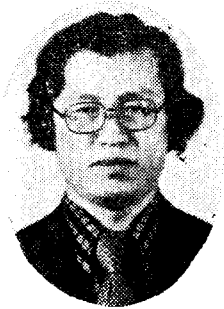


# 垂直入荷 配管의 流體調整裝置(下)



—震動 防止策 模型實驗結果—  
(Flow Control Device for Filling Vertical  
Pipe Running to Storage Cavity)

정우석 단화학부장 韓 正 洙\*

### 3. Induced Swirl Through Tangential Inlet

Tangential inlet가 Swirl를 일으키는 가장 간단한 방법중의 하나이다. 이것은 수직배관의 정상에서만 사용될 수 있다.

#### 3.1 MIXED AXIAL AND TANGENTIAL SUPPLY

Annular flow가 전길이에 걸쳐 유지될 수 있도록 하기 위한 최소 Tangential discharge를 여러가지의 총유량에 대해서 측정 하였다.

TABLE I에 모든 실험결과를 기록 하였으며 그 결론은 다음과 같다.

Annular film의 두께는 Tangential inlet에 의하여 유도되는 Kinetic momentum에 의한다 는 것이 확실하므로 장애물의 직경은 그다지 중요한 것 같지 않다. Annular flow는 모든 유량에 대해서 약 95 Diameter 이상 까지 존재하였다. 회전각도는 서로서로가 비슷하였다. 흡수된 공기에 의해 Air core가 사라진 후에도 Mixed Air/Water flow가 약 50 Diameter까지 계속되는데, 흡수된 공기량은 각 경우에 있어서  $Q_a/Q=0.8$ 로 동일 하였다. System의

Head loss는 원형에서의 핀런 수치가  $0.7\text{kg/cm}^2$ 를 넘지 않으므로 상당히 받아들일 수 있는 것이었다.

비록 Tangential/Total discharge ratio가 실험에서 일정하지 않더라도, 적은 유량에 대해서 Annular flow length를 약간 줄여 줌으로써 이 System의  $Q_a/Q$ 를 약 0.4로 유지 할 수 있다. Tangential inlet에 의해 생성된 Swirl이 Axial flow로 인해 소멸되므로 사실 Axial방향과 Tangential 방향으로 혼합하여 주입하는 것은 적당치 못하다.

#### 3.2 TANGENTIAL SUPPLY ONLY-ALTERNATIVES

TABLE II에 모든 결과를 나타내었다.

10mm×40mm의 Opening을 통한 Tangential supply는 막대한 압력(원형에서 유량10,000m<sup>3</sup>/hr시의 대응 압력손실  $8.8\text{kg/cm}^2$ )을 요구하므로 시험을 완성하지 못하였다.

보다 더 적합한 2개의 Tangential supply가 실험되었다. 첫번째 Supply(10mm×94mm)가 두번째(20mm×100mm)보다 약간 큰 Swirl을 만들어 냈으나 Annular length에서 별이득이 없음을 알 수 있었다. 반대로 Head loss가 훨씬 더 중요하게 되었다. (원형에서 유량 10,000

\* 化工技術士(化學裝置 및 設備)

m<sup>3</sup>/hr 시의 대응압력손실 2.4kg/cm<sup>2</sup>대 0.7kg/cm<sup>2</sup>) 따라서 두번째 Tangential supply가 채택되어 장애물 없이 하는 실험을 계속하였으며, 그결과 장애물이 필요없음을 알 수 있었다.

사실 장애물은 Axial supply 나 혹은 Tangential inlet가 없는 것에서는 물이 직접 관 중앙으로 떨어지지 않게하기 위하여 필수적으로 있어야 하지만, 반대로 완전한 Swirl이 유도됨으로써 흐름을 관벽에 밀착시키는 것은 어떤 장애물의 실존이 아니라 원심 동작인 것이다.

