

배수구역의 평균수압결정을 위한 최소수압측정기간

Minimum Period of Data Collection for the Determination of Average Water Pressure in the Water Distribution Networks

현인환 · 독고석 · 김덕현

In-Hwaan Hyun · Seok Dockko · Duckhyun Kim

단국대학교

(2010년 8월 17일 접수 ; 2010년 10월 10일 수정 ; 2010년 10월 12일 채택)

Abstract

Average pressure in a pipe network is one of critical factors to estimate the flow distribution and to calculate UARL (Unavoidable Annual Real Losses) value in ILI (Infrastructure Leakage Index). While its collection period and measuring location are essential to obtain average pressure, their standard method have not been established so far. In this study, proper method including its procedure for data collection period and measuring point for average pressure were suggested using non-exceedance probability concept in the water distribution network.

Key words : 비초과확률, 평균 수압, 간접배수, 측정기간

주제어 : Non-Exceedance Probability, Average Pressure, Data Collection Period

1. 서론

배수구역의 평균수압은 배수관망의 평가 및 성능개선에 있어서 관망상태를 평가하는 매우 중요한 지표중의 하나이다. 그러나 평균수압을 산정하는데 있어서 수압자료의 수집 기간과 수압측정지점에 대한 통일된 규정이 아직까지는 제시되지 않고 있다.

수압측정과 관련하여, 상수도관망 기술진단 매뉴얼 개발 연구(환경부a,2007)와 유수율 제고 사업 추진 매뉴얼(환경부 b,2007)에서는 ‘배수관망 해석을 위하여 각 측정별 48시간 이상의 수압(kgf/cm² 또는 m)의 변동을 측정하여 주간 및 야간의 수압을 조사한다.’ 고 명시되어 있으나, 일부의 논문(M. Tabesh, 2004)에서는 수압측정기간이 변화와 기후변화, 계절, 요일 등이 변화함에 따라 그 산정결과가 달

라질 수 있다고 제시하고 있어 이에 대한 연구가 필요한 것으로 판단된다. 또한, 평균수압지표는 최근 배수관망의 누수율평가에 일부 사용되고 있는 ILI(Infrastructure Leakage Index)에서 ‘어떠한 노력으로도 완벽하게 없앨 수 없는 누수량’을 나타내는 UARL(Unavoidable Annual Real Losses) 값의 계산에서도 사용되고 있으며, 이 경우의 평균수압은 1년간 24시간 측정된 자료를 이용하여 평균수압을 산정하고 있다(구 등, 2007, H.Alegre, 2008, R.Liemberger, M.Farley, 2005). 1년간 24시간 수압측정된 수압자료를 이용하면 항상 만족한 평가자료를 구축할 수 있으나, 자료가 오래동안 구축되지 못하는 배수관망의 상태를 평가하기 위해서는 단기간의 측정자료로 해당 배수구역의 평균수압을 산출할 수 밖에 없다. 그러한 의미에서 우리나라의 평가매뉴얼 등에서는 단기측정자료를

* Corresponding author Tel:+82-31-8005-3478, Fax:+82-31-8005-4042, E-mail: ihyun@dankook.ac.kr(Hyun, I.)

사용할 수 있도록 규정하고 있는 것으로 판단된다. 따라서 1년간 측정된 평균수압과 유사한 결과를 나타낼 수 있는 자료의 단기구축기간설정이 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 K도 U시 S배수구역의 간접배수시의 겨울철과 여름철 계측 자료를 이용하여 전체 계측자료의 평균수압을 산정한 후 기간별 평균수압과의 오차율에 대하여 비초과확률의 개념의 적용가능성을 검토하고자 한다. 본 연구를 통하여 우리나라 여건에 맞는 수압 측정 기간을 검토하고, 배수구역의 평균수압 산정에 있어서 그 측정기간을 단축시킬 수 있는 가능성에 대해 검토하고자 하였다.

2. 연구내용 및 방법

2.1 기본자료

본 연구에서는 K도 U시 S배수구역의 자료를 기본자료로 사용하였다. 이 배수구역은 다세대 주택, 단독주택, APT, 산업단지가 혼합되어 있는 지역으로 사용량이 564,113m³/월이며, 급수인구는 79,140인, 급수전수는 4,014전으로 구성되어 있다. 이중 대구경(D75mm)수용가에서 71%인 400,872.2m³/월을 사용하는 공동주택 밀집지역이다. Fig.1은 S 배수구역의 현황도이다. 또한, S배수구역은 배수관로 73.9km가 매설되어 있는 5개의 소블록으로 구성되어 있으며, 총 13개의 지점에서 수압을 측정하였다. 소블록당 수압계는 블록당 평균 2.6개소, 최대 3개소, 최소 1개소가 설치하였다. 자료의 수집은 솔라 수압계(OT-1)를 이용하여 관망의 유입부, 중간부, 말단부에서 측정하였으며, 1분 단위로 자동 측정하였다.

