

빗물펌프장의 수력학적 과도현상에 관한 연구

이영범* · 김경엽**†

A Study on Hydraulic Transient Phenomenon in a Rainwater Pumping Station

Youngbum Lee*, Kyung-Yup Kim**†

Key Words : Drainage pump(배수펌프), Hydraulic transient(수력학적 과도현상), Water hammer(수격현상), Negative pressure(부압), Slamming(슬래밍), Rainwater pumping station(빗물펌프장)

ABSTRACT

In this study, a field test was conducted to study the water hammer, which is a hydraulic transient phenomenon occurring at a rainwater pumping station. The drainage pump subject to the field test was a vertical shaft two floor mixed flow pump with a pump bore of 2,000 mm and a motor power of 1,320 kW. To test the hydraulic transients phenomenon of the drainage pump, the pressure sensors were installed on the pump discharge side and the outlet of the check valve. In the electrical transient test, the voltage, current, and the power factor of the motor were measured using a power meter. The measured pressure and electrical values were stored in a data acquisition system. A field test for water hammer phenomenon that occur when starting and stopping the drainage pump were conducted in cases where the electric butterfly valve was throttled and when it was full open. As a result of the field test, it was analyzed that the method of cutting off the power of the drainage pump after significantly throttling the electric butterfly valve can reduce the flow velocity in the discharge pipe, but the effect of increasing the pressure of the drainage pump appeared greater. It was observed that the flap valve closed before the check valve when the power to the drainage pump was shut off, and when the flap valve closed abruptly 1 second before and after, slamming occurred. This may cause the valve disk and the valve seat to be damaged by the impact, therefore, caution is required.

1. 서 론

최근 기후변화와 기상이변으로 홍수 및 국지성 집중호우로 인하여 도시지역에서 재개발과 주변의 지역개발에 따라 불투수 면적이 증가하여 지표면에서 우수유출량이 증가하고, 홍수량이 일시에 저지대로 유입되어 빗물펌프장의 용량이 부족하거나 내수 배제능력 부족 등으로 침수 피해가 증가 추세에 있는 것으로 나타나고 있다. 특히, 도시개발사업으로 인한 배수 체계 변경 및 미개발 지역의 도시화 등 개발 후 영향을 고려하여 계획빈도의 호우발생 시 개발사업 부지와 주변 지역에 대한 침수 피해가 발생하지 않도록 빗물펌프장을

건설하고 있다.

빗물펌프장은 장마나 집중호우 시 하천으로 유입되는 빗물의 양이 많아 자연배수가 곤란할 경우 빗물을 우수지나 저류지에 모아 배수펌프를 가동하여 하천으로 강제배수하는 기능을 하는 만큼, 저지대 등 주택가 밀집지역의 침수 피해를 예방하는 데 효과적인 시설이다.

또한 기후변화로 인한 국지적인 호우, 기습강우, 상습침수 등으로 배수펌프장의 중요도는 커지고 배수펌프 운전은 점점 빈번해지고 있다. 일단 운전이 필요할 때 확실한 기동으로 배수 운전을 하도록 하는 것이 주목적이므로 특히 높은 신뢰성과 사용의 편리성이 요구된다.⁽¹⁾

* (주)수성엔지니어링 기술연구소 (Technical Research Center, Soosung Engineering Co., Ltd.)

** 한국산업기술대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Korea Polytechnic University)

† 교신저자, E-mail : kykim@kpu.ac.kr

따라서 본 연구는 빗물펌프장 시설물의 설계, 시공, 관리 전반의 결함을 발견하고 그에 대한 적절한 방안을 강구하고자, 배수펌프의 기동 및 정지 시에 발생하는 수격현상을 현장에서 시험하기 위하여 펌프 출구측과 체크밸브 출구측에 압력센서를 설치하고, 전기적 과도현상을 분석하기 위해서 전동기의 전압, 전류, 역률 등을 동력계를 사용하여 측정하여 빗물펌프장에서 발생하는 수력학적 과도현상을 연구하는데 그 목적이 있다.^(2,3)

2. 시스템 현황

2.1 시설물 개요

빗물펌프장은 침수지역인 내수위 상승 시 침수방지를 위해 어떠한 조건하에서도 배수펌프에 의한 강제배수가 가능하도록 설계되는데 계획 배수량과 계획 외수위, 흡수정의 고수위와 저수위를 Table 1에 나타내었다. 빗물펌프장은 펌프설비, 건축물, 토목구조물로 시설된 펌프장과 부속설비로 구성된다. 빗물펌프장 배치도를 Fig. 1에 나타내었으며, 펌프장 운영 및 효율적 관리가 가능토록 계획하고 주변여건들을 감안하여 최적 설비로 시설되었다.⁽⁴⁾

2.2 빗물펌프장 설비

빗물펌프장 설비는 설계 강우량을 30년 빈도로 적용하여 유량 변화에 따른 효율적이고 합리적 운전이 가능하도록 대용량 펌프 및 대수를 결정하여 효율화 설비로 설치되었으며,

Table 1 Design conditions of rainwater pumping station

| Description | Design condition |
|---|---|
| Planning capacity of drainage | 4,080 m ³ /min(68 m ³ /sec) |
| Planning downstream water surface (Discharge level) | (+) 12.65 m |
| Suction sump high water level (HWL) | (+) 4.0 m |
| Suction sump low water level (LWL) | (+) 0.0 m |

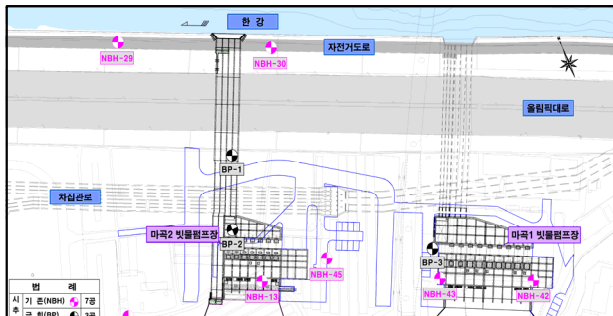


Fig. 1 Layout of rainwater pumping station

Fig. 2에 빗물펌프장의 계획평면도를 나타내었다.

