◎ 논 문

관로계통 및 가압펌프장 수격에 따른 최적 안정성 확보방안

라병필*†· 박종호**

Application & Examination of the Plan for Optimum Stability through Water-hammer in Pipe Line and Booster Pump Station

Beyong-pil Ra*†, Jong-ho Park**

Key Words : Water-hammer(수격작용), Column separation(수주분리), Surge suppression device(수격완화 설비), Pressure wave(압력파), Emergency stop(비상정지), Vacuum breaker valve(진공파쇄밸브)

ABSTRACT

This paper is performed to find out the stability of water-hammer in pipe line and pump station that is happened when additional water needs demanded. At first, the water supply construction project is planned to supply 6,000 m^3/day through 17.9 km pipe line. But additional demand (1,200 m^3/day) happened from Cheong-ra water reservoir. In this situation, air-chamber(4 m^3) and vacuum breaker valve(φ100 mm) are needed to prevent water-hammer. When the additional water is supplied, the existing facilities (air-chamber, vacuum breaker valve) are sufficient to alleviate shock not changing capacity alteration, judging from the airspace change and rise. Therefore, there is no problem for water-hammer by installing air-chamber(4 m^3) and vacuum breaker valve(φ100 mm) at the top of Yeo-ju hill.

1. 서 론

상수도에서 용수를 공급해야 하는 시설로는 취수 또는 가압펌프장, 관로 등이 있으며, 상수도시설의 펌프 관로 계통에서 관로누수, 펌프장 침수 등 여러 여건에서 안정성이 확보되어야 한다.

상수도 시설 중 펌프는 설치장소, 용도, 비속도 등에 따라 선정되고 양정은 주로 유출 측의 최고수위와 펌프장 흡수정의 최저 수위 차, 즉 위치수두와 관로, 곡관류, 밸브 등 여러 손실을 종합하여 결정[1]하는데 유량조절 따른 밸브개도 등이 변화함에 따라 토출관로에 유속변화가 발생되어 과도현상이 발생하고, 특히 펌프장에서 수격작용(water-hammer)은 펌프를 기동시키거나 정지시킬 때, 정상운전 중 정전 등으로 비상정지(emergency stop)시 그 순간 관로 내 유속이 급격히 변하면 관내 압력도 크게 상승하거나 강하하게 되어 심한 수격작용을 일으킨다.[2)3)]

관로 내의 갑작스런 유속변화로 압력파(pressure wave)가 펌프장과 배수지 사이를 왕복할 때, 관로 내의 압력은 관로 형상에 따라 물의 포화증기압 이하로 떨어져 증기공동(vapor cavity)이 형성되며, 결국 수주분리(column separation) 현상이 발생한다. 관로 내의 압력이 대기압보다 낮아지면 관로에 좌굴(collapse)이 일어날 수 있으며, 증기공동으로 분리되었던 수주가 재결합 할때 높은 압력이 유발되어 관로가 파손될 염려가 있다.

물이 역류하는 동안에는 펌프장 구내 배관의 압력이 비정상적으로 상승하여 펌프나 밸브류, 배관 및 부대시설 등이 파열되어 펌프장 침수 사고가 발생[4)]하기도 한다. 이러한 시설물이나 설비류의 피해를 경감시키기 위한 적절한 방법을 취하는 것은 펌프설비 계획상 중요한 일이다.[5)]

