

대심도 지하관로 배수 시스템의 서어징 현상에 관한 연구

Study of Surges in a Large-Diameter Subteranean Diversion Channel with Multiple Surge Tanks

정 광 근* / 여 운 식* / 안 태 진**

Chung, Kwang Kun / Yo, Woon Shik / Ahn, Tae Jin

Abstract

Complicated surges in a large-diameter subteranean diversion channel with six surge tanks and a pumping station are studied with a nonlinear state equation based on a rigid water column theory. The state equation consists of flow continuity equations for the tanks and momentum equations for drainage pipe system with nonlinear resistance. Under rectangular pulse inputs conditions where the pumped rate of outflow is equated to the total rate of flow, both the state equation and its linearized equation yield almost identical oscillations of water levels. This shows that effects of pipe resistance on the surges are small, and justifies a free oscillation analysis. Free oscillation equation has six eigen modes of different periods, including a rigid mode which is existed when the pumped rate of outflow differs from the total rate of inflow. The six modes constitute a variety of surges dependent on different inflow and outflow conditions. Presence of the rigid mode needs sophisticated pump operations adjusted to real flood inflows.

Keywords: surging, surge tank, subteranean diversion channel, nonlinear system, linear system, free oscillation, eigen oscillation mode

요 약

6개의 수조와 1개의 펌프장을 갖고 있는 대심도 지하관로 배수시스템에서 발생하는 복잡한 서어징 현상을 강체수주 이론에 의한 비선형 상태방정식에 의해서 해석하였다. 상태방정식은 각 수조에서의 유량연속방정식과 비선형항을 갖는 지하관로의 운동 방정식으로부터 구성된다. 홍수의 유입량과 펌프의 유출량을 장방형 펄스(pulse)로 하고 유출유량과 전유입유량이 같다고 한다면 비선형 상태방정식에 의한 각 수조수위의 진동은 선형화 방정식에 의한 결과와 잘 일치하고 있다. 이것은 관로저항의 영향이 적고 이것을 무시한 자유진동해석이 타당하다는 것을 나타내는 것이다. 자유진동 방정식은 6개의 고유모드를 갖는다. 그 중 하나는 강제모드이며 유출유량이 전유입유량과 다를 때에 나타나며 이러한 6개의 고유모드는 유입유출조건에 의해서 여러 가지 서어징 현상을 구성한다. 강제모드가 존재하기 때문에 실제의 홍수 유입량에 대응한 고도의 펌프운전이 요구된다.

핵심용어 : 서어지, 서어지 탱크, 지하관로 배수시스템, 비선형계, 선형근사계, 자유진동, 고유진동모드

* 농어촌진흥공사 농어촌연구원 주임연구원

Senior Researcher, Rural Research Inst., Rural Development Corporation, Ansan, Kyonggi 425-170, Korea

** 안성산업대학교 토목공학과 전임강사

Full-Time Lec., Dept. of Civil Engrg., Ansung National Univ. of Industry, Ansung, Kyonggi 456 749, Korea

1. 서 론

1960년대 경 이후 일본에서는 급격한 경제성장에 의한 도시화와 지리적인 위치에 의한 장마, 태풍 등의 영향으로 매년 홍수에 의한 피해를 입어왔다. 특히 상습적인 피해지역에 있어서는 하천주변에 가옥이 발달되어 있는 이유 등으로 하천의 폭 등을 넓히는 방재 공사의 많은 부분을 용지매입이 차지하게 되어 효율적인 공사를 할 수 없었다. 그러나 최근에 많은 인프라 시설의 지하공간이용이라는 추세에 따라 홍수대비시설의 지하매설이라는 자연스런 발상이 대두되었다.

이러한 지하공간을 이용한 홍수대비시설을 「대심도 지하조정지」라 하며 미국의 시카고시에서 실시된 TARP(Tunnel and Reservoir Plan)가 이 시설의 원조이며 그 이용은 호수시에 미시간호에 유입되는 오수를 차단하기 위해서 지하에 대규모 조정지시설을 만들어 강우시에 유입수를 저장해 놓고 비가오지 않을 때에 양수하여 오수처리장으로 보내는 역할을 하고 있다.

일본에서는 이 시설을 여러 개의 강을 관로로 연결시켜 홍수의 유입을 바다 또는 다른 강으로 방류시키는 「대심도 지하 관로」로서 이용하기 위하여 계획·시공을 토우쿄도의 간다가와유역, 오오사카부의 네아가와유역, 사이타마현의 나카가와유역에서 하고 있으며 본 연구는 사이타마현의 나카가와유역을 대상으로 하였다. 이 대심도 지하 관로의 주된 특성으로서는 ① 용지 취득이 불필요하기 때문에 사업을 조기 달성할 수 있다. ② 지하 40 m 정도에 매설하기 때문에 도로구조 본체나 다른 도시시설에의 영향이 없다. ③ 복수하천연결에 의한 지역적 강우변화에의 효율적 대응이 가능하다. ④ 긴급구간의 우선적 시공으로 조정지로서의 유효

활용에 의한 치수안전도의 조기 달성이 가능하다. ⑤본천의 개수가 불필요하다. ⑥ 관로 안은 항상 비어 있기 때문에 홍수의 저류효과와 타 목적의 가능성을 갖고 있다. 등의 6가지를 들 수 있다. 위와 같은 여러 가지 이점에도 불구하고 아직까지 이 대심도 지하 관로가 활성화되지 않고 있는 이유 중의 하나는 지하에 매설되어 있는 시설물로서 물리학적 현상의 해석방법이 완전하게 정립되어 있지 않는 점도 간과할 수 없다.

지금까지 농업용 파이프라인이나 도시 수도용 파이프라인의 물리적 특성해석에는 크게 나누어서 기본적인 설계 제원을 제공해 주는 정상류 해석, 시간에 대한 대상치의 변화를 예측할 수 있는 부정류해석, 관로가 갖고 있는 독특한 현상 중에 하나인 수격압 해석, 그리고 서어지 탱크의 서어징 해석 등을 들 수 있다. 특히 이 대심도 지하 관로에 관해서는 관로구경이 10 m 이기 때문에 아직까지 이러한 대구경의 관로에 연결되어진 수조에 대한 서어징 현상의 해석에가 드문 것이 현재까지의 실정이다.

따라서 본 연구는 Fig. 1과 같은 사이타마현의 나카가와 유역의 지하 관로를 모델로 하여 지하 관로가 만류상태인 경우에 발생하는 각각의 수조내의 복잡한 서어징 현상을 연성진동의 견지에서 검토한다.

