

펌핑 설비내 수격현상 해석

박 인 동

현대중공업 종합연구소 선임연구원



●1953년생
●유체를 전공하였으며, 펌핑설비내 수격의 전산 시스템 이용 해석, 유체 기계 내의 내부 유동 및 구조해석에 관심을 가지고 있다.

김 상 철

현대중공업 엔진사업본부 과장



●1956년생
●유체기계 중에서 임펠러 펌프의 유동해석 접근 설계 및 그 주변기기의 전산 시스템 이용 설계에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

최근에는 펌핑 설비의 대형화로 유량, 양정, 유속, 파이프 라인의 길이 등이 크게 됨에 따라 송수관로 내의 밸브로써 유량을 제어하거나 또는 펌프가 전원 차단으로 인하여 갑자기 정지하는 경우등에서 관로 내의 압력이 급격히 상승하거나 강하하게 된다.

또 압력 강하시 파이프 내의 압력이 그 유체 온도에 있어서의 포화 증기압 이하로 되면 관로 배열 등의 상황으로 수주가 분리되며 유체로부터 유리된 공기는 수주가 분리된 용적을 차지한 후 그 수주가 재결합시 큰 압력이 상승하여 관로 등을 파손시키게 되어 펌핑 설비의 기능이 상실되는 경우도 있다.

이러한 현상을 수격현상이라고 하고, 이론해석 계산방법으로는 Joukowski(1904), Allievi(1925), Bergson(1931), Parmakian(1953), Streeter와 Wylie(1962) 등에 의하여 연구되어 왔으며 최근에는 컴퓨터 발달에 따라 특성방정

식 수치 해법을 이용하여 아주 복잡한 관로망에서도 비교적 정확하게 압력분포 해석을 할 수 있게 되었다. 산업계에서도 펌프 설치시 자주 수격현상에 의한 문제점이 발생되어 안전한 강도의 파이프 라인 및 밸브류의 제작이 필요하거나 수격방지장치의 설치가 필요한 경우가 있었다.

본 글에서는 이러한 필요에 의해 수격해석시 복잡한 관로 및 필요한 해석치를 단순화하고 수격 현상에서 발생하는 수주 분리 현상을 규명, 그 현상으로 기인된 관로내 압력분포를 해석함으로써 異狀압력을 억제할 수 있는 장치설계의 기초자료가 되도록 고찰하였다.

2. 관로별 등가치

2.1 직경이 다른 관에서의 등가치

그림 1과 같이 관로의 직경이 다를때 수격현상의 해석을 용이하게 하기 위하여 다음과 같이 등가치를 계산한다.

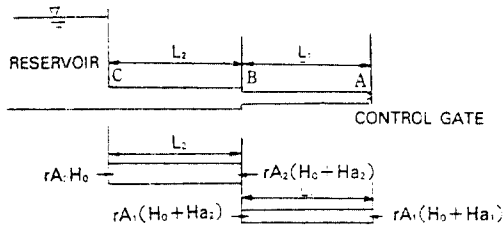


그림 1 직경이 다른 관로

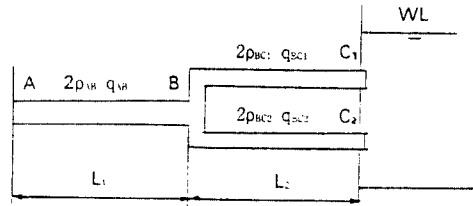


그림 3 병렬관로⁽¹⁾

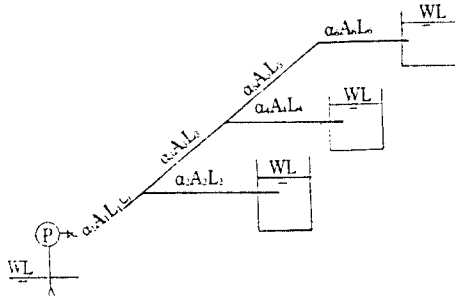


그림 2 枝狀의 송수관로

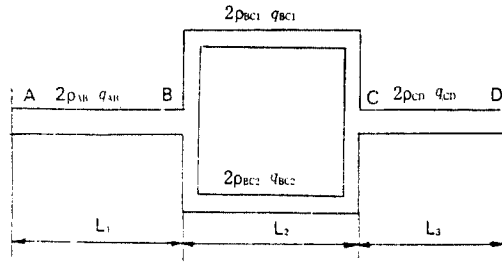


그림 4 병렬관로⁽²⁾

등가길이

$$L = L_1 + \frac{L_2}{A_2} A_1 + \frac{L_3}{A_3} A_1 + \dots + \frac{L_n}{A_n} A_1 \quad (1)$$

