

## 레이놀드 수에 따른 색소 젯트(jet)의 특성 및 색소레이저의 출력변화

김성호 · 고도경 · 이종민

한국원자력연구소

임 권 · 조재홍 · 장 수

한남대학교 이과대학 물리학과

(1994년 4월 18일 받음)

레이놀드 수(Reynold's number)에 따른 색소 젯트의 공간적인 편평도를 마이켈슨 간섭계를 이용하여 분석하였다. 레이놀드 수 600(유속 12 m/s)일 때 색소 젯트의 편평도는 최적 조건을 보였다. 이러한 색소 젯트의 최적 조건하에서, 증펍 펄프 Littman형 색소레이저 빔은 펄프 에너지 0.5~1.0 mJ/pulse의 범위에서 단일 종모우드로 발진되었다. 이 때의 선폭( $\Delta\nu$ )은 470 MHz이었고, 변환 효율과 빔 발산각은 각각 4.7%, 3 mrad이었다.

### I. 서 론

고출력, 고반복율 단일 종모우드 색소레이저<sup>[1]</sup>를 발진시키기 위하여 펌프광원을 고반복율의 광원으로 사용하면 색소용액의 순환속도를 높여주어야 하는데, 고속으로 순환시에 색소 셀(cell)표면의 마찰저항과 고출력의 펌프에너지로 열이 발생하게 되어 색소가 타거나 색소 셀의 내부 표면에 달라 붙기도한다. 이런 문제의 개선 방법으로써 연속발진 색소레이저에서 사용하는 노즐을 이용하여 색소용액을 분사시키는 경우에는 색소용액이 공기중에 고속으로 분사되므로 균일한 두께로 안정되기가 어렵다.

Hans-Peter Härril<sup>[2]</sup>는 이러한 색소 젯트의 두께를 균일하게 형성시키기 위한 노즐의 재질 및 크기와 구조에 따른 라미나(laminar) 유체의 유체역학적 형성 조건을 언급하였으며, 최근에는 Yoichio Maruyama<sup>[3]</sup>는 색소 젯트를 이용하여 구리증기 레이저로 펌프된 단일종모우드 색소레이저에 대한 빔특성을 보고하였다. 그러나, 단일 종모우드 레이저가 발진할 때의 색소 젯트의 유체 특성<sup>[4]</sup>과 광학적 편평도를 갖는 색소 젯트의 면적들과 레이놀드 수와의 상관관계에 대한 조건은 언급되지 않았다.

본 논문에서는 노즐을 이용하여 색소용액의 유속변화로 인한 레이놀드 수의 변화에 따른 색소 젯트의 편평

도를 마이켈슨 간섭계의 간섭무늬로 분석하였고, 레이저가 발진할 때 단일 종모우드로 발진가능한 색소 젯트의 공진위치에 대한 범위인 유효공진면적의 변화를 조사함과 동시에 Littman형 공진기<sup>[5,6]</sup>로부터 발진된 레이저의 단일 종모우드 발진 여부 및 출력 특성을 조사하였다.

### II. 실 험

색소용액이 노즐을 통하여 공진기안에서 분사되는 모양은 노즐의 기하학적인 모양과 색소용액의 순환속도 및 색소를 용해시키는 용매의 성질에 따라서 결정된다. 이와 같은 색소용액의 분사모양을 유체역학적으로 해석하면, 레이놀드 수(Reynold's number:  $Re$ )라는 무차원 상수로서 유체의 균일성을 표현하며 이 상수는 다음과 같이 정의된다.<sup>[7]</sup>

$$Re = \frac{2\rho \bar{v}L}{\eta} \quad (1)$$

(1)식에서  $\rho$ ,  $\eta$ ,  $\bar{v}$ ,  $L$ 는 분사되는 유체의 밀도, 점성도, 평균속도, 노즐의 두께이다. 대개의 색소레이저 발진기 부분의 색소 농도는 약  $10^{-3}$  mole/l 이하다 되도록 사용하므로 용매의 부피에 비하여 색소의 부피는 매우 작다. 따라서, 분사유체의 밀도와 점성도는 용매의 성질에 의해서 좌우된다. 유체가 얇고 편평한 모양으로 분

