

수격펌프의 효율성 및 현장 적용성 평가

이수형¹ · 윤희성¹ · 김동훈¹ · 신에스더² · 김용철¹ · 고경석¹ · 하규철^{1,2*}

¹한국지질자원연구원, ²한국과학기술연합대학원(UST)

Evaluation of Field Feasibility and Efficiency of Hydraulic Ram Pump

Soo-Hyoung Lee¹, Heesung Yoon¹, Dong-Hun Kim¹, Esther Shin², YongCheol Kim¹, Kyung-Seok Ko¹ and Kyoochul Ha^{1,2*}

¹Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, South Korea

²University of Science and Technology, Daejeon 305-350, South Korea

(Received: 4 May 2016 / Revised: 3 June 2016 / Accepted: 10 June 2016)

This study was conducted to evaluate the applicability and efficiency of water supply using hydraulic ram pump. Study area is the Imgok-ri, Hwanam-myeon, Sanju-si, Kyeongsangbuk-do. There is an abandoned coal mine, where groundwater is discharged from its entrance with a flow rate of approximately 260 m³/day. Hydraulic ram pump uses the waterhammer phenomenon and utilizes the power of falling water for pumping part of that water to a higher elevation than the water sources without electric power. To determine the efficiency of hydraulic ram pump, the flow rate was measured at three points according to the altitude difference ($\Delta h = 19$ m (point 1), 30 m (point 2), 40 m (point 3)). Flow rate measured at 1, 2, and 3 were about 8.6~10.8 m³/day, 3.98~4.39 m³/day, and 2.35~2.59 m³/day, respectively. The current results suggested that, hydraulic ram pump could be applicable for the water supply system in mountain areas without external power supply.

Key words : hydraulic ram pump, groundwater discharge, water supply system, waterhammer phenomenon, mountain areas

본 연구는 수격펌프를 이용하여 용수 공급의 가능성과 효율성을 평가하기 위하여 수행되었다. 연구지역은 경상북도 상주시 화남면 임곡리로 과거 석탄개발에 사용된 갭도로부터 지속적으로 지하수 유출이 발생하고 있다. 유출되는 지하수는 일평균 약 260 m³/day 의 수량을 가지는 것으로 파악되었다. 수격펌프는 수격현상을 이용하여 전력없이 공급 원으로부터 고도차(압력)에 의해 물의 일부를 높은 곳으로 이송시키는 펌프이다. 수격펌프의 효율성을 파악하기 위해 수격펌프와의 고도차에 따라 3지점($\Delta h = 19$ m (1지점), 30 m (2지점), 40 m (3지점))에서 유량을 측정하였다. 1지점에서는 약 8.6~10.8 m³/day, 2지점은 약 3.98~4.39 m³/day 그리고 3지점에서는 약 2.35~2.59 m³/day 의 물을 운반할 수 있는 것으로 파악되었다. 이번 연구를 통해 수격펌프가 산간지역 등에서 전력없이 물공급 시스템에 활용할 수 있을 것으로 파악되었다.

주요어 : 수격펌프, 지하수 유출, 물공급 시스템, 수격현상, 산간지역

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided original work is properly cited.

*Corresponding author: hasife@kigam.re.kr

1. 수격펌프 원리 및 특징

관 내에 유체가 팽 찬 상태로 흐를 때 유체의 속도를 급격하게 변화시키면 관 내부에 압력변화가 생겨 순간적으로 압력파에 의한 진동이 발생하게 되는 것을 수격현상(water hammer) 이라고 한다(Kwon, 2012). 관로 내부를 흐르던 유체는 하류 부분에 위치한 밸브를 급격히 닫거나 열 때, 운동에너지가 압력에너지로 변환되면서 관 내부를 전파하게 된다(Kim and Lee, 1997; Lee, 1998). 이러한 수격현상을 이용하여 공급원으로부터 관 속을 흘러 떨어지는 물의 수두 차를 이용하여 물의 일부를 보다 높은 곳으로 이동시키는 펌프를 수격펌프(water hammer pump, 또는 hydraulic ram pump)라고 한다(Iversen, 1975; Young *et al.*, 1997).

