

Boulous-Altman 역산 기법의 부정류 적용성 검토

○ 성장환*, 이성준*, 박남식**, 김학용***

1. 서 론

관망 분석은 구체적으로 관의 특성, 저수지 수두, 각 접합점에서의 압력, 그리고 펌프의 운용 수두의 수리학적 분석을 요구한다. 정상류 해석 기법은 관망 문제를 관 시스템 변수들로 구성된 연속 방정식, 에너지방정식으로 적용하여 풀 수 있다. 정상류 해석 기법에 적용되는 방정식들은 비선형 식으로 Newton-Raphson 방법으로 선형화하여 모든 관 시스템에 적용되어 질수 있다.

Boulous-Altman 역산 기법은 정상상태의 압력과 유량은 물론 관 직경, 조도 계수, 펌프의 효율, 절점 수요량 같은 관 시스템 매개변수도 구할 수 있다. 따라서 이 방법은 다양한 매개변수의 검정과 조작, 설계를 위한 최적값 결정에 사용될 수 있다.

실제 관망 흐름은 거의 항상 부정류이다. 따라서 기존의 정상류 해석 기법보다는 부정류 해석 기법이 필요하다. INVCHAR(Chen, 1995)는 부정류 해석을 통한 관망 설계와 누수 분석을 수행할 수 있는 효과적인 프로그램이다. 이러한 INVCHAR를 이용하여 Boulous-Altman 방법의 부정류 적용성을 검토하였다.

2. 기본 이론

관망을 설계하거나 관망 시스템을 운영하기 위해서 일반적으로 사용하는 정상류 흐름 분석은 순간적인 흐름의 정지, 수리구조물의 작동, 관의 사고에 의한 파열 같은 변화를 고려하기가 힘들기 때문에 관망에서의 부정류 흐름 분석이 필요하다.

입력 변수와 시스템 변수가 주어진 상태에서 Boulous-Altman 방법은 정상류 상태의 응답 변수를 구할 수 있다. 이 정상류 상태의 압력과 유량을 INVCHAR에 적용함으로써 부정류 상태에서의 수두와 유량을 구할수 있다. 여기에서 야기된 부정류 상태의 압력과 유량을 Boulous-Altman 역산 기법에 적용 하였다.

* 동아대학교 토목공학과 석사과정

** 동아대학교 토목공학과 조교수

*** 한일네트워크 엔지니어링 대표

기본적으로 연속방정식과 에너지 방정식을 사용한 Broussin-Altman 방법은 정상류 관망의 압력과 유량을 결정하는 우수한 방법으로 미지 유량에 대한 독립된 연속방정식과 에너지방정식의 수는 모든 관망에 대한 관의 수로 나타내어진다. 연속방정식은 설계된 관 구간, 저류 시설 또는 배수시설에서의 유입, 유출에 대해 요구되는 구체적인 유량 비율을 나타내고, 에너지 방정식은 절점에서의 지정된 압력을 나타내는데 사용된다. 관망 해석에서의 이 모든 공식은 설계된 관망 매개변수와 추가된 연속방정식, 에너지방정식의 구체화를 포함하기 위해 이 논문에서는 확장되고 있다. 추가된 연속방정식과 에너지 방정식은 관망에 대한 식과 통합되어진다. 추가된 각각의 방정식은 각각의 매개변수에 대응한다. 즉, 추가된 에너지방정식은 특정한 수두 미정 절점에서 에너지 경사와 압력이 지정될 때 첨가되어지며, 추가된 연속방정식은 특정 관에서의 유속 혹은 유량의 조건이 지정될 때 첨가되어진다. 여기에서 추가된 압력 또는 유량의 조건과 상응하는 매개변수 계산의 수는 제한이 없다.

2.1 관 시스템 매개변수의 직접적 계산을 위해서 고려되는 변수

관 시스템 매개변수의 직접적 계산을 위해서는 세가지 경우로 변수를 고려 할수 있다. 첫 번째는 관 직경, 관 길이, 펌프의 효율, 저수지의 수두, 밸브 특성 등과 같은 설계변수가 있으며, 두 번째는 펌프 회전수, 압력 조절 밸브, 유량 조절 밸브와 같은 작동 변수가 있다. 세 번째는 관 조도, 절점 수요량과 같은 검정 변수이다.

