

## 多点注入系 配水管網에 미치는 上水需要形態의 影響

## Effect of Water Demand Patterns on the Water Distribution System with Multi-Reservoirs

현인환\* · 위옥량\*\* · 이상준\*\*\*

In Hwan Hyun\* · Wuk Ryang Wi\*\* · Sang Jun Lee\*\*\*

## Abstract

Determining the sizes and the locations of reservoirs in the water distribution system(WDS) with multi-reservoirs is much difficult than that with single reservoir. The extended period simulation(EPS) models provide more comprehensive analysis of water distribution systems than the steady-state models can do. Therefore, EPS models should be applied to the WDS with multi-reservoirs.

This study is to investigate the variations of required reservoir sizes and residual nodal pressures according to reservoir locations. In this study, EPS was applied to analyze an artificial and a real WDS under several water demand patterns.

As a result, it was found that water demand patterns make no significant differences in the determining of the reservoir size, if they have similar peaking factors. And, the variations of the peaking factor should be carefully checked in the design and the analysis of the WDS with multi-reservoirs, because the peaking factor itself will affect the minimum allowable sizes of reservoirs in those systems.

## I. 서 론

상수도 시스템에서 배수지의 용량은 상수 수요량 형태의 시간적 변화를 고려한 용량과 소화 용수량 및 비상시를 위한 여유량 등을 통하여 결정하고 있다. 따라서, 수요형태의 시간적

변화에 대응하기 위한 배수지의 용량을 결정할 때에는 24시간 동안을 1시간 간격으로 시뮬레이션하는 방법으로 해석하여야 한다. 특히, 하나의 배수관망계에 2개 이상의 배수지로부터 수량과 수압을 공급받는 다심주입계 배수관망에서는 이러한 해석방법이 배수지의 저류량과 유출량을 결정하고자 할 때 더욱 중요하게 된다.

본 연구는 상수 수요량의 시간적 변화형태와 첨두부하율을 달리하는 수요형태를 가정하여, 상수 수요형태에 따른 배수지의 필요용량과 유

\* 단국대학교 토목환경공학과 교수

\*\* 두산엔지니어링 상하수도부

\*\*\* 단국대학교 토목환경공학과 박사과정

출량의 변화를 EPS(Extended Period Simulation) 해석을 통하여 검토하는 데 그 목적이 있다.

## II. 다점주입계의 해석방법

### 1. 다점주입계의 분류

다점주입계의 해석에 있어서 배수관망은 유량제어방식과 수위제어방식으로 크게 분류할 수 있다. 이 중에서 유량제어방식에 의한 분류는 배수지에서 배수관로로 유입되는 수량이 일정한가, 아니면 시간에 따라서 불규칙적으로 변화하는가로 다시 분류된다. 즉, 각 배수지로부터 일정한 유량이 유입되는 경우를 정량유입방식이라 하고, 각 배수지로부터의 유입유량을 제어하지 않는 경우를 유량가변 유입방식이라고 부른다. 또한, 배수지의 수위관계에 따라서 다점주입계는 수위 일정방식, 수위차 일정방식, 수위 가변방식 등 세가지로 분류될 수 있다.

수위일정방식은 1개 이상의 배수지 수위를 각각 일정하게 유지하는 것이다. 수위차 일정방식은 2개 또는 그 이상의 배수지의 수위 차를 일정하게 유지하기 때문에 배수지 용량을 최대한으로 이용하는 경우에 채택된다. 이들에 비해서 수위가변방식에서의 배수지 수위는 자유로이 변동하는 것으로, 각 절점의 수압이 허용치 이상으로 되게 하여 배수지의 수위를 정한다. 다만, 이 분류는 어디까지나 해석상의 편의를 위한 것이고, 여기서의 배수지 수위는 실제의 수위와 같지 않을 수 있다. 만약 일정하게 정해진 수위 또는 해석의 결과에서 얻어진 수위가 실제의 수위보다 높을 때에는 배수펌프를 필요로 하고, 반대로 낮을 때에는 감압밸브가 필요하게 된다(6).

### 2. 다점주입계의 해석법

배수관망해석에 있어서 절점방정식은 다음과 같다.

$$\sum_j Q_{ij} + P_i = 0 \quad (i = 1, \dots, N) \quad (1)$$

$$Q_{ij} = R_{ij} |E_i - E_j|^{a-1} (E_i - E_j) \quad (2)$$

여기서,  $P_i$ : 절점  $i$ 에서의 유출수량

$N$ : 절점수

$$R_{ij} = 0.27853 CHD^{2.63} L^{-0.54}, a = 0.54$$

(Hazen-Williams 공식인 경우)

또한, 손실수두  $H$ 가 마찰손실수두만으로 표현되고, 흐름방향을 고려하여  $H$ 와  $Q$ 의 방향을 같게 표현하면 다음 식이 형성된다.

$$H_{ij} = E_i - E_j = r \cdot Q_{ij}^u = r \cdot |Q_{ij}|^{u-1} \cdot Q_{ij} \quad (3)$$

여기서,  $E_i$  - 절점  $i$ 의 에너지위

$E_j$  - 절점  $j$ 의 에너지위

$$r = 10.666 CH^{-1.85} D^{-4.87} L,$$

$$u = 1.85 \text{ (Hazen-Williams 공식)}$$

要素閉管路에서 폐관로방정식은 다음과 같다.

$$\sum (+ r_{ij}' |Q_{ij}|^{(u-1)} Q_{ij}) - \delta E_k = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, K) \quad (4)$$

여기서,  $K$ : 요소폐관로수

$\delta E_k$ : 요소폐관로  $k$ 에 포함된 증압, 감압장치의 소요 수두 또는, 다점주입계에 있어서 두 배수지 사이의 일정수위차

본 연구에서는 Newton법을 이용하여 상기 연립방정식을 해석하였다.