일반적으로 Fig. 1과 같은 배수시설에서는 평상시에는 홍수대책을 위해 지하 관로의 물은 배수가 되어있고 최하류의 펌프장 부근을 제외하고는 공기로 채워져 있다. 따라서 최초의 홍수유입에 의해 개수로 비정상류가 발생하고 다음으로 하류단에서 상류로 향해 만류상태의 관수로 비정상류로 이행해 간다. 이 과정은 공기의 연행을 포함하는 대단히 복잡한 수리현상이기 때문에 많은 연구가 실험과 이론의 양면에서 진행되고 있다(浦西和夫, 1994; 眞鍋浩一와 宮代耕一, 1992;

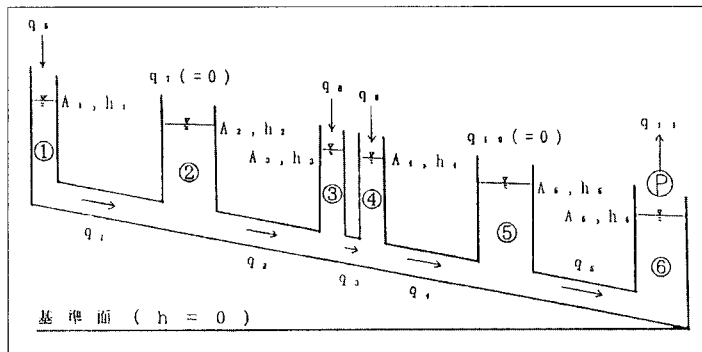


Fig. 1. System of large-diameter subterranean diversion channel

吉野秀雄, 1986).

또 다른 하나의 중요한 문제로서 본 연구와 같은 지하 관로의 만류상태에서의 복잡한 서어징 현상에 관한 것이 있다. 이것은 홍수의 유입이 변동하면서 장시간에 걸치는 경우로서 배수 펌프의 적절한 운전 방법을 결정하기 위한 것이다. 홍수 유입량의 변동은 물론 펌프의 기동·정지, 펌프 배수량의 변경 등 어느 것이나 서어징 현상의 원인이 되기 때문에 대단히 복잡한 문제이다.

최근에 스케카와노보루(スケガワ ノボル)(1996)는, 지하 하천의 만류 관로상태의 비정상류에 대해서 수리 모형 실험과 수치계산을 하고 각각의 스탠드 파이프(stand pipe)를 수조라고 생각하는 강제수주이론(鬼塚 宏太郎, 1986; Onizuka, 1986)에 의한 모델화가 타당한 것을 확인했다. 특히, 각 관로의 손실수두가 유입 손실수두($f_e = 1.0$)와 유출손실수두($f_o = 1.0$)에 Darcy-Weisbach의 마찰손실수두를 더하면 실험결과와 유사하게 근사시킬 수 있다는 것을 입증한 것은 커다란 성과이다. 그러나 각 수조(스탠드 파이프)내 수위가 복잡한 서어징 현상에 관해서는 수리실험 및 수치계산 결과의 검토에 있어서 임의의 2개 수조의 단면적과 그 사이의 관로의 총 연장으로부터 계산되어지는 U자관 진동 주기를 이용한 근사적인 해석과 고찰에 멈추고 있어 다수조 직렬관로계로서의 고유진동주기와 고유모드의 문제 등은 검토가 되어 있지 않다.

그러나, 강제수주이론을 적용할 수 있다면 적당한 선형화(三春浩一, 1996)에 의해 고유진동주기와 고유모드의 해석이 가능하고 복잡한 서어징 현상을 각 고유진동의 중복으로써 이해할 수 있을 것이다. 이것을 실행하는 것이 본 연구의 첫 번째 목적이다. 다음 문제로서는 지하 관로 배수시스템의 서어징 현상 특유의, 이른바 강제모드(安田人彦, 1993)의 존재가 있다. Fig. 1로부터 명백히 알 수 있는 것과 같이 하류의 펌프 배수량이 3개 유입량의 합계와 항상 같지 않는 한 배수로 전체의 저류량은 변화하고 그것에 따라서 각 수조 수위는 전체적으로 상하이동을 한다. 이것은 모든 수조 수위가 등속으로 변화하는 특수한 모드이지만 고유진동 해석을 하지 않는 한 표면에 나타나지 않는 것이기 때문에 지금까지 검토되었던 적은 없었다.

일반적으로 적당한 유입 및 유출 파형을 가정했을 경우 수리실험이나 수치 시뮬레이션에 의한 각 수조수위의 변동은 이 강제모드에 의한 전체로서의 상하이동과 본래의 각 고유진동이 서로 겹쳐진 것이다. 그러므

로 각 고유진동의 영향을 정확하게 판단하기 위해서는 우선 최초로 강제모드를 제거할 수 있는 경우를 상정하고 기본적인 진동 해석을 할 필요가 있다. 이와 같은 취급방법의 하나의 실례를 보여주는 것이 본 연구의 두 번째 목적이다. 따라서 본 연구는 다수조 직렬관로계로서의 지하 관로에 발생하는 복잡한 서어징 현상에 대해서 진동본의 기본적인 사고방식에 따라 구체적인 해석예를 보여주고 고찰을 행한다.

2. 대심도 지하 관로 배수시스템 상태방정식

2.1 비선형 상태 방정식

지하 관로 시스템의 구조는 Fig. 1과 같이 5개의 직렬 관로와 6개의 수조로 구성되어 있다. 홍수시의 유입은 수조①과 ③, ④의 3개소에서, 수조②와 ⑤는 조정 수조이다. 최하류의 수조⑥은 유입량을 펌프에 의해 밖으로 내보내는 배수수조이다.

Fig. 1의 모델에 강제수주이론을 적용하면 각 관로에 관한 운동 방정식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} L_1 \dot{q}_1 &= (h_1 - h_2) - K_1 |q_1| q_1 \\ L_2 \dot{q}_2 &= (h_2 - h_3) - K_2 |q_2| q_2 \\ L_3 \dot{q}_3 &= (h_3 - h_4) - K_3 |q_3| q_3 \\ L_4 \dot{q}_4 &= (h_4 - h_5) - K_4 |q_4| q_4 \\ L_5 \dot{q}_5 &= (h_5 - h_6) - K_5 |q_5| q_5 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 h_i 는 기준면부터의 각 수조수위 ($i = 1, \dots, 6$), q_n 는 관로유량 ($n = 1, \dots, 5$), \dot{q}_n 은 관로유량 q_n 의 시간변화율이다. 또한 식 (1)의 L_n 과 K_n ($n = 1, \dots, 5$)는 각각 관성을 나타내는 관로정수와 저항을 나타내는 유량 저항 계수로서 식 (2)와 식 (3)으로 표현된다.

$$L_n = \frac{l_n}{a_n g} \quad (n = 1, \dots, 5) \quad (2)$$

$$K_n = \left(f_c + f_o + f_n \frac{l_n}{d_n} \right) \frac{1}{2g a_n^2} \quad (n = 1, \dots, 5) \quad (3)$$

여기서 d_n 은 관로의 직경, l_n 은 관로의 길이, f_n

은 Darcy-Weisbach의 마찰 손실 계수, $a_n = \frac{\pi d_n^2}{4}$ 는 관로의 단면적 ($n = 1, \dots, 5$), g 는 중력 가속도, f_e 는 입구의 유입 손실 계수, f_o 는 출구의 유출 손실 계수이다. 또한 식 (3)으로 부터 유량저항계수의 계산으로는 스케카와노보루(스ヶガワ ノボル)(1996)의 $f_e = 1.0$, $f_o = 1.0$ 을 사용한다.

