

Transducer 최적화 설계에 의한 Laser Projection Display용 음향광학변조기 제작 및 특성평가에 대한 연구

차승남 · 이항우 · 김용훈 · 황영모

삼성종합기술원

(1997년 5월 28일 받음)

Laser projection display(LPD)는 레이저를 이용한 full color의 대형화면을 구현하는 system이다. TeO₂와 LiNbO₃ 단결정을 음향광학 매질과 transducer로 사용하여 이 system에 쓰이는 영상 신호 처리용 음향광학변조기(Acousto Optic Modulator : AOM)를 제작하고 그 특성을 평가하였다. AOM은 transducer에서 발생된 초음파가 가장 효과적으로 음향광학 매질에 전달되도록 simulation한 후 제작하였으며 제작된 AOM은 특성평가와 더불어 설계값에 맞게 제작되었는가를 회절 효율 측정을 통해 검증하였다. LPD system에 실장된 AOM의 회절효율은 85%이며 rise time은 41.5 ns이다.

I. 서 론

음향광학효과는 초음파가 매질 내에서 전파될 때, 매질의 광학적 특성이 변화되는 현상이다. 음향광학 효과 중 가장 많이 응용되는 현상 중 하나가 광의 회절이다. 어떠한 매질에 초음파와 광이 입사되어 지나갈 때 적절한 조건이 만족되면 입사된 광이 부분적으로 회절되며 초음파의 세기에 따라 회절광량이 변화된다. 이러한 회절현상은 매질이 초음파의 강도에 따라 굴절률이 변화되고, 이것이 위상격자와 같은 역할을 함으로써 일어난다. 이 현상은 일반적으로 X-ray 회절현상과 같은 원리를 근거로 하기 때문에 Bragg diffraction^[1]이라 한다.

음향광학현상은 이미 1930년대에 발견되었으나 레이저가 발명되기 이전인 1960년 초까지는 실용적인 측면에서 각광을 얻지 못하였고, 레이저 발명 이후 빔의 회절과 변조의 필요성이 인식되면서 연구의 대상이 되었다. 음향광학 현상을 이용한 대표적인 소자는 acousto-optic modulator(AOM)로서 레이저 공진기 내부에 설치되어 Q-switched 또는 cw mode-locked 레이저와 같은 짧은 펄스 발진에 사용되고 있다. 펄스 레이저 응용 외에도 cw 레이저 외부에 설치하여 광신호 발생 및 처리 응용에도 유용하게 쓰이고 있다. 이 응용분야 중 하나가 laser projection display(LPD) system이다. 이는 영상신호를 AOM을 이용하여 변조된 광신호로 바꾼 뒤 화면에 projection하여 화상을 구현하는 것이다.

그림 1에서와 같이 LPD 시스템^[2]은 full color 대화면을 구현하는 장치로 광원인 백색광 레이저, 백색광 레이저를 적·녹·청색광으로 분리하는 색 분리부, 영상신호에 따라 레이저 광의 진폭을 변조하는 광변조부, 변조된 광을 통합하는 색 통합부, 수평스캔을 위한 회전다면경과 수직스캔을 위한 galvanometer등으로 이루어진 광주사부, 영상신호처리 및 제어 신호를 발생시키는 신호처리부로 구성된다. 이 system은 NTSC 신호를 처리하여 3m×4m 크기의 화면을 구성하며 각종 광학계를 통과한 전체의 광효율은 약 50%이다.