식 (2)를  $E_i, E_j$ 로 편미분하면 각각 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial E_i} = a R_{ij} |E_i - E_j|^{a-1} \quad (5)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial E_j} = -a R_{ij} |E_i - E_j|^{a-1} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \therefore Q_{ij} &= q_{ij} + \left( \frac{\partial Q_{ij}}{\partial E_i} \right) \Delta E_i + \left( \frac{\partial Q_{ij}}{\partial E_j} \right) \Delta E_j \\ &= q_{ij} + a \cdot R_{ij} |e_i - e_j|^{a-1} (\Delta E_i - \Delta E_j) \\ &= q_{ij} + a \cdot S_{ij} \cdot (\Delta E_i - \Delta E_j) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,  $S_{ij} = R_{ij} (e_i - e_j)^{a-1}$

$$q_{ij} = R_{ij} (e_i - e_j)^a = S_{ij} (e_i - e_j)$$

이 식을 식 (1)에 대입하여 정리하면 다음 식이 되며, 보정치  $\Delta E_i \approx 0$ 가 될 때까지 반복 계산하는 것이 Newton법을 이용한 해석법이다.

$$\Delta E_i \sum_j S_{ij} - \sum_j S_{ij} - \Delta E_j = -1/a(\sum_j Q_{ij} + P_i) \quad (8)$$

여기서, 배수지 또는 다른 절점에 대해서 M개의 에너지위를 일정값으로 고정시키면 식의 개수와 미지수의 개수가 일치되어 해석이 가능하다. 즉, M개의 배수지를 가진 M점 주입계의 경우,  $K_R(M \geq K_R \geq 1)$ 개의 배수지 수위와 다른 절점에 대해서  $(M - K_E)$ 개의 에너지위를 고정한  $K_E$ 수위 일정방식과, 배수지 이외의  $K_E$ 개의 절점 에너지위를 일정하게 한 수위가변방식은 식 (7)을 그대로 이용해서 해석할 수 있다.

또한, 정량유입방식을 채택하는 경우에는 소정의 수량을 유입시킨  $K_Q(M \geq K_Q \geq 1)$ 개의 배수지에 대해서, 그림 1(a)와 같은 일반적인 절점부여 형식을 그림 1(b)와 같이 배수지 바로 밑으로 절점을 이동한다면, 식 (8)을 그대로 이용해서 해석할 수 있다. 이것이 가능한 이유는 배수지의 유입량이 결정되기 때문이며, 따라서 배수지가 절점화되므로 절점방정식의 적용이 가능하다. 다만, 배수지 수는 M개에서  $M - K_Q$ 개로 변동하고, 절점유출수량  $P_i$ 는 (-)로 주어진다.

수위차 일정방식을 채택하는 경우에는 새로운 식이 추가된다. 즉,  $K_D(M > K_D \geq 1)$ 개의 배수지에 대해서 각 두개의 수위차  $E_\beta, E_\gamma$ 를 일정치  $\delta E_{\beta, \gamma}$ 로 유지할 때, 다음 식과 같은 조건식에  $K_D$ 항이 추가된다.

$$E_\beta - E_\gamma = \delta E_{\beta, \gamma} \quad (9)$$

$$\therefore \Delta E_\beta - \Delta E_\gamma = \delta E_{\beta, \gamma} - (e_\beta - e_\gamma)$$

여기서,  $e$ 는  $E$ 에 따른 가정치 또는 근사치이고,  $\Delta E$ 는 보정치이다.

이상을 모두 합친다면 정량유입의 배수지 수를  $K_Q$ , 수위차 일정의 배수지 수를  $K_D$ , 에너지위가 고정된 절점 수를  $n$ 이라고 할 때, 조건식은 절점방정식과 합해서  $N - (M - K_D) + K_D$ 항으로 되고, 여기에 대해서 미지량은  $N - n$ 개이다. 따라서, 연립방정식이 해석되기 위해서는 다음과 같은 관계가 성립되어야 한다.

$$N - (M - K_D) + K_D = N - n \quad (10)$$

$$\therefore M - 1 \geq K_D \geq 0$$

다만,  $K_Q$ 와  $K_D$ 에 관해서 독립된 최대 수는 모두가  $M - 1$ 이 되고, 또한 배수지 및 에너지위의 고정된 절점이 적어도 1개는 존재해야 하므로 식 (10)에 다음과 같은 제약이 추가된다.

$$M \geq 1, N \geq 1, M - 1 \geq K_Q \geq 0, M - 1 \geq K_D \geq 0 \quad (11)$$

$M = 1$ 인 단점주입계에 있어서는 식 (11)에서  $K_Q = 0, K_D = 0$ 로 되기 때문에, 식 (10)에서  $n = 1$ 이라는 당연한 결과가 얻어진다.