빗물펌프장의 시설 능력은 유출량 변동에 대응하도록 계획배수량과 펌프 용량을 결정하고 운전 대수 및 운전시간 등을 통해 경제성과 최적의 합리적 운영을 고려하여 저용량 배수펌프와 주배수펌프를 함께 설치함으로써 강우 시 초기 대응을 신속히 하여 안전성이 확보되도록 하였다. 배수펌프의 형식은 수직축 사류펌프 2상식으로서 저용량 배수펌프 (Ø 1,350 mm × 255 m³/min × 690 kW) 2대와 주배수펌프 (Ø 2,000 mm × 510 m³/min × 1,320 kW) 7대가 설치되어 있다. 빗물펌프장의 구내 전경은 Fig. 3에 나타내었다.

배수펌프는 흡수정 내에 설치된 수위계와 제어기능을 연계시켜 자동운전이 가능토록 구성되었다. 타 설비인 전기설비 및 계장설비와의 효율적인 연계를 통해 운영의 효율성 확보 및 유지관리의 편의성이 최적화되어 있다.

밸브설비는 각각의 기능과 사용 목적에 부합되도록 유출 유량제어 및 차단이 가능하도록 계획되었고, 비상시 배수시설의 보호 및 안전성을 확보할 수 있게 되어 있다. 펌프 토출측에는 긴급 정전 및 펌프 긴급정지 시 역류방지 및 수격작용 완화를 위해 완폐식 체크밸브와 플랩밸브를 설치하여 펌프 및 부속 설비를 보호한다.⁽⁵⁾ 또한 펌프 토출배관에는 전동식

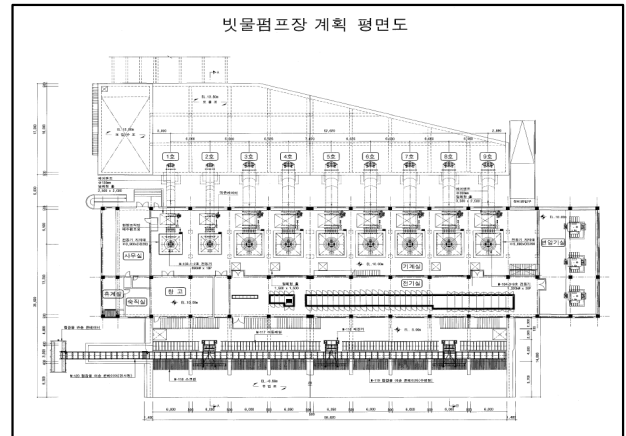


Fig. 2 Floor plan of rainwater pumping station



Fig. 3 View of rainwater pumping station

버터플라이밸브를 설치하여 펌프의 운전조건에 따라 연동 운전이 가능하고 펌프의 효율적 운영 및 제어가 가능하게 되었다. 밸브는 저용량 배수펌프는 Ø 1,350 mm, 2대와 주배수 펌프는 Ø 2,000 mm, 7대씩 각각 설치되어 있다.

3. 수격현상 현장시험

3.1 시험장치

현장시험을 위한 빗물펌프장은 주배수펌프 7대와 저용량 배수펌프 2대로 총 9대의 펌프로 구성되어 있으며, 수력학적 과도현상의 현장시험은 주배수펌프인 수직축 사류 펌프 2상식 형식의 Ø 2,000 mm × 510 m³/min × 1,320 kW를 대상으로 실시하였다.⁽⁶⁾ 주배수펌프의 시방은 Table 2와 같으며, 펌프 성능곡선도를 Fig. 4에 나타내었다.

펌프장에서 정지하고 있는 펌프를 기동 및 정지시키거나 정상 운전 중 정전으로 인하여 갑자기 동력을 잃게 될 때, 또는 밸브의 개도를 빠르게 변화시킬 때 그 순간 관로 내의 유속이 급격히 변화하면서 압력도 크게 상승하거나 변화하는 현상을 수력학적 과도현상이라 한다.^(7,8)

배수펌프의 정상적인 기동 및 정지 시 발생하는 수력학적 과도현상인 수격현상을 시험하기 위하여 펌프 출구측압력(PT1)과 체크밸브 출구측 압력(PT2)을 측정하고자 Table 3의 압력센서를 사용하여 0.02초 간격으로 측정하였다. 또한, 전기적 과도현상을 분석하기 위하여 전동기의 전압, 전류, 역률

Table 2 Specifications for main drainage pump

| Item | Data | Item | Data |
|---------------------|-------------------------|----------------------|----------|
| Pump bore | 2,000 mm | Motor power | 1,320 kW |
| Specified capacity | 510 m ³ /min | Motor current | 185 A |
| Total pump head | 11.7 m | Power supply voltage | 6,600 V |
| Speed of revolution | 267 rpm | Number of pole | 26 pole |