2.2 관 시스템 배열

관 시스템은 관의 길이, 관경, 조도계수로 구성된 관들의 상호 연관으로 구성되어 있다. 파이프는 펌프, 피팅(연결부분), 밸브, 밴드로 구성 될 수 있으며 각 관들의 수두 미정 절점이나 끝부분이 수두 지정 절점임을 알수 있다. 수두 미정 절점은 두 개 혹은 그 이상의 관들이 연결된 점으로 유량이 관 시스템에 들어가고 나오는 지점이며, 수두 지정 절점은 일정한 에너지 경사가 유지되는 점이다. 관 영역, 수두 미정 절점, 수두 지정 절점들을 분석하면 다음의 관계가 성립된다.

$$NP = NJ + NL + NF - 1 \quad \text{-----}(1)$$

여기서,
 NP = 관의 수
 NJ = 수두 미정 절점의 수
 NL = 폐고리의 수
 NF = 수두 지정 절점의 수
 NE = 개고리의 수(개고리의 수는 고정 격자 절점의 수에 1을 뺀 것과 같다.)

2.3 부정류 상태의 흐름 분석을 위한 연속방정식과 에너지방정식

각각의 고리에서의 수두 미정 절점은 하나의 에너지방정식으로 구성된다. 각각의 수두 미정 절점에 대하여 연속방정식은 유량에 대한 대수의 합이 0임을 요구한다. 어떠한 루프에서도 두 개의

절점은 전체 에너지에서 수두 손실을 뺀 것이다. 시스템에서 모든 관이 선택되어 질 때 부정류 관망 분석 문제는 다음의 형태로 공식화 된다.

$$\sum_{i=1}^{NP} \lambda_{j,i} Q_i - q_j = 0, \quad j=1,2, \dots, NJ \text{-----} (2)$$

$$\sum_{i=1}^{NP} v_{n,i} [K_p Q_i^a + K_m Q_i^2 - P(Q)_i] - \Delta E_n = 0, \quad n=NJ+1, \dots, NP \text{-----} (3)$$

- 여기서, $v_{n,i}$ = i번째 관에서 절점 j로의 유입과 유출
- $\lambda_{n,i}$ = 루프 N에 속해 있으면서 i번째 관에서 시계 방향일때는 -1,
반시계 방향일때는 1, 루프 N에 속해 있지 않을때는 0
- Q = 관에서의 유량
- q = 외부 유출입 유량
- Kp = 관로에서 길이, 지름, 조도계수의 항으로 일정.
- a = 수두손실을 나타낼 때 좌우되는 계수
- Km = 연결 부분과 지름에 대한 수두손실 계수의 합의 항으로 일정하다.
- P(Q) = 펌프에 의해 더해지는 에너지

지정된 관의 요소(수요 형태, 저수지 수두, 각 관에서의 유량, 각 절점에서의 압력, 펌프에 대한 압력)에 대하여 흐름 분석을 위한 방정식은 관망 분석을 수행한다. 이 분석은 식 (2), (3)에 의해 각 관의 미지 유량의 항으로 나타난다. 이 모든식은 기본으로 추가된 식을 제공할 수 있다. 가정된 유량항이 관의 길이, 지름 조도계수, 손실 계수, 펌프수두, 저수지 수두, 펌프 유속 혹은 다른 변수의 항이면 추가적인 미지 매개변수는 직접 계산법으로 해를 풀 수 있다.

2.4 매개변수 값의 직접적 계산을 위한 3가지 방법

매개변수 값의 직접적 계산을 위해 압력이나 유량 조건에 따라 고려되는 방법은 3가지 경우가 있다. 첫 번째 방법은 1개의 설계 매개변수에 대한 1개의 지정 조건을 검정 하는 것이고, 두 번째 방법은 매개변수들을 적용하기 위해 복합적인 설계 변수에 대한 한 개의 지정 조건을 검정하는 방법이다. 마지막으로 설계 매개변수에 대한 종합적인 요소 변화에 대한 검정이 있다.

