

## 광역상수도용 펌프시방 최적결정에 관한 연구

김성원\* · 강신형\*\* · 서상호\*\*\*

### 1. 서 론

광역상수도용 펌프의 선정에 있어서 상수도 시설기준에 따라 최악의 조건(노후 관로, 피크유량, 최대 실양정 등 적용)인 상태를 기준으로 선정된 펌프의 전양정은 실제 운전양정보다 여유량이 상당히 포함될 수밖에 없다. 따라서 실제 운영시에는 계획 이상의 많은 유량이 공급되고 이를 조절하기 위해 토출밸브 교축이나, 임펠러 조정 등의 방법을 취하게 된다. 그러나 초기 설계단계에서의 과도한 여유산정에 대한 대책으로서 정도 이상의 토출밸브 교축이나 임펠러 커팅을 실시하거나 또는 과대유량을 그대로 방치할 경우 펌프 및 밸브의 수명단축, 막대한 에너지 낭비를 초래하여 운전 및 유지관리비용 지출이 증가되어 저효율 고비용의 원인이 되는 단점을 가지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 수도권 광역상수도 팔당 2취수펌프장 운영일지를 토대로 펌프의 실제 운전양정과 선정시 시방양정의 차이를 비교평가하고 그로 인한 저효율 운전 및 캐비테이션(cavitation) 피해현황을 분석해봄과 동시에 개선 방안 및 기대효과를 제시함을 목적으로 한다.

### 2. 운전현황 분석방법

본 연구의 대상인 팔당 2취수장(3단계)은 '98 연간 취수량 5,500만 m<sup>3</sup> 규모로서 그림 1에 제시한 펌프(BEP: 11583 m<sup>3</sup>/hr, 82 m, 92%) 7대가 Line1, Line2에 각각 3대, 4대씩 병렬로 설치되어있다. 이에 대한 운전현황 분석방법은 다음과 같다.

- 1) 전산일지(매월 3일간만 측정)로부터 각 단계의 라인별 펌프별 일일 토출량을 확인한다.

\* 중소기업진흥공단 펌프에너지기술실  
 \*\* 서울대학교 기계항공공학부  
 \*\*\* 숭실대학교 기계공학과  
 E-Mail : pump@sbc.or.kr

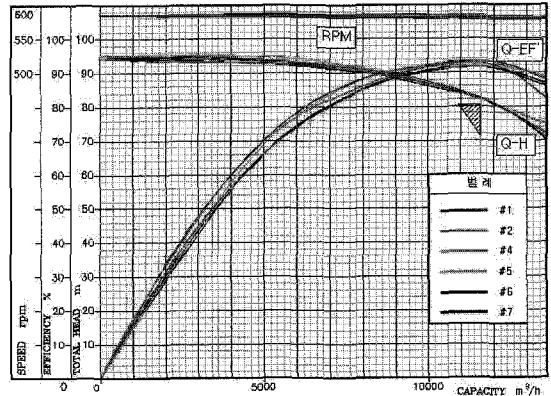


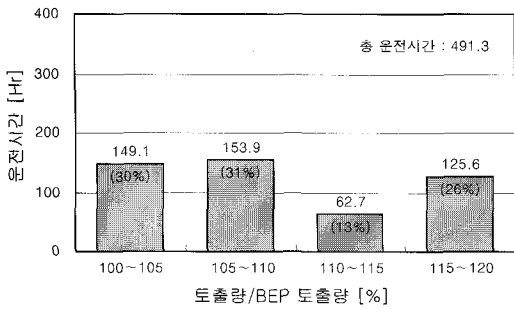
그림 1 펌프 특성곡선 (효성 에바라 제공)

- 2) 라인별 운전펌프의 번호, 댓수 및 각각의 운전시간을 확인한다.
- 3) 각 펌프의 토출량을 계산한다. 단 동일라인의 펌프는 토출량이 동일한 것으로 간주한다.
- 4) 성능곡선으로부터 각 펌프의 실제 토출량에서의 양정과 효율을 확인한다.
- 5) 각 펌프의 운전소비동력을 계산한다.
- 6) 각 펌프의 일일 소비전력량을 계산한다.
- 7) 각 펌프의 최고효율점 소비동력 대비 실제운전 소비동력 증가분을 계산한다.
- 8) 각 펌프의 일일토출량 대비 일일소비전력량을 계산하여 정리한다.