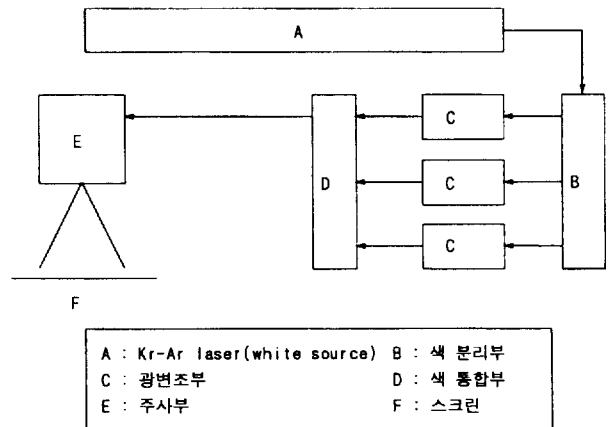


그림 1. LPD system 구성도

본 연구에서는 AOM transducer 최적화 설계에 의해 LPD system에 장착되어 사용되고 있는 AOM을 제작하고 그 특성을 평가하였다.

II. AOM transducer 최적화 설계에 관한 이론적 배경^[3]

AOM을 포함한 acousto optic(AO) device가 제대로 작동하기 위한 중요한 두 가지 작용은 다음과 같다. 하나는 전자신호가 acoustic신호로 변환되는 piezoelectric transducer의 작용이며 또 하나는 음향광학 매질에서 일어나는 초음파와 레이저 beam 사이의 상호 작용이다. 따라서 AO device가 동작하는 전체적인 대역폭은 transducer 대역폭과 Bragg 대역폭에 의해 결정된다.^[4]

2 장에서는 transducer 대역폭, 즉 주파수 변화에 대한 transducer의 변화를 simulation하기 위한 이론적 배경을 간단히 설명하였다. Code 작성은 transducer 대역폭에 영향을 주는 각각의 상호 독립적 요소들을 복소 행렬로 표현한 수식을 이용했다.

이 code를 이용하여 AO device가 동작할 때 사용되는 carrier frequency에 맞는 piezoelectric transducer 두께를 결정할

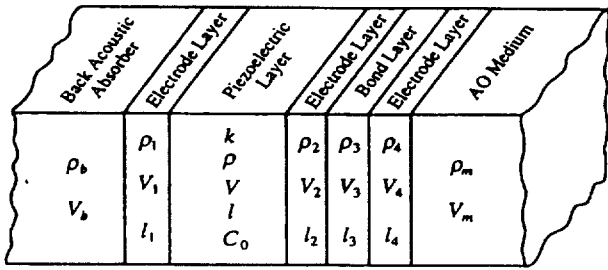


그림 2. AOM deposition layer들의 구조

수 있고, 이때 초음파가 가장 효과적으로 음향광학 매질로 전달된다. Simulation code는 Borland사의 C compiler를 이용하여 작성하였다.

AOM의 일반적 구조는 그림 2와 같다.

주어진 carrier frequency 혹은 center frequency f_c 에 대한 acoustic power의 transducer loss를 얻기 위해 몇 가지 parameter가 정의된다. 우선 첫 번째 parameter로 각 layer에 대한 mechanical impedance(acoustic impedance)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Z_0 &= A \rho V, & Z_{0n} &= A \rho_n V_n \quad n = 1, 2, 3, 4 \\ Z_{0m} &= A \rho_m V_m, & Z_{0b} &= A \rho_b V_b \end{aligned} \quad (2.1)$$

A 는 transducer top electrode의 넓이다. $\rho, \rho_n, \rho_m, \rho_b$ 와 V, V_n, V_m, V_b 는 각 layer의 밀도와 그 layer내에서 초음파의 속도이다. k 와 C_0 는 transducer로 사용되는 물질의 electromechanical coupling coefficient와 clamped capacitance이다. 두 번째 정의되는 parameter는 piezoelectric layer의 half wave frequency이다.

$$f_0 = \frac{V}{2l} \quad (2.2)$$

Code simulation에 의해 f_0 값을 얻게 되면 이에 맞게 piezoelectric transducer 두께 l 을 가공한다.