압력파의 등가전파속도 (α)는

$$\alpha = L / \sum (L_n / \alpha_n) \quad (2)$$

송수 관로의 등가 단면적 (A)은

$$A = L / \sum (L_n / A_n) \quad (3)$$

등가 관로내 유속 (V)는

$$V = \sum (V_n L_n) / L \quad (4)$$

송수관로 전체의 관로정수 (2ρ)는

$$2\rho = \frac{Q_0 \cdot \sum (L_n / A_n)}{g \cdot H_0 \cdot \sum (L_n / \alpha_n)} \quad (5)$$

2.2 枝狀인 송수관로의 등가치

그림 2와 같이 송수관로가 枝狀인 경우에는 등가 L/A 치는

$$\begin{aligned} L/A = & L_1/A_1 + 1/[(A_2/L_2) \\ & + 1/((L_3/A_3) \\ & + 1/((A_4/L_4) + 1/((L_5/A_5) \\ & + (L_6/A_6)))] \end{aligned} \quad (6)$$

압력파의 등가전파속도 L/α 는

$$\begin{aligned} L/\alpha = & L_1/\alpha_1 + 1/[(a_2/L_2) + 1/((L_3/\alpha_3) \\ & + 1/((a_4/L_4) + 1/(L_5/\alpha_5 + L_6/\alpha_6)))] \end{aligned} \quad (7)$$

송수관로 정수치 (2ρ)은

$$2\rho = a/gA = \sum (L_n/A_n) / g \sum (L_n/\alpha_n) \quad (8)$$

2.3 병렬관에서의 등가치

그림 3과 같은 병렬관로의 경우

$$\begin{aligned} 2\rho_{AC} = & (2\rho_{AB}L_{AB} + 2\rho_{BC}L_{BC}) / L_{AC} \\ = & (2\rho_{AB}L_{AB} + (2\rho_{BC1} + q_{BC1} \\ & + 2\rho_{BC2} + q_{BC2})L_{BC}) / L_{AC} \end{aligned} \quad (9)$$

그림 4와 같은 병렬관로의 경우

$$\begin{aligned} 2\rho_{AD} = & (2\rho_{AB}L_{AB} + 2\rho_{BC}L_{BC} + 2\rho_{CD}L_{CD}) / L_{AD} \\ = & \{2\rho_{AB}L_{AB} + (2\rho_{BC1} q_{BC1} + 2\rho_{BC2} q_{BC2}) \\ & L_{BC} + 2\rho_{CD}L_{CD}\} / L_{AD} \end{aligned} \quad (10)$$

3. 수주분리 현상

펌프가 급정지하면 펌프의 토출측 압력은 일시적으로 저하되며, 발생 부압이 대기압 이하

로 저하하면 진공상태가 되어 흐름이 절단되거나 송수관로내의 유체중에 용융된 가스가 분리되어 기포상태의 부압 부분이 발생되기도 한다. 이 현상은 일반적으로 수주 분리라 칭하여 지고 이와같이 수주 분리는 펌프 토출측 송수관로내의 압력이 포화증기압이하로 저하한 시에 발생하지만 송수관로의 도중에 밸브를 급폐쇄한 경우 밸브의 후류측에도 나타난다.

수주 분리가 발생되면 송수관로가 찌그러지거나 수주분리를 일으킨 유체가 재결합시에 고압을 발생시켜 송수관로를 파손시키므로 이에 대한 방지대책이 필요하다.