2.2 분석방법

대상 배수구역의 각 소블록을 유입부, 중간부, 말단부로 분류하여 각각 2개 지점씩 6개 지점을 선정하였다. 또한 2009.12.05~2010.01.02(겨울), 2010.05.27~2010.07.05(여름), 두 자료를 연속으로 한 68일의 자료를 산술 평균으로 산정한 평균수압과 1일간부터 최대 68일간의 기간별 누적 산술평균과의 오차율을 산출한 후, 각 기간에 대한 오차율에 대해 비초과확률을 적용하여 오차율의 발생 확률을 검토하였으며, T-검정을 통하여 산정된 수압들 간의 유의성 검토를 실시하였다.

2.3 비초과확률 분석

비초과확률 분석이란 자료치 계열을 이론적 확률분포형에 맞추어서 그 자료가 대표하는 사상의 생기빈도를 분석하는 방법이다. 이러한 목적을 위해서는 자료의 누가생기확률을 계산하여 자료치의 크기와 누가생기확률간의 관계가 직선에 가장 가깝도록 나타나는 확률지상에 도시하게 된다. 만약 분석되는 자료가 모집단이라면 가장 작은 값과 가장 큰 값이 자료에 포함되어 있을 것이므로 발생확률이 모든 값을 가질 수 있으나, 표본자료인 경우는 최대치 혹은 최소치를 항상 포함한다고 볼 수 없으므로 0과 1의 확률을 포함시킬 수는 없다. 따라서 도시위치를 결정하기 위해서는 보통 경험공식이 사용되고 있으며 흔히 사용되고 있는 공식은 California공식, Hazen공식, Beard공식, Weibull공식, Chegadayev공식 등이 있다. 이들 공식 중에서 Weibull 공식은 홍수량의 빈도해석 등에 널리 사용되고 있으며, 본 연구에서도 Weibull 공식을 이용하여 비초과확률을 산정하였다. Weibull 공식을 이용하는 경우, 변량 X가 특정치를 초

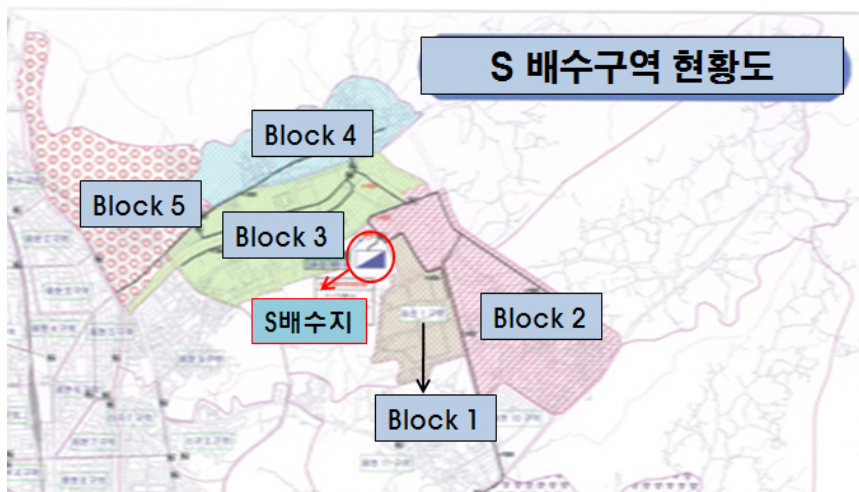


Fig 1. S 배수구역 현황도

과할 확률은 다음과 같이 표현된다.(김, 1983)

$$P(X > x) = \frac{m}{n+1} = \frac{1}{T} = 1 - P(X \leq x)$$

여기서 : n은 자료치 계열을 구성하고 있는 자료의 총수
m은 모든 자료를 제일 큰 것부터 제일 작은 것
까지의 순으로 나열했을 때의 순위.

T: 평균재현기간 (초과확률의 역수)

또한, 비초과확률은 $P(X \leq x)$ 로서 사상이 어떤 특정 값 x를 초과하지 않을 확률을 의미한다. 비초과확률은 우리나라의 상수도 시설을 결정하는 침투부하의 영향 요소 분석과 가정용수의 이상치 분석에 널리 이용되고 있으므로 본 논문의 수압 측정 간격 오차율 검토에 대하여 적용하였다.(현, 2004; 이, 2005; 장, 2006)

3 분석 및 고찰

배수관망내에서는 측정지점에 따라 손실수두의 발생정도 및 변동폭이 달라진다. 본 연구에서는 이러한 수압변동 패턴을 감안하기 위하여, 손실수두가 가장 작게 변동하는 배수관망의 유입부, 크게 변동하는 관망의 말단부 및 중간정도인 중간부의 측정지점별로 평균수압의 기간별 오차범위를 분석하였다.