f_0 는 carrier frequency(center frequency) f_c 보다 조금 큰 값을 가지게 되는데 이는 piezoelectric transducer가 deposition layer들로 인해 독립적으로 자유진동 할 때의 주파수 보다 조금 더 큰 주파수를 가지기 때문이다. 따라서 AOM 설계 및 제작시 deposition layer가 어떻게 이루어지느냐에 따라서 같은 carrier frequency라도 f_0 는 조금씩 달라질 수 있다. 세 번째 parameter는 relative thickness로 다음과 같이 정의된다.

$$t_n = \frac{2f_0}{V_n} l_n \quad (2.3)$$

마지막 parameter는 각 layer에서의 phase shift이다.

$$\gamma = \pi \frac{f}{f_0}, \quad \gamma_n = \pi \frac{f}{f_{0n}} \quad (2.4)$$

이 parameter들을 이용하면 piezoelectric layer와 각 deposition layer는 각각 하나의 transmission matrix로 표현할 수 있다.

$$[A_0] = \frac{1}{\phi} \begin{bmatrix} 1 & j\phi_2/\omega C_0 \\ j\omega C_0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\frac{1}{S} \begin{bmatrix} \cos \gamma + j z_b \sin \gamma & Z_0(z_b \cos \gamma + j \sin \gamma) \\ j \sin \gamma/Z_0 & 2(\cos \gamma - 1) + j z_b \sin \gamma \end{bmatrix}$$

$$S = \cos \gamma - 1 + j z_b \sin \gamma, \quad z_b = \frac{Z_b}{Z_0} \quad (2.5)$$

$$Z_b = j Z_{01} \tan \gamma_1, \quad \phi^2 = \frac{Z_0 \omega_0 C_0 k^2}{\pi}$$

$$[A_n] = \begin{bmatrix} \cos \gamma_n & j Z_{0n} \sin \gamma_n \\ j \frac{\sin \gamma_n}{Z_{0n}} & \cos \gamma_n \end{bmatrix} \quad n = 2, 3, 4 \quad (2.6)$$

위 식에서 A_0 는 piezoelectric layer를, A_n 은 각 deposition layer들을 나타낸다. Total transmission matrix는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} [A_{tot}] &= \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = [A^{(m)}] \times [A_0] \times [A_2] \times [A_3] \times [A_4], \\ [A^{(m)}] &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/j \omega L & 1 \end{bmatrix}, \quad \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C_0} \end{aligned} \quad (2.7)$$

$A^{(m)}$ 은 구동회로와 AO device사이의 matching network를 나타내는 행렬이다. 이들 transmission matrix들을 이용하여 electric parameter와 acoustic parameter 사이의 관계를 표현할 수 있다(그림 3).

E_s 와 R_s 는 구동회로의 기전력과 내부저항이며 E 는 terminal voltage, I 는 terminal current, F 는 terminal surface force, U 는 terminal surface particle velocity이다.

영상신호를 실은 구동회로의 electrical signal과 이 signal에 따라 동작하는 AOM의 mechanical signal 사이의 관계는 다음의 행렬식으로 정리된다.

$$\begin{bmatrix} E \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F \\ U \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$F \equiv Z_{0m} U, \quad a \equiv A Z_{0m} + B, \quad b \equiv C Z_{0m} + D$$

Transducer의 각 단에서 power를 나타내면 다음과 같다.

$$P_s = (E_s)^2/4R_s \quad (2.9)$$

$$P_t = E^2 \text{Re}(a/b) \quad (2.10)$$

$$P_m = F^2/Z_{0m} \quad (2.11)$$

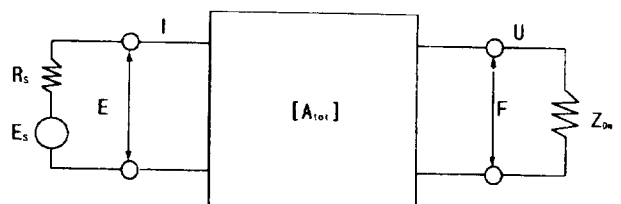


그림 3. AO device matrix network representation

식 (2.9)는 구동회로가 load에 전달하는 최대 power(source power)이고, 식 (2.10)은 transducer로 들어가는 실제 power (transmission power)이며, 식 (2.11)은 음향광학 매질로 들어가는 power(useful acoustic power)이다.

