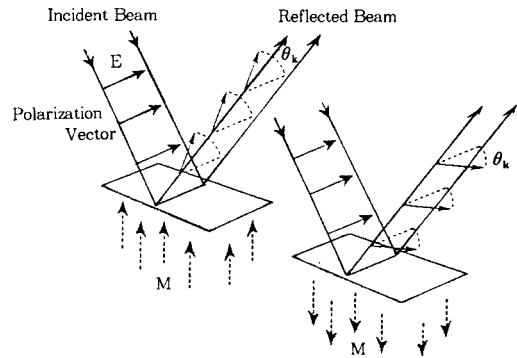


그림 4. Schematic diagram describing the polar magneto-optical Kerr effect.

는 원리를 이용한다. 쓰기 단계에서는 높은 출력의 레이저를 사용하며 읽기에는 낮은 출력의 편광된 다이오드 레이저를 사용하며 이 때 필요한 장치를 그림 5에 보인다.

위의 세가지 종류 모두 레이저광은 입사시와 반사시 두 번 이 투명한 플라스틱 기판을 통과하게 되며 기록면에 초점을 형성하기 위해 광은 디스크에 수직하지만 경사를 이루며 입사(converging) 및 반사(diverging)된다는 것을 기억해 두기로 하자. 한편, 이 플라스틱 기판의 제조 과정이 바로 고분자물질의 성형과 관계되므로 다음 절에는 이러한 기판의 성형에 대해 알아보기로 한다.

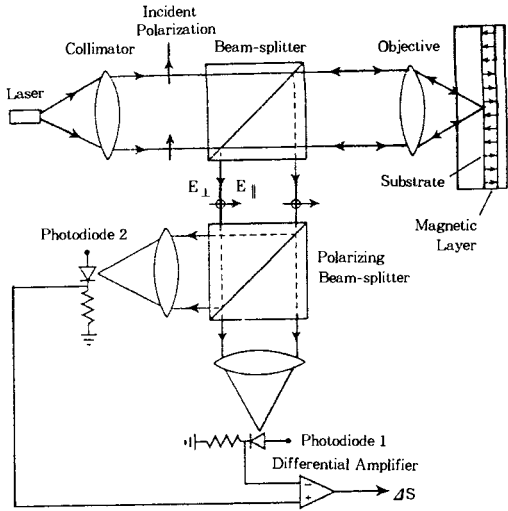


그림 5. A differential detection scheme of a magneto-optical disk.

3. 디스크 기판

3.1 디스크 기판의 제조법

우선 기판을 제조하기에 앞서 스탬퍼의 제조과정이 필요하며 다음의 과정을 거친다. 그림 6(a)와 같이 파장이 짧은 레이저를 사용하여 photoresist material에 원하는 패턴을 넣은 후 (b)와 같은 현상작업을 거쳐 (c)와 같이 전기도금을 한다. 이때 전기도금에 주로 사용하는 금속은 니켈이며 현상 작업 후에 만들어진 photoresist master 위에 도금된 니켈 파트는 다음의 성형시 한쪽 면에 데이터 또는 데이터 트랙을 만드는데 사용되며 이를 스탬퍼(stamper)라 부른다. 스탬퍼의 제조 기술은 기판 성형에 앞서 필수적으로 갖추어야 할 요소이며 앞으로 국내에서 독자적인 테크닉을 개발하는데 큰 노력이 필요한 부분이기도 하다. 한편, 위의 스탬퍼가 준비되면 그림 6(d)와 같이 실제 기판을 성형하게 되며 크게 다음과 같은 단순 사출과 사출/압축 공정에 의해 이루어진다.

3.1.1 사출성형

대부분의 읽기 전용(read only)인 CD(CD-ROM, CD-I, CD-V 포함), VD의 생산에 이용되며 대량생산에 적합하고 기록된 데이터를 가지고 있는 스탬퍼의 수명도 비교적 길다. 중심에 스프루가 위치하고 보압을 계속 걸어야 하므로 중심의 두께가 외주의 두께보다 크고 광학적 이방성 또한 중심에서 큰 경향을 보인다.