3.1 자료측정 기간별 평균수압 분포

관망 유입부 5-21지점에서의 겨울철(28일 자료)의 평균수압은 6.760 kgf/cm², 여름철(40일 자료)의 평균수압은 6.831 kgf/cm²로 나타났으며, 두 기간을 합한 전체 기간의

평균수압은 6.802 kgf/cm²로 나타났다. 이 지점에서의 전체 평균 대비 겨울철의 최대오차율은 1.09%, 여름철의 최대오차율은 1.36%, 전체의 경우 최대오차율은 1.79%를 나타내었다.

관망 중간부인 5-12지점에서는 겨울의 경우 3.576 kgf/cm², 여름의 경우 3.636 kgf/cm², 전체 기간의 평균수압의 경우에는 3.602 kgf/cm²로 나타났다.

Fig. 2, Fig 3 및 Fig 4에는 관망 말단부인 5-31지점의 측정기간별 평균수압을 나타내었다. 5-31지점에서는 겨울철의 경우 4.933 kgf/cm², 여름철의 경우 5.090 kgf/cm²로 나타났으며, 전체자료의 평균수압은 5.026 kgf/cm²로 나타났다. 분석된 모든 지점 평균수압에 대하여 유의성을 확인하기 위하여 T-검정을 실시한 결과 유의성이 있는 것으로 판단되었다.

Fig 2에서는 측정기간을 1일부터 시작하여 2일, 3일 등 28일까지의 자료를 이용하여 측정기간이 달라짐에 따라 평균수압이 28일 전체자료를 이용한 평균수압과 어떻게 달라지는 가를 나타하였다. 분석결과 측정기간을 1일로 하였을 때에는 전체자료를 이용한 값에 대해 평균수압의 최대와 최소와의 차이는 0.220kgf/cm²이었으며, 6일 자료를 이용한 경우에는 0.105kgf/cm², 20일자료를 이용한 경우에는 0.020kgf/cm²으로 측정기간이 늘어날수록 장기간(28일) 자료에 의한 평균수압과의 차이가 작아지는 것을 확인할 수 있었다.

5-31지점에서 여름철의 경우에는 측정기간 1일에 대한 평균수압의 최대와 최소의 차이는 0.875kgf/cm²이었으며, 측정기간을 6일로 했을 때의 차이는 0.226kgf/cm², 20일자료를 이용한 경우에는 0.069kgf/cm²로 겨울철과 마찬가지로

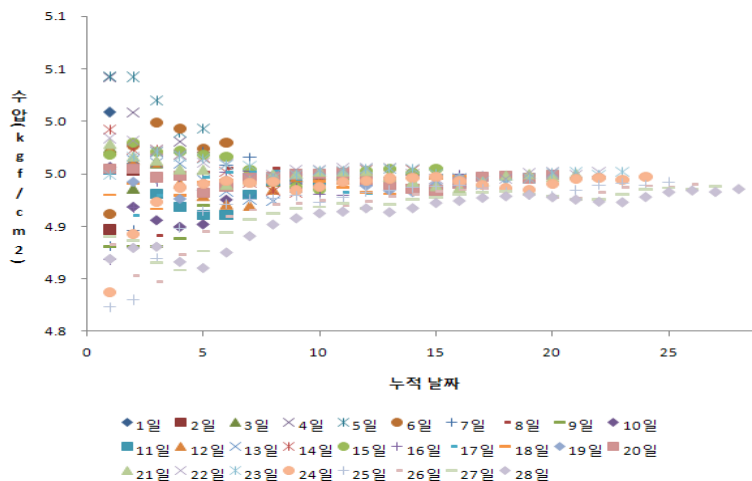


Fig 2. 관망 말단부의 평균수압 분포(겨울철)

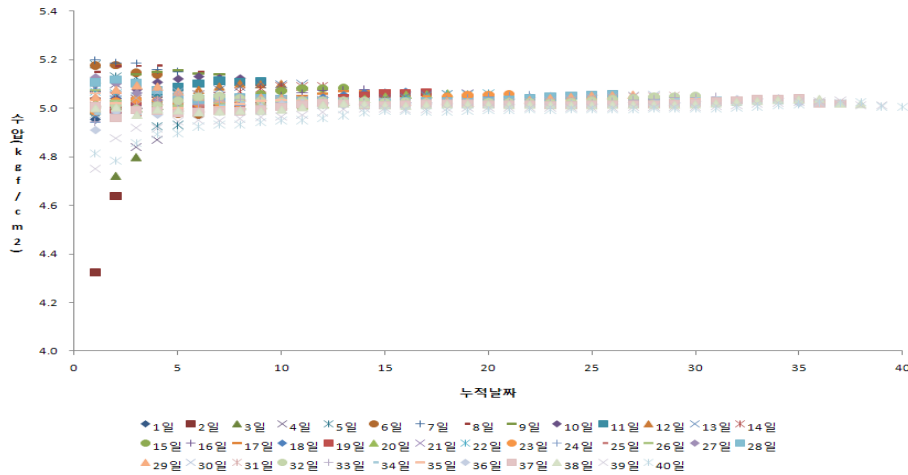


Fig 3. 관망 말단부의 평균수압 분포(여름)