다음에 Fig. 1로부터 각 수조에서의 유량의 연속 방정식을 나타내면 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} A_1 \dot{h}_1 &= q_6 - q_1 \\ A_2 \dot{h}_2 &= q_7 + q_1 - q_2 \\ A_3 \dot{h}_3 &= q_8 + q_2 - q_3 \\ A_4 \dot{h}_4 &= q_9 + q_3 - q_4 \\ A_5 \dot{h}_5 &= q_{10} + q_4 - q_5 \\ A_6 \dot{h}_6 &= q_{11} + q_5 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $A_n = \frac{\pi D_n^2}{4}$ 로 각 수조의 단면적 ($n = 1, \dots, 6$), \dot{h}_n 는 각 수조 수위의 시간 변화율 ($n = 1, \dots, 6$), q_i 는 관로유량 ($i = 1, \dots, 5$), q_j 는 각 수조에서 시간의 함수로서의 유입량 또는 유출량 ($j = 6, \dots, 11$), D_n 은 각 수조의 직경 ($n = 1, \dots, 6$) 이

다. 또한 이 시스템에서는 수조②와 수조⑤에의 유입은 없기 때문에 q_7 과 q_{10} 은 0이지만 일반적인 형식으로 하기 위하여 q_7 과 q_{10} 을 표시하였다.

식 (1)에 있어서 $K'_n = K_n |q_n|$ ($n = 1, \dots, 5$) 이라고 하고 관로에서의 유량의 시간 미분에 관하여 정리하여 행렬과 벡터를 사용해 나타내면 식 (5)와 같다. 단, 식 (5)의 우변 제2항에 있어서 행렬의 대각 요소는 정수가 아니고 각 관로의 유량을 포함하기 때문에 이 식은 비선형 방정식이 된다.

또한 각 수조에서의 수위의 변화를 계산하기 위하여 식 (4)로부터 좌변의 수위의 시간 미분에 관하여 정리하여 행렬과 벡터를 사용해 나타내면 식 (6)과 같이 된다. 이 식 (6)은 선형 방정식이다.

이상의 식 (5)와 식 (6)으로 이 시스템의 비선형 상태방정식을 구성한다. 이 비선형 상태방정식에 의한 시뮬레이션에 있어서는 각 유입량과 펌프에 의한 유출량을 임의의 시간에 대한 함수로서 주고 유량의 변화율을 구하는 식 (5)와 수위의 변화율을 구하는 식(6)을 연립 방정식으로서 동시에 수치 적분을 한다. 이하의 수치 적분에는 4차의 Runge-Kutta법을 사용하고 계산구간(step)은 0.25 sec로 하였다.

2.2 비선형 상태 방정식의 선형 근사

비선형 상태방정식에 있어서 관로의 유량저항이 각 수조의 진동 주기에 얼마만한 영향을 주는지를 검토하

$$\begin{pmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \\ \dot{q}_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{L_1} & -\frac{1}{L_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_2} & -\frac{1}{L_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_3} & -\frac{1}{L_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_4} & -\frac{1}{L_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_5} & -\frac{1}{L_5} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \\ h_6 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \frac{K'_1}{L_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K'_2}{L_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K'_3}{L_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{K'_4}{L_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K'_5}{L_5} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \\ \dot{h}_3 \\ \dot{h}_4 \\ \dot{h}_5 \\ \dot{h}_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{A_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{A_2} & -\frac{1}{A_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{A_3} & -\frac{1}{A_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{A_4} & -\frac{1}{A_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{A_5} & -\frac{1}{A_5} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{A_6} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{A_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{A_2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{A_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{A_4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{A_5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{A_6} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_6 \\ q_7 \\ q_8 \\ q_9 \\ q_{10} \\ -q_{11} \end{pmatrix} \quad (6)$$

기 위하여 선형근사를 한다. 선형근사를 하기 위해서 유입량 및 펌프에 의한 유출량은 시간적으로 일정하며 또한 펌프에 의한 유출량은 유입량 전체와 같다고 하는 경우를 상정한다. 이것은 선형화에 필요한 하나의 정상 상태를 설정함과 동시에 서론에서 설명한 강제모드를 제거하기 위한 가정이다.

다음으로 관로의 유량과 수조수위를 정상치와 정상치로부터의 변동치로 나누어 나타내면 다음 식 (7) 및 식 (8)과 같이된다.

$$q_i = q_{is} + y_i \quad (i = 1, \dots, 5) \quad (7)$$

$$h_i = h_{is} + x_i \quad (i = 1, \dots, 6) \quad (8)$$

여기서 q_{is} 는 각 관로에서의 정상 유량($i = 1, \dots, 5$), y_i 는 관로 유량의 변동($i = 1, \dots, 5$), h_{is} 는 각 수조의 정상수위($j = 1, \dots, 6$), x_j 는 수조 수위의 변동치($j = 1, \dots, 6$)이다. 외부에서의 유입량 및 유출량은 일정치로 가정하기 때문에 정상치로부터의 변동치는 존재하지 않는다.

다음으로 식 (7)과 식 (8) 및 식 (7)의 시간 미분을 식 (1)에 대입하여 정상유량의 변동치에 관하여 정리하면 식 (9)가 도출된다.

$$\begin{aligned} L_1 \dot{y}_1 &= (x_1 - x_2) - 2K_1 |q_{1s}| y_1 \\ L_2 \dot{y}_2 &= (x_2 - x_3) - 2K_2 |q_{2s}| y_2 \\ L_3 \dot{y}_3 &= (x_3 - x_4) - 2K_3 |q_{3s}| y_3 \\ L_4 \dot{y}_4 &= (x_4 - x_5) - 2K_4 |q_{4s}| y_4 \\ L_5 \dot{y}_5 &= (x_5 - x_6) - 2K_5 |q_{5s}| y_5 \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)에서, 유량저항 $K_i |q_{is} + y_i|$ ($q_{is} + y_i$) ($i = 1, \dots, 5$)는 $q_{is} > |y_i|$ 에 있어서 (+)가 되기 때

문에 유량 저항을 y_i 에 관해서 전개하고 $K_i y_i^2$ 은 미소하기 때문에 무시한다. 또한 $R_i = 2K_i |q_{is}|$ 로 놓고 행렬과 벡터를 사용해 나타내면 식 (10)이 된다.

각 수조의 정상 수위로부터의 변동치를 구하기 위해서 식 (7)과 식 (8)의 시간 미분을 식 (4)에 대입하면 식 (11)과 같다.

$$\begin{aligned} A_1 \dot{x}_1 &= -y_1 \\ A_2 \dot{x}_2 &= y_1 - y_2 \\ A_3 \dot{x}_3 &= y_2 - y_3 \\ A_4 \dot{x}_4 &= y_3 - y_4 \\ A_5 \dot{x}_5 &= y_4 - y_5 \\ A_6 \dot{x}_6 &= y_5 \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)을 행렬과 벡터를 사용해 나타내면 식 (12)와 같이 된다.

