



# 급·배수 시스템내 경제적 감압밸브의 선정방법



**양 승 경**  
한국수자원공사 경남지역본부 차장  
skyang@kwater.or.kr



**장 주 현**  
한국수자원공사 기술관리실 팀장  
juhyeon@kwater.or.kr



**박 종 일**  
한국수자원공사 경인 아라뱃길사업처 대리  
parkpi74@naver.com

수압관리는 펌프조절 등과 같이 다양한 방법이 있으나 감압밸브를 활용한 수압관리가 가장 효율적인 방법으로 알려져 있으며, 본고에서는 구경, 형식, 재질에 있어 경제적 감압밸브 선정방법에 대해 소개하고자 한다.

## II. 감압밸브의 종류와 기능

수도시설은 동일관경에서 유량이 많으면 압력이 낮아지므로 용수수요량이 많은 시간대에도 충분한 수압을 확보할 수 있도록 설계된다. 반면 야간 등 최소용수사용시간에는 필요이상의 수압이 형성되어 누수량을 증가시키고 관로, 설비 등의 마모를 가속시킨다.

수압으로 인한 이러한 문제점의 대안으로 감압밸브(PRV)를 활용한 수압관리가 가장 효과적이며, PRV는 고정유출, 시간제어, 유량제어의 세가지 형식이 있다.

(1) 고정유출은 수압저감을 시간에 따라 동일하게 유지하는 방식으로 설치비용은 저렴하나 최소용수사용시(야간 등) 과수압을 제어할 수 없는 단점이 존재한다.

(2) 시간제어는 고정유출 방식에 타임 컨트롤러를 부착하여 시간에 따라 수압을 조절하는 방식을 말한다. 따라서, 사전 충분한 용수공급패턴 분석을 통해 시간대별 예측되는 수압을 미리 선정하여 운영된다.

(3) 유량제어는 유입유량 또는 임계지점\* 수압변동에 따라 감압밸브의 유출압력을 조정하여, 임계지점

## I. 서론

급배수 시스템에서 누수는 누수자체의 경제적 손실은 물론 도로침하 등과 같은 2차 피해를 유발하므로 매우 중요한 관리 요소이다.

누수저감을 위해 1980년대부터 유럽과 일본에서는 다양한 방법을 연구하였으며, 그 결과 수압관리가 가장 효과적임을 입증하였다. 또한, John May가 FAVAD(Fixed and Variable Areas Discharges) 개념을 발표함으로써 수압관리와 누수의 상관관계를 이론적으로 뒷받침 하였다.