수격펌프를 이용하여 낮은 곳의 물을 높은 곳으로 이동시키는 원리는 다음과 같다(Fig. 1). 유도관(drive pipe)을 통해 수원지로부터 물이 중력의 의해 공급되며 펌프 안에서 유입속도와 운동에너지가 증가하며 배출 밸브(waste valve)를 통해 일부가 유출되면서 마찰력이

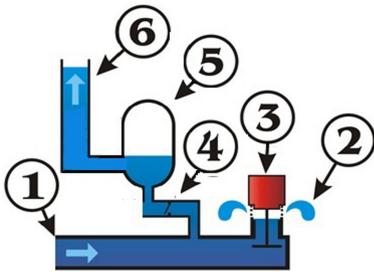


Fig. 1. Basic components of a hydraulic ram pump (modified Wikipedia; ① Inlet: drive pipe, ② Free flow at waste valve, ③ Waste valve, ④ Delivery check valve, ⑤ Pressure vessel, ⑥ Outlet: delivery pipe).

증가한다. 마찰력이 증가함에 따라 배출밸브가 닫히게 되면 압력 상승에 의해 수격현상이 발생하고 이송체크 밸브(delivery check valve)가 열리며 압력챔버 (pressure vessel) 내부에 압력이 증가하게 되며 증가된 압력에 의해 이송관을 따라 유체가 상부로 이동하게 된다. 이송관(delivery pipe) 출구(outlet)를 통해 유체가 이동하면 압력과 유속이 감소하여 그 흐름이 역으로 전환되게 된다. 이때 이송 체크밸브는 닫히면서 상부로 이송된 유체가 하부로 빠져나가지 못하도록 한다. 하부에 남아 있는 잔여 유체는 배출밸브를 통해 유출된다. 위와 같은 과정이 연속적으로 진행되면서 유체는 지속적으로 운반과 배출이 병행되면서 고도가 더 높은 곳까지 이동하게 되는 것이다.

수격펌프를 이용하여 물을 높은 고도로 끌어올리기 위해서는 취수원으로부터 지속적으로 물이 공급되어야 하고 공급되는 물을 수격펌프에서 취수원보다 높은 고도의 저류지 또는 배수지까지 보내기 위해서는 공급수두(supply head)를 형성시킬 필요가 있으며 공급수두는 저류지까지의 수두(delivery head)를 고려하여 설정해야 한다(Fig. 2).

수격펌프는 동력펌프에 비해 전기가 필요하지 않기 때문에 친환경적이라고 할 수 있다. 또한 쉽게 제작이 가능하고 설치도 용이하기 때문에 산업용이나 가정용 등 다양한 분야에 활용 가능하다. 그러나 수격펌프를 가동시키기 위해서는 지속적으로 일정량의 물이 공급되어야 하고 일정한 수두 차가 형성되어야 하기 때문에 배출되어 소실되는 물이 많으며 수량조절도 어렵다는 단점이 있다(Table 1).

수격펌프는 1770년대에 많은 사람들에 의해 개발되기 시작하였으며(Whitehurst, 1775; Thomas, 1994; Gardner-Thorpe *et al.*, 2007) 성능 및 효율성 시험,

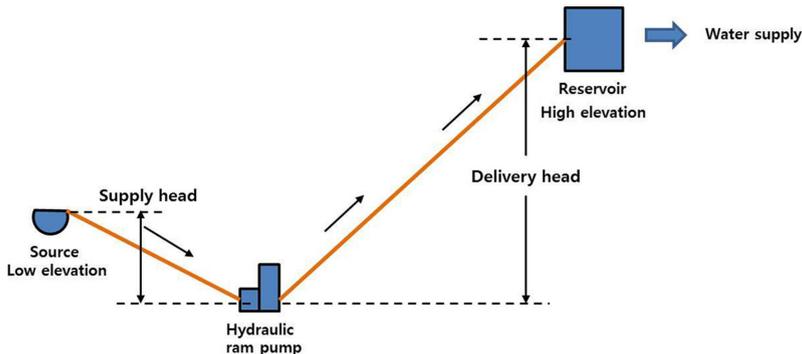


Fig. 2. Diagram for water supply system using hydraulic ram pump.