3. 정상류에 대한 적용

Boulous-Altman 역산 기법의 부정류 적용성을 검토하기 위해서 정상류 흐름 분석을 먼저 하였다. 그림 1.은 간단한 12개의 관으로 구성된 관망으로 표1.에서 주어진 관망의 제원을 바탕으로 해서 관망의 절점 1, 절점 8에서 유출이 발생하고 절점 2에서는 유입이 발생하도록 하였고 흐름 방향

은 가상으로 설정하여 설계를 하였다.

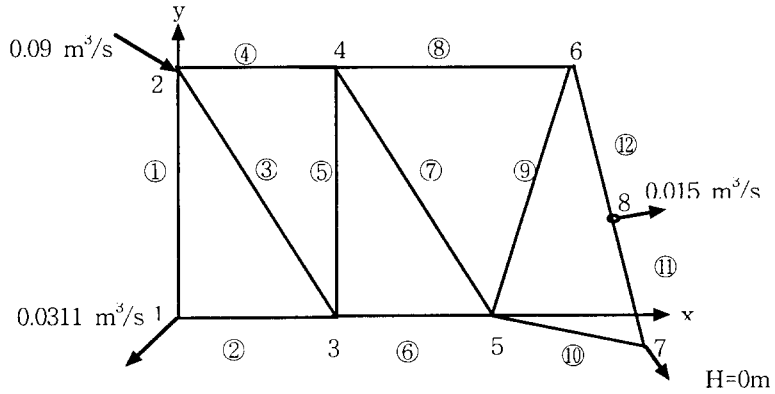


그림 1. 8개의 절점과 12개의 관들로 구성된 관망

표 1. 관 배치 시스템 변수들

관 번호	상류 절점	하류 절점	길이 (m)	관경 (m)	H-W 조도계수
1	1	2	500	0.1524	110
2	1	3	250	0.1524	110
3	2	3	559	0.1524	110
4	2	4	250	0.127	110
5	3	4	500	0.1016	110
6	3	5	300	0.127	110
7	4	5	583.1	0.1016	110
8	4	6	500	0.1524	110
9	5	6	538.5	0.127	110
10	5	7	412	0.127	110
11	7	8	316	0.1016	110
12	6	8	316	0.1524	110

정상류 분석을 위한 그림 1.의 관망 문제는 다음의 형태로 공식화된다. 7개의 연속 방정식을 식 (2)에서, 5개의 에너지 방정식을 식 (3)에서 구하였다. Bouslog-Altman 정상류 분석 방법은 위에서 구한 12개의 방정식을 미지 유량의 향으로 나타내며 Newton-Raphson 방법의 알고리즘에 의해 관 시스템에 적용되어 진다. 표 2.는 정상류 분석 방법을 통한 각 관에서의 유량을 나타내었다.

표 2. 각 관에서의 유량 ($\times 10^{-2}, m^3/s$)

관번호	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
유량	3.0675	0.0425	2.8878	3.0447	0.4397	2.4055	0.8204	2.6640	0.3149	2.9111	1.4789	2.9789

4. 부정류에 대한 적용성 검토

Boulous-Altman 방법에서 구한 각 관에서의 유량과 압력을 INVCHAR에서는 초기상태의 유량과 압력으로 사용하며, 부정류 야기 요인으로는 절점 2의 유입량이 시간에 따라 줄어들도록 하였다.

4.1 INVCHAR에서 사용된 부정류 야기 요인

INVCHAR는 계산 시간 내에서 지정된 시각에서의 압력과 유량을 구할 수 있다. 그림 1의 관망을 부정류 흐름으로 분석하기 위해서 절점 2에서의 유입량을 시간 15초, 30초, 60초에 따라 유입량을 0.09 m³/s에서 0.045m³/s로 감소하는 조건을 경계조건으로 사용하였다. 이러한 부정류 야기 요인으로 인해 발생한 각 절점에서의 압력과 각 관에서의 유량은 시간에 따라 달라질 것이다.