* 한국수자원공사
** 충남대학교 기계공학과
† 교신저자, E-mail : rbp@kwater.or.kr

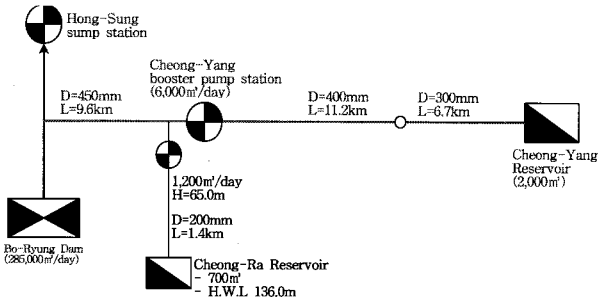

Fig. 1 Water supply distribution diagram in Cheong-Yang for Construction project

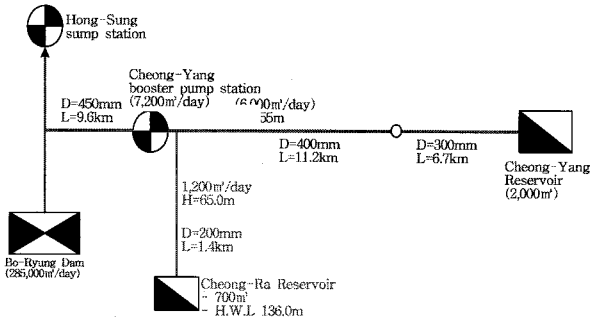

Fig. 2 Changed Water supply distribution diagram for Construction project

본 연구는 청양군에 생활용수를 공급하고자 상수도 시설을 건설중인 펌프장과 관로계통을 모델로 하였다. 펌프장의 시설용량은 6,000 ㎥/day를 가압하여 φ400~φ300 mm 주철관, 17.9 km를 통하여 청양배수지로 용수를 공급하는 것으로 계획되었으나 당초 공급량보다 1,200 ㎥/day를 추가하여 기존 가압펌프장을 이용하고 가압펌프장 유출측 관로에서 분기하여 공급하는 것으로 변경됨에 따라 관로시설 및 펌프계통의 전반적인 안정성을 검토하여 수격작용에 의한 안정성 확보여부와 기존 수격완화 설비의 용량의 적정성, 그리고 경제적인 수격완화 설비로 대체가 가능한지를 고찰코자 하였다.

연구모델은 기존에 계획되었던 펌프장과 청양군의 관로 말단에 설치되어 있는 청양배수지까지 청양계통 수격작용과 추가로 신설되는 청라계통, 즉 청라계통으로 1,200 ㎥/day를 공급코자 동일펌프장 유출측의 φ400 mm 관로에서 φ200 mm로 분기하여 1.4 km에 위치한 청라배수지까지 포함하였다. 기존 청양배수지로 6,000 ㎥/day을, 그리고 추가증설로 인해 또 다른 청양배수지에 1,200 ㎥/day의 용수를 공급해야 함에 따른 수격작용에 의한 전 관로의 최적의 안정성을 확보하는 데 있다.

2. 연구대상 시설현황

연구대상 시설은 Fig. 1과 같이 보령권계통 광역상수도 시설용량 285,000 ㎥/day의 생활용수를 보령시, 홍성군, 서산시 등의 각 지자체로 공급하는 시설중에서 기존의 보령-홍성계통 관로 φ1,500 mm에서 φ450 mm로 분기하여 성주계통에 900 ㎥/day를 공급, 청라계통으로 1,200 ㎥/day를 공급토록 계획되었으며, 청양계통은 가압펌프장에서 펌핑하여 6,000 ㎥/day를 관말단인 청양배수지로 용수를 공급토록 구성되었다.

Fig. 2는 계획변경으로 인해 청양가압장의 위치가 바뀌게 되었고, 이에 따라 청라계통 관로 분기점이 당초 청양가압장의 유입측에서 유출측으로 변경됨에 따라 청라배수지에 추가로 공급해야하는 물량 1,200 ㎥/day를 포함하여 청양가압장의 펌