**Comment 1**

Head loss factor, K는 여러 실험치와 2.5항에서 유도한 이론치가 잘 맞음을 알 수 있다.

$$K=1+2\log\frac{R}{R-l}$$

$$K=1.92 \text{ for } l=10\text{mm}$$

$$K=3.70 \text{ for } l=20\text{mm}$$

TABLE 1을 보면 약간의 편차가 나타났는데, 이것은 Axial flow로 인한 약간의 교란 때문에 Head loss에 대해 장애물이 영향을 끼쳤기 때문이다. 그러나, TABLE II는 실험치와 이론치가 잘 부합함을 나타낸다.

**Comment 2**

Tangential inlet에 의한 Swirl역시 2.5항으로부터 유도될 수 있다. 하여튼 각 경우에 있어서 장애물은 영향력이 없다는 것을 확실히 해둘 필요가 있다. 이것은 20mm×100mm Opening과 10mm×94mm Opening에 대한 결과에서 확인된다. 더구나 각도 α역시 e≪R이라는 가정이 만족될 만큼 충분히 작다는 것도 확인할 필요가 있다.

상기의 관점에서 볼때 공식[4]를 장애물없는 20mm×100mm Opening에 적용시킬 수 있고, 그결과 다음과 같은 실제적인 값이 얻어진다.

Q (l/s)	Vt (m/s)	f	e <sub>sr</sub> (mm)	Vmsr (m/s)	α <sub>0</sub> (degrees)
2	1	0.0227	3.68	3.44	11
4	2	0.0187	5.73	4.61	16
6	3	0.0170	7.51	5.47	20

Remarks : 두께가 상기와 같이 계산되었는데 이는 공식[1]에 의해서가 아니라 e가 R에 대해 무시되지 않은 정확한 표현에 의한 것이다.

$$\frac{D-e_{sr}}{D} \cdot e_{sr} = \left[ \frac{f}{8g} \cdot \frac{Q^2}{\pi^2 D^2} \right]^{1/3} \dots\dots\dots [5]$$

$$f = 0.34 \left[ \frac{4Q}{\pi \nu (D-e_{sr})} \right]^{-0.25} \dots\dots\dots [6]$$

$$\text{그리고 } V_{msr} = \frac{Q}{\pi e_{sr} (D-e_{sr})} \dots\dots\dots [7]$$

한편 α<sub>0</sub>는 e≪R이라고 가정한[4]로부터 직접 얻는다.

$$\sin \alpha_0 = \frac{Vt}{V_{msr}} \left( 1 - \frac{l}{D} \right)$$

가정 e≪R은 확실히 [4]에 어떤 영향을 미치고(6l/s시 e/R=30%) 보다 큰 Swirl에서는 [4]를 전연 적용시킬 수 없다는 것은 분명한 일이다.

하여튼 다음과 같은 결론이 얻어진다.

e<sub>sr</sub>은 대략 유량 Q의 0.6승에 비례한다.

V<sub>sr</sub>은 대략 유량 Q의 0.4승에 비례한다.

Vt는 대략 유량 Q에 비례한다.

폭 l인 Tangential inlet에 대하여 sin α<sub>0</sub>는 Q의 0.6승에 비례한다. 따라서 각도 α<sub>0</sub>는 대략 Q의 0.5승으로 변화한다. TABLE I, II를 보면 이러한 관계가 분명함을 알 수 있다. 또한 흐름은 적은 유량에서 보다 많은 유량에서, 보다 긴 구간에서 Annular flow가 되는데 이것 역시 실험적으로 증명되었다.

따라서 주어진 시설의 칫수를 정함에 있어서는 배관계통의 어떤 진동이 위험스럽지 않게 되는 점 이하로 한계 유량을 고려하여야 한다.

