



垂直入荷 配管의 流體調整裝置(上)

—震動 防止策 模型實驗結果—

(Flow Control Device for Filling Vertical Pipe Running to Storage Cavity)

正友엔지니어링(株) 化工部長 韓 正 洙*

1. 서 론

금반 우리나라에서도 지하암반을 굴착하여 만든 암반공동(Rock Cavern)에 원유 및 LPG를 저장하는 암반공동저유시설(Cavern Storage Facilities)을 설치하여 대용량의 원유 및 LPG등을 저장할 수 있게 되었다.

이의 시설에서는 일반 지상저유시설과는 달리 수십 m 또는 100m가 넘는 긴 수직배관(Inpumping Shaft)을 통하여 원유가 Cavern 내로 저장되기 때문에 일반 배관으로서는 원유 입하시킨 수두(Head)로 인한 Shaft 내의 진공발생 및 이로인한 진동현상을 방지할 수 없게 된다.

본 연구는 이의 방지를 위한 유체 흐름의 현상 파악 및 그 흐름을 조절할 수 있는 장치를 개설키고자 함에 있다.

이를 위하여 모형을 만들어 실험하였고, 그 결과가 이론식과 잘 부합된다는 사실이 증명되었다. 결국 원형에서의 장치를 설계하는데 이론적인 뒷받침이 될 수 있었다.

저유동굴은 여기에 연결된 긴 수직 배관을 통하여 지상에서부터 원유가 입하된다. System 설계로부터 이 배관은 직경 30in, 길이 63m로 정

해졌으며, 입하 유량은 3,250~11,000m³/hr 범위이다.

Pumping 시설은 보통 수직배관 상부에서의 압력이 포화 증기압과 같거나, 약간 큰 압력이 되도록 설계한다.

하부 측 저유동굴 자체에서의 기/액 평형을 고려하면, 수직배관을 따라 흐르는 유체는 포화 증기압 보다 낮은 압력이 되는데, 그 결과 Head에 상응하는 위치에너지가 소멸되는 불안정한 Cascade 모양의 증발을 포함한 Two-phase down flow(Slug flow)가 된다. 이러한 흐름은 매우 바람직하지 못한 진동을 야기시킨다. 따라서 본 연구의 목적은, 하향흐름이 액체는 관벽주위에 얇은 Annular liquid film을 형성하면서 흐르고, 기체는 관 중심에 남게되는 Separate phase가 될 수 있도록 수직배관에서의 흐름을 형성시키는 데 있다.

본 연구는 Vapor core가 만들어질 때 발생하는 열역학적 현상은 배제한다. 또한 진동정도를 직접 관찰하는 관점에서의 어떠한 Pipe support의 유사성이나 유연성을 시도하거나 재현하지 않는다.

본 연구는 물/공기를 사용한 모형에서의 순수한 수력학적인 유사성을 연구하는데 국한 한다.

* 化工技術士(化學裝置 및 設備)

그 목적은 가능한한 오래 Annular flow가 안정하게 존속할 수 있는 Flow-control device를 조정하고 최적화 하는데 있다. 그러므로 이 모형은 Reynold's Number의 최소한의 감소와 Froude Similarity에 근거하게 된다.

배관내에 원추형 장애물을 설치하여 관벽에 Annular film을 억지로 형성하고자 한 실험에서는, 흐름이 있는 동안 수직배관내에 Annular film을 안정하게 형성되도록 하는 것이 매우 어렵다는 것과, 불안정한 어떤 요소가 불안정한 Mixed flow로 급선회시키는 경향이 있다는 것이 주목되었다. 그러한 불안정성에 대처하기 위해서는 힘의 다른 분야 즉 미리 Liquid rotation에 의한 원심력을 만들어 낼 필요가 있었다. 이 렇게 하기 위하여 흐름의 일부 또는 전부를 Tangential 방향으로 주입하는 실험을 실시하였으며, 그 결과 중요한 결론에 도달할 수 있었다. (Steam Turbine 전문 제작회사인 볼란서의 N-EYRPIC에서 실시한 실험에 근거하였음)