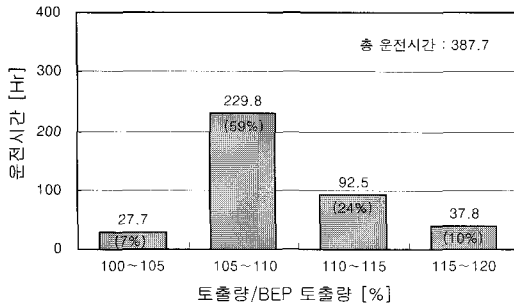
### 3. 운전현황 분석결과

#### 3.1 운전유량

그림 2에는 (가) Line 1 전체 평균 토출량별 운전시간, (나) Line 2 전체 평균 토출량별 운전시간을 표시하였다. 운전유량 범위(그림 3 참조)는 Line 1, Line 2 각각 11,580~13,980 m<sup>3</sup>/hr, 11,497~13,535 m<sup>3</sup>/hr으로 나타나며, 평균 운전유량은 Line 1, Line 2 각각 최고효



(가) Line 1 평균



(나) Line 2 평균

그림 2 도출량별 운전시간

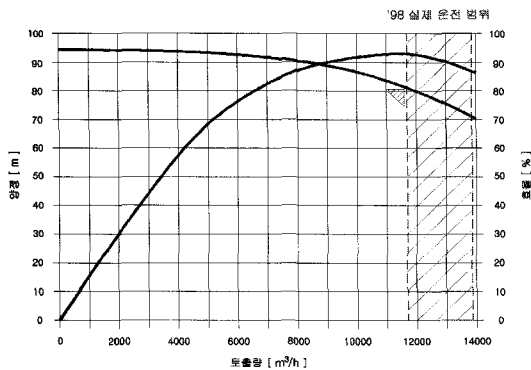


그림 3 실제 운전유량 범위

율점의 109%, 110%로서 공히 과대유량/저양정/저효율 운전이 이루어지고 있다. 심지어 110%~120%에 달하는 과대유량 운전시간도 그림 2에서 보듯이 Line 1, Line 2 각각 전체 운전시간의 39%, 34%에 이르고 있다. 반면 최고효율점 유량 이하(100% 이하) 운전은 Line 1, Line 2 각각 전체 운전시간의 2%, 1%에 불과한 것으로 나타났다. 이와 같은 과대유량 운전은 시스템 안정상 필요한 저양정 운전 및 kWh/m<sup>3</sup> 값의 하향조정을 위해 불가피하고도 의도적인 상황으로 평가된다. 그러나 이와 같은 지나친 과대유량 운전조건으로 인해 캐비테

이션 발생가능성은 크게 증가할 수 밖에 없는데, 일반적으로 BEP 대비 120% 유량 운전시 NPSHR 크기는 BEP 대비 최대 170%까지 증가하게 되고 결국 현재의 NPSHA를 초과하게 됨으로써 캐비테이션 발생에 따른 피해는 심각할 것으로 예상된다. 과연 저양정, 과대유량 운전을 통한 경제적 이득이 캐비테이션 피해에 따른 각종 손실을 충분히 보상하는지 반드시 검토해 볼 필요가 있을 것이다.