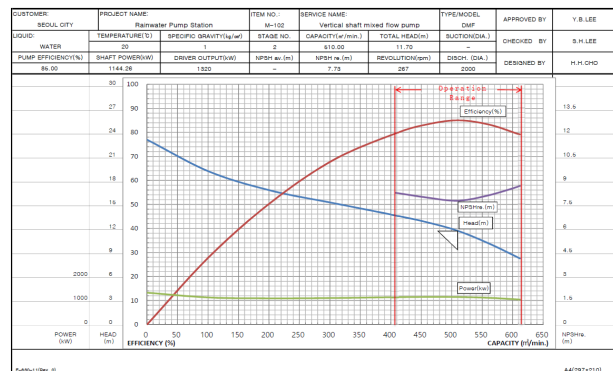


Fig. 4 Performance curve of main drainage pump

Table 3 Measuring equipment manufacturer and model

| Description | Measuring device | Model | Manufacturer |
|------------------------|---------------------|------------------|----------------------|
| Discharge pressure | Pressure transducer | PSHH#001K AIG-FC | Sensys |
| Discharge pressure | Pressure transducer | PSHH0005K AIG | Sensys |
| Electrical power input | Digital power meter | 3169-21 | Hioki |
| Data collection | Data acquisition | NI9208 | National Instruments |

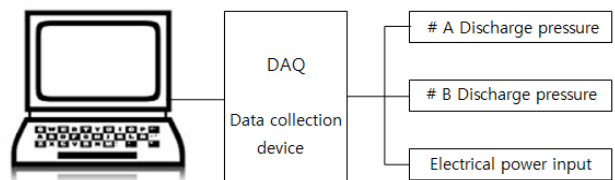


Fig. 5 Measuring equipment block diagram

등은 동력계를 사용하여 0.5초 간격으로 측정하였다.^(9,10) 이렇게 측정된 압력과 전기 값들은 데이터 수집장치(data acquisition system)를 통하여 저장되며, Fig. 5와 Fig. 6은 현장시험 시 사용된 계측장비 구성도와 주배수펌프 종단면도를 나타내었다.

한편, 배수펌프의 정상 정지 시 전동 버터플라이밸브는 완전히 개방된 상태에서 전동기의 전원을 차단하는 것이 일반적인 운영 방식이다. 그러나 현장에서는 수격작용을 완화시키기 위하여 전동 버터플라이밸브를 상당히 교축시킨 후 전동기의 전원을 차단하는 방식을 택하고 있었다. 이에 따라 본 실험에서는 전동 버터플라이밸브를 교축시킨 후 전동기의 전원을 차단하는 경우와 전동 버터플라이밸브가 완전히 개방된 상태에서 전동기의 전원을 차단하는 경우에 대하여 현장시험을 실시하였다. Fig. 7은 빗물펌프장의 배수펌프와 밸브 등이 설치된 구내 전경을 나타내었다.

3.2 밸브 교축 후 펌프 기동 및 정지에 따른 수격현상

본 시험은 배수펌프를 정상적으로 기동시킨 다음 유동이 안정된 후 배수펌프를 정지시키기 위해 전동 버터플라이밸브를 완전히 개방(밸브개도 100%) 상태에서 밸브개도 25%까지 교축시킨 후 전동기의 전원을 차단하는 경우이다. 이러한 과정에서 측정된 수력학적 과도현상과 전기적 과도현상을 Fig. 8에 각각 나타내었다. 주배수펌프의 가동시간 동안 내수위와 외수위의 변화는 Table 4와 같으며,⁽¹¹⁾ 빗물펌프장의 주배수 펌프 기동 시 측정된 수력학적 과도현상은 Table 5에 요약하여 나타내었다.