2. General

2.1 Model Study Conditions

이미 언급한 바와 같이 금번연구는 기/액 경계면에서의 질량전달현상(비등 또는 응축)은 취급하지 않는다. 단순히 수직배관의 상부가 그 운전온도에서 포화 증기압이 형성된 것으로 간주하고, 최소한의 압력강하가 Vapor 공간(여기서는 자연적으로 유입되는 공기로 대체하여 실험하였음)을 만들것으로 가정한다.

수직배관의 각 구간에서의 Vapor 흐름은 새로운 수력학적 조건에 즉시 대처하기 위하여 상의 변화를 일으키면서 변화될 것이다. 특히 자유표면에서의 진화현상이 그러하다. 물론 이 문제의 열역학적 양상은 여기서는 고려치 않는다.

또한 모형배관이 완전히 단단한 것이므로 구조물의 진동과 내부 흐름사이의 상호작용을 유발할 수력학적 탄력특성 역시 고려치 않는다.

모형에서 상기의 양현상을 재현한다는 것은 굉장한 실질적인 문제점을 갖게 될 것이다. 포화 조건하에서 실험될 수 있는 유체의 선택 또는 구조물 및 Flange 연결부의 선택에 있어서 특히

주의하여야 하는데 그것은 복잡한 Similarity 조건을 요구할 것이다.

반대로 단순화하기 위하여 물/공기 유체와 단단한 배관을 가정하면 중요한 현상은 매우 간단한 Similarity를 사용하므로써 재현될 수 있으며, 이 단순화는 첫번째 조사를 위하여는 적절한 것으로 고려될 수 있다.

따라서 Froude Number로 표현되는 관성과 중력과의 비가 모형에 적용된다.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}}$$

반면 모형에서의 흐름은 매우 큰 난류이므로 Reynold's Number, $Re = Dv/\nu$ 에 대한 비점도 ν 의 영향이 무시되는 그러한 Reynold's Number가 유지된다.

사실 마찰은 관벽주위의 Liquid film 두께를 제한하는 중요한 영향력을 가졌다. 그러므로 마찰계수가 원형에서의 값과 같은 정도의 크기를 갖도록 하는 것이 원칙이다. 실험실의 제한된 높이(10m)를 고려하면서 가장 큰 Z/D Diameter를 얻기 위하여는 모형의 직경이 작아져야 한다. 직경 54mm면, 마찰현상이 모형과 원형에서 동일한 그러한 Reynold's Number를 유지하면서 150 Diameter를 얻는 것이 가능하다. 원형의 직경이 739.7mm이므로

$$\bar{D} = 0.073 (= 54/739.7)$$

$$\bar{V} = \bar{D}^{\frac{1}{2}} = 0.27$$

$$\bar{Q} = \bar{V}\bar{D}^2 = \bar{D}^{\frac{5}{2}} = 0.00144$$

$$\bar{\partial P} = \rho \bar{V}^2 = 0.0855$$

원형과 모형에서의 운전조건은 다음과 같다.

	원 형	모 형
<u>Dimension</u>		
Pipe diameter	739.7mm	54mm
Vertical flow length	63m(85D)	8mm(150D)
<u>Physical Properties</u>		
Specific mass	853kg/m ³	1000kg/m ³
Kinetic velocity	8.7×10 ⁻⁶ m ² /s	1.2×10 ⁻⁶ m ² /s
<u>Filling Rate</u>		
Volume	3,250~11,000 m ³ /hr	1.3~4.4l/s

2.2 Test Loop

Fig. 1에 모형을 나타냈으며 그 중요항목은 다음과 같다.

