

# 수압의 변천과 특성

## History and Properties of the Water Hydraulics

김성동 · 함영복 · 윤소남

Sung Dong Kim, Young Bog Ham and So Nam Yun

### 1. 수압의 변천 역사

유체를 매개체로 하여 동력을 전달하는 장치로는 수압이 맨 처음으로 시작되었다. 예를 들어 고대 로마 시대에 Fig. 1에서 보여주는 바와 같은 대규모 수로시설이 시작되었으며, 주거지역까지 연결되는 근대적인 수도 배관망과 유사한 수도 시설이 존재하였다.

하지만 근대적인 수압 장치의 시초는 1780년대에 개발된 물을 이용한 프레스로 보고 있으며, 1850년대 산업 혁명 시기에 수압이 번성하였다. 하지만 20세기 초반에 장거리 이송에 효율적인 에너지인 전기에너지의 발전과 유압이 출현하면서 수압은 쇠퇴하기 시작하였다.

1970년대에 유압의 치명적 약점인 기름 누출로 인한 오염과 화재 위험성이 크다는 문제점을 해결할 수 있는 수압에 대한 관심과 연구가 주목받기 시작하였다.(Fig. 2 참조)



Fig. 1 Roman water path facilities

### 2. 수압의 감쇠 요인

동력을 전달하는 매개체로서 물은 기름에 비교할 때 환경 친화성과 화재 안전성을 제외한 거의 모든 특성이 열등하다. 특히 낮은 윤활 성능과 높은 누설, 낮은 내마모성, 낮은 내부식성 등이 치명적인

약점이다. 20세기 초반에 수압이 쇠퇴하게 된 세부적인 원인을 열거하면 다음과 같이 정리된다.

#### (1) 부식(corrosion)

물에 용해된 산소( $O_2$ ), 염소( $Cl$ ), 이산화탄소( $CO_2$ ) 등은 파이프 배관과 수압 부품을 부식시킨다. 특히 염소 성분은 스테인리스 스틸까지도 부식시킨다. 그뿐만 아니라 물속에 서식하는 미생물도 부품의 부식을 증가시키게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 가격이 비싼 내부식 재료를 사용해야 하는데 비용의 증가가 수반된다.

#### (2) 동결

물은  $0^{\circ}C$ 에서 동결하는데, 동결할 때에 9% 정도 체적이 팽창하여 부품의 손상을 초래한다. 그러므로 열대지방을 제외하고는 수압을 이용한 실외장치로 적용이 쉽지 않다. 실내 장치라고 하더라도 실내 온도의 제어가 되지 않으면 적용이 어렵다. 또 적도 지방이라고 하더라도 물의 비등점( $100^{\circ}C$ )이 낮으므로 낮 기온이  $50^{\circ}C$ 가 넘는 사막과 같은 환경에서는 적용이 쉽지 않다.

#### (3) 낮은 점도

물의 점도는 일반적인 유압유의 점도의 1/30 정도로 낮은 수준이다. 물의 점도가 낮으므로 부품 사이에 누설이 크고, 윤활성이 떨어지는 치명적인 단점을 초래한다.

#### (4) 미생물

파이프 배관이나 필터에 미생물이 집적되면 유체의 유동 저항과 동력 손실이 증대한다. 그뿐만 아니라 미생물로 인하여 유발되는 부식이 발생하고 악취를 풍기며 궁극적으로는 부품의 기능에 장애를 일으킨다.

#### (5) 높은 체적 탄성 계수

물의 체적 탄성 계수는 기름의 체적 탄성 계수의 1.5 배 정도로 크다. 유체의 탄성 계수가 큰 경우에 수격 현상(water hammering)이 심각해지며, 수격 현상으로 인한 침식(erosion)이 증대한다. 반면에 구동체의 제어 정밀도와 응답 성능은 더욱 우수해지는 장점도 존재한다.

