

論 文
36~12~8

니트로벤젠을 이용한 레이저 PT의 특성 연구

Characteristic of Nitrobenzene Laser Potential Transformer

金 逸 中*·李 成 圭*·韓 民 九**
 (Il-Jung Kim, Seong-Kyu Lee, Min-Koo Han)

ABSTRACT

A laser potential transformer(PT) has been developed and characterized to measure the voltages using electro-optic Kerr effect. Laser PT utilizing Kerr cell successfully measures applied voltages up to 3 KV. Experimental results show a good agreement with the theoretical values, Kerr constant of nitrobenzene is also measured and agrees very well with the published results. Applied voltages and modulated laser intensities are also characterized. (Jun 1)WE1

1. 서 론

전력 수요가 증가함에 따라 송전 전압이 초고압으로 상승되고 있어 전력 계통의 효율적인 운용을 위해서, 각종 계측과 정보의 검출 및 수집이 요구되고 있다. 초고압의 측정을 위하여, 종래의 전기적인 권선형 PT (potential transformer)는 절연이격 거리의 증가로 인하여 PT가 대형화 하게 되는 구조적인 문제가 생길 뿐 아니라, 전자 유도장애(EMI) 등의 기능상의 문제가 발생하기 때문에 광 계측을 이용한 방법이 연구 및 개발되고 있다.^{1), 2), 3)}

전기적인 계측이 아닌 광학적인 방법을 사용하는 레이저 PT는, 기존의 권선형 PT에 비해 비접촉으로 측정할 수 있다는 점과 전자 유도 장애(EMI)를 받지 않으며, 광 섬유로 정보 처리 및 장거리 정보 전송이 용이하다는 장점을 갖고 있다. 광 계측은 고전압 및 고전계의 측정⁴⁾ 뿐 아니라, 절연물 내의 불균일한 전계 강도의 측정⁵⁾ 및 유전체의 분극 현상 측정⁶⁾ 등에도 사용되고 있다.

본 연구에서는 Kerr 상수가 큰 니트로벤젠(C₆H₅NO₂)으로 레이저 PT를 설계 및 제작하고 3KV까지의 전압을 측정하여 그 결과를 분석, 검토함으로써 레이저를 이용한 전압 측정의 기틀을 확립하였다.

2. 레이저 PT의 이론

2.1 레이저와 전계의 상호 작용

전계 중에 놓인 매질을 빛이 통과할 때, 그 매질의 광학적 성질이 전계에 의해 변화하는 현상을 전기 광학 효과라고 한다.

매질의 유전율이 전계에 따라 변화할 때 유전율 ϵ 은 식 (1)로 표시가 된다.^{5), 6)}

$$\epsilon = \epsilon_0 + \alpha E + \beta E^2 + \dots \quad (1)$$

여기서, ϵ_0 는 진공 유전율이고 α 및 β 는 매질의 고유 상수이며 E는 전계를 나타낸다. 파장이 짧은 광 영역에서는 굴절율과 유전율이 $n = \epsilon^{1/2}$ (ϵ_r 은 비유전율)의 관계가 있으므로⁷⁾, 굴절율 n은 식 (2)로 나타난다.

$$n = n_0 + aE + bE^2 + \dots \quad (2)$$

여기서 a를 Pockels 상수, b를 Kerr 상수라고 한다.

*正 會 員 : 서울대 大學院 電氣工學科 碩士課程
 **正 會 員 : 서울대 工大 電氣工學科 助教授

接受日字 : 1987年 8月 4日
 1次修正 : 1987年 9月 22日

전계의 일차 항 aE 에 의해 주어지는 효과를 Pockels 효과라 하고, 전계의 이차 항 bE^2 에 의해 주어지는 효과를 Kerr 효과라고 한다.

