

수충격 (5차 기고)

5. 부정류해석에서 펌프의 경계조건

박 한 영*

수충격 관련 기술을 연재물(1회: 수충격 해석 이론, 2회: 압력파란?, 3회: 특성법에 의한 해석, 4회: 부정류해석에서 밸브의 경계조건, 5회: 부정류해석에서 펌프의 경계조건, 6회: 수충격 완화설비)로 소개하고 있으며, 본 기사는 그 가운데 다섯 번째 기고이다.

액체 수송 시스템 설계자들은 자주 펌프 선택 문제와 직면한다. 펌프와 펌프 부속설비 판매자들은 통상적으로 펌프 선정 절차에 많은 도움을 주지만 설계자는 펌프와 운전 특성을 특히 부정류 조건을 숙지하는 것이 좋다. 이 장에서는 부정류에 대해 기술하고 상사 법칙에 대한 지식을 얻을 수 있도록 기술하였다.

1. 펌프의 급정지

예상치 못한 정전이나 운전자가 실수로 전원을 차단 하면 펌프에 공급되는 에너지가 급작스럽게 중지한다. 어떤 경우이던 회전하고 있는 펌프 임펠러의 속도가 저하되면 펌프 토출측 압력은 저하되고 흡입측 압력은 상승 (인라인 가압 펌프의 경우)한다. 그 결과로서 발생하는 부정류는 예측하기 어려운 결과를 초래하는 수주 분리를 발생시키며, 때로는 역지 밸브의 폐쇄로 인한 과도하게 높은 압력 또는 공동 파괴를 초래한다. 이유가 어떻든 간에 위험한 압력이 발생하는지 그 여부를 결정하기 위해서 이러한 현상을 다소 평범한 현상으로 모의실험이 가능하도록 하는 것은 매우 중요하다.

정전으로 펌프의 회전속도가 느려지게 되면 펌프의 유량-수두와 유량-토크 특성이 변화한다. 펌프의 회전속도가 변화하면 임의 회전속도에서 펌프의 특성들을 상사법칙에 의해 알아낼 수 있다. 펌프 토크 변화는 펌프 정지 절차에서 중요하므로 먼저 펌프 토출 유량에 따

라 수두가 어떻게 변화하는지 중점적으로 고찰한다.

다양한 속도에서 펌프 특성들은 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다. N_0 로 명명된 실선은 정속 펌프 특성 곡선이고 유사한 형상을 갖는 점선들은 회전 속도를 줄였을 경우의 펌프 특성 곡선이다. 각 점선 특성 곡선의 지점들은 정속 특성곡선으로부터 상사 법칙을 이용하여 계산할 수 있다. 펌프 임펠러 직경이 동일한 경우 아래 식들과 같은 상사 법칙을 적용할 수 있다.

$$\frac{Q}{N} = \text{일정} \quad (1)$$

$$\frac{h_p}{N^2} = \text{일정} \quad (2)$$

$$\frac{T}{N^2} = \text{일정} \quad (3)$$

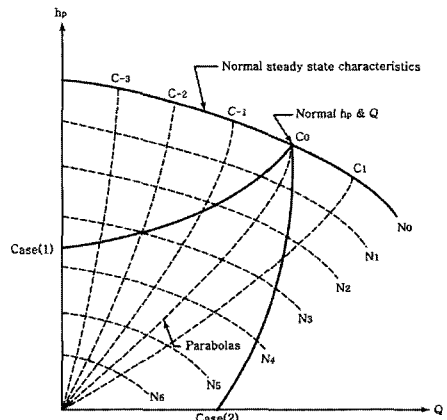


Fig. 1 펌프의 다양한 회전 속도의 특성 곡선

* 한국수자원공사, 한국수자원연구원
E-mail: hanyung@kowaco.or.kr

5. 부정류해석에서 펌프의 경계조건

정속 펌프 특성 곡선상에 있는 일련의 점들 C_3, C_2 등에서 Q_0 와 h_{p0} 수치 범위를 선정하고 다음 식으로부터 다른 회전 속도의 상응점을 계산하여 연속적인 회전 속도 N_i 곡선을 작성할 수 있다.

$$Q_i = Q_0 \frac{N_i}{N_0} \quad (4)$$

$$h_{pi} = h_{p0} \left(\frac{N_i}{N_0} \right)^2 \quad (5)$$

한 예로 C_1 점 유량 Q_0 와 수두 h_{p0} 를 사용하고, 회전수(속도)를 변경하여 각 다른 특성 곡선 상에 일련의 상응점들을 작성할 수 있다. 이 상응점들은 좌표의 원점과 C_1 을 통과하는 포물선 상에 놓인다. 같은 절차로 정속 펌프 특성 곡선상 C_3, C_2 점에 대해 수행하면 일련의 임의 회전수에서의 펌프 특성 곡선을 작도할 수 있다. 원칙적으로 모든 회전속도에서 특성 곡선을 작도할 수 있다. Fig. 1은 좌표의 원점을 통과하는 일련의 포물선들을 보여준다.

펌프의 회전속도가 감소되면 이에 따른 펌프의 유량과 수두 변화를 추적하는 궤적이 특성 선도에 작성된다. 그러나 이러한 궤적은 특정한 포물선 곡선을 따르지는 않는다. 즉, 궤적은 펌프와 전동기 회전 관성과 펌프 임펠러 배관에 있는 물이 작용하는 역압(back pressure)에 의해 결정된다. 대표적인 2개의 예제를 Fig. 1에 나타내었다.

경우 (1): 관로의 정수두(실수두)가 높고 관로가 비교적 짧아 관로 손실 수두가 작은 경우이다. 이 경우 관로 내 물의 관성은 상대적으로 작고 중력은 유량(유속)을 감소시키는데 일조한다. 결과적으로 펌프를 통과하는 물은 양의 수두임에도 불구하고 펌프를 통한 토출 유량은 다소 급속하게 0이 된다. 이때 관로 내 역지 밸브가 설치되어 있지 않으면 펌프를 통한 역류가 발생한다.

경우 (2): 관로가 상대적으로 길고 펌프에 의해 형성된 수두의 대부분이 마찰 손실인 경우이다. 이 경우 정전이 되면, 이동하는 유체의 커다란 관성은 급속히 속도가 저하되는 것을 방지한다. 펌프의 회전 속도 또한 더욱 완만하게 감소되고 펌프를 통한 수두는 유량이 정지되기 전에 0이 된다. 이 시점에서 유동은 펌프에 에너지를 주어 수차의 역할을 하게 하며 펌프를 통해 계속 역류하던지 아니면 바이패스 배관을 통해 펌프를 우회한다.

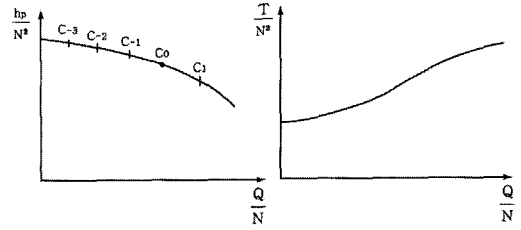


Fig. 2 펌프의 대표적인 h_p/N^2 과 T/N^2 곡선

2. 가압 펌프를 위한 공식 설정

Figure 1 C_3, C_2 등을 지나는 각 포물선 곡선에 따른 Q/N 과 h_p/N^2 은 일정하다. 따라서 Fig. 1의 펌프의 모든 특성 거동을 $Q/N - h_p/N^2$ 의 도표에 의해 나타낼 수 있다. 같은 논리를 $Q/N - T/N^2$ 의 도표를 만족시키는 토크에 적용한다. 대표적인 각 곡선의 예제를 Fig. 2에 나타내었다.