### III. 배수관망에의 적용

#### 1. 검토대상 배수관망

본 연구에서 이용된 대상 관망은 전형적인 한국의 구 도시인 A시의 B구역을 대상으로 하였으며, 하나의 배수계통에 2개의 배수지가 설

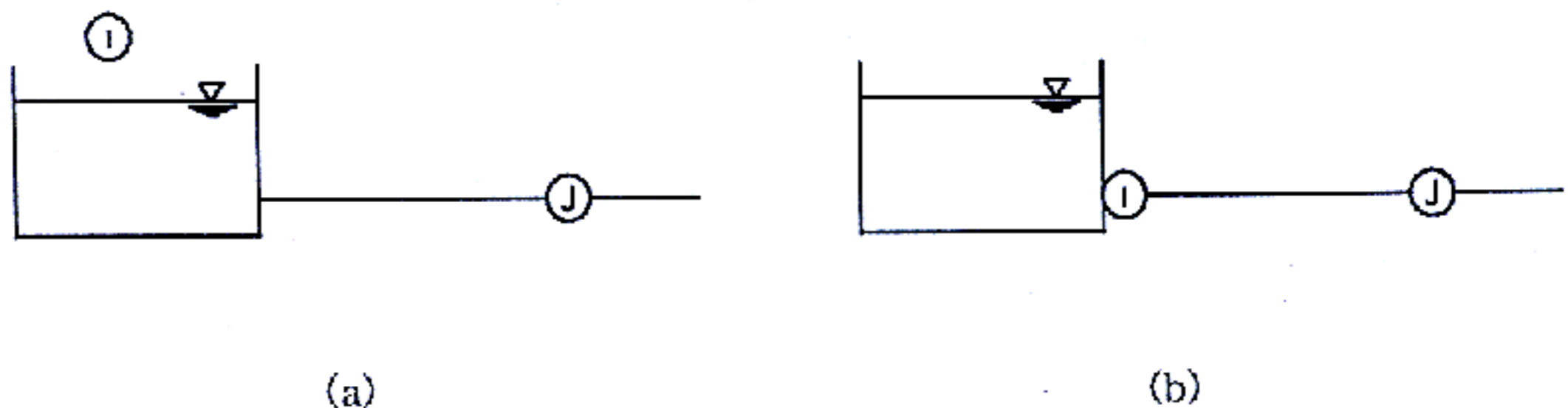


그림 1. 절점위치의 이동

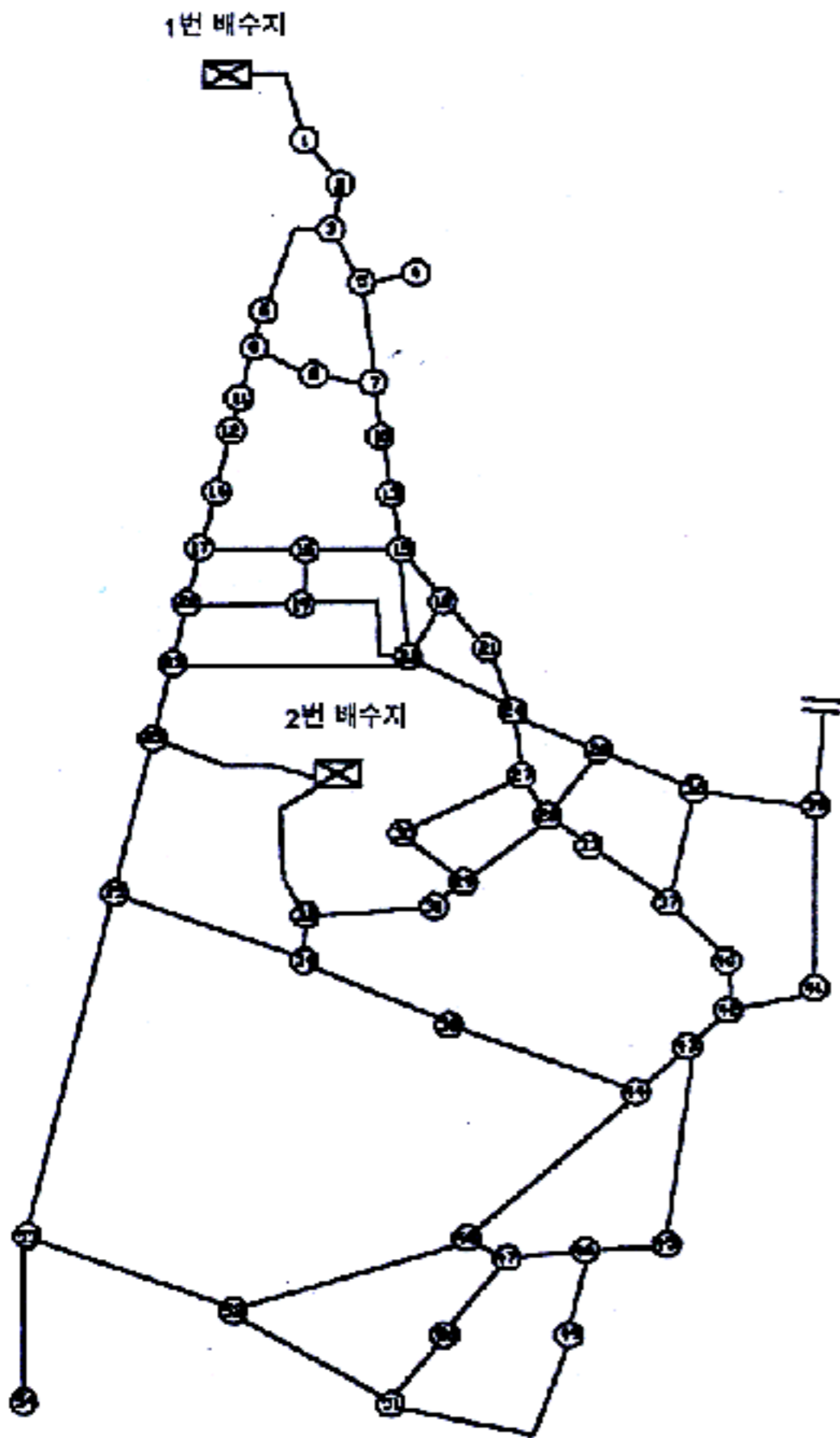


그림 2. A시 B구역의 배수관망도

치되어 수량과 수압을 공급하는 다짐주입계 형태로 구성되어 있다(그림 2). 그리고, 여기서 2개의 배수지는 각각 다른 정수장으로부터 배수량을 공급받도록 되어 있으며, 이 배수관망 시스템의 배수구역은 각 절점의 지반고의 차이가 커서, 1번 배수지는 고지대를 공급하도록 하고, 2번 배수지는 저지대를 공급하도록 계획되어 있다.