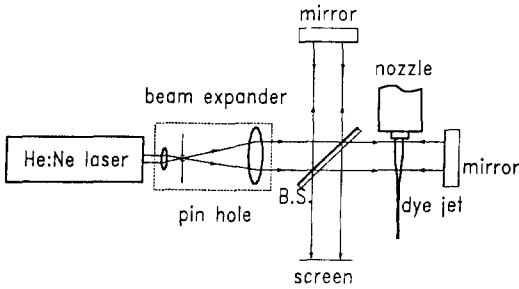


그림 1. 마이켈슨 간섭계.

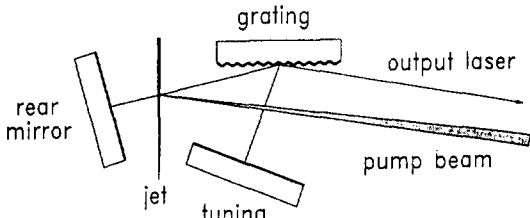


그림 2. 공진기 구조.

사되며 유체내부에서 서로 교란이 없는 상태를 라미나 (larminar) 유체라고 하고, 서로 교란이 있는 상태를 교란 (turbulence) 유체라고 한다. 유체의 교란이 발생하는 교란 임계 레이놀드 수(Rec)는 노즐의 기하학적인 형태에 따라서 각각 다르다.

본 실험에서 사용된 노즐(Radiant Dye Chemie. Inc., RDSN05)의 형태는 파이프 형태와 평면경계면 형태의 복합형으로써, 두께는 0.5 mm이고 너비는 5 mm이다. 이 노즐에서 분사되는 유체가 라미나 유체상태로 분사되려면, 레이놀드 수는 400에서 600 사이의 범위가 적당하다고 조사된 바가 있다.<sup>[37]</sup> 색소 젯트의 용매로는 에틸렌글리콜에 색소 Rhodamine-6G를 녹여서 사용하였다. 에틸렌글리콜의 점성도는 상온 22°C 에서 약 20 C.P.이다. 색소 젯트의 온도에 따른 점성도와 밀도의 변화를 막기 위하여 색소용액이 순환되는 색소용기의 냉각수 파이프에 물을 순환시켜서 온도를 22°C 로 유지하였다. 색소 젯트의 편평도를 분석하기 위하여 그림 1와 같이 마이켈슨 간섭계를 구성하였다. 간섭광원으로써 주파수 안정화된 He-Ne 레이저를 광속 확대기로 확대하여 간섭광원의 빔 직경을 15 mm인 평행광으로 만들어 사용하였으며, 색소 젯트의 두께차이에 의한 간섭무늬를 조사하였다.

한편 본연구에서는 색소 젯트를 이용한 색소레이저를 제작하여 그 출력특성을 조사하였는데, 공진기는 Litt-

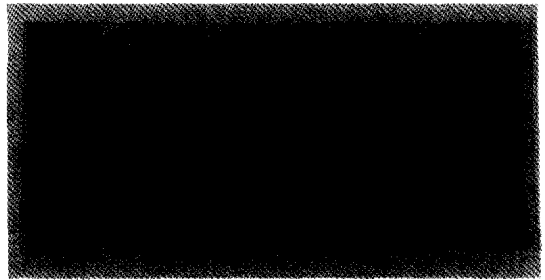


그림 3. 레이놀드 수에 따른 색소 젯트의 분사모습. (a)  $Re=250$  (b)  $Re=350$  (c)  $Re=500$  (d)  $Re=600$  (e)  $Re=700$  .