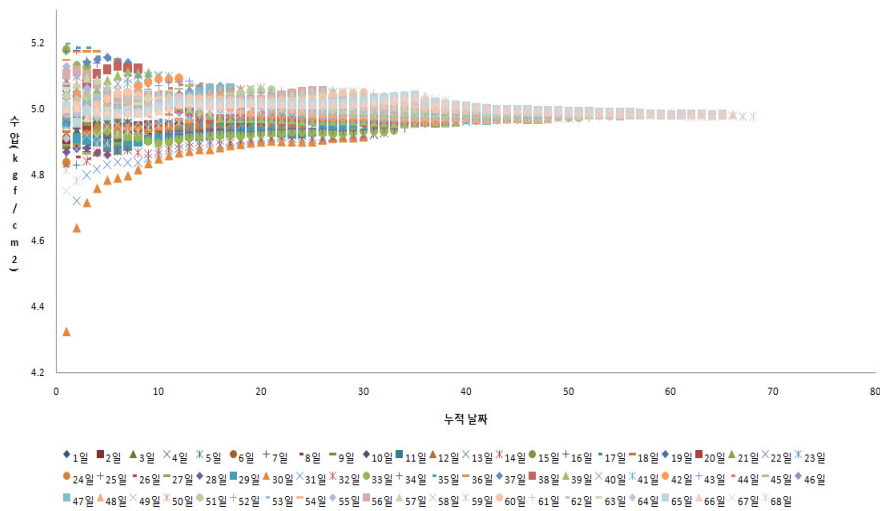


Fig 4. 관망 말단부의 평균수압(전체자료)

로 장기간(40일간) 자료에 의한 평균수압과의 차이가 작아지는 것을 알 수 있었다.

Fig 4에는 5-31지점에서 전체자료(68일)를 이용하여, 측정기간을 1일로 했을 때부터 시작하여 68일 전체자료를 이용하였을 때의 평균수압의 분포를 나타내었다.

5-31지점에서 전체자료를 이용하여 측정기간별 평균수압의 분포를 분석한 결과, 측정기간을 1일로 했을 경우 최대값과 최소값의 차이는 0.875kgf/cm²으로 나타났으며, 측정기간을 6일로 했을 때에는 그 차이가 0.360kgf/cm², 20일 자료인 경우 0.162kgf/cm²으로 측정기간을 증가시킬수록

장기간(68일간)의 평균수압에 가까워짐을 알 수 있다.

5-41지점도 겨울의 경우 평균수압 7.772 kgf/cm²로 최대오차율 1.11%, 여름의 경우 7.658 kgf/cm²로 최대오차율 2.52%, 전체의 경우 평균수압 7.706 kgf/cm²으로 최대오차율 2.74%, 일일 수압의 변동범위 1.156 kgf/cm²를 나타내었다.

5-12지점은 관망의 중간부로서 겨울철의 경우 평균수압은 3.576kgf/cm²으로 최대오차율 2.72%, 여름철 평균수압은 3.636kgf/cm²으로 3.62%, 전체의 경우 평균수압 3.602kgf/cm²로 나타났으며, 일일수압의 변동범위는

0.143kgf/cm²로 균등수압을 나타내고 있다. 5-42지점은 겨울철 평균수압은 6.481kgf/cm²으로 최대오차율 1.36%, 여름의 평균수압 6.352kgf/cm²으로 최대 오차율 1.79%, 전체의 경우 6.402kgf/cm²으로 최대 오차율 2.62%, 일일 수압 변동범위 0.856kgf/cm²를 나타냈다.

3.2 측정기간별 오차율에 대한 비초과확률 적용

배수관망에서의 손실수두의 발생은 배수구역에서의 물사용패턴에 따라 달라지며, 물사용량은 각종 외적 변수에 영향을 받는다. 따라서, 측정기간에 따라 전체 자료와의 오차율은 달리 나타나며, 이 발생확률을 검토할 필요가 있다. 오차발생확률의 검토에는 비초과확률개념을 적용하였다.

관망의 말단부 5-11지점과 5-31지점의 기간별 평균수압 및 오차율 비초과확률로 산정한 오차율에 대하여 **Table 1**과 **Table 2**에 나타내었다.