### 3.2 운전양정

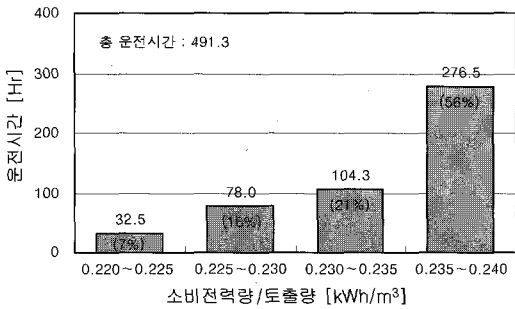
운전양정 범위는 Line1, Line2 각각 67~83m, 71~83m로 나타났으며 평균 유저양정은 공히 77m 정도로 나타났다는데, 이는 BEP 양정 82m 대비 6% 이상 낮은 양정 값이다. 이러한 결과는 위에서 설명된 과대유량 운전과 연관된 당연한 결과이다.

### 3.3 운전효율

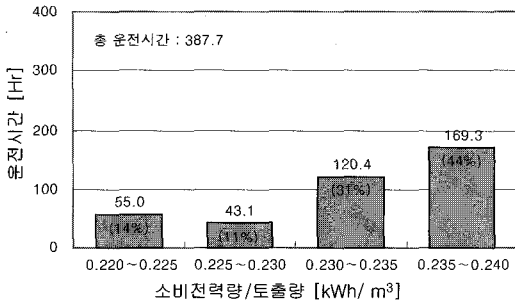
운전효율 범위는 Line1, Line2 각각 77~93%, 86~92%로 나타났으며 평균 효율은 공히 90% 정도로 나타났다. 다만 특이한 점은 #2 펌프의 경우만 고유량에서 효율저하가 특히 심각하게 보이고 있어 70% 후반대의 효율이 나타나는 것이다. 이상의 효율평가 결과는 서두에 언급한 바와 같이 펌프제조업체의 성적서를 기준으로 산정한 값으로서, 실제값과는 분명히 차이가 있을 것으로 예상되나 정량적인 평가가 어려운 실정이다.

### 3.4 전력원단위(kWh/m<sup>3</sup>)

그림 4 에는 (가) Line1 전체 평균 전력원단위별 운전시간, (나) Line2 전체 평균 전력원단위별 운전시간을 표시하였다. 운전 전력원단위의 범위는 Line1과 Line2 각각 0.215~0.246 및 0.223~0.246 로 비교적 큰 변동폭을 나타냈으며, 평균 전력원단위는 각각 0.234, 0.232로 나타났다. 분석결과에 따르면 일반적인 예상결과와 같이 유량이 증대할수록 전력원단위값이 감소하는 경향을 볼 수 있었다. 그러나 이러한 경향은 유량증가분에 따라 매우 제한적으로 나타나고 있었으며 평균적으로 BEP 대비 110%이상의 과대유량 운전에서는 펌프 자체의 효율저하로 인해 도리어 전력원단위가 다시 상승하는 결과를 나타내었다. 이는 과대유량운전으로 공급량이 많아질수록 전력원단위는 절감되고 이로 인한



(가) Line 1 평균



(나) Line 2 평균

그림 4 전력원단위별 운전시간

전력에너지 절감분은 과대유량 운전으로 인한 각종 기계적 손상에 따른 펌프수명 단축 등 유지관리비용 증가분을 충분히 보상할 수 있다는 근거하에 비공식적으로 묵인되어온 기존의 운영방안에 대한 더욱 신중하고 면밀한 경제성 검토가 필요한 부분이라 할 수 있다. 실제로 그림 4에서 보듯이 Line1, Line2 각각 전체 운전시간 중 56%, 44%의 경우 평균값을 넘어서는 0.235 kWh/m³ 이상의 전력소비를 보이는 이유는 대부분이 지나친 과대유량 운전에서 기인한 것으로 나타났으며, 결국 과대유량 운전을 통해 전력소비효율 향상을 꾀하고자 한 운영자측의 기본취지와는 배치됨을 주목하지 않을 수 없다.