이 곡선들은 제작사가 제공한 곡선으로부터 h_p 와 Q 의 쌍을 선택하여 각각 N 과 N^2 으로 나누고 그 결과를 도표로 작성할 수 있다. 어떻게 작성하는지 한 예제를 살펴보자.

Figure 3과 같은 가압 펌프장을 고려해 보자. 각 펌프 토출 측에는 역지 밸브가 설치되었고 펌프장 주변으로 역지 밸브가 설치된 바이패스가 있다. 정전이 되어 모든 펌프들 동시에 정지된다고 가정한다. 이에 적합한 공식은 다음과 같다.

$$\text{흡입측 } C^+ \quad V_{Ps} = C_1 - C_2 H_{Ps} \quad (6)$$

$$\text{토출측 } C^- \quad V_{Pl} = C_3 + C_4 H_{Pl} \quad (7)$$

$$\text{질량보전법칙} \quad V_{Ps} A_s = V_{Pl} A_d \quad (8)$$

$$\text{일과 에너지} \quad H_{Ps} + h_p = H_{Pl} \quad (9)$$

$$\text{펌프특성} \quad h_p = f(Q), f_1(V_{Pl}) \text{ 또는 } f_2(V_{Ps}) \quad (10)$$

상기 공식들은 N 의 5개의 추가적인 미지수를 갖는다. 다른 미지수를 구하기 전에 N 을 구할 수 있다면 해답을 구할 수 있다.

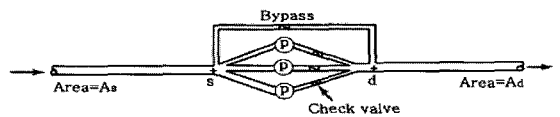


Fig. 3 대표적인 병렬 가압 펌프 개략도

일과 에너지 공식 (9)에서 펌프 특성 선도에 의해 주어진 펌프를 통한 수두 증가를 구할 수 있다. 만일 펌프 토출 관로, 토출 수두, 역지 밸브 또는 차단 밸브에서 상당한 손실이 발생된다면 h_p 를 수정하여야 한다. 즉, 주어진 토출 유량에서 발생하는 수력 손실만큼 h_p 를 감하여야 한다. 결과적으로 펌프 특성 선도를 다시 작성하여야 하며, 각 토출 측에서 발생하는 수두 손실을 수정하여야 한다. 이러한 손실 수두는 대표적으로 $K_L V^2/2g$ 의 형태로 표현하며 발생하는 각각의 손실은 모두 합산하여 펌프의 토출 수두를 감한다. h_p 는 다단 펌프의 각 단을 통과하면서 증가되는 수두의 합이므로 주어진 토출 유량에서의 부분 손실들은 단수로 나누어 펌프 각 단의 수두를 계산하고 펌프 특성 선도를 다시 작성한다. 한 단에서의 펌프 특성 곡선이 컴퓨터 프로그램에 입력되고 내부적으로 단 수를 곱하기 때문에 이러한 단계가 필요하다. 바로 진행할 수 있도록 공식 (9)에 수두 손실이 포함되지 않은 것에 대해 의문을 갖을 수 있다. 이 절에서 포물선 또는 고차의 보간법을 피하기 위해 펌프 특성 곡선을 선형으로 표현하였다. 따라서 이차 방정식을 재도입할 수 없다. 간단히 말해 선형 보간법을 유지하기 위해 부분 손실을 위한 펌프 특성 선도를 조정한다.

다른 네 개의 공식과 조합하기 위해 공식 (10)을 다시 표현할 필요가 있다. 통상적으로 펌프 곡선을 포물선 공식으로 모델링하였다. 이런 방법은 곡선의 형상이 포물선에 가까운 특성 곡선일 경우에만 유효하다는 제한이 있다. 이제 일반적인 방법인 일련의 직선 분절을 이용하여 $Q/N-h_p/N^2$ 곡선을 표현하는 것을 따르기로 한다. 임의의 점에서 곡선은 Q/N 의 제한된 범위에서 유효한 직선으로 된다. 이러한 자세한 절차는 현 회전 속도 N 을 구한 후에 따르기로 한다.

3. 속도 변화를 구하는 법

이제까지 우리는 새로운 수두와 속도 수치를 연산할 수 있을 때 그 시간에서 새로운 회전 속도를 구할 수 있다고 가정하여 왔다. 저하되는 토크를 연산하고 회전 동역학을 이용하여 속도 변화 ΔN 을 구할 수 있다. 펌프에서 회전체인 축, 전동기 그리고 임펠러는 회전 관성 모멘트 I 를 갖는다. 통상적으로 전동기가 가장 큰 관성 모멘트를 갖는다. 그러나 펌프 축과 임펠러에 충만된 물의 회전도 포함하여야 한다. 이러한 회전체들에 대한 수치는 제작사로부터 얻을 수 있고 또는 관성 모멘트 I 가

알려진 유사한 펌프들의 수치와 비교하여 추정할 수 있다. 미국에서는 통상적으로 펌프 제작사가 I 수치를 W^2 (한국에서는 GD^2)를 $lb_f \cdot ft^2$ 의 단위로 제공한다. 이 수치가 바로 컴퓨터 입력 자료가 된다. 특정 전동기에 대한 I 수치를 얻을 수 없다면 U.S. 단위를 채택한 다음 공식을 (Thorley, 1991) 사용하여 추정한다.

$$I = 1818 \left(\frac{HP}{N} \right)^{1.48} \quad (11)$$

여기서 I 의 단위는 $lb_f \cdot ft^2$, HP 는 마력이고 N 은 분당 회전수 (rpm)이다.

정상 상태 (steady-state) 조건 하에서 전동기의 기동 토크는 펌프 임펠러에 있는 물에 의해 발생하는 저항 토크에 의해 평형을 이룬다. 정전이 되면 기동 토크가 소멸되고 저항 토크에 의해 펌프의 회전속도가 감소된다. 이 감속은 다음 식에 의해 표현된다.

$$T = I\alpha = I \frac{d\omega}{dt} = \frac{2\pi}{60} I \frac{dN}{dt} \quad (12)$$

여기서 N 은 분당 회전수 (rpm)이고 I 는 회전체의 전 회전 관성 모멘트이다. Δt 동안 발생하는 속도 변화를 구하기 위해 공식 (12)를 적분한다.

$$\int dN = \frac{60}{2\pi I} \int T dt \quad (13)$$

T 의 함수 관계를 알지 못하므로 Δt 를 작게 유지하면서 Δt 전 (previous) 시간 단계에서 알려진 T 를 상수로 유지하도록 한다. 통상적으로 토크는 토출 유량 전 범위에서조차 크게 변화하지 않으므로 이러한 방법은 유효하다. 새로운 회전 속도는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$N(t + \Delta t) = N(t) - \frac{60}{2\pi I} T(t) \Delta t \quad (14)$$

첫 번째 속도 변화는 정상 상태의 N_0 와 T_0 로부터 계산할 수 있다. 후속적인 토크 수치는 방금 계산된 Q 수치를 사용하여 $Q/N - T/N^2$ 표로부터 보간법을 사용하여 구할 수 있다. 이제 공식 (6)부터 (10)까지 사용하여 새로운 수두와 속도를 구할 수 있다.