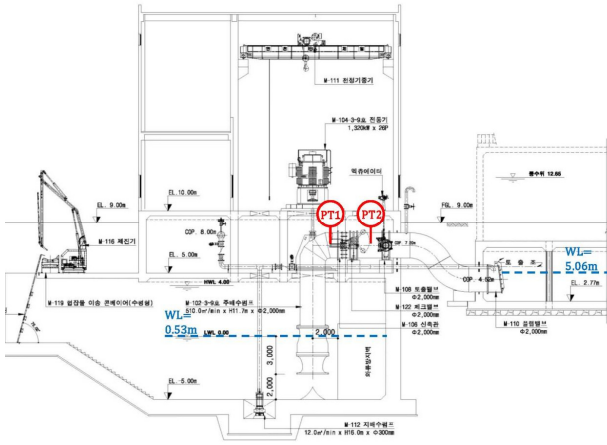


Fig. 6 Main drainage pump longitudinal drawing

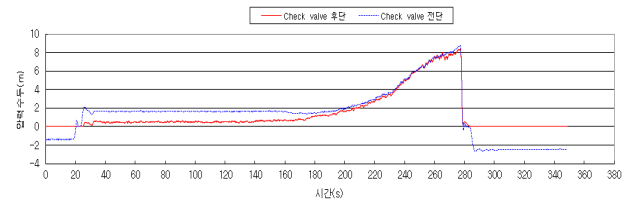


Fig. 7 View of rainwater pumping station

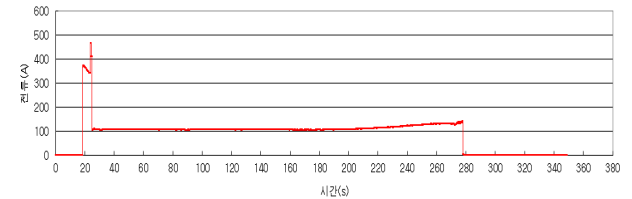
배수펌프 기동 전 체크밸브 전단에서 압력(PT1)은 -1.39 m로 부압이, 체크밸브 후단에서 압력(PT2)은 0.02 m로 대기압 가까이 작용하였고, 전원 전압은 6,588 V로 측정되었다. 시간 18.54초에 전동기로 전원이 공급되면서 기동 전류는 366 A까지 상승하였고, 전압은 6,262 V까지 최저로 떨어졌다. 주배수펌프가 가동됨에 따라 토출배관으로 물이 양수되면서 체크밸브 전후단에서 정방향 압력구배가 20.42초에 형성되고, 이때부터 체크밸브가 열린다. 주배수펌프의 관성 모멘트가 크기 때문에 전동기의 기동 전류와 동력은 24.42초에 각각 411 A와 1,923 kW인 최대값으로 측정되었다. 토출배관에서 유동이 형성됨에 따라 펌프 출구측 압력(PT1)은 26.22초에 2.14 m까지 상승하나, 수격현상은 곧바로 안정되고 있음을 알 수 있다. 또한, 콘덴서에 의해 역률이 보상됨에 따라 전류는 26.22초에 정격전류(185 A) 이하인 107 A로 감소한 것으로 측정되었다.

주배수펌프를 정상적으로 기동시킨 다음 유동이 안정된 후 배수펌프를 정지시키기 위해 전동 버터플라이밸브를 완전 개방(밸브개도 100%) 상태에서 밸브개도를 25%까지 교축시킨 후 전동기의 전원을 차단하였을 때 즉, 주 펌프의 정지 시 측정된 과도현상은 Table 6에 요약하여 나타내었다. 정상 운전 중인 시간 160초에 체크밸브 전단에서 압력(PT1)은 1.66 m,

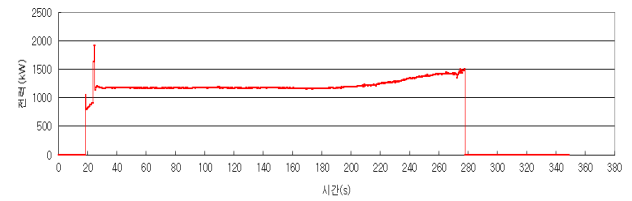
체크밸브 후단에서 압력(PT2)은 0.72 m가 작용하였고, 전동기 전류와 동력은 각각 105 A와 1,169 kW로 측정되었다. 전동 버터플라이 밸브 개도를 25%까지 교축시킴에 따라 펌프 출구측 압력(PT1)과 전동기 전류는 점차로 증가하는데, 277.32초에 PT1은 8.73 m까지, 전류는 139 A까지 상승하였다. 이 순간 전동기 동력은 정격출력(1,320 kW)을 초과한 1,512 kW로 측정되었다. 이때 전동기 전원을 차단하였고, 펌프 출구측 압력은 급격히 떨어지면서 수력학적 과도현상인 수격현상이 발생한다. 시간 278.28 초에 체크밸브 전후단에서 역방향 압력구배가 형성되고, 이때부터 체크밸브가 닫힌다. 한편, 토출배관 말단에 설치된 플랩밸브도 닫히기 시작하는데, 밸브 디스크의 관성 때문에 플랩밸브가 체크밸브보다 더 빨리 닫히는 것으로 현장시험 결과 확인되었다. 체크밸브가 닫힘에 따라 체크밸브 전단에서 압력(PT1)은 287.32초에 -2.69 m로 부압이, 체크밸브 후단에서 압력(PT2)은 0.03 m로 대기압 가까이 작용하고 있음을 알 수 있다.



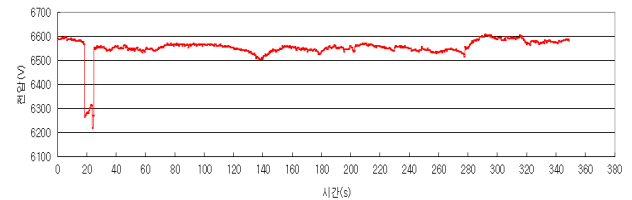
(a) Pump discharge pressure at the front and rear of the check valve



(b) Motor current



(c) Motor power



(d) Motor voltage

Fig. 8 Hydraulic transient according to start and stop of main drainage pump (valve open rate = 25%)

Table 4 Status of inside and outside water levels in rainwater pumping station

| Time | Start | | Stop | | | Operating time |
|----------|--------------------|---------------------|----------|--------------------|---------------------|----------------|
| | Inside water level | Outside water level | Time | Inside water level | Outside water level | |
| 10:00:52 | 0.53 m | 5.06 m | 10:05:13 | 0.41 m | 5.06 m | 4 min 22 sec |

Table 5 Hydraulic transient according to start of pump

| Time (sec) | Pressure head PT1 (m) | Pressure head PT2 (m) | Voltage (V) | Current (A) | Power factor | Motor power (kW) |
|------------|-----------------------|-----------------------|-------------|-------------|--------------|------------------|
| 0.00 | -1.391 | 0.029 | 6,588 | 0 | 0 | 0 |
| 18.54 | -1.373 | 0.035 | 6,262 | 366.3 | 0.264 | 1048.3 |
| 20.42 | 0.072 | 0.041 | 6,283 | 360.7 | 0.214 | 840.9 |
| 24.42 | 0.673 | 0.035 | 6,269 | 411.9 | 0.431 | 1923.5 |
| 24.94 | 1.544 | 0.039 | 6,550 | 104.4 | 0.962 | 1137.6 |
| 26.22 | 2.144 | 0.401 | 6,552 | 107.8 | 0.976 | 1193.4 |
| 33.66 | 1.688 | 0.601 | 6,539 | 107.1 | 0.976 | 1183.1 |
| 38.54 | 1.667 | 0.432 | 6,551 | 105.8 | 0.976 | 1171.3 |