2.2 Kerr 효과

전계중에 놓인 물질에 직선 편광된 빛을 전계방향에 수직하게 통과시켜, 그 편광방향을 전계 방향에 대해 45°로 하면, 투과광에 생기는 전계에 수직인 방향과 수평한 방향의 굴절률 성분의 위상차 $\Delta\phi$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \frac{2\pi L}{\lambda} (n_h - n_v) \\ &= \frac{2\pi L}{\lambda} bE^2 \end{aligned} \tag{3}$$

여기서,

- L : 전극의 길이
- λ : 레이저의 파장
- n_h : 전계에 평행한 굴절률 성분
- n_v : 전계에 수직인 굴절률 성분
- E : 인가 전계
- b : Kerr 상수

이다.

그러므로, 투과광의 세기의 상대값 $I_r (= I_o/I_i)$ 은 다음과 같이 된다.*

$$\begin{aligned} I_r &= \text{SIN}^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \\ &= \text{SIN}^2\left(\frac{\pi L}{\lambda} bE^2\right) \\ &= \text{SIN}^2\left(\frac{\pi L}{\lambda} b\left(\frac{V}{d}\right)^2\right) \\ &= \text{SIN}^2\left(\frac{\pi}{2}\left(\frac{V}{V_\pi}\right)^2\right) \end{aligned} \tag{4}$$

$$V_\pi = \left(\frac{\lambda d^2}{2Lb}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{5}$$

(d : 전극간거리 V : 인가 전압)

식(4)에서 최초로 $\pi/2$ 의 위상차를 주는 즉, 투과광의 세기 I_r 이 '1'이 되는 전압을 반파장 전압 V_π 라고 하며 식 (5)에 이를 나타내었다. 이 반파장 전압은 매질의 고유한 성질인 Kerr 상수 b와 전극의 형태에 따라 결정되는 Kerr cell의 고유한 값으로 Cell 상수라고도 한다.

위의 식 (4)에서 볼 수 있듯이, 인가되는 전압이 변하면, 그에 따라 광의 위상이 변하여 출력광의 세기가 변화함을 알 수 있다. 즉, 인가 전압 V가 없으면 ($V=0$), 출력광의 세기는 없고, 반파장 전압 V_π ($V=V_\pi$)가 되면 최초로 광의 세기가 최대로 된다. 이 관계를 그림 1에 나타내었다.

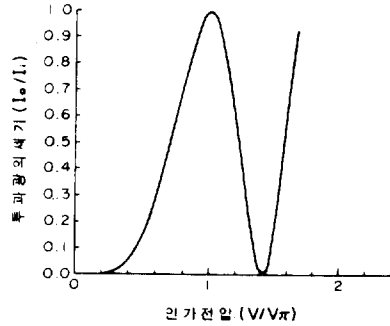


그림 1. 광의 세기(I)와 인가 전압(V)의 이론 특성 곡선.

Fig. 1. Theoretical characteristic curve of laser intensity and applied voltage.

식 (4)를 인가되는 전압 V에 관해 다시 고쳐 쓰면 식 (6)과 같이 된다.

$$V = V_\pi \left(\frac{2}{\pi} \text{SIN}^{-1} (I_r)^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{6}$$

그러므로, 식 (6)으로부터 Kerr cell의 V_π 를 알고, Kerr cell을 통과해 나온 투과광의 세기 I_r 을 측정할 수 있으면, 인가 전압을 추정할 수 있다.

3. 실험

3.1 Kerr cell 제작

Kerr 효과를 갖는 매질로는 액체 및 고체 유전체가 있는데, KTN 등의 고체 유전체는 매우 고가이므로, 본 연구에서는 저렴한 가격의 액체 유전체 중 Kerr 상수가 가장 큰 니트로벤젠을 이용하여 Kerr cell을 제작하였다.

몇가지 유전체의 Kerr 상수들을 표 1에 나타내었다.*

표 1. Kerr 상수. ($\times 10^{-18}(\text{m/V})^2$)
Table 1. Kerr constants ($\times 10^{-18}(\text{m/V})^2$)

물	0.03
니트로벤젠	2.4 - 3.2
광유	-0.003
니트로톨루엔	1.4
클로로벤젠	0.11

니트로벤젠($C_6H_5NO_2$)의 순도가 낮으면 저항율이 감소되어서 순간적인 전압의 인가에 의하여 Joule heating이 발생하여 온도가 상승해서 불안정해진다. 니트로벤젠은 맹독성과 강한 용해성으로 인하여 제작상의 문제점들이 야기될 수 있다.