또한, 배수관망해석에 사용된 입력자료는 표 1~표 3과 같이, 배수관망의 총 절점수는 54개이며, 총 관로수는 76개이다.

표 1. 대상 관망의 관경과 관로길이

관로 번호	절점 연결상태	관 경(mm)	길 이(m)
1	1번배수지 - 1	1,000	270
2	1 - 2	1,000	510
3	2 - 3	1,000	180
4	3 - 6	200	655
5	3 - 5	1,100	430
6	5 - 6	1,200	395
7	5 - 4	800	200
8	6 - 9	800	100
9	9 - 8	200	295
10	8 - 7	200	200
11	5 - 7	400	340
12	9 - 11	800	280
13	11 - 12	800	70
14	12 - 10	200	520
15	7 - 10	400	190
16	12 - 14	800	240
17	10 - 13	400	240
18	14 - 13	250	560
19	14 - 17	800	180
20	17 - 16	800	340
21	16 - 15	800	250
22	13 - 15	400	180
23	17 - 20	800	180
24	20 - 19	200	380
25	16 - 19	200	180
26	19 - 22	200	430
27	15 - 22	800	360
28	15 - 18	400	260
29	18 - 22	500	120
30	18 - 21	400	150
31	20 - 23	800	200
32	23 - 22	300	675
33	22 - 24	400	290
34	21 - 24	200	320
35	23 - 25	800	395
36	24 - 27	400	300
37	24 - 26	150	450
38	2번배수지-25	800	309
39	27 - 30	250	400
40	27 - 28	400	280
41	26 - 28	200	260
42	25 - 35	600	640
43	2번배수지-32	900	630
44	30 - 29	150	460

관로 번호	절점 연결상태	관 경(mm)	길 이(m)	관로 번호	절점 연결상태	관 경(mm)	길 이(m)
45	28 - 29	550	290	67	50 - 51	150	370
46	28 - 33	400	150	68	47 - 50	150	280
47	33 - 37	400	420	69	47 - 46	250	190
48	26 - 36	150	585	70	43 - 45	250	730
49	32 - 31	500	340	71	49 - 51	150	600
50	29 - 31	500	90	72	46 - 49	150	360
51	35 - 34	250	750	73	45 - 46	250	260
52	32 - 34	150	130	74	53 - 54	450	570
53	34 - 38	250	490	75	53 - 52	250	700
54	38 - 44	250	710	76	52 - 51	200	610
55	36 - 37	150	390				
56	37 - 40	500	375				
57	36 - 39	150	410				
58	40 - 42	450	140				
59	42 - 41	450	320				
60	41 - 39	400	675				
61	35 - 53	450	300				
62	43 - 44	250	280				
63	42 - 43	350	130				
64	48 - 52	250	810				
65	44 - 48	250	800				
66	48 - 47	250	230				

표 3. 배수관망의 해석에 이용된 C 값

관 경	C 값
800mm 이 상	1 2 0
500mm ~ 800mm	1 1 0
500mm 이 하	1 0 0

표 2. 대상 관망의 절점사용수량과 지반고

절점 번호	사용수량 (m <sup>3</sup> /day)	지반고 (m)	절점 번호	사용수량 (m <sup>3</sup> /day)	지반고 (m)	절점 번호	사용수량 (m <sup>3</sup> /day)	지반고 (m)
1	0	72.5	19	490	51.7	37	1,620	45.6
2	1,500	67.8	20	260	52.5	38	1,010	43.0
3	1,150	66.1	21	0	71.6	39	2,770	42.5
4	350	60.5	22	960	52.2	40	1,070	46.2
5	780	62.7	23	840	49.9	41	2,490	36.5
6	340	63.1	24	1,280	57.3	42	750	37.7
7	390	57.5	25	800	46.0	43	620	37.5
8	270	58.4	26	790	55.8	44	0	36.5
9	280	61.2	27	1,100	48.6	45	350	34.9
10	720	57.2	28	1,120	45.1	46	60	35.9
11	310	61.5	29	320	45.0	47	100	36.5
12	790	57.9	30	0	54.0	48	1,100	36.9
13	560	54.0	31	1,320	40.4	49	120	43.5
14	850	56.5	32	800	46.5	50	270	40.5
15	230	52.9	33	920	47.0	51	2,110	50.4
16	320	53.2	34	2,310	46.2	52	270	51.5
17	210	54.6	35	2,350	46.5	53	1,180	50.0
18	0	54.1	36	1,260	43.6	54	1,040	46.0

2. 사용수량의 시간적 변화형태

배수관망에 있어서 상수의 수요형태는 절전수압, 관로유량에 영향을 미친다. 다만 배수지가 1개인 단점주입계와는 달리, 배수지가 복수인 다점주입계 배수관망의 경우에는 배수지의 설계용량도 복수의 배수지로 분할되어야 한다. 본 연구에서는 상수 수요형태가 다점주입계 배수관망에 미치는 영향을 검토하기 위하여 여러 가지의 수요형태를 가정하여 분석하였다.

우선, 상수도 시설기준[10]에 제시되어 있는 배수량의 시간적 변화 pattern을 수요형태 1이라 하고 기본 pattern으로 이용하였다. 시간대에 따른 수요량의 변화형태를 구체적으로 살펴보면 오전 10시를 전후로 첨두수요를 나타내고 있으며, 오전 4시를 전후로 가장 낮은 수요형태를 나타내고 있다.