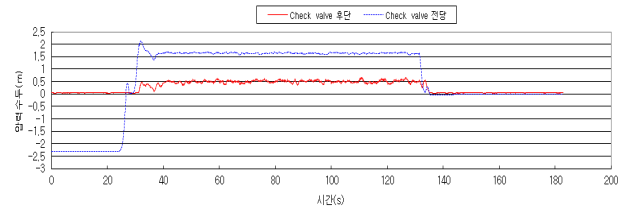
Table 6 Hydraulic transient according to stop of pump (valve open rate = 25%)

| Time (sec) | Pressure head PT1 (m) | Pressure head PT2 (m) | Voltage (V) | Current (A) | Power factor | Motor power (kW) |
|------------|-----------------------|-----------------------|-------------|-------------|--------------|------------------|
| 160.00 | 1.662 | 0.728 | 6,554 | 105.5 | 0.977 | 1169.3 |
| 277.32 | 8.734 | 8.388 | 6,515 | 139.7 | 0.960 | 1512.6 |
| 278.28 | 3.865 | 3.883 | 6,555 | 0 | 0 | 0 |
| 287.32 | -2.694 | 0.034 | 6,585 | 0 | 0 | 0 |

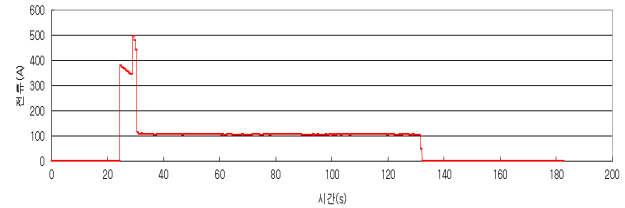
3.3 밸브 완전 개방 후 펌프 기동 및 정지에 따른 수격현상

본 시험은 배수펌프의 토출배관에 설치된 전동 버터플라이밸브가 완전히 개방된 상태에서 배수펌프를 기동시킨 다음 유동이 안정된 후 전동 버터플라이밸브가 완전히 개방된 상태에서 배수펌프를 정지시키기 위해 전동기의 전원을 차단하는 경우이다. 이러한 과정에서 측정된 수력학적 과도현상과 전기적 과도현상은 Fig. 9에 각각 나타내었다. Table 7은 주 배수펌프의 가동시간 동안 내수위와 외수위의 변화를 나타내었다.

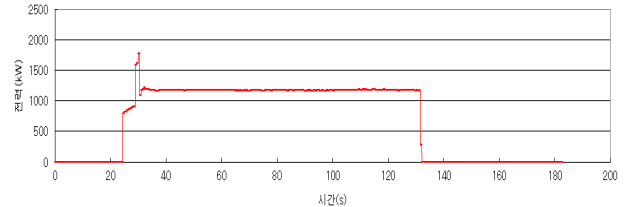
빗물펌프장의 주배수펌프 기동 시 측정된 과도현상은 Table 8에 요약하여 나타내었다. 배수펌프 기동 전 체크밸브 전단에서 압력(PT1)은 -2.32 m로 부압이, 체크밸브 후단에서 압력(PT2)은 0.04 m로 대기압 가까이 작용하였고, 전원 전압은 6,609 V로 측정되었다. 시간이 24.50초에



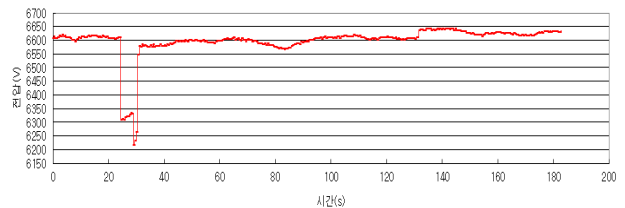
(a) Pump discharge pressure at the front and rear of the check valve



(b) Motor current



(c) Motor power



(d) Motor voltage

Fig. 9 Hydraulic transient according to start and stop of main drainage pump (valve open rate = 100%)

전동기로 전원이 공급되면서 기동 전류는 379 A까지 상승하였고, 전압은 6,308 V까지 최저로 떨어졌다.

배수펌프가 가동됨에 따라 토출배관으로 물이 양수되면서 체크밸브 전후단에서 정방향 압력구배가 26.74초에 형성되고, 이때부터 체크밸브가 열린다. 주배수펌프의 관성모멘트가 크기 때문에 전동기의 기동 전류와 동력은 30.00초에 각각 439 A와 1,774 kW인 최대값으로 측정되었다. 토출배관에서 유동이 형성됨에 따라 펌프 출구측 압력(PT1)은 32.12초에 2.12 m까지 상승하나, 수격작용은 곧바로 안정되고 있음을 알 수 있다. 또한, 콘텐서에 의해 역류이 보상됨에 따라 전류는 32.12초에 정격전류(185 A) 이하인 109 A로 감소한 것으로 측정되었다.

