

〈논 문〉 SAE NO. 953765

원통형 초크의 분류영역에서 맥동유동의 거동

Behaviour of Pulsating Flow in the Jetflow Region through Cylindrical Chokes

모 양 우,* 유 영 태,** 홍 성 삼,*** 위 광 한***
Y. W. Moh, Y. T. Yoo, S. S. Hong, K. H. Wee

ABSTRACT

Cylindrical chokes are used widely as components of hydraulic equipments. The dynamic characteristics between flowrate and pressure drop through the cylindrical chokes were discussed by the frequency characteristics of the chokes. It was assumed no pressure recovery occurred at the downstream neighborhood of the choke. The pulsating jetflow from outlet of cylindrical chokes shows very complex behaviours which are quite different from the steady jetflow but it is not clarified quantitatively. In order to utilize the chokes as a flowmeter, it is indispensable to discuss the estimation of the dynamics of pressure drop in the downstream jetflow region of cylindrical chokes. In this experimental study, the dynamic behaviours of the jetflow in the downstream region of cylindrical chokes are investigated precisely by using flow visualization. In the results of experimental study, it is clarified that the reattachment length depended on pressure wave is compared with it depended on velocity wave.

주요기술용어 : Pulsating flow(맥동유동), Cylindrical choke(원통형 초크), Jetflow region(분류영역), Collapse length(붕괴거리), Plane wave(평면파), Pressure wave(압력파), Retachment length(재부착거리), Density probability(밀도확률)

1. 서 론

유압 제어장치는 산업기계의 안정화 및 생산

합리화를 위한 자동조작 및 원격조작을 비롯하여 제어계통의 조작단에서 고정밀도으 운동을 얻는데 사용되며, 그 이용기술 또한 고도의 발전을 이룩하고 있다. 특히 자동차 구조가 복잡해지고 성능이 향상되어 가고 있으며, 자동차의 유압잭(hydraulic jack), door stopper, oil brake, 현가장치 등에 유압 제어장치가 응용되고 있으며, 산

* 정회원, 조선대학교 공과대학 기계공학과

** 조선대학교 공과대학 정밀기계공학과

*** 조선대학교 대학원 기계공학과

업현장의 증장비에서도 많은 유압 제어장치를 이용하고 있다.

유압 제어기에 있어서 원통형 초크는 저항요소로서 자주 이용되고 있는데, 그 유동특성이 정상유동일 경우에 대해서는 연구 발표가 있었으나 비정상유동일 경우에 대해서는 그 특성이 아직 명확하게 규명되지 않고 있다. 원통형 초크를 비정상유동인 경우의 유량측정에 응용할 때에는 압력차를 측정하기 위한 측정위치와 초크하류에서의 교축길이비에 따른 분류의 영향이 문제가 되고 있다. 정상유동과 진동유동이 합성된 맥동유동의 경우 초크의 상류와 하류의 초크 내경의 2배인 위치에서의 압력을 측정하여 압력과 유량과의 관계를 주파수에 따라 연구하였다¹⁾²⁾. 초크의 상류부분의 압력측정 위치에 대해서는 수치해석과 실험으로 충분히 검토되었으나³⁾, 초크의 하류부분에 있어서의 압력측정 위치와 유동의 동적 거동에 대해서는 연구가 충분하지 못하였다. 지금까지 정상유동에서의 교축부분을 통과한 분류가 상당한 거리를 지나서 다시 부착되는 현상이 연구되어졌다. 그러나 정상유동과 진동유동이 합성으로 이루어진 맥동유동의 경우에는 교축부분을 통과한 분류가 상당히 짧은 거리에서 관벽면에 도달할 것이지만 그 유동의 거동을 정량적으로 연구한 문헌은 별로 없었다.

본 연구에서는 원통형 초크의 교축부분을 통과한 유동의 분류영역에 있어서 압력파를 변수로한 식과 속도를 변수로한 식의 물리적 특성을 확인하고자 한다. 실험적인 방법으로는, 가시화 실험을 통하여 분류영역에서의 동적 거동과 주파수, 레이놀즈수에 따라 변화하는 분류의 재부착거리를 고찰하고자 한다. 또한, 교축길이비와 유량진폭비에 따른 분류붕괴거리와 분류 영역을 비교 검토하여 유량측정의 응용자료로 제공하고자 한다.

2. 이론 해석

정상유동과 진동유동의 합성으로 표시된 맥동유동이 원통형 초크를 통과할 때의 유동현상을 가시화 현상으로 고찰하기 위하여 압력파(pres-

sure wave)를 변수로 이용하였다. 맥동유동중 진동유동의 압력파(pressure wave)는 관로내의 유동이므로 평면파(plane wave)로 표시되며 다음과 같다.

$$P(x, t) = P_0 e^{i(kx - \omega t)} \quad (1)$$

위 식(1)에서 P_0 는 기본압력 진폭이며, T 를 주기로 하여 이것을 다시 정리하면 식(2)와 같다. 정맥유동중 지수함수로 표시된 진동유동의 파동함수에서 물리적 의미를 갖는 것은 실수항이므로 반사파 허수항은 무시하였다.

$$\begin{aligned} P(x, t) &= P_0 e^{i(kx - \omega t - \omega T)} \\ &= P_0 e^{i\phi} \end{aligned} \quad (2)$$

위 식에서 ϕ 는 진동파의 위상이다. 식(1)에서 k 는 시간이 순간적으로 고정되었을 때의 단위 길이당 위상의 변화량을 나타내며, 진동유동의 위상이 일정할 경우 식(1)에서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$kx - \omega t = C \quad (3)$$

위 식을 미분하여 정리하면 다음과 같은 속도 항을 얻을 수 있고, 이 속도를 위상속도(phase velocity) u_p 라고 한다.

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{k} = u_{m.p} \quad (4)$$

위 식을 다시 한번 미분한 속도가 군속도 u_g (group velocity)이며, 비정상유동중 맥동유동의 입자속도를 나타내는 속도로 다음과 같다.

$$\frac{d\omega}{dk} = u_{m.g} \quad (5)$$

군속도는 언제나 위상속도보다 작으며 유체 유동 입자의 운동량과 질량과의 비로 표시되는 양이다⁵⁾⁶⁾. 실험에 의한 측정값은 이 군속도이며, 이것은 맥동유동의 최대진폭으로 표시되는 양으

로 Fig.1에 나타내었다.

압력파가 정현파상으로 초크의 내경을 통과할 때, 식(1)로 표시된 압력진폭이 초크를 통과할 때 변화하므로 다음과 같이 투과파(transmissive wave)에 대하여 정리하였다⁵⁾⁶⁾.

$$P(x, t) = P_0 e^{i(k'x - \omega t)} \quad (6)$$

위 식(6)에서 $i(k'x - \omega t)$ 로 표시되는 투과파 수 $k'x$ 는 다음과 같이 정리된다^{4,5,6)}.

$$P(x, t) = P_0 e^{-\alpha x} e^{i(kx - \omega t)} \quad (7)$$

식(1)과 식(7)를 비교해 보면 투과진폭은 지수함수적으로 감소한다는 것을 알 수 있다. 여기에서 α 는 $\frac{\omega}{c}k$ 로 주어지는 각주파수 변화값이다.

정현파상의 유량 변동값에 대해서 그 압력강하 변동값의 위상은 차이가 있고 이 위상차는 주파수 및 초크의 계수 때문에 있는 차이이다. 진동 유량값에 대하여 같은 위상에서의 압력 강하값을 점성저항값이라고 하고, 진동유량에 비하여 위상이 빠른 것을 관성값이라고 한다.

원통형 초크를 지나는 운동량은 운동에너지(K)와 위치에너지(V_0)의 합으로 표시되는 다음과 같은 Hamiltonian 운동방정식을 이용하였다⁷⁾⁸⁾.

$$H = V + K_0 \quad (8)$$

식(8)에서 Hamiltonian 운동방정식이 정준운

동량(canonical momentum)이므로 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial p_i} &= \dot{q}_i \\ \frac{\partial H}{\partial q_i} &= \dot{p}_i \end{aligned} \quad (9)$$

위 식에서 q 는 일반좌표이고, p 는 운동량이다. 초크를 통과하여 나오는 밀도확률(density probability)⁴⁾⁵⁾⁶⁾을 구하기 위하여 식(7)로 표시되는 압력파를 식(8)에 적용하여 ket 벡터와 bra 벡터를 적용하면 다음과 같다.

$$\langle P(x,t) | H | P(x,t) \rangle = |P_0|^2 e^{-2\alpha x} \quad (10)$$

식(10)에서 보는 바와 같이 초크를 통과하고 나온 투과파의 에너지는 지수함수적으로 감소하고 있음을 알 수 있다.

압력파를 변수로 하여 초크의 하류를 분석한 식을 확인하기 위하여 속도를 변수로 하여 물리적 특성을 규명하였다. 원통형 초크 출구에서 단면평균 시간평균속도를 u_0 라고 하고 출구에서 단면평균 속도를 u_m 이라고 하여 다음과 같이 정의하였다⁹⁾.

$$u_m = u_0(1 + A_p \sin \omega t) \quad (11)$$

또 교축부 출구에서의 유량변화는 Fig.1에 표시하고, 여기에서 A라고 표시한 시점에서 교축부 출구를 빠져나온 입자가 유량변화의 1주기 동안 진행한 거리 λ 는 다음과 같다.

$$\lambda = u_0 T = \frac{u_0}{f} \quad (12)$$

A로 표시한 시점에서 초크 출구를 나온 입자와 B로 표시한 시점에서 초크출구를 나온 입자의 시각의 차는 $T/4$ 이다. B의 시각에서 양쪽 거리의 차는 $\lambda/4$ 이고 A의 입자와 B의 입자의 속도차 u_a 는 $A_p u_0$ 이다. 여기에서 A_p 는 정상유동의 유량에 대한 맥동유동의 유량비이다. 1주기동안