구동회로에서 발생한 power는 impedance 등의 mismatch로 인해 모두 transducer로 전달되지 못한다. 여기서 발생하는 손실을 mismatch loss라 하며, 식 (2.9)와 (2.10)을 이용해 다음과 같이 나타낸다.

$$ML = -10 \log \frac{P_t}{P_s} \quad (2.12)$$

Transmission power가 모두 음향광학 매질로 들어가지 못하고 일부만이 흡수됨에 따라 일어나는 손실을 inner conversion loss라 하며, 식 (2.10) 과 (2.11)로 표현할 수 있다.

$$CL = -10 \log \frac{P_m}{P_t} \quad (2.13)$$

결국 transducer에서 발생하는 총 손실은 다음과 같다.

$$TL = ML + CL = -10 \log \frac{P_m}{P_s} = -10 \log \frac{4R_s Z_{0m}}{|a + R_s b|^2} \quad (2.14)$$

위의 수식들을 바탕으로 주파수 변화에 따른 transducer loss

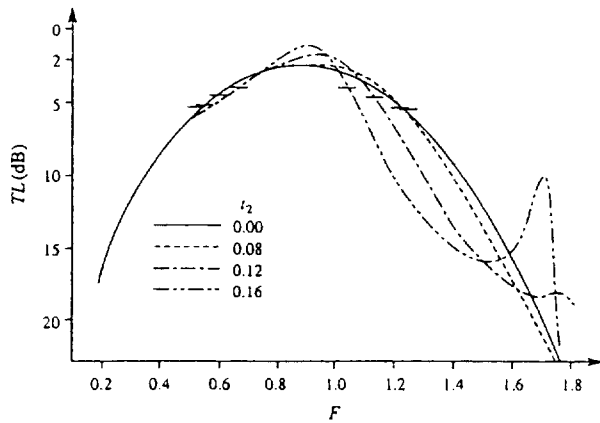


그림 4. Transducer loss-참고문헌¹⁾

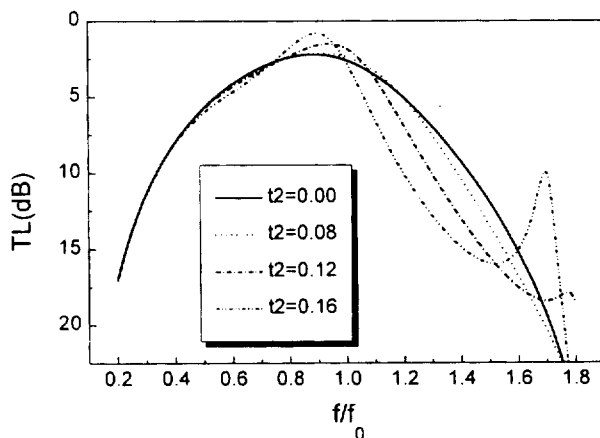


그림 5. Transducer loss-simulation 결과

를 simulation해보면 우리가 원하는 carrier frequency에서 power 손실이 최소가 될 수 있도록 transducer를 설계할 수 있다.

위에서 언급한 이론적 내용을 바탕으로 simulation code를 작성하였고 작성된 simulation code의 신뢰성을 확보하기 위해 참고문헌³⁾의 structure parameter를 이용하여 simulation하였다. 그림 4와 그림 5에서 참고문헌³⁾과 참고문헌 structure parameter를 동일하게 입력한 simulation결과가 같음을 알 수 있다. 각각의 그래프 상에서 transducer loss 곡선들이 변화되는 이유는 deposition layer의 변화에 의한 것이다. 즉 하나의 carrier frequency에 맞추어 AOM을 만들더라도 deposition layer들에 따라 acoustic power의 효율과 bandwidth 등이 다르게 나올 수 있다.