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{A_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{A_2} & -\frac{1}{A_2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{A_3} & -\frac{1}{A_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{A_4} & -\frac{1}{A_4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{A_5} & -\frac{1}{A_5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{A_6} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \end{pmatrix} \quad (12)$$

이 선형근사계의 수치 해석에 있어서는 정상유량으로부터의 변동치를 구하는 식 (10)과 정상 수위의 변동치를 구하는 식 (12)를 연립시키고 비선형 상태방정식의 수치 해석과 같은 방법으로 계산을 행한다.

$$\begin{pmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{y}_3 \\ \dot{y}_4 \\ \dot{y}_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{L_1} & -\frac{1}{L_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_2} & -\frac{1}{L_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_3} & -\frac{1}{L_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_4} & -\frac{1}{L_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_5} & -\frac{1}{L_5} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \frac{R_1}{L_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_2}{L_2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R_3}{L_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{R_4}{L_4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{R_5}{L_5} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \end{pmatrix} \quad (10)$$

2.3 비선형계와 선형근사계의 시뮬레이션 (simulation)에 의한 비교

여기에서는 시스템의 기본적인 고유 진동을 조사하기 위하여 항상 전 유입량과 같은 유량을 배수할 수 있는 이상적인 펌프를 생각한다. 그리고 Fig. 2와 같은 직사각형 펄스상의 유입, 유출량에 대한 비선형계와 선형근사계의 응답을 비교한다. 펄스의 시간폭은 $t=0$ (sec)부터 $t=10,800$ sec의 3시간이다. 실제 홍수시의 유입과 형태는 장시간에 걸쳐있지만 여기서의 해석에는 직접 관계하지 않기 때문에 3시간이라고 했다. 이 결과는 Fig. 3에 나타내었다. 위의 시뮬레이션을 행하기 위한 시스템의 제원을 Table 1에 나타낸다. 이 시스템은 전체 길이가 약 6.35 km이고 각 관로의 구경은 전부 10.0 m이다. 유입이 있는 수조①, 수조③, 수조④는 다른 수조에 비해 직경이 대단히 작다. 유입량과 유출량에 관하여는, 수조①에 $80 \text{ m}^3/\text{sec}$, 수조③은 $100 \text{ m}^3/\text{sec}$, 수조④에 $20 \text{ m}^3/\text{sec}$ 의 합계 $200 \text{ m}^3/\text{sec}$ 의 계획 최대 유입량이 있고, 펌프에 의한

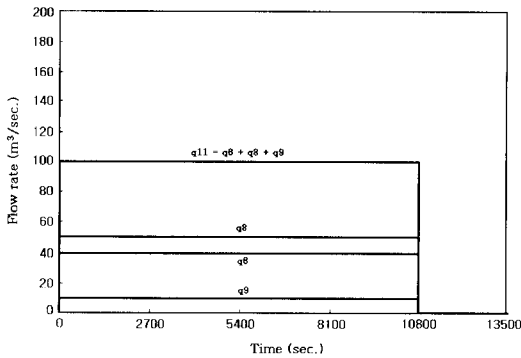


Fig. 2. Inflow and outflow by rectangular pulse waves

계획 최대 배수량도 $200 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이다. 따라서, Fig. 2의 유입·유출과형은 계획 최대 유입·유출량의 1/2에 상당한다. 더욱이 여기에서는 각 수조의 상단은 충분히 높고 각 수조 수위는 자유롭게 상승할 수 있다고 가정한다(계획상은 기준면으로부터 약 65 m 이다). 또 시스템의 초기 정지 상태에서의 각 수조 수위는 같고 기준면부터 54.875 m 라고 한다.

Fig. 3(a)에서는, 수조①의 수위 h_1 은 약 34 sec의 주기를 갖고 있는 진동이 약 307 sec의 주기를 갖고 있는 커다란 주기의 진동과 겹쳐져 감쇠 하면서 진동을 계속하고 있다. 이 수위 h_1 은 시스템 안에서 진동의 진폭이 가장 큰 수위이다. 만약, 각 수조의 상단(지표면과 같은 높이라고 한다)을 기준면부터 약 75 m로 하면 유입량에 의한 역류가 없이 배수할 수 있다. 그러나, 실제로 설계상 수조의 크기는 65 m이기 때문에, 배수는 불가능하다. 비선형계와 선형근사계의의 비교에서는 제1주기까지는 잘 일치하고 있고, 비선형계가 저항 효과가 크기 때문에, 선형근사계 보다 빨리 정상상태로 이행되어진다. 비선형계의 정상상태에의 이행시간은 약 3,600 sec이다. Fig. 3(b)에서는, 유량의 유입이 없는 수조②의 수위 h_2 는 비교적 작은 진동이 나타나지 않고, 완만한 약 307 sec의 주기 위에서 움직이고 있다. 또한 수조 ②는 수위 h_1 의 진동을 흡수하고, 시스템을 안정시키는 조정 수조의 역할을 하고 있는 것을 알 수 있다. 비선형계와 선형근사계의의 비교는 진폭이 적기 때문에 잘 일치하고 있다. Fig. 3(c)와 Fig. 4(d)에서는 수조③과 수조④로부터 유입이 있기 때문에 약 27 sec의 작은 주기의 진동이 일어난다. 이 수위 h_3 과 h_4 는 수조③과 수조④의 사이의 관로 길이가 짧기 때문에 같은 진동 형태를 보이고 있다. 비선형계와 선형근사계의 값은 유입 개시 후 120 sec 정도

Table 1. Dimension of system in Fig. 1

관로번호	관로의 제원					수조의 제원		
	관로장 $l_n (m)$	관경 $d_n (m)$	마찰손실계수 f_n	L_n (S^2/m^2)	K_n (S^2/m^2)	수조번호	직경 $D_n (m)$	단면적 $A_n (m^2)$
1	1490.0	10.0	0.015	1.93485120	0.00003255	1	3.83	11.515
2	1430.0	10.0	0.015	1.85693773	0.00003191	2	30.0	706.5
3	5.0	10.0	0.015	0.00649279	0.00001659	3	4.08	13.067
4	1965.0	10.0	0.015	2.55166618	0.00003766	4	2.34	4.298
5	1360.0	10.0	0.015	1.76603868	0.00003116	5	30.0	706.5
						6	30.0	706.5