3.1.2 사출/압축성형

메모리가 가능한 제품(magneto-optical disk)과 고급 CD의 제조에 쓰이며 사출에 의해 충전 후 압축공정을 가미하여 전면에 균일한 압력을 걸어 전체적으로 왜곡

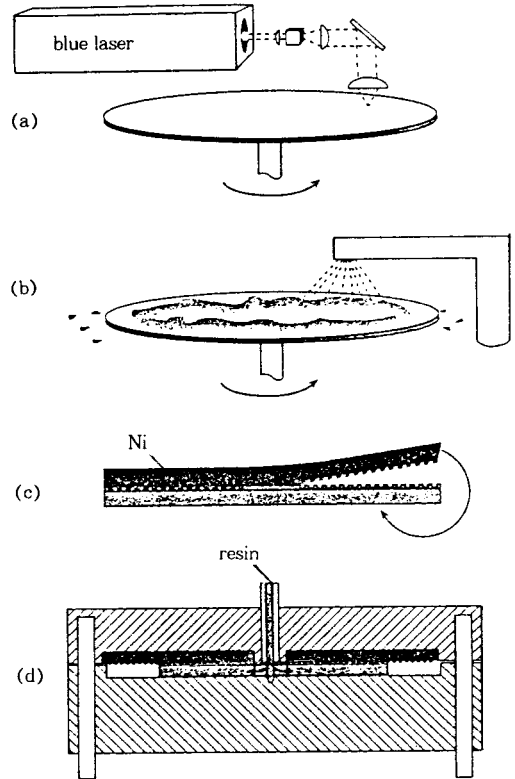


그림 6. Manufacturing steps for a plastic disk substrate; laser exposure of a photoresist master(a), wet development of the master(b), electroplating to make nickel stamper(c), and injection molding process(d).

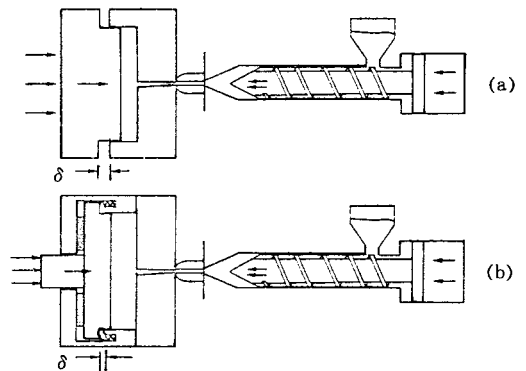


그림 7. Two types of compression mechanism: a total compression of a moving plate by a clamping force control(a) and a core compression by a separate unit(b).

이 적고 두께의 분포가 균일한 제품을 얻을 수 있다. 그림 7에 현재 쓰이고 있는 두가지 대표적인 사출기 및 금형의 형태를 보이며 그림 7(a)는 전면 압축에 의해 금형의 가동축을 형체력(clamping force)에 의해 제어하는

구조를 보이며 그림 7(b)의 구조는 고정측과 가동측이 형체력에 의해 완전히 닫힌 상태에서 코어 부분만을 압축할 수 있도록 되어있다. 충전 후 금형의 구조에 따라 δ 만큼 캐비티가 벌어져 있다가 압축공정시 속도 또는 압축력을 제어하며 최종 제품을 만드는 과정이다. 이는 사출 성형과 압축성형공정을 가미함으로써 사출 후(또는 사출 중) 압축공정을 제어하는 변수들이 첨가되기 때문에 프로세스의 제어가 힘들고 생산성은 단순 사출에 비해 약간 떨어지며 전용 사출기의 구입 및 사출/압축 전용금형의 개발이 필수적으로 코스트가 높아지므로 현재는 고급의 초정밀을 요하는 제품에만 적용된다.