3. Acousto optic modulator 제작 및 특성평가

실험에 사용된 음향광학 매질은 TeO₂로 [001]방향이 초음파의 진행방향이 되게 가공하였다. Transducer로는 36° Y cut LiNbO₃를 사용하였다. 실험에 사용된 carrier frequency는 144 MHz이고 simulation에 의해 계산된 최적의 structure parameter는 표 1과 같다.

표 1과 같은 구조로 제작이 완료된 AOM은 50 Ω으로 impedance matching을 한다. 이는 구동회로의 내부저항 R_s를 50 Ω으로 제작하였기 때문이다. Impedance는 실수부와 허수부의 합으로 이루어지는데 허수부가 존재하면 AOM 구동시 power loss가 생긴다. 따라서 impedance matching은 허수부를 0 Ω에 최대한 가깝게 맞추고 실수부는 50 Ω에 맞춘다. 그림 6은 impedance matching data로 AOM의 구동 주파수 f_c=144 MHz에서 impedance의 실수부는 49.4 Ω, 허수부는 -0.842 Ω이다.

표 1. AOM structure parameter data

Top electrode (Au)	4997Å
Piezoelectric layer (LiNbO ₃)	20.2 μm
Electrode layer (Ag)	3204Å
Bonding layer (In)	7590Å
Electrode layer (Ag)	3204Å

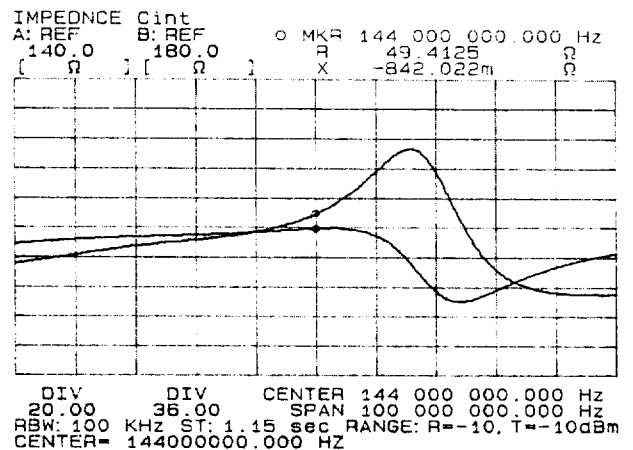


그림 5. Transducer loss-simulation 결과

AOM이 설계값에 맞게 제작되었는가를 AOM 회절효율 측정을 통해 검증하였다. 회절효율 η^3 는 다음과 같다.

$$\eta = \sin^2 \left\{ \frac{\pi}{\lambda_0 \cos \theta} \left[\frac{M_2 L}{2H} P_m \right]^{1/2} \right\} \quad (3.1)$$

λ_0 는 사용 레이저 파장, θ 는 birefringent Bragg diffraction angle, M_2 는 음향광학 매질의 figure of merit이다. L과 H는 top electrode의 길이와 폭이다. 식 (3.1)에서 acoustic power P_m 은 회절효율 η 에 대한 식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta = \sin^2 C P_m^{1/2}$$

$$\text{where } C \equiv \frac{\pi}{\lambda_0 \cos \theta} \left[\frac{M_2 L}{2H} \right]^{1/2} \quad (3.2)$$

이 식은 P_m 에 대해 정리할 수 있다.

$$P_m = \left\{ \frac{\sin^{-1} \eta^{1/2}}{C} \right\}^2 \quad (3.3)$$

식 (3.3)을 식 (2.14)에 대입 정리하면 다음과 같다.