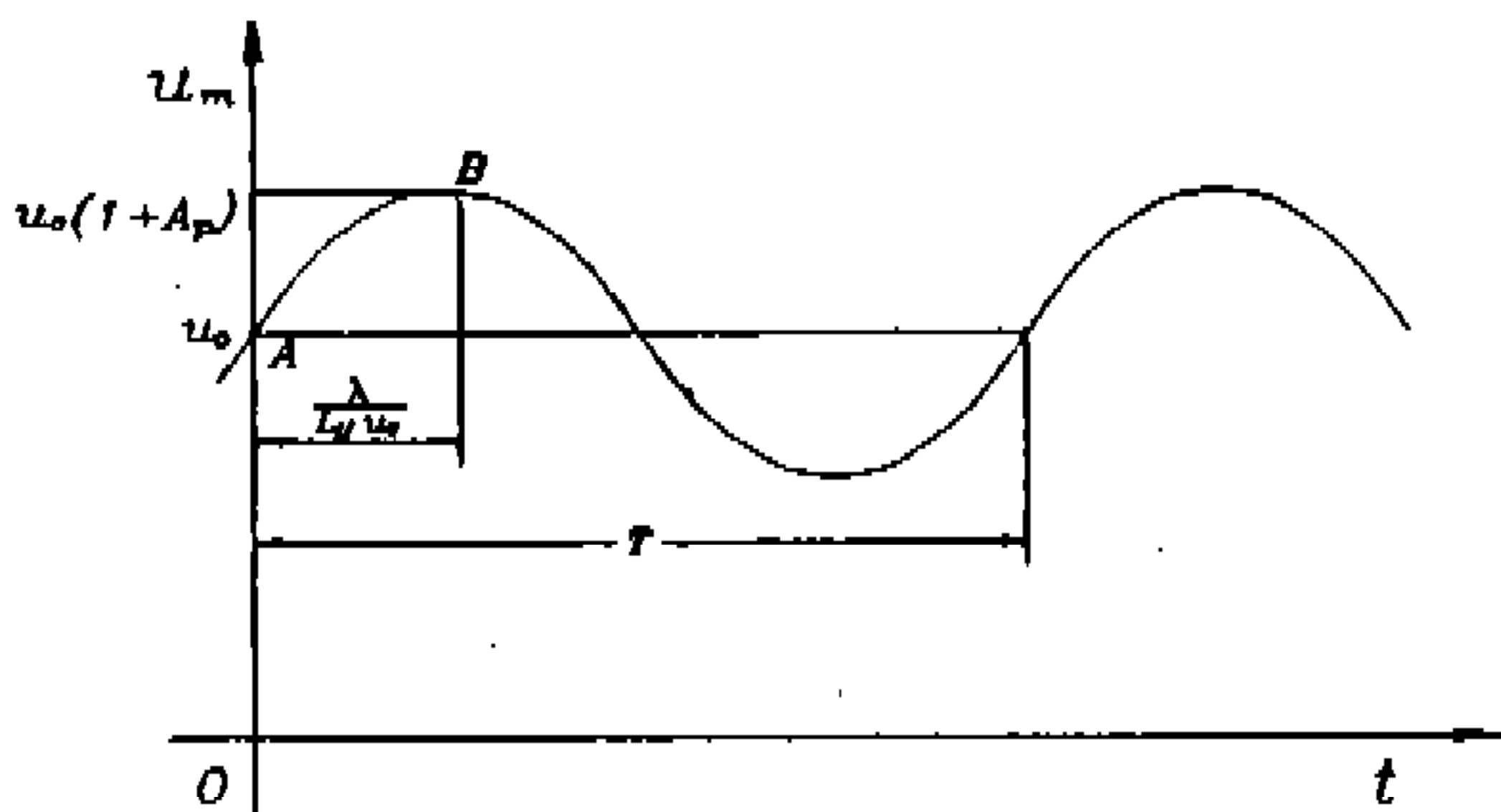


Fig.1 Flowvariation at the outlet of a choke

최대속도인 B의 입자가 시간평균속도 u_0 로 하류에서 A의 입자를 추월할 때, 즉 유체의 최대입자속도가 가장작은 유체입자속도를 추월할 때 펄스가 최대가 되고 붕괴가 시작된다. 무차원 분류 붕괴 시작거리 $\bar{L}_s (=L_s/D)$ 는 B의 입자가 A의 입자를 추월하기 위한 시간을 T_s 라고 하여 정리하면 다음과 같다¹⁰⁾.

$$\bar{L}_s = \frac{T_s(u_a + u_0)}{D} = \frac{Re_a \beta (1 + A_p)}{16 A_p \bar{f}} \quad (13)$$

여기에서 $Re_a = du_0/\nu$, $\bar{f} = d^2 f/4\nu$, $\beta = d/D$ 이고 위에서 설명한 분류확대구간의 길이 $\bar{L}_e (=L_e/D)$ 를 고려하여 쓰면 다음과 같다.

$$\bar{L}_{jf} = \bar{L}_s + \bar{L}_e \quad (14)$$

Fig.2에서 총류 정상유동인 경우 $\bar{L}_r = 16$ 의 위치에서 다시 부착되는 것을 고려해서 위 식에서 $\bar{f} \rightarrow 0$ 으로 될때 정상유동의 조건을 동시에 만족하는 다음과 같은 식을 이용하였다. 즉, \bar{L}_{jf} 는

$$\lim_{\bar{f} \rightarrow 0} \bar{L}_{jf} = \frac{Re_a}{\alpha} + \bar{L}_e = \bar{L}_r \quad (15)$$

로 되어 다음 식(16)의 형태로 된다. 여기에서 α 는 계수이다³⁾.

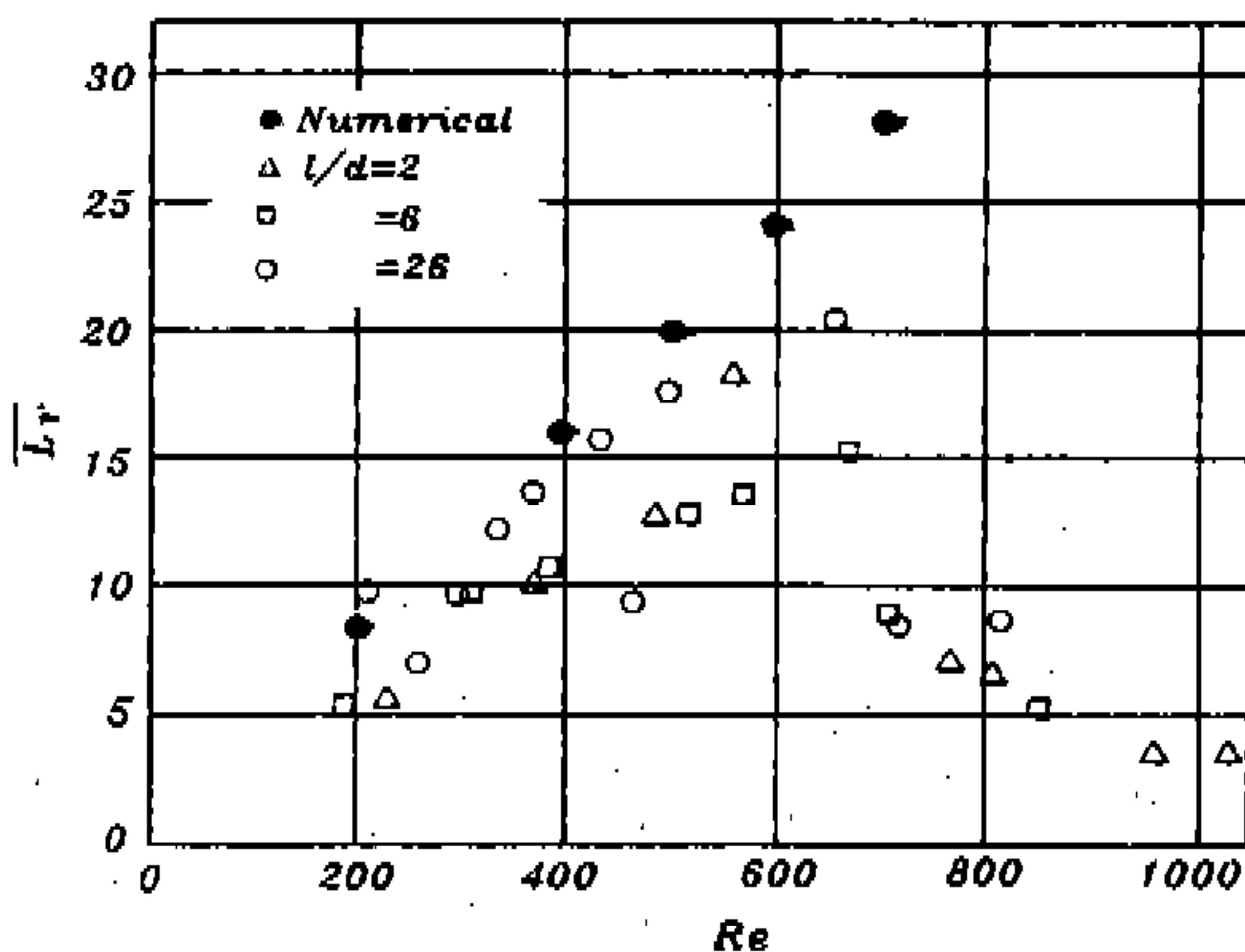


Fig.2 Reattachment length of steady flow

$$\bar{L}_{jf} = \frac{1}{\frac{1}{\bar{L}_s} + \frac{\alpha}{Re_a}} + \bar{L}_e \quad (16)$$

따라서 식(13)의 결과를 식(16)에 대입하면 무차원 분류 붕괴거리 \bar{L}_{jf} 는 다음과 같다.

$$\bar{L}_{jf} = \frac{Re_a \beta (1 + A_p)}{16 A_p \bar{f} + \alpha \beta (1 + A_p)} + \bar{L}_e \quad (17)$$

α 의 값은 Re 가 600이하에서는 Fig.3의 정상류 재부착거리의 수치해석의 결과³⁾를 이용하면 일정한 값으로 된다. 맥동유동의 경우에도 시간평균 레이놀즈수를 최대 레이놀즈수 Re_{max} 를 이용하여 \bar{L}_{jf} 를 정리하면 다음과 같다.

$$\bar{L}_{jf} = \frac{Re_a \beta}{24 \bar{f} + \alpha \beta} + \bar{L}_e \quad (18)$$

식(17)과 식(18)은 재부착거리를 레이놀즈수와 주파수로 해석하였는데, 이 식을 압력파동 방정식을 Hamiltonian 방정식으로 유도한 식(10)과 비교하여 재부착거리를 확인하고자 한다.