사출/압축성형법의 대표적인 장점으로는 캐비티를 약간 열고 충전하기 때문에 충전완료시 노즐에 걸리는 압력을 단순 사출에 비해 낮출 수 있어 단순 사출에 비해 저압에서 성형을 완료할 수 있으며 제품면 전체에 고른 가압 효과를 줄 수 있다는 점을 들 수 있다.

3.2 기판의 재료

광디스크의 재료로는 현재 video disk(V.D.)에서는 아직도 PMMA를 사용하고 있으나 대부분의 제품에는 폴리카보네이트(PC)를 주로 사용하고 있다. PMMA는 투명성과 내구성이 우수하고 외관적으로도 우수하지만 흡습성이 크고 내열성이 비교적 적다는 단점을 가지고 있다. PC는 내열성, 내충격성이 우수하지만 성형 가공성, 표면 경도가 약간 떨어지며 복굴절이 크게 남고 수지의 가격도 약간 비싸다는 결점도 있다.

이러한 수지들은 특히 성형성의 향상, 복굴절의 감소 및 이형성의 개선 등을 위하여 분자량을 작게 하는 등 노력을 통해 일반용과는 달리 광디스크 전용이 사용되고 있으며 다음의 표 2에 compact disk용으로 개발된 G.E의 Lexan OQ1020C의 물성 데이터를 그 측정법 및 조건과 함께 실 예를 보이기로 한다.

3.3 사출기의 선택 및 성형시 유의점

초정밀 성형을 가능하게 하려면 각 부의 압력, 온도 및 속도를 공정중 얼마나 빠르고 안정하게 제어할 수 있는지가 관건이며 이러한 조건을 만족시키려면 다음과 같은 조건들을 만족시킬 수 있어야 한다.

- 1) 수지의 정확한 계량과 빠르고 균일한 가소화를 이룰 수 있도록 전단량의 조절이 가능한 스크류의 채택이 바람직하며 실린더와 전단 노즐부의 온도 조절에 특히 신경을 써야 한다.
- 2) 사출 압력 및 스크류의 속도 및 가압시 가압 코어의 속도 및 압력의 제어를 클로즈드 루프(closed loop control)를 써서 안정성과 재현성을 높이는 과정도 필수적이다.
- 3) 형체기구가 정밀하게 작동할 수 있어야 하며 타이 바 각각에 균일한 하중이 걸리도록 설계되어야 한다.
- 4) 금형의 가격이 높으므로 (심지어는 금형의 가격이

표 2. Typical Properties of LEXAN® OQ1020C Resin

	Property	Test method	Condition	Unit	Properties
Physical	Specific gravity	ASTM D792	23°C	-	1.2
	Water absorption	ASTM D570	23°C, 24hrs	%	0.15
Optical	Refractive index(n_D)	ASTM D542	-	-	1.585
	Light transmittance	ASTM D1003	1.0mm thickness	%	90
	Yellowness index	JIS K7103	1.0mm thickness	-	1.0이하
Mechanical	Tensile strength (at break)	ASTM D638	23°C	MPa	64
	Elongation (at break)	ASTM D638	23°C	%	105
	Flexural strength	ASTM D790	23°C	MPa	98
	Flexural modulus	ASTM D790	23°C	MPa	2900
	Impact strength	ASTM D256	Izod, notched 3.2mm thick	J/m	190
			Izod, unnotched 3.2mm thick		NB
Rockwell hardness	ASTM D785	M scale	-	77	
Thermal	Mold shrinkage	ASTM D955	Flow dir.	%	0.5~0.7
			Traverse dir.		
	Heat distortion temperature under load	ASTM D648	0.455MPa	°C	138
			1.820MPa		129
	Glass transition temp(T_g)	DSC	-	°C	139
	Melt flow rate	ASTM D1238	250°C/1.2kg	g/10 min	11.0
	Coefficient of linear thermal expansion	TMA	-30°C ~ +30°C	$\times 10^{-5}K$	7
Thermal conductivity	-	-	W/m·K	0.294	
Electrical	Dielectric breakdown strength	ASTM D149	3.2mm thick	KV/mm	16
	Volume resistivity	ASTM D257	-	Ω -cm	10^{16}
	Dielectric constant	ASTM D150	23°C, 60Hz	-	3.2
	Dielectric tangent	ASTM D150	23°C, 60Hz	-	0.0009
Particle Contamination	RION	>50 μ m	pieces/5g	0	