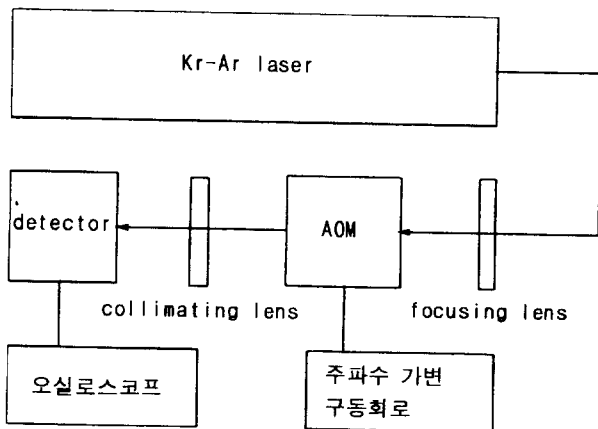


그림 7. Transducer loss 측정 실험 장치도

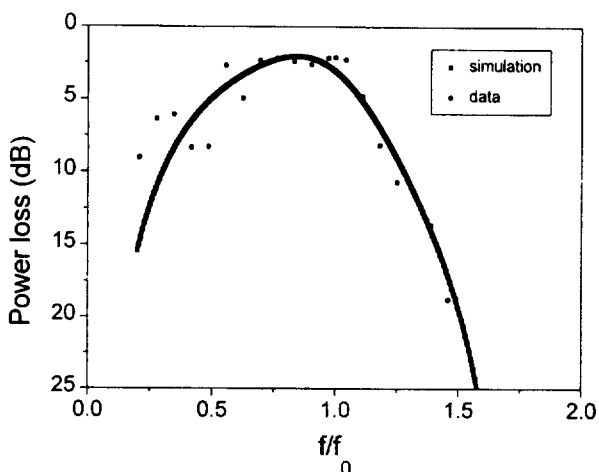


그림 8. 제작된 AOM transducer loss 실험값

$$TL = -10 \log(\sin^{-1} \eta^{1/2}) + 10 \log P_s + 20 \log C \quad (3.4)$$

식 (3.4)를 통해 회절효율 측정으로부터 acoustic power loss를 간접적으로 측정할 수 있음을 알 수 있다. 우변의 마지막 두 항은 상수로 고정 할 수 있으므로 실험값과 계산값의 fitting parameter로 쓸 수 있다. 그림 7의 실험 장치를 이용하여 여러 주파수에서 회절효율을 측정한 후 simulation 값과 비교한 결과를 그림 8에 나타내었다. 이러한 과정을 통하여 최적화된 AOM 설계가 가능하며 제작된 AOM이 설계값과 일치하는가를 알 수 있다.

Transducer 최적화 설계를 통해 제작된 AOM을 LPD system에 실장한 후 변조된 광신호의 선형성을 측정하였다. 이는 주어진 영상신호에 대해 변조된 광신호의 응답정도를 측정하는 것이다. 선형성이 제대로 확보되면 영상신호에 대한 화상의 왜곡이 적어진다. 10단계의 밝기를 지니는 영상신호를 구동회로에 입력한 후 AOM에서 변조된 출력 광신호를 photodiode를 이용하여 측정하였다. 9단계의 밝기를 측정할 수 있었다. 이 선형성은 AOM 구동회로에서도 요구된다. 구동회로는 영상신호를 진폭변조(Amplitude Modulation) 방법을 이용하여 carrier frequency에 실는 방법을 사용하였다. 선형성을 보기 위해 영상신호로 삼각파형을 입력한 후 변조되어 출력되는 신호와 비교하였다. 그림 9, 그림 10은 AOM 모듈 및 구동회로의 선형성 측정결과이다.