Table 1. Characteristics of electric and hydraulic ram pump

Pump	Advantage	Disadvantage
Electric pump	<ul style="list-style-type: none"> • Easy to control • No power 	<ul style="list-style-type: none"> • Electric power needed • Difficult to control
Hydraulic ram pump	<ul style="list-style-type: none"> • Environmental friendly • Easy to manufacture and install 	<ul style="list-style-type: none"> • Too much water loss • Noisy, and bigger than electric pump

현장 적용성 연구(Gregory, 1996; Green and Carter, 2002; Yang *et al.*, 2014; Reza *et al.*, 2015) 등을 통해 다양한 분야에 응용되고 있다(Sawyer and Maratos, 2001; Maratos, 2002). 현재는 인터넷을 통해 일반인들도 간단한 설명과 부속품으로 가정용 수격펌프를 쉽게 만들 수 있을 정도로 널리 알려져 있으며 동남아시아, 아프리카 등 전기 이용이 제한적인 지역에서 물을 공급하기 위한 적정기술로서 널리 이용되고 있다.

본 연구는 수격펌프를 이용하여 직접 용수 공급 가능성과 효율성을 평가하기 위하여 수행되었다.

2. 연구지역 및 연구방법

2.1. 연구지역

연구지역은 충청북도 보은군 마로면과 경상북도 상

주시 화남면의 임곡리로 행정구역상 두 지역의 경계로 나누어져 있는 곳이다. 이 지역은 광역상수도가 들어오지 않아 생활용수 및 농업용수를 마을상수도에 의존하고 있다. 보은군 임곡리는 취수원으로서 계곡수를 이용하고 있고 상주시 임곡리는 지하수 관정을 개발하여 사용하고 있는데 행정구역이 나누어져 있어 각각 물관리를 하고 있다. 보은군 임곡리에서 사용하는 계곡수는 수량적으로 큰 문제가 없지만 상주시 임곡리에서 사용하는 지하수 관정에서는 양수할 수 있는 양이 하루에 20 m³도 채 되지 않기 때문에 신규 수원 개발이 필요한 상황이다.

상주시 임곡리에는 과거 1920년대부터 1990년대 초까지 석탄광(전호탄광) 개발이 이루어졌던 곳으로 석탄을 개발하기 위한 갱도가 지하에 분포되어 있다. 이 폐광 갱도로부터 다량의 지하수가 지속적으로 유출되