**Comment 3**

Z/D항에 따른 α의 감소현상을 TABLE I, II에 나타내었다. Kreith와 Sonju는 비록 Full-section flow에 적용시킨 것이지만 다음과 같은 Evolution law를 제시하였다.

$$\tan \alpha / \tan \alpha_0 = \exp \left[ - \frac{33.4(1+\epsilon) \cdot 2(Z/D)}{Re} \right] \dots\dots [8]$$

$$\epsilon = 4.15 \times 10^{-3} \times \frac{Re^{0.86}}{2} \text{ for Turbulent}$$

diffusivity

Q (l/s)	e <sub>sr</sub> (mm)	Vmsr (m/s)	α <sub>0</sub> (degrees)	*D <sub>H</sub> (mm)	**Re	ε
2	3.68	3.44	11	13.7	39, 270	18.5
4	5.73	4.61	16	20.5	78, 750	33.7
6	7.51	5.47	20	25.9	118, 060	47.8

20mm×100mm Opening 에 대해서 각유량에 대한  $\tan \alpha / \tan \alpha_0$  는 다음과 같다.

$$*D_H = 4 \cdot \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4\pi D} = \frac{D^2 - d^2}{D} = \frac{D^2 - (D - 2e_s)^2}{D}$$

Hydraulic diameter

$$**Re = \frac{D_H V_{msr}}{\nu}$$

$$\tan \alpha / \tan \alpha_0 = e^{-0.0352(Z/D)} \text{ for } Q=2l/s$$

$$\tan \alpha / \tan \alpha_0 = e^{-0.0234(Z/D)} \text{ for } Q=4l/s$$

$$\tan \alpha / \tan \alpha_0 = e^{-0.0276(Z/D)} \text{ for } Q=6l/s$$

TABLE III 을 보면 Swirl decay 가 측정이 불확실함에도 불구하고 상기 관련식이 잘 적용됨을 알 수 있다.

FIG2, 3 은  $\alpha(Z)$  의 변화를 측정 한 것이다.

### 3.3 VELOCITY PROFILE

Tangential opening 이 연결되는 Filling pipe 의 정확한 기하형태를 규격대로 재현하는 것은 불가능하기 때문에 Opening 상부 80mm 지점에서 Velocity profile 을 결정하기 위하여 Probe 를 사용하였다.

이 실험(FIG 4)에서는 Velocity profile 이 일정하지는 않지만 100mm 높이에 걸쳐 상당히 균일한 것으로 나타났다.

상기의 실험에 근거한 이론식에 따라 4항에서 원형에 대한 Tangential supply system 을 설계하였으며 FIG5 에 그 결과를 나타내었다.

## 결 론

수직배관에서 Swirl 을 발생시키면 안정한 Annular flow 를 얻을 수 있다는 것이 확인되었다. 배관이 적절한 Head loss 를 갖는 Swirling flow 로 이행되도록 Tangential inlet 를 연구하는데 특별한 주의가 주어져야 한다.

수직선과 약 20°의 각도를 만들어 내는 Swirl 은 100 Diameter 이상에서 흐름을 관벽에 밀착시키는 것이 가능하다.

이러한 방법으로 적어도 배관 정상에서 Mixed flow 에 의하여 발생될지도 모를 진동가능성을 상당히 줄여 줄수 있다.

여기서 언급한 실험은 물질전달의 열역학적

현상(비등 또는 응축)을 고려치 않는 물/공기 계통에 한한 것이었다는 것을 지적한다. 이 System 의 정확한 운전에 대한 완전한 보장은 Vapor 와 평형상태에 있는 액체를 사용하는 마지막 실험을 행한 후에야만 가능하다.

