

油壓管路에서의 캐비테이션 初生

鄭 容 吉

韓國 船 級

(1987년 7월 30일 수리)

Cavitation Inception in Oil Hydraulic Pipeline

Yong-Gil JUNG

Korean Register of Shipping

(Received July 30, 1987)

The cavitation inception in oil hydraulic pipeline was investigated experimentally and numerically. In the experiment, negative pressures below -1 MPa (absolute pressure) were measured, associated with the transient flows in oil hydraulic pipeline. These experimental results show that the common hydraulic oil in the experimental pipeline withstands large tensions.

The growth of a spherical bubble in a infinite volume of viscous compressible fluid due to a step-wise pressure drop was investigated to obtain the critical bubble radius. The calculated value of the critical bubble radius corresponding to the negative pressure measured in the experiment is so small that the premised condition about the bubble shape in the analysis is unsatisfactory. The physical significance of this calculated result implies the fact that there hardly exist free bubbles which can act as cavitation nuclei in the experimental pipeline.

緒 論

2 管路内の 液體過渡現象과 관련하여 발생하는 캐비테이션(液柱分離)현상은 工學上으로 매우 중요한 문제이며, 이미 많은 연구성과가 보고되어 있다. 그러나 液柱分離현상의 發生機構를 조사한 기초적인 연구는 매우 드물며, 아직 미지의 문제가 많이 남아 있다고 생각된다. 그래서 본 연구에서는 油壓管路에서의 液柱分離현상의 發生機構를 조사하는 一接近法으로서, 비교적 소직경의 油壓管路에서 過渡現象에 수반하여 발생하는 캐비테이션 初生에 대하여 실험적으로 조사한다.

이어서, 실험에서 얻은 결과를 바탕으로 하여 油壓作動油中の 캐비테이션 核에 대하여 고찰한다. 여기서는 캐비테이션 核으로 油中の 微小氣泡(micro-bubble)에 注目하여, 氣泡로부터 無限遠方의 壓力이 계단(step)상으로 강하할 때의 氣泡의 성장에 대하

여 조사한다. 數值計算을 통하여, 壓力이 강하할 때 氣泡가 성장을 계속하는가 혹은 어떤 일정한 크기로 再平衡하는가의 境界가되는 氣泡의 初期半徑 즉, 初期半徑의 臨界值(이후에는 이것을 臨界半徑 R_0^* 라 부름)를 구한다.

계단상으로 壓力을 강하시킬 때, 강하후의 壓力值가 絕對壓 零이하인 경우는, 氣泡運動의 解析에 物質傳達(mass transfer)의 효과도 고려하는 것이 순리이지만, 油壓作動油에 대해서는 그것의 物性值의 일부가 不明이며, 또 반드시 物質傳達효과가 지배적인 요소로 되지도 않기 때문에 이것을 생략하고 斷熱 혹은 等溫의 가정하에서 氣泡運動의 解析을 할 한다.

캐비테이션 初生에 관한 실험

管路內에서의 過渡흐름에 수반되는 캐비테이션 初

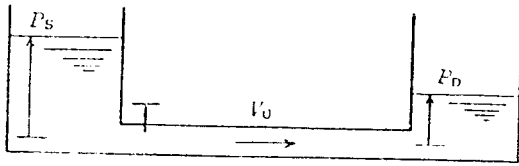


Fig. 1. Pipe model

生壓을 측정하기 위하여 Fig. 1의 管路모델과 같은 장치를 구성하여 실험을 행한다. 管路는 내경 8mm, 길이 20m의 銅管이며, 管路의 양끝에는 定壓槽가 연결되어 있다. 上流側의 定壓槽로서는 어큐뮬레이터(accumulator)를 사용하며, 릴리프 밸브(relief valve)로 壓力을 설정한다. 처음에 上流端의 밸브를 열어서 기름이 흐르게 해두고, 밸브를 급격히 폐쇄하여, 過渡現象을 발생시킨다. 壓力측정지점은 밸브 직후와, 밸브로부터 5m, 12m, 18m 지점의 4개소이며 壓力의 측정은 管路外周의 변형으로부터 검출하는 방법²⁾으로 행한다. 作動油는 市販의 鑛物油이다.