본 연구에서는 먼저, 첨두수요량과 첨두부하율은 수요형태 1과 동일하나, 첨두시간대를 다르게 하고, 사용수량도 변화시켜서 수요형태 2와 수요형태 3을 구성하였으며, 이를 계열 A라 하였다. 또한, 첨두수요량은 동일한 시간대 즉, 오전 10시에 발생하나, 수요형태 1의 첨두부하율 1.72를 2.27과 1.56으로 변화시켜 수요형태 4와 수요형태 5를 구성하였으며, 이를 계열 B라 하였다. 여기에서, 1일간의 총사용수량은 모든 경우에 있어서 같게 가정하였다. 그

림 3은 수요형태의 계열 A를 나타내고 있으며, 수요형태의 계열 B는 그림 4에 나타내었다.

3. 수요형태에 따른 배수지의 필요 용량의 변화

상수 수요형태의 변화가 배수지의 용량에 대해서 어느 정도의 영향을 주는가를 알아보기 위하여 다점주입계인 대상관망에 적용해서 EPS 해석을 실시한 결과, 상수 수요형태에서 첨두수요량의 발생 시간대가 좌우로 이동하여 발생하였을 때는, 두 배수지의 저류용량은 큰 변화를 보이지 않았다. 그러나, 수요형태의 변화에서 첨두수요량의 크기가 증가하거나 감소하는 형태를 가진 계열 B는 배수지의 저류량에 많은 차이를 가져왔다.

수요형태에 따른 배수지 저류량의 차이를 수요형태 1을 기준으로 하여 표 4에 나타내었으며, 각 계열별 저류량의 변화를 그림 5와 그림 6에 나타내었다. 이들 결과에서 볼 수 있듯이, 상수 수요형태에 대한 배수지 저류량의 변화양상은 계열 A에서 최고 12% 정도로써 현재의 설계방법에서도 충분히 대응할 수 있다고 볼 수 있으나, 만약 계열 B에 따른 수요형태가 나타난다면 배수지의 저류량은 완전하게 대응할 수 없다고 볼 수 있다.