3. 실험

본 실험장치는 Fig.4에 나타내었다. 정상유동과 진동유동을 합성하여 얻은 맥동유동이 원통형 초크를 지나서 생기는 분류영역의 동적인 거동을 연구하기 위해서 가시화 실험을 하였다. 실험에

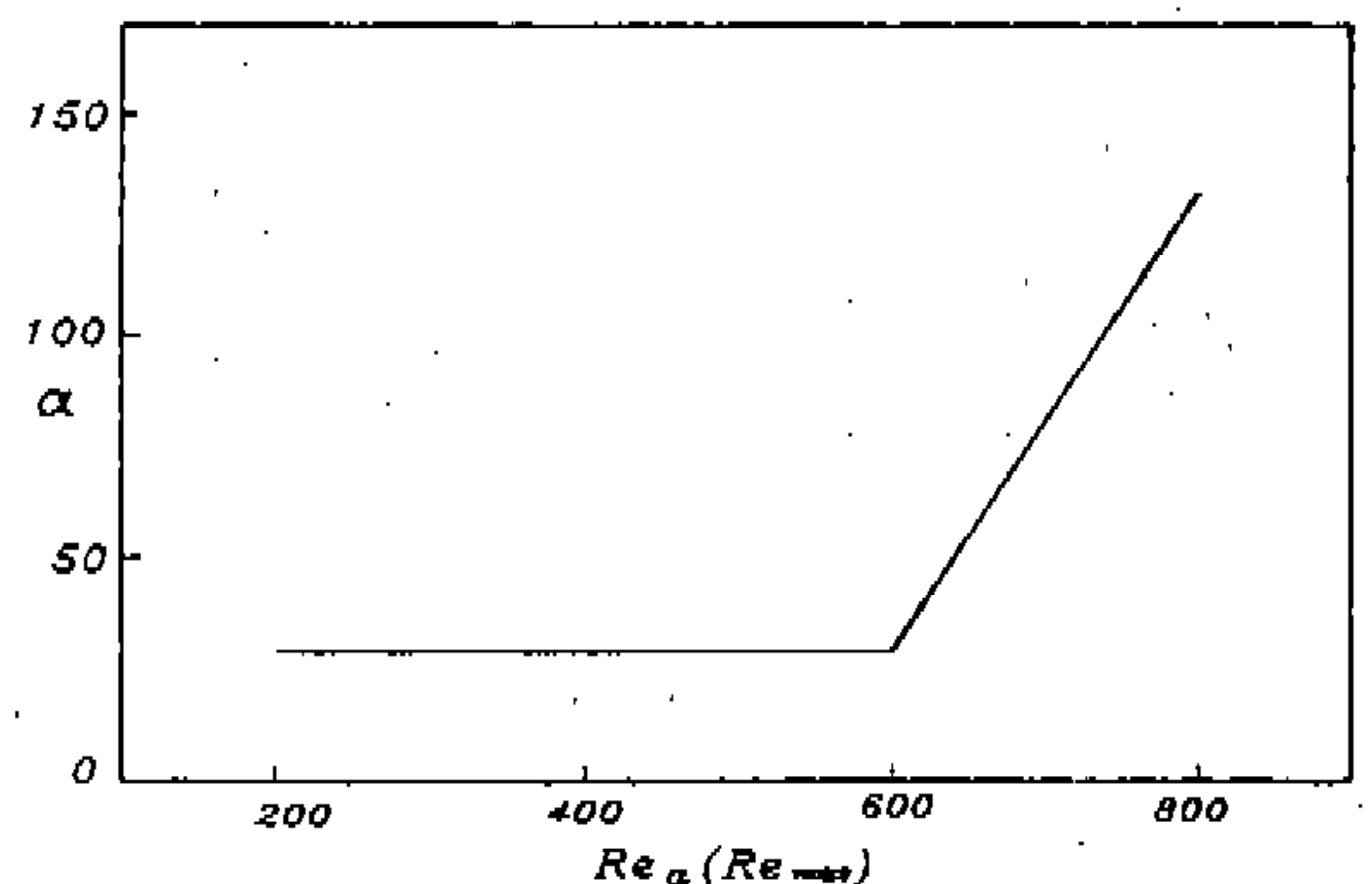
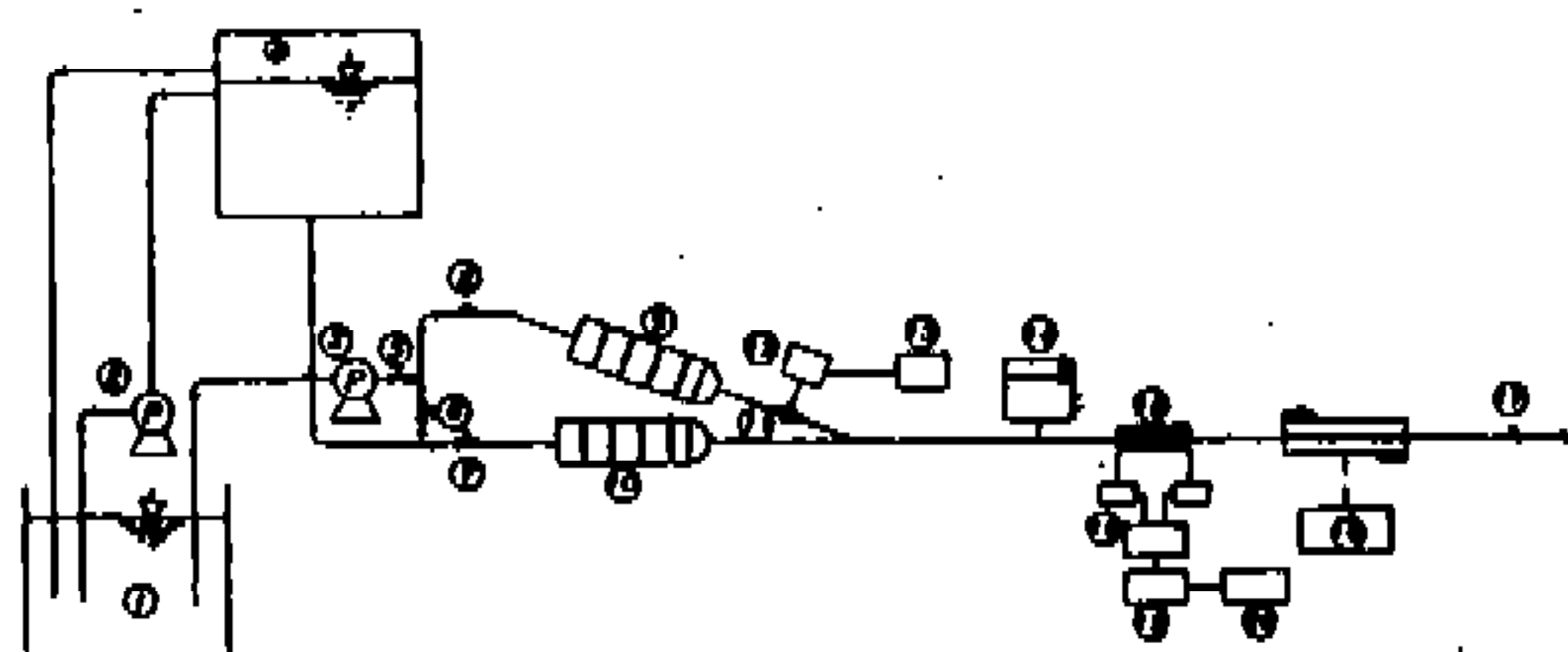


Fig.3 Dependence of coefficient α on Re

서의 작동유체는 정류한 증류수를 사용하였으며, 저장탱크로부터 펌프를 이용하여 overflow 탱크로 물을 올려보내 물의 수위가 언제나 일정하게 유지되도록 하였다. 또 탱크 출구로부터 관입구로 균일한 유동이 유입되도록 하였으며, 시험관 재질은 아크릴관이며 염색소를 이용하여 유동의 상태를 확인하였다.

본 실험에서 비정상유동인 맥동유동중 진동유동은 butterfly ball valve를 gear motor로 회전시켜 진동유동을 만든 다음 정상유동과 합성하여 발생시켰다. 기어모터의 주파수는 속도 조절기로 조절하였고, 이들의 주파수를 변화시켜 가면서 그 특성을 시험하였다. 유량의 조절은 밸브 ⑤와 ⑦로 하였으며, 유체가 정상상태를 유지하게 하기 위하여 정류기를 설치하였다. Fig.5는 Jet expansion을 나타냈으며, 관의 내경을 D , 초크 내경을 d 로 하였고, 분류봉괴거리를 L_j 라고 하였다. 원통형 choke의 직경과 길이비인 교축길이비(l/d)는 각각 2, 6, 10과 26이며 원통형 choke의 내경(d)은 5mm이고 관의 내경(D)은 20mm이다. 특히 교축 길이비(l/d)가 26인것을 선택한 이유는 원관내 층류유동인 경우 완전히 발달된 유동영역의 입구길이가 $0.065d \cdot Re$ 이기 때문에 원통형 초크의 교축내부에서 완전히 발달한 길이에 해당한다.

원통형 choke를 교환할 수 있도록 플랜지 형



No	DESCRIPTIONS	No	DESCRIPTIONS	No	DESCRIPTIONS
1	storage tank	8	valve	15	cylindrical choke
2	pump	9	straightener	16	ultrasonic flowmeter
3	pump	10	straightener	17	valve
4	overflow tank	11	butterfly ball valve	18	pressure transducer
5	valve	12	gear motor	19	personal computer
6	valve	13	speed controller	20	printer
7	valve	14	dye reservoir		

Fig.4 Schematic diagrams of experimental apparatus

태로 만들었으며, 원통형 choke와 플랜지사이에는 고무패킹을 삽입하여 유체의 누수를 막았다. 맥도유동은 정상유동과 진동유동의 합성으로 되어있기 때문에 정상유동의 유속의 조절은 수두차로부터의 위치에너지와 순환펌프를 이용하였다. 맥동유동의 평균 순간유량은 Wide beam type의 초음파 유량계(Ultrasonic Flowmeter)를 사용하여 정상유동인 경우와 맥동유동인 경우의 유량을 측정하였다. 이 초음파 유량계로 측정한 정상유동의 유량과 맥동유동의 유량을 이용하여 진동유량에 대한 정상 유동의 유량비(A_p)를 계산하였다.

본 실험에서의 초크의 직경이 $(d/D)\beta=0.25$, 레이놀즈수 $Re=200\sim 1,000$ 이며, 작동유체의 온도는 열전대를 이용하여 EasyLogger 900으로 받아들여 순간 순간의 온도를 측정할 수 있도록 하였으며, 유체는 다시 저장탱크로 보내어져 재순환할 수 있도록 하였다.