man 형태이며 그 구조는 그림 2와 같다. 공진기 내부의 회절격자는 groove수가 2400 line/mm인 홀로그래픽 반사회절격자(American Holographic제품)을 사용하였고 후면경과 파장가변용 반사경은 색소 Rhodamine-6G의 파장가변영역인 560~620 nm에서 반사도가 1인 것을 사용하였다. 그리고, 색소레이저의 공진기 길이는 약 9 cm 정도이다. 펌프광원으로는 펄스폭 20 ns, 파장 532 nm인 Nd:YAG 레이저(Continum, model: NY81C-10)의 제 2 조화파를 사용하였으며, 펄스 반복율은 10 Hz이었다. 색소레이저의 출력을 자우스펙트럼 영역이 10 GHz인 에탈론에 통과시켜서, 에탈론 간섭무늬를 채널 수 2048인 1차원 배열 CCD로 촬영하여 종모우드 형태를 관측하였다. 펌프 광과 색소레이저의 에너지는 에너지 미터 (Molelectron, model: J3-09)를 사용하여 측정하였다.

### III. 결과 및 분석

Littman형 공진기 내에서 분사되는 색소 젯트의 레이놀드 수에 따른 유체모양을 찍은 사진은 그림 3과 같다. 레이놀드 수가 커짐에 따라서 색소 젯트의 두께가 얇고 균일한 두께를 갖는 면적이 점차 넓어짐을 보이고 있다. 색소 젯트가 공기중에 분사된 후 에틸렌글리콜의 표면장력 때문에 색소 유체가 다시 모이는 위치는 레이놀드 수에 따라서 점차 아래로 이동하였다. 레이놀드 수 700인 속도 14 m/s에서는 편평한 면적이 가장 넓었다. 그러나, 그림 3에서는 뚜렷이 나타나지는 않지만 색소 젯트에 공기방울이 관측되었다. 이것은 노즐로부터 분사된 색소 젯트가 색소 저장용기에 떨어질 때 색소 젯트의 분사 속도가 크기 때문에 공기방울들이 많이 생성되었고, 이 공기방울들이 필터를 통과할 때 모두 제거되지 못하고 순환하기 때문이다. 따라서, 이 레이놀드 수에서는 색소 젯트를 레이저 이득매질로 사용하기에