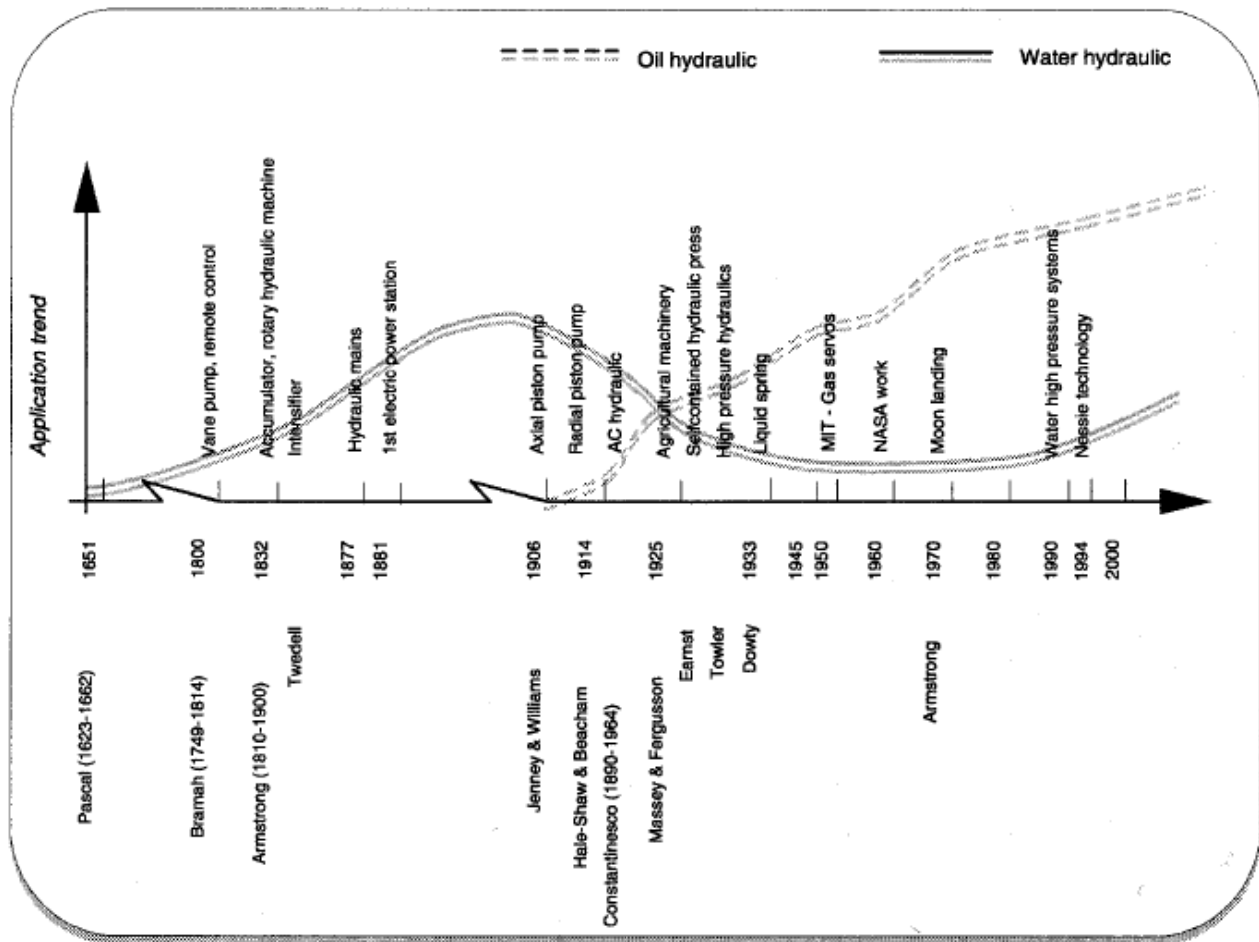


Fig. 4 The historical development of water and oil hydraulics (Conrad 1998)

(6) 공동화(cavitation)