FIGURE 2. Variation of Flow Rotation Angle in Terms of Obstruction Distance

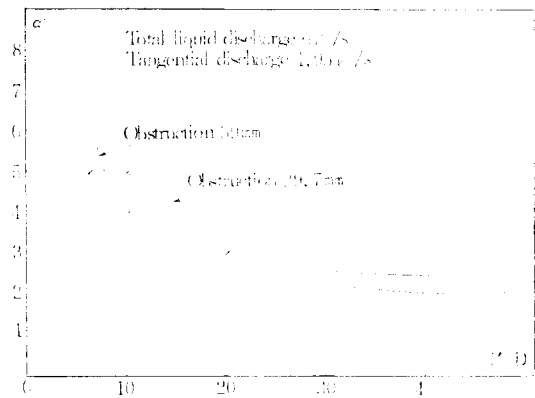
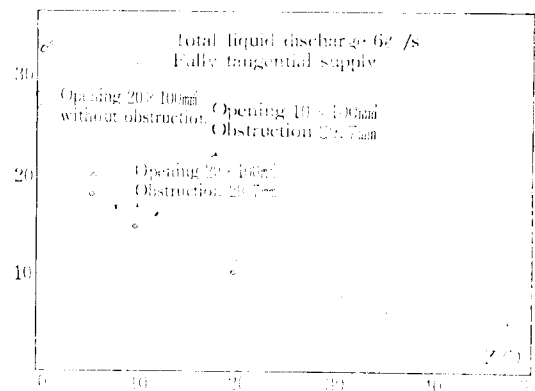


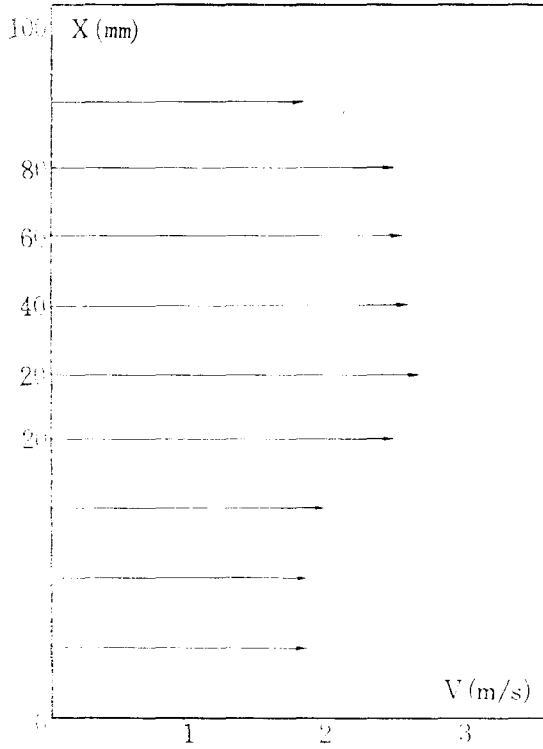
FIGURE 3. Variation of flow rotation angle in terms of obstruction distance



## 4. PROTOTYPE DEVICE—Tangential Supply System of Inpumping Shaft

직경 739.7mm,  $Z/D=85$  인 Inpumping shaft 에 비중  $853 \text{ kg/m}^3$ , 비점도  $8.7 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  인

FIGURE 4. Velocity profile 80mm upstream of the tangential inlet—cross section 20×100mm<sup>2</sup>



원유가 흐를때 진동이 없는 Tangential supply system 을 구상하여 보자.

우선  $l/R=0.81$  일 때 장치에 대한 Pressure drop 이 제일 적으므로

$l/R=0.81$   $l=0.81(0.7397/2)=0.3m$  로 한다.

입하량  $Q=11,000m^3/hr=3.056m^3/s$  때의 설 계치에 대한 Tangential inlet size 를 다음과 같 이 계산한다.

[5]식으로부터

$$\frac{D-e_{sr}}{D} \cdot e_{sr} = \left[ \frac{f}{8g} \cdot \frac{Q^2}{\pi^2 D^2} \right]^{1/3}$$

$$\frac{0.7397-e_{sr}}{0.7397} \cdot e_{sr} = \left[ \frac{f}{8 \times 9.8} \cdot \frac{3.056^2}{\pi^2 \cdot 0.7397^2} \right]^{1/3}$$

$$e_{sr} - \frac{e_{sr}^2}{0.7397} = (0.02208f)^{1/3}$$

[6]식으로부터

$$f = 0.34 \left[ \frac{4Q}{\pi \nu (D-e_{sr})} \right]^{-0.25}$$

$$= 0.34 \left[ \frac{4 \times 3.056}{\pi \times 8.7 \times 10^{-6} (0.7397-e_{sr})} \right]^{-0.25}$$