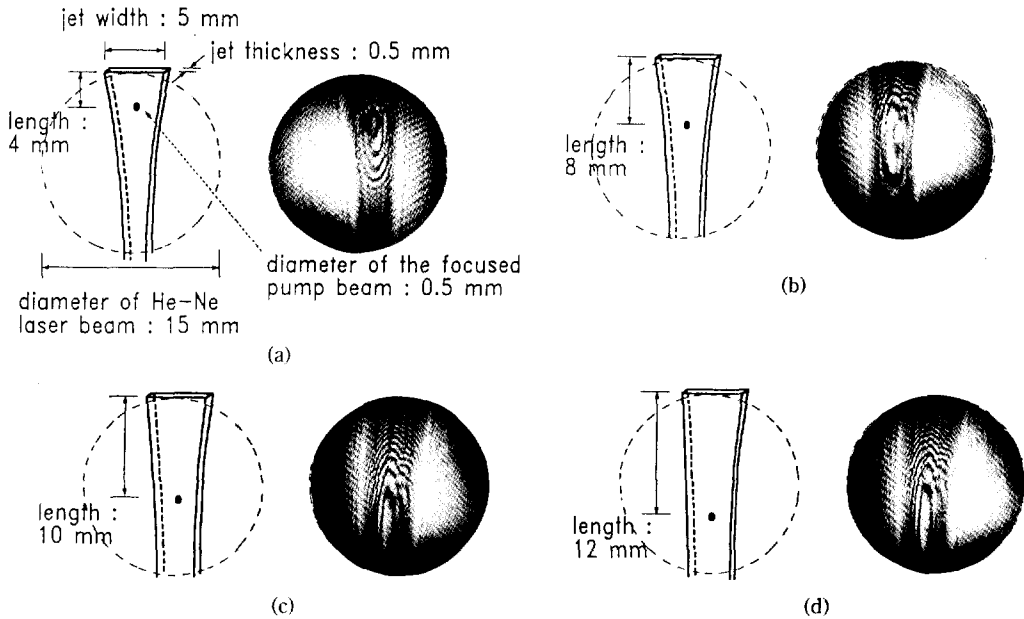


그림 4. 레이놀드 수에 따른 마이켈슨 간섭무늬와 색소 젯트에 펌핑하는 위치.  
 (a)  $Re=25$  (b)  $Re=350$  (c)  $Re=500$  (d)  $Re=600$  .

불가능하여, 속도를 5 m/s에서 12 m/s까지(레이놀드 수 범위: 250~600) 변화시키면서 유체의 속도에 따른 간섭무늬를 관측하여 유체의 편평도를 조사하였다.

노즐로부터 분사가 시작되는 시작부분의 색소 젯트의 너비는 5 mm이고 간섭광원의 직경은 15 mm이다. 이렇게 함으로써, 색소 젯트가 형성되는 얇은 막의 전부분에 대한 두께의 균일성을 조사할 수 있었다. 간섭무늬를 관측한 결과는 그림 4와 같고 (a)는  $Re=250$ , (b)는  $Re=350$ , (c)는  $Re=500$ , (d)는  $Re=600$ 일 때의 간섭무늬 사진과 각각의 레이놀드 수에서 색소레이저의 발진시 색소 젯트에 펌핑하는 위치를 그려놓은 것이다. 간섭무늬에서 각각에 대하여 원형의 밝은 바탕은 간섭광원인 He-Ne 레이저가 색소 젯트를 경유하지 않고 마이켈슨 보강간섭된 부분이고 내부의 타원형의 무늬들은 색소 젯트를 경유하여 보강과 소멸간섭 때문에 생긴 무늬들이다. 밝고 어두운 줄무늬 사이의 실제 두께차이는  $\lambda/4$  정도가 됨을 알 수 있다.

레이놀드 수에 따라 분사된 색소 젯트의 전면적 중에서 가장 넓고 균일한 두께를 갖는 부분의 면적은 마이켈슨 간섭무늬와 실제 색소 젯트의 크기를 비교함으로써 알 수 있다. 이 결과, 레이놀드 수가 600일 때 색소 젯트의 편평도가 가장 좋았으며, 이 때의 마이켈슨 간섭무늬(그림 4의 d)에서 타원간섭 무늬들 중의 중심에 있는

밝은 무늬에 해당하는 색소 젯트의 실제 크기 즉,  $\lambda/4$  이내의 편평도를 유지하는 영역은 가로직경 0.8 mm, 세로직경 5 mm이다. 또한, 그림 4의 (a)와 그림 4의 (d)를 보면, 레이놀드 수 250인 속력 5 m/s에서 짙은 간섭무늬의 중심에 있는 타원형 간섭무늬가 레이놀드 수 600인 속력 12 m/s로 변화시키면 아래로 약 8 mm 정도 이동하였고, 그 크기도 커졌음을 알 수 있다. 각각의 레이놀드 수에 따른 간섭무늬를 비교하여 보면, 색소 젯트의 속도가 높아질수록 색소 젯트의 편평한 위치가 아래로 이동하고, 그 면적은 넓어지는 것을 볼 수 있다.