\* 용수공급구역내 최저수압지점 또는 수용가의 특수성에 따라 일정 압력을 유지해야하는 목표지점

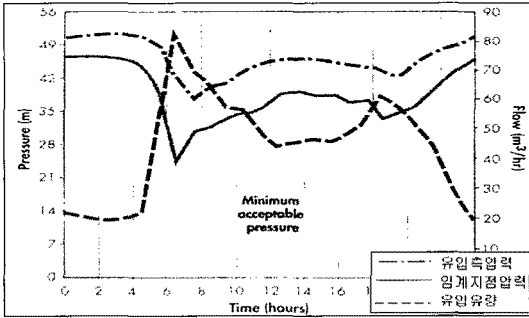


그림 1. 수압 미제어시

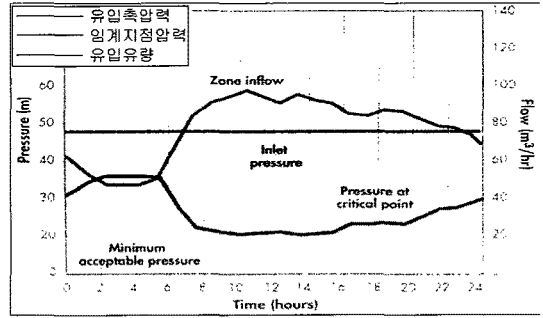


그림 2. 고정유출 PRV

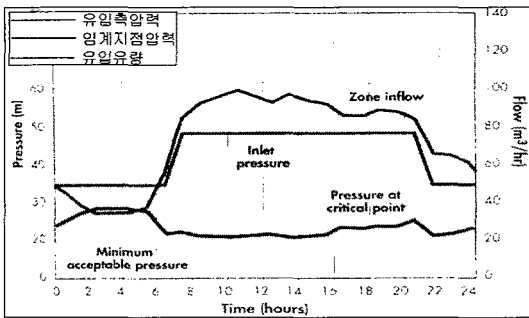


그림 3. 시간조절 PRV

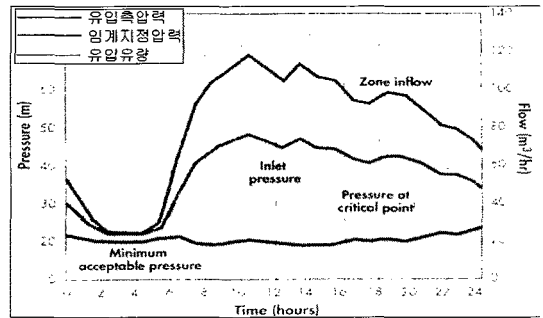


그림 4. 유량조절 PRV

의 수압을 설정된 값에 유지하는 형식이다. 감압밸브 형식별 유출수압과 임계지점에서의 수압과의 관계를 다음 그림 1~4와 같이 나타내었다.

그림1의 수압 미제어시 유량이 많을수록 압력이 낮아지는 일반적인 현상을 나타낸다.

그림2의 고정유출 PRV는 최대 유량사용시 임계지점에서 용수공급이 가능한 최소압력을 기준으로 PRV 유출압력을 설정하여 운영함으로 수압미제어시와 비교할 때 전반적으로 압력이 낮아지나, 용수수량이 적은 야간시간대에는 압력저감 효과가 적으며, 유량과 압력이 반비례하는 일반적인 현상이 역시 나타난다.

그림3의 시간조절 방식은 유수사용이 적을 때는 PRV 유출압력을 더 낮추고, 유수사용이 많을 때는 반대로 압력을 상승시켜 최고·최저수압의 차이가 상대적으로 적어진다.

그림4의 유량조절 방식은 유입유량 또는 임계지점의 압력에 따라 PRV의 유출압력이 자동으로 운영되

어 임계지점의 수압이 일정하게 유지되어 과수압의 범위가 매우 적다.

각 그림에서 최저수압지점에서 임계지점수압선 사이의 황색부분은 시간대별 과수압을 나타내며, 황색부분의 면적이 고정유출(시간제어)유량제어 순으로 줄어드는 것을 알 수 있다. 이는 PRV 형식중 유량제어 방식이 압력제어에 가장 효과적임을 나타낸다.

### III. FAVAD

FAVAD(Fixed and Variable Areas Discharges) 이론은 수압과 누수와의 관계를 정립한 것으로, 다음 식으로 표현된다.

$$L_1 / L_0 = (P_1 / P_0)^{NI}$$

여기서,  $L_0$  = 초기 누수량( $m^3/일$ )

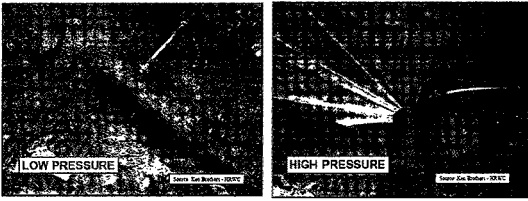


그림 5. 수압과 누수와의 관계<sup>2)</sup>

$$L_t = \text{수압 변동 후 누수량(m}^3/\text{일)}$$

$$P_0 = \text{초기 수압(m)}$$

$$P_1 = \text{변동 후 수압(m)}$$

$$N1 = \text{FAVAD 지수(단위 없음)}$$

그림 5는 수압에 따라 누수량이 비례하여 증가하는 사례를 보여준다.

하지만, 많은 연구에서 누수량은 단지 수압과의 비례선형 관계가 아니라 관종 등 다양한 조건에 의해 변화됨을 확인하였고, John May가 FAVAD 개념 “누수량은 수압의 N1승에 비례한다”을 발표(1994.5) 함으로 수압과 누수량간의 상관관계를 정립하였다. 지수 N1은 다양한 조건에 따라 0.5~2.5 사이에서 값을 가지는데 외부에 노출되는 큰 규모의 누수는 0.5, 작은 규모의 누수는 2.5에 근접하며, 규모가 작은 급배수 시스템에서는 0.5~1.5, 큰 규모에서는 1.0에 근접하는 값을 가진다. 또한, 관의 종류에 따라서는 합성수지관이 금속관보다 큰 N1값을 가진다.