관망의 말단부에 위치한 5-11지점에서의 평균수압은 겨울철자료의 경우 3.930kgf/cm², 여름철 자료의 경우 3.777kgf/cm² 전체자료를 이용한 경우 평균수압 3.841kgf/cm²로 나타냈다.

전체기간에 대한 자료상의 오차율은 측정기간을 1일로 했을 경우 최대 9.23%로 나타났으며 측정기간을 2일로 했을 경우에는 8.70%, 5일로 했을 경우 최대오차율은 4.92%로 나타났다. 오차율에 대해 비초과확률을 적용한 결과, 99%비초과확률에서는 1일측정기간의 경우 8.65%, 5일측

Table 1 관망 말단부(5-11지점)에서의 평균수압과의 오차율(%) 및 평균수압

구 분		2009.12.05 ~ 2010.01.02(28일)					2010.05.27 ~ 2010.07.02(40일)					전체기간(68일)					
		1일	2일	3일	4일	5일	1일	2일	3일	4일	5일	1일	2일	3일	4일	5일	
평균 수압 (kgf/cm ²)	최대	4.06	4.03	4.03	4.02	4.01	4.02	4.02	3.99	3.98	3.95	4.06	4.03	4.03	4.02	4.01	
	2순위	4.06	4.02	4.01	4.02	4.00	4.01	4.01	3.98	3.94	3.94	4.06	4.02	4.01	4.02	4.00	
	3순위	4.04	4.02	4.01	4.01	4.00	3.98	3.98	3.95	3.92	3.93	4.04	4.02	4.01	4.01	4.00	
	4순위	4.01	4.02	4.01	3.98	3.97	3.98	3.98	3.91	3.92	3.93	4.02	4.02	4.01	3.98	3.97	
오차율 (%)	최대	3.99	3.02	2.51	2.19	0.44	7.70	7.16	5.92	4.56	3.32	9.23	8.70	7.48	5.32	4.92	
	2순위	3.90	2.89	2.18	2.17	0.40	7.65	5.76	5.48	4.33	2.64	9.18	7.11	5.71	5.09	4.40	
	3순위	3.86	2.37	2.06	1.85	0.40	6.67	5.54	4.44	4.16	2.48	8.22	6.23	5.20	4.61	4.25	
	4순위	3.14	2.20	1.97	1.62	0.40	6.37	5.48	4.11	4.11	2.34	6.30	6.17	4.95	4.60	4.10	
비 초과 확률	오차율	99%	4.24	3.31	2.75	2.41	0.70	8.77	6.60	5.24	4.42	3.91	8.65	7.09	6.16	5.58	5.20
		95%	3.51	2.73	2.26	1.96	0.49	6.21	4.62	3.61	3.01	2.64	6.12	5.00	4.33	3.90	3.63
		90%	3.12	2.41	1.99	1.72	0.39	4.84	3.56	2.74	2.26	1.96	4.77	3.89	3.35	3.01	2.80

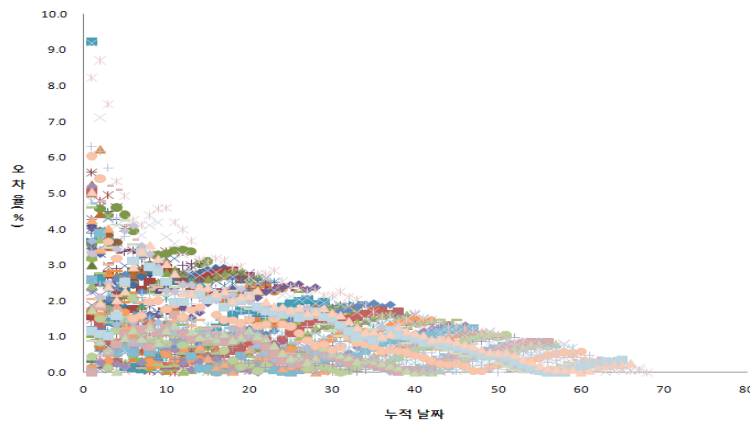


Fig 5. 5-11지점 평균 수압 오차율(%) (전체기간)

