

〈講 座〉

水 擊 作 用 (I)

Waterhammer

우 효 섭*
Woo, Hyo-Seop



머릿말

1. 수격작용 연구의 역사적 배경
 2. 수격작용의 기본적 해석
 3. 過渡流의 방정식(Transient Flow Equations)
 4. 特性法을 이용한 수격작용의 해석
 5. 펌프에 의한 수격작용의 해석
 6. 수력발전소에서의 수격작용의 해석
 7. Column Separations / Entrapped Air
 8. 수격작용의 완화방법
- 맺는말

記號

- | | |
|-----------------|---------------------|
| a : 壓力波의 전파속도 | L : 관의길이 |
| A : 관의 단면적 | P : 압력 |
| F : 외력 | V : 유속 |
| g : 중력가속도 | ρ : 액체의 밀도 |
| H : 水頭 | γ : 액체의 단위중량 |
| K : 액체의 체적 탄성계수 | |

머릿말

水擊作用 혹은 水擊現象(Waterhammer)은 管內 水流의 급작스러운 변화에 의한 水壓의 변화와 그에 따른 壓力波가 音波의 속도로 상·하류로 전파되는 현상이다. 수격작용이란 용어는 전통적으로 물에 의한 不定流 현상에 국한되어 사용되었으며 보다 일반적인 용어로 “Fluid Transient”(過渡 水理現象)가 쓰이며 기름에 의한 Oilhammer나 수증기에 의한 Steamhammer 등을 포함한다. 수격작용의 최근한 예로서 가정내 급수관에 수격작용의 억제시설이 잘 되어 있지 않는 경우 물이 쏟아지는 수도꼭지를 급히 잠글 때 손에 느끼는 수도관의 진동과 ‘탕탕’거리는 소음을 들 수 있다. 이러한 수격현상은 가정내 소규모 급수관에서 고층 건물의 복잡한 급배수관망이나 대규모 공장, 발전소, 장거리에 걸친 송수관 등에 이르기까지 관내의 액체의 흐름이 급격히 非定常으로 되는 경우 어디서나 발생할 수 있다.

수격작용은 관자체는 물론 펌프, 밸브, 터어빈 등 관시설물을 파손시키거나 진동, 소음 등을 야기시킴으로 대규모 건물, 공장, 발전소 등의 설계시 이에 대한 적절한 대책을 강구하는 것이 중요하다. 예로서 수력발전소의 導水管(Penstock)과 같은 고속, 고압의 관망 시스템을 설계할 경우, 그 시스템이 여러 가능성 있는 수격작용에 견딜 수 있나를 해석하여야 한다. 해석결과 그 시스템이 어느 수격작용에 견딜 수 없는 경우 그 시스템의 설계조건을 변경하거나 수격작용의 완화 및 조절장치를 고려하여 경제성 있는 범위내

우효섭 1953年 6月 3日生
 서울 송파구 가락2동 극동 Apt. 4-1406
 서울대학교 토목공학과 B. S.
 서울대학교 토목공학과/수리학 M. S.
 美 Colorado주립대 Ph. D.85/12
 現 한국건설기술연구원 수자원연구실 수석연구원
 論文: Forces in Initially Empty Pipes Subject
 to Rapid Filling 外 12편
 大對洞 506 선경(아)12-1101
 大學院 76/博士 82
 首席研究員

에서 다시 해석되어야 할 것이다. 이러한 안전설 제도 중요하지만 예기치 않은 수격작용에 의한 피해를 방지하기 위해서는 그 시스템이 항상 엄격한 운용지침에 의거 가동되는 것이 중요하다. 또한 새로운 시스템의 시운전시 시스템의 파괴 등 불의의 사고를 막기위해 여러가지 가능한 수격작용에 대한 시스템의 적응도를 점진적으로 테스트 하여야 하며 일시에 최악의 시나리오를 주지 말아야 한다.

본 강좌에서는 전체를 3부로 나누어 1부에서는 수격작용연구의 역사적 배경과 수격작용의 기본적인 해석, 2부에서는 과도류의 기본 방정식과 그 해법, 마지막으로 3부에서는 펌프에 의한 수격작용, 수력발전소에서의 수격작용, Column Separation/Entrapped Air, 수격작용의 완화방법 등을 중점적으로 논할 것이다.