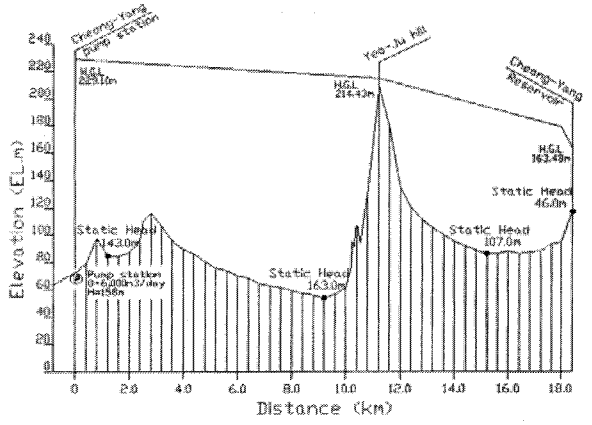

Fig. 3 Hydraulic gradient line Cheong-Yang line

Table 1 Specification of pump-motor

item		unit	specification	remark
Pump	Type	-	single suction vertical type multi-stage Volute pump	4-stage
	Unit	set	2 (1)	( ) is spare
	Quantity	㎥/min	2.5	
	Head	m	155	
	Speed	rpm	1,800	
	Efficiency	%	70	
	GD^2	kg-㎡	0.086	
Motor	Pole	P	4	
	Volt	V	380	
	Frequency	Hz	60	
	Power	kW	110	
	GD^2	kg-㎡	1.16	

프용량이 6,000 ㎥/day에서 7,200 ㎥/day로 증량, 공급하는 것으로 변경하였다.

청양계통의 관로 동수두는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 보령댐 광역상수도 관로에서 분기되어 청양 가압장까지 자연유하로 유입된 후 청양 가압장에서 청양 배수지까지 주철관로 17.9 km로 φ400~φ300 mm를 통해 펌프양정 155 m로 양수하게 된다. 관로 최정점인 여주재를 지나기 위해 위치수두차가 약 137 m 정도이며 기타 나머지는 관로 손실수두다.

청양가압장에 설치되는 펌프모터의 규격은 Table 1과 같으며, 청라계통에 추가용수 공급으로 펌프 댓수는 계획대로 2 대로 하고 유량은 대당 2.1 ㎥/min에서 2.5 ㎥/min로 증가하였고 펌프 총양정은 검토결과 당초 155 m로 변경없이 송수가 가능한 것으로 판단되었다. 통상적으로 펌프에서 유량과 양정이 정해지면 펌프효율을 고려한 축동력과 전동기 동력을 결정하며, 기타 펌프에서 발생될 수 있는 공동현상(cavitation)등을 종합적으로 고려하여 모터극수도 선정하게 된다. 수격작용 해석에 필요한 관성모멘트(GD^2)는 펌프모터 제작사에 의뢰하여 참고한 값이다.

3. 수격해석

청양 가압장 펌프용량이 당초 6,000 ㎥/day에서 7,200 ㎥/day로 증량되어 전관로 및 펌프장 안정성에 대한 수격작용의 재검토가 필요하게 되었으며 또한 경제성을 감안하여 다른 대안이 없는 지도 살펴보았다. 수치해석은 수격완화 설비가 없을 때, 그리고 수격완화 설비를 설치할 경우별로 해석을 하였으며 전산 수치해석은 미국 KY Pipe사의 Pipe 2000인 Surge 전용 프로그램을 사용하였다.

3.1 일일 6,000㎥을 공급할 경우

3.1.1 수격완화 설비가 없는 경우

Fig. 4~5는 양정 155 m에 6000 ㎥/day를 공급하는 관로계통에서 수격완화 설비가 설치되어 있지 않는 경우로써 청양가압장에서 청양배수지로 최대 용량인 6,000 ㎥/day가 공급되고 있는 중에 가동중인 2대의 펌프가 정전이나 기타의 원인에 의해 갑작스런 중단으로 수격작용에 따라 관로거리에 따른 최고 상승압력 및 최저압력의 변화선도이다.

Fig. 4에서 나타난 바와 같이 펌프 2대가 정상가동 상태에서 약 10초 후 트립되었을 경우 최고 상승압력은 펌프장에서 약 11.2 km지점인 관로 최정점의 여주재에서 약 1.79 MPa, 펌프장에서는 1.67 MPa, 관말단인 청양배수지 입구에서 0.78 MPa가 발생한다. 이는 각 지점에서의 정상상태 압력 1.53 MPa, 1.46 MPa, 0.77 MPa와 비교할 때 0.2~0.3 MPa 차이를 보이기는 하나 관로의 허용압력인 1.98 MPa 이내의 값이다.

그러나 최저 하강압력은 관로 최정점 300 m 전방에서부터 관로 정상부근의 500 m 구간에 부압(-)값을 나타내어 최대값인 (-)10 m까지 하강한다. 부압으로 인하여 수주분리가 발생될 우려가 있으며 이를 해소하기 위한 대책이 필요한 것으로 나타났다.