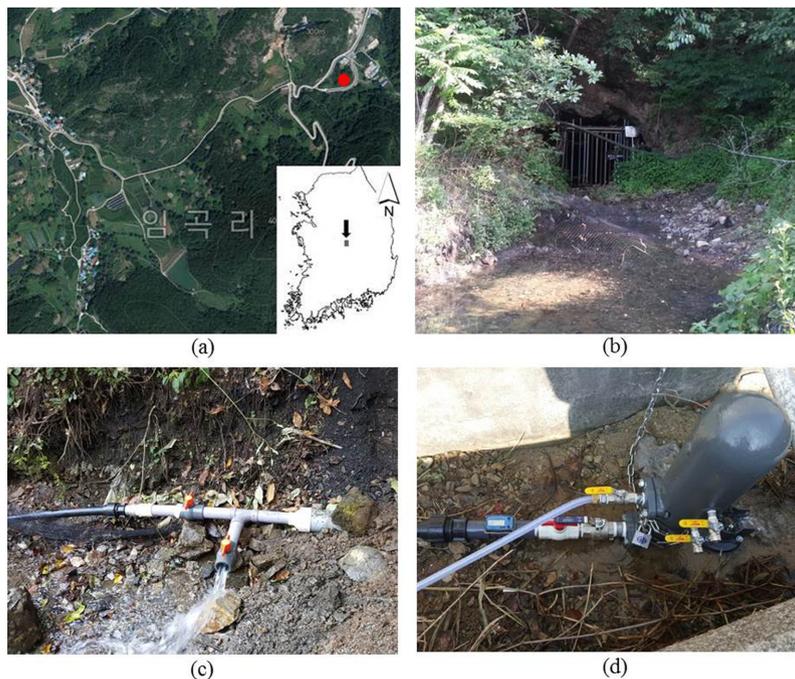


Fig. 3. Site location of water supply system using hydraulic ram pump (a: site location, b: mine entrance, c: pipe line, d: hydraulic ram pump; basemap source: <http://map.daum.net>).

고 있어 이 물을 마을에 공급하기 위해 전력이 필요 없는 수격펌프를 설치하여 활용가능성을 파악하고자 하였다(Fig. 3(a, b)).

2.2. 연구방법

수격펌프는 물의 낙차를 이용하는 것으로 펌프로 유입되는 물의 초기 수두보다 펌프가 아래쪽에 위치해야 하며 지속적으로 물이 공급되어야 한다. 수격펌프는 Green & Carter Ltd의 1.5인치 Vulcan Ram Pump(무게 54 kg)를 사용하였고 공급원인 갱도 입구로부터 수두 낙차를 고려하여 탄광 입구에 공급배관을 새로 설치하였으며, 공급배관은 구경이 40 mm인 PE관이다. 갱도 유출지점에는 저류지가 있는데 수격펌프를 사용하지 않을 경우를 대비하여 저류지로 유출시키거나 유량을 조절할 수 있도록 우회관로 및 조정밸브를 추가로 설치하였다(Fig. 3(c, d)).

수격펌프의 효율성을 시험하기 위해 수원지(갱도 입구)와 수격펌프의 수두차인 공급수두를 약 6 m 정도로 설정하였고 수원지와 수격펌프까지의 총 길이는 약 90 m 정도 되었다. 수격펌프로부터 운반되는 유량은 저류지까지의 고도 차(이송수두)에 따라서 다르기 때문에 고도가 다른 3개지점에서 (수격펌프와의 고도 차: 18, 30, 40 m) 운반되는 유량을 측정하였으며 40 m 지점까지의 배관의 총 길이는 약 225 m 정도 되었다. 또한 물을 이동시키는 배관의 직경에 따라 배출되는 유량이 다를 수 있으므로 관 직경에 따른 효율성을 평가하기 위해 2개의 배관직경(20, 16 mm)에 대하여 유량을 측정하였다.

3. 연구결과 및 토의

3.1. 연구지역의 물 수요량 분석

상주시 통계연보에 의하면 상주시 화남면 임곡리에 거주하는 주민은 총 29세대 49명이다(<http://www.sangju.go.kr>). 상수도 통계에 의하면 2013년 기준으로

우리나라 상수도 1인 1일당 평균 급수량은 335리터인데 행정구역별로는 특·광역시 305리터, 시지역은 427리터, 읍지역은 155리터로서 차이가 매우 크다. 그러나 전국 1인1일당 평균 물 사용량은 282리터이고 특·광역시가 279리터, 시지역은 284리터, 읍지역은 285리터로서 물 사용량이 행정구역별로 차이가 거의 없다 (Ministry of Environment, 2014). 읍지역에서는 물 사용량과 급수량 차이가 많이 나기 때문에 통계적으로 상수도 공급의 취약성이 그대로 드러나고 있다.

상주시 임곡리 지역에서는 기존 취수정에서의 취수할 수 있는 수량이 일 20 m³ 미만이며 이 양도 가뭄이 들게 되면 절반도 채 되지 않기 때문에 신규 취수원 개발이 절실한 상황이다. 또 다른 문제는 이곳 소규모 급수시설의 관로 누수율이 파악이 되지 않는 것이다. 우리나라 전국 평균 상수도 누수율은 2013년 기준 10.7%라는 통계치가 있지만 이는 전용 상수도를 기준으로 제시되어 있는 수치이며 마을상수도나 소규모 급수시설의 경우에는 누수율이 정확히 파악되어 있지 않다. 전문가들에 따르면 이러한 소규모 급수시설은 관로 누수율이 50%이상 될 수도 있다고 한다.