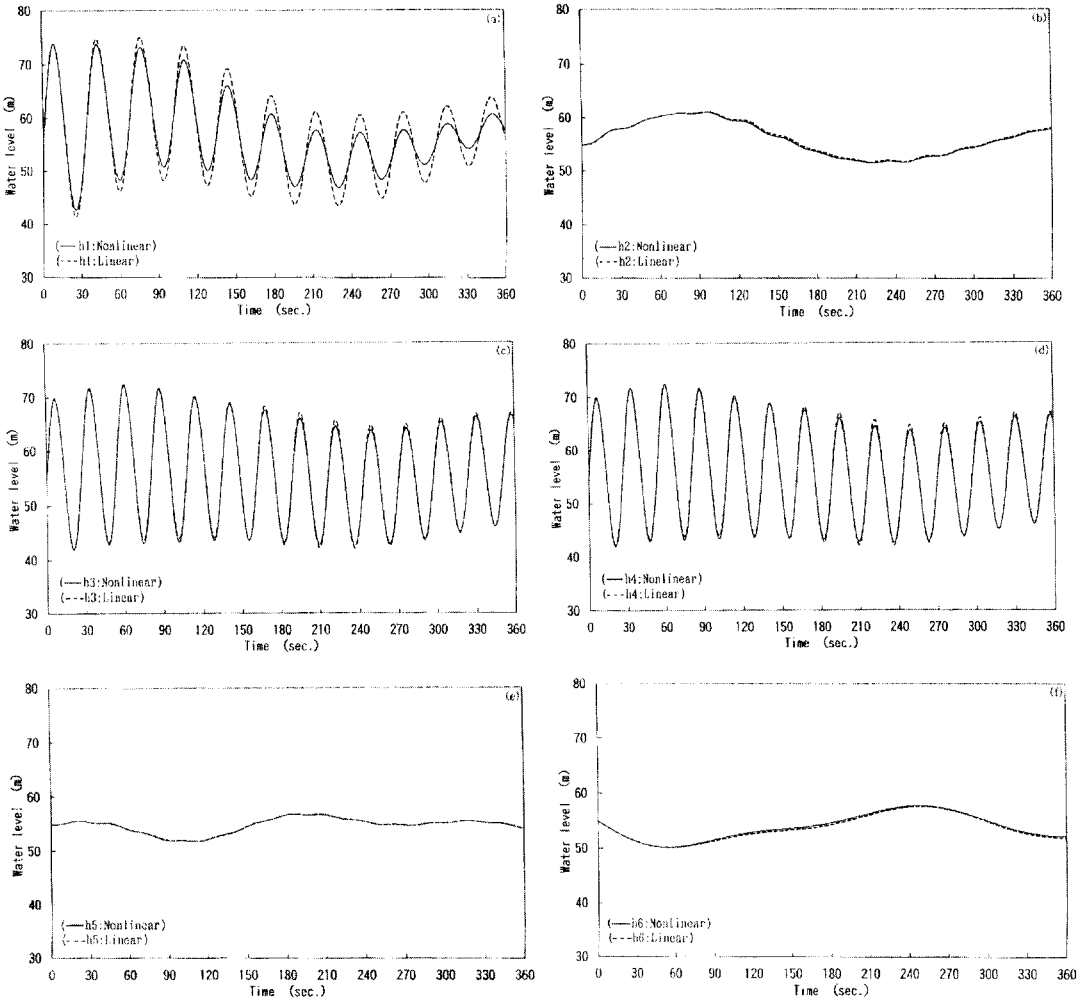


Fig. 3. Comparison between nonlinear system and its linearized

까지는 잘 일치하고 있다. Fig. 3(e)에서 수조⑤는 시스템에 대해서 수조②와 같이 조정 수조로서의 역할을 하고 있는 것을 알 수 있다. 비선형계와 선형근사계의 값은 잘 일치한다. Fig. 3(f)에서는, 수조⑥은 펌프를 이용해 유입량을 밖으로 배수하는 배수수조이지만 그 수위 h_6 은 비교적 완만한 약 307 sec의 주기로 진동한다. 비선형계와 선형근사계는 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

위의 시뮬레이션의 결과를 보면, 비선형계와 선형근사계에 있어서 모든 진동 주기와 위상이 잘 일치하고 있다. 이것은 Fig. 2와 같은 유입, 유출 개시시의 수조 수위의 과도적인 변동에 대해서는 관로저항의 영향 그

자체가 적은 것을 나타내고 있다. 이것은 Table 1에 있어서 K_n 의 값이 L_n 의 값에 비교해 대단히 적은 것으로부터도 이해할 수 있다.

또한 관로저항의 영향을 정량적으로 확인하기 위해서 유량저항계수를 포함하는 선형근사계의 상태방정식 즉 식 (10)과 식 (12)의 연립 방정식계의 고유 함수를 구하면 고유진동모드(1에서 5까지)에 대응하는 5개의 복소수 고유치가 구하여지고 각각의 실수부 절대치의 역수로서 고유진동의 감쇠를 나타내는 시정수의 값이 정해진다.

이 결과 가장 감쇠가 늦은 기본진동모드(모드 5)의 시정수는 776 sec(약 13분)의 커다란 값이 되고 가장

감쇠가 빠른 모드 3에서도 333 sec(약 5분)가 된다. 또한 각진동수(고유치의 허수부)도 Table 2의 자유 진동 경우와 소숫점 5자리수까지 일치한다. 이러한 결과는 유량저항의 영향이 매우 적은 것을 나타내는 것이다. 따라서 장시간에 걸친 진동의 감쇠를 생각하는 경우를 제외하고는 관로의 저항을 무시해도 좋을 것이다. 즉 각 수조수위의 과도적인 변동은 관로의 저항 계수를 0으로 한 자유진동해석으로 충분히 이해할 수 있다고 생각된다.

3. 자유 진동 해석

3.1 고유주기, 고유벡터 및 고유모드

Fig. 1과 같이 6개 수조수위의 자유 진동에 관한 고유치, 고유벡터, 고유모드를 계산하기 위해서, 식 (6)을 다시 한번 시간으로 미분한 식에, 식 (5)에 있어 각 유량저항계수를 0으로 놓은 식을 대입하면 식 (13)과 같은 선형 미분 방정식이 된다.

여기서 유입유출과형은 직사각형 펄스이지만 전유입량과 유출량은 같지 않다고 하는 경우를 생각하면 식 (13)에 있어서 우변의 외부로부터의 일정 유입량 및 펌프에 의한 일정 유출량의 시간미분은 $t=0$ 초와 $t=10,800$ 초의 순간을 제외하고는 0이 된다. 따라서 좌변 제2항의 행렬을 $[M]$ 이라고 하면 $0 < t < 10,800$ 초의 시간구간에 있어서 식 (13)은 식 (14)가 된다. 이것은 6개 수조수위의 자유 진동을 나타내는 진동 방정식이다. 단 $[h]$ 는 h_1 에서 h_6 까지의 벡터이다.

$$[\dot{h}] + [M] [h] = 0 \quad (14)$$

다음으로 임의의 초기치 벡터를 $[h_0]$ 로 하여 $[h] = [h_0]e^{i\omega t}$ 로 하고 2차의 시간 미분을 계산하여 식 (14)에 대입해 정리하면 다음 식 (15)와 같이 나타낸다.

$$\{\omega^2 [I] - [M]\} [h_0] e^{i\omega t} = 0 \quad (15)$$

여기에서 $[I]$: 단위벡터, ω : 각진동수이다. 또한 $[h_0]$ 는 임의이며 $e^{i\omega t}$ 는 0이 되지 않기 때문에 식 (15)로부터 다음 식 (16)이 성립한다.

$$|\omega^2 [I] - [M]| = 0 \quad (16)$$

식(16)에 의해 고유치와 고유벡터를 계산할 수 있다. 고유치는 ω^2 이 된다. 여기에서 고유벡터에 의한 행렬을 $[X_{ij}]$ ($(i=1, \dots, 6), (j=1, \dots, 6)$)이라고 하면 다음 식 (17)이 된다.

$$\{\omega^2 [I] - [M]\} [X_{ij}] = 0 \quad (17)$$

식 (17)의 연립 방정식을 푸는 것에 의해 각 고유치 ω^2 에 대한 고유벡터를 계산할 수 있다. 또한 고유주기 T 는 식 (18)을 이용하여 구할 수 있다.