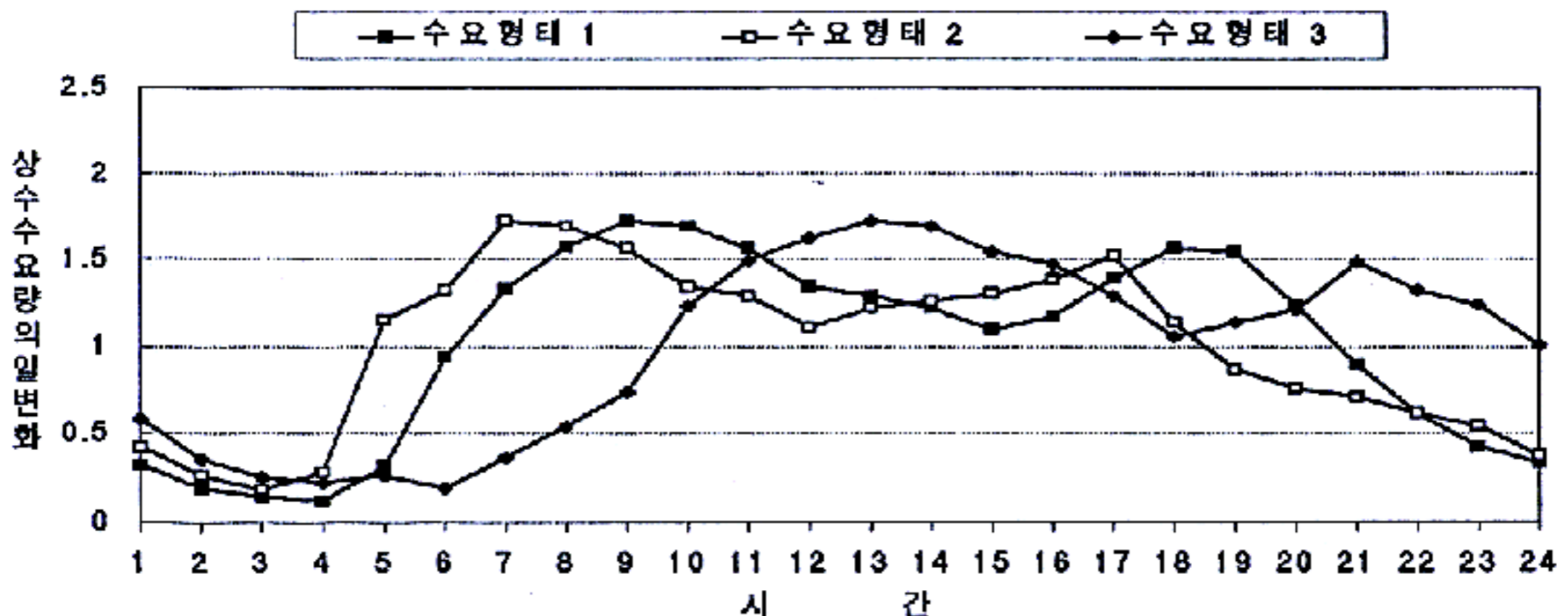


그림 3. 계열 A의 상수 수요의 시간적 변화 pattern

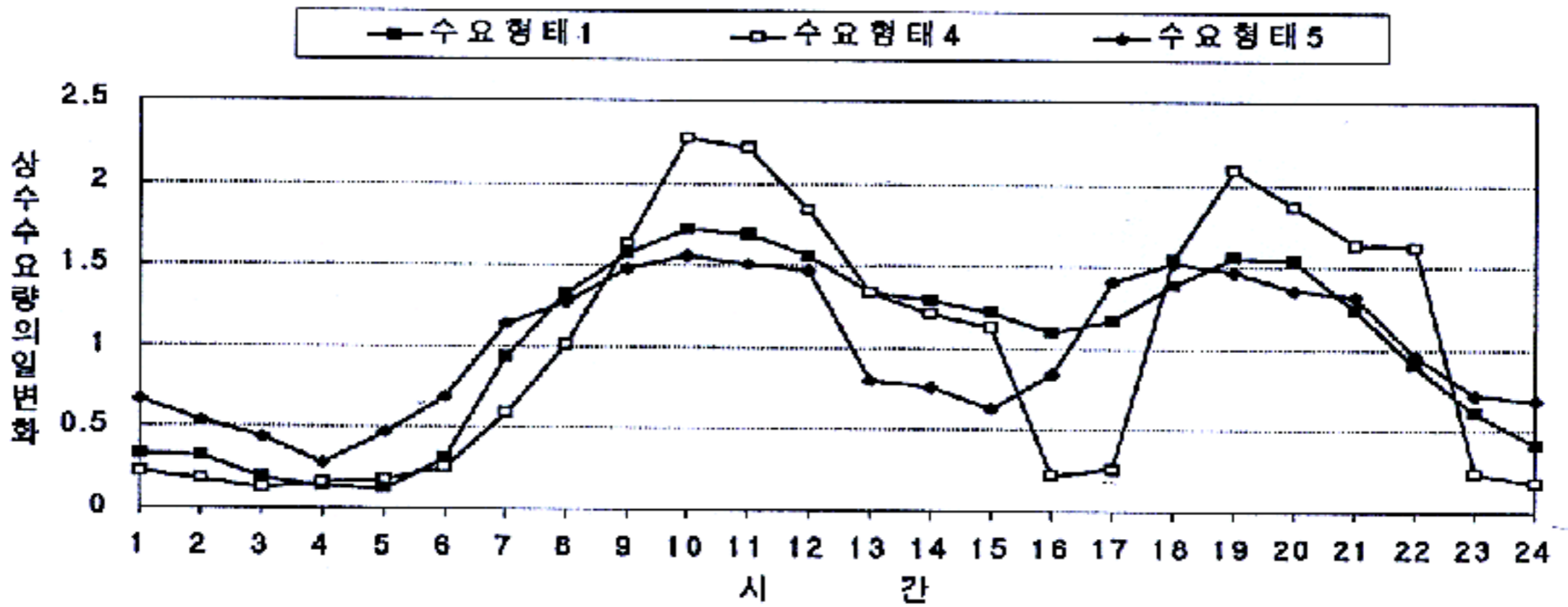


그림 4. 계열 B의 상수 수요의 시간적 변화 pattern

표 4. 수요형태의 변화에 따른 저류량의 변화율

수요 형태	1번 배수지의 저류량 변화율	2번 배수지의 저류량 변화율
수요형태 2	12.8%	12.3%
수요형태 3	3.7%	3.6%
수요형태 4	32.1%	31.6%
수요형태 5	21.4%	20.9%

\* 각 변화율은 수요형태 1에 대한 변화율이다.

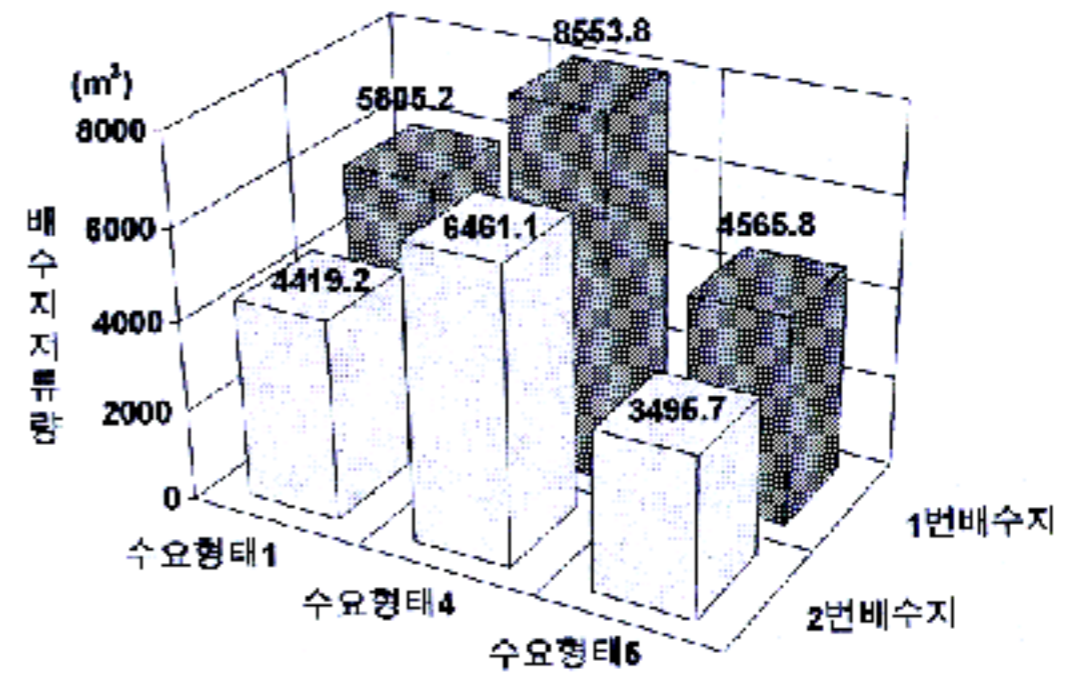


그림 6. 수요형태의 변화에 따른 배수지의 저류량 (계열 B)