4. 결과 및 고찰

식(10)에 따르면 각주파수와 초크의 길이가 증가할수록 맥동유량의 맥동(pulse)이 감소하는, 이는 밀도확률(density probability)이 감소하고 있음을 의미한다. 이것은 초크를 통과하면서 에너지 손실이 지수함수적으로 감소하고, 이 에너지의 감소가 재부착거리의 증가로 나타나는 현상을 설명하고 있다. 이러한 현상은 Photo.1~5에 잘 나타나있다. 여기서 보는 바와 같이 초크의 길이가 짧을수록 에너지의 손실량이 적기때문에 맥동에 의한 펄스가 크게 나타나며, 따라서 이 크기에서는 다른 초크의 길이에 비하여 재접

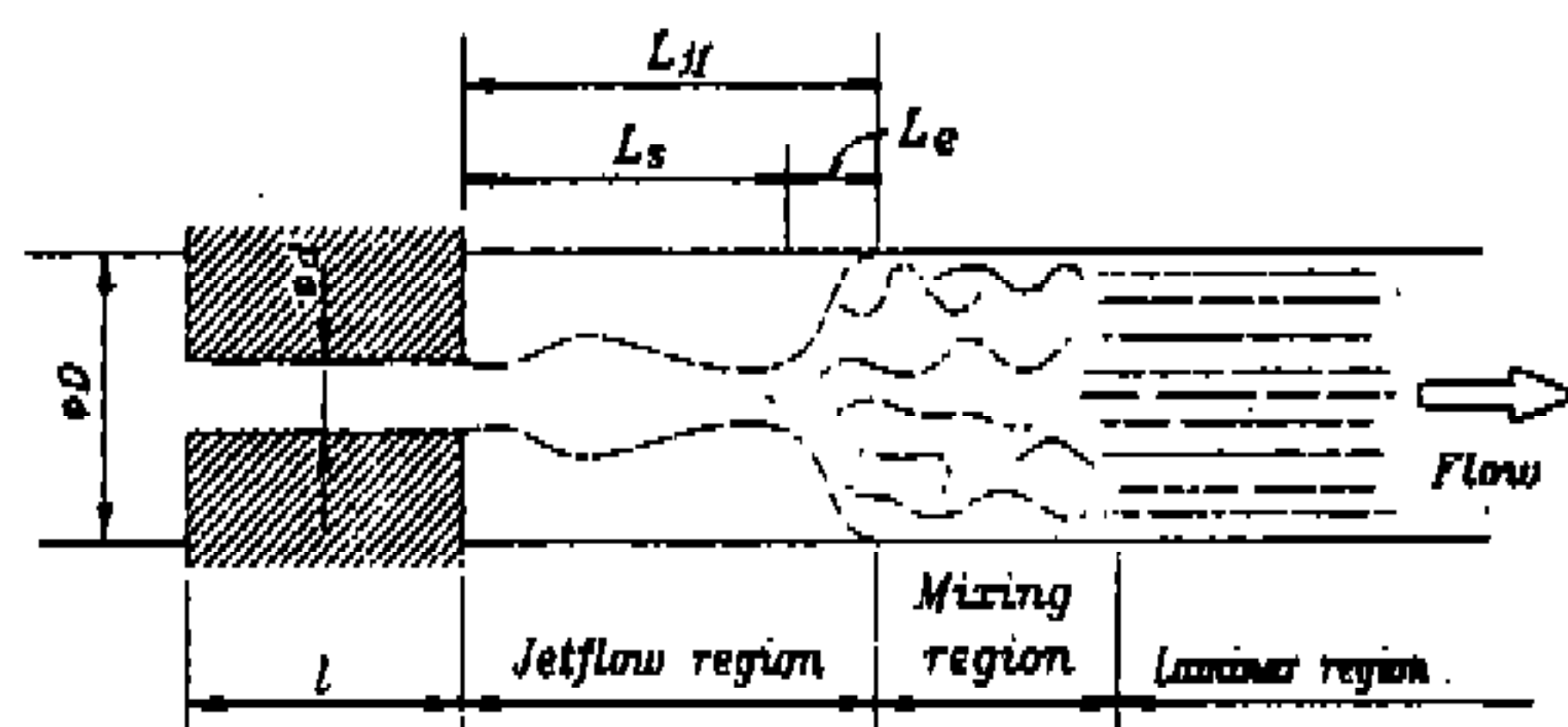


Fig.5 Jet expansion

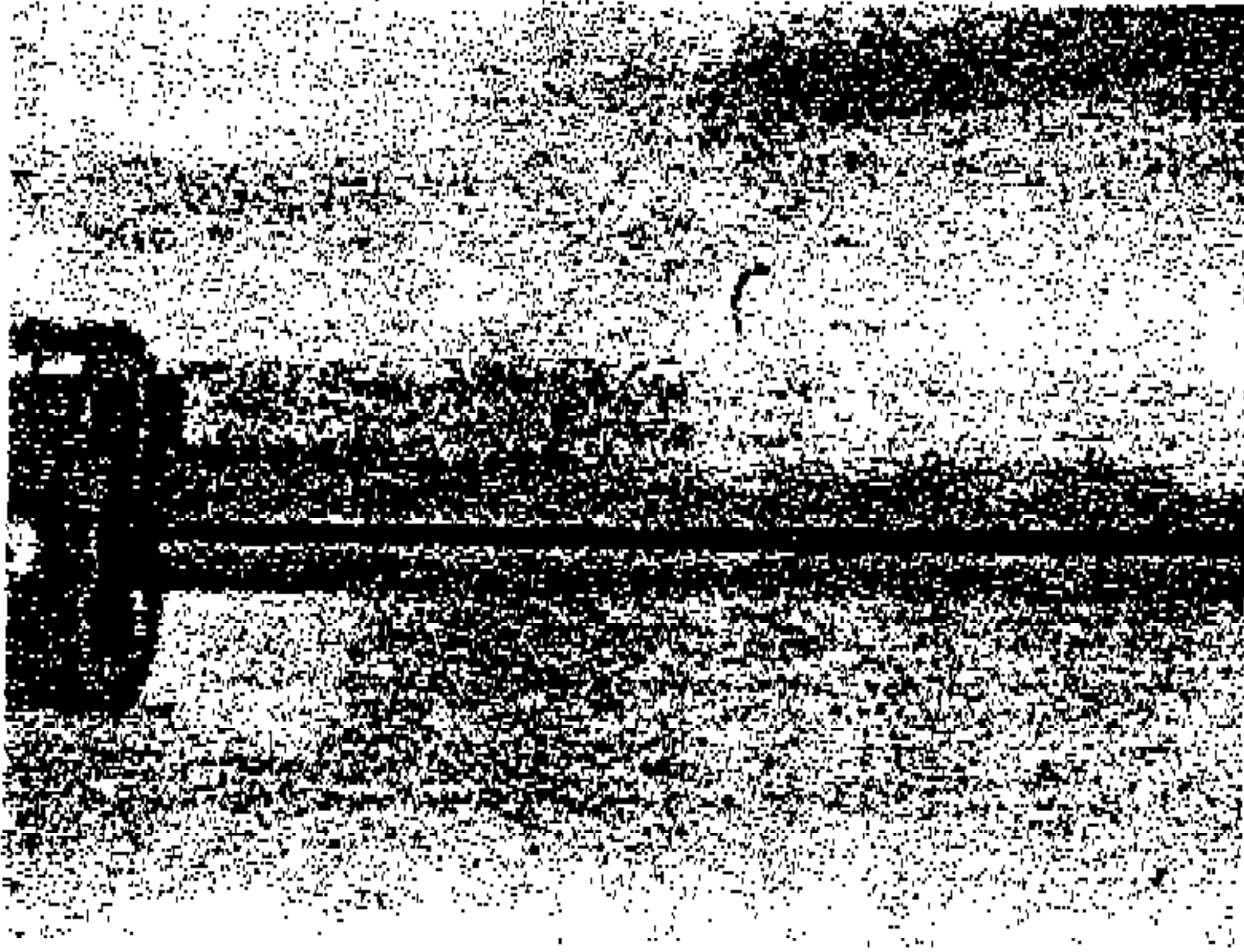
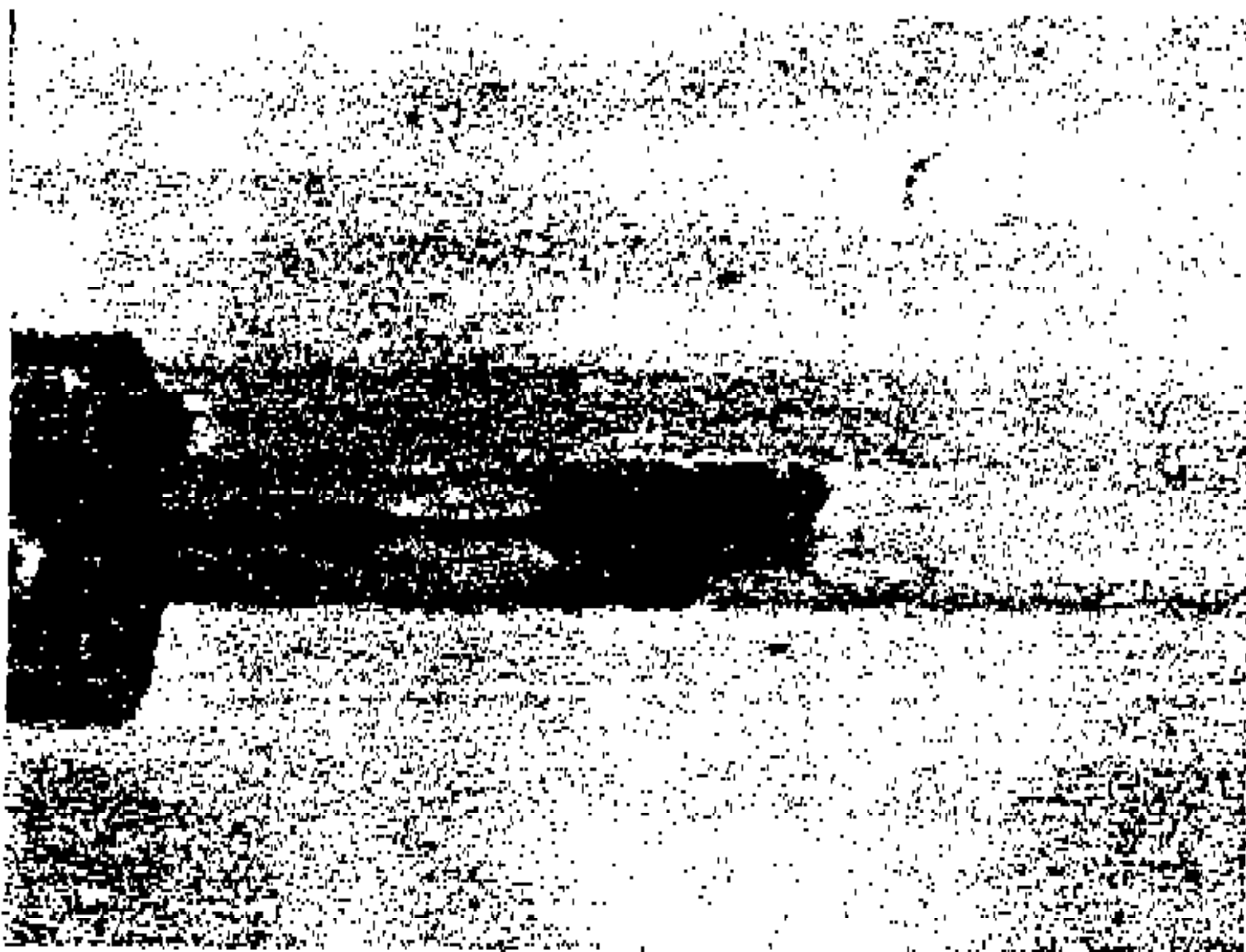
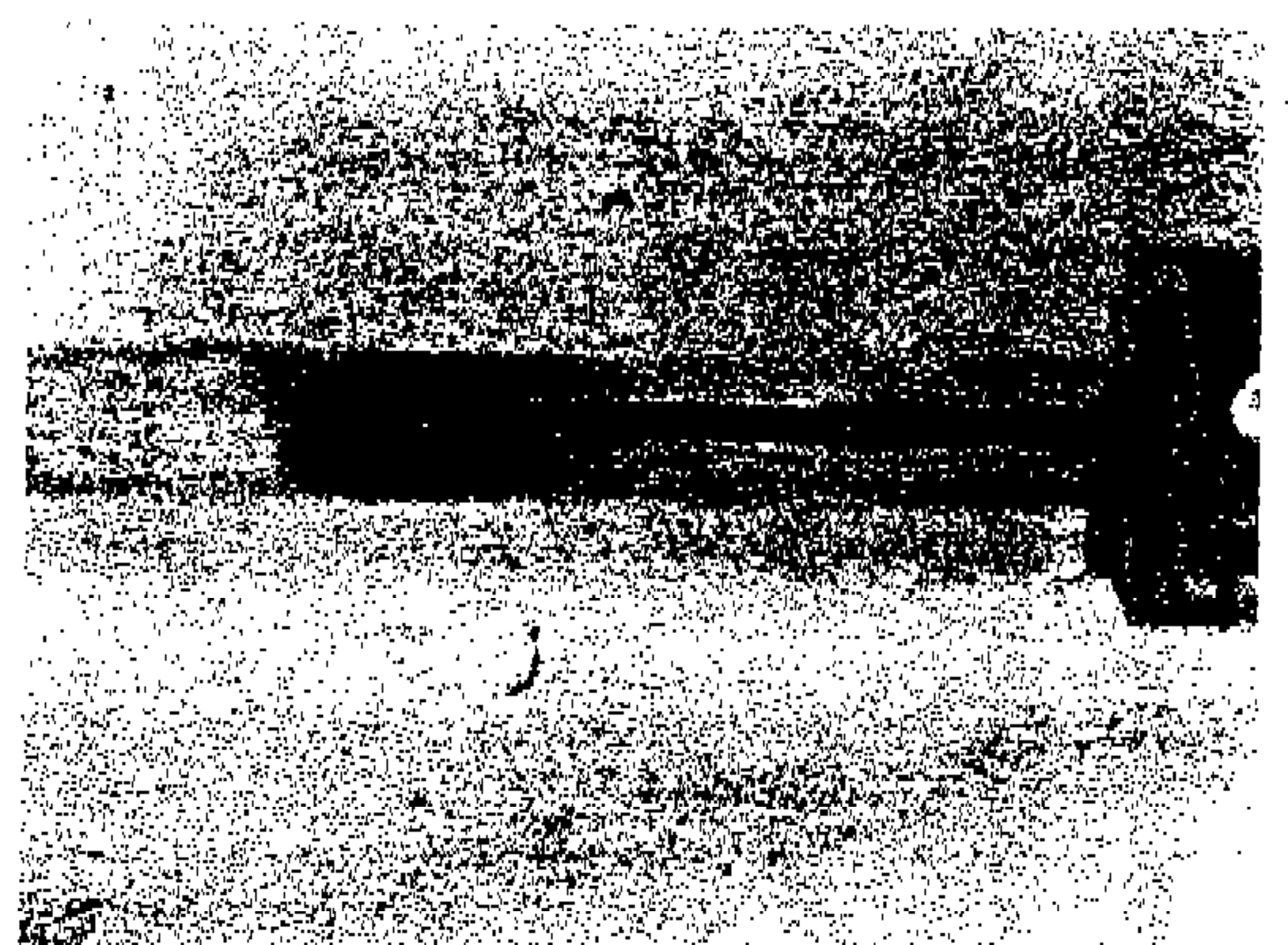