4. 공식 해법

공식을 풀기 위한 첫 단계는 공식 (10)을 Q/N 의 유한 범위에서 선형 함수로 나타내는 것이다. Fig. 4는 $h_p/N^2 - Q/N$ 을 선형 분절로 나타내었다. 이 분절을 위한 선형 공식은 다음과 같다.

$$\frac{h_p}{N^2} = N_{st} \left[\left(\frac{(h_p/N^2)_A - (h_p/N^2)_B}{(Q/N)_A - (Q/N)_B} \right) \frac{Q}{N} - \left(\frac{(h_p/N^2)_A - (h_p/N^2)_B}{(Q/N)_A - (Q/N)_B} \right) \left(\frac{Q}{N} \right)_B + \left(\frac{h_p}{N^2} \right)_B \right] \quad (15)$$

상기 식에서 h_p/N^2 와 Q/N 수치는 펌프의 한 단의 것이고 N_{st} 는 펌프의 단수이다. 상기 식을 간략히 하여 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{h_p}{N^2} &= N_{st} \left[C_7 \frac{Q}{N} + C_8 \right] \\ \text{단, } C_7 &= \frac{(h_p/N^2)_A - (h_p/N^2)_B}{(Q/N)_A - (Q/N)_B} \\ C_8 &= - \left(\frac{(h_p/N^2)_A - (h_p/N^2)_B}{(Q/N)_A - (Q/N)_B} \right) \left(\frac{Q}{N} \right)_B + \left(\frac{h_p}{N^2} \right)_B \\ &= \left(\frac{h_p}{N^2} \right)_B - C_7 \left(\frac{Q}{N} \right)_B \end{aligned} \quad (16)$$

펌프장 토출측 관로에서의 속도를 위한 5개의 공식을 동시에 풀면 다음과 같다.

$$V_{PI} = \frac{\frac{C_1}{C_2} + N_{st} N^2 C_8 + \frac{C_3}{C_4}}{\frac{1}{C_4} + \frac{A_d}{C_2 A_s} - \frac{N_{st} N A_d C_7}{N_{pu}}} \quad (17)$$

여기서 N_{pu} 는 병렬로 운전되는 펌프의 대수이다.

$V_{PI} > 0$ 일 경우 즉, 펌프 영역의 경우 공식 (17)에서 구한 V_{PI} 를 공식 (7) 및 (8)에 대입하여 H_{PI} , V_{PS} 를 구하고, V_{PS} 를 공식(6)에 대입하여 H_{PS} 를 구하고, H_{PS} 및 H_{PI} 를 공식 (9)에 대입하여 h_p 를 구할 수 있다. 그러나 토출측 수두가 흡입측 수두보다 크게 되면 $h_p < 0$ 가 되

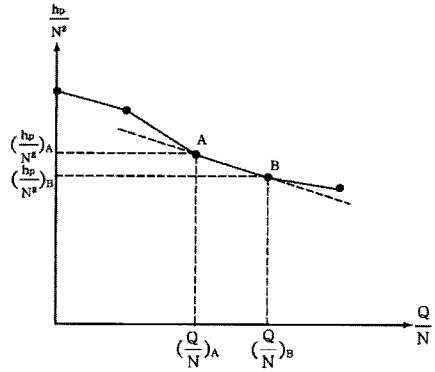


Fig. 4 $h_p/N^2 - Q/N$ 의 불연속 선형 표현

어 바이패스 배관이 개방되므로 $h_p = 0$ 그리고 $H_{PS} = H_{PI}$ 으로 설정하고 다음 두 공식들로부터 속도를 다시 계산하고 공식 (6)과 (7)을 사용하여 H_{PS} 와 H_{PI} 를 결정한다.

$$V_{PI} = \frac{C_1 C_4 + C_2 C_3}{C_2 + C_4 \frac{A_d}{A_s}} \quad (18)$$

$$V_{PS} = \frac{A_d}{A_s} V_{PI} \quad (19)$$

만일 공식 (17)의 해답이 음의 속도를 갖는다면 V_{PS} 와 V_{PI} 를 0으로 설정하고 공식 (6)과 (7)을 사용하여 H_{PS} 와 H_{PI} 를 계산한다. 최종적으로 Q/N 를 계산하여 Fig. 4의 A와 B 사이에 있는지 증명하여야 한다. 그렇지 않을 경우에는 C_7 과 C_8 을 다시 계산하고 해결 절차를 반복한다.

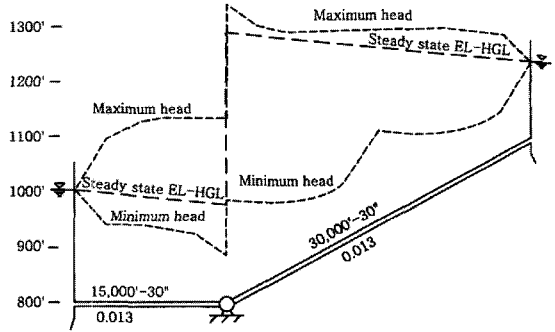
예제 : 정전 시 가압 펌프의 영향을 알아보기 위해서 길이 45,000 ft 관로에 펌프 4대를 설치한다. 직경 30인치 관로는 강관 용접으로 마찰 계수 0.013 그리고 파속은 3,590 ft/s이다. 이 관로는 두 저수지 사이를 연결하고 가압장은 첫 번째 저수지로부터 15,000 ft 하류에 위치한다.

펌프는 3단 Ingersoll-Dresser 15H277 터빈 펌프로써 임펄터의 직경은 11.83 인치이고, 펌프 특성 곡선은 부록C (저자에게 문의)와 같다. 각 펌프와 전동기의 Wt^2 은 대략 475 $lb_f \cdot ft^2$ 이다. 펌프 성능을 위한 자료표를 설정하기 위해 유량 Q 축에서 6개의 점을 선정한다 (Q=0, 1,000, 2,000, 3,000, 4,000 그리고 4,500

(gal/min)). 각 유량점에 해당하는 h_p 와 bhp 수치를 읽어 입력 파일에 입력한다. 프로그램은 정상 토출 유량을 결정하므로 사전 수력 계산은 불필요하다. 반복 절차의 정확도 기준만을 선정해주면 된다. 이 경우 정확도는 0.5 gal/min으로 선택한다.

```

예제 프로그램 EP71.FOR - 입력자료 파일 "EP71.DAT"
정전시 3단 가압펌프 4대 INGERSOLL-DRESSER 15H277
&SPECS
NPIPES=2,NPARTS=5,IOUT=10,HRESUP=1000.,HRESDN=1240.,
  ZEND=1100.,HATM=30.,QTRY=0.,QACC=0.50,
  TMAX=60.,PFILE=T,HVPRINT=T,PLOT=T,
  GRAPH=T,RERUN=F/
1 30. 15000. .013 3590. 800.
2 30. 30000. .013 3590. 800.
&PUMPS NPUMPS=4,NSTAGE=3,IPUMP=1,RPM=1775.,
  WRSQ=475.,QN=0.,1000.,2000.,3000.,4000.,4500.,
  HNSQ=129.,127.5,121.,103.5,67.5,0.,
  TNSQ=50.,58.,78.,92.,97.,80./
&GRAF NSAVE=2,IOUTSA=1,PIPE=1,2,0,0,NODE=999,1,0,0/
    
```



정전 시 가압 펌프 작동 분석 프로그램인 EP71.FOR 는 이러한 문제를 해결하기 위해서 사용된다. 이 원시 파일과 실행 파일은 별첨과 같다. 관로에 따른 과도 압력 수치를 나타내는 위의 그림은 분석으로부터 도출된 주요 결과중의 하나이다. 우리는 높은 압력은 펌프의 흡입 측에서, 낮은 압력은 펌프의 토출 측에서 발생하는 것을 관측할 수 있다. 이러한 경우에 수주 분리가 발생 되지 않는다.