레이놀드 수 600에서, 간섭무늬의 중심(편평하고 균일한 두께를 유지하는 면적)에 해당하는 색소 젯트의 영역에 펌프광을 조사시켜 레이저를 발진시켰다. 펌프광원인 Nd:YAG 레이저의 빔 발산각은 0.45 mrad이고, 이를 초점거리 20 cm의 렌즈로 집속시켰을 때의 빔 직경은 다음의 식에서 구할 수 있다.<sup>[8]</sup>

$$\Delta x = f \cdot \Delta \theta \quad (2)$$

여기서,  $\Delta x$ ,  $f$ ,  $\Delta \theta$ 는 펌프광이 집속됐을 때의 빔 직경, 펌프광을 색소 젯트에 집속시키는 집속렌즈의 초점거리, 펌프광의 빔 발산각으로 초점거리에서 펌프광의 집속된 빔 직경은 약 0.1 mm로 계산되었다. 앞서 레이놀드 수 600일 때 색소 젯트의 균일한 부분의 가로직경이 0.8

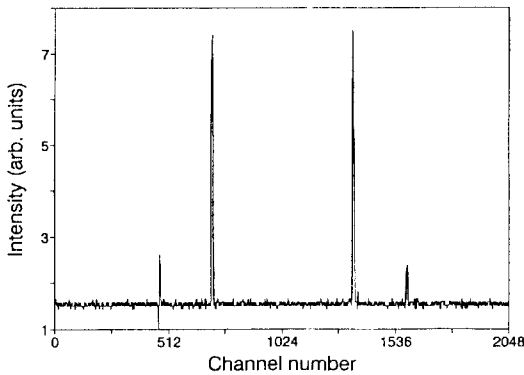


그림 5. 레이놀드 수 600에서 균일한 두께를 갖는 부분에 펌프하였을 때, 색소레이저의 단일 종모우드에 탈론 간섭무늬를 1차원 CCD를 이용하여 측정한 에탈론 간섭무늬.

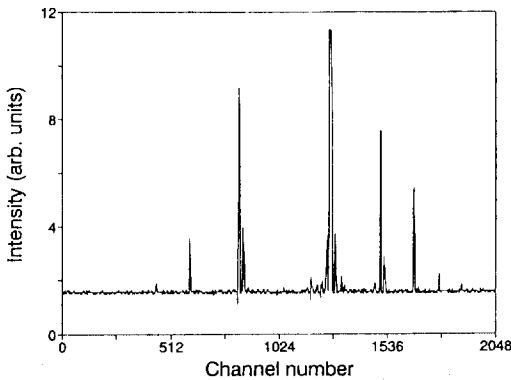


그림 6. 레이놀드 수 250에서 불균일한 두께를 갖는 색소 젯트에서의 색소레이저의 에탈론 간섭무늬.

mm임을 상기하면, 이는 펌핑영역 내에서 젯트의 편평도는  $\lambda/32$  이내임을 알 수 있다. 이 값은 T. W. Hänsch<sup>[9]</sup>가 실험한  $\lambda/8$  보다 더 좋은 조건으로서, 이 정도의 편평도이면 단일종모우드 발진에 문제가 없으리라 보고 실험을 행하였다.

간섭무늬의 분석에서 조사하였던 결과를 토대로 하여, 색소 젯트의 편평도가 가장 좋은 레이놀드수 600에서 그림 4의 (d)에 표시된 위치에 펌핑하여 색소레이저를 발진시키고, 이 레이저를 에탈론에 투과시켜 얻은 고리형의 에탈론 간섭무늬를 에탈론 간섭무늬의 중심축 1차원에 대하여 CCD로 간섭무늬의 공간적 세기를 측정하였으며 그 결과는 그림 5와 같다. 측정된 고리무늬의 중심에서 첫번째 고리무늬까지의 거리  $r_1$ , 두번째 고리무늬까지의 거리  $r_2$ , 첫번째 고리무늬 세기의 반전치폭  $\Delta r_1$ 과 측정에 사용한 에탈론의 두께  $d$ 를 이용하면 선폭

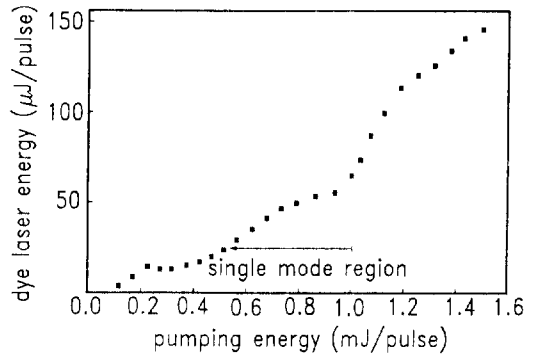


그림 7. 펌프에너지의 변화에 따른 색소레이저의 출력 변화.