3.1.2 관로 최정점에 진공파쇄밸브(Vacuum breaker valve)를 설치 할 경우

부압발생 방지를 위한 진공파쇄밸브(vacuum breaker valve) φ100 mm를 포함하여 공급량 6,000 ㎥/day와 양정 155 m의 조건에서 수치해석 결과 관로상 및 펌프장에서의 최고, 최저압력은 Fig. 6~7과 같다. 관로 최정점인 여주재 정상 부근에서 최대(-)10 m까지 발생하던 부압이 거의 정상상태로 환원되며 수주분리 현상은 해소되었다.

그러나 최고 상승압력은 여주재 입구 관로부근에서 약 1.94 MPa, 펌프장에서 1.81 MPa, 관말단인 청양배수지 입구에서

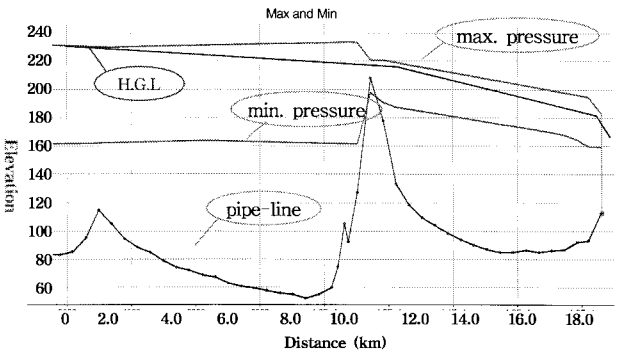

Fig. 4 Maximum & minimum pressure variation diagram in pipeline

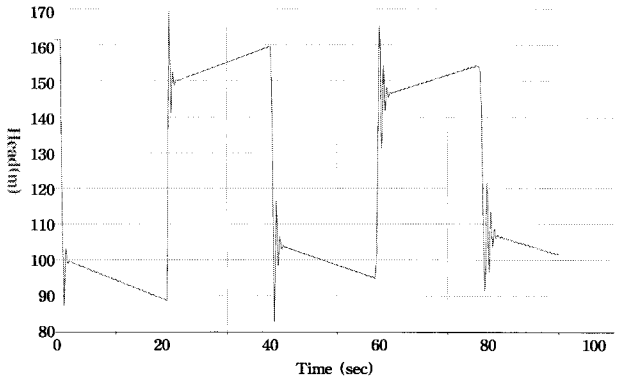

Fig. 5 Head in pump station

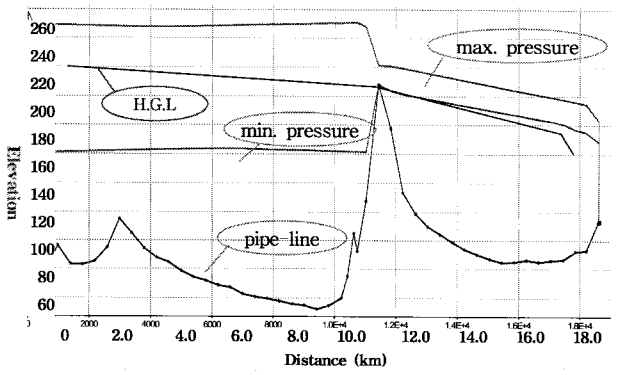

Fig. 6 Maximum & minimum pressure variation diagram in pipeline

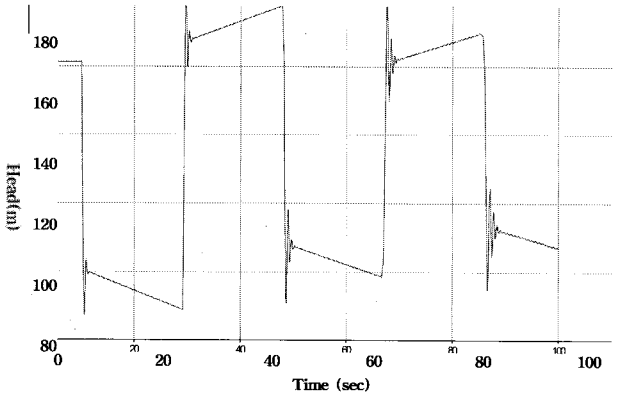

Fig. 7 Head in pump station

0.78 MPa 정도 발생되었으며, 진공파쇄밸브로 유입된 공기의 영향으로 인해 약 0.1~0.2 MPa 상승하고 있음을 알 수 있다. 이는 관로 허용압력 1.96 MPa 이내이기는 하나 여전히 높은 값을 나타낸다. 진공파쇄밸브의 형식은 완폐식(slow closing type)이며, 차압(-) 1.0 m에서 공기량이 0.2 ㎥/sec 이상 유출입이 될 수 있어야 한다.