별첨: 프로그램 EP71.FOR

```

*****
*
* 이 프로그램은 독자의 편의를 위해 작성하였다.
* 저자는 이 프로그램의 정확성에 대한 책임을 지지 않는다.
* 이 프로그램 사용자는 자신이 책임지고 사용할 수 있다.
*****
PROGRAM NO. EP71.FOR
* 운전 중인 가압 펌프의 정전 시 부정류 해석을 위한 프로그램 예제 7.1
*****
* - 상류측과 하류측은 일정 수두를 유지하는 저수지가 있으며 이들 저수지는
* 서로 관로로 연결되었으며 중간에 펌프가 설치되었다. 펌프장 주변으로 마찰이
* 없는 bypass배관이 설치된다.
* - 이 프로그램에서는 모든 펌프가 동시에 정전되어 정지하는 것으로 취급하였다.
*
* ***** 자료 설명 *****
* 배관들은 상류측 시작점을 1부터 시작하여 하류측으로 가면서 연속적으로 번호가
* 지정된다.
    
```

- * TITLE1 = 입력 파일에 기술되는 첫 번째 작업 설명으로 최대 80칸.
- * TITLE2 = 입력 파일에 기술되는 두 번째 작업 설명으로 최대 80칸.
- * NPIPES = 직렬관로의 배관 숫자
- * NPARTS = 배관이 나누어지는 분절의 수.
- * IOUT = 출력을 제어하는 기준으로 매번 IOUT마다 출력된다.
즉, IOUT=30이면 3번째 마다 출력한다.
- * HRESUP = 상류측 저수지의 수위로서 단위는 FT
- * HRESDN = 하류측 저수지의 수위로서 단위는 FT
- * ZEND = 하류측 마지막 배관의 고도로서 단위는 FT
- * HATM = 대기압 수두로서 단위는 FT
- * QTRY = 정상류 유량의 초기 추정치로서 프로그램내 default 수치가 해답을 제공 못하는 경우에는 할당될 필요가 없다. 단위는 GPM
- * QACC = 정상류 유량 계산을 위한 반복 정확도로서 단위는 GPM
(추정 유량의 0.001배로 시도한다)
- * TMAX = 모의실험 최대 시간으로서 단위는 SEC.
- * DTNEW = 정상유동을 유지하기 위해 필요한 감소된 DELTA T의 수치.
RETURN=TRUE가 되기 위해서는 0이 아닌 수치가 필요하다.
- * PFILE = LOGICAL IF.TRUE., 관로의 종단도와 함께 최대 수두 수치들이 도식된다.

5. 부정류해석에서 펌프의 경계조건

```

* HVPRNT = LOGICAL.IF.TRUE., 유속과 시간 자료가 도시된다.
*           (지체한 입력에 대해서는 부프로그램 'PGRAPH' 참조)
* PPLOT = LOGICAL.IF.TRUE., 시간과 수두에 대한 PRINTER PLOT이 작성된다.
* GRAPH = LOGICAL.IF.TRUE., 결과물을 PLOT하기 위해 LOGICAL UNIT 9를
*         통해 외부 자료 파일이 작성된다.
* RERUN = LOGICAL.IF.TRUE., DELTA T의 새로운 수치를 제공하여야 한다.
*         이 LOGICAL은 안정성 시험이 실패하고 두번째 실행이 필요할 때만
*         TRUE로 설정된다.
* PIPE = 관로 번호(상류측 끝단부터 1로 시작한다)
* D() = 배관의 직경으로 단위는 IN.
* L() = 배관 길이로서 단위는 FT.
* F() = 달시-비하의 미찰계수 f 또는 하전-윌리엄의 C 값
* A() = 파속으로 단위는 F/S.
* PIPEZ() = 상류측 끝단의 배관 고도로서 단위는 FT
* NPUMPS = 병렬운전하는 펌프의 총 대수
* NSTAGE = 각 펌프의 단 수
* IPUMP = 하류측 끝단에 가압 펌프를 갖는 관로의 숫자
* RPM = 정속 펌프의 회전수 단위는 RPM
* WRSQ = 펌프와 모터의 관성 모멘트로 단위는 LBM-FT^2
* QN() = 펌프 특성곡선으로부터 구한 토출 유량으로 단위는 GPM
* HNSQ() = 펌프 특성곡선으로부터 구한 펌프 한 단계에서의 가압 양정으로서 단위는 FT
* TNSQ() = 펌프 특성곡선으로부터 구한 펌프 한 단계에서의 BHP로 단위는 HP
* * QN()과 HNSQ()에 대한 자료는 QN(1)=0, 그리고 HNSQ(6)=0 또는 필요하면 음의
*   숫자로 선정한다. 따라서 펌프 특성곡선을 인위적으로 연장시켜야 할
*   필요성이 있다.
      DIMENSION X[ALLOCATABLE](:,:),V[ALLOCATABLE](:,:),
      $H[ALLOCATABLE](:,:),HLOW[ALLOCATABLE](:,:),
      $HHIGH[ALLOCATABLE](:,:),HEAD[ALLOCATABLE](:,:),
      $VNEW[ALLOCATABLE](:,:),HNEW[ALLOCATABLE](:,:),
      $THIGH[ALLOCATABLE](:,:),TLOW[ALLOCATABLE](:,:),
      $HSTEAD[ALLOCATABLE](:,:)
      DIMENSION L[ALLOCATABLE](:,:),D[ALLOCATABLE](:,:),A[ALLOCATABLE](:,:),
      $PIPEZ[ALLOCATABLE](:,:),F[ALLOCATABLE](:,:),VZERO[ALLOCATABLE](:,:),
      $NPAR[ALLOCATABLE](:,:),C[ALLOCATABLE](:,:),AK[ALLOCATABLE](:,:),
      $$SINE[ALLOCATABLE](:,:),AREA[ALLOCATABLE](:,:),DELTT[ALLOCATABLE](:,:),
      $RATIO[ALLOCATABLE](:,:)
*           MP=100
*           MMP=100
* DIMENSION X(MP,MMP),V(MP,MMP),H(MP,MMP),HLOW(MP,MMP),HHIGH(MP,MMP),
      $HEAD(MP,MMP),VNEW(MP,MMP),HNEW(MP,MMP),THIGH(MP,MMP),TLOW(MP,MMP),
*   $HSTEAD(MP,MMP)
*   DIMENSION L(MP),D(MP),A(MP),PIPEZ(MP),F(MP),VZERO(MP),NPAR(MP),
*   $C(MP),AK(MP),SINE(MP),AREA(MP),DELTT(MP),RATIO(MP)
      DIMENSION QN(6),HNSQ(6),TNSQ(6)
      LOGICAL FAIL,BYPASS,SAVE,PPLOT,HVPRNT,RERUN,PFILE,GRAPH
      INTEGER PIPE
      REAL L,L,NEXP
      CHARACTER TITLE1*80,TITLE2*80,CH,CH12,CH78,CH79,CHN,FNAME*12
      NAMELIST /SPECS/ NPIPES,NPARTS,IOUT,HRESUP,HRESDN,ZEND,HATM,
      $           QTRY,QACC,TMAX,DTNEW,PFILE,HVPRNT,PPLOT,
      $           GRAPH,RERUN
      NAMELIST /PUMPS/ NPUMPS,NSTAGE,IPUMP,RPM,WRSQ,QN,HNSQ,TNSQ
      DATA SAVE,PPLOT,HVPRNT,RERUN,PFILE,GRAPH/6*.FALSE./