$\Delta \bar{v}$ 는 다음 식과 같이 주어진다.

$$\Delta \bar{v} = \frac{1}{d} \frac{r_1 \Delta r_1}{(r_2^2 - r_1^2)} \quad (3)$$

실험에서 측정된 값을 (3)식에 대입한 결과 선폭은 470 MHz로 계산되었으며 공진기모우드 간격이 1.6 GHz임을 고려하면 단일 종모우드로 발진되었음을 알 수 있다. 그림 6은 레이놀드 수 600에서의 펌핑위치(그림 4의 d)를 바꾸지 않고 색소 젯트의 속력을 바꾸어 레이놀드 수 250(속력 5 m/s)인 경우에 색소레이저를 발진시키고 에탈론 간섭무늬를 측정된 결과이다. 이 때의 색소레이저의 종모우드는 다중모우드가 발진됨을 보여주고 있다. 이러한 이유로는 그림 4의 (d)에 표시한 펌프 광의 위치(마이켈슨 간섭무늬로부터 알 수 있듯이 레이놀드 수 600일 때의 균일한 두께를 갖는 색소 젯트의 위치)가 속도의 변화에 따라서 레이놀드 수 250일 때는 위로 이동하여 펌핑면적내에서 두께차이가 있는 색소 젯트로 변화했기 때문이다. 그러나, 레이놀드 수 250(그림 4의 a)에서 균일한 두께를 갖는 부분인 위치에 해당하는 색소 젯트(이 균일한 색소 젯트 면적의 직경은 0.3 mm 정도이고, 편평도는 약  $\lambda/12$ 임)에 펌핑할 경우에는, 단일 종모우드의 색소레이저를 발진시킬 수 있었다. 따라서, 레이놀드 수를 350과 500으로 변화시키면서 펌핑위치를 그림 4의 (b), (c)에 표시된 위치로 하여 레이저를 발진시키고 종모우드를 조사한 결과도 마찬가지로 단일 종모우드로 발진시킬 수 있었다. 즉, 색소 유체의 흐름은 구조를 썬에 의해서 강제적으로 구성시키는 색소 썬과 비교하여 볼 때, 색소 젯트에서는 단일 종모우드로 발진을 시키기 위하여는 레이놀드 수 변화에 따른 균일한 색소 젯트의 위치를 갖는 최적화된 위치에 펌프하여야 한다는 중요한 사실을 알 수 있다. 이상에서 볼 때, 펌핑위치의 조절과

각각의 편평도를 고려하면 레이놀드 수가 250에서 600 사이 어느 값에서도 단일 종모우드의 레이저 발진이 이루어짐을 알 수 있다. 그러나, 색소 젯트가 흔히 CW 또는 고반복율의 구리증기레이저와 같은 광원으로 펄핑될 때 사용되므로, 이 경우 색소 젯트의 속도가 빠르고 편평한 면적이 넓은 레이놀드 수 600일 때가 최적이라 볼 수 있다. 더욱이 라미나 유체는 레이놀드 수가 200에서 600 사이일 때라는 것을 참고로 할 때, 이값은 적정한 값이라 볼 수 있다.