Photo.1 Flow visualization in the steady flow

Photo.2 Flow visualization in the pulsating flow at $l/d=2$ Photo.3 Flow visualization in the pulsating flow at $l/d=6$ Photo.4 Flow visualization in the pulsating flow at $l/d=10$ Photo.5 Flow visualization in the pulsating flow at $l/d=16$

축길이가 짧아진다.

Photo.1는 레이놀즈수가 400인 정상유동인 경우의 분류의 형태를 보여주고 있으며 초크의 교축부를 지난 유동의 분류가 비교적 먼 거리를 지나서 매끄럽게 확대되고 있음을 알 수 있다. Photo.2~5는 맥동유동인 경우 시간평균 레이놀즈수가 400, 무차원주파수($f = d^2 f / 4\nu$)가 4.3인 경우이다. 이 사진에서 알 수 있듯이 맥동유동의 분류는 정상유동인 경우와는 거동이 매우 다르며 교축부를 지난 유동의 분류가 상당히 짧은 거리에서 갑자기 붕괴되어 주위의 유동과 혼합되고 어떤 구간을 지나서는 난류의 상태가 발생한다. 이와같이 원통형 초크의 하류부분을 크게 3개의

영역으로 분류하여 고찰할 수가 있으며 그 결과는 Fig.5에 나타내었다. 즉 교축부의 출구에서 나온 분류가 유량변화에 따라 생기는 맥동(pulse)을 유지하면서 이동하고 붕괴가 시작된 후 분류가 확산되어 관벽까지 도달하는 영역, 분류가 형태를 유지하고 못하고 붕괴한 후 관내 전체에 유동이 복잡하게 혼합되는 혼합영역, 그리고 다시 원관에 층류유동으로 재층류화되는 영역으로 나눌수 있다. 여기에서는 이들 분류영역중에서 첫번째의 경우를 고찰하였다. 이 영역의 크기가 교축길이비나 주파수에 따라 어느 정도 변화하는가를 검토하였으며, Fig.5에서 분류영역과 혼합영역의 경계, 즉 분류가 확대되어 관벽면에 도달한 곳을 분류붕괴점이라 하고, 유동을 가시화해서 교축부의 출구로부터의 분류붕괴거리 L_{ij} 를 측정하였다. 유동을 가시화해서 고찰한 사진의 결과로부터 분류영역에 있어서 유동의 거동은 다음과 같다는 사실을 알았다. 교축부를 나온 유체의 각 입자는 출구에서 유속을 유지하면서 하

류로 진행하였다. 이때문에 맥동유동의 경우에는 1주기마다 선행하는 입자가 출구를 나옴에 따라, 빠른 유체입자가 느린 입자를 밀어내어 관벽면으로 커다란 맥동(pulse)형태의 부분이 형성된다. 이 분류가 크게 맥동(pulse)으로 형성된 부분이 하류로 이동해가면서 뒤에서 따라오는 유체의 입자때문에 크게 된 다음, 그 형태를 유지하지 못하고 분류가 붕괴되기 시작한다. 붕괴가 된 다음, 어느 거리를 지나고 나서 분류붕괴 때문에 난류가 관벽면 전체에 미치게 된다. 이것을 분류확대구간이라고 부른다.

원통형 초크를 지난 맥동유동의 맥동(pulse)이 재부착하는 현상을 Fig.5~12에 나타내었다. 정상유동의 유량에 대하여 변동하고 있는 진동유동의 유량 진폭비 A_p , 시간평균 레이놀즈수 Re_0 및 직경비 β 와 교축길이비 l/d 를 변수로 하여 맥동유동에 대한 무차원분류붕괴거리 \bar{L}_{ij} 의 실험결과를 표시하였다. Fig.6~13에 나타낸 점선은 압력파를 이용하여 해석한 식(10)의 이론곡선이