이상과 같은 우리나라 읍지역의 1인 1일당 평균 물 사용량 285리터를 기준으로 계산하면 상주시 화남면 임곡리에 필요한 수량은 일 14 m³ 정도이다. 그러나, 관로 누수율을 50%정도로 예상한다면 최소한 하루에 28 m³ 정도의 수량이 지속적으로 공급될 수 있어야 한다.

3.2. 유출수 수량 및 현장 수질 모니터링

수격펌프를 이용하여 물을 공급하기 위해서는 물공급 원수에 대한 조사가 필수적이다. 원수는 앞서 언급했듯이 석탄광 폐광 갱도 입구에서 지속적으로 유출되는 물이며 이를 대상으로 2015년 7월부터 11월까지 유출량과 현장 수질을 측정하였다. 유출량은 파이프라 인과 유량계를 설치하여 측정하였고 현장 수질은 온도, pH, 전기전도도(EC), 용존산소농도(DO), 산화환원전위(ORP)를 측정하였다(Table 2).

Table 2. Measurements of the discharge rate and in-situ water quality for the mine drainage water

Date	Discharge rate (m ³ /day)	Temperature (°C)	pH	EC (µS/cm)	DO (mg/l)	ORP (mV)
2015.07.30	236	12.8	7.29	428	9.10	210.7
2015.09.24	270	12.5	7.22	468	8.81	157.4
2015.10.21	282	12.7	7.14	468	8.75	225.0
2015.11.03	264	12.4	7.23	507	8.72	181.7
Average	263	12.6	7.22	468	8.85	193.7

유출량 측정결과, 파이프라인을 통해 유출되는 유량은 약 236~282 m³/day로 월별 유량 변동이 적으며 평균적으로 260 m³/day 이상이 안정적으로 유출되었다. 파이프라인 밖으로 흘러나가는 유출수량도 상당한 양이어서 이를 감안하면 강도로부터 유출되는 물은 최소 300 m³/day 이상이 될 것으로 판단된다.

유출수는 온도 12.4~12.8°C, pH 7.14~7.29, EC 428~507 μS/cm, DO 8.72~9.1 mg/l, 그리고 ORP 157.4~225.0 mV 로 비교적 안정된 현장수질을 유지하였다.

3.3. 수격펌프 효율성 평가

수격펌프 시험 결과, 유입량이 260 m³/day 일 때 운반된 유량은 이송배관 직경이 20 mm인 경우 Δh = 18 m 지점에서 8.6 m³/day, Δh = 30 m 지점에서는 3.98 m³/day,

그리고 Δh = 40 m 지점에서는 2.35 m³/day로 측정되었으며 이송배관 직경이 16 mm인 경우에는 Δh = 18 m 지점에서 10.8 m³/day, Δh = 30 m 지점에서는 4.39 m³/day, 그리고 Δh = 40 m 지점에서는 2.59 m³/day로 측정되었다(Table 3, Fig. 4(a)).

수격펌프의 효율성(μ)은 물 공급량 대비 운반되는 물의 양을 가지고 다음과 같은 식에 의해 계산된다 (Inthachot, 2015).

$$\mu = \frac{q \times h}{H \times Q} \tag{1}$$

여기서, Q는 공급되는 물의 양(m³/day)이고, H는 취수지점에서 수격펌프까지의 고도차(m), q는 수격펌프에서 이송되는 물의 양(m³/day), h는 수격펌프로부터 이송되는 고도차(m)이다. 이송배관 직경에 따른 효