사출기의 가격을 훨씬 상회하는 경우도 있음) 금형의 오작동을 방지할 수 있는 안전장치 등 보호기능의 설치는 권장할 만하다.

위와같은 사항들이 해결되면 일반 사출기에 비해 훨씬 향상된 속도 및 위치제어와 온도의 조절이 가능하여 안정하고 균일한 제품의 생산이 가능하여지고 다음의 목표인 전체 사이클 타임의 감소를 추구하고 수 있게 된다. 예를 들어 현재 CD 기판의 사이클 타임이 5-6초임에 비하여 후공정의 시간에 맞추기 위해 약 3초대로 줄이는 연구가 한창 진행 중이다.

3.4 광디스크 성형시 요구되는 사항

다음의 각 조건들은 그 규격이 주어진 디스크의 종류에 따라 규격집에 명시되어 있으며 최종 사출품의 테스트 과정의 확립은 필수적이다. 예를 들어 Red Book이라고 알려진 1985년 Sony와 Philips사가 합의한 음악 재생 전용 compact disk의 규격집 내용 중 일부를 표 3에 보였으며 몇가지 필수적으로 고려해야 할 사항들을 다음

표 3. Specifications of Compact Disc (from Red Book)

	Characteristic to be specified	Requirements	Method of measurement and/or conditions
Outer diameter	Outer diameter of disc	$120 \pm 0.3\text{mm}$	measured at $23 \pm 2^\circ\text{C}$ and $50 \pm 5\%$ RH
	Eccentricity	$\pm 0.2\text{mm}$	relative to center hole
Centre hole	Diameter	$15.0 \pm 0.1\text{mm}$	measured at $23 \pm 2^\circ\text{C}$ and $50 \pm 5\%$ RH
Thickness	Thickness of disc	$1.2 - 0.1 \sim 1.2 + 0.3\text{mm}$	incl. protective layer and label
Clamping area	Thickness of clamping area	$1.2 - 0.1 \sim 1.2 + 0.3\text{mm}$	incl. protective layer and label
Deflection	Max. deflection	$\pm 0.4\text{mm}$	within information area (45mm to max. 118mm diameter)
	deflection, averaged over one revolution	$\pm 0.3\text{mm}$	
	Max. angular deviation of the beam incident surface from the reference plane	$\pm 0.6^\circ$	
Optical requirements	Thickness of transparent disc substrate	$1.2 \pm 0.1\text{mm}$	within information area (45mm to max. 118mm diameter)
	Refractive index of transparent substrate	1.55 ± 0.1	
	Max. birefringence of the transparent substrate	100nm	double pass
	Reflection and substrate transmission	$> 70\%$	
	Maximum variation of reflection and double pass substrate transmission	3%	for frequencies $< 100\text{Hz}$ disc rotating at scanning velocity
Track pitch	Track pitch	$1.6 \pm 0.1 \mu\text{m}$	in program area and lead in/out area
Rotation	Sense of rotation	counter clockwise	seen from read out side
	Scanning velocity	$1.20 \sim 1.40\text{m/s}$	
	Max. velocity variation on one disc	$\pm 0.01\text{m/s}$	
Radial deviations of the track	Max. eccentricity of track radius	$\pm 70 \mu\text{m}$	relative to centre hole

에 정리하였다.

3.4.1 투명성

고도의 광선 투과율이 필요하며 열변색은 허용되지 않는다.