측정결과의 예를 Fig. 2에 나타낸다. Fig. 2에는 上流端의 壓力 $P_s=1.3\text{MPa}$, 下流端의 壓力 $P_D=0.1\text{MPa}$ (본 논문에서 壓力은 모두 絕對壓力임)의 경우이다. 밸브 직후($x=0\text{m}$)에서의 壓力波形은 여기서 큰 空洞이 발생하고 있음을 나타내고 있다. 그러나 管路途中에서는 캐비테이션이 발생하지 않고, 絕對壓 零보다 상당히 낮은 負壓이 기록되어 있다. 下流

端의 壓力 P_D 를 일정히 해두고, 上流端의 壓力을 높여 가면, 발생하는 負壓의 絕對值도 거의 P_s 에 비례하여 커지지만 P_s 가 어느 한도에 달하면 캐비테이션이 발생하기 시작한다. 본 논문에서는 이 때의 캐비테이션을 캐비테이션 初生(incipient cavitation)이라 부르고, 管路途中에서 캐비테이션이 발생하지 않는 경우에서 측정된 壓力의 最低值(負壓)를 臨界壓力이라 부르기로 한다. 이 실험에서 측정된 臨界壓力은 -1MPa 보다도 낮은 값이었다. 실험에 사용한 作動油는, 캐비테이션 核으로 간주되는 要素를 배제하기 위하여 특별한 前處理를 행한 바가 전혀 없는 기름이지만, 캐비테이션이 발생하지 않는 P_s 의 범위에서는 상당히 再現性이 있는 실험결과가 얻어졌다.

캐비테이션 初生 조건

여기서는 액체의 壓力이 급강하할 때 액체중의 氣泡성장을 解析하여 앞의 실험에서 측정한 臨界壓力에 대응하는 初期臨界半徑을 구한다. 그리고 실험 및 解析결과를 바탕으로 하여 油中の 캐비테이션 核에 대하여 고찰한다.

우선, 無限量的 粘性·壓縮性 油中에 존재하는 單一 氣泡(Fig. 3)를 생각하여, 이것이 주위압력의 계단(step)상 변화($P_{\infty,0} \rightarrow P_{\infty}$)에 따른 氣泡半徑의 시간

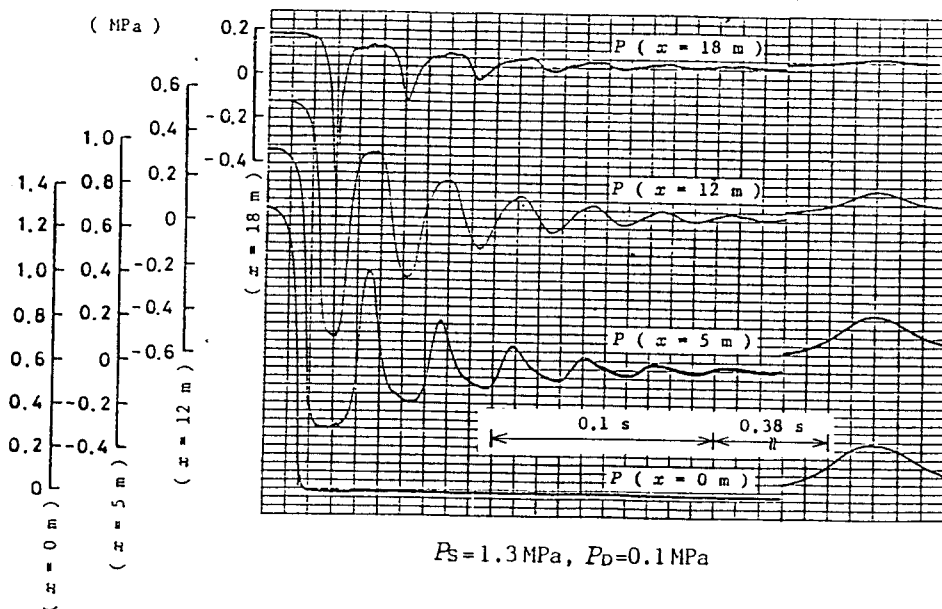


Fig. 2. Records of pressure fluctuation (at $T=313\text{K}$)

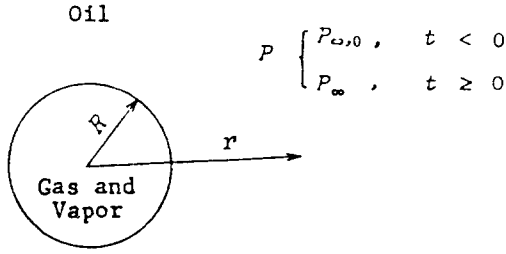


Fig. 3. A spherical bubble

적 변화를 解析한다. 解析에 있어서 다음과 같은 가정을 세운다. (i) 重力의 영향, 氣·液界面에서의 熱傳達 및 가스擴散의 영향을 무시한다. (ii) 체적점성계수는 零으로 둔다. (iii) 氣泡内の 가스 체적 변화는 斷熱변화에 따른다. (iv) 氣泡은 언제나 球形을 유지하며, 徑의 변화에 따른 表面張力의 변화는 없다. 이상의 가정하에서 氣泡의 運動方程式은 다음과 같이 나타낼 수 있다.³⁾

$$\left(1 - \frac{2\dot{R}}{a_\infty}\right) R \ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 \left(1 - \frac{4\dot{R}}{3a_\infty}\right) + \frac{1}{\rho} (P_\infty - P_{r=R} - \frac{R \dot{P}_{r=R}}{a_\infty}) = 0 \quad (1)$$