—내경 54mm, 높이 8m의 투명 프라스틱관으로 되어있는 수직 직관부, 투시가 되는 것 외에 관내의 흐름을 묘사하기 위하여 여러 위치에 Probe를 설치하였다.

—원형대서와 같이 배관 말단이 잠기게 하기 위한 집수조

—유량측정 장치와 밸브가 부착된 2-Branch로 갈라지는 수평 공급관

• 54 Diameter의 Axial supply branch (90° Elbow)

• 유체 회전을 위한 Tangential supply branch 여러 단면을 갖는 Tangential flow inlet가 실험되었는데 주로 10mm×40mm, 10mm×94mm 및 20mm×100mm이다.

—외경이 39 및 29.7mm로 조정될 수 있어 각각 7.5 및 12.15mm 두께의 Annular 공간을 만들 수 있는 원추형 장애물.

• 이와 같이 단면적을 줄이는 목적은 이 장애물을 떠나는 시점에서 가능한 한 정상상태에 가까운 조건을 만들기 위함이다. (2.4 및 2.5항 참조)

이 원추형 장애물 아래에서는 흐름이 자연스럽게 유입되는 공기와 접촉하게 되는데, 이는 원형에서의 흐름이 포화 증기압 이하의 압력강하에 의하여 Vapor를 발생하게 되는 것을 모방하기 위함이다.

중요 측정기기는 다음과 같다.

—총유량(Axial+Tangential)을 지시하는 0~6l/s 범위의 Ventri type 유량계

—Tangential 방향으로 주입되는 유량을 측정하기 위한 0~6l/s 범위의 Electromagnetic 유량계

—유입되는 공기량을 측정하기 위하여, 장애물의 배기관에서의 공기속도를 기록하는 Hot-Wire 풍력계

—Elbow 상부의 주배관에서의 압력측정

—흐름이 54 Diameter 관에 Tangential 방향으로 주입되는 지점으로부터 200mm 상부쪽의

Tangential supply 관에서의 압력측정

여기에 더하여 Pitot probe가 사용되었다.

• 수직배관의 주어진 단면에서의 Annular flow의 잔존여부를 확인하기 위하여(중심부의 Gas core)

• Tangential supply inlet에서 80mm 상부쪽에서의 Velocity profile을 결정하기 위하여

수직배관을 따라 흘러 내리는 Annular film의 속도를 측정하는 것이 흥미있는 일이지만 Film 두께가 좁고(약 7~8mm) Probe로 인해 흐름이 쉽게 교란되기 때문에 이것을 측정한다는 것이 쉽지 않다. Film 두께를 측정하는 것도 Film 두께에 비하여 Probe size가 상당히 크므로 매우 정확치 못한 것이 사실이다.

그래서 이러한 종류의 측정은 피하였으며 대신 수직선과 Velocity vector로서 이루어지는 각도 α 를 외부에서 측정하는 간단한 방법으로 대체하였다. 이 각도는 매우 쉽게 얻을 수 있는데 유체 파동 때문에 측량의 정확도가 약 $\pm 2\sim 3^\circ$ 로 되었다.

2.3 Results

각기의 기하학적 수치에 대한 실험결과를 Table에 나타내었다.

Q : 총유량, l/s

Q_a : Tangential 방향으로 주입된량, l/s

α_0 ; EL. Z=0(장애물 바로 아래)에서의 수직선에 대한 흐름각도, degrees

$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_6$; EL. Z=6.8D, 10.3D, 20.3D, 48.5D, 70D 및 90D에서의 흐름각도 α

Z=75D, 95D, 115D 및 135D에서 Pitot Probe에 의하여 흐름의 형태가 측정되었다.