배수펌프를 정상적으로 기동시킨 다음 유동이 안정된 후 배수펌프를 정지시키기 위해 전동 버터플라이밸브가 완전히 개방된 상태에서 전동기의 전원을 차단하였을 때 즉, 주배수

Table 7 Status of inside and outside water levels in rainwater pumping station

| Time | Start | | Stop | | | Operating time |
|----------|--------------------|---------------------|----------|--------------------|---------------------|----------------|
| | Inside water level | Outside water level | Time | Inside water level | Outside water level | |
| 10:14:22 | 0.52 m | 5.08 m | 10:16:10 | 0.42 m | 5.08 m | 1 min 49 sec |

Table 8 Hydraulic transient according to start of pump

| Time (sec) | Pressure head PT1 (m) | Pressure head PT2 (m) | Voltage (V) | Current (A) | Power factor | Motor power (kW) |
|------------|-----------------------|-----------------------|-------------|-------------|--------------|------------------|
| 0.00 | -2.321 | 0.040 | 6,609 | 0 | 0 | 0 |
| 24.50 | -2.294 | 0.042 | 6,308 | 379.8 | 0.192 | 791.8 |
| 26.74 | 0.056 | 0.039 | 6,321 | 358.5 | 0.221 | 868.8 |
| 30.00 | 0.363 | 0.038 | 6,265 | 439.8 | 0.372 | 1774.3 |
| 30.52 | 1.021 | 0.051 | 6,547 | 113.1 | 0.863 | 1097.9 |
| 32.12 | 2.126 | 0.439 | 6,586 | 109.3 | 0.975 | 1215.2 |
| 41.96 | 1.677 | 0.566 | 6,583 | 106.0 | 0.977 | 1179.9 |
| 44.50 | 1.652 | 0.423 | 6,597 | 105.4 | 0.977 | 1175.8 |

Table 9 Hydraulic transient according to stop of pump (valve open rate = 100%)

| Time (sec) | Pressure head PT1 (m) | Pressure head PT2 (m) | Voltage (V) | Current (A) | Power factor | Motor power (kW) |
|------------|-----------------------|-----------------------|-------------|-------------|--------------|------------------|
| 131.62 | 1.612 | 0.558 | 6,611 | 104.9 | 0.977 | 1173.0 |
| 132.76 | 0.263 | 0.273 | 6,641 | 0 | 0 | 0 |
| 136.82 | -0.039 | 0.033 | 6,639 | 0 | 0 | 0 |
| 141.62 | -0.032 | 0.036 | 6,642 | 0 | 0 | 0 |

펌프의 정지 시 측정된 과도현상은 Table 9에 요약하여 나타내었다. 정상 운전 중인 시간 131.62초에 체크밸브 전단에서 압력(PT1)은 1.61 m, 체크밸브 후단에서 압력(PT2)은 0.55 m가 작용하였고, 전동기 전류와 동력은 각각 104 A와 1,173 kW로 측정되었다. 이때 전동기 전원을 차단하였는데, 펌프 출구측 압력은 급격히 떨어지면서 수력학적 과도현상인 수격현상이 발생하였다. 시간 132.76초에 체크밸브 전후단에서 역방향 압력구배가 형성되고, 이때부터 체크밸브가 닫힌다. 한편, 토출배관 말단에 설치된 플랩밸브도 닫히기 시작하는데, 밸브 디스크의 관성 때문에 플랩밸브가 체크밸브보다 더 빨리 닫히는 것으로 현장시험 결과 확인되었다. 체크밸브가 닫힘에 따라 체크밸브 전단에서 압력(PT1)은 141.62초에 -0.03 m로 부압이, 체크밸브 후단에서 압력(PT2)은 0.03 m로 대기압 가까이 작용하고 있음을 알 수 있다.

Table 10 Comparison of electrical transient according to pump start

| Item | Valve open 25% | | | Valve open 100% | | |
|---------------------|---------------------------|---------|---------------------------|---------------------------|---------|---------------------------|
| | Max. starting current (a) | (b)/(a) | Over current duration (b) | Max. starting current (c) | (c)/(a) | Over current duration (c) |
| Motor rated current | 185 A | 411.9 A | 2.23 | 6.40 sec | 439.8 A | 2.38 |

Table 11 Comparison of hydraulic transient according to pump start

| Check valve opening time (sec) | Valve open 25% | | Valve open 100% | | |
|--------------------------------|------------------------|-------|--------------------------------|------------------------|-------|
| | Max. pressure head (m) | | Check valve opening time (sec) | Max. pressure head (m) | |
| | PT1 | PT2 | | PT1 | PT2 |
| 1.88 | 2.144 | 0.601 | 2.24 | 2.126 | 0.566 |

4. 수격현상 현장시험 분석

4.1 펌프 기동 및 정지 시 수격현상

빗물펌프장의 수격현상 발생 여부 및 원인을 분석하기 위하여 주배수펌프의 정상적인 기동 및 정지 시 발생하는 과도현상에 관한 현장시험을 실시하였다. 현장 시험은 2가지 경우 즉, 첫째 전동 버터플라이밸브를 교축시킨 후 전동기의 전원을 차단하는 경우, 둘째 전동 버터플라이밸브가 완전히 개방된 상태에서 전동기의 전원을 차단하는 경우에 대하여 실시하였다.

Table 10은 빗물펌프장의 배수펌프 기동에 따른 전기적 과도현상을 서로 비교하여 나타내었다. 전동기의 정격전류 대비 최대 기동전류는 2.23~2.38배로 흐르고, 과전류 지속 시간은 6.02~6.40초로 측정되었다. 비속도가 큰 배수펌프는 전동식 버터플라이밸브를 완전히 개방한 후 기동시키는 데, 이는 기동 전류가 과다하게 증가하여 전동기의 권선이 소손되는 것을 방지하기 위함이다.

빗물펌프장의 배수펌프 기동에 따른 수력학적 과도 현상인 수격현상은 Table 11에 서로 비교하여 나타내었다. 펌프 출구측 압력(PT1)은 2.126~2.144 m 범위로 상승하고, 체크밸브 출구측 압력(PT2)은 0.566~0.601 m까지 상승하는 것으로 나타났다. 또한, 체크밸브가 열리기 시작하는 정방향 압력구배는 전동기로 전원이 공급된 후 1.88~2.24초 사이에서 형성되는 것으로 측정되었다.