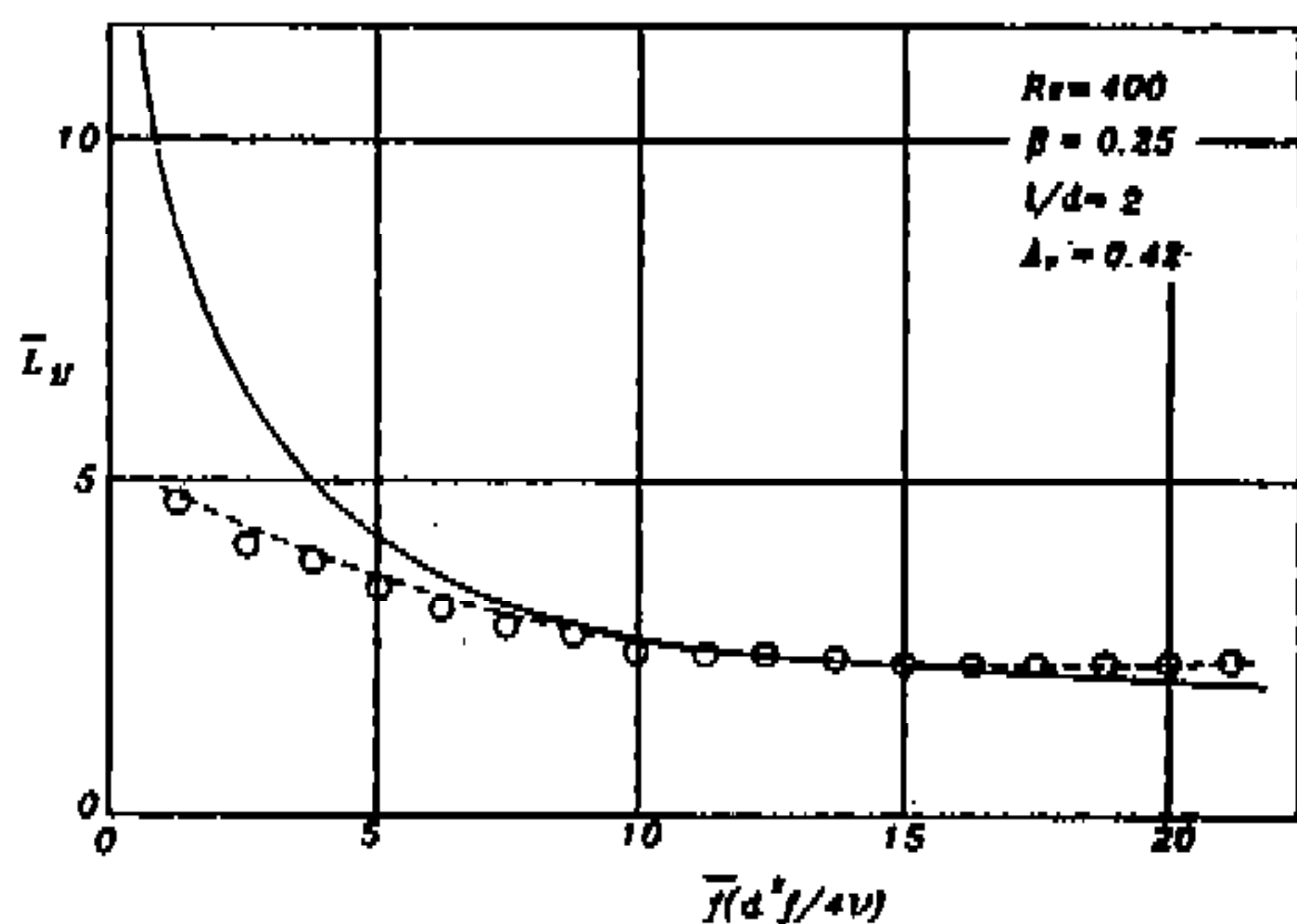


Fig.6 Collapse length of pulsating flow

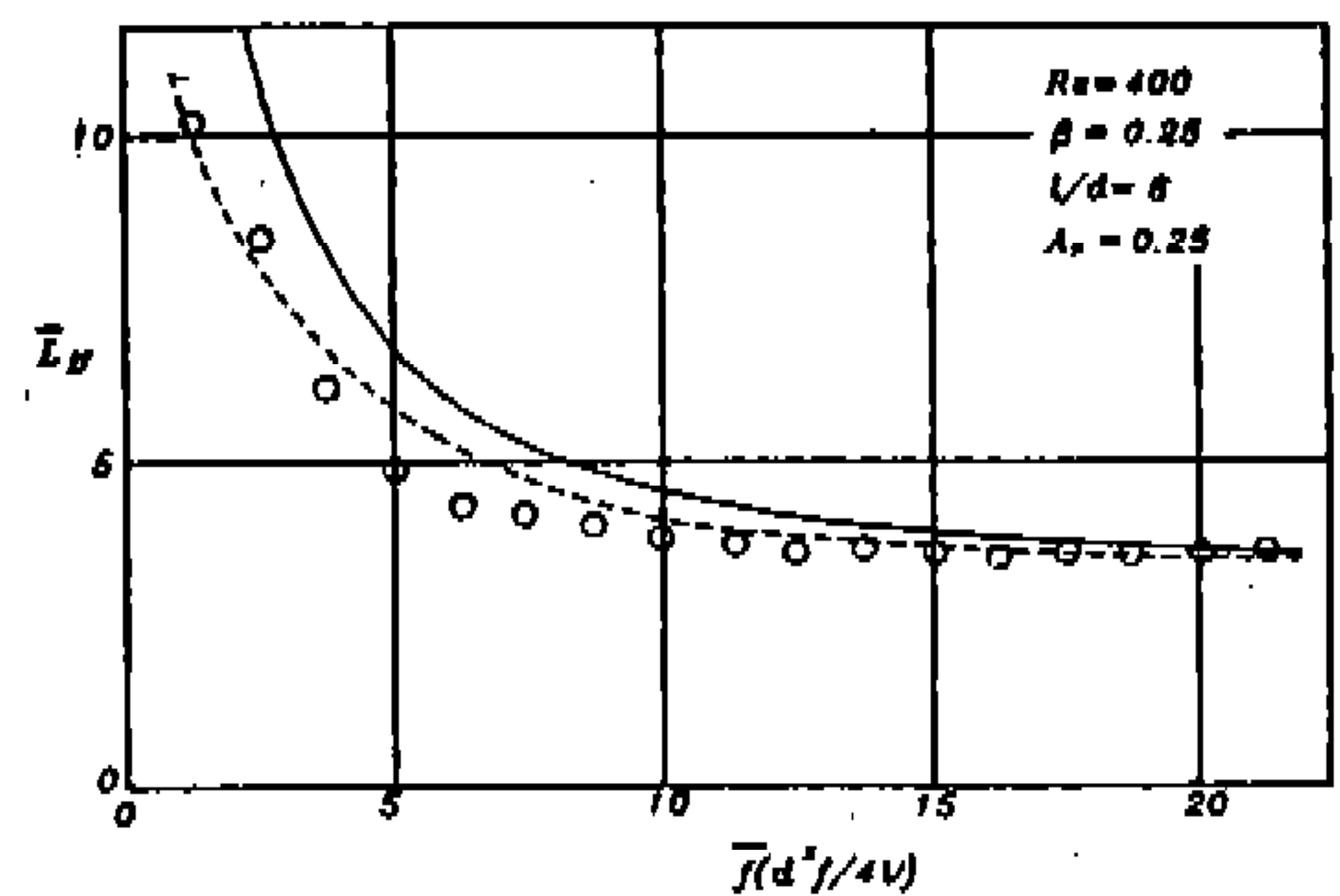


Fig.7 Collapse length of pulsating flow

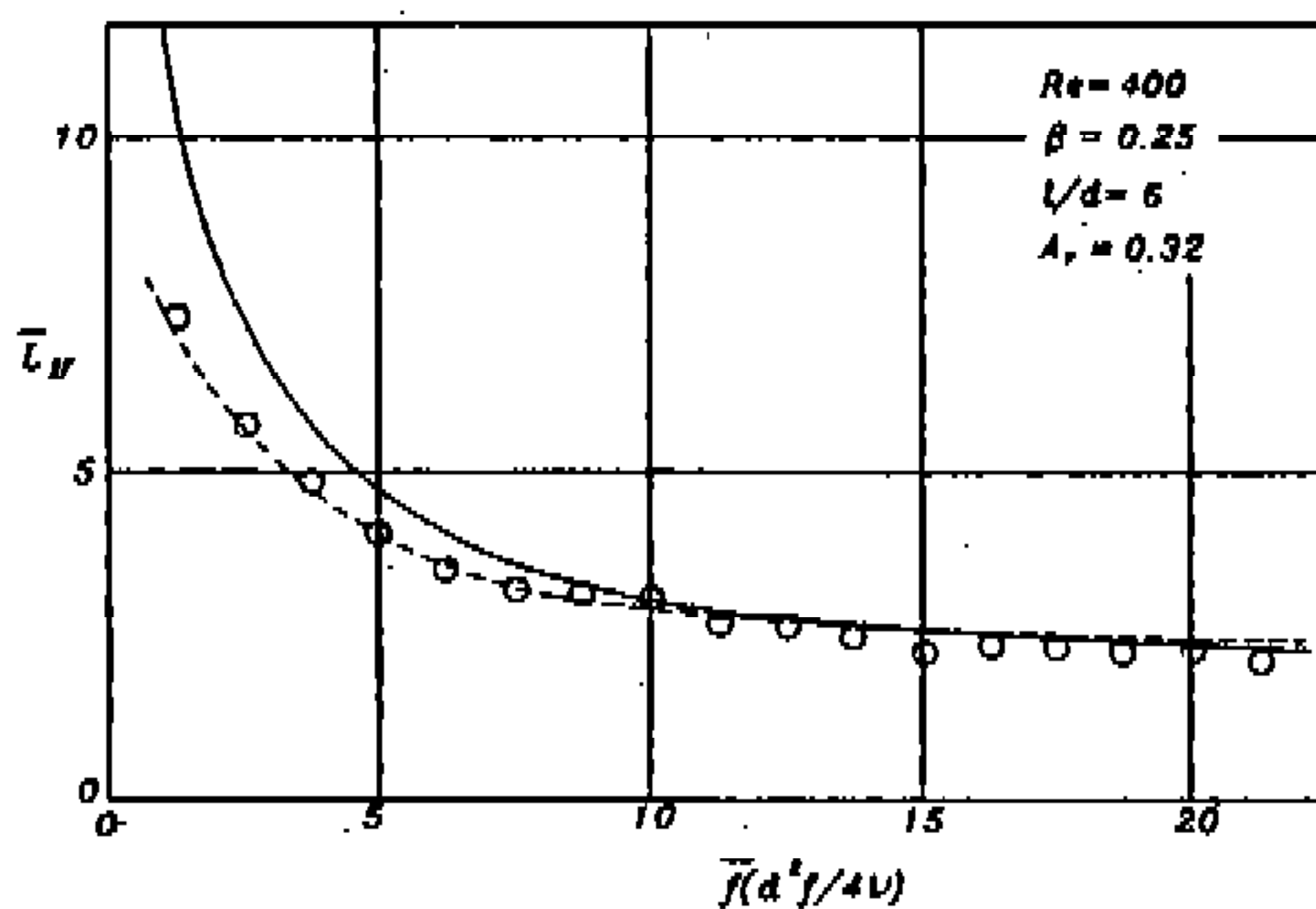


Fig.8 Collapse length of pulsating flow

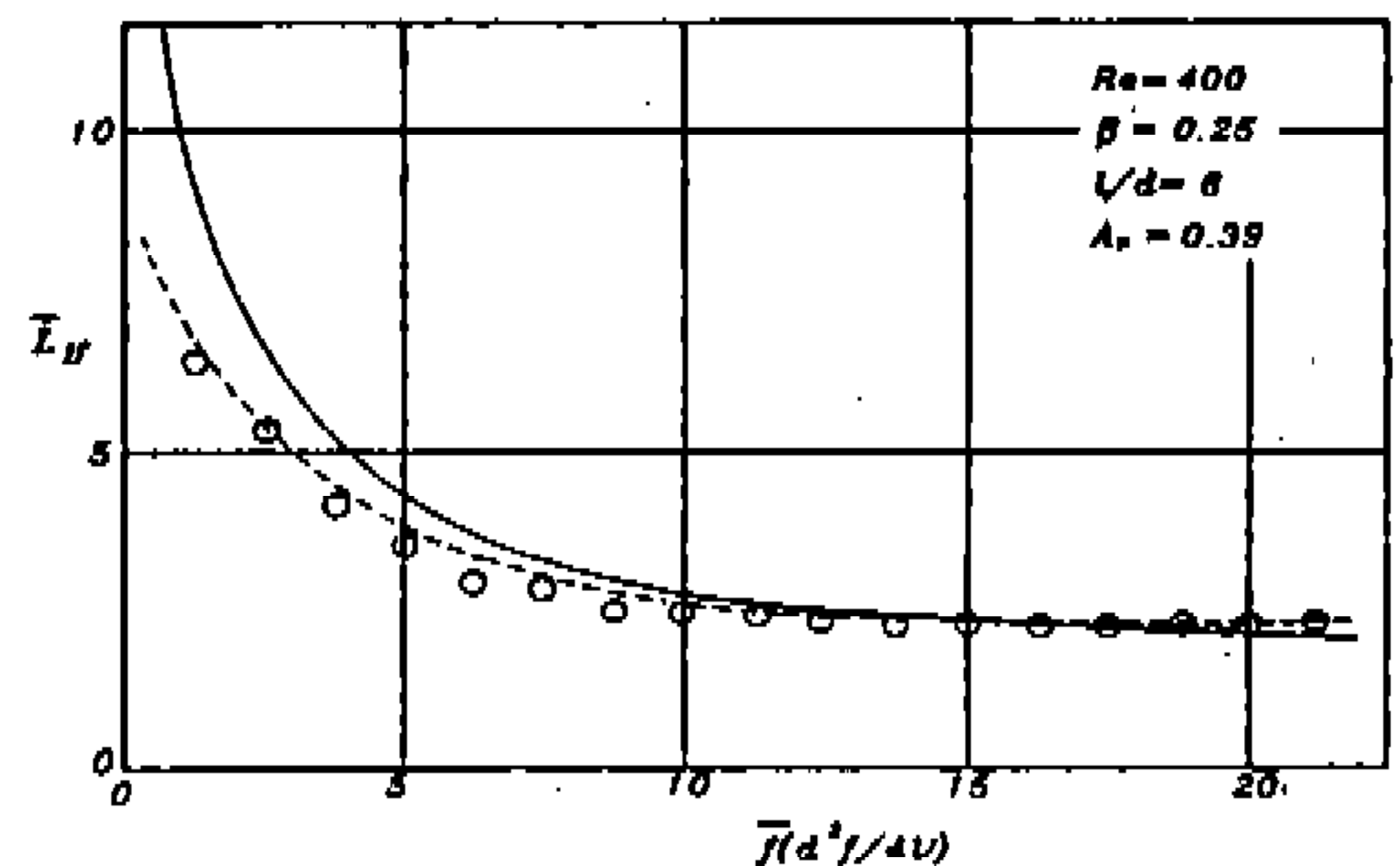


Fig.9 Collapse length of pulsating flow

며, 실선은 속도를 중심으로 이론해석한 식(17)의 곡선이고, Point는 실험값이다. 횡축은 무차원주파수 ($f = d^2 f / 4\nu$), 종축은 재부착거리를 나타낸다. 맥동유동의 분류붕괴 거리는 주파수가 작을 경우에는 비교적 길게 되어 정상유동의 재부착거리에 접근하고 주파수가 큰 경우에는 급격하게 줄어 f 가 10을 넘게 되면 2D정도로 된다. 식(10)과 식(17)에서의 계산결과는 분류붕괴현상에 대한 이러한 경향을 잘 나타내고 있다. 식(17)의 경우에는 주파수가 낮은 범위에서 계산값보다도 실험값이 약간 낮은 경향이 있는데 이것은 유체가 교축부분을 나온 후에도 같은 값을 가지고 이동한 붕괴모델과 비교해보면 실제 유동현상에서는 점점 감소하고 있기 때문이다. 그러나 압력파를 중심으로 계산한 식(10)의 결과인 굵은 실선은 원통형 초크를 빠져 나온 맥동(pulse)이 하류로 진행함에 따라 지수함수적으로 감소하고 있는 형태를 반영하고 있기 때문에 속도를 변수로 한 식(17)보다 더 잘 일치하고

있다. 식(10)과 (17)을 서로 비교해 볼 때, 진폭비 A_p 에 따라 고찰해 보면 A_p 가 작을 경우에는 두 식 모두 \bar{L}_{ij} 가 이론값과 잘 일치하고 있으며, 시간평균 레이놀즈수 Re_a 에 대해서도 Re_a 가 커지면 \bar{L}_{ij} 가 길어진다. Fig.6~13에서 보는 바와 같이 교축길이비 l/d 가 작을수록 분류붕괴거리가 짧아진다. 원통형 초크를 빠져 나온 맥동의 밀도확률은 에너지손실의 정도를 나타내며, 이값은 재부착거리에 역비례한다. 이상의 고찰로부터 압력파를 Hamiltonian 운동방정식을 이용하여 해석한 식(10)과 속도를 중심으로 해석한 식(17)과 비교해 보면 원통형 초크의 교축부를 지난 거동의 특성은 매우 일치하고 있지만, 실험값과 비교해 보면 압력파를 중심으로 해석한식(10)이 더욱 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