수격완화 설비가 없을 때와 비교할 때 어느 정도 개선되었음을 볼 수 있으나 상승압력도 동시에 해소하기 위한 방안이 바람직할 것이다. 이를 위해 부압과 상습압력에 효과적인 에어챔버를 설치하는 방안을 검토하였다.

3.1.3 에어챔버 및 진공파쇄밸브를 병행 설치시

에어챔버 4 ㎥을 포함한 진공파쇄밸브 φ100 mm 1기, 공급량 6,000 ㎥/day, 그리고 양정 155 m의 조건에서 수치해석 결과 최고 및 최저압력은 Fig. 8~9와 같다. Fig. 8은 최고 상승압력이 1.65 MPa정도 이며 관로 최정점인 여주재에서도 부압발생이 나타나지 않았다.

Fig. 9는 펌프장에서 최대상승압력도 1.70 MPa으로 관로 허용압력인 1.96 MPa의 범위내이다.

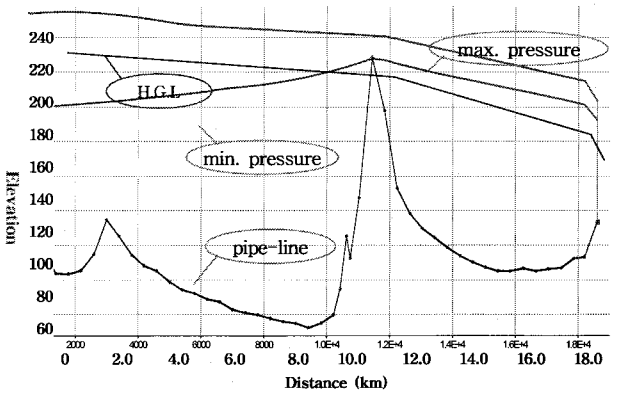

Fig. 8 Maximum & minimum pressure variation diagram in pipeline

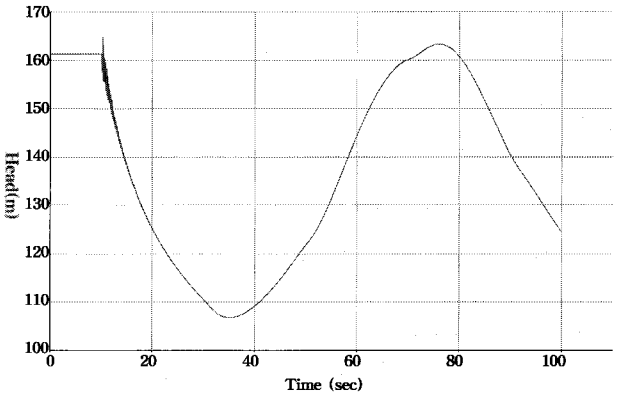

Fig. 9 Head in pump station

따라서 수격으로 인한 최대 상승압력과 과로 최정점에서의 부압이 발생하지 않는 것으로 판단되어 수격작용에 의한 안정성이 확보되었다고 할 수 있다.

그러나 가압펌프장 위치변경으로 청라배수지에 추가로 용수공급을 해줘야 하므로 이에 대한 수격작용의 재검토가 필요하게 되어 가압펌프장의 총 공급량인 7,200 ㎥/day를 기준으로 에어챔버(4 ㎥) 1기, 진공파쇄밸브(φ100 mm) 1기, 그리고 양정 155 m의 조건으로 수치해석을 수행해 보았다.