우리나라의 경우 토목공학/수리학 분야에서는 이러한 수격현상을 비교적 소홀히 취급해 왔다. 그 이유로는 우리나라의 경우 대체로 管에서의 수격현상의 공학적 중요성은 토목공학/수리학분야보다는 타공학 분야에서 더 강조되어 왔기 때문이다. 특히, 1960-70년대 선진외국에서는 원자력발전소의 대대적 건설과 함께 그 안전장치의 핵심부중 하나인 냉각수 순환 및 비상시스템에서의 고압, 고열, 고속의 물/수증기의 과도흐름에 관한 연구가 집중적으로 행하여졌으며 이러한 연구는 전통적인 水理學보다는 소위 熱水力學 (Thermal Hydraulics)이라는 Discipline에서 다루어져 왔다. 그러나 전통적으로 수리학의 연구대상인 대규모 급수관망시스템, 수력발전소, 기타 펌핑시스템 등의 공학적 중요성을 고려하면 수격현상, 보다 일반적인 표현으로 과도수리현상의 연구는 수리학 분야에서 쉽게 간과될 수 없을 것이다. 또한 수격작용의 해석은 통상 부정류해석이라는 고급유체역학, 수학, 수치해석 등의 지식을 요구하므로 이에 대한 이해 및 연구는 수격작용이라는 제한된 분야를 넘어 다른 분야의 이해 및 연구에 좋은 초석이 될 수 있을 것이다.

1. 수격작용 연구의 역사적 배경

수격작용은 액체의 압축성에 기인한다. 또한 액체의 압축성은 媒質에서의 音波의 속도를 결정 지음으로 수격현상 연구는 18세기 매질에서의 음파의 속도에 관한 연구부터 시작된다. 18세기 Euler(1759)는 음파의 전파에 관한 다음과 같은 편미분방정식을 유도하였다.

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \dots\dots\dots (1.1)$$

여기서 a는 음파의 전파속도(Wave Celerity)이다. 식(1.1)의 일반해로서 Euler는 다음식을 제안하였다.

$$y = F(x + at) + f(x - at) \dots\dots\dots (1.2)$$

여기서 F와 f는 각각 반대방향으로 전파되는 파를 나타낸다. 그후 Monge(1789)는 식 (1.1)의 해를 도해법(Graphical Intergration)을 이용하여 구하였으며 特性法(Method of Characteristics)이라는 용어를 소개하였다.

수격현상에 관한 본격적인 연구는 19세기 말 미국의 Frizell(1898)의 연구부터라 할 수 있다. 그는 Utah에 있는 10,000m 가까운 수력발전소의 도수관을 이용하여 체계적인 수격현상의 연구를 시작하였다. 그의 연구는 물의 흐름이 순간적으로 정지되는 경우의 압력의 증가, 수격현상에서의 支管의 영향, 압력파의 반사 등을 포함한다. 이러한 Frizell의 연구는 다음에 소개할 동시대의 Joukowski나 Allievi의 연구에 버금가는 의의가 있으나 불행히도 그들의 연구보다 덜 알려져 왔다.

제정 러시아 시대의 19세기 말 모스크바에서 Joukowski(1900)는 길이가 수백에서 수천m, 직경이 5~15cm의 관을 이용하여 체계적인 실험과 이론에 의한 수격현상 연구를 하였다. 그 연구결과와 하나로서 단순관에서의 수격작용시 유속의 변화(ΔV)에 따른 관압력의 변화(ΔP)는 액체의 밀도(ρ)를 사용하여 다음과 같이 표시되며 그의

연구업적을 기념하기 위해 Joukowski식이라 불리운다.

$$\Delta P = \rho_a \Delta V \dots\dots\dots (1.3)$$

예로서 유속 1m/s로 흐르는 수도관의 수도꼭지를 순간적으로 잠글 때 그 수도관에서의 압력파의 전파속도를 1,000m/s로 가정할 경우 그에 따른 압력의 증가는 水頭로 100m로서 대기압의 약 10배에 달하는 강한 압력파가 발생한다.