Table 3. Test results of the hydraulic ram pump

Supply head		In flow (supply)				
		Supply Pipe diameter	40 mm			
6 m		Supply flow rate				
		average 260 m ³ /day				
Out flow (delivery)						
Point	Delivery pipe diameter 20 mm			Delivery pipe diameter 16 mm		
	Delivery head (Δh, m)	Flow rate (m ³ /day)	Efficiency (%)	Delivery head (Δh, m)	Flow rate (m ³ /day)	Efficiency (%)
1 step	18	8.6	9.9	18	10.8	12.5
2 step	30	3.98	7.7	30	4.39	8.4
3 step	40	2.35	6.0	40	2.59	6.6

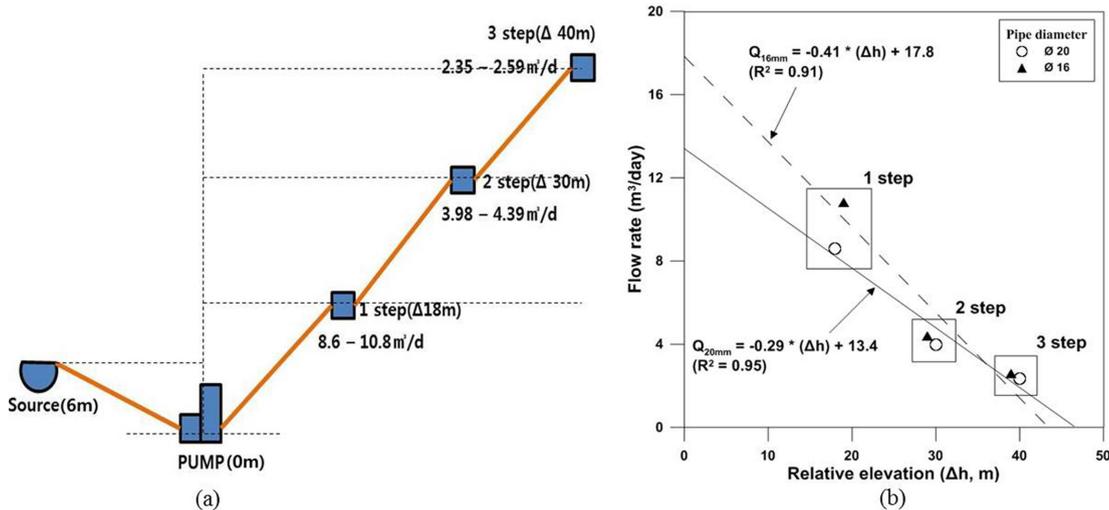


Fig. 4. Field test of feasibility (a) and efficiency (b) by relative elevation and pipe diameter.

율성은 직경 20 mm 배관에서 6.0~9.9%의 효율성을 보였으며 16 mm 직경에서는 6.6~12.5%의 효율을 보이는 것으로 측정되었다. 수격펌프의 효율은 각 제조사 별로 다르지만 일반적으로 10~20%(1:9, 2:8)정도이다.

이번 연구결과 해당 수격펌프의 효율은 수격펌프로부터 이송되는 고도차와 공급배관의 직경에 따라서 다른 결과를 나타내었다. 이송시키고자 하는 고도가 높아질수록, 공급배관의 직경이 클수록 효율성은 떨어지는 것을 알 수 있었다.

또한, 현장에서 측정한 값을 이용하여 이송배관 직경(\varnothing), 고도차에 따른 유량(Q)을 다음과 같은 간단한 선형식으로 나타낼 수 있다(Fig. 4(b)).

$$Q = -0.29 \times \Delta h + 13.4 \text{ (m}^3\text{/day)} \quad (\varnothing = 20 \text{ mm}) \quad (2)$$

$$Q = -0.41 \times \Delta h + 17.8 \text{ (m}^3\text{/day)} \quad (\varnothing = 16 \text{ mm}) \quad (3)$$