공동화 현상은 유체가 액체가 아닌 기체 상태로 존재하는 것으로서 유체의 증기압(유체가 기체 상태로 변화하는 최대 압력)이하에서 유체가 기화된 상태로 존재하는 것이다. 더욱 엄밀한 의미에서는 유체에 용해된 가스나 미세한 기포 등이 집적하여 공기 방울로 분리되는 경우도 포함한다. 물의 증기압이 기름의 증기압보다 높으며, 유체의 기화와 미세 기포들의 집적이 발생할 확률이 물이 기름보다 높아서, 물이 쉽게 공동화 현상을 초래한다. 공동화 현상은 저압부에서 생성된 기포가 고압부에서 붕괴되는 과정에 높은 충격 압력을 발생하여 부품 표면의 침식을 유발하며, 기포 상태로 유체에 잔존하는 경우에는 작동체의 응답 성능과 제어 정밀성을 떨어뜨린다.

(7) 스케일(scale, 물 때)

스케일은 물속의 무기질이 부품 표면에 점착하는 현상으로서 '물 때'로 호칭할 수 있다. 부품 틈새에 집착하는 스케일은 부품의 작동을 고착시키는 고장

을 유발할 수 있다. 또 물속의  $Ca$  이온과  $Mg$  이온이 감소하여 윤활성을 감소시키며, 부품의 섭동 면에 마멸을 증대시킨다.

3. 수압 재출현의 유발 인자

1970년대에 들어서면서 수압이 다시 출현하기 시작하였다 수압의 주된 장점은 환경 친화성과 안전성으로 요약할 수 있지만, 앞으로 수압이 발전할 가능성을 염두에 두고 세부적인 사항들까지 열거하였다.

- (1) 수압 장치의 사용자와 작업자의 안전과 화재 예방에 대한 안전 의식의 증가
- (2) 기름 누출에 대한 우려와 환경 보호에 대한 요구의 증가
- (3) 제품 소비자의 위생과 건강에 대한 관심 증대
  - 식품 산업 (도살장, 육류 포장, 유류제품 산업)
  - 제약회사
  - 석유계 기름과 반응하는 화학제품의 산업

(4) 수압 시스템은 초기 설치 비용은 증대하나 유지 비용이 감소하여 장기 생산 비용이 감소함.

(5) 수압의 문제점들을 해결할 수 있는 기술의 발전

① 저가 내부식성 재료 (예. 스테인리스 스틸, 엔지니어링 플라스틱)

② 누설을 줄일 수 있는 정밀 가공 기술의 향상

③ 우수 윤활성 재료 (예. 엔지니어링 플라스틱, PEEK)

④ 미생물 감소 기술의 발전

⑤ 물의 동력 문제를 해결할 수 있는 환경 친화 부동액 개발

(6) 수돗물은 위생적이며, 풍부하며, 재사용이 가능하며, 구매와 저장 처리 비용이 낮다. 수돗물을 작동 매체로 사용할 수 있다.

(7) 낮은 보험료

(8) 물은 기름보다 열 전도성이 높으며, 냉각 용량이 크다. 물 저장 용기의 크기를 줄일 수 있다.

(9) 간접 관리 비용이 국제 유가에 무관하며 저렴하다.

(10) 기계 작동 유체에 대한 법률 규제가 강화됨.

#### 4. 물의 특성

수압 시스템에서 물의 특성이 매우 중요하므로 자세히 소개한다.

(1) 밀도(density)

밀도는 단위 부피당 질량으로 정의되며, 4°C 물이 밀도로 1g/cm<sup>3</sup>이며, 기름 밀도에 약 1.15배이다. Fig. 3에서 보여 주듯이 온도 0°C에서 100°C로 온도가 변화할 때 물의 밀도는 4~5% 변화한다. 또 Fig. 4에서 보여 주듯이 0bar에서 1000bar로 압력이 증대할 때 물의 밀도는 4% 증대하는 반면에 기름의 밀도는 5.5% 증대하여 변화 폭이 크다.