그림 7은 레이놀드 수 600의 최적화된 위치에 펌프된 조건하에서 펄프광의 에너지를 변화시켜가면서 색소레이저의 출력에너지를 측정 한 값이다. 펄스당 펄프광의 에너지가 0.5~1.0 mJ/pulse에서 단일 종모우드를 발진시킬 수 있었는데, 이는 펄스당 펄프광의 에너지 0.1 mJ/pulse(펄프 광의 threshold)과 0.5 mJ/pulse 사이에서는 레이저 발진이 불안정하여 색소레이저 발진기로서 사용하기에 불가능하였고, 펄스당 펄프광의 에너지가 약 1 mJ/pulse 이상으로 높아지면 색소 이득매질의 이득률의 증가로 다른 종모우드들도 발진하기 때문이다. 펄스당 펄프광의 에너지 0.5 mJ/pulse에서 펄스당 레이저의 출력이 24  $\mu$ J/pulse으로서 변환 효율은 4.7%이었다.

#### IV. 결 론

색소레이저에 이용되는 색소 젯트의 유체분석을 간접 무늬 방법을 이용하여 분석하였다. 쉘 대신 고속류 색소 젯트를 사용할 때, 단일 종모우드 레이저를 발진시키기 위하여 색소 젯트의 유체형성에 대한 최적 조건을 조사하였다. 크기 5×0.5 mm인 색소 노즐로부터 분사되는

색소 젯트의 레이놀드 수 600에서 편평도가 가장 좋았으며, 이러한 조건에서 펄스당 펄프광의 에너지 0.5~1.0 mJ/pulse에서 단일 종모우드로 발진되었다. 이 결과는 구리증기 레이저와 같은 고출력, 고반복율인 광원으로 펄핑될때 안정된 단일 종모우드 레이저 빔을 발진시킬 수 있음을 예측할 수 있다. 또한, 이와 같은 라미나 유체의 형성을 위하여 변화시킬 수 있는 것은 속도뿐만 아니라, 색소 유체의 점성도 및 밀도와 노즐의 크기에 따라서 변화가 가능하므로, 속도를 변화시킬 수 없는 경우에도 다른 변수들을 조절하여 안정적인 색소레이저의 발진을 이룰 수 있을 것이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] S. Lavi, M. Amit, G. Bialolanker, E. Miron and L. A. Levin, *Appl. Opt.* **24**, 1905(1985).
- [2] H. H rri, S. Leutwyler and E. Schumacher, *Rev. Sci. Instrum.* **53**, 1855 (1982).
- [3] Yoichiro Maruyama, Masaaki Kato and Takashi Arisawa, *Jap. J. Appl. Phys.* **30**, L748 (1991).
- [4] S. Whitaker, *Introduction to Fluid Mechanics*, (Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1968).
- [5] K. Liu and M. G. Littman, *Opt. Lett.* **6**, 117 (1981).
- [6] M. G. Littman, *Appl. Opt.* **23**, 4465 (1984).
- [7] J. K. Vennard and R. L. Street, *Elementary Fluid Meachanics* (John Wiley & Sons. Inc., New York, 1976).
- [8] H. Kogelnick, *Bell Syst. Tech. J.* **44**, 455(1965).
- [9] T. W. Hänsch, *Appl. Opt.* **11**, 895 (1972).

### The Characteristics of Dye Jet and Dye Laser Output Depending on the Reynold's Number

Sung Ho Kim, Do-Kyeong Ko and Jongmin Lee  
*Laser Spectroscopy Lab., Korea Atomic Energy Research Institute,*  
*P.O. Box 105, Yusong, Taejon 305-600, Korea*

Gwon Lim, Jae Heung Jo and Soo Chang  
*Dept. of Physics, Hannam University, Taejon 300-791, Korea*

(Received: April 18, 1994)

The spatial flatness of dye jet depending on the Reynold's number has analyzed by using a Michelson interferometer. When the Reynold's number of dye jet was 600, the flatness of the flow was the best. Under this condition, the dye laser with Littman-type configuration has been operated in a single longitudinal mode at the pumping energy of 0.5~1.0 mJ/pulse. The conversion efficiency and beam divergence were 4.7% and 3 mrad, respectively.