$$= 0.34 \left( \frac{0.4475 \times 10^6}{0.7397-e_{sr}} \right)^{-0.25}$$

[5]와 [6]식으로부터

$$e_{sr} - \frac{e_{sr}^2}{0.7397} = \left[ 0.02208 \times 0.34 \times \left( \frac{447,500}{0.7397-e_{sr}} \right)^{-0.25} \right]^{1/3}$$

$$= \frac{0.1958}{\left( \frac{447,500}{0.7397-e_{sr}} \right)^{0.0833}}$$

$e_{sr}$  은 Trial-error method 에 의하여 구한다.

$e_{sr}$	0.1m	0.08m	0.071m
과 변	0.0865	0.0713	0.0642
우 변	0.0638	0.0640	0.0641

$\therefore e_{sr}=0.071m$  로 정한다.

[7]식으로부터

$$V_{msr} = \frac{D}{\pi e_{sr} (D-e_{sr})}$$

$$= \frac{3.056}{\pi \times 0.071 (0.7397-0.071)} = 20.5m/s$$

$Z/D=85$  에서는  $\alpha_0$  가  $14^\circ$  정도이면 Annular flow 가 된다고 본다.

[4]식으로부터

$$\sin \alpha_0 = \frac{Vt}{V_{msr}} \left( 1 - \frac{l}{D} \right)$$

$$\sin 14^\circ = \frac{Vt}{20.5} \left( 1 - \frac{0.3}{0.7397} \right)$$

$$\therefore Vt = 8.3m/s$$

또한  $Vt = \frac{Q}{l \cdot h}$  이므로

$$h = \frac{Q}{Vt \cdot l} = \frac{3.056}{8.3 \times 0.3} = 1.2m$$

Shaft 바닥에서의 Swirl 의 각도는 [8]식에서 계 산될 수 있다.

$$D_H = \frac{D^2 - d^2}{D}$$

$$= \frac{0.7397^2 - (0.7397 - 2 \times 0.071)^2}{0.7397}$$

$$= 0.2567m$$

$$Re = \frac{D_H \cdot V_{msr}}{\nu} = \frac{0.2567 \times 20.5}{8.7 \times 10^{-6}}$$

$$=604,960$$

$$\epsilon = 4.15 \times 10^{-3} \times \frac{Re^{0.86}}{2}$$

$$= 4.15 \times 10^{-3} \times \frac{(604,960)^{0.86}}{2} = 194.7$$

$$\tan \alpha / \tan \alpha_0 = e^{-\frac{33.4(1+\epsilon) \cdot 2(Z/D)}{Re}}$$

$$\tan \alpha = (\tan \alpha_0) e^{-\frac{33.4(1+194.7) \cdot 2(85)}{604,960}}$$

$$= (\tan 14^\circ) e^{-1.8368} = 0.0397$$

$\therefore \alpha = 2.3^\circ$ 로 Annular flow 임을 알 수 있다.  
 상기와 같이  $l = 0.3\text{m}$ ,  $h = 1.2\text{m}$  인 Opening 을  
 갖는 Tangential supply system 의 Pressure  
 drop 은 다음과 같다.

[2]식으로부터

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

$$= \frac{853 \times 3.056^2}{2 \times 9.8 \times 0.3^2 \times 1.2^2} \times$$

$$\left( 1 + 2 \log \frac{0.3699}{0.3699 - 0.3} \right)$$

$$= 7670 \text{kg/m}^2 = 0.77 \text{kg/cm}^2 \text{ 로서 적}$$

당하다.

상기 시설로서 최소유량  $3,750 \text{m}^3/\text{hr} = 1.042 \text{m}^3/\text{s}$   
 일때의 결과치는 다음과 같다.

$e_{sr}$	$V_{msr}$	$V_t$	$\alpha_0$	$\alpha$	$(P_m - P_a)$
0.036m	13.1m/s	2.9m/s	7.6°	1°	0.09kg/cm <sup>2</sup>

FIG 5. Cyclone filling line for crude storage cavern