ANN	Annular
LIM	Limit
M	Mixed

Q_a : 흡수된 공기량, l/s

P_a : Air Core에서의 압력, kg/cm² A

P_t : Tangential inlet에서 200mm 상부지점의 압력, kg/cm²

$\frac{\rho V_t^2}{2g_c}$; Tangential inlet에서의 Dynamic

Pressure, kg/cm²

$$\partial p = P_t + \frac{\rho V_t^2}{2g_c} - P_a; \text{ Tangential supply를}$$

위한 총구동압력, kg/cm²

$$k = \frac{\rho V_t^2 / 2g_c}{\partial p}; \text{ Tangential inlet에 해당하는}$$

Head loss factor

2.4 Theoretical Description of Annular Flow

직경 D, Swirling flow Q, 수직선과 속도 V가 각도 α 를 만들어내는 안정된 Annular flow의 특성을 고찰해 보자.

V_m 을 Meridional velocity라 할 때 $V_m = V \cos \alpha$ 가 되며 Swirl component $V\alpha$ 는 $V \sin \alpha$ 가 된다.

옆 그림에서 보듯이 P점은 중력가속도 g 와 원심가속도 $V\alpha^2/\gamma$ 에 관한 것이며 모든 것은 마치 흐름이 중력장 τ 안에 있는 것처럼 나타난다. 전 Film에서의 상수 $\tan \beta$ 와 τ 를 얻기 위하여 $e \ll R$ 이라는 관계가 항상 유지된다고 가정한다.

두번째 그림에서 보듯이 Channel bottom에서의 기울기는

$$\tan \beta = \frac{g \cdot R}{V\alpha^2} \text{ 이고}$$

새 중력 가속도는

$$\tau = \sqrt{g^2 + V\alpha^4/R^2}$$

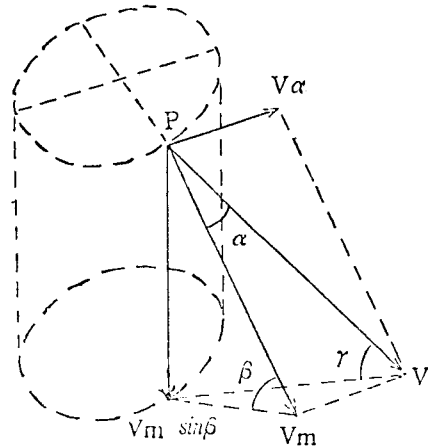
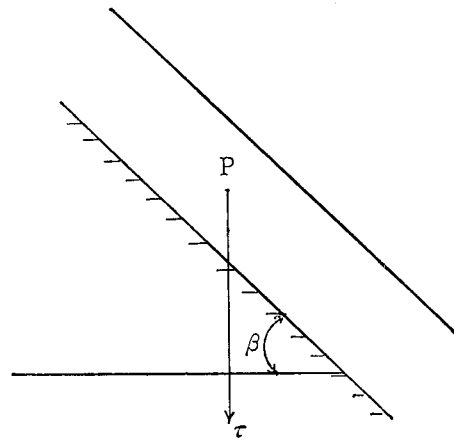
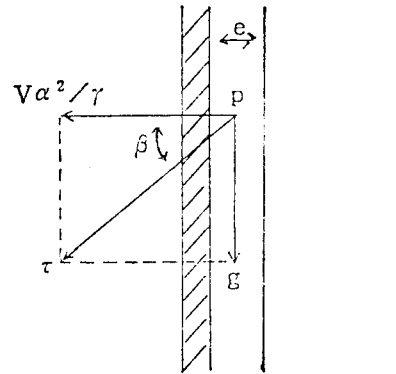
결국 새 Channel에서는 가장 큰 기울기를 갖는 선(Vector V_m 에 해당)과 각도 α 를 형성하면서 흐른다. 흐름의 중력방향의 속도비는 다음과 같다. (세번째 그림)

$$i = \sin \gamma = \frac{V_m \cdot \sin \beta}{V} = \cos \alpha \cdot \sin \beta$$