본 절에서는 이러한 수주분리현상에 대한 이론 규명을 통하여 추후 관로를 보호할 수 있는 수경방지장치의 필요 제원을 용이하게 결정할 수 있도록 고찰하였다.

3.1 강성이론에 의한 수주분리

펌프에서의 압력강하 ΔH 에 의해 화살표 방

향으로 수력구배선을 따라 전 관로에 압력이 저하하면 관로 D에서 부터 부압이 발생되어 수주 부압이 5~7m 이상이 되면 수주분리 현상이 일어나고 특히 관로의 정점인 B에서는 수주분리가 더욱 용이해지는 곳이다(그림 5).

(1) 송수관의 저항을 생략하는 경우

송수관로내의 유체의 운동방정식은 수력학적 이론 및 뉴턴의 운동법칙으로 부터 다음과 같이 표시된다(그림 6).

유속 V 가 급정지할 때까지의 시간 t 를 구하면

$$t = V_0 L / H_{ag} = 2\rho \cdot \mu / 2 \quad (11)$$

여기서 2ρ : 송수관로 정수

μ : 압력과 왕복시간

= 관로정수 × 압력파가 말단까지의 도달시간

송수관로내의 유속이 정지하기까지의 거리 S_0 는

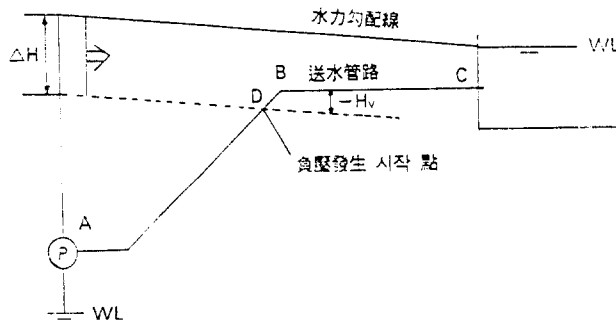


그림 5 송수관로의 종단도

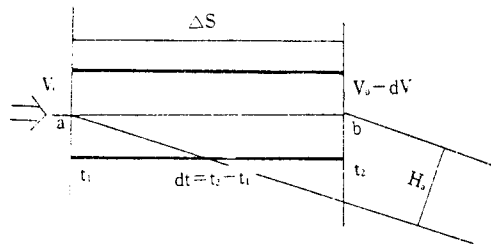


그림 6 유체의 이동

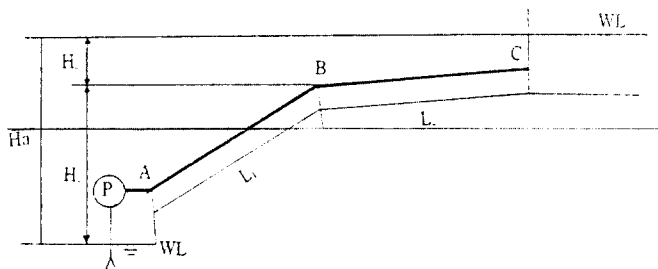


그림 7 송수관로(관로저항생략)

$$S_0 = V_0^2 L / 2gH_0 = 2\sigma \cdot \mu \cdot V_0 / 4 \quad (12)$$

= t · V₀ / 2
 = 관로정수 × 압력과의
 왕복시간 × 초기유속 / 4
 = 유체가 정지하기 까
 지의 시간 × 평균유속

관로 내를 이동한 유체의 용적 V은

$$V_{SL} = AS_0 = AV_0^2 L / 2gH_0 \quad (13)$$

= 2ρ · μ · Q₀ / 4
 = 관로정수 × 압력과의 왕복시간
 × 유량 / 4

그러면 그림 7의 B점에서 수주 분리 현상이 발생한다고 가정한다. 이때 B점에서 펌프측에 있는 관로내의 유체의 이동거리 S₁은

$$S_1 = V_0^2 L_1 / 2gH_1$$

마찬가지로 B점에서 토출측에 있는 관로 내의 유체의 이동 거리 S₂는

$$S_2 = V_0^2 L_2 / 2gH_2$$

그러므로 B점에서 수주분리가 발생한 거리 S_e는

$$S_e = S_2 - S_1 = (V_0^2 L_2 / 2gH_2) - (V_0^2 L_1 / 2gH_1) = (V_0^2 / 2gH_0) \{ (1 - b_1) / (1 - k_1) - b_1 / k_1 \} \quad (14)$$