#### IV. K-Pressure

K-Pressure는 남아프리카공화국의 South African Water Research Commission에서 BABE\*, FAVAD 개념, 손실수두-유량관계식에 근거하여 개발한 PRESMAC 프로그램을 수자원공사에서 Excel로 재구성한 자동계산 프로그램이다.

\* BABE(Burst and Background Estimates) : 용수공급 시스템 내 물수지분석 방법으로, 기존 물수지 분석법의 Real Apparent Losses를 계량이 가능한 인자. 즉, 계량기 오류, 연결부위 누수 등의 5가지로 분류·분석하는 방법

K-Pressure의 주요기능은 감압밸브 설치로 예상되는 PRV 종류별 누수저감량을 계산하고 이에 따른 편의 계산을 수행한다.

K-Pressure는 총 5개 Sheets로 구성되어 있으며, 첫 번째 Sheet는 누수저감량 산정을 위한 시설현황 등과 같은 기초자료와 대상구간의 압력 및 유량 등의 측정자료가 입력된다. 두 번째 Sheet는 현재상태의 유량, 수압 및 손실수두를 계산하며, 세 번째부터 다섯 번째 Sheet는 입력자료를 바탕으로 세가지 감압밸브 종류별 누수저감량을 예측하게 된다. 이때 BABE와 FAVAD의 이론을 바탕으로 한 계산이 수행되며 마지막 Sheet는 결과를 요약한다<sup>3)</sup>.

#### V. 경제적 감압밸브의 선정

경제적 감압밸브 선정을 위해서는 대상 급배수 구역의 수리학적 분석과 K-Pressure를 활용한 경제성을 평가하여 PRV 종류, 구경, 재질을 선정하는 체계적인 절차가 필요하다. 대부분의 PRV가 체계적인 검토 없이 설치되어 기대만큼 효과를 거두지 못하는 실정이다.

이 절에서는 경제적 PRV 선정을 위해 K-Pressure를 활용하여 PRV의 구경, 형식, 재질 선정 방법과 절차를 소개하고자 한다

##### 1. 사전조사

최적 PRV 선정을 위해서는 급배수 구역에 대한 신뢰성 있는 관망검토가 선행되어야 한다. 왜냐하면 PRV 설치 이후에 발생할 수 있는 수리학적 변동에 대한 예측이 가능해야 하기 때문이다. 만약 특정지역에 감압밸브를 설치시 기존 관망검토가 적정하지 않았다면, 감압에 의한 효과보다 출수불량 등 오히려



피해를 줄 수 있다.

## 2. 감압밸브 위치 선정

관망검토가 완료되었다면 최적의 감압 효과를 발휘할 수 있는 위치를 선정해야 한다. 통상적으로 PRV 위치 선정에 위한 조건은 다음과 같다<sup>4)</sup>.

- (1) 한개의 수압관리구역(PMA) 또는 구역계량지역(DMA)에 대해 적용한다.
- (2) 감압밸브는 구역의 유입부에 설치되어야 한다.
- (3) 수압관리구역(PMA) 또는 구역계량지역(DMA)이 완전하게 구축되어야 하며, 유량 및 수압을 측정할 수 있는 곳이어야 한다.

## 3. 감압수준 검토

감압수준은 임계지점에 의해 결정된다. 임계지점은 급배수구역 중 최저 수압지점이 대부분 선정되나, 최저수압 지점이 반드시 구역의 임계지점은 아니다. 만약 선정된 임계지점에 일반적인 급수조건에 의한 1.5kgf/cm<sup>2</sup> 정도의 수압이 되도록 PRV의 감압수준을 결정한 경우, 만약 다른 지점에서 2.0kgf/cm<sup>2</sup> 이상의 수압이 필요한 수용가가 있다면 이는 잘못된 임계지점을 선정한 것이다. 이러한 이유로 사전조사를 통한 수압과 유량의 관계를 고려한 물수요자의 특성 분석은 매우 중요하다.

## 4. 구경선정

구경은 PRV 상·하류의 감압차이와 최대유량과의 관계에 의해 선정되며 선정 절차는 다음과 같다.