여기서 r 은 氣泡중심으로부터의 거리, R 은 氣泡의 半徑, $P_{r=R}$ 은 氣泡壁에서의 액체의 壓力, P_∞ , a_∞ 는 각각 氣泡로부터 無限遠方에서의 壓力 및 액체중의 音速, ρ 는 액체의 밀도이다. $\dot{\cdot}$ 표시는 시간에 대한 미분을 나타낸다.

다음으로, 氣泡壁에서의 壓力밸런스로부터 $P_{r=R}$ 은 다음 식으로 표시된다.

$$P_{r=R} = P_{g,0} \left(\frac{R_0}{R}\right)^{3n} + P_V - \frac{2\sigma}{R} - 4\mu \frac{\dot{R}}{R} \quad (2)$$

여기서 μ 는 기름의 粘度, σ 는 表面張力, $P_{g,0}$, R_0 는 初期의 氣泡內 가스 壓力 및 初期의 氣泡半徑이다. P_V 는 기름의 飽和증기압이지만, 여기서는 $P_{g,0} \left(\frac{R_0}{R}\right)^{3n} \gg P_V$ 로 가정하여 P_V 를 定數(初期溫度 때의 값) 취급한다. n 은 폴리트로프 지수이다.

(1)식의 初期條件은 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} t=0 \text{에서 } R &= R_0, \\ \dot{R}_{0+} &= \frac{1}{\rho a_\infty} \left(P_{g,0} + P_V - \frac{2\sigma}{R_0} - P_\infty \right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

다음으로 (1)식을 位相平面에서 고찰하면, 平衡半徑 R_* 를 만족시키는 다음 식이 얻어진다.

$$P_\infty - P_V - P_{g,0} \left(\frac{R_0}{R_*}\right)^{3n} + \frac{2\sigma}{R_*} = 0 \quad (4)$$

作動油로서 터빈 油(turbine oil)를 대상으로 하여 數值計算을 행한다. 計算에 사용하는 物性値는 다음과 같다.⁴⁾

$$T_\infty = 293K, \rho = 873Kgf/m^3, \mu = 0.0932N \cdot S/m^2, \\ \sigma = 0.0205N/m, P_V = 8.87 \times 10^{-3} P_a.$$

氣泡半徑의 변화는 氣泡로부터 無限遠方에서의 油中の 壓力이 (5)식과 같이 계단(step)상으로 변화함을 상정하여, (1)식을

$$\left. \begin{aligned} t \leq 0, P_\infty &= \left(P_{g,0} + P_V - \frac{2\sigma}{R_0} \right) \\ t > 0, P_\infty & \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

(3)식으로 주어지는 初期條件하에서 數值積分(4階 Runge-Kutta 法)하여 구한다.

Fig. 4는 $P_{g,0} = 1 \text{ MPa}$, $P_\infty = -1 \text{ MPa}$ 인 경우의 세

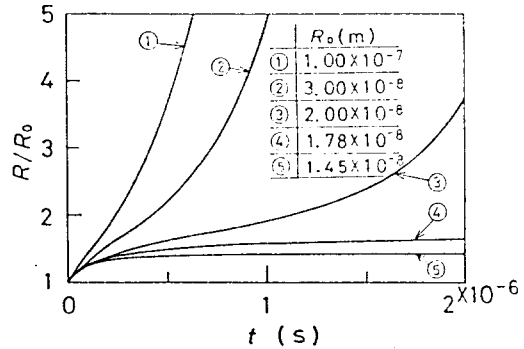


Fig. 4. Variation of bubble radius with time ($P_{g,0} = 1 \text{ MPa}$, $P_\infty = -1 \text{ MPa}$, $n = 1.4$)

산에이다. 이 그림에서, 氣泡의 거동이 初期半徑 R_0 에 따라서 매우 달라짐을 알 수 있다. 즉, $R_0 \leq R_0^*$ (여기서 R_0^* 는 臨界半徑인)의 경우는 氣泡의 운동이 단조로운 성장을 하여 어떤 일정한 크기로 再平衡하나, $R_0 > R_0^*$ 의 경우는 성장을 계속하여 캐비테이션을 유발하게 된다. Fig. 4에서 $R_0 \leq R_0^*$ 인 경우, 氣泡의 거동이 단조로운 성장으로 되는 것은 터빈 油의 粘度가 상당히 높은 것과, 氣泡半徑이 작을수록 粘性項의 영향이 커서 감쇠가 커지기 때문이다. 이와같이 氣泡의 거동이 단조로운 성장으로 나타나는 경우는 (1)식을 數值積分하는 대신에 (4)식으로부터 간단히 R_0^* 를 구할 수가 있다. 臨界半徑 R_0^* 의 계산치를 <Table 1>에 나타낸다. <Table 1>에는 비교 자료로서 $n = 1.0$ 인 경우의 계산치도 병기하고 있다.