```

WRITE(*,791)

```

READ(*,790) FNAME
OPEN(5,FILE=FNAME)
READ(5,100) TITLE1
READ(5,100) TITLE2
READ(5,SPECS)
MP=NPIPES
C   ALLOCATE L(MP),D(MP),A(MP),PIPEZ(MP),F(MP),VZERO(MP),
C   $NPAR(MP),C(MP),AK(MP),SINE(MP),AREA(MP),DELTT(MP),RATIO(MP))
READ(5,*) (PIPE,D(I),L(I),F(I),A(I),PIPEZ(I)),1=NPIPES)
READ(5,PUMPS)
WRITE(*,792)
READ(*,790) FNAME
OPEN(6,FILE=FNAME,STATUS='REPLACE')
-----
C   CH=CHAR(27)
C   CH12=CHAR(12)
C   CH78=CHAR(78)
C   CH79=CHAR(79)
C   CHN=CHAR(3)
DELTN=100000.
FAIL=.FALSE.
BYPASS=.FALSE.
IF(PPLOT.OR.HVPRNT.OR.GRAPH) SAVE=.TRUE.
PINERT=WRSQ/32.2
PI=3.141592
NEXP=1.0
IF(F(1),GT.10.) NEXP=0.85
* COMPUTE STEADY STATE DISCHARGE
IF(QTRY.LT.0.001) QTRY=QN(4)
COEF=12.*144.*144.*16.*NPUMPS*NPUMPS/(64.4*449.*449.*PI*PI)
IF(F(1),GT.10.) COEF=3.03*(12.*4.87)*(NPUMPS/(449.*.7854))**1.85
EX=2.0
IF(F(1),GT.10.) EX=1.85
DO 320 NZ=1,20
DO 300 I=1,5
IF(QTRY.GT.QN(I).AND.QTRY.LE.QN(I+1)) GO TO 310
300 CONTINUE
WRITE(6,250)
STOP
310 HN=HNSQ(I)+(QTRY-QN(I))*(HNSQ(I+1)-HNSQ(I))/(QN(I+1)-QN(I))
SUM=0.
DO 301 J=1,NPIPES
IF(F(J),GT.10.) SUM=SUM+L(J)*QTRY**1.85/((F(J)**1.85)
$(D(J)**4.87))
IF(F(J),LT.10.) SUM=SUM+F(J)*L(J)*QTRY*QTRY/D(J)**5
301 CONTINUE
FUNCT=HRESUP-HRESDN+NSTAGE+HN-COEF*SUM
FPRIME=NSTAGE*(HNSQ(I+1)+HNSQ(I))/(QN(I+1)-QN(I))-EX*COEF*SUM/QTRY
QNEXT=QTRY-FUNCT/FPRIME
IF(ABS(QNEXT-QTRY).LT.QACC) GO TO 350
QTRY=QNEXT
320 CONTINUE
WRITE(6,251)
STOP
350 QLINE=QNEXT*NPUMPS

```

```

Q=QNEXT
HPUMP=NSTAGE+HN
COEF=4.*144./(449.*PI)
DO 2 I=1,NPIPES
VZERO(I)=QLINE*COEF/D(I)**2
AREA(I)=0.25*PI*D(I)*D(I)/144.
C(I)=32.2/A(I)
DELTT(I)=L(I)/(NPARTS*(VZERO(I)+A(I)))
IF(.LEQ.NPIPES) SINE(I)=(ZEND-PIPEZ(I))/L(I)
IF(.EQ.NPIPES) GO TO 2
SINE(I)=(PIPEZ(I+1)-PIPEZ(I))/L(I)
2 CONTINUE
** COMPUTE MINIMUM DELTA T **
DELTA=DELTT(1)
KMIN=1
DO 12 I=2,NPIPES
IF(DELTT(I).GT.DELTA) GO TO 12
DELTA=DELTT(I)
KMIN=I
12 CONTINUE
IF(FERUN) DELT=DTNEW
NPARR=1
DO 13 I=1,NPIPES
IF(.LEQ.KMIN) GO TO 14
ANPAR=L(I)/(DELTA*(VZERO(I)+A(I)))
NPAR(I)=ANPAR
TEST=NPAR(I)
IF(ABS(TEST+1-ANPAR).LT..0001) NPAR(I)=NPAR(I)+1
GO TO 166
14 NPAR(I)=NPARTS
166 IF(NPAR(I).GT.NPARR) NPARR=NPAR(I)
13 CONTINUE
IZ=NPARR+1
IZZ=IZ+1
C ALLOCATE (X(NP,IZ),V(NP,IZ),H(NP,IZ),HLOW(NP,IZ),HHIGH(NP,IZ),
C $HEAD(NP,IZ),VNEW(NP,IZ),HNEW(NP,IZ),THIGH(NP,IZ),TLOW(NP,IZ),
C $HSTEAD(NP,IZ))
DO 177 I=1,NPIPES
K=NPAR(I)+1
177 HEAD(I,K+1)=0.
WRITE(6,100) CH,CH78,CHN
WRITE(6,201) TITLE1
WRITE(6,2011) TITLE2
WRITE(6,202)
WRITE(6,101) NPIPES,NPARTS,HPUMP,HRESUP,HRESDN,HATM,ZEND,TMAX.
$IOU,QACC
WRITE(6,104)
WRITE(6,105) NPUMPS,NSTAGE,RPM,WRSQ
WRITE(6,106)
WRITE(6,107) (QN(I),HNSQ(I),TNSQ(I),I=1,6)
WRITE(6,108) QLINE,HPUMP
IF(F(1).LT.10.) WRITE(6,102)
IF(F(1).GT.10.) WRITE(6,1022)
DO 3 I=1,NPIPES
IF(F(1).LT.10.) WRITE(6,103) I,D(I),L(I),A(I),PIPEZ(I),F(I),