여기서

b₁ (= L₁ / L) b₂ (= L₂ / L) : 관장계수

k₁ (H₁ / H₀) k₂ (= H₂ / H₀) : 관고계수

위 식에서 강체 이론에 수주분리 발생 조건은 (1 - b₁) / (1 - k₁) - b₁ / k₁ > 0 즉 k₁ / b₁ > 1 (15)

위 조건을 그림 8과 같이 표시할 수 있고 수주 분리 발생 영역을 制定할 수 있다.

수주분리 발생 용적 V_{SL}은

$$V_{SL} = A \cdot S_e = Q_0 / 4 \cdot 2\rho \cdot \mu (b_2 / k_2 - b_1 / k_1) = Co \{ (k_1 - b_1) / (k_1 (1 - k_1)) \} \quad (16)$$

여기서 Co : 수주분리 정수 (= Q₀ / 4 · 2ρ · μ)

(2) 송수관로 저항을 고려하는 경우

유속이 정지하는 시간 T₁은

$$T_1 = (To Km / C) \tan^{-1} Km \quad (17)$$

여기서 To = V₀L / gH₀ = 2ρ · μ

$$Km = \sqrt{C / (1 - C)}$$

$$C = H_L / H_0$$

유체가 정지하기까지의 이동 거리는 S는

$$S = S_0 / C [\log \{ 1 / (1 - C) \}] \quad (18)$$

여기서 S₀ : 송수관로 저항이 없을 경우의

이동거리 (= V₀²L / 2gH₀)

C : 관로내의 저항비율 (H_L / H₀)

수주분리용적 즉 보급수량 V_{SL}은

$$V_{SL} = (Q_0 / 4 F_1) \cdot 2\rho \cdot \mu \cdot \log \left\{ \frac{Ha + \{ (1 - b_1) / (1 - k_1) \} H_L}{Ha + (b_1 / k_1) H_L} \right\} \quad (19)$$