- (1) 관망해석을 통하여 임계지점의 필요한 동수압이 확보되는 PRV 유출압력 선정
- (2) 실제 측정된 상류측 수압값과 관망해석에 의해 도출한 하류측 수압값의 차이(즉, 감압범위)를 선정
- (3) 유량 재산정 - 계산에 필요한 유량값은 현재의 유량값이 아닌 감압밸브 설치후의 유량 값이다. 따라

### <유량재산정법>

누수량은 수압에 비례하는 원리를 이용 누수저감량 예측을 통한 유량재산정

1. 현재 누수량(Qn) = 현재공급량(Qs) - 현재사용량(Qu)
2. 현재 누수량(Qn) = 현재 누수량(Qn) × 90%(가정치)
3. 향후 누수량 저감량(Q<sub>L</sub>) = Q<sub>n</sub> - Q<sub>n</sub> × (P<sub>2</sub>/P<sub>1</sub>)<sup>0.5-2.5</sup> (동상 L<sub>1</sub>을 사용:  
(P<sub>1</sub> - 현재 하류수압, P<sub>2</sub> - 감압후 하류수압)

L varies with P<sup>0.5</sup>  
누수량(L)은 수압(P)의 N1승에 비례한다

4. 조정 유량(Q) = Q<sub>s</sub> - Q<sub>L</sub>
- ※ N<sub>1</sub>은 누수형태, 관종, 수압별로 차이가 있음. 복잡한 배수시스템에서 N<sub>1</sub>에 대한 가중평균치를 구하면 대개 1.0에 근접(Ogura 1981, Lambert 1997)

서, 현재의 유량값으로 감압밸브를 선정시 실제 필요한 구경보다 큰 구경이 산정될 수 있으므로 유량의 재산정이 필요하다.

- (4) 감압밸브 구성선정은 그래프법, 유량계수법, 프로그램법에 의거 산정된다.

### 1) 그래프법

상하류 수압차이를 X축에 시간최대유량값을 Y축에 대입하여 교차되는 지점에서 상부의 사선에 표시된 구경을 산정하게 된다.

### 2) 유량계수법

감압과 유량계수 관계의 의한 무차원의 수(Cv, 유량계수)로 각 구경별 유량계수 조건이 일치하는 구경을 산정하는 방법으로 유량계수조건에 따라 표1에 의해 산정된다.

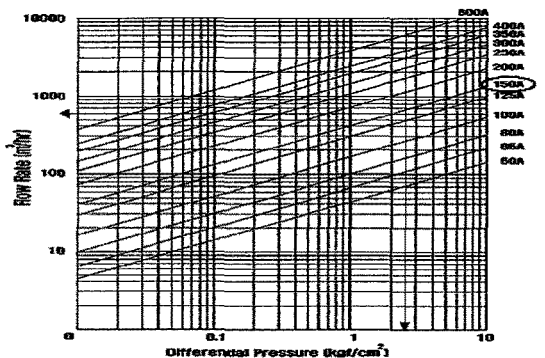


그림 6. 그래프에 의한 구경선정

※ 필요유량이 600m<sup>3</sup>/hr이고 감압이 2.5kgf/cm<sup>2</sup>이 되는 경우 구경은 D150mm가 됨

표 1. 유량계수 조건에 의한 구경선정 표

구경 (mm)	유량계수 $C_{min} \sim C_{max}(C_v)$	최소유량 (m <sup>3</sup> /hr)	최대유량 (m <sup>3</sup> /hr)	유속 7.6m/s일 때의 유량(m <sup>3</sup> /hr)
80	8.3~75.6(106)	5.70	104.4	129.6
100	17.3~154.8(200)	9.00	181.8	226.8
150	39.6~349.2(450)	20.40	408.0	511.2
200	64.8~590.4(771)	34.08	703.8	885.6
250	93.6~853.2(1250)	56.76	1,113.0	1,396.8
300	1,940	79.50	1,590.0	1,976.4
350	2,151	96.60	1,918.8	2,386.8
400	2,850	124.80	2,497.8	

$$C_v = Q \left( \frac{G}{\Delta p} \right)^{1/2}$$

$$\text{최소유량계수 } C_{v_{min}} = Q_{min} \sqrt{\frac{S}{P_1 - P_2}}$$

$$\text{평균유량계수 } C_{v_{ave}} = Q_{ave} \sqrt{\frac{S}{P_1 - P_2}}$$

$$\text{최대유량계수 } C_{v_{max}} = Q_{max} \sqrt{\frac{S}{P_1 - P_2}}$$

$Q_{min}$  : 시간최소유량,  $Q_{ave}$  : 시간평균유량

$Q_{max}$  : 시간최대유량,  $P_1$  : 1차측수압

$P_2$  : 2차측수압,  $S$  : 비중(1)

### 3) 프로그램법

감압밸브 제조회사에서 개발한 프로그램으로 상하류 수압값과 유량입력시 구경과 캐비테이션, 유속 및 여유율 등을 자동계산한다.