3.4.2 전사성

마이크로 미터 단위의 피트들을 스템퍼에서 기관으로 옮겨 넣어야 하므로 고도의 전사성이 요구된다.

3.4.3 이형성

스템퍼의 면에서 이형시 수지를 남기지 않고 균일하게 이형될 수 있어야 한다.

3.4.4 치수정밀도

내경, 외경 및 두께가 주어진 스펙에 의한 규격안에 들어올 수 있도록 성형되어야 한다. 특히 내경이 동심원과 가깝게 성형될 수 있는 것이 중요하다.

3.4.5 먼지 및 환경

수지 공급자로부터 성형기에 주입시까지 이물질의 혼합이 되지 않도록 철저한 관리가 필요하며 금형의 관리와 성형후 관리에도 철저를 기해야 한다. 클린룸 내에서의 성형이 일반적이며 사출 조건의 균일성을 유지하기 위해서는 항온, 항습은 필수적이다.

3.4.6 복굴절

광관련 제품시 필수적으로 작게 하여야 하는 특수한 사항으로 기관내 복굴절의 양이 큰 경우 신호에 잡음이 커지며 메모리 디스크의 경우 기록면의 신호를 읽지 못하는 경우까지 발생한다.

3.4.7 성형성

일반적인 디스크들은 두께가 1.2 mm이므로 범용 수지에 비해 유동성이 좋은 수지를 사용해야 하며 최근 개발된 DVD는 두께가 0.6 mm이므로 실린더의 온도를 더욱 높이거나 사출/압축 성형시 처음 열어주는 거리 δ 를 크게 하는 등의 연구가 필수적이다.

4. 광침의 형성과 기관내의 복굴절

4.1 광침(Optical Stylus)

LP 레코드 플레이어의 바늘과 마찬가지로 광디스크에서는 레이저광을 초점에 조사하여 기록면의 데이터를 읽게 되어있다. 하지만 기하광학(geometrical optics)에서의 가정과는 달리 회절광학(diffraction optics)에서는 그림 8과 같이 초점 주위에서 광의 세기가 분포를 가지며 이 때 형성되는 광침의 지름은 중심의 세기의 반이 되는 위치(full width at half maximum, FWHM) d 로 정하며 이는

$$d \cong \frac{0.6\lambda}{NA}$$

로 표시되며 여기에서 λ 는 사용되는 레이저의 파장(현재 사용되는 다이오드 레이저의 파장은 780-800 nm)이며 NA (numerical aperture)는 광의 지나는 매질의 굴절

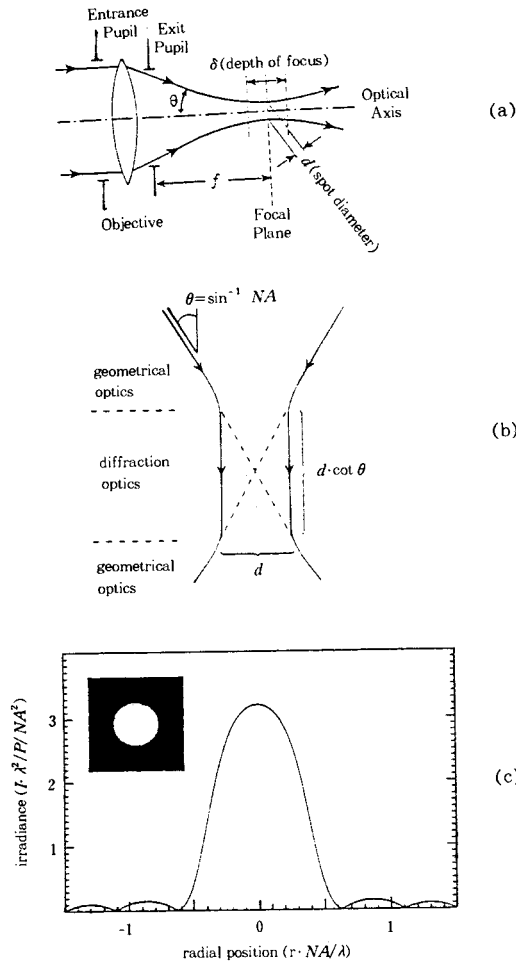


그림 8. The numerical aperture(NA) and the spot size d of a focused laser beam(a), the depth of focus for a diffraction-limited spot(b), and the airy profile(c).