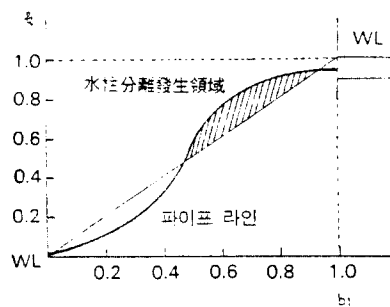
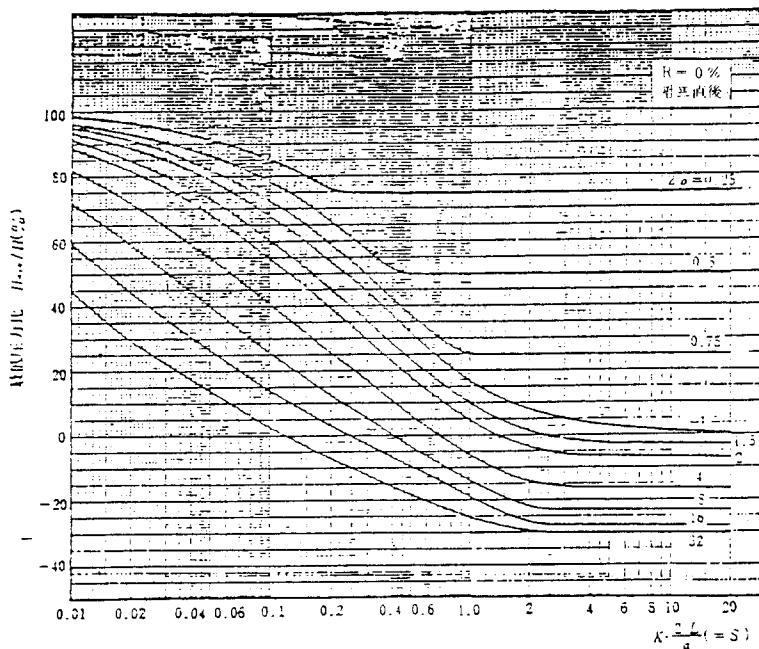
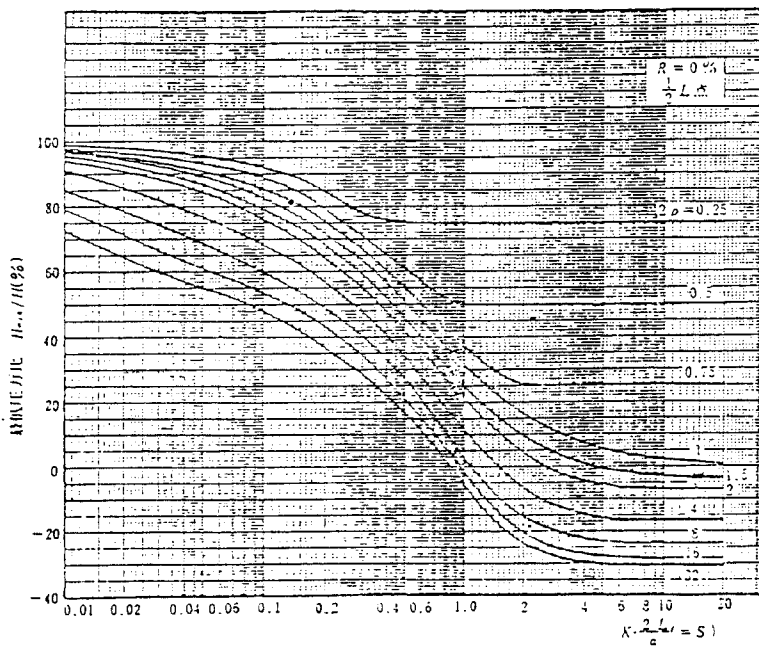