물의 밀도가 기름 밀도보다 크므로 수압 시스템이 유압 시스템보다 중량이 더 무거울 가능성이 높다.

(2) 비열(specific heat)

50°C에서 물의 비열은 4.180 kJ/(kg °C)로 기름의 비열 1.900 kJ/(kg °C)보다 약 2.2 배 크다. 비열은 열 흡수 능력을 의미하며, 저장 탱크의 열용량이 비열의 크기에 비례한다. 같은 열 흡수 능력을 기준으로 할 경우에 탱크의 용적을 소형화할 수 있음을 의미한다.

Fig. 5에서 온도 변화와 압력 변화에 대한 물 비열의 변화를 보여 주는데, 압력이 100 bar 이내에서는 비열의 변화가 비선형적이며 변화량도 1% 이내로 매우 작으나, 300 bar에서는 비열 변화는 2% 수준이다.

기름 비열의 변화율의 정량적 데이터가 생략되었지만, 일반적으로 온도 변화와 압력 변화에 대한 기름 비열의 변화율은 물이 변화율보다 크다. 이러한 경향은 비열뿐만 아니라 밀도, 점도, 체적 탄성 계수 등의 제반 물성 값에 대하여 유사한 경향을 가진다.

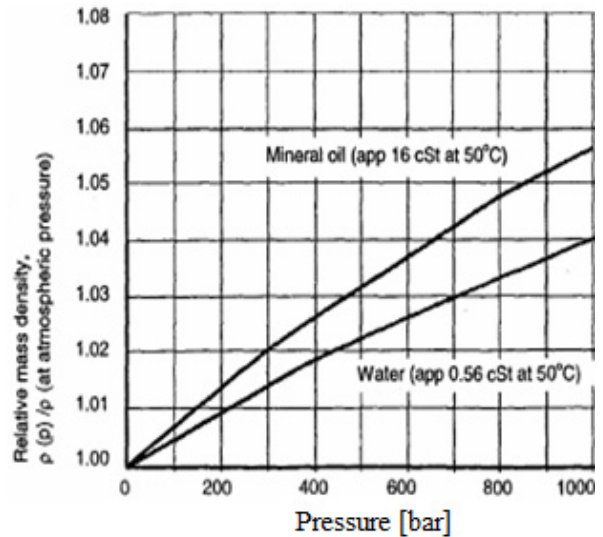


Fig. 5 Comparison of the mass density of water with that of mineral oil at a given temperature as pressure varies (Trostmann et al. 2001)

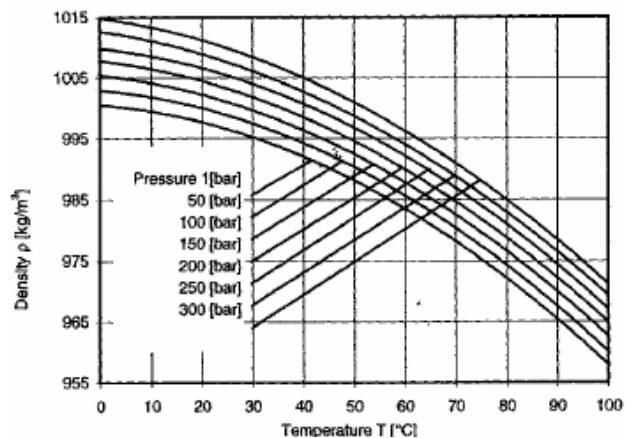


Fig. 6 Variation of mass density of pure water with temperature and pressure (Trostmann et al. 2001)