표 4. Comparisons between CD and DVD Specifications

	CD	DVD
Outer Diameter (mm)	120	120
Thickness (mm)	1.2	1.2
	Single substrate	Two bonded 0.6mm substrates
Wavelength (nm)	780	650 & 635 (red)
NA	0.45	0.6
Track pitch (μm)	1.6	0.74
Shorted pit/land length (μm)	0.83	0.4
CLV(m/s)	1.2	4.0
Data (Bytes)	680 MB	single 4.7GB dual 8.5GB
Video data rate (MB/s)	1.44	1~10
Video compression	MPEG 1	MPEG 2

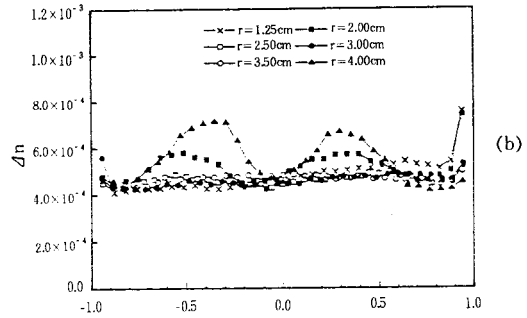
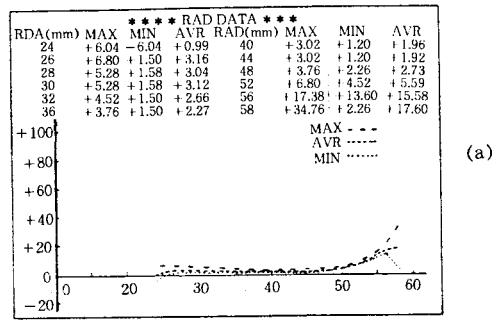


그림 9. Examples of the in-plane birefringence $n_{rr}-n_{\theta\theta}$ (a) and the vertical birefringence Δn (b) of a disk substrate.

물이 n 일 때 $NA = n \sin \theta$ 로 정의되며 현재는 0.45-0.5 사이를 사용하고 있다. 위의 식으로부터 알 수 있는 바와 같이 더 많은 데이터를 단위 면적당 크게 하려면 주어진 n 에 대하여 d 를 작게 만들어야 하는데 될 수 있으면 짧은 파장의 레이저를 사용해야 하고 NA의 값을 크게 해야 한다. 현재 데이터의 밀도를 높이기 위해 실제로 이러한 시도가 이루어지고 있으며 차세대 광매체인 DVD에서는 표 4에 보이는 바와 같이 종전 CD와는 다른 스펙을 사용한다는 것을 알 수 있다.

4.2 디스크 기관 내의 복굴절의 구조

빛은 그 진동방향과 수직으로 진동하는 전자기파의 일종인 횡파의 성질을 가지고 있으며 이방성이 있는 물질을 통과할 때 그 진동방향에 따라 각기 다른 속도를 가지고 통과하며 이러한 현상을 복굴절이라 부른다. 일반적으로 진동방향에 따라 가장 빠르게 진행되는 방향을 fast axis, 가장 느리게 진행되는 축을 slow axis라 하며 이때 최대와 최소 굴절률의 차이를 복굴절의 값 Δn 이라 부른다.

고분자 수지의 경우 충전시 유동에 의한 응력의 분포와 이의 이완에 의해 남는 잔류 복굴절(flow-induced birefringence)과 차가운 금형면으로의 불균일 냉각에 의해 발생하는 잔류응력으로 인해 남는 복굴절(thermally-induced birefringence)로 구분할 수 있으며 최종 복굴절의 구조는 이 두가지가 복합되어 남는다.