본 연구에서 사용한 니트로벤젠의 순도는 99.5%였으며, 전극으로는 알루미늄 평판을, 전극간 지지대로는 니트로벤젠에 녹지 않는 테프론을, 용기로는 고온에서도 잘 견디는 직경 8cm의 파이렉스 유리를 사용하였다. 또한 파이렉스 유리관의 양단도 테프론을 O-ring으로 제작하여, 볼트와 너트로 강하게 기계적으로 봉합하였다. 그림 2에 본 연구에서 제작한 Kerr cell의 제작도를 표시하였다. 여기서 전극의 길이 L 은 60cm, 전극간의 거리 d 는 5mm이다. 이렇게 설계한 이유는 전극의 길이를 길게 함으로써 식 (5)의 반파장 전압을 감소시켜 측정의 정확도를 향상시키고자 함이다. 메가옴 계기로 측정된 제작된 Kerr cell의 등가 저항은 $4 \times 10^7 \Omega \cdot cm$ 로 측정되었다.

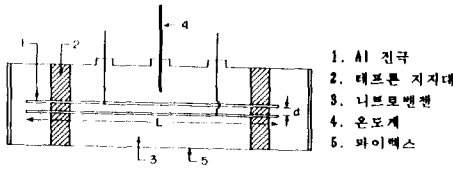


그림 2. Kerr cell의 구조
Fig. 2. Structure of Kerr cell

3.2 레이저 PT를 사용한 전압 측정

제작된 Kerr cell을 사용하여 전압을 측정하기 위하여 레이저 PT를 구성하였다. 그림 3에 전체적인 계통도를 표시하였다.

광원으로는 파장이 6300Å인 He-Ne 레이저를 사용하였고, 광 센서로는 Metrologic사의 He-Ne레이저용으로 조절된 센서를 사용하였다. 이 광 센서의 출력은 입력되는 광의 세기에 선형적으로 변하는 전압이어서, 출력 단자를 digital scope에 직접 접속시켰다.

Kerr cell 양단에서 polarizer와 analyzer를 수직으로 편광시키고, 레이저 광을 두 전극 사이로 통과시킨다. 전원에서 전압을 가해주지 않으면, polarizer와 analyzer가 수직으로 편광되어 있기 때문에, 투과광은 나타나지 않는다. 그러나, 전압이 인가되면, 전술했듯이 polarizer에서 직선 편광된 광의 전

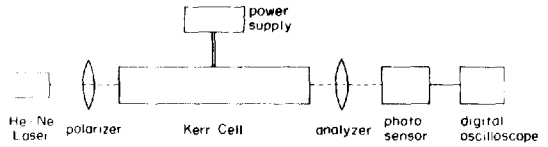


그림 3. 측정 계통도.
Fig. 3. Schematic diagram of measuring system

계에 수평한 방향과 수직인 방향의 굴절률이 변화하여 Kerr cell을 통과하는 동안 광의 위상차가 생겨 투과광이 나오게 된다.

또한, Kerr cell에 입사되는 광의 편광 축이 전극면과 45°의 각도를 이룰 때 최대 출력광이 나오므로, polarizer를 회전시켜 가며 45°각도의 편광축을 찾아 고정시켰다.

전극 양단에 0 - 3KV의 AC 전압을 인가하여, 출력광의 세기를 측정하여, 인가전압과 투과광의 세기 사이의 관계를 고찰하였다.