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (18)$$

위의 식 (16)과 식 (18)에 의해 얻어진 각 진동모드의 고유치·각진동수·고유주기는 Table 2와 같이 된다.

Table 2. Eigen values, angular frequencies, eigen periods of system in Fig. 1

모 드	고유치 $\omega^2 (s^{-2})$	각진동수 $\omega (s^{-1})$	고유주기 $T (s)$
1	47.69684244	6.906290063	0.909316
2	0.05425681	0.232930913	26.960742
3	0.03418715	0.184897674	33.964732
4	0.00181746	0.042631678	147.308299
5	0.00041771	0.020437955	307.271448
6	0.00000000	0.000000000	무 한 대

$$\begin{pmatrix} \dots \\ \dot{h}_1 \\ \dots \\ \dot{h}_2 \\ \dots \\ \dot{h}_3 \\ \dots \\ \dot{h}_4 \\ \dots \\ \dot{h}_5 \\ \dots \\ \dot{h}_6 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{1}{A_1 L_1} & -\frac{1}{A_1 L_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{A_2 L_1} \left(\frac{1}{A_2 L_1} + \frac{1}{A_2 L_2} \right) & -\frac{1}{A_2 L_2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{A_3 L_2} \left(\frac{1}{A_3 L_2} + \frac{1}{A_3 L_3} \right) & -\frac{1}{A_3 L_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{A_4 L_3} \left(\frac{1}{A_4 L_3} + \frac{1}{A_4 L_4} \right) & -\frac{1}{A_4 L_4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{A_5 L_4} \left(\frac{1}{A_5 L_4} + \frac{1}{A_5 L_5} \right) & -\frac{1}{A_5 L_5} & -\frac{1}{A_5 L_5} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{A_6 L_5} & \frac{1}{A_6 L_5} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \\ h_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{q_6}{A_1} \\ -\frac{q_7}{A_2} \\ -\frac{q_8}{A_3} \\ -\frac{q_9}{A_4} \\ -\frac{q_{10}}{A_5} \\ -\frac{q_{11}}{A_6} \end{pmatrix} \quad (13)$$

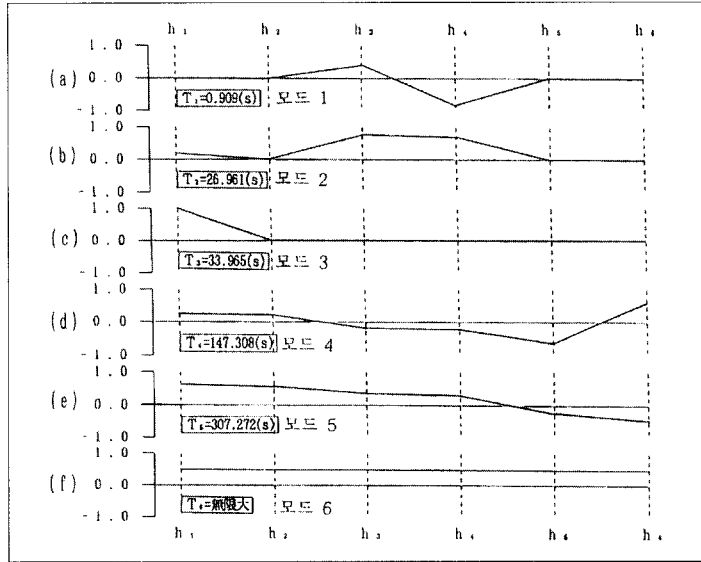


Fig. 4. Eigen values, eigen vector, and eigen modes

또한 정규화 한 각 고유벡터로부터 6개 고유모드의 형태가 Fig. 4와 같이 구해진다. 단 여기서는 편리상 고유주기가 짧은 순서대로 모드의 번호를 정한다.

일반적으로 진동해석에서 중시되는 시스템의 기본진동모드는 모드 5(주기 $T_5 =$ 약 307 sec)에 대응한다.

Fig. 4(a)에서는 고유주기 T_1 (약 0.9 sec)가 수조 ③과 ④의 진동에 관계하고 다른 수조의 진동에는 영향이 없음을 나타낸다. 이것은 수조 ③과 ④의 사이에 있는 관로의 길이가 다른 관로의 길이에 비해 대단히 짧기 때문에 일어나는 이른바 U자관 진동이다. 이 진동은 진폭이 대단히 짧기 때문에 시뮬레이션상에서는 거의 나타나지 않는다. Fig. 4(b)는 고유주기 T_2 (약 27 sec)가 주로 수조 ③과 ④의 진동에 관계하는 것을 나타낸다. Fig. 3(c)과 Fig. 3(d)로부터 알 수 있는 바와 같이 수위 h_3 과 h_4 의 주기가 고유주기 T_2 와 일치하고 있다. Fig. 4(c)으로부터 고유주기 T_3 (약 34 sec)를 수조 ①의 진동으로 직접 관계가 있는 것을 알 수 있다. 특히 이 시스템에서는 수위 h_1 의 이상한 저하가 공기혼입의 판단기준이 되기 때문에 이 고유주기 T_3 의 영향을 고려하는 것이 시스템의 설계에 있어서 중요하다. 또한 시스템의 안전을 생각하기 위해서는 고유주기 T_3 의 진동을 작게 하는 유입 및 유출 방법도 생각할 필요가 있다. Fig. 4(d)로부터는 고유주

기 T_4 (약 147 sec)가 주로 수조 ⑤와 수조 ⑥의 진동에 관계하는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 4(e)로부터는 고유주기 T_5 (약 307 sec)가 수조 ①과 수조 ⑥의 진동에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 3(a)부터 (e)의 수위의 진동형태에 대응하고 있다. Fig. 4(f)의 모드 6($\omega = 0, T = \infty$)은 이 모드가 이른바 강제모드, 즉 각 수조수위가 같은 빠르기로 전체적으로 위 또는 아래로 이동하는 형태임을 나타낸다. 전유입량과 펌프에 의한 배수량이 각 순간에 있어서 같다면 이 모드는 변동하지 않는다. 따라서, 이상의 시뮬레이션에서는 이 모드의 영향은 나타나 있지 않다.