원통형 초크를 통과하는 맥동유동을 가시화해

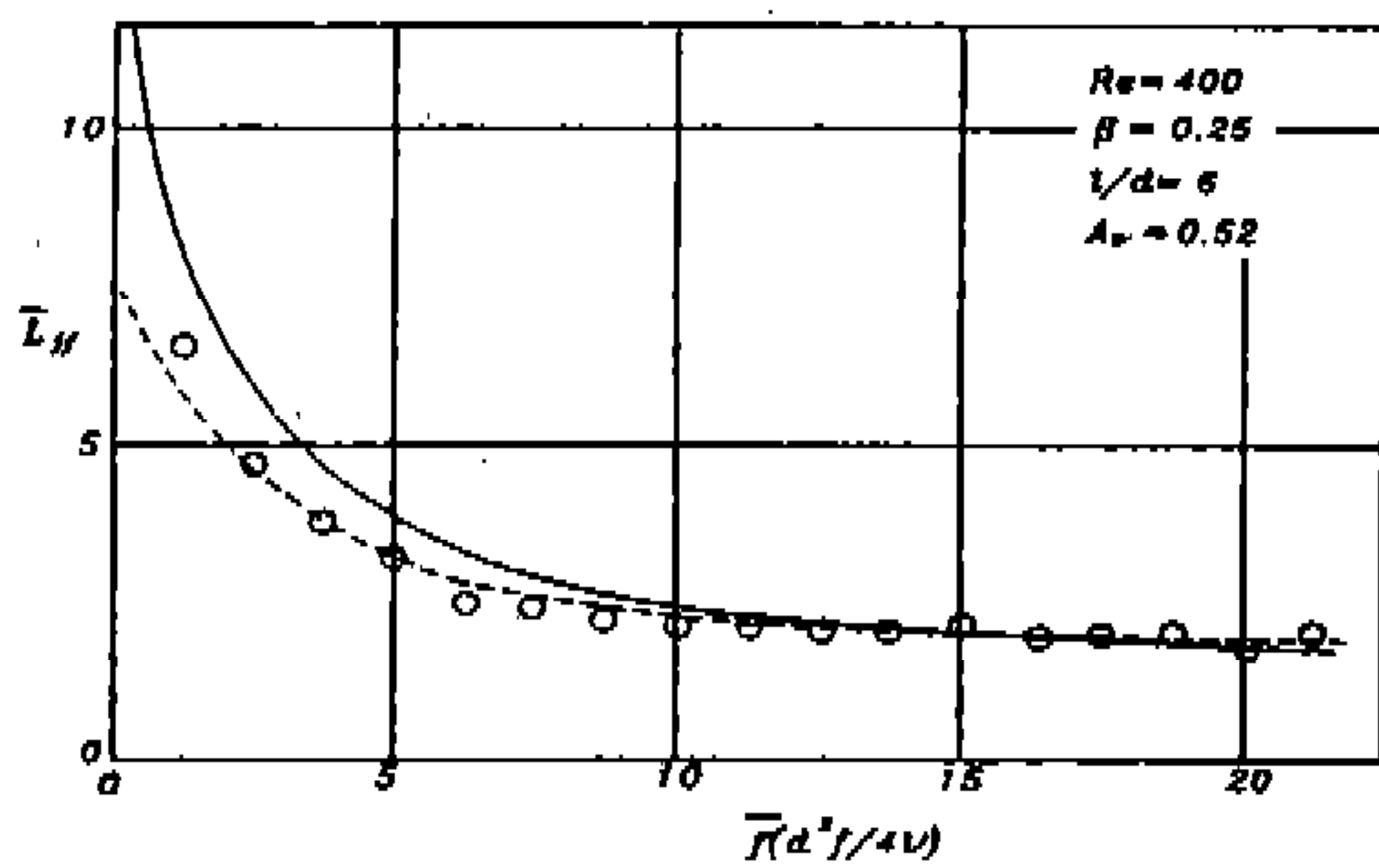


Fig.10 Collapse length of pulsating flow

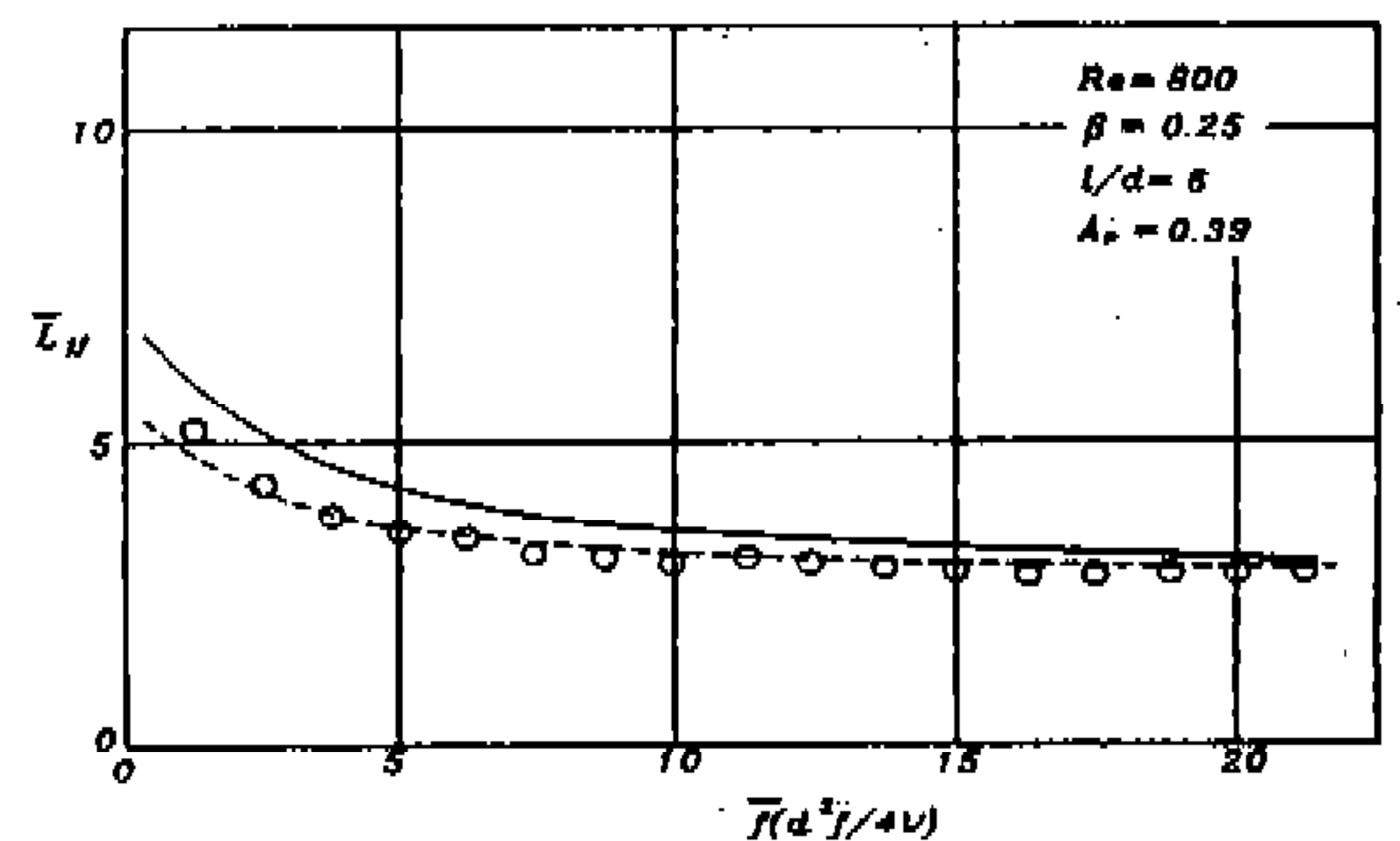


Fig.11 Collapse length of pulsating flow

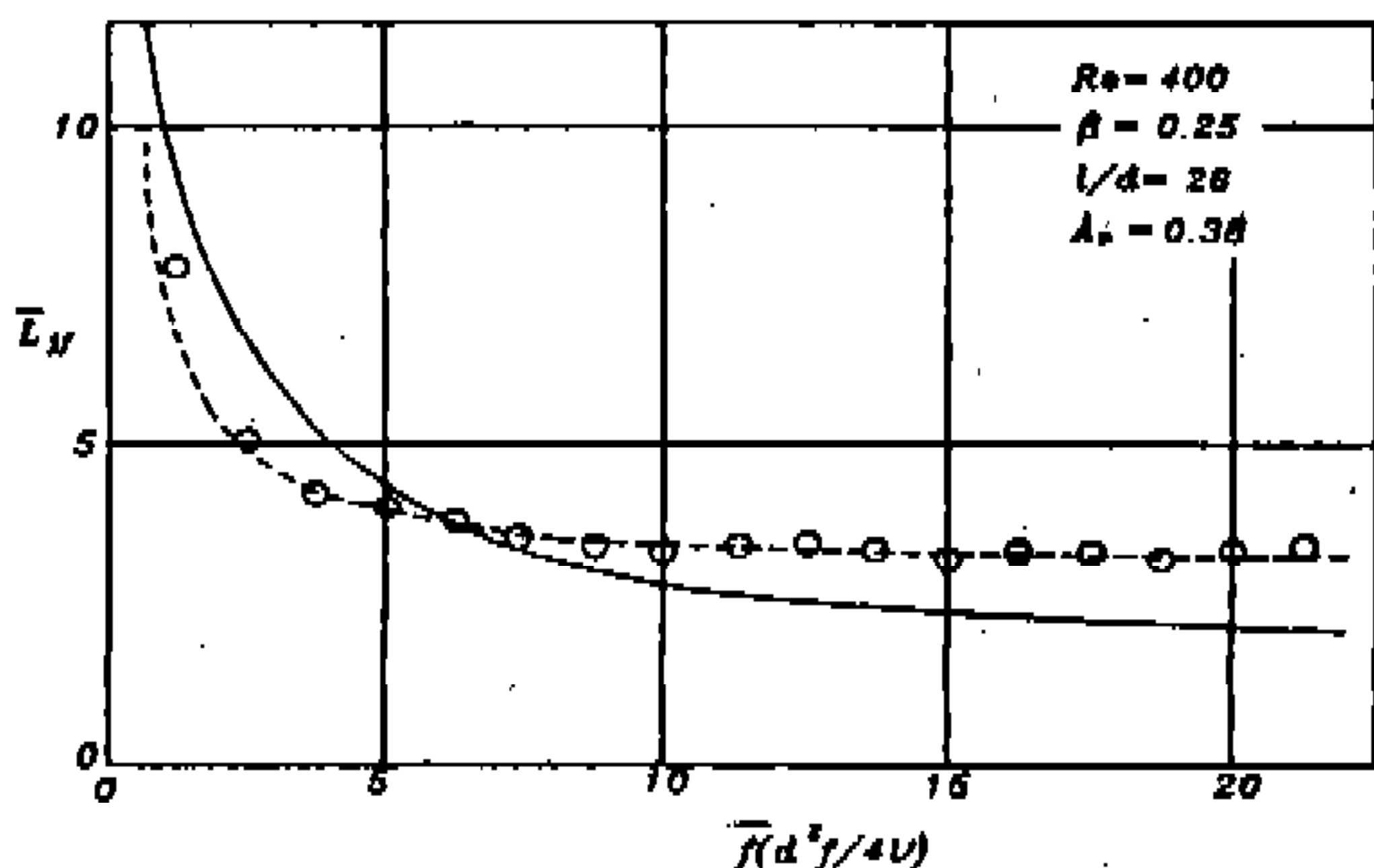


Fig.12 Collapse length of pulsating flow

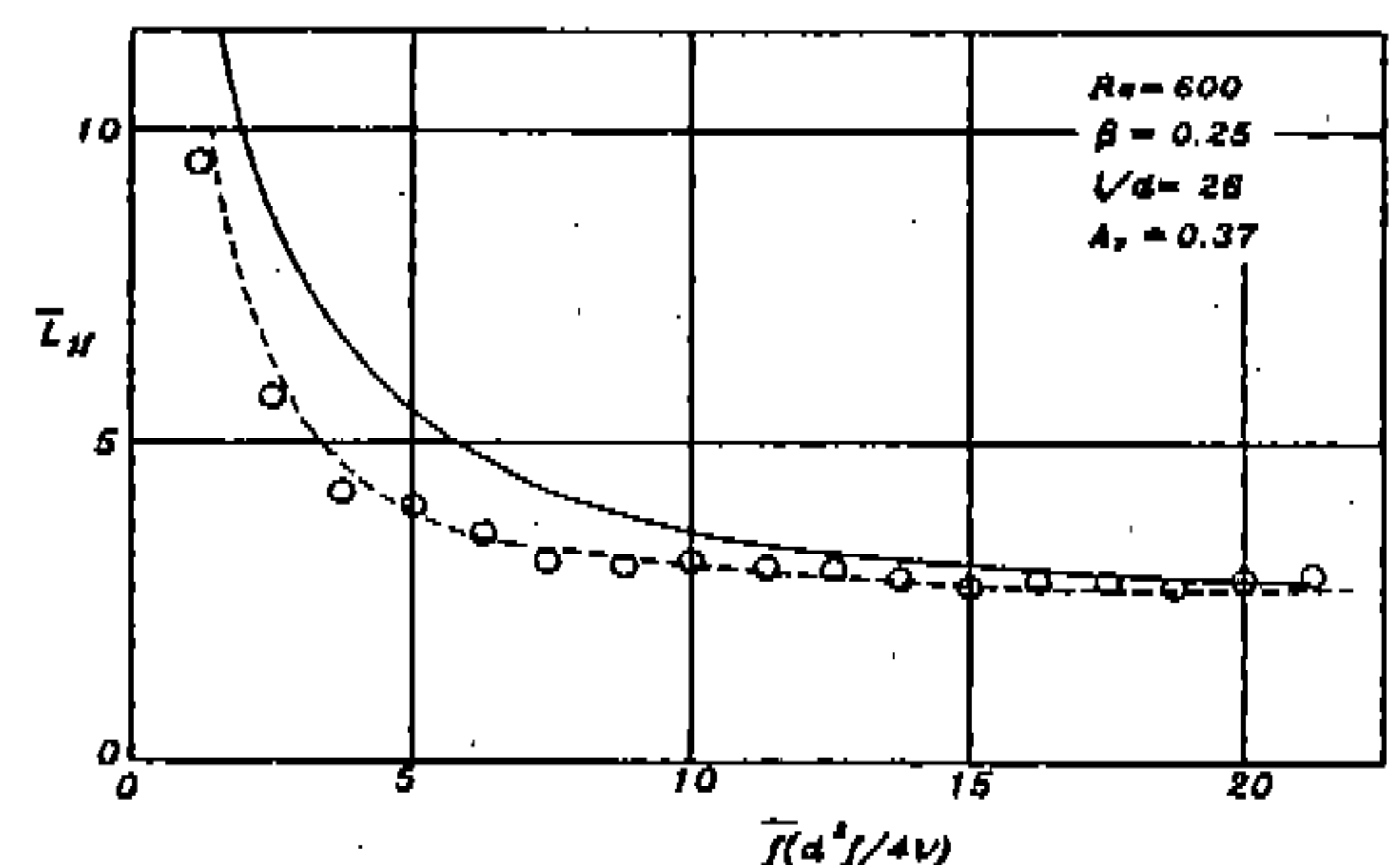


Fig.13 Collapse length of pulsating flow

서 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 교축부를 통과한 맥동성분은 맥동(Pulse) 형태를 갖는 분류가 정상유동과 비교해서 짧은 거리에서 관벽면에 다시 부착됨을 알았다.
- 2) 교축부를 지난 영역을 분류영역, 혼합영역, 재충류영역으로 분리할 수 있다.
- 3) 교축부를 지난 균속도는 교축길이비 l/d 가 증가함에 따라 지수함수적으로 감소하고 있음을 알 수 있다.
- 4) 원통형 초크의 하류에서 압력을 측정할 때 2D까지는 반경방향의 속도를 무시할 수 있음을 알았다.
- 5) 교축부를 지나 유체입자가 관벽면에 다시 부착되는 거리는 교축길이비 l/d 가 짧을수록 작아짐을 알았다.