```

```

$VZERO(I)
IF(F(1).GT.10.) WRITE(6,1033) I,D(I),L(I),A(I),PIPEZ(I),F(I),
$VZERO(I)
3 CONTINUE
WRITE(6,1020)
DO 4 I=1,NPIPES
LA=L(I)/A(I)
AINT=1.0-DELTA*NPAR(I)/LA
4 WRITE(6,1030) I,DELTT(I),NPAR(I),SINE(I),LA,AINT
* CONVERT TO Q/N, H/NSQ, T/NSQ
COEF=60.*550./(2.*PI)
DO 1 I=1,6
QN(I)=QN(I)/(449.*RPM)
TNSQ(I)=NSTAGE*COEF*TNSQ(I)/RPM**3
1 HNSQ(I)=HNSQ(I)/RPM**2
** SET UP CONDITIONS FOR STEADY STATE (T=0) **
H(1,1)=HRESUP
V(1,1)=VZERO(1)
DO 20 I=1,NPIPES
DELL=L(I)/NPAR(I)
IF(F(I).GT.10.) AK(I)=12.*DELTA*195./(2.*D(I)*(F(I)**1.85)*
$(D(I)/12.)**1.7)
IF(F(I).LT.10.) AK(I)=12.*F(I)*DELTA/(2.*D(I))
IF(F(I).GT.10.) F(I)=195./(F(I)**1.85)*(VZERO(I)**1.5)*
$(D(I)/12.)**1.7)
DELHF=12.*F(I)*DELL*VZERO(I)**2/(64.4*D(I))
K=NPAR(I)+1
X(I,1)=0.
HEAD(I,1)=H(I,1)-PIPEZ(I)
RATIO(I)=DELTA/DELL
DO 21 J=2,K
X(I,J)=(-J-1)*DELL/L(I)
H(I,J)=H(I,1)-DELHF*(J-1)
HEAD(I,J)=H(I,J)-(PIPEZ(I)+X(I,J)*L(I)*SINE(I))
21 V(I,J)=VZERO(I)
IF(.LEQ.NPIPES) GO TO 20
H(I+1,1)=H(I,K)
IF(.LEQ.1PUMP) H(I+1,1)=H(I,K)+HPUMP
V(I+1,1)=VZERO(I+1)
20 CONTINUE
DO 23 I=1,NPIPES
K=NPAR(I)+1
DO 23 J=1,K
HSTEAD(I,J)=H(I,J)
TLOW(I,J)=0.
THIGH(I,J)=0.
HLOW(I,J)=H(I,J)
23 HHIGH(I,J)=H(I,J)
PHMAX=-100.
PHMIN=100000.
DO 11 I=1,NPIPES
K=NPAR(I)+1
DO 11 J=1,K
IF(HEAD(I,J).LT.PHMAX) GO TO 16
IPMAX=I

```

5. 부정류해석에서 펌프의 경계조건

```

XMAX=X(I,J)
PHMAX=HEAD(I,J)
TTMAX=T
GO TO 17
16 IF(HEAD(I,J).GT.PHMIN) GO TO 17
  IPMIN=I
  XMIN=X(I,J)
  PHMIN=HEAD(I,J)
  TTMIN=T
17 CONTINUE
11 CONTINUE
* ** WRITE OUT STEADY STATE CONDITIONS **
  T=0.0
  IENTRY=0
  INDEX=TMAX/DELTA+1
  WRITE(6,100) CH:2
  WRITE(6,204)
  WRITE(6,205) T
  DO 22 I=1,NPIPES
    K=NPAR(I)+1
    WRITE(6,206) I,(X(I,J),HEAD(I,J),H(I,J),V(I,J),J=1,K)
  22 CONTINUE
  II=1
*   IF(SAVE) CALL PGRAPH(II,NP,I,Z,INDEX,DELTA,V,HEAD,IENTRY)
  IENTRY=1
  WRITE(6,212) RPM,Q,HPUMP
  Q=Q/449.
-----
*           BEGIN TRANSIENT ANALYSIS
-----
  DO 99 II=1,INDEX
    T=T+DELTA
* ** COMPUTE H AND V AT INTERIOR NODES **
    DO 30 I=1,NPIPES
      K=NPAR(I)
      DO 30 J=2,K
        RA=RATIO(I)*A(I)
        VLEFT=V(I,J)-RA*(V(I,J)-V(I,J-1))
        VRITE=V(I,J)-RA*(V(I,J)-V(I,J+1))
        HLEFT=H(I,J)-RA*(H(I,J)-H(I,J-1))
        HRITE=H(I,J)-RA*(H(I,J)-H(I,J+1))
        VNEW(I,J)=0.5*(VLEFT+VRITE+C(I))*((HLEFT-HRITE)+C(I)*DELTA*SINE(I))
        $(VLEFT-VRITE)-AK(I)*(VLEFT*ABS(VLEFT)**NEXP+VRITE*
        $ABS(VRITE)**NEXP)
        ;HNEW(I,J)=0.5*(HLEFT+HRITE+(VLEFT-VRITE)/C(I)+DELTA*SINE(I))*
        $(VLEFT+VRITE)-(AK(I)/C(I))*(VLEFT*ABS(VLEFT)**NEXP-VRITE*
        $ABS(VRITE)**NEXP)
      30 CONTINUE
* ** COMPUTE H AND V AT INTERIOR JUNCTIONS **
      KK=NPIPES-1
      DO 40 I=1,KK
        K=NPAR(I)+1
        VLEFT=V(I,K)-RATIO(I)*A(I)*(V(I,K)-V(I,K-1))
        HLEFT=H(I,K)-RATIO(I)*A(I)*(H(I,K)-H(I,K-1))
        C1=VLEFT+C(I)*HLEFT+C(I)*VLEFT*DELTA*SINE(I)-AK(I)*VLEFT+
        $ABS(VLEFT)**NEXP
        VRITE=V(I+1,1)-RATIO(I+1)*A(I+1)*(V(I+1,1)-V(I+1,2))
        HRITE=H(I+1,1)-RATIO(I+1)*A(I+1)*(H(I+1,1)-H(I+1,2))
        C3=VRITE-C(I+1)*HRITE-C(I+1)*DELTA*VRITE*SINE(I+1)-AK(I+1)*VRITE*
        $ABS(VRITE)**NEXP
        IF(I.EQ.IPUMP) GO TO 41
        HNEW(I,K)=(-C3*AREA(I+1)+C1*AREA(I))/(C(I+1)*AREA(I+1)+C(I)*
        $AREA(I))
        HNEW(I+1,1)=HNEW(I,K)
        VNEW(I,K)=C1-C(I)+HNEW(I,K)
        VNEW(I+1,1)=C3+C(I+1)+HNEW(I+1,1)
        GO TO 40
*   COMPUTE CONDITIONS AT BOOSTER PUMP
  41 IF(BYPASS) GO TO 554
    QQ=Q/RPM
    IF(QQ.LE.0.) GO TO 552
    DO 44 J=1,5
      IF(QQ.GT.QN(J).AND.QQ.LE.QN(J+1)) GO TO 45
  44 CONTINUE
    WRITE(6,260)
    J=5
    TN2=TNSQ(6)
    GO TO 553
  45 TN2=TNSQ(J)+(QQ-QN(J))*(TNSQ(J+1)-TNSQ(J))/(QN(J+1)-QN(J))
    GO TO 553
  552 TN2=TNSQ(1)
    J=1
  553 RPM=RPM-30.*TN2*DELTA/(PI*PINERT)+RPM*RPM
    IF(RPM.LT.0.) BYPASS=.TRUE.
    IF(RPM.LT.0.) GO TO 554
    GO TO 555
  554 CONTINUE
    VPD=(C1*C(I+1)+C(I)+C3)/(C(I)+C(I+1)*AREA(I+1)/AREA(I))
    IF(VPD.LE.0.) GO TO 520
    VPS=AREA(I+1)*VPD/AREA(I)
    HPD=(VPD-C3)/C(I+1)
    HPS=HPD
    GO TO 530
  520 VPS=0.
    VPD=0.
    HPD=-C3/C(I+1)
    HPS=C1/C(I)
    GO TO 530
  555 DO 46 NZ=1,20
    HA=HNSQ(J)
    HB=HNSQ(J+1)
    QA=QN(J)
    QB=QN(J+1)
    C7=(HA+HB)/(QA-QB)
    C8=HB-QB*C7
    VPD=(C1/C(I)+NSTAGE*RPM*RPM*C8+C3/C(I+1))/(1./C(I+1)+AREA(I+1)/
    $(C(I)*AREA(I))-RPM*NSTAGE*C7*AREA(I)/NPIPES)
    IF(VPD.LE.0.) VPD=0.
    HPD=(VPD-C3)/C(I+1)
    VPS=AREA(I+1)*VPD/AREA(I)