#### 4. 전력원단위 절감을 위한 최적시방점 검토

##### 4.1 시방점에 따른 전력원단위 변화

표 1에서는 위에서 설명한 운전현황 분석결과를 토대로 도출량[m³/hr]은 12,000, 13,000 및 14,000의 3가지로 대별하고, 각 유량에 대해 다시 양정에 68~76m까지 2m 단위로 분류하여 총 15개의 각기 다른 시방점(BEP) 운전의 경우 소비전력량 및 kWh/m³의 변화를

표 1 시방점에 따른 전력원단위 변화

| 도출량 [m³/hr] | 양정 [m] | 비속도 | 동력 [kW] | 소비전력 [kWh/일] | 전력원단위 [kWh/m³] |
|-------------|--------|-----|---------|--------------|----------------|
| 12,000      | 68     | 247 | 2,469   | 59,256       | 0.206          |
|             | 70     | 242 | 2,542   | 61,008       | 0.212          |
|             | 72     | 237 | 2,614   | 62,736       | 0.218          |
|             | 74     | 232 | 2,687   | 64,488       | 0.224          |
|             | 76     | 227 | 2,760   | 66,240       | 0.230          |
| 13,000      | 68     | 257 | 2,675   | 64,200       | 0.206          |
|             | 70     | 252 | 2,754   | 66,096       | 0.219          |
|             | 72     | 246 | 2,832   | 67,968       | 0.218          |
|             | 74     | 241 | 2,911   | 69,864       | 0.224          |
|             | 76     | 237 | 2,990   | 71,760       | 0.230          |
| 14,000      | 68     | 267 | 2,881   | 69,144       | 0.206          |
|             | 70     | 261 | 2,965   | 71,160       | 0.212          |
|             | 72     | 256 | 3,050   | 73,200       | 0.218          |
|             | 74     | 250 | 3,135   | 75,240       | 0.224          |
|             | 76     | 246 | 3,220   | 77,280       | 0.230          |

예상 정리해 보았다. 단 각 시방점에서의 펌프효율을 공히 90%로 가정하였다. 그 결과 시방점의 비속도가 증가할수록 유량은 증가, 양정은 감소할수록 kWh/m³ 값이 작아지면서 운영 경제성이 향상됨을 분명히 확인할 수 있다. 또한 시방점별 소비전력량을 정량적으로 비교 평가함으로써 운전조건과 경제성을 종합적으로 고려한 최적시방점의 선정이 수월해질 수 있을 것이다. 이러한 검토분석절차는 기존 시스템 점검은 물론 신설 시스템의 계획단계에서 운전조건 변화에 따른 운영경제성 분석 및 최적화를 기초과정이자 필수 선결과제인 것으로 생각된다.

##### 4.2 시방점 최적화에 따른 전력원단위 절감

지금까지의 팔당 2취수장 3단계에 대한 운전현황분석 및 시방점별 소비전력량 비교분석 결과에 의하면 기존의 시방점은 개선의 필요가 있는 것으로 잠정 평가된다. 이에 이상의 분석결과를 종합하여 기존의 시방점을 실제 운전조건에 적합한 방향으로 개선 변경할 경우 기대되는 소비전력량절감, 전력원단위의 절감 및 캐비테이션 위험감소에 대해 정리해 보았다. 3단계 기존 시방점과 예시를 위한 개선 시방점은 다음과 같다.

기존 : Q 11,583 m³/hr, H 82m, Ns 211

개선 : Q 13,000 m³/hr, H 74m, Ns 241

표 2 시방점 변경에 따른 운전효율 및 전력원 변화

| #3 - 4/15 | Q [m <sup>3</sup> /hr] | $\Delta Q / Q_{BEP}$ | 양정 [m] | 효율 [%]  | 전력량 [kWh/일] | kWh /m <sup>3</sup> |
|-----------|------------------------|----------------------|--------|---------|-------------|---------------------|
| 기 존       | 11,910                 | +2.8%                | 81     | 92 (-0) | 68,536      | 0.240               |
| 개 선       | 11,910                 | -8.4%                | 81     | 91 (-1) | 69,288      | 0.242               |