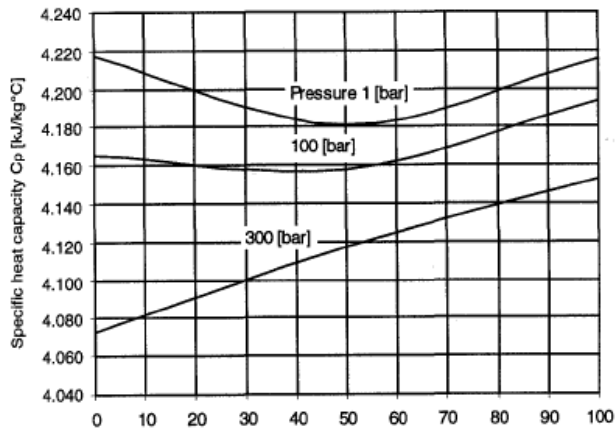


Fig. 7 Specific heat of water as a function of temperature and pressure (Trostmann et al. 2001)

(3) 점도(viscosity)

물의 점도는 Table 1에서 보여 주듯이 약 1 cSt(센티 스토크)로 일반적인 유압 작동유의 낮은 점도 값에 해당하는 30 cSt의 1/30 수준이다. 이처럼 물의 낮은 점도가 수압 시스템의 가장 중요한 특성을 결정짓는 요소이며, 수압의 근본적인 문제점을 해결하는 방향도 낮은 점도의 해결하는 것이다. 예를 들어 같은 누설 량을 기준으로 할 때 수압 부품의 가공 공차와 틈새 크기는 유압 부품의 공차와 틈새의 1/3 수준으로 정밀해야 한다.

Table 1 Viscosity of water and a mineral oil and its effect

	water	Oil	
viscosity(cSt)	1	30	
viscosity change rate	20~70°C	1/3 reduced	1/10 reduced
	1~200 bar	infinitesimal	1.7 times more
leakage	30 times more than oil	1	
clearance	1/3 less than oil	1	
flow velocity	high	low	
frictional loss	low	high	

$$\frac{q_{l,water}}{q_{l,oil}} = \frac{\mu_{oil}}{\mu_{water}} \cdot \frac{h_{water}^3}{h_{oil}^3} \quad (1)$$

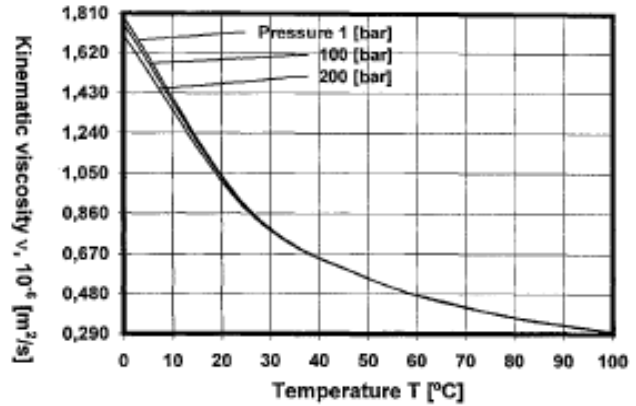


Fig. 8 The kinematic viscosity of water as a function of temperature and pressure (Trostmann et al. 2001)

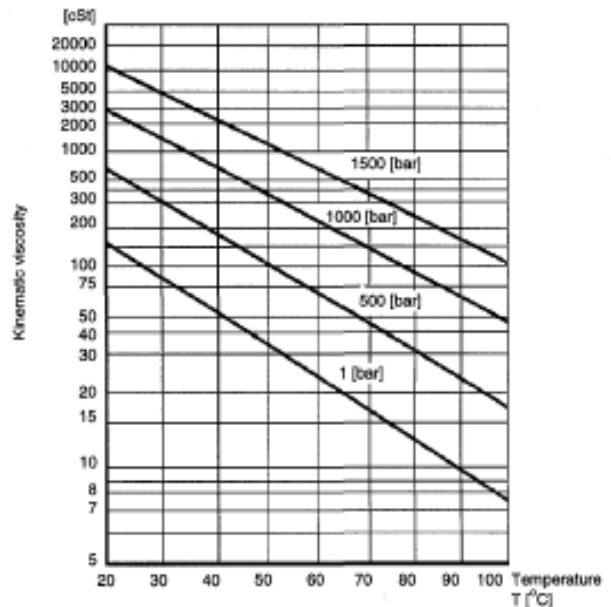


Fig. 9 Variation the kinematic viscosity of a mineral oil with temperature and pressure (Trostmann et al. 2001)