```



```

HPS=(C1-VPS)/C(I)
IF(HPD.GT.HPS) GO TO 500
VPD=(C1+C(I+1)+C(I)*C3)/(C(I)+C(I+1)*AREA(I+1)/AREA(I))
VPS=AREA(I+1)*VPD/AREA(I)
HPD=(VPD-C3)/C(I+1)
HPS=HPD
500 CONTINUE
QPD=VPD*AREA(I+1)/(NPUMPS*APM)
DO 47 JJ=1,5
IF(QPD.GT.QN(JJ).AND.QPD.LE.QN(JJ+1)) GO TO 48
47 CONTINUE
IF(QPD.GT.0..AND.J.EQ.5) GO TO 50
IF(QPD.GT.0..AND.J.LT.5) J=J+1
IF(QPD.LE.0..AND.J.EQ.1) GO TO 50
IF(QPD.LE.0..AND.J.GT.1) J=J-1
GO TO 46
48 IF(J.EQ.JJ) GO TO 50
J=J
46 CONTINUE
WRITE(6,270)
STOP
50 CONTINUE
Q=QPD*APM
530 HNEW(I+1,1)=HPD
VNEW(I+1,1)=VPD
VNEW(I,K)=VPS
HNEW(I,K)=HPS
IF(HPS.GE.HPD) HPUMP=0.
IF(HPS.GE.HPD) BYPASS=.TRUE.
IF(HPD.GT.HPS.AND.VPD.GT.0.) HPUMP=HPD-HPS
IF(VPD.LE.0.) HPUMP=HNSQ(1)*APM*APM*NSTAGE
40 CONTINUE
* ** COMPUTE H AND V AT UPSTREAM END **
* --THIS BOUNDARY CONDITION IS FOR A CONSTANT HEAD RESERVOIR--
WRITE=V(1,1)-RATIO(1)*A(1)*(V(1,1)-V(1,2))
HRITE=H(1,1)-RATIO(1)*A(1)*(H(1,1)-H(1,2))
C3=WRITE-C(1)+HRITE-C(1)*DELTA*WRITE+SINE(1)-AK(1)*WRITE+
$ABS(WRITE)**NEXP
HNEW(1,1)=HRESUP
VNEW(1,1)=C3+C(1)+HRESUP
* ** COMPUTE H AND V AT DOWNSTREAM END **
* --THIS BOUNDARY CONDITION IS FOR A CONSTANT HEAD RESERVOIR--
NV=NPART(NPIPES)+1
VLEFT=V(NPIPES,NV)-RATIO(NPIPES)*A(NPIPES)*(V(NPIPES,NV)-
$V(NPIPES,NV-1))
HLEFT=H(NPIPES,NV)-RATIO(NPIPES)*A(NPIPES)*(H(NPIPES,NV)-
$H(NPIPES,NV-1))
C1=VLEFT+C(NPIPES)+HLEFT+C(NPIPES)+VLEFT*DELTA*SINE(NPIPES)-
$AK(NPIPES)*VLEFT+ABS(VLEFT)**NEXP
HNEW(NPIPES,NV)=HRESDN
VNEW(NPIPES,NV)=C1-C(NPIPES)+HNEW(NPIPES,NV)
* ** LOCATE MAXIMUM AND MINIMUM HEADS AND H-VALUES **
DO 61 I=1,NPIPES
K=NPART(I)+1
DO 61 J=1,K
DELTX=L(I)/(NPART(I)*ABS(VNEW(I,J))+A(I)))
IF(DELTX.LT.DELTN) DELTN=DELTX
IF(HNEW(I,J).GT.HLOW(I,J)) GO TO 63
HLOW(I,J)=HNEW(I,J)
TLOW(I,J)=T
63 IF(HNEW(I,J).LT.HHIGH(I,J)) GO TO 64
HHIGH(I,J)=HNEW(I,J)
THIGH(I,J)=T
64 HEAD(I,J)=HNEW(I,J)-(PIPEZ(I)+X(I,J)*L(I)*SINE(I))
IF(HEAD(I,J).LT.PHMAX) GO TO 66
IPMAX=
XMAX=X(I,J)
PHMAX=HEAD(I,J)
TTMAX=T
GO TO 67
66 IF(HEAD(I,J).GT.PHMIN) GO TO 67
IPMIN=I
XMIN=X(I,J)
PHMIN=HEAD(I,J)
TTMIN=T
67 CONTINUE
IF(HEAD(I,J).GT.-HATM) GO TO 62
WRITE(3,214) T,I,X(I,J)
FAIL=.TRUE.
62 CONTINUE
61 CONTINUE
* ** WRITE OUT H,V,AND HEAD VALUES AND TEST FOR TMAX **
IF(FAIL) GO TO 71
IF(MOD(I,I.OUTPUT).NE.0) GO TO 72
71 WRITE(6,205) T
DO 73 I=1,NPIPES
K=NPART(I)+1
WRITE(6,206) I,X(I,J),HEAD(I,J),HNEW(I,J),VNEW(I,J),J=1,K)
73 CONTINUE
IF(BYPASS.AND.VPD.GT.0.) WRITE(6,215)
IF(BYPASS) GO TO 72
QQQ=49.*Q
WRITE(6,212) RPM,QQQ,HPUMP
72 CONTINUE
* IF(SAVE) CALL PGRAPH(I,NP,IZ,INDEX,DELTA,VNEW,HEAD,IENTRY)
IF(FAIL) GO TO 400
* ** PREPARE FOR NEXT TIME STEP COMPUTATION **
DO 80 I=1,NPIPES
K=NPART(I)+1
DO 80 J=1,K
V(I,J)=VNEW(I,J)
80 H(I,J)=HNEW(I,J)
IF(T.GT.TMAX) GO TO 400
99 CONTINUE
-----
* END OF TRANSIENT ANALYSIS
-----
* ** CHECK STABILITY CRITERIA **
400 IF(DELTN.GE.(0.9999*DELTA)) GO TO 402
DELTA=0.999*DELTN