3.2 일일 7,200㎥을 공급할 경우

3.2.1 에어챔버 및 진공파쇄밸브를 병행 설치시

추가 공급량 1,200 ㎥/day를 포함한 가압펌프장의 총 공급량인 7,200 ㎥/day를 기준으로 에어챔버(4 ㎥) 1기, 진공파쇄밸브(φ100 mm) 1기, 그리고 양정 155 m의 조건에서 수치해석 결과 관로상에서 최고 및 최저압력과 펌프장에서의 압력변화선도, 그리고 에어챔버 내에서의 공기량 변화선도는 Fig. 10~12와 같다.

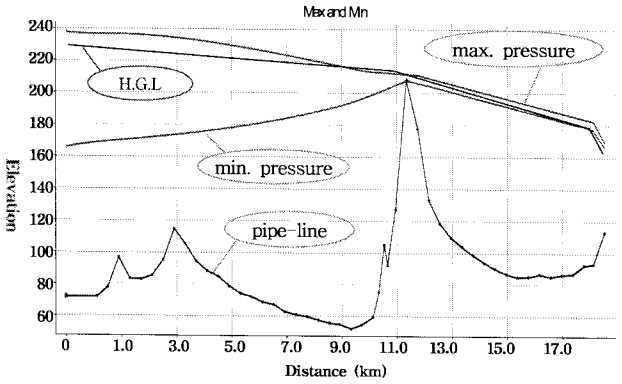

Fig. 10 Maximum & minimum pressure variation diagram in pipeline

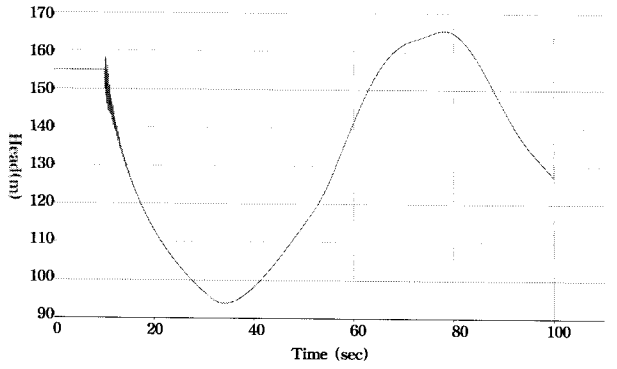

Fig. 11 Head in pump station

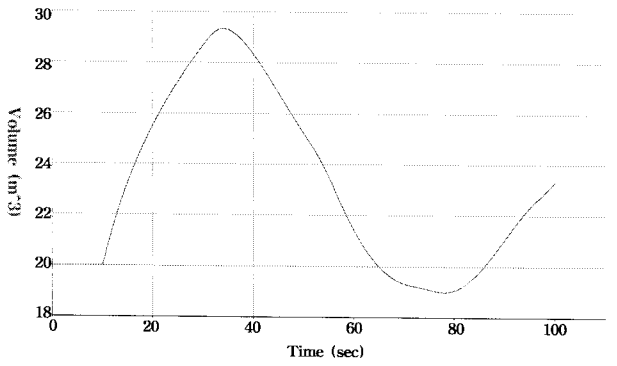

Fig. 12 Air volume variation in Air-chamber

추가공급량을 포함한 해석결과는 Fig. 8~9와 비교해 보면 유량증가에도 불구하고 압력변화 선도가 거의 비슷함을 알 수 있었는데 이는 청라 배수지가 청양계통 보다 양정이 매우 낮아 청라배수지가 오히려 surge tank 역할을 한 것으로 보이며, 수격작용의 검토는 청양계통으로 용수공급시 수격위험이 가장 큼을 알 수 있다. 다만 청라배수지 관로에는 청라분기점에 고압을 고려한 감압밸브 설치 여부를 검토해야 할 것이다.