상기의 관점으로 볼때, Film의 정상 두께는 Channel이 무한히 큰 것으로 고려할 때의 정상 상태 조건하에서 통상적인 방법에 의하여 계산될 수 있다. 폭 $2\pi R$, 길이 dz , 두께 e 인 Space element의 Channel bottom에서의 마찰력은

$$F_o 2\pi R dz = (f/4) \frac{\rho v^2}{2g_c} \cdot 2\pi R dz \quad f; \text{ Moody}$$

friction factor, 중력은 $\rho \cdot 2\pi R e dz (\tau/g_c) \cdot i = \rho \cdot 2\pi R e dz (\tau/g_c) \cos \alpha \cdot \sin \beta$, 중력과 마찰력이



평형을 이루므로

$$\frac{f \cdot \rho \cdot V^2}{8g_c} \cdot 2\pi R dz = \rho \cdot 2\pi R e dz (\tau/g_c) \cos$$

$$\alpha \cdot \sin \beta$$

$$\therefore \frac{f V^2}{8} = \tau e \cos \alpha \cdot \sin \beta = g e \cos \alpha$$

$Q = 2\pi R e \cdot V_m = 2\pi R e \cdot V \cdot \cos \alpha$ 를 대입하면

$$\frac{fQ^2}{32\pi^2 R^2 e^2 \cos^2 \alpha} = g e \cos \alpha$$

$$\therefore e = \left[\frac{f}{8g} \frac{Q^2}{\pi^2 D^2} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{\cos \alpha} = \frac{e_{sr}}{\cos \alpha}$$

.....[1]

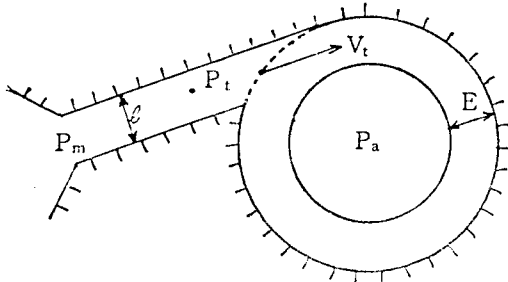
e_{sr} ; Swirl이 없을 때의 정상상태 조건하에서의 Film 두께이다.

2.5 Formation of Annular Flow From a Tangential Inlet

상기에서 언급한 정상상태 조건하에서는 중력과 마찰력은 균형을 유지한다. 지금 높이 h , 폭 l 인 직사각형의 Opening에 의하여 발생하는 Swirl을 생각하자.

초기의 두께 E 는 대략 Opening size l 과 같고 Swirl 속도는 일정하며 Opening을 통과한 속도와 같다고 합리적으로 가정할 수 있을 것이다.

$$V_t = \frac{Q}{l \cdot h}$$



흐름의 주입압력 P_t 는 반경 R 인 관에서의 Swirl에 의하여 유도된 원심력을 보상하여야 한다.

$$P_t = P_a + \int_{R-E}^R \frac{\rho}{g_c} \frac{V_t^2}{r} dr$$

V_t 가 일정하므로

$$P_t = P_a + \frac{\rho}{g_c} V_t^2 \log \frac{R}{R-E}$$

흐름에 필요한 압력은

$$P_m = P_t + \frac{\rho V_t^2}{2g_c} = P_a + \frac{\rho V_t^2}{2g_c}$$

$$(1 + 2 \log \frac{R}{R-l})$$

$$= P_a + \frac{\rho Q^2}{2g_c l^2 h^2} (1 + 2 \log \frac{R}{R-l})$$

$$\text{Head loss factor, } k = 1 + 2 \log \frac{R}{R-l}$$

동일한 속도 V_t 는 여러 가지의 l 값에 대해 동시에 h 를 조정하므로써 얻어진다. Swirl로 인한 Head loss는 다음과 같다.

$$P_m - P_a = \frac{\rho Q^2}{g_c h^2 R^2} \frac{R^2}{l^2} \left[\log \frac{R}{R-l} + \frac{1}{2} \right]$$

.....[2]

정해진 유량에 대하여 이 Head loss를 최소화하기 위하여는 $\frac{R^2}{l^2} \left[\log \frac{R}{R-l} + \frac{1}{2} \right]$ 이 최소가 되는 l 을 선택하여야 한다. 이것은 $l/R = 0.81$ 에 해당된다.