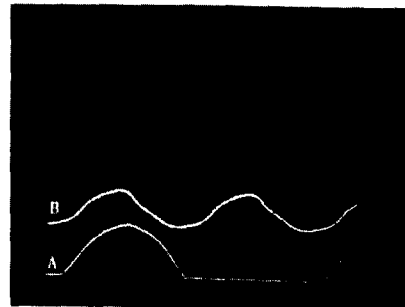


그림 4. 인가 전압 1000V
(a) 인가 전압(A) 과 광 출력의 세기(B)
(b) V-I (Intensity) 특성 곡선
Fig. 4. Applied voltages : 1000V
(a) Applied voltages(A) and laser intensity(B)
(b) V-I (Intensity) characteristic curve

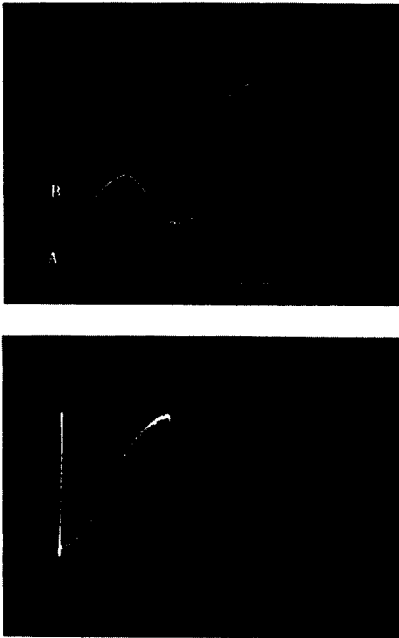


그림 5. 인가 전압 2000V

- (a) 인가 전압(A) 과 광 출력의 세기(B)
- (b) V-I (Intensity) 특성 곡선

Fig. 5. Applied voltages : 2000V

- (a) Applied voltages(A) and laser intensity (B)
- (B) V-I (Intensity) characteristic curve

4. 실험 결과 검토 및 결론

본 연구에서 제작한 레이저 PT의 반파장 전압 V_{π} 는 매 100V마다 전압을 인가하여서 최초로 최대 출력 광이 나오는 전압을 구한 결과 2KV로 측정되었고, 이 측정된 반파장 전압과 식 (5)로부터 역산한 결과 얻은 Kerr 상수 b는 약 $3.28 \times 10^{-10} (\text{m/V})^2$ 였다. 이는 문헌에 보고된⁶ 니트로벤젠의 Kerr 상수 $2.4-3.2 \times 10^{-10} (\text{m/V})^2$ 와 거의 일치함을 알 수 있었다.

또한, 전압을 0 - 3KV 까지 변화시키면서 인가하여, 광출력의 세기 및 그림 1 과 같은 특성 곡선들을 측정하였다. 그 중에서 대표적인 것을 그림 4 ~ 그림 6 에 나타내었다. 이 그림들에서, (a) 의 A는 각각 인가되는 전압을 나타내고 B는 그에따른 출력광의 세기를 나타내고 있다. A의 인가 전압은 비교를 위하여 AC 전압의 (+)부분만을 나타내었다. 한편, (b)는 그 때의 그림 1 과 같은 특성 곡선을 나

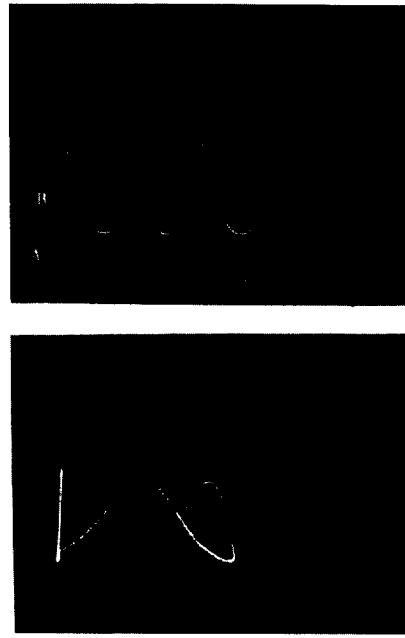


그림 6. 인가 전압 3000V

- (a) 인가 전압(A) 과 광 출력의 세기(B)
- (b) V-I (Intensity) 특성 곡선

Fig. 6. Applied voltages : 3000V

- (a) Applied voltages(A) and laser intensity (B)
- (b) V-I (Intensity) characteristic curve

타내는 것이다. 여기서 가로축은 인가전압을, 세로축은 광 출력의 세기를 나타내고 있다.