Table 2 관망 말단부(5-31지점)에서의 평균수압과의 오차율(%) 및 평균수압

구분	2009.12.05 ~ 2010.01.02(28일)					2010.05.27 ~ 2010.07.02(40일)					전체기간(68일)					
	1일	2일	3일	4일	5일	1일	2일	3일	4일	5일	1일	2일	3일	4일	5일	
평균 수압 (kgf/cm ²)	최대	5.04	5.04	5.02	4.99	4.99	5.20	5.19	5.18	5.18	5.16	5.20	5.19	5.18	5.18	5.16
	2순위	5.04	5.01	5.00	4.99	4.97	5.18	5.18	5.17	5.16	5.16	5.18	5.18	5.17	5.16	5.16
	3순위	5.01	4.98	4.97	4.98	4.97	5.18	5.17	5.15	5.15	5.15	5.18	5.17	5.15	5.15	5.15
	4순위	4.99	4.98	4.97	4.97	4.97	5.15	5.13	5.14	5.14	5.12	5.15	5.13	5.14	5.14	5.12
오차율 (%)	최대	2.28	2.17	1.78	1.56	1.52	13.65	7.34	4.15	3.38	3.01	13.14	6.80	5.26	4.38	3.88
	2순위	2.18	2.14	1.71	1.40	1.20	5.08	5.70	3.56	3.05	2.98	4.53	5.15	4.17	3.99	3.61
	3순위	2.16	1.67	1.42	1.27	1.17	3.84	4.46	3.35	2.86	2.89	4.44	4.21	3.96	3.65	3.58
	4순위	2.00	1.48	1.33	1.17	0.82	3.83	3.61	3.30	2.73	2.28	4.08	4.03	3.58	3.46	3.49
비오 초과 확률	99%	2.71	2.32	2.03	1.77	1.47	6.58	5.03	3.52	2.77	2.26	5.57	4.47	3.93	3.59	3.34
	95%	1.92	1.64	1.43	1.24	1.03	4.65	3.54	2.42	1.86	1.48	3.94	3.16	2.76	2.51	2.34
	90%	1.49	1.28	1.11	0.96	0.79	3.62	2.74	1.83	1.38	1.07	3.07	2.46	2.14	1.94	1.80

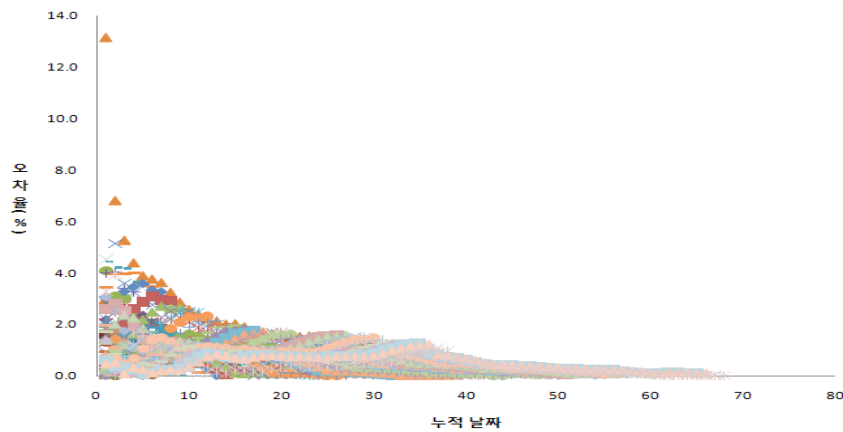


Fig 6. 5-31지점 평균 수압 오차율(%) (전체 기간)

정기간의 경우 5.20%로 나타나 1일측정기간의 경우 자료상의 오차율은 1%이하의 특이 확률이지만, 5일자료의 오차율은 1%정도의 확률로 발생함을 나타내고 있다. 95%비초과확률을 적용한 결과는 1일측정기간에서는 6.12%를 나타냈으나 2일측정기간보다 긴 경우에는 5.0%이하의 오차율을 보이는 것으로 나타났다.

계절적으로는 겨울철과 여름철이 다르게 나타나, 겨울철에서는 변동폭이 작아 2일측정기간에서 자료최대오차율은 3.02%이나 비초과확률 99%를 적용한 경우, 3.31%, 95%비초과확률로 산정했을 때에는 2.72%의 오차율을 나타내었다. 여름철 자료의 경우는 오차율이 겨울철자료보다 커져서 2일측정기간에서 자료최대오차율은 7.16%이나 비초과확률 99%를 적용한 경우에는 6.60%, 95% 비초과확률로 산정했을 때에는 4.62%의 오차율을 나타내었다.

5-31지점은 겨울의 경우 평균수압 4.933kgf/cm²으로 1

일측정기간에서의 최대오차율 2.28%, 여름의 경우 평균수압 5.015kgf/cm²으로 1일측정기간에서의 최대오차율은 13.65%을 나타내었다. 전체자료의 경우 평균수압은 4.977kgf/cm²로 1일측정기간에서의 최대오차율은 13.14%를 보였으며 일일 수압의 변동범위는 1.857kgf/cm²로 측정일에 따라 수압의 변화가 큼을 알 수 있다.