배수펌프 정지에 따른 수력학적 과도현상 시험은 배수펌프를 긴급차단시킨 것과 같은 시험으로서, Table 12는 빗물펌프장의 배수펌프 정지에 따른 수력학적 과도현상을 서로 비교하여 나타내었다. 전동 버터플라이밸브를 교축시킨 후 전동기의 전원을 차단하는 경우는 펌프 출구측 압력(PT1)은

Table 12 Comparison of hydraulic transient according to pump stop

| Valve open 25% | | | Valve open 100% | | |
|-----------------------------------|-----------------------|--------|-----------------------------------|-----------------------|--------|
| Reverse flow occurring time (sec) | Pressure head PT1 (m) | | Reverse flow occurring time (sec) | Pressure head PT1 (m) | |
| | Max. | Min. | | Max. | Min. |
| 0.96 | 8.734 | -2.694 | 1.14 | 1.612 | -0.039 |

8.734 m로 상승하고, -2.694 m까지 떨어진 것으로 측정되었다. 또한 전동 버터플라이밸브가 완전히 개방된 상태에서 전동기의 전원을 차단하는 경우는 펌프 출구측 압력(PT1)은 1.612 m로 정상상태 압력수두를 넘지 않았고, -0.039 m까지 하강하는 것으로 나타났다. 두 경우 모두 펌프 출구측 압력은 1 kgf/cm²를 넘지 않고, 기계설비의 설계압력이 10 K인 점을 고려할 때 수격압은 그다지 우려할 수준은 아닌 것으로 판단된다. 또한, 배수펌프 정지 후 역류방지용 밸브의 거동과 배관 내 유동에 따른 소음을 현장에서 확인하였는데 특별한 문제점은 발견되지 않았다.⁽¹²⁾

현장에서 배수펌프의 정지 시 수격작용을 완화시키기 위하여 전동 버터플라이밸브를 상당히 교축시킨 후 전동기의 전원을 차단하는 방식은 토출배관 내 유속은 줄일 수 있으나, 배수펌프의 압력상승 효과가 더 크게 나타나는 것으로 분석되었다. 즉, 펌프 출구측 압력(PT1)은 더욱 증가하고, 펌프 양수관 내 부압(negative pressure)도 더 크게 발생하는 것으로 측정되었다. 이러한 경향은 빗물펌프장의 주배수펌프에서 두드러지게 나타나고 있는데, 배수펌프가 재기동될 때 양수관 내 공동(cavity)으로 인하여 체크밸브의 개방시간이 2.24초로 늦어지고 전동기의 기동 전류가 2.38배로 커지는 것으로 분석되었다.

4.2 펌프 토출 배관의 밸브류 수격현상

빗물펌프장의 배수펌프 정지에 따른 수력학적 과도현상을 서로 비교한 Table 12에 의하면, 역류방지용 체크밸브가 닫히기 시작하는 역방향 압력구배는 전동기 전원이 차단된 후 0.96~1.14초 사이에서 형성되는 것으로 측정되었다. 역류가 발생하면 토출배관 말단에 설치된 플랩밸브는 유압장치가 장착된 체크밸브보다 먼저 닫히는 것으로 관측되었다. 매우 큰 단일 디스크가 1초 전후로 급격히 닫힐 때 슬래밍(slamming)이 발생하여 밸브디스크와 밸브시트가 충격(impact)으로 인하여 플랩밸브가 파손될 우려가 있기 때문에 각별한 주의가 필요하다.⁽¹³⁾ Fig. 10은 슬래밍이 발생하여 파손된 플랩밸브를 나타내었다.

빗물펌프장에는 차수용 밸브로서 전동식 버터플라이밸브를 설치하였고, 역류방지용 밸브로서 완폐식 체크밸브와 플랩밸브를 병용하여 설치하였다. 일반적으로 플랩밸브는

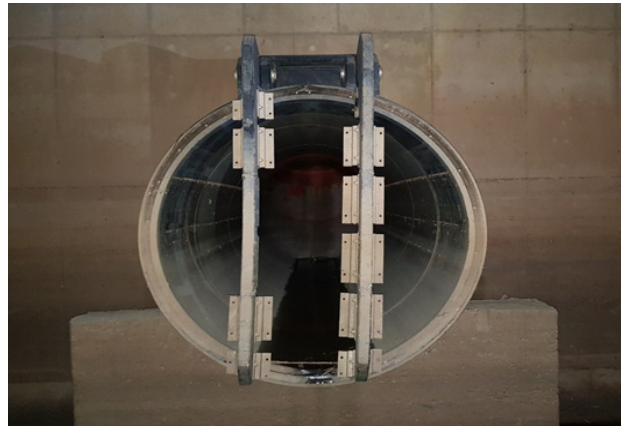


Fig. 10 Damage of the flap valve

완전한 수밀성을 기대하기 어렵기 때문에 체크밸브를 병용해서 사용함으로써 빗물펌프장의 침수 가능성을 낮추기 위한 조치로 판단된다. 빗물펌프장의 토출배관은 사이폰(siphon) 형상으로 설계되었고, 펌프출구측에 체크밸브가 설치되었으며, 펌프 정지 후 전동버터플라이밸브를 닫기 때문에 플랩밸브를 제거하여도 토출배관을 통한 역류가 발생할 가능성은 매우 낮은 것으로 판단된다.