| #3 - 7/19 | Q [m <sup>3</sup> /hr] | $\Delta Q / Q_{BEP}$ | 양정 [m] | 효율 [%]  | 전력량 [kWh/일] | kWh /m <sup>3</sup> |
|-----------|------------------------|----------------------|--------|---------|-------------|---------------------|
| 기 존       | 12,689                 | +9.6%                | 78     | 90 (-2) | 71,880      | 0.236               |
| 개 선       | 12,689                 | -2.4%                | 78     | 92 (-0) | 70,320      | 0.231               |

| #3 - 11/18 | Q [m <sup>3</sup> /hr] | $\Delta Q / Q_{BEP}$ | 양정 [m] | 효율 [%]  | 전력량 [kWh/일] | kWh /m <sup>3</sup> |
|------------|------------------------|----------------------|--------|---------|-------------|---------------------|
| 기 존        | 13,725                 | +18.5%               | 74     | 87 (-5) | 76,302      | 0.232               |
| 개 선        | 13,725                 | +5.6%                | 74     | 91 (-1) | 72,936      | 0.221               |

표 2에는 기존 펌프(Line1-#3)의 특징 몇몇 토출량에 따른 소비전력량 및 전력원단위를 개선 시방점 펌프의 예상치와 비교 정리하였다. 98년 4월 15일 경우 토출량은 11,910m<sup>3</sup>/hr 로서 기존 시방점에는 매우 근접한 운전이 이루어지고 있는 반면, 시방점 토출량을 대폭 상향 조정한 개선 펌프의 경우 도리어 토출량이 시방점보다 8.4% 감소 운전되고 있어 약간의 효율 저하가 불가피할 것이며, 그 결과 전력원단위 값이 도리어 기존보다 약간 크게(+0.002) 나타나고 있다. 그러나 실제로 토출량이 시방점 부근, 즉 BEP 대비 100~105% 범위에서 운전되는 시간은 Line1, Line2 각각 전체시간의 30%, 7%(그림 2 참조)에 지나지 않는다. 7월 19일 토출량 12,689 m<sup>3</sup>/hr 경우 기존 펌프는 시방점 유량을 9.6% 초과하고 있어 펌프 효율이 2% 저하된 운전이 이루어지고 있는 반면, 개선펌프는 토출량이 시방점에 단 2.4% 차이로 접근함으로써 최고효율 운전이 가능해진 결과 전력원단위 값이 기존 대비 0.005 절감되었다. 토출량이 BEP 대비 105~110% 범위에서 운전되는 시간은 Line1, Line2 각각 전체시간의 31%, 59%(그림 2 참조)에 이른다. 마지막으로 11월 18일 토출량 13,725 m<sup>3</sup>/hr 경우 기존 펌프는 시방점 유량을 18.5%나 초과하고 있어 펌프 효율이 무려 5% 저하된 운전이 불가피해진 반면, 개선 펌프는 초과 토출량이 시방점 유량의 5.6%에 불과함으로써 단지 1% 정도의 효율저하 운전이 가능해지고 그 결과 전력원단위의 값이 기존 대비 0.011 절감되었다. 토출량이 증가할수록 기존 대비 개선 펌프의 전력원단위의 절감 폭이 증가함을 알 수 있다. 토출량이 BEP 대비 110~120% 범위에서 운전되는 시간

은 Line1, Line2 각각 전체시간의 39%, 34%(그림 2 참조)에 이르므로, 시방점 개선에 따른 소비전력량 절감이 매우 크게 될 것임에 틀림없다.