```

5. 부정류해석에서 펌프의 경계조건

```

WRITE(*,216) DELT
WRITE(6,216) DELT
GO TO 98
* ** WRITE OUT MAXIMUM AND MINIMUM HEADS AND H-VALUES **
402 CONTINUE
WRITE(6,100) CH12
WRITE(6,207)
DO 401 I=1,NPIPES
WRITE(6,208) I
K=NPAR(I)+1
DO 401 J=1,K
HEADMX=HHIGH(I,J)-(PIPEZ(I)+X(I,J)+L(I))*SINE(I)
HEADMN= HLOW(I,J)-(PIPEZ(I)+X(I,J)+L(I))*SINE(I)
401 WRITE(6,209) X(I,J),HEADMX,THIGH(I,J),HEADMN,TLOW(I,J),
$HHIGH(I,J),HLOW(I,J)
PMAX=PHMAX/2.31
PMIN=PHMIN/2.31
WRITE(6,210) PHMAX,PMAX,IFMAX,XMAX,TTMAX
WRITE(6,211) PHMIN,PMIN,IPMIN,XMIN,TTMIN
IF(PFILE) WRITE(6,100) CH12
IF(PFILE) CALL PROFILE(NPIPES,L,NPAR,PIPEZ,SINE,X,HLOW,HHIGH,
$HSTEAD,IENTRY)
IENTRY=2
* IF(VPRINT) CALL PGRAPH(II,NP,IZ,INDEX,DELT,VNEW,HEAD,IENTRY)
IENTRY=3
WRITE(6,100) CH,CH79
* IF(PPLOT) CALL PGRAPH(II,NP,IZ,INDEX,DELT,VNEW,HEAD,IENTRY)
IENTRY=4
* IF(GRAPH) CALL PGRAPH(II,NP,IZ,INDEX,DELT,VNEW,HEAD,IENTRY)
IF(GRAPH) CALL PROFILE(NPIPES,L,NPAR,PIPEZ,SINE,X,HLOW,HHIGH,
$HSTEAD,IENTRY)
98 CONTINUE
* ***** FORMAT STATEMENTS *****
100 FORMAT(3A)
101 FORMAT(5X,'NUMBER OF PIPES =',I3/5X,'MINIMUM NO. OF PARTS PIPE IS
$DIVIDED INTO =',I3/5X,'BOOSTER PUMPS ARE LOCATED AT DOWNSTREAM END
$ OF PIPE',I3/5X,'RESERVOIR ELEVATION AT UPSTREAM END =',F7.1,' FT'
$/5X,'RESERVOIR ELEVATION AT DOWNSTREAM END =',F7.1,' FT'/
$$X,'ATMOSPHERIC PRESSURE HEAD =',F5.1,' FT OF WATER'
$/5X,'ELEVATION OF DOWNSTREAM END OF LAST PIPE =',F7.1,' FT'/5X,
$'MAXIMUM REAL TIME OF ANALYSIS =',F7.1,' SEC'/5X,'OUTPUT IS PRINT
$ED EVERY',I4,' TH TIME INTERVAL'/5X,'ACCURACY OF ITERATION FOR ST
$EADY STATE DISCHARGE =',F5.1,' GPM')
102 FORMAT(//22X,'PIPE INPUT DATA'/22X,15(-)//5X,'PIPE DIAM-IN LENGT
$H-FT WAVE SPD-FPS PIPEZ-FT F-VALUE VEL-FPS/'
$$X,4(-),1X,7(-),1X,9(-),1X,12(-),1X,8(-),1X,7(-),
$1X,7(-))
1022 FORMAT(//22X,'PIPE INPUT DATA'/22X,15(-)//5X,'PIPE DIAM-IN LENGT
$H-FT WAVE SPD-FPS PIPEZ-FT C-VALUE VEL-FPS/'
$$X,4(-),1X,7(-),1X,9(-),1X,12(-),1X,8(-),1X,7(-),
$1X,7(-))
1020 FORMAT(5X,'PIPE DELT-SEC PARTS SINE L/A-SEC INTERPOLATION'
$/5X,4(-),1X,8(-),1X,5(-),2X,6(-),1X,7(-),1X,13(-))
103 FORMAT(5X,I3,2X,F6.2,1X,F9.1,6X,F6.0,4X,F6.0,3X,F5.4,3X,
$/F5.2)
1033 FORMAT(5X,I3,2X,F6.2,1X,F9.1,6X,F6.0,4X,F6.0,3X,F5.0,3X,F5.2)
1030 FORMAT(5X,I3,2X,F6.3,3X,I3,2X,F7.5,1X,F6.2,5X,F5.3)
104 FORMAT(///15X,'* PUMP DATA */')
105 FORMAT(5X,'NUMBER OF PUMPS IN PARALLEL =',I3/5X,'EACH PUMP HAS',I2
$,' STAGES'/5X,'STEADY STATE PUMP SPEED =',F7.1,' RPM'/5X,'EACH PUM
$P AND MOTOR UNIT HAS A MOMENT OF INERTIA OF',F6.1,' LB-FT SQ')
106 FORMAT(/8X,Q-GPM H/STAGE-FT BHP/STAGE/8X,5(-),2X,10(-),2X,
$9(-))
107 FORMAT(6X,F7.1,2X,F8.1,4X,F8.2)
108 FORMAT(//5X,'* STEADY STATE LINE FLOW RATE =',F9.1,
$' GPM AT A PUMP HEAD =',F6.1,' FT'/)
201 FORMAT(//10X,A)
2011 FORMAT(10X,A/)
202 FORMAT(21X,14(*))/21X,'* INPUT DATA */21X,14(*)/)
204 FORMAT(////' PRESSURE HEADS, H-VALUES AND VELOCITIES AS FUNCTIONS
$ OF TIME'/2X,60(-))
205 FORMAT(//18X,2(4X,' X HEAD-FT H-FT V-FPS)'/ TIME =',F7.3,
$' SEC,2(4X,'-----'))
206 FORMAT(/12X,'PIPE',I2,2(4X,F5.3,2F7.0,F8.2)/(18X,2(4X,F5.3,2F7.0
$/F8.2)))
207 FORMAT(////28X,27(*))/28X,'* TABLE OF EXTREME VALUES */
$28X,27(*))/13X,'X MAX HEAD TIME MIN HEAD TIME ',
$'MAX H MIN H'/11X,5(-),2X,8(-),2X,4(-),4X,8(-),2X,
$4(-),3X,6(-),3X,6(-))
208 FORMAT(2X,'PIPE',I2)
209 FORMAT(11X,F5.3,3X,F6.1,2X,F5.1,5X,F6.1,2X,F5.1,3X,F6.0,3X,F6.0)
210 FORMAT(// ' MAXIMUM HEAD =',F6.1,' FT ('F5.1,' PSI) IN PIPE',
$'I3,' AT X =',F5.3,' AT TIME =',F7.2,' SEC')
211 FORMAT(/ ' MINIMUM HEAD =',F6.1,' FT ('F5.1,' PSI) IN PIPE',
$'I3,' AT X =',F5.3,' AT TIME =',F7.2,' SEC')
212 FORMAT(/15X,'PUMP SPEED =',F7.1,' RPM,10X,'PUMP DISCHARGE =',F7.1
$,' GPM EACH'/15X,'PUMP HEAD =',F6.1,' FT')
214 FORMAT(////2X,'COLUMN SEPARATION HAS OCCURRED AT',F6.2,' SEC IN PI
$PE',I3,' AT LOCATION',F5.3)
215 FORMAT(/15X,'PUMP HEAD HAS DROPPED TO ZERO AND BYPASS IS OPEN')
216 FORMAT(/ ' THE CHECK FOR STABILITY CRITERIA HAS FOUND A VIOLATION.'
$/ ' THE ANALYSIS MUST BE RERUN WITH A SMALLER DELTA T.'/
$' CHANGE DATA FILE TO SET DTNEW =',F7.4,' SEC & RERUN = "T")
250 FORMAT(/////10X,'YOU HAVE EXCEEDED MAXIMUM DISCHARGE VALUE INPUT.
$EXECUTION IS TERMINATED.').
251 FORMAT(/////10X,ITERATION TO COMPUTE STEADY STATE DISCHARGE WAS U
$NSUCCESSFUL AFTER 20 TRIES')
260 FORMAT(//10X,'YOU HAVE EXCEEDED MAXIMUM BHP VALUE INPUT')
270 FORMAT(/////10X,'THE SEARCH FOR A VALUE OF Q HAS CYCLED 20 TIMES W
$ITHOUT SUCCESS. EXECUTION IS TERMINATED.').
790 FORMAT(A)
791 FORMAT(/ ' ENTER THE NAME OF YOUR INPUT DATA FILE: 'W)
792 FORMAT(/ ' ENTER THE NAME OF THE FILE ON WHICH YOU WANT YOUR
OUTPUT
$ WRITTEN: 'W)
END

```