그래서 필요한 속도 V_t 를 얻을 수 있도록 h 를 조정하는 것이 가능하며 필요한 Kinetic momentum을 유도하는 것이 가능하여진다. 실질적으로 Kinetic momentum이 일정하게 유지되도록 정상상태 조건이 설정된다. E 가 보통 e 보다 큰 것을 고려하면 Swirl Velocity V_{α_0} 는 V_t 보다 약간 작을 것이다.

$$V_{\alpha_0} \approx V_t \frac{R-l/2}{R-e/2} = V_t \frac{(1-l/D)}{(e \text{가 작을 때})}$$

.....[3]

$$\text{따라서 } \tan \alpha_0 = \frac{V_{\alpha_0}}{V_m} = \frac{V_{\alpha_0}}{Q/2\pi R \cdot e}$$

$$= \frac{V_{\alpha_0} 2\pi R e_r}{Q \cos \alpha_0}$$

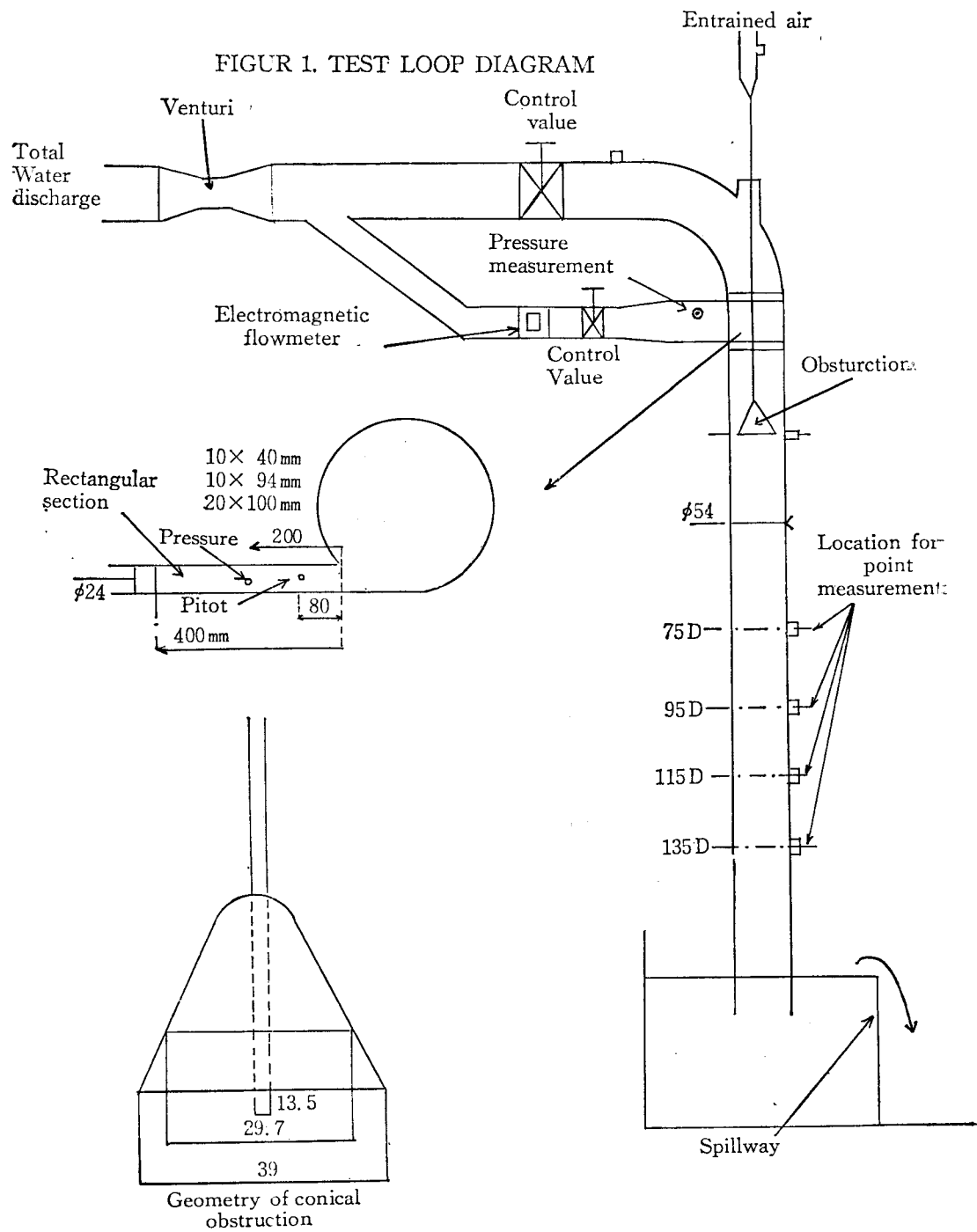
$$\therefore \sin \alpha_0 = \frac{2\pi R e_r V_t (1-l/D)}{Q}$$