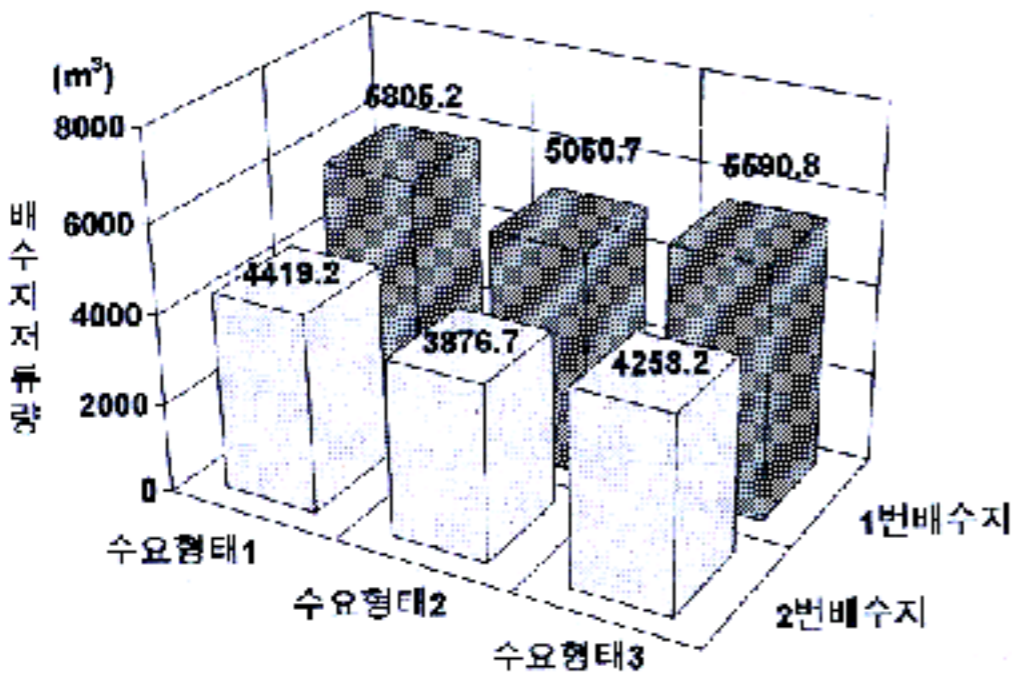


그림 5. 수요형태의 변화에 따른 배수지의 저류량 (계열 A)

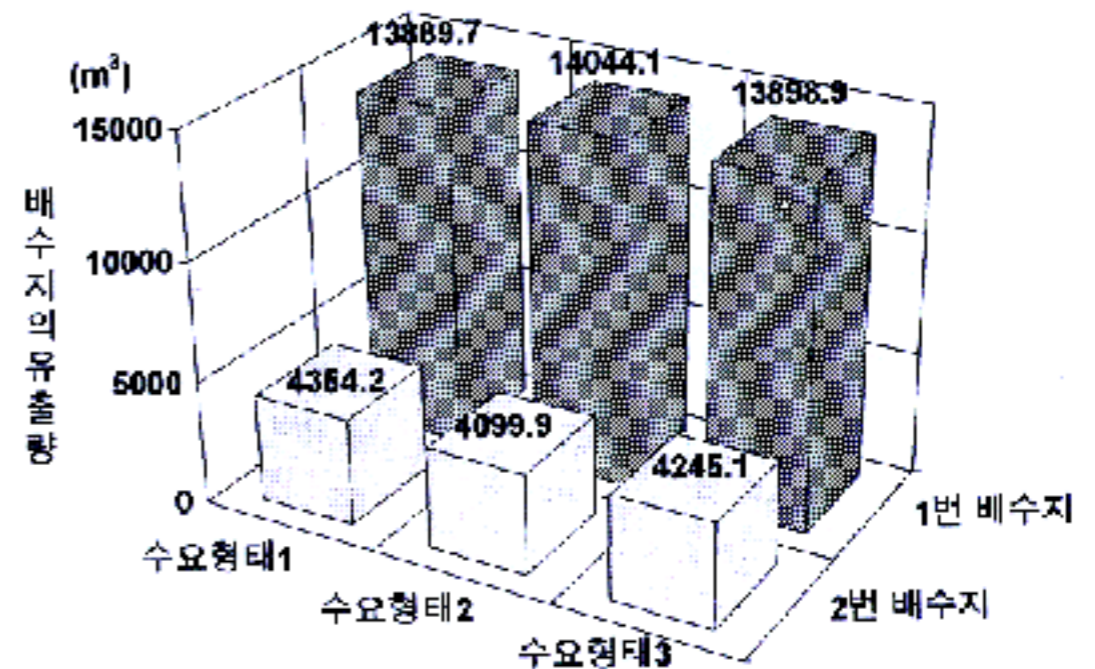


그림 7. 수요형태의 변화에 따른 배수지의 유출량 (계열 A)

4. 수요형태에 따른 배수지의 유출량 비교 대상 관망에 대하여 상수 수요형태의 변화에 따른 1번 배수지와 2번 배수지의 유출량을 그림 7과 그림 8에 나타내었으며, 2번 배수지의