따라서, 향후 수격펌프의 효율성을 증가시키기 위해서는 초기 수원지와 수격펌프와의 수두 차를 증가시키고 저류지까지 운반되는 이송배관의 길이를 최소화 한다면 수격펌프의 효율을 높일수 있을 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 전기가 필요 없는 수격펌프는 실제로 공급원과 펌프의 수두차를 이용해 고지대까지 물을 운반할 수 있는 능력을 가지는 것으로 평가되었다.
- 수격펌프로부터 운반되는 물의 유량은 펌프와 배출 지점의 고도 차에 많은 영향을 받는 것으로 파악되었으며, 그 외에도 배관의 직경(배관내의 물의 양)도 중요한 변수가 된다는 것을 알 수 있었다.
- 수격펌프를 이용한 물공급 시스템은 현장상황에 적합한 설계를 통해 용수공급량 증가 또는 효율성을 증가시킬 수 있는 것도 확인하였다.

이번 현장 검증을 통해 산간지역 등에서 전기 없이 물을 공급하는데 있어 수격펌프를 이용 가능 할 것으로 판단되며, 특히 여름철의 하천 또는 계곡에서 유출되는 물을 수격 펌프를 통해 고지대에 저장시켜 물이 부족 할 때 사용 할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원 주요사업 '복합 인공

함양 기법을 이용한 지하수 확보·활용 기술 개발(15-3415)에 의해 지원되었습니다.

References

- Gardner-Thorpe, C., Pearn, J. and Gardner-Thorpe, D. (2007) Alterations without attendance, *J. Hydraul. Eng.*, v.133, p.463-467.
- Green and Carter. (2002) Inventors and patentees of the hydraulic ram principle in 1774, <http://www.greenand-carter.com>.
- Gregory, D.J. (1996) Hydraulic ramp pumps, *Biological and Agricultural Engineering*, North Carolina State University, North Carolina Cooperative Extension Service. Publications Number: EBAE p.161-93.
- Inthachot, M., Saehaeng, S., Max, J.F.J., Muller, J. and Spreer, W. (2015) Hydraulic ram pumps for irrigation in Northern Thailand, *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, v.5, p.107-114.
- Iversen, H.W. (1975) An analysis of the hydraulic ram, *J. Flui. Eng.*, v.97, p.191-196.
- Kim, K.-Y. and Lee, Y.-H. (1997) Waterhammering on pump pipeline systems, *J. Korean Soc. of Marine Eng.*, v.21, p.331-335.
- Kwon, H.-J. (2012) Please explain what water hammer is, and explain the damage cases and prevention measures for that, *Korean Soc. of Civil Eng.*, v.60, p.128-131.
- Lee, M.H. (1998) An analysis of water hammer in pipeline systems with pump, *J. Korean Soc. of Marine Eng.*, v.22, p.92-99.
- Maratos, D.F. (2002) Technical feasibility of wavepower for seawater desalination using the hydro-ram (Hydram), *Desalination*, v.153(1), p.287-293.
- Ministry of Environment (2014) 2013 Statistics of waterworks. Ministry of Environment, 536p.
- Reza, F.-A., Babak, L.-A. and Alireza, K. (2015) Determine the efficiency of hydraulic ram-pumps, *E-proceedings of the 36th IAHR World Congress*, p.1-8.
- Sawyer, R.A. and Maratos, D.F. (2001) An investigation into the economic feasibility of unsteady incompressible duct flow (waterhammer) to create hydrostatic pressure for seawater desalination using reverse osmosis, *Desalination*, v.138, p.307-317.
- Thomas, T.H. (1994) Algebraic modeling of the behavior of Hydraulic ram pumps, *Development technology unit, School of Engineering, University of Warwick, Working paper No.41*, 23p.
- Whitehurst, J. (1775) Account of a machine for raising water, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, v.4.
- Yang, K.-L., Li, J.-Z., Guo, Y.-X., Fu, H., Guo, X.-L. and Wang, T. (2014) Design and hydraulic performance of a novel hydram, *11th International Conference on Hydroinformatics, HIC 2014*, p.108.
- Young, B. (1997) Design of homologous ram pump, *Journal of Fluids Engineering*, v.119, p.360-365.