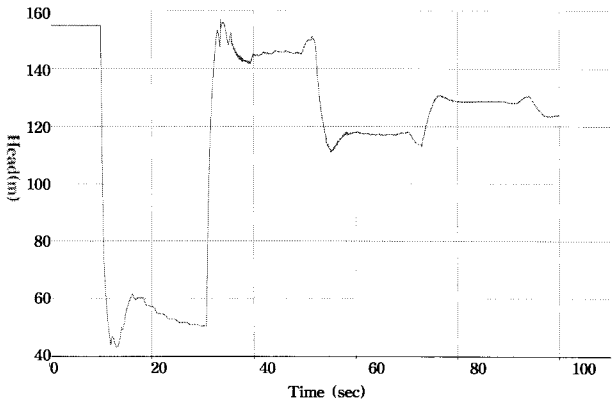

Fig. 13 Head in pump station

펌프장에서의 압력변화는 최대 공기량이 2.95 ㎥일 때 압력은 0.92 MPa이며 최소공기량 1.90 ㎥일 때 1.63 MPa이다. 해석결과에 따라 초기 에어챔버 4 ㎥ 1기와 진공파쇄밸브 φ100 mm 1기를 설치해도 상승압력과 부압발생을 충분히 방지한다.

3.2.2 역지변과 진공파쇄밸브 설치시

에어챔버는 고가이므로 에어챔버대신 펌프 토출측의 역지변으로 수격작용을 완화시키고자 Fig. 13은 역지변을 5초이내로 급폐쇄 시키고 유량 7,000 ㎥/day, 양정 155m로 관로 최정점인 여주재에 진공파쇄밸브(φ100 mm) 1기를 설치하는 조건으로 수치해석 결과 펌프장에서의 압력변화 선도이다.

펌프토출측 압력수두는 관로상 최상단과 비교할 때 137 m의 수두차이가 있으므로 수두도 137 m 정도에서 안정화 되어야 하지만 가압펌프장의 경우는 수두에 비해 관경이 φ400 mm로 작은 편이다. 즉 Fig. 13에서와 같이 펌프가 트립되면, 약 0.5 초만에 유로의 진행방향이 바뀌고 수두는 급격히 감소한다. 그 후 관의 탄성복원력에 의하여 안정점인 137 m 점을 향하여 복귀되는데 이러한 하강압력에 의한 수격작용은 밸브가 역류되는 시점에 폐쇄된다 하더라도 관성력을 방지할 수 없어 이때는 수격방지설비의 하나인 에어챔버를 이용하여 하강압력을 완화시켜야 상대적으로 작용하는 상승압력을 최소화 할 수 있다.

3.2.3 에어챔버, 진공파쇄밸브, 역지변을 모두 설치시

에어챔버, 진공파쇄밸브 등 수격완화 설비를 모두 포함하여 해석한 결과는 Fig. 14~15와 같다. 즉, 역지변을 급폐쇄하고 에어챔버, 진공파쇄밸브 등을 그대로 설치하는 조건으로 수격작용을 해석한 결과다. 급폐식 역지변을 추가 적용하였을 경우

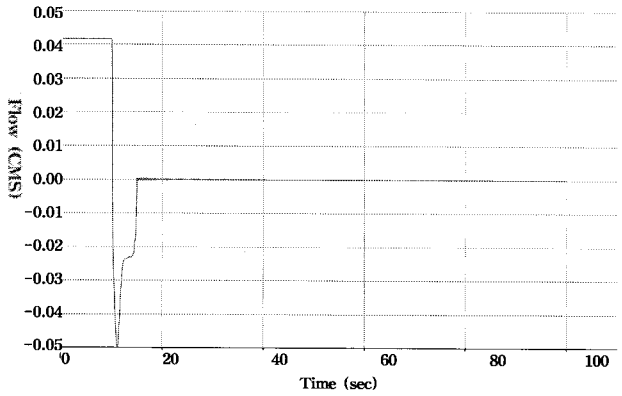

Fig. 14 Flux change in pump station

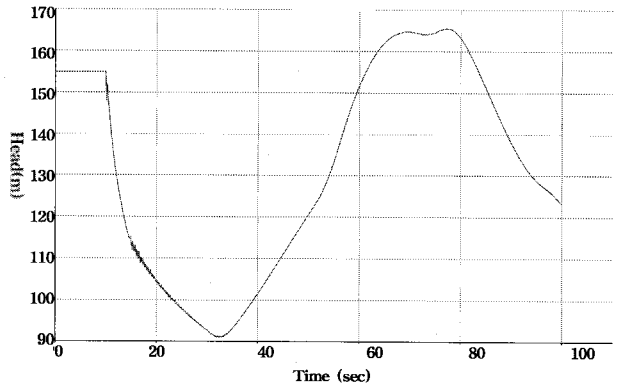

Fig. 15 Head variation

이며, 일시적인 역류현상은 역지변이 5초정도에 작동함에 따라 약간의 역류가 발생하는 것으로 나타났으나 이는 스윙식 역지변으로 설치시 역류를 허용치 않을 것으로 보인다.