그림 7 에 인가 전압이 2KV ($V=V_{\pi}$) 일 때의, 이론값과 실험값을 같은 크기로 표시한 광의 세기(I) 와 인가 전압(V) 의 특성 곡선을 나타내었다. 여기서, A의 실선은 실험값(그림 5 참조)을, B의 파선은 이론값(식(4) 및 그림 1 참조)을 나타내고 있는데, 잘 일치함을 볼 수 있었다.

본 연구에서 얻어진 광의 세기와 인가 전압의 특성 곡선들은 교류 전압이 올라갈 때와 내려올 때의 광의 세기의 path가 다르게 나타났다. 이러한 현상은 여러 가지 저항과 콘덴서를 Kerr cell에 병렬로 연결하여 측정해도 같은 파형을 얻는 것으로 보아 Kerr cell 회로 상의 과도 현상은 아니라고 사료된다.

이러한 미시적 현상의 해석과 이온 교환 수지법에 의해 니트로벤젠의 저항율을 $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ 이상으로 증가시켜서 온도 상승에 따른 굴절을 변화를 억제시킨다면¹⁰, 레이저 PT의 실용화가 가능하다고 사

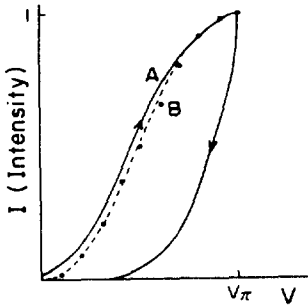


그림 7. 인가 전압 2000V 일 때의 이론 및 실험 곡선의 비교

Fig. 7. Comparison of the characteristic curve between theoretical values and experimental results at 2000V

(a) (a)(a)(a)(b)(b)(b)(b)(a)(a)(a)(a)

료된다.

감사의 말

김 일중 회원은 한국 전력 공사의 석사 논문 연구 장려비를 통하여 본 연구를 수행함을 알리며 관계자 제위께 감사드립니다.

REFERENCE

1) D.C.Wunsch, "Kerr Cell Measuring System for High Voltage Pulse," Rev. Sci. Inst., Vol.35, No.7, pp.816-820, July, 1964.

2) R.E.Hebner, R.A.Malewski, and E.C.Cassidy, "Optical Methods of Electrical Measurement at High Voltage Levels," Proc. of IEEE, Vol.65, No.11, pp.1524-1548, 1977.

3) E.C.Cassidy et. al., "Kerr Effect Studies of an Insulating Liquid Under Varied High-Voltage Conditions," IEEE Trans. Elec. Insul., Vol.EI-9, No.2, pp. 43-56, 1974.

4) M.Zahn, Y.Ohki, D.B.Fenneman, R.J.Gripshover, and V.Gehman, "Dielectric Properties of Water and Water / Ethylene Glycol Mixtures for Use in Pulsed Power System Design," Proc. of the IEEE, Vol.74, No.9, pp.1182-1221, 1986.

5) C.J.F.Botter and P.Bordwijk, Theory of Electric Polarization, Elsevier Scientific Publishing Company, 1980.

6) 栗原雅幸, "液體コア光ファイバのカー効果を用いる電壓測定法の基礎検討, 電力中央研究所 報告 研究報告 : 182008, 1982.

7) Grant R.Fowles, Introduction to Modern Optics, Holt, Rinehart and Winston, INC. 1975.

8) A.Chelkowski, Dielectric Physics. Elsevier Scientific publishing company. 1980.

9) M.J.Aroney, M.R.Battaglia, R.Ferfaglia, D.Millar, and R.K.Pierens, "The Kerr Constant of Water and Other Pure Liquids at 633 nm," J. Chem. Soc. Faraday Trans., Vol.72, pp.724-726, 1976.

10) A.W.Bright, B.Makin, and A.J.Pearnain, "Field Distribution in Nitrobenzene Using the Kerr Effect," Brit. J. Appl. Phys., Vol.2, pp.447-451, 1969.