이상의 예상 분석결과를 살펴볼 때 팔당 3단계 펌프시스템의 경우 펌프 자체의 효율향상 없이도 시방점을 운전조건에 적합하도록 조정해줄 경우 kWh/m<sup>3</sup> 값에서 기존 대비 평균적으로 최소 0.008 이상의 절감이 가능하리라 생각된다. 연간 총취수량이 8.5억 m<sup>3</sup>에 이르는 팔당 3, 4단계에서만 평균적으로 0.008 kWh/m<sup>3</sup> 절감이 이루어진다면 연간 무려 680만 kWh의 전력량, 전력량 요금으로는 매년 4억원의 절감이 가능해지는 것이다. 참고로 설계최적화 또는 펌프유로 내부코팅 등을 통해 펌프자체의 효율을 5% 향상시킨다면 kWh/m<sup>3</sup> 값은 평균적으로 0.015 가량 감소된다. 이러한 경우에는 부가적으로 연간 1,275만 kWh의 전력량, 전력량 요금으로는 연간 7.3억원이 절감되는 것이다. 동시에 시방점 대비 토출량 초과분 감소(예: #1-98.11.18, 18.5% → 5.6%), 즉 과대유량 운전의 감소에 따라 캐비테이션으로 인한 임펠러 침식 등 각종 기계적 손상도 대폭 감소할 것으로 예상된다. 여기에 관련해서는 다음 절에서 구체적으로 다루기로 한다.

정리해보자면, 이상과 같은 종합적이고 체계적인 분석 및 예측에 의한 적절한 시방점 변경 또는 선정을 통해서 펌프시스템의 운영경제성은 물론 펌프설비가동률 증대와 유지보수비 절감이라는 일석삼조의 효과를 기대할 수 있을 것이다.

### 4.3 토출량 증가와 캐비테이션 피해

캐비테이션 발생의 결정적인 조건이 되는 NPSHR의 크기는 일반적으로 펌프 토출량 증가와 더불어 커진다. 비속도 300 내외의 양흡입 펌프의 경우 토출량 증가에 따른 NPSHR의 증가율은 대략 표 3에 제시된 바와 같다. 따라서 펌프 설계 시방점에서의 NPSHR만을 기준으로 펌프장의 NPSHA와 비교하고, 그 결과로써 캐비테이션 발생여부를 평가한다는 것은 매우 위험한 것이다. 실례로서 팔당 3단계의 경우 펌프 제조업체의 설계계획서에 따르면 NPSHA=12.9m 이며, 펌프

표 3 토출량과 NPSHR 변화

| Q / Q <sub>bep</sub>         | 100% | 110%         | 120%         | 130%         |
|------------------------------|------|--------------|--------------|--------------|
| NPSHR / NPSHR <sub>bep</sub> | 100% | 115<br>~125% | 140<br>~170% | 170<br>~240% |

표 4 토출량과 캐비테이션 위험

| Q / Q <sub>best</sub> | 100%                  | 110%       | 120%        |
|-----------------------|-----------------------|------------|-------------|
| NPSHA [m]             | ≤ 12.9                | ≤ 12.7     | ≤ 12.6      |
| NPSHR [m]             | ≥ 8.0<br>(제조업체<br>제시) | ≥ 9.2~10.0 | ≥ 11.2~13.6 |
| 캐비테이션<br>피해           | 안전                    | 주의         | 심각          |

시방점에서의 NPSHR은 8m정도이므로 캐비테이션 위험은 거의 없는 것으로 검토결과가 제시되어 있다. 그러나 실제 운전조건, 즉 시방점보다 크게 웃도는 과대 토출량 운전시에는 NPSHR이 크게 증가함으로써 빈번한 캐비테이션이 발생하고, 그 결과 여러가지 기계적 손상 즉, 글랜드패킹/베어링의 잦은 교체 이외에도 임펠러 피팅에 의한 파손이 심각한 것으로 조사되었다. 표 4 에는 팔당 3단계 기존 시설에서의 토출량 증가에 따른 NPSHR의 변화를 추정하고, 그에 따른 캐비테이션 위험 정도를 예측한 것이다. 기억해야 할 부분은 팔당 3단계의 경우 캐비테이션 피해의 주의를 요하는 110% 이상의 토출량 운전시간이 전체의 34~39%(그림 2 참조)에 이르고 있음이다. 팔당 취수장 현장 관리자들에 의하면 실제로 1~14호기의 14대 펌프 모두 캐비테이션에 의한 피팅 침식이 있는 것으로 평가되고 있다.