펌프 트립 시 펌프 토출측 유량변화 및 수두변화로 분석 결과 펌프트립 시 하강써지압력이 약 10초간 진행되고, 에어챔버로 인하여 밸브의 급격한 폐쇄에 의한 수압상승은 나타나지 않았다.

Fig. 14~15의 결과로 펌프토출측 유량제어 및 역류시 차수를 위한 급폐식 역지변을 추가 적용하여도 위에서 검토한 에어챔버와 진공파쇄밸브 설치 시와 비교했을 때 수격작용 해소에 그다지 큰 효과가 없음을 알 수 있다.

4. 결 론

관로계통 및 가압펌프장 수격작용 검토에 대한 수치해석 결과는 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 당초 계획한 용량(Q=6,000 ㎥/day, H=155 m)에서 수격완화 설비가 없을 경우 안정성에 문제가 발생되는 것으로 판단되었다. 이에 대한 대책으로 수격작용에 따른 수격완화 설비는 에어챔버(4 ㎥)와 관로상 최정점인 곳에 진공파쇄밸브(Φ100 mm) 1기를 설치해야 수주분리나 상승압력과 하강써지압력에 대한 압력을 최소화 할 수 있었다.

동일한 가압펌프장 유출측에서 분기하여 추가로 용수를 공급코자 1,200 ㎥/day를 증량하여 공급량이 당초 6,000 ㎥/day에서 7,200 ㎥/day로 증가되었을 경우에도 에어챔버의 공기량 변화와 수격으로 인한 상승압력 및 부압발생 여부 등을 판단해 볼 때 수격완화 설비의 용량 변경없이 기존에 설치하고자 했던 에어챔버(4 ㎥)와 진공파쇄밸브(Φ100 mm) 1기로 충분히 완화할 수 있다는 결론을 얻을 수 있었다.

2) 다른 수격완화 설비 없이 펌프 토출측에 설치되는 역지변 만으로 폐쇄시간을 급폐쇄하여 운용할 때 수격작용에 대한 안정성 해석 결과 최고압력과 최소압력 변화가 1.03 MPa 정도 발생하게 되어 수격작용에 대비가 불가능한 것으로 판단되었으며, 에어챔버, 진공파쇄밸브에 추가로 급폐식 역지변 등을 설치했을 경우에도 별다른 효과를 기대할 수 없었다.

따라서 이 연구에서의 수격완화설비로는 에어챔버(4 ㎥) 1기와 송수관로상 최정점 상단에 진공파쇄밸브(Φ100 mm) 1기를 설치하여 운용한다면 수격작용 시 문제가 없을 것으로 판단된다.

참고문헌

(1) I.J.Karassik, 1976, "Pump Handbook," McGraw Hill Book Co., pp. 9-26~9-50.
(2) E. Benjamin Whlie/Victor L. Streeter/Lisheng Suo, 1993, "Fluid Transients in System," Englewood Cliffs(USA), pp. 143~144.
(3) 김경엽, 김점배, 2004. "원심펌프의 시동 및 정지에 따른 수격현상," (사) 유체기계공업학회, pp. 51~52.
(4) M.Hanif.Chaudhry, 1979, "Applied Hydraulic Transients," Van Nostrand Reinhold Co, pp. 16~22.
(5) 한국수자원공사, 1994. 12 "펌프장 신뢰성 향상방안 연구," pp. 20~24.
(6) 한국수자원공사. 2007. 5. "금강북부권 급수체계구축(1차)사업 실시설계보고서," pp. 9-393~9-403.