- 6) 원통형 초크의 교축부를 지닌 밀도확률은 재부착거리에 역비례한다.

참 고 문 헌

1. 横田, 中野 “圓筒形絞りの周波數特性”, 油壓と空氣, 13-3, p.199-205(1982).
2. 中野和夫, 横田眞一, 植山 幹夫 “圓管内瞬間流量計測手法”, 計測自動制御學會論文集, p. 427-427, 1984
3. 中野和夫, 横田眞一, 宮本 力 “油壓管路の動特性實驗による高周波用瞬間流量計測法の検討” 日本機械學會論文集, p.413-416, 1986
4. Ramamurti Shankar “Principle of Quantum Mechanics”, Yale University New Haven, Connecticut, p.91-110, 1980.
5. 송희성, 양자역학, 교학연구사, p.57-73, 1993.
6. S.Gasiorowicz “Quantum Physics”, University of Minnesota, p.26-39.
7. Herbert Goldstein “Classical Mechanics”, Addison Wesley Publishing Company, p. 339-437, 1980.
8. 고재휴 “역학”, 청문각, p.267-283, 1993
9. 横田, 中野, 田中 “圓筒形絞りを通過する振動流に関する研究”, 昭和59年秋季油空壓講演會論文集, 21/24, 1984.
10. 横田, 中野, 田中 “圓筒形絞りの噴流領域における振動流の舉動(第2報 數値解析)”, 油壓と空氣壓 第17卷 第6號, 昭和 61年