(4) 열 전도율(thermal conductivity)

물의 열 전도율은 0.6 W/(m °C) 정도이며, 기름의 열 전도성 0.12 W/(m °C)의 5배 정도로 크다. 즉 물의 냉각 능력이 기름의 냉각 능력보다 5 배 큰 것인데, 배관과 유체 저장 탱크에서의 방열량이 훨씬 크다는 의미이다.

물의 온도 변화와 압력 변화에 대한 열 전도율의 변화율은 그렇게 크지 않음을 보여 주며, 실제로 기름의 열 전도율 변화율보다 상대적으로 작다.



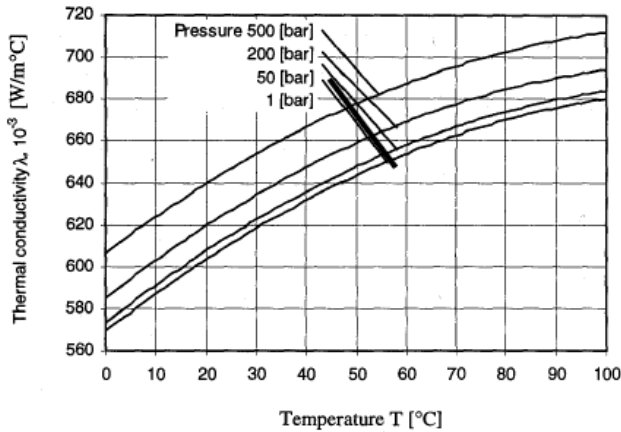


Fig. 10 Thermal conductivity of water as function of temperature and pressure (Trostmann et al. 2001)

(5) 증기압( vapor pressure)

Table 2와 Fig. 9에서 보듯이 물의 증기압이 기름의 증기압보다 100 배 이상 높다. 증기압이 높다는 의미는 펌프 흡입부가 공동화될 가능성이 높다는 의미이며, 그만큼 공동화 방지를 위한 대책이 중요함을 의미한다.

Table 2 Vapor pressure of water and a oil

	water	oil
vapor pressure at 50°C	0.12 bar	10-6 bar
cavitation	high	low

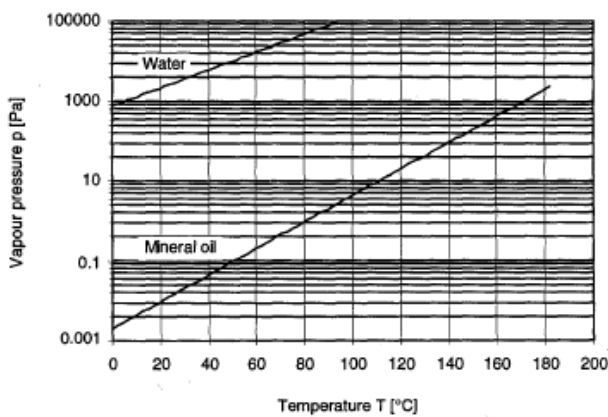


Fig. 11 Comparison of the vapor pressure with that of mineral oil as a function of temperature (Trostmann et al. 2001)

(6) 체적 탄성 계수 (bulk modulus)

기포가 존재하지 않는 순수한 물의 체적 탄성 계

수는  $2.4 \times 10^4$  bar 정도이며, 기름의 체적 탄성 계수는  $1.6 \times 10^4$  bar보다 50 % 더 크다. 하지만 체적 탄성 계수는 식 (2)(배관의 탄성 효과는 매우 큰 것으로 간주한 경우)에서 보여 주는 바와 같이 유체에 혼입된 기포의 정도에 따라 크게 영향을 받는다.

$$\frac{1}{\beta_e} = \frac{V_g}{V_{tot}} \cdot \frac{1}{\beta_g} + \frac{1}{\beta_l} \quad (2)$$

식 (2)에서  $\beta_e$ 는 유효 탄성 계수,  $\beta_l$ 는 액체 탄성 계수,  $\beta_g$ 는 기포 탄성 계수,  $V_{tot}$ 는 총 용적,  $V_g$ 는 기포 용적을 각각 의미한다.