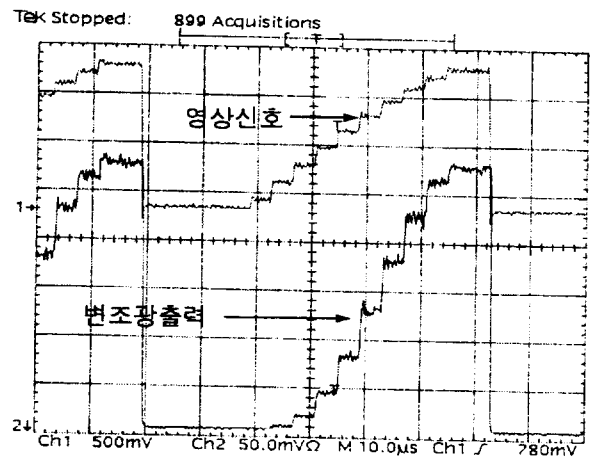


그림 9. AOM 선형성 측정 결과

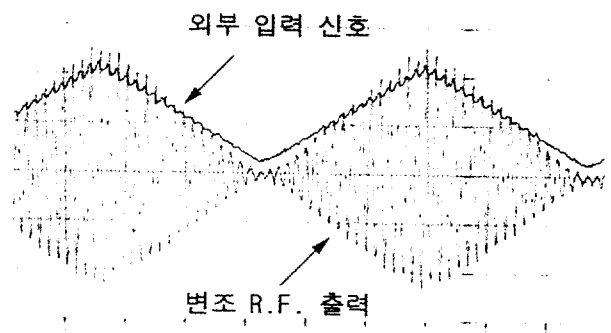


그림 10. AOM 구동회로 선형성 측정 결과

제작된 AOM은 최대 회절효율 85%, rise time 41.5ns의 성능을 지닌다.

4. 결 론

Full color의 대형화면을 구현하는 laser projection display system에서 광변조를 위한 acousto optic modulator를 제작하여 특성을 평가해보았다. AOM 제작시 초음파를 발생시키는 transducer설계를 위해 simulation code를 작성하였다. 이 code simulation을 통해 초음파가 가장 효과적으로 음향광학 매질로 전달되게 transducer를 설계하였다. 제작된 AOM이 계산된 설계값에 맞게 제작되었는가를 검증하기 위해 주파수에 대한 회절효율 변화를 측정하여 설계값과 비교 검증하였다.

LPD system에서 레이저 광원이 system에 사용된 광학계들을 통과한 후 최종 광효율^[5] 50%를 얻기 위한 AOM은 회절효율은 80%이상이며, 5 MHz의 영상신호를 처리하기 위해서

rise time은 50ns이하의 성능을 지녀야 한다. Transducer 최적화 설계를 통해 제작된 AOM은 최대 회절효율 85%, rise time 41.5 ns로 LPD system 요구사항을 만족시킨다.

참고문헌

- [1] A. Yariv, *Quantum Electronics*(John Wiley & Sons, Singapore 1988) chapter 14
- [2] 홍성수 외 4, 1996 광정보처리학술발표회 논문집, pp.70~74 (1996).
- [3] Jieping Xu, *Acousto-Optic Devices : Principles, Design, and Applications*(John Wiley & Sons, New York, 1992) chapter 3
- [4] E. I. Gordon, *Proceedings of the IEEE*, Vol.54, pp.1391~1401 (1966).
- [5] J. Lee et al, *SID 97 digest*, Vol.28, pp.631~634 (1997).

Fabrication of transducer optimized acousto optic modulator for laser projection display

Seung Nam Cha, Hang Woo Lee, Yong Hoon Kim and Young Mo Hwang
Samsung Advanced Institute of Technology,
P.O. Box 111, Suwon 440-600, Korea

(Received : May 28, 1997)

Laser projection display is a full color display system for large area. In this system, laser beams are modulated at acousto optic modulators(AOM) according to the video signal. AOM consists of a TeO₂ crystal and a LiNbO₃ transducer. We calculated the acoustic wave propagating from transducer to acousto optic media and made AOM by the calculated results. We compared calculated results with fabricated AOM by measuring modulation efficiency at various frequency. The modulation efficiency of AOM is 85% at the carrier frequency of 144MHz and the rise time is 41.5 ns.