그러나 여름의 경우에서 누적평균으로 산정한 절대 오차율은 3일측정기간에 대해 4.15%, 측정구간에 따른 수압 변동범위는 2.175kgf/cm²를 나타내었고, 99% 비초과확률로 산정한 오차율은 3일측정기간에 대해 3.52%, 95% 비초과확률로 산정한 오차율은 2.42%를 나타내었다. 전체기간에 대해 산정한 절대오차율은 연속3일측정자료에서 5.26%로 나타났으며, 비초과확률 99% 적용 시 오차율은 3.93%, 95% 비초과확률로 산정한 오차율은 2.76%를 나타내었다.

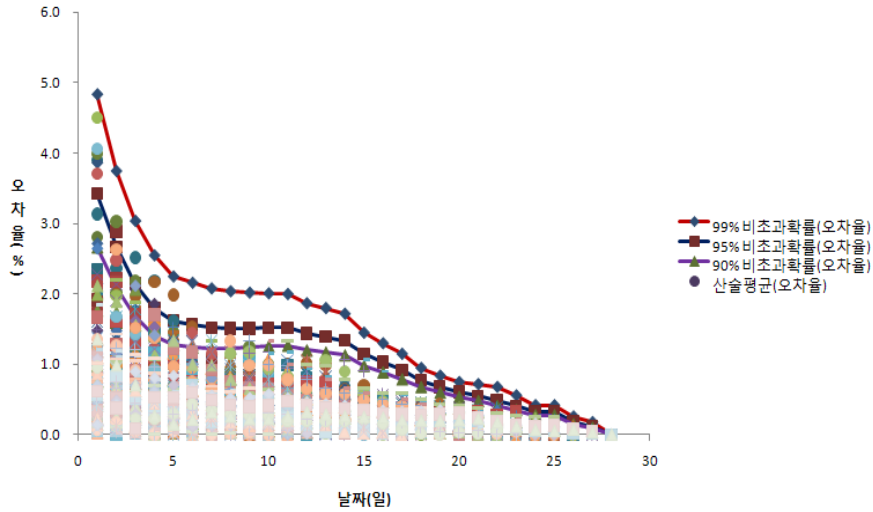


Fig 7 겨울의 기간별 산술평균 오차율과 비교과확률로 비교한 오차율 (전체지점)

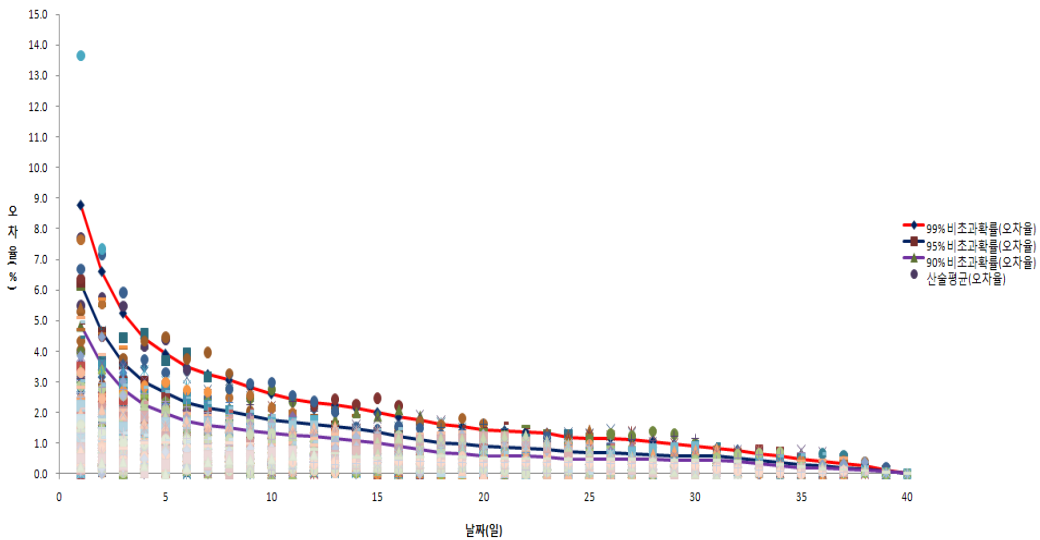


Fig 8 여름의 기간별 산술평균 오차율과 비교과확률로 비교한 오차율(전체지점)

3.3 검토

본 연구에서는 간접 배수 방식에서의 평균 수압의 산정에 관한 수집기간에 대하여 고찰하였다. 관망의 유입부(5-21 지점, 5-41지점), 중간부 지점(5-12지점, 5-43지점)에서는 겨울, 여름, 전체 기간에서 전체 산술평균수압과 측정 기간을 1일로 했을 경우에도 측정구간에 따른 자료의 오차

율이 5% 이내로 나타나, 평균수압의 신뢰도를 95%로 했을 경우, 1일 측정간격으로도 충분히 신뢰성있는 평균수압을 산정할 수 있음을 알 수 있었다.