### 4) 유속 및 캐비테이션 검토

선정된 구경에 대해서는 유속과 캐비테이션 검토가 필요하다.

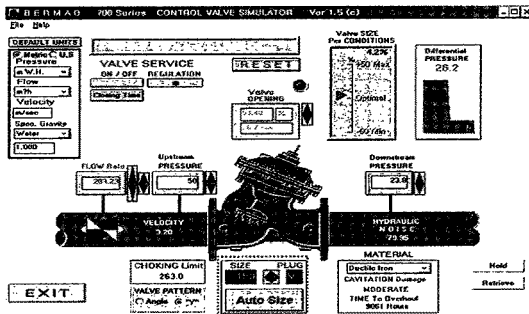


그림 7. 감압밸브 구경선정 프로그램

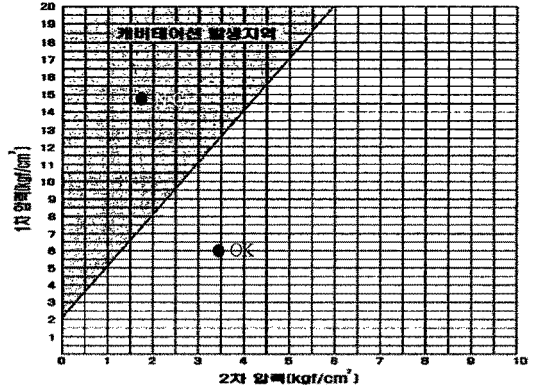


그림 8. 캐비테이션 검토

- 1) 관내 유속이 7.0m/s 이상일 경우 대상구경은 제외되며
- 2) 캐비테이션검토는 1차측 수압(상류)와 2차측 수압이 아래 표의 캐비테이션 발생지역내 위치하면 대상구경은 제외된다.

### 4. 최적 감압밸브의 선정

최종 감압밸브의 선정은 앞서 결정한 구경과 종류 그리고 재질에 따른 편익검토를 통해 이루어지며, 편익검토시 K-Pressure가 활용된다. 구경이 선정되었다면 세가지 PRV와 다시 각 PRV별 재질에 따른 누수저감량과 설치비용을 고려한 편익산정이 필요하다. PRV의 재질은 주철과 강철로 두 종류이므로 한개의 감압밸브 구경이 선정되었다면 세가지 방법의 PRV와 두가지 종류의 재질을 검토해야 하므로 총 6회의 편익검토가 필요하다. 급배수시스템의 수리학적 조건에 따라 다르겠지만 보통 PRV 선정시 다수 구경이 선정되며, 만약 두 종류 구경이 선정되었다면 총 12회의 편익검토가 필요하다.

가장 중요한 검토사항은 감압밸브의 수명 즉, 내구년한에 따라 달라진다. 감압밸브의 수명은 재질과 구경에 따라 달라지는 데, 통상 주철재 밸브는 강철재 밸브에 비해 가격과 내구년한이 1/3 수준이며, 같은 재질의 밸브이지만 구경이 작을수록 내구년한도 짧다. 다시말해, 감압밸브는 감압시 물리학적 특성상



구경선정	PRV 종류	재질	편익검토
150mm	고정식	주철	1
		강철	2
	시간제어	주철	3
		강철	4
	유량제어	주철	5
		강철	6
200mm	고정식	주철	7
		강철	8
	시간제어	주철	9
		강철	10
	유량제어	주철	11
		강철	12

그림 9. 구경선정에 따른 편익검토 회수

많은 와류를 발생시킨다. 구경이 작은 PRV에서는 일정 유량을 공급하기 위해 보다 빠른 유속이 발생할 것이고, 재질이 약한 밸브는 와류로 인해 밸브마모가 재질이 강한 밸브보다 클 것이다.