유출량의 변화를 비교한 결과, 표 5와 같이 최소비율과 최대비율의 차이가 5% 정도로서 배

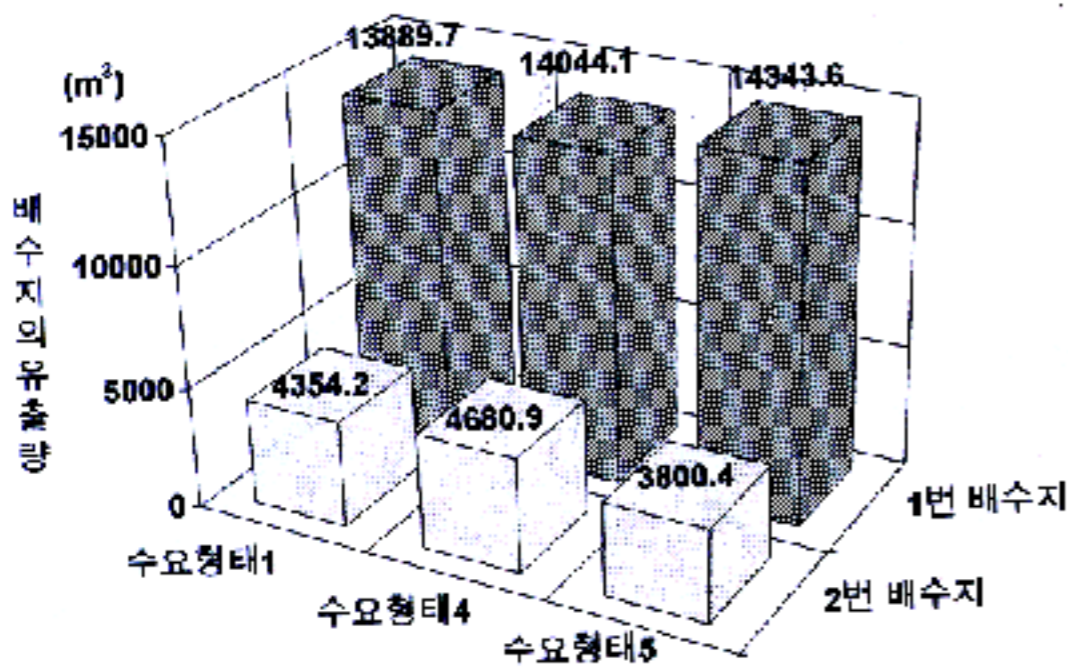


그림 8. 수요형태의 변화에 따른 배수지의 유출량 (계열B)

표 5. 수요형태에 따른 2번 배수지의 유출량의 비율

계열 A	배수지 유출량비율	계열 B	배수지 유출량비율
수요형태 1	23.8 %	수요형태 1	23.9 %
수요형태 2	22.5 %	수요형태 4	25.8 %
수요형태 3	23.4 %	수요형태 5	20.9 %

우 작게 나타났다. 이것은 다점주입제 배수관망에서 상수 수요형태의 시간적 이동에 의한 변화와 침투부하 크기의 변동이 2개 배수지의 유출량에 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타난 것이다. 그러므로, 배수지의 유출량은 수요형태의 어떤 변화에도 영향을 받지 않고, 각 배수지의 에너지위에만 관계된다는 것으로 볼 수 있다.

한편, 이들 유출량을 그림 5와 그림 6의 저류량과 비교해 볼 때, 많은 차이가 있는데, 이것은 배수지의 유출형태에 따른 것으로서 침투수요 발생을 전후로 하여 집중적으로 유출하기 때문이다. 따라서, 에너지위가 낮은 배수지일지라도 경우에 따라서는 소요 저류량이 상당히 크게 요구되는 경우도 있다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 다점주입제 배수관망에서 수요량의 시간적 변화와 침투부하율을 변화시켜 EPS 해석을 실시하였으며, 이를 통하여 상수 수요형태에 따른 상위배수지와 하위배수지의

소요 저류용량의 변화와 유출량을 비교, 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 다점주입제 배수관망에 있어서 각 배수지의 저류용량은 유출량에 비례하여 결정되지 않는다. 배수지의 유출량은 에너지위에 의해 결정되므로, 배수지의 저류량과 유출량의 관계를 다점주입제 해석법을 이용하여 가장 적절한 배수지의 에너지위를 정할 수 있는데, 이 해석을 하기 위해서는 반드시 침투부하율의 변화를 고려할 수 있는 EPS해석을 실시해야 한다.

2. 상수 수요형태의 시간적 변화에 있어서, 동일한 침투수요량이 시간대를 달리하여 발생한다면 배수지 저류량의 변화는 약 10% 내외로 큰 차이를 가져오지 않으나, 침투부하율의 크기가 다른 수요형태가 나타난다면 배수지의 저류량에 약 30% 내외의 많은 차이를 가져왔다. 따라서, 배수관망의 설계시 수요량 형태의 변화 중에서 침투부하의 발생시간의 이동은 별로 고려하지 않아도 되지만, 발생하는 침투부하율은 가능한 한 정확한 값을 이용하여야 한다.

#### 참고문헌

- 1) Thomas M. walski, Analysis of Water distribution Systems, Van Nostrand Reinhold Company, 1990.
- 2) Bryan Coulbeck, and Chun-Hou Orr, Computer Applications in Water Supply, Volume 1-systems analysis and simulation, p.63~126, 1988.
- 3) Shamir, U., "Water Distribution Systems Analysis", ASCE, H.Y. Vol. No 1, 1968.
- 4) 高桑哲男, "配水管網の解析と設計", p.81-127, 森北出版株式會社, 1978.
- 5) 高桑哲男, "配水管網の解析と設計", p.128-174, 森北出版株式會社, 1978.
- 6) 高桑哲男, "配水管網解析の基礎と應用", p.73~94, 水道管路技術 センタ, 1992.
- 7) 船水山行, 高桑哲男, "需要水量の時間變動を考慮した貯留, 増壓法", 日本水道協會雜誌, 제716호, 1994.
- 8) 船水山行, 高桑哲男, "増壓を目的とした配水池増設のための管網解析法", 水道協會雜誌, 제720호, 1994.
- 9) 玄仁煥, "配水管網의 最適 設計法에 관한 研究", 서울대학교, 1987.
- 10) 건설부, 상수도시설기준, p.253, 1992