여름의 경우 5-11지점에서 기간별 산술평균을 사용하였을 시에는 최소 4일 이상의 자료를 이용할 때 절대 오차율 5% 이내로 산정할 수 있었다. 99% 비교과확률을 사용

하였을 시에도 4일 이상, 95% 비초과확률을 대해서는 최소 2일 이상의 자료를 이용하여야만 5%이내의 오차를 기대할 수 있음을 알 수 있었다. 전체자료에서는 자료상의 최대오차율로는 최소 5일 이상의 측정기간을 이용해야만 전체자료에 대한 오차율을 5% 이내로 할 수 있었다. 오차율 5%의 기대확률을 95%의 비초과확률을 적용했을 경우에도 최소 3일 이상의 측정기간이 필요함을 알 수 있다.

5-31지점에서는 여름의 경우 자료상으로는 연속측정이 최소 3일 이상, 99% 비초과확률을 적용하였을 경우에는 최소 3일 측정기간 이상, 95% 비초과확률을 이용하였을 때에는 1일기간 이상의 자료를 사용한다면 오차율 5%이내의 평균수압을 산정을 기대할 수 있었다. 전체자료를 대상으로 분석한 결과, 평균수압의 오차율을 5% 이내로 산정하기 위해서는 최소 연속4일 이상의 측정이 필요하였고, 99% 비초과확률을 적용하였을 때에는 연속2일 이상의 측정이 필요하며, 95% 비초과확률을 적용하였을 시에는 측정기간이 1일인 경우에도 오차율 5%이내의 평균수압을 산정할 수 있었다.

4. 결론

겨울과 여름기간의 1분 간격으로 측정된 일 평균수압과 전체 68일을 기준으로 산술평균하여 산정된 평균수압 대비 오차율 5%이내의 자료상의 판단으로는 연속 측정기간이 6일 이상 필요한 것으로 분석되었다. 전체자료를 기준으로 기간별로 산출된 오차율에 비초과확률을 적용하여 분석한 결과 수압을 최단기간으로 측정할 수 있는 기간은 99% 비초과확률을 적용하는 경우에는 연속6일 이상의 측정기간이 필요한 것으로 나타났고, 95% 비초과확률을 적용하는 경우에는 연속3일 이상의 측정기간이 필요한 것으로 분석되었다. 수압의 변동범위가 큰 지역일수록 기간별 산술평균수압과 99%, 95% 비초과확률로 분석한 오차율이 커지는 것으로 나타났다. 이는 이상 자료의 포함으로 인한 것으로 판단되며, 이 자료들을 제외한 분석과 관망의 모델링을 통한 관망해석이 추가적으로 시행 및 검토 되어야 될 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 구자용, 이현동, 홍인식, 김정구, 김경필 (2007), 누수 방지 및 저감 기술의 적용사례, 대한환경공학회지, 제29권 12호, pp. 1310~1317
2. 김정년, (1983), 통계학, pp.417~419, 경문사
3. 이제인, 현인환, 손창호 (2005), 지역별 침투부하 특성을 고려한 송배수관망의 설계용량 산정에 관한 연구, 상하수도학회, 공동추계 학술발표회 논문집, pp. 91~97
4. 의정부시, (2009), 수도정비기본계획
5. 장동진, 현인환, 독고석, 구자용, 김상현 (2006), 가정용수 실적자료의 이상치 분석 방법, 상하수도학회, 공동추계 학술발표회 논문집, pp. 41~48
6. 현인환, 이제인, 이상목 (2000), 일 최대부하율의 확률분포 특성, 한국물환경학회지, 공동추계 학술발표회 논문집, pp.31~34
7. 현인환, 이제인, (2004), 우리나라 상수도시설의 침투부하 영향요소 분석, 상하수도학회지, 제18권 제1호, pp.49~58
8. 한국상하수도협회, (2004), 상수도시설기준
9. 환경부, (2007a), 상수도관망 기술진단 매뉴얼 개발연구
10. 환경부, (2007b), 유수율 제고사업 추진 매뉴얼
11. J.Thornton and R.Sturm, (2008), *Water Loss Control*, 2nd Ed. pp. 121~123, Mc Graw Hill, New York.
12. H.Alegre, W.Hirner, J.M.Baptista, R.Parena, (2000), *Performance Indicators For Water Supply Services*, pp. 33~34, IWA Manual of Best Practice. ISBN 900222272
13. R.Liemberger, M.Farley (2005), Developing a Non-Revenue Water Reduction Strategy Part 1: Investigating and Assessing Water Losses, Water Supply Vol 5, No 1, pp 41~50
14. M. Tabesh, T.T. Tanyimboh, R. Burrows (2004), Pressure dependent stochastic reliability analysis of water distribution networks, Water Supply Vol 4, No 3, pp 81-90, IWA Publishing