이상의 결과로부터 각 고유모드가 서로 겹치고 복잡한 진동을 일으킨다는 것을 알 수 있다. 또한 각 수조의 수위가 다른 주기의 진동에 영향을 주는 것도 이해할 수 있다.

3.2 고유진동수와 고유벡터에 의한 자유진동의 해석

식 (15)에 대해서는 각 모드의 고유함수는 $\cos \omega t$ 와 $\sin \omega t$ 의 선형 결합이 되며 식 (19)와 같은 자유진동의 일반적인 해를 얻을 수 있다. 여기서 α_i, β_i ($i = 1, \dots, 6$)는 임의의 정수이다. 단 모드 6의 ω_6 는 0이며 또한 그 고유벡터의 각 성분은 같기 때문에 식 (20)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \\ h_6 \end{pmatrix} = (\alpha_1 \cos \omega_1 t + \beta_1 \sin \omega_1 t) \begin{pmatrix} x_{11} \\ x_{21} \\ x_{31} \\ x_{41} \\ x_{51} \\ x_{61} \end{pmatrix} + \dots + (\alpha_6 \cos \omega_6 t + \beta_6 \sin \omega_6 t) \begin{pmatrix} x_{16} \\ x_{26} \\ x_{36} \\ x_{46} \\ x_{56} \\ x_{66} \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$\begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \\ h_6 \end{pmatrix} = (\alpha_1 \cos \omega_1 t + \beta_1 \sin \omega_1 t) \begin{pmatrix} x_{11} \\ x_{21} \\ x_{31} \\ x_{41} \\ x_{51} \\ x_{61} \end{pmatrix} + \dots + (\alpha_5 \cos \omega_5 t + \beta_5 \sin \omega_5 t) \begin{pmatrix} x_{15} \\ x_{25} \\ x_{35} \\ x_{45} \\ x_{55} \\ x_{65} \end{pmatrix} + \alpha_6 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (20)$$

$$\begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \\ h_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_0 \\ h_0 \\ h_0 \\ h_0 \\ h_0 \\ h_0 \end{pmatrix} = h_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} & X_{14} & X_{15} & 1 \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} & X_{24} & X_{25} & 1 \\ X_{31} & X_{32} & X_{33} & X_{34} & X_{35} & 1 \\ X_{41} & X_{42} & X_{43} & X_{44} & X_{45} & 1 \\ X_{51} & X_{52} & X_{53} & X_{54} & X_{55} & 1 \\ X_{61} & X_{62} & X_{63} & X_{64} & X_{65} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \\ \alpha_6 \end{pmatrix} \quad (21)$$

식 (20)을 사용해서 시스템의 초기 정지 상태 즉 각 관로가 물로 채워져 있고 계다가 유입이 없으며 펌프에 의한 유출도 없는 상태로부터 Fig. 2의 직사각형 펄스(pulse)상의 유입과 유출이 동시에 개시된 경우의 계산을 한다. 각 수조의 초기 수위는 전부 같기 때문에 (54.875 m) 이 값을 h_0 이라고 하면 식 (21)로부터 α_i ($i = 1, \dots, 6$) 를 구할 수 있다. 그 결과 α_6 을 제외하고 α_1 부터 α_5 는 전부 0이 된다. α_6 은 h_0 와 같고 이것은 각 수위의 시간적 평균치를 나타낸다.

다음으로 $t=0$ 초에 각 관로 유량 q_i ($i = 1, \dots, 5$) 는 0이기 때문에 식 (21)의 시간 미분과 식 (6)부터 얻어지는 식 (22)의 관계에 의하여 β_i ($i = 1, \dots, 5$) 가 계산된다.

$$\begin{pmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \\ \dot{h}_3 \\ \dot{h}_4 \\ \dot{h}_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{q_6}{A_1} \\ \frac{q_7}{A_2} \\ \frac{q_8}{A_3} \\ \frac{q_9}{A_4} \\ \frac{q_{10}}{A_5} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} & X_{14} & X_{15} \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} & X_{24} & X_{25} \\ X_{31} & X_{32} & X_{33} & X_{34} & X_{35} \\ X_{41} & X_{42} & X_{43} & X_{44} & X_{45} \\ X_{51} & X_{52} & X_{53} & X_{54} & X_{55} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_1 \beta_1 \\ \omega_2 \beta_2 \\ \omega_3 \beta_3 \\ \omega_4 \beta_4 \\ \omega_5 \beta_5 \end{pmatrix} \quad (22)$$

이와 같이 해서 초기정지상태에 대응하는 각 관로 저항을 무시한 수조수위의 자유진동 해석하는 식 (23)에서 주어진다.

$$\begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \\ h_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} & X_{14} & X_{15} & 1 \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} & X_{24} & X_{25} & 1 \\ X_{31} & X_{32} & X_{33} & X_{34} & X_{35} & 1 \\ X_{41} & X_{42} & X_{43} & X_{44} & X_{45} & 1 \\ X_{51} & X_{52} & X_{53} & X_{54} & X_{55} & 1 \\ X_{61} & X_{62} & X_{63} & X_{64} & X_{65} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta_1 \sin \omega_1 t \\ \beta_2 \sin \omega_2 t \\ \beta_3 \sin \omega_3 t \\ \beta_4 \sin \omega_4 t \\ \beta_5 \sin \omega_5 t \\ \alpha_6 \end{pmatrix} \quad (23)$$

또한 시스템의 정상상태로부터 Fig. 2와 같이 $t = 10,800$ sec에 유입 및 유출을 멈춘 때의 과도현상을 계산하는 경우에는 $t = 10,800$ sec 때의 비선형계에서의 각 정상수위 h_{is} ($i = 1, \dots, 6$) 를 사용해 식 (21)로부터 α_i ($i = 1, \dots, 6$) 를 구하고 식 (22)로부터 $t = 10,800$ sec 때의 비선형계에서의 각 관로의 정상유량 q_{is} ($i = 1, \dots, 5$) 를 사용하여 β_i ($i = 1, \dots, 5$) 를 구하여 식 (20)에 의해 각 수조의 수위 변동을 계산한다.

3.3 비선형계의 수치해와 자유진동 해석해의 비교

대심도 지하관로 배수시스템의 수치해석에 있어서 2.3절에서 나타낸 바와 같이 0~1 sec 사이에 최대유량의 유입·유출을 행하는 장방향 펄스 상 파형을 이용하는 것은 안전설계를 위한 전제조건으로서 실제와 실험상으로는 구현하기 어려운 시뮬레이션 상에서만 가능한 것이다. 따라서 안전설계를 위한 전제조건으로서 여기서도 Fig. 2의 직사각형 펄스상의 유입 및 유출 파형에 관해서 비교하는 것으로 한다.