$$= \frac{V_t (1-l/D)}{V_{msr}}$$

.....[4]

V_{msr} 은 Swirl이 없을 때의 Meridional falling velocity이다.

물론 이 표현은 $e \ll R$ 이고 따라서 α 가 작은 값일 때만 가치가 있다. 이것으로 각도가 마찰 영향으로 변하기 이전의 초기각도 α_0 를 구할 수 있다.



<Table 1> Test Results For Mixed Supply (Axial and Tangential)

Geometry of device	Water disch- arge		Flow angles about vertical line						Probes				Entrained air		Device head loss				
	Q	Q _i /Q	α ₀ z=0	α ₁ 6.8D	α ₂ 10.3D	α ₃ 20.3D	α ₄ 48.5D	α ₅ 70D	α ₆ 90D	75D	95D	115D	135D	Q _a /Q	P _a	P _i	ρV _i ² / 2	δ _P	K
Obstruction φ 39mm Tangential opening 10×40mm ²	2.62	1.55	—	14	11	6	4	—	—	ANN	ANN	M	M	2.26	0.86	1.033	0.075	0.120	1.60
	3.49	1.76	—	9	9	4	2	—	—	ANN	ANN	M	M	3.25	0.93	1.035	0.097	0.158	1.63
	4.19	1.68	—	6	8	5	3	—	—	ANN	ANN	LIM	M	3.63	0.87	0.961	0.088	0.126	1.43
	6.03	1.95	—	6	4	3	2	—	—	—	—	—	—	4.67	0.77	0.929	0.119	0.229	1.92
Obstruction φ 29.7mm Tangential opening 10×40mm ²	2.62	1.55	15	9	9	8	4	1	—	ANN	ANN	M	M	2.32	0.89	0.987	0.075	0.108	1.44
	3.49	1.76	18	16	13	8	5	1	—	ANN	ANN	M	M	3.07	0.88	0.970	0.097	0.137	1.41
	4.19	1.68	11	7	7	6	2	1	—	ANN	ANN	M	M	3.42	0.82	0.954	0.088	0.090	1.02
	6.03	1.95	—	5	5	3	2	0	—	ANN	M	M	M	4.58	0.76	0.913	0.090	0.156	1.31

<Table 2> Test Results for Tangential Supply.