5. 맺음말

이상과 같은 광디스크 매체는 현재의 추세로 볼 때 앞으로 새로운 기준에 의한 더욱 새로운 매체의 지속적인 개발도 이루어질 것으로 보인다. 특히, 데이터 밀도의 증가 추세와 더불어 더욱 까다로운 조건을 만족시켜야 하는 기관의 초정밀 성형 또한 중요한 부분으로 떠오르고 있다. 한편, 광학 관련 고부가가치 상품의 생산기술 확보를 위해 전용 금형의 개발, 전용 사출기의 개발 및 초정밀 측정기술의 개발과 더불어 이 방면의 지속적인 연구가 필요하다고 생각한다.

참 고 문 헌

1. Marchant, A. B., "Optical Recording : A Technical Review", Massachusetts, Addison-Wesley, 1990.
2. Mansuripur, M., "The Physical Principles of Magneto-optical Recording", Cambridge, Cambridge University Press, 1995.
3. 유병열, 이만용 역, "최신 사출성형 기술", 성안당, 1990.
4. Hecht, E., "Optics", Berlin, Addison-Wesley, 1987.
5. Isayev, A. I. (Ed.), "Injection and Compression Molding Fundamentals", New York and Basel, Marcel and Dekker Inc., 1987.
6. K. Yoon, "On the Study of Birefringence Structure in Injection and Injection-Compression Molded Disks", SPE Tech. Papers, Vol. 41, pp. 2973-2977, 1995.
7. Philips Technical Review, "A review of technology for the Laser-Vision videodisks and the Compact Disc", 1982 & 1985.
8. <http://www.unik.no/%7Erobert/hifi/dvd/>
9. <http://www.sel.sony.com/sel/consumer/dvd/>
10. <http://www.toshiba.com/tasp/sp/>
11. <http://www-us.philips.com/pkm/laseroptics/dvd/brochure/>

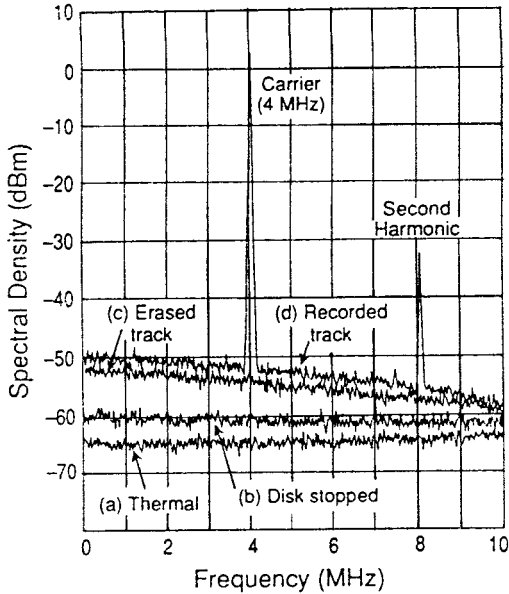


그림 10. Spectra of various noise components in MO readout.

이 복굴절은 디스크 기관에서도 성형시 나타나며 수직 방향인 in-plane birefringence($n_{rr}-n_{\theta\theta}$)와 두께 방향으로 나타나는 vertical birefringence(Δn)로 구별하며 이러한 대표적 분포를 그림 9(a), (b)에 각각 나타내고 있다. 이러한 기관내 복굴절이 커지면 그림 10과 같이 spectrum analyzer로 신호를 받아보면 주신호 영역 주위의 잡음신호(noise)가 커지며 SNR(signal-to-noise ratio) 또는 CNR(carrier-to-noise ratio) 값이 작아지는 경향이 발견된다. 특히 MOD에서는 신호를 받지 못하는 경우도 발생하며 이에 성형조건의 변화 등으로 이러한 기관내 복굴절의 값을 줄이기 위한 연구도 지속적으로 이루어지고 있다.