이상과 같은 캐비테이션 피해를 최소화하기 위해서는 NPSHR값이 매우 중요한 의미를 가지에도 불구하고, 제조업체측에서 통상적으로 경험식에 의한 계산값 특히 시방점 단점점에 대한 NPSHR값만을 제시하는 것은 극히 무책임한 일이라 할 수 있다. 초대형 펌프에 대한 실제 NPSHR 측정이 불가능하다면 최소한 모형시험이라도 거친 유량별 실측 NPSHR 곡선을 제시해야만 할 것이다.

### 5. 종합검토 및 건의사항

여러가지 요건을 고려한 더욱 종합적인 분석이 필요하겠지만 전력소비효율 즉, 전력원단위를 위주로 한 경제성 측면에서만 살펴본다면 기존 팔당 3단계 펌프의 시방점은 개선의 여지가 많은 것으로 평가된다. '98 운영자료의 분석결과로부터 결론지을 수 있는 최적시방점 변경방향은 단적으로 말해 "저양정 대유량"(표 1, 2 참조)이다. 4.2절에서 제시한 바와 같이 적절한 설계시방점 변경만 이루어진다면 펌프 자체의 효율 향상이 없이도

기존에 비해 전력원단위는 평균적으로 0.01 kWh/m<sup>3</sup> 이상 절감할 수 있을 것이며, 이러한 경우 연간 총취수량이 8억 5,500만 m<sup>3</sup>에 이르는 팔당 2취수장에서만 무려 연간 855만 kWh(≒ 전력량요금 4억~5억원/년) 절약이 가능한 것으로 평가된다. 동시에 과대유량 운전의 감소로 인해 캐비테이션 손상저감에 따른 펌프고장률 및 에너지손실의 저하도 매우 클 것으로 확신한다. 다만 '98 운영자료의 기초가 되는 기존의 수리학적 방법을 이용한 펌프성능추정의 경우 대부분의 현장 여건상 정확한 유량측정이 거의 불가능하고, 그 결과 펌프효율의 평가에도 어려움이 많다. 특히 병렬운전되는 경우 각 펌프의 성능 및 효율값에 대한 측정 신뢰도는 매우 낮은 편이다. 따라서 본 조사분석결과는 정량적으로 신뢰할 수 있는 결과가 아님을 분명히 밝히는 바이다. 다만 본 조사분석의 내용 및 과정이 기존설비의 개선 및 신규설비 계획/설계 단계에서 검토되어야 하는 기본 작업으로 여겨진다.

참고로 설비현장에서의 정확한 측정이 사실상 불가능한 수리학적 측정방법을 배제하고, 펌프를 통과하는 유체의 미세한 온도상승을 측정하여 펌프손실/효율을 직접 평가하는 열역학적인 방법을 도입, 활용할 경우 펌프설치 현장에서 실시간으로 정밀한 성능/효율을 측정하여 아래와 같은 운전현황을 정밀진단할 수 있다.

- 제작자 시험성적서와 실제성능의 비교
- 펌프효율의 지하 및 마모 평가
- 펌프 시방점의 적정성 평가
- 시스템 저항 변화의 분석

이상의 정밀진단 결과를 토대로 운전갯수/시간, 유량, 양정, 효율 및 kWh/m<sup>3</sup>에 대한 상세 분석을 거쳐 펌프 자체의 설계개선, 시방점 변경, 펌프 수리, 운전일 정관리 및 관로시스템 최적화 등을 통한 에너지효율과 설비운영 경제성의 극대화가 가능할 것이다. 또한 기존 설비에 대한 위의 정밀진단 결과의 축적을 통해서만이 차후 신규시스템 설계최적화를 위한 충분한 연구가 가능하리라 생각된다.

### 후 기

본 연구는 한국수자원공사 수도설비처의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.