Fig. 10에서 보여 주는 바와 같이 보통 물의 공기 용해도가 기름의 공기 용해도의 20 % 수준에 불과하다. 또 유체 속의 기포가 분리되어 배출되는 속도는 유체의 점도에 반비례하며, 물속의 기포가 분리되는 속도가 기름 속의 기포가 분리되는 속도의 30 배에 달한다. 물의 낮은 공기 용해도와 기포 분리 속도로 인하여, 공기 혼입도가 기름의 혼입도보다 매우 낮을 것이며, 결과로 얻어지는 유효 탄성 계수도 높을 것이다. 물의 유효 탄성 계수가 높으므로 정밀한 제어 성능과 빠른 응답 성능을 얻을 수 있는 장점이 있지만, 수격 현상의 압력 상승의 정도가 더 심각한 단점도 존재한다.

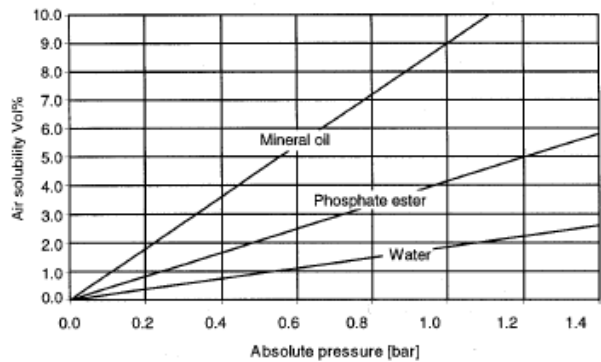


Fig. 12 Comparison of the solubility of air in water with that of other hydraulic pressure media as a function of absolute pressure (Trostmann et al. 2001)

(7) 공동화(cavitation)

공동화 현상은 유체의 압력이 증기압보다 더 낮은 경우에 발생한다. 물의 증기압이 기름의 증기압보다 훨씬 높으며, 그만큼 공동화가 발생할 가능성

도 높다. 물의 온도가 올라감에 따라 증기압이 감소하므로 공동화 현상을 피하고자 물의 온도를 낮게 관리하여야 하며, 보통 물의 온도를 50 °C 이하로 관리하는 것이 바람직하다. 또한, 펌프 흡입부와 같 대기압 이하의 저압부에서 공동화 대책을 수립하는 것이 중요하다. Trostmann 외 공동 저자들은 절대 압력으로 0.8 bar 이상으로 유지하는 것과 흡입 관로의 유속을 1.5 m/s 이하로 할 것을 추천하였다<sup>2)</sup>.

(8) 수격(water hammering)

수격 현상은 배관 속의 유체 유동이 밸브의 차단 에 의해 제한될 때에 유체의 운동 에너지가 압력 에너지로 변환되는 현상이다. 상승하는 압력  $P_{max}$  는 다음 식과 같이 표현된다.

$$P_{max} = \rho c v_o \tag{3}$$

식 (3)에서  $\rho$ 는 유체 밀도를 의미하며,  $v_o$ 는 유체 속도이다.  $c$ 는 유체의 음속(sound speed)인데 다음 식과 같이 표현된다.

$$c = \sqrt{\frac{\beta}{\rho}} \tag{4}$$

여기서  $\beta$ 는 체적 탄성 계수이다.

식 (3)과 Table 3의 예에서 보여 주는 바와 같이 물을 작동 유체로 사용하는 경우에 밀도와 유체 음속이 기름을 사용하는 경우보다 높으며, 결과로 얻 어지는 수격 현상의 압력 상승도 높다.