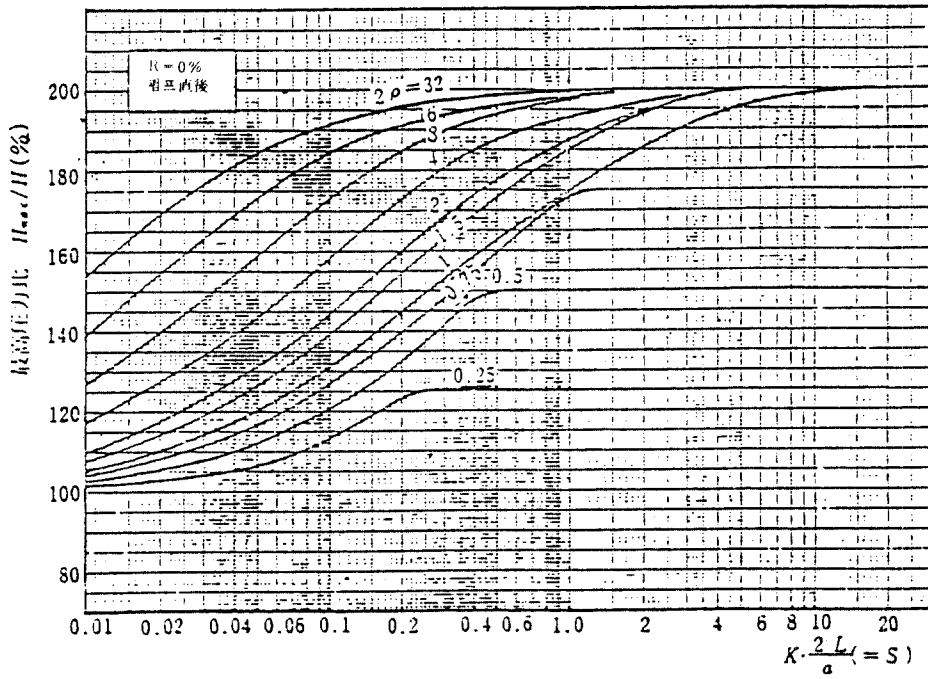
그림 8 수주 분리의 制定線



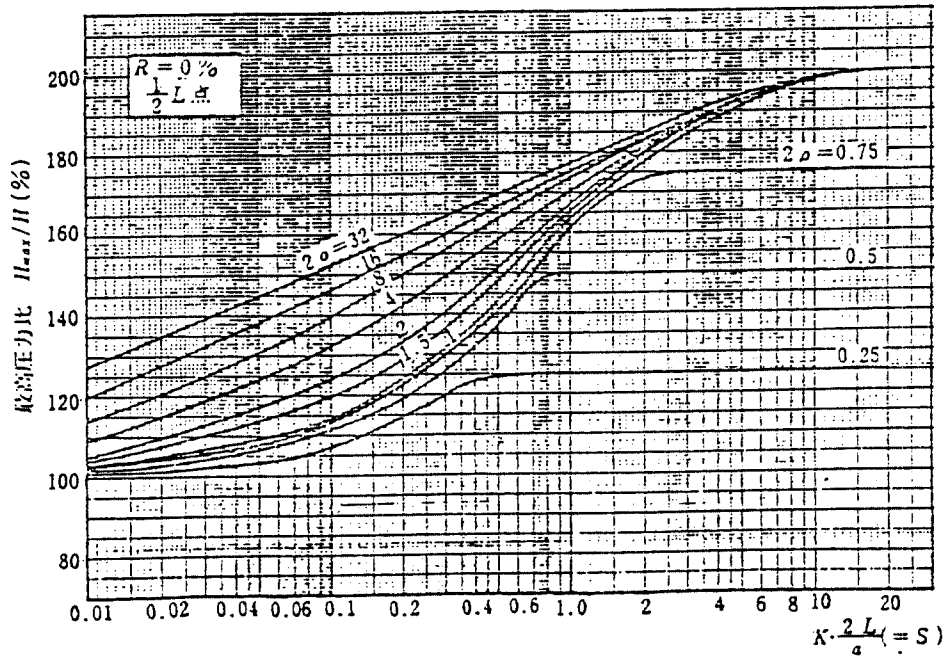
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 9 수격간이계산 선도(기술자료) (a) 펌프 직후의 최저압력비 (b) $1/2L$ 의 최저압력비 (c) 펌프 직후의 최저압력비 (d) $1/2L$ 의 최고압력비

여기서 $F_1 = (H_L / Ha)$
 $Co = (Q_0 / 4F_1) \cdot 2\rho \cdot \mu$

3.2 수주 분리의 보정계수

펌프 파이프 라인 내의 수주분리량의 정확한 추정은 수주분리 방지를 위한 장치 설치를 위해 중요하므로 이를 위해 보정계수 개념을 도입하고 이 보정계수는 (1) 송수관로의 분포상태, (2) 관로정수, (3) 관성효과, (4) 송수관로의 저항등에 따라 다르며 실제 수주 분리 용적 V_{so} 는 다음과 같이 구한다.

$V_{so} = \phi_c \cdot V_{SL}$ (20)

여기서 ϕ_c : 보정계수

보정계수 ϕ_c 는 대략 다음과 같다.

(가) $K\mu \geq 0.8 \sim 0.43$ 및 $2\rho \geq 2$ 의 범위에는 $1 \geq \phi_c \geq 0.6 \sim 0.9$ 이다.

(나) $K\mu > 0.8$ 의 범위에는 ϕ_c 는 1에 가깝다.

(다) 관고계수 k_1 이 크게 됨에 따라 수주분리점의 배관 높이가 높으므로 보정계수가 커져 이론식 (16)에 근접한다.

(라) 관장계수 b_1 이 작게 됨에 따라 수주분리점이 펌프측에 가까우므로 ϕ_c 는 크게 된다.

(마) $2\rho \geq 6 \sim 8$ 을 넘는 경우에는 수주분리용적을 식 (19)에서 바로 구하여도 실용상 지장이 없다.

상기의 사항을 고려하여 ϕ_c 치를 적절히 선정하면 송수관로 내의 수주분리의 용적을 직접 구하여도 실용상 지장이 없이 사용 가능하다.