20세기 초 Allievi(1903)는 수격현상에 관한 일반이론을 발표하였다. 수격작용에 관한 그의 이론과 차트를 이용한 해법은 60년초 컴퓨터에 의한 수치해석이 소개되기까지 보편적으로 사용되었으며, 수격현상을 다룬 일부 교과서에서는 계속 소개되고 있다. Allievi의 방법 등 1930년대까지 수격작용의 계산은 관마찰을 무시하고 관의 양끝에서의 반사계수를 고려한 소위 Arithmetic Method를 이용하여 행하여 졌다. 그 이후, Graphical Method가 소개되어 수격작용을 다루는 실무자들에게 널리 사용되었으며 지금까지 일부 사용되고 있다. 1950년부터 소개된 전자계산기의 출현은 수격현상의 연구분야에도 큰 영향을 미치어 60년대 초 특성법에 의한 차분방정식의 수치해석이 본격화되었다. 그 대표적인 예는 1964년 美토목공학회 수리학 논문지에 발표된 미시간大 Streeter교수(1964)의 논문으로 수격작용의 수치해석에 관한 체계적인 소개가 이루어졌다.

60/70년대의 구미에서의 수격현상에 관한 연구는 전술한 바와 같이 원자력발전소의 냉각수 순환장치에서의 과도수리현상에 관한 연구가 주류가 되었다. 그 결과, 관에서의 액체(물, 기름)만의 흐름에 관한 해석보다 훨씬 복잡한 Two-Phase Flow(물/수증기, 물/고체입자 등)의 수격현상 연구가 크게 진전되었다. 그 예로서 소위 Near-characteristic Method(Shin & Kot, 1978)를 이용한 과도수리현상의 2차원 해석이 소개되었다. 이러한 수격현상에 관한 많은 연구성과에도 불구하고 아직 미해결된 분야가 있으

며, 그중 하나가 관에서의 액체흐름의 분리(Cloumn Separation)와 그에 따른 기체의 방출(Air Release)에 관한 해석이다. 압력의 감소로 인해 방출된 기체는 액체속에 분포되어 소위 'Cushioning' 효과를 가져와 압력파의 전파속도를 급속히 감소시키며, 또한 서로 분리된 액체전단이 다시 합치는 경우 급격한 압력증가를 가져온다. 이러한 액체/기체의 복잡한 거동은 수학적 해석을 매우 어렵게 하며 또한 아직까지 과도 수리현상의 수학모형에 장애가 되고 있다.

2. 수격작용의 기본적 해석

그림 1과 같은 正常流의 단순관의 한쪽 끝의 밸브를 급히 폐쇄하는 경우 물의 운동 에너지는 물 자체의 탄성에너지로 바뀌어 물은 압축되고 그 압력파가 일정한 속도로 상류로 전파된다. 이러한 단순관에서의 수격작용은 다음과 같은 Control Volume의 운동량 방정식을 적용하여 해석될 수 있다.

$$\Sigma \vec{F} = \frac{d}{dt} \int_{cv} \rho \vec{V} dV + \int_{cs} \rho \vec{V} (\vec{V} \cdot d\vec{A}) \dots (2.1)$$

여기서 $\Sigma \vec{F}$ 는 Control Volume에 미치는 외력의 합이며, \vec{V} 와 \vec{A} 는 각각 속도 벡타와 Control Surface에서의 연직방향의 면적 벡타를 나타낸다. 예로서 그림 1과 같이 초기 압력과 유속이 각각 H_0 와 V_0 인 直管에서의 수격작용에 의한 압력파의 前端을 포함하는 Control Volume(CV)에 식 (2.1)를 적용하면 다음과 같이 된다.