빗물펌프장의 배수펌프 정지에 따른 수력학적 과도현상에서 체크밸브와 플랩밸브 사이의 토출배관은 배관 상부에 설치된 에어벤트 설비에 의해 부압 발생이 방지되는 것으로 분석되었다. 배수펌프의 기동 및 정지 시 공기의 원활한 출입을 위하여 저용량 배수펌프 및 주배수펌프 토출배관에는 구경 150 mm와 200 mm의 에어벤트가 각각 설치된 것이 확인되었다. 그러나 펌프 양수관과 체크밸브 사이의 토출배관에서는 상당한 부압이 발생하는 것으로 현장시험 결과 확인되었다. 양수관에서 부압은 전동 버터플라이밸브를 교축시킨 후 전동기의 전원을 차단하는 경우의 결과가 전동 버터플라이밸브가 완전히 개방된 상태에서 전동기의 전원을 차단하는 경우의 결과보다 더 크게 나타났다. 따라서, 부압을 줄여 수력학적 과도현상을 완화시키기 위해서는 저용량 배수펌프 및 주배수펌프의 양수관 상부에 각각 구경 150 mm, 구경 200 mm의 급속공기밸브를 추가로 설치하는 것이 필요하다.

5. 결 론

빗물펌프장에서 발생하는 수력학적 과도현상을 현장에서 시험하기 위하여 평상시 배수펌프를 기동·정지시킬 때 발생하는 수격현상에 관련된 자료를 현장에서 취득하고, 현장 시험을 수행한 후 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 빗물펌프장에서 배수펌프를 정상적으로 기동·정지시킬 때 펌프 출구측 압력은 1 kgf/cm²를 넘지 않고 있어 수격현상은 별다른 문제가 없는 것으로 현장시험 결과를 통해 확인되었다.

- 2) 현장에서 수격작용을 완화시키기 위하여 전동 버터플라이밸브를 상당히 교축시킨 후 전동기의 전원을 차단하는 방식을 택하고 있었는데, 이러한 방식으로 토출배관 내 유속은 줄일 수 있으나, 배수펌프의 압력상승 효과가 더 크게 나타나는 것으로 분석되었다.
- 3) 역류방지용 체크밸브가 닫히기 시작하는 역방향 압력 구배는 전동기 전원이 차단된 후 0.96~1.14초 사이에서 형성되는 것으로 측정되었고, 역류가 발생하면 토출배관 말단에 설치된 플랩밸브가 체크밸브보다 먼저 닫히는 것으로 관측되었다. 플랩밸브는 1초 전후에 급격히 닫힐 때 슬래밍이 발생하여 밸브디스크와 밸브시트가 충격으로 파손될 우려가 있으므로 각별한 주의가 필요하다.
- 4) 체크밸브와 플랩밸브 사이의 토출배관 상부에 설치된 에어벤트 설비는 부압 발생을 방지하기 위하여 설치되었다. 현장시험 결과 펌프 양수관과 체크밸브 사이의 토출배관에서는 상당한 부압이 발생하므로 부압을 줄여 수력학적 과도현상을 완화시키기 위해서는 배수펌프의 양수관 상부에 급속공기밸브를 추가로 설치하는 것이 필요하다.

후 기

본 연구는 2020년도 한국산업기술대학교 연구년에 의하여 연구되었고, 서울주택도시공사의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- (1) Kim, K. Y., Park, J. M., Lee, Y. B., et al., 2019, Drainage Pump Facility - Design, Construction and Maintenance, Dong Myeong Publishers.
- (2) Kim, K. Y., Kim, J. B., 2004, "Waterhammer Caused by Startup and Stoppage of a Centrifugal Pump." The KSFJ Journal of Fluid Machinery, Vol. 7, No. 1, pp. 51~57.
- (3) Lee, Y. B., Kim, K. Y., 2019, "A Study on Hydraulic Transient Phenomenon of a Pumped Storage Power Plant(I)." The KSFJ Journal of Fluid Machinery, Vol. 22, No. 5, pp. 35~43.
- (4) Seoul Housing & Communities Corporation., 2012, "Magok 1, 2 Rainwater Pumping Station Construction Report."
- (5) Wylie, E. B. and Streeter, V. L., 1993, Fluid Transients in Systems, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- (6) Lee, Y. B., Sun, H. S., Kim, K. Y., 2020, "A Study on the Waterhammer of Rainwater Pumping Station." 2020 Korea Society for Fluid Machinery Winter Conference. pp. 27~28.
- (7) Ghidaoui, M. S., Zhao, M., McInnis, D. A., and Axworthy, D. H., 2005, "A Review of Water Hammer Theory and Practice." ASME, Vol. 58, pp. 49~76.
- (8) Chaudhry, M. H., 2014, Applied Hydraulic Transients, 3rd edition, Springer.
- (9) Kim, K. Y., Oh, S. Y., Lee Y. B., 1997, "Waterhammer in the Pump Pipeline System with an Air Chamber." The Fifth International Conference on Fluid Machinery, Seoul, Korea, pp. 569~576.
- (10) Kim, K. Y., 2017, "Waterhammer for the Mini Hydropower Plant Installed at Water Conveyance Pipeline." The KSFJ Journal of Fluid Machinery, Vol. 20, No. 3, pp. 11~17.
- (11) Kim, K. Y., Lee, Y. B., Sun, H. S., Kim, M. H., 2020, Magok 1, 2 Rainwater Pumping Station Waterhammer Related Facility Inspection Report. Korea Society for Fluid Machinery.
- (12) Watters, G. Z., 1984, Analysis and Control of Unsteady Flow in Pipelines, Second edition, Butterworth Publishers, MA.
- (13) Kim, K. Y., Oh S. H., 2001, "Waterhammer for the Intake Pumping Station with the Pump Control Valve." The KSFJ Journal of Fluid Machinery, Vol. 4, No. 4, pp. 16~21.