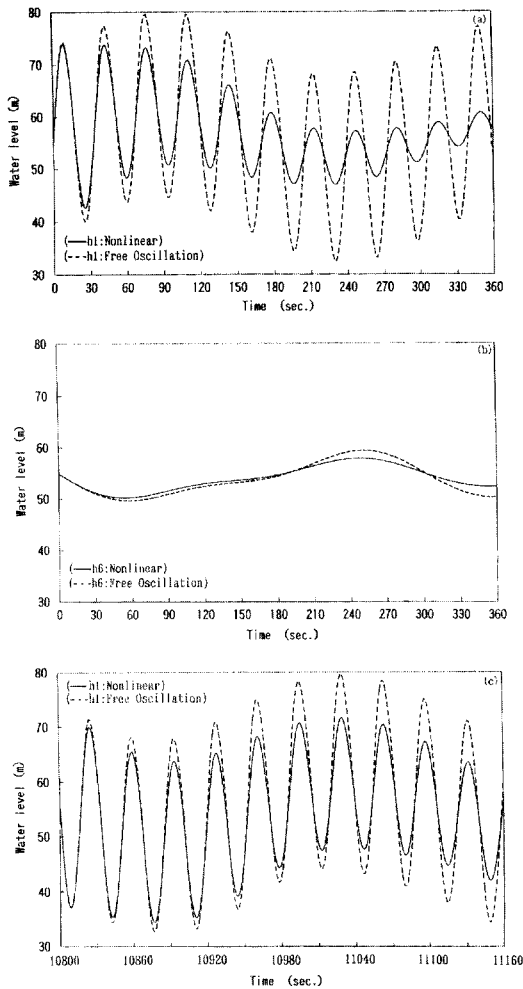


Fig 5. Comparison between nonlinear system and free oscillation system

Fig. 5(a)는 수조 ①의 수위를 Fig. 5(b)는 수조 ⑥의 수위를 나타내고 있다. 다른 수조에 관해서는 생략한다. Fig. 5(a), (b)로부터 본래의 비선형 해석에서는 저항효과가 있기 때문에 시간 경과와 함께 진동이 수속되는 것에 비해서 저항을 무시한 자유진동의 해석해에서는 같은 진동을 반복하는 것을 알 수 있다. 그러나 최초의 약 60 sec까지의 차이는 그다지 크지 않고 진동 주기도 잘 일치하고 있다. Fig. 5(c)는 정상상태에 달해 있는 시스템에 있어서 $t=10800$ sec에서 유입과 유출을 급정지한 경우의 수조 ①의 수위를 나타낸다. 비선형계에서는 유량이 감소해 가기 때문에 관로저항은 감소하고 진동이 수속되기까지의 시간은 꽤 길어진다

(10시간 이상). 관로저항을 무시한 자유진동 해석해에서는 감쇠는 없지만 최초의 약 60 sec까지는 비슷한 수위 변동을 나타낸다. 또한 비선형계의 수위 h_1 의 최고치는 75 m 이하이다. 그러나 설계상 기준면으로부터의 허용 최고 수위는 65 m이기 때문에 배수할 수 없게 된다. 이와 같이 Fig. 2의 파형에 의한 유입개시 직후와 유입정지직후의 수조수위의 변동은 관로저항을 무시한 자유진동 해석해에서 잘 이해할 수 있다. 또한 자유진동의 해석해는 진폭이 커지기 때문에 설계상으로는 안전측의 결과를 주는 것을 알 수 있다.

스케카와노보루(스케가와 노ボル)(1996)의 수리실험에 있어서도 Fig. 2에 가까운 파형에 관하여 검토하고 있지만 엄밀히 말해서 직사각형 펄스상의 유입, 유출은 실험적으로는 실현할 수 없는 것이다. 따라서 설계시의 기본적인 검토 사항으로서 여기에 나타내었던 바와 같은 자유진동의 해석을 행하는 것이 좋다고 생각한다.

지금까지 제시한 자유진동의 해석해는 말할 것도 없이 식 (13)의 인펄스응답 그 자체를 나타내고 있다. 따라서 이것은 충격적인 유입량, 유출량에 대한 시스템의 응답이고 임의의 파형에서의 유입량, 유출량에 대한 응답해석의 기본이 되는 것이다. 또한 이 해석으로는 펌프에 의한 유출량이 각 순간에 있어서의 전유입량과 같다고 하는 조건이 중요하다. 이 조건을 설정하는 것에 의하여 시스템내의 전저류량은 일정하며 불변하기 때문에 모드 6(강제모드)의 변동을 제거하고 시스템의 고유진동만을 명백히 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 대심도 지하관로 배수시스템의 서잉 현상에 관하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- (1) 대심도 지하 관로 배수시스템에서는 관로저항의 효과가 대단히 작기 때문에 장시간에 걸치는 진동의 감쇠를 생각하는 경우를 제외하고는 관로저항을 0이라고 한 자유진동해석으로 시스템의 과도적인 현상을 충분히 이해할 수 있다.
- (2) 자유진동 방정식에 있어서 각 유입량과 펌프에 의한 유출량을 직사각형 펄스상 파형으로 준다면 시스템 특유의 강제모드 및 기본적인 고유진동모드와 그 영향을 조사할 수 있다.
- (3) 각 수조수위의 진동을 일으키는 것은 유량이 아니고 유량의 시간 변화율이기 때문에 유입 및 유출 파형에 의해 각 수조수위의 진동 파형이 크게 다르다. 안

전설계를 고려하기 위해서는 참고를 위해서 충격적인 유입, 유출 파형인 직사각형 펄스 형태의 파형으로 수치 해석을 하는 것이 적절하다고 판단된다.

참 고 문 헌

- 浦西和夫 (1994). “遷移系水路の水理實驗-水平氣壓二相流れの遷移現象-.” 電業社機械, Vol. 18, No. 1, pp. 22-35.
- 眞鍋浩一, 宮代耕一 (1992). “開水路と閉水路が共存する水路の非定常流解釋.” 日本機械學會日立地方講演會論文集, pp. 145-147.
- 吉野秀雄 (1986). “開水路流れと管路流れの移行現象のシミュレーションの開発について.” 農土論集, Vol. 126, pp. 99-111.
- 스케가와 노볼 (1996). “地下放水路の管水路狀態の非定常流の數値計算.” 土論集, No. 545/II-36, pp. 55-67.
- 鬼塚宏太郎 (1986). “狀態空間解析による枝わかれ管路の減衰特性の評價.” 土論集, Vol. 62, No. 2, pp. 79-89.
- 三春浩一, 大里耕司, 鬼塚宏太郎 (1996). “超低周波應答解析による大規模樹枝狀パイプラインのファームボンドの容量設計について.” 農土論集, Vol. 185, pp. 107-116.
- 安田仁彦 (1993). 모드解析と動的設計. コロナ社, pp. 64-66.
- Onizuka, K. (1986). “System dynamics approach to pipe network analysis.” *Trans. of the ASCE*, Vol. 112, No. 8, pp. 728-749
- (논문번호:98-056/접수:1998.09.03/심사완료:1998.11.11)