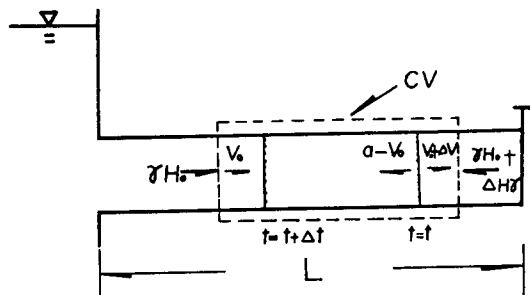


그림 1. 관에서의 수격작용의 해석

$$\frac{d}{dt} \int_{CV} \rho \vec{V} \cdot d\vec{V} = \frac{1}{\Delta t} [\rho(V_0 + \Delta V) A (a - V_0) \Delta t - \rho V_0 A (a - V_0) \Delta t] = \rho(a - V_0) \Delta VA$$

$$\int_{CS} \rho \vec{V} \cdot \vec{V} \cdot d\vec{A} = -\rho V_0^2 A + \rho(V_0 + \Delta V)^2 A = \rho(2V_0 + \Delta V) \Delta VA$$

$$\Sigma \vec{F} = \gamma H_0 A - \gamma(H_0 + \Delta H) A = -\gamma \Delta HA$$

윗 식들에서 수격작용에 의한 관단면의 변화와 액체밀도의 변화는 압력 및 속도의 변화에 비해 작다고 보아 무시하였다. 또한 관단면에서의 마찰손실을 고려하지 않았다. 이 경우 식 (2.1)은 다음과 같이 표시된다.

$$-\gamma \Delta HA = \rho(a - V_0) \Delta VA + (2V_0 + \Delta V) \Delta VA \dots\dots\dots (2.2)$$

$$\therefore \Delta H = -\frac{a \Delta V}{g} \left(1 + \frac{V_0}{a} + \frac{\Delta V}{a}\right) \cong -\frac{a \Delta V}{g} \dots\dots\dots (2.3)$$

윗 식에서 V_0 및 ΔV 값들은 a 값에 비해 통상 매우 작으므로 무시되었다. 식 (2.3)은 점진적인 밸브폐쇄에도 적용될 수 있으므로 보다 일반적으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Sigma \Delta H = -\frac{a}{g} \Sigma \Delta V \dots\dots\dots (2.4)$$

식 (2.3)과 (2.4)은 상류로 전파된 압력파가 관의 상단에서 반사되기 전까지 일반적으로 성립한다.

압력파의 전파속도 a 를 알기 위하여서 다시 그림 1과 같은 단순관의 전체길이 L 에 질량보존의 법칙을 적용한다. 관하단에서 수격작용이 발생한 후 그 압력파가 상류단에 전파되기까지는 L/a 시간이 걸리며 이 동안 관에 계속유입되는 질량은 $\rho AV_0 L/a$ 이다. 이 질량은 결국 수격작용에 의한 관의 길이방향의 팽창, 단면적의 증가, 그리고

물의 압축에 의해 수용되므로 다음과 같은 질량보존의 법칙이 성립된다.

$$\rho AV_0 \frac{L}{a} = (\rho + \Delta \rho)(A + \Delta A)(L + \Delta L) - \rho AL = \rho A \Delta L + \rho L \Delta A + \rho \Delta A \Delta L + AL \Delta \rho + A \Delta L \Delta \rho + L \Delta A \Delta \rho + \Delta A \Delta L \Delta \rho \cong \rho A \Delta L + \rho L \Delta A + AL \Delta \rho \dots\dots\dots (2.5)$$

윗 식에서 미소증가의 2차 및 3차 항은 1차 항에 비해 작으므로 모두 무시하였다. 한편, 관하단에서의 수격작용에 의한 관의 길이팽창 또한 속도 a 로 상류로 전파된다고 가정하면 관 하단에서의 속도변화 ΔV 는 水流의 완전 정지에 의한 속도변화 $-V_0$ 에 관의 팽창때문에 생기는 변화 $a \Delta L/L$ 를 고려하여 다음과 같이 표시된다.

$$\Delta V = -V_0 + a \frac{\Delta L}{L} \dots\dots\dots (2.6)$$

따라서, 식 (2.6)를 식 (2.5)에 대입하여 V_0 를 소거하면,

$$-\frac{\Delta V}{a} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \dots\dots\dots (2.7)$$

다시 식 (2.3)을 식 (2.7)에 대입하여 ΔV 를 소거하면 다음과 같다.

$$a^2 = \frac{g \Delta H}{\Delta A/A + \Delta \rho / \rho} \dots\dots\dots (2.8)$$