4.2 Boulous-Altman 역산 기법의 부정류 적용

INVCHAR에서 구한 시간에 따른 각 절점에서의 압력과 각 관에서의 유량을 두 가지 경우에 대하여 Boulous-Altman 역산 기법을 통해 부정류 적용을 수행하였다.

첫 번째, 2개의 매개변수(절점 1, 2에서의 유출입량)를 계산하기 위해 1개의 연속방정식(절점 1에 접한 1번 관의 유량)과 1개의 에너지 방정식(절점 6의 수두)을 지정하였다. 이 경우 표 3.에서 보듯이 Boulous-Altman 역산 기법의 부정류 적용은 시간에 따라 차이는 있으나 우수한 수렴성을 보여 준다.

표3. 1번관 유량, 6번 절점의 수두 지정 (T=sec, Q=m³/s)

절점번호	적용법	T=15(sec)	T=30(sec)	T=60(sec)
1	B.-A.	0.0458	0.0328	0.0305
	INVCHAR	0.0311	0.0311	0.0311
2	B.-A.	0.0512	0.0766	0.0841
	INVCHAR	0.065	0.080	0.0875

두 번째, 3개의 매개변수(절점 1, 2, 8에서의 유출입량)를 계산하기 위해 3개의 에너지 방정식(절점 3, 절점 4, 절점 6)을 지정 하였다. 이 경우는 표 4.에서 보듯이 1개의 에너지 방정식과 1개의 연속방정식을 추가 한 것보다는 수렴성은 떨어지나 역시 부정류에 흐름에 접근하고 있음을 알 수 있다.

표4. 3번, 4번, 6번 절점의 수두 지정 ($T=\text{sec}$, $Q=\text{m}^3/\text{s}$)

절점번호	적용법	T=15(sec)	T=30(sec)	T=60(sec)
1	B.-A.	0.0361	0.0283	0.0294
	INVCHAR	0.0311	0.0311	0.0311
2	B.-A.	0.037	0.0661	0.0780
	INVCHAR	0.065	0.080	0.0875
8	B.-A.	0.0192	0.0127	0.0168
	INVCHAR	0.015	0.015	0.015

5. 결 론

일반적으로 실제 관망에서의 흐름은 거의 모두 시간에 대한 함수이다. 순간적인 흐름의 정지, 수리구조물의 작동, 관의 사고에 의한 파열 같은 변화는 관망 시스템을 통해 음속으로 이동하는 강한 압력파를 가지 상당한 압력파동을 야기한다. 이러한 압력파는 관망에 상당한 영향을 미친다. 그러므로 수리학적 천이(hydraulic transient) 상태에 노출 되어 있는 관망에서는 정상상태에 대한 분석보다는 천이상태분석을 행하는 것이 관망의 설계, 관망 시스템의 운영을 더욱 효과적으로 행할 것이다. 여기에서 제시하고 있는 Boulous-Altman 역산 기법은 정상류에 대하여 미지 유량과 미지 매개변수를 결정하는 방법이다. 이 방법을 부정류에 적용해 본 결과 급변 부정류에서 보다는 완변 부정류로 갈수록 적용성이 향상되었다. 그리고 동일한 흐름에 대해서도 지정 조건과 미지 변수에 따라 적용성이 달라지는 것으로 나타났다. 위에서 제시한 자료를 분석해 볼 때 이 방법은 부정류 흐름의 특성 파악에 따른 실제 흐름에 대한 적용성의 검증에 유효할 것이라 판단되나 추가 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

1. Boulous, P. J. and Wood, D. J. (1990). "Explicit Calculation of Pipe-Network Parameters", J. of Hydraulic Engineering, Vol.116, No. 11, Paper No. 25212.
2. Brebbia, C. A. and Ferrante, A. J. (1983). "Computational Hydraulics", pp. 99 - 118
3. Chen, L. C. (1995). "PIPE NETWORK TRANSIENT ANALYSIS - THE FORWARD AND INVERSE PROBLEMS"
4. Roberson, J. A. and Cassidy, J. I. and Chaudhry, M. M. (1988) "Hydraulic Engineering"