Geometry of device	Water disch- arge		Flow angles about vertical line						Probes				Entrained air		Device head loss					
	Q	Q _i /Q	α ₀ z=0	α ₁ 6.8D	α ₂ 10.3D	α ₃ 20.3D	α ₄ 48.5D	α ₅ 70D	α ₆ 90D	75D	95D	115D	135D	Q _a /Q	P _a	P _i	ρV _i ² / 2	δ _P	K	
																				Q
Obstruction φ 39mm Tangential opening 10×40mm ²	2.25	2.25	1							LIM?	M?	M	M			1.06				
	3.1	3.1	1							LIM?	M?	M	M			1.18				
	3.9	3.9	1							LIM?	M?	M	M		0.962	1.24	0.475	0.753	1.59	
	5.1	5.1	1							ANN	ANN	LIM	M		0.947	1.52	0.813	1.386	1.70	
Obstruction φ 29.7mm Tangential opening 10×94mm ²	2	2	1							ANN	LIM	M	M	1.12	0.56	—	1.004	—	—	
	4	4	1	28	23	14	8	3		ANN	ANN	M	M	2.86	0.71	0.963	1.075	0.0905	0.202	2.24
	6	6	1	32	31	18	10	7		3ANN	ANN	ANN	M	3.19	0.53	0.951	1.265	0.204	0.518	2.54
Obstruction φ 29.7mm Tangential opening 20×100mm ²	2	2	1	14	8	6	4	1		ANN	LIM	M	M	1.28	0.64	—	—	—	—	
	4	4	1	18	12	8	5	2		ANN	ANN	M	M	2.9	0.73	0.956	0.997	0.020	0.061	3.05
	6	6	1	28	15	10	7	4		2ANN	ANN	M	M	3.58	0.59	0.934	1.075	0.045	0.186	4.13
Obstruction NONE Tangential opening 20×100mm ²	2	2	1	18	10	5	4	1		ANN	LIM	M	M	1.17	0.58	—	0.998	—	—	
	4	4	1	22	14	8	5	2		ANN	ANN	M	M	2.74	0.68	0.94	0.991	0.020	0.071	3.55
	6	6	1	27	17	11	7	4		2ANN	ANN	M	M	3.02	0.50	0.909	1.034	0.045	0.170	3.78

<Table 3>

Swirl Decay With Distance.

Geometry of device	Q_{total} l/s	Q_{tan} l/s	$\tan \alpha / \tan \alpha_0$						
			$z=0$	$6.8D$	$10.3D$	$20.3D$	$48.5D$	$70D$	$90D$
Obstruction ϕ 29.7mm	2.62	1.55	1	0.59	0.59	0.52	0.26	0.07	
Tangential inlet	3.49	1.76	1	0.88	0.71	0.43	0.22	0.05	
$10 \times 40 \text{mm}^2$	4.19	1.68	1	0.63	0.63	0.54	0.18	0.09	
Obstruction ϕ 29.7mm	2	2	1	—	—	—	—	—	—
Tangential inlet	4	4	1	0.88	0.80	0.47	0.23	0.10	—
$10 \times 94 \text{mm}^2$	6	6	1	0.96	0.96	0.52	0.31	0.20	0.08
Obstruction ϕ 29.7mm	2	2	1	0.54	0.54	0.27	0.16	—	—
Tangential inlet	4	4	1	0.62	0.66	0.35	0.22	0.09	—
$20 \times 100 \text{mm}^2$	6	6	1	0.71	0.60	0.38	0.17	0.14	0.07
Without obstruction	2	2	1	0.78	0.56	0.42	0.28	0.07	—
Tangential inlet	4	4	1	0.88	0.65	0.43	0.22	0.11	—
$20 \times 100 \text{mm}^2$	6	6	1	0.61	0.50	0.33	0.16	0.13	0.07
Design value	2	2	1	0.80	0.71	0.51	0.20	0.10	0.05
Without obstruction	4	4	1	0.82	0.74	0.55	0.24	0.13	0.07
Tangential inlet	6	6	1	0.83	0.76	0.58	0.27	0.14	0.08
$20 \times 100 \text{mm}^2$									