Table 3 Comparison of the peak pressure values of water and mineral oil in the event of a water hammer effect

	$c(m/s)$	$\rho(kg/m^3)$	$v_o(m/s)$	$P_{max}$
water	1,500	1,000	5	75.0
oil	1,300	870	5	56.5

5. 결 론

수압이 현재 유압의 고유 분야라고 할 수 있는 건설기계, 운반기계, 광산기계, 농기계 등의 산업 분야에 적용되기에는 한계가 있어 보인다. 하지만 의 료분야, 식품산업 등과 같이 친환경성이 중요한 산

업 분야에서는 존재 가치를 충분히 인정받으며, 앞으로 독자적인 발전을 할 것으로 예측된다. 또한, 수압의 문제점을 해결할 수 있는 기술의 발전과 사회 환경의 변화에 따라 수압이 뜻밖에 빠른 속도로 발전하고 적용 영역을 확대해 나갈 잠재적 가능성도 높다고 판단된다. 예를 들어서, 물의 대부분 특성이 기름의 특성보다 열등하지만, 국내외 범규가 물의 장점인 친환경성을 따르고 물의 단점은 기술적으로 해결하도록 강제한다면, 의외로 수압이 주목 받을 수도 있을 것이다.

References

- 1) Gary W. Krutz and Patrick S. K. Chua, "Water hydraulics-Theory and appliations 2004", workshop on water hydraulics, agricultural equipment technology conference (AETC'04), Louisville, Kentucky, Februrary 8-10, 2004.
- 2) Trostmann E., Frolund B., Olesen B.H. and Hilbrecht B., "Tap water as a hydraulic pressure medium", Marcel Dekker, Inc., 2001.
- 3) Trostmann E., "Water Hydraulic Control Technology", Marcel Dekker, Inc. 1966.
- 4) Trostmann T. and Clausen M., "Hydraulic components using Tap Water as pressure medium", The forth Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP'95, Tampere, Finland, pp. 942-954, Sept. 26-29, 1995.
- 5) Conrad, F., "Why use tap water hydraulic systems? It's a natural approach", paper No. 12, Proceedings of the international workshop on water hydraulic systems and applications, LyngbyDenmark, 3-4 September, 1988.

[저자 소개]

김성동

E-mail : sdkim@kumoh.ac.kr

Tel : 054-478-7395

1987년 KAIST 생산공학과 박사 과정

졸업. 1984년 대우중공업 입사, 1988년

금오공과대학교 기계공학과 조교수,

1997년 동 대학 교수. 유공압제어, 펌프,

서보밸브 등의 연구에 종사. 대한기계학회, 한국정밀공학회, 유공압건설기계학회의 회원. 공학박사



[저자 소개]



함영복

E-mail : hyb665@kimm.re.kr

Tel : 042-868-7157

2003년 금오공과대학교 기계공학과 박사. 2004년 일본 동경공대 및 야마나시대 객원연구원. 1990년~현재 한국기계연구원 극한에너지기계연구실 책임연구

원. 유압 피스톤 펌프 및 모터, 수압 피스톤 펌프, 압전 액추에이터를 적용한 펌프, 디스펜서, 약물 인젝션 디바이스 연구에 종사. 대한기계학회, 한국정밀공학회, 한국동력기계공학회, 유공압건설기계학회의 회원. 공학박사

[저자 소개]



윤소남

E-mail : ysn688@kimm.re.kr

Tel : 042-868-7155

1986년 제주대학교 기계공학과 졸업

1994년 부경대학교 공과대학 박사.

2005년 어번대 마이크로 나노시스템/재료연구실 객원연구원. 1994년~현재 한국

기계연구원 책임연구원. 스마트 액추에

이터, 유공압 밸브, 다축 시뮬레이터, 극한지 및 심해잠수정용 유압기기 개발 연구에 종사. 대한기계학회, 한국정밀공학회, 한국동력기계공학회, 유공압건설기계학회의 회원. 공학박사