하지만, 최적 감압밸브의 선정에 있어 또하나 검토해야할 부분이 있다면 감압밸브의 계획 사용년수이다. 영구적으로 사용할 수 있는 감압밸브는 없으므로 사용년수에 따라 재투자가 발생할 것이고 재투자가 발생한다면 당초 고려되었던 편익은 재산정 되어야 한다. 예를들어 어떤 용수공급 시스템내에서 두종류의 PRV가 선택되었다. 하나는 250mm, 시간제어방식, 강철재질 PRV의 경우 내구년한은 11년이고 초기 투자비는 33백만원이며 재투자비 역시 33백만원이다. 다른 하나는 재질만 다른 주철재질 PRV인 경우 내구년한은 8년이고 초기 투자비는 22백만원이며 재투자비는 22백만원이다. 누수저감으로 인한 비용절감은 연간 26백만원으로 동일하다. 이런 경우 수도시설 관리자가 사용년한을 11년으로 계획하였다면, 당연히 재투자가 없는 강철재 PRV가 선택되지만 8년으로 계획하였다면 초기 투자비용이 적은 주철재가 선택되어야 한다. 다시말해 감압밸브 선정에 있어 가장 중요한 것은 수도관리자가 향후 시설계획과 용수 수급전망을 통해 감압밸브를 몇 년간 사용할 것인가에 따라 최적 PRV의 선정은 달라진다.

감압밸브 선정시 편익계산은 다음식과 같다.

$$\text{년간 누수비용절감} \times \text{감압밸브 사용기간} - (\text{초기투자비} + \text{재투자비} \times \text{재투자횟수}) = \text{편익}$$

여기서, 재투자횟수는

$$\text{감압밸브사용기간} \div \text{밸브내구년한} = \text{재투자횟수}$$

## VI. 결론

본문에서 경제적 PRV를 선정에 있어 지배적 요소는 PRV의 계획 사용기간임을 알 수 있다. 즉, 수도관리자가 수요에 따라 변하는 급배수시스템 상황을 적절히 예측하여 PRV의 종류 및 재질 등 각각의 내구년한과 투자비용, 재투자비용을 산정하여 선정되어야 할 것이다.

## VII. 향후과제

### 1. PRV 내용년수의 객관적 분석

앞서 기술한바와 같이 경제적 PRV 선정은 PRV의 내용년수에 의해 많이 좌우되며 만약 내용년수에 대한 DATA가 잘 못 적용되면, 수도시설 관리자는 효과가 낮은 감압밸브를 선정할 수 있다. 본고에서 적용한 산정방법은 일부 제품에 국한된 것으로 내용연수에 대해 모든 PRV에 적용될 수 있는 객관적인 조사와 보편적 방법에 대한 연구가 필요하다.

### 2. 다지점 PRV 설치시 최적 PRV의 선정

본고에서는 제시한 최적 PRV의 선정에 대한 방법은 한 개의 고립된 용수공급 구역내로 한정하였다. 하지만, 대부분의 수도시설은 다수의 PRV 설치가 필요하며 이런경우 PRV의 선정은 보다 어려워 진다. 우선 각 지점별 감압정도를 분석하여 시스템내에 전반적인 수리학적 거동을 분석하여야 할 것이다. 또한, 최적 PRV 선정시 유량제어방식은 최초 비용에

포함된 프로그램 구축비용 등을 포함하고 있으므로 한 대만을 설치할 경우 초기투자 비용은 과대하나 다수를 선정할 경우에는 누수감소량 대비 편익의 효과가 큼으로 전체적인 경제성 평가에서 우선순위가 될

수 있다. 따라서, 다수의 PRV의 선정을 위해서는 결정해야 할 경우의 수가 매우 많으므로 경제성 평가시 기존 K-Pressure와 GA 등 최적화 기법을 도입한다면 매우 유용할 것으로 판단된다. ☞

### 참고문헌

1. PRESMAC(Pressure Management Program)developed through SOUTH AFRICAN WATER RESEARCH COMMISSION By Ronnie McKenzie : WRP Pty Ltd. (Coding by Stephen Langenhoven)WRC Report No TT 152/01 March 2001
2. Managing and Reducing Losses from Water Distribution Systems Manual (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (QUEENSLAND) and WIDE BAY WATER
3. K-Pressure 사용자 설명서(한국수자원공사 2007. 4)
4. 감압밸브 선정 및 설치 검토 업무매뉴얼(한국수자원공사, 2007.11)