한편, 유체의 체적 탄성계수(Bulk Modulus of Elasticity), $K = \frac{\Delta P}{\Delta \rho / \rho}$ 를 이용하면 식 (2.8)은 다음과 같이 표시된다.

$$a^2 = \frac{K / \rho}{1 + (K/A)(\Delta A / \Delta P)} \dots\dots\dots (2.9)$$

한 관에서의 수격작용시 ΔA 와 ΔP 의 관계는 관의 구성재료 및 관의 支持상태에 따라 달라지며, 대부분의 수격작용 관련 참고서(예 : Applied Hydraulics Transients, M. H. Chaudhry, 1987 : Fluid Transients, E. B. Wylie and V. L.

Streeter, 1983)에 잘 나와 있으므로 본 고에서는 생략한다. 관면이 매우 두꺼운 경우 식 (2.9)의 $\Delta A/\Delta P$ 값이 작아지므로 이 경우 압력파의 전파 속도는

$$a = \sqrt{K/\rho} \dots\dots\dots (2.10)$$

이 되어 무한대의 액체에서의 음파의 전파속도가 된다. 따라서 관재료 및 지지상태가 일정한 경우 수격작용에 의한 압력파의 전파속도는 액체의 성질에 따라 크게 달라진다. 예로서 공기나 기체입자가 많이 포함된 하수의 경우 수격작용에 의한 압력파의 전파속도는 깨끗한 물의 경우보다 훨씬 적다는 것이 실험적으로 알려져 왔다(Pearsall, 1966). 더우기 수격작용에 의해 관내의 압력이 감소되는 경우 물속에 녹아있던 공기나 개스 혹은 vapor 등이 방출되어 물속에 널리 분포하게 되면 압력파의 전파속도 역시 작아지게 된다. 이에 대해서는 추후 제 7장에서 Column Separation과 공기방출(Air Release)에 관해 구체적으로 논할 것이다.

액체속에 고체입자들이 떠흐르는 경우 K 값과 ρ 값이 달라지므로 수격작용에 의한 압력파의 전파속도 역시 달라진다. 이 분야연구의 중요성은 광물이나 골재 등을 파이프를 통해 물과 섞어 운송하는 소위 Hydrotransport 등에서 찾을 수 있다. 이러한 액체/고체 혼합물의 흐름에서의 수격작용 연구는 60년대부터 점진적으로 행하여지고 있으며, 이에 관한 최근의 연구는 Liou(1984) 등의 연구를 들 수 있다.

참고문헌

1. Allievi, L.(1903) Teoria generale del moto perturbato dell'acqua anei tubi in pressione, Ann. Soc. Ing. Arch. italiana.
2. Chaudhry, M. H.(1987) Applied Hydraulics Transients, Van Nostrand. Reinhold Book, New York, N. Y.
3. Euler, L.(1759) De la propagation du Son, Memoires de l' Acad. d. Wiss., Berlin.
4. Frizzel, J. P.(1898) Pressures resulting from changes of velocity of water in pipes, Trans. Amer. Soc. Civil Engrs., Vol. 39.
5. Joukowski, N. E.(1898, 1900) Mem. Imperial Academy Soc. of St. Petersburg, Vol. 9, No. 5.
6. Liou, C. P.(1984) Acoustic wave speeds for slurries in pipelines, J. of Hydraulic Division, ASCE, Vol. 110, No. 7.
7. Monge, G.(1789) Graphical integration, Ann des Ing. Sortis des Ecoles de Grand.
8. Pearsall, I. S.(1965-1966) The velocity of waterhammer waves, Sym. on Surges in Pipelines, Proc. Inst. Mech. Eng., Vol. 180, part 3E.
9. Streeter, V. L.(1964) Waterhammer analysis of pipelines, J. of Hydraulic Division, ASCE, Vol. 90, No. HY4.
10. Wylie, E. B., & Streeter, V. L.(1984) Fluid Transients, Feb Press, Ann Arbor, Michigan.
11. Shin, Y. W., & Kot, C. A.(1978) Two-dimensional fluid-transient analysis by the method of near-characteristics, J. of Computational Physics, Vol. 28, No. 2.