4. 펌프 동력 차단시 수격현상 해석

본 절에서는 수격해석 선도를 이용하여 펌프 전원차단시 발생하는 압력 변화를 구하는 방법을 서술한다.

본 해석에 사용한 선도 그림 9(일부 생략)는 일본에서 수백가지의 수격해석을 컴퓨터에서 행한 결과의 실용선도로서 송수관로의 저항을 고려한 해석이므로 비교적 정확한 압력변동을 예측하는데 사용될 수 있다.

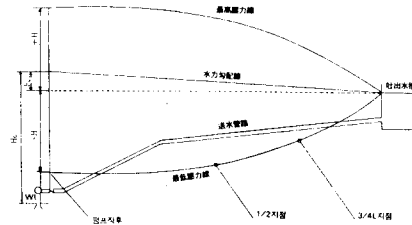


그림 10 송수관로내 압력 변화도

4.1 관로내 압력 분포 해석

펌핑 설비에서 펌프의 사양이나 배치가 결정된 후의 수격해석 순서는 다음과 같다.

(1) 펌프 specification 작성

펌프 유량 Q : m^3/min .

펌프 전양정 H_0 : 실양정 (Ha) + 송수관로 손실 (H_L), m.

회전수 No : rpm

펌프 효율 ηp : %

유체의 비중 τ : kg/l

(2) 펌프 축동력 (L)과 축 토크 (T)의 계산

(3) 펌프 관성계수의 계산

(4) 송수관로 내 정상시 유속 (V)의 계산

(5) 압력과 전파속도 (a)의 계산

(6) 송수관로정수 (2ρ)의 계산

(7) 압력파의 왕복시간 (μ)의 계산

(8) $S(k \cdot \mu)$ 값의 계산

(9) 송수관로 저항비 (R)의 계산

(10) 송수관로내 압력변화도 작성

위 (10)항의 작성시에는 그림 9(일부 생략)와 같은 적용 선도를 선정하고 그 값이 중간인 경우에는 보간법으로 압력을 산출하며 그림 10과 같은 송수관로내 최종 압력변화도를 작성함으로써 관로내 최고 및 최저 압력분포를 구한다.

(1) 송수관로 중단도의 작성(그림 10 참조)

(2) 최저 압력선의 작성

(3) 최고 압력선의 작성

5. 맺음말

수격해석은 최근의 펌핑 설비의 중요한 선결

과제이고 산업계에서도 자주 문제시 되고 있으므로 본 글은 직접 전원 차단으로 인한 수격현상 해석을 수행하는 데 도움이 되도록 여러 문헌을 분석하여 간략히 정리하였고 그 분석으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 직경이 다른 관, 분기관 및 병렬관 등의 경우는 2절에서와 같이 등가치를 계산함으로써 해석을 단순화한다.

(2) 수주 분리시 유체 정지시간, 이동거리 및 보급수량은 3절에 따라 산출하며 이는 수격방지장치 용량 결정의 기초자료가 된다.

(3) 실제 펌핑 설비에서 수격현상의 발생은 대부분이 예기치 않는 펌프 전원차단시에 기인된다. 이때의 수격현상 해석을 실용선도 (그림 9, 일부 생략)에 의해 4·1에 따라 관로내 각 지점의 최고 및 최저 압력을 산출한다.

(4) 끝으로 기존 참고문헌에 의한 해석은 여

러가지의 어려운 한계가 존재하므로 추후 수격해석 방안으로서는 특성방정식을 이용한 컴퓨터 수치해석 수행되어야 될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- (1) John Parmakian, "Water Hammer Analysis", Dover Publication INC, New York.
- (2) 五十火田悦郎, 森垣誠太郎, "ポンプつうんトおける過度現象", ポンプ工學, Vol. 9, No. 5.
- (3) 水撃簡易計算線圖(つづき), "ターボ機械", 79-11, pp. 34~42.
- (4) 富澤清治, 1979, "ウォーターハンマ 現象", 雜誌「水」, 2-10.