氣泡 성장에 대한 상기의 계산에서 熱傳達, 가스擴散의 영향은 고려되어 있지 않으나, 이들 효과를 고려하여 계산을 하더라도 R_0^* 가 여기서 구한 값($n = 1.4$ 의 경우)보다 큰 값으로 될 가능성은 없다. 즉 R_0^* 가 過小評價되어 있는 것은 아니다.

앞의 실험에서 -1 MPa 보다도 낮은 負壓이 측정되었으며, 따라서 $P_\infty = -1 \text{ MPa}$ 인 때의 R_0^* 를 생각하

Table 1. Critical radii R_0^* and dimensionless equilibrium radii r_e .
(turbine oil, $T=293$ K, $P_{\infty,0}=1$ MPa)

P_{∞} (MPa) (abs)	n R_0^*, r_e	1.0		1.4	
		R_0^* (m)	r_e	R_0^* (m)	r_e
-0.0001		1.01×10^{-5}	26.56	2.63×10^{-5}	11.12
-0.001		2.16×10^{-6}	12.43	4.56×10^{-6}	6.72
-0.1		8.87×10^{-8}	3.05	1.28×10^{-7}	2.42
-0.5		2.49×10^{-8}	2.17	3.32×10^{-8}	1.90
-1.0		1.37×10^{-8}	1.96	1.78×10^{-8}	1.74

면 <Table 1>에 나타난 바와 같이 $R_0^* \approx 10^{-8}m$ 가 된다. 氣泡의 크기로서 이러한 數値는, 이 數値가 作動油分子의 크기와 비교하여 數倍~數十倍에 지나지 않을 정도로 작은 값임을 생각할 때, 액체를 連續體로 취급하여 얻은 상기의 값이 반드시 적절하고 물리적인 의미를 갖는 값이라고 말하기는 어렵다. 그러나 기름이 連續體로 간주될 수 있을 정도로 큰 氣泡가 油中에 존재하는 경우, -1MPa보다 낮은 負壓으로의 壓力변화하에서 氣泡가 안정하게 존재하는 것이 불가능함은 이 계산으로부터 명백해진다. 한편, 氣泡성장의 시간적인 지연이 액체의 抗張力을 초래한다는 보고⁵⁾도 있으나, Fig.4에 나타난 氣泡半徑의 시간응답은 $R_0 > R_0^*$, $R_0 < R_0^*$ 의 어느 경우에도 매우 빠르기 때문에, 氣泡성장시의 시간지연이 진출한 실험에서 나타난 액체의 抗張力을 초래할 가능성은 거의 없음을 알 수 있다.

이상의 사실로부터, 본 연구에서 사용한 실험관로 내를 유동하는 作動油中에는 캐비테이션 核으로 될 수 있는 自由氣泡가 존재할 가능성이 매우 낮음이 입증되었다.

要 約

油壓管路에서의 캐비테이션 發生 機構를 조사할

목적으로, 過渡흐름에 수반하여 발생하는 캐비테이션 初生에 관한 실험 및 壓力이 급강하 할 때의 氣泡 성장에 대한 계산을 행하였다. 실험에서 얻은 결과를 기초로 한 계산에서, 作動油가 絕對壓 零이하의 負壓에 노출되어도 캐비테이션이 발생하지 않을 정도의 張力을 갖기 위해서는, 소위 말하는 氣泡(氣泡 주위의 액체가 連續體로 간주될 수 있을 정도의 크기를 갖는 氣泡)가 油中에 존재할 가능성은 거의 없음이 입증되었다.

參 考 文 獻

1. T. Tanahashi (1976): Fluid Engineering, 12(9), pp.519-527.
2. 李一永, 北川 能, 竹中俊夫, (1984): 日本機械學會 論文集, 50(458) B, pp.2655-2662.
2. A. Shima and T. Fujiwara.(1980): J. Acoust. Soc. Am., 68, pp.1509-1515.
4. K. Shiba.(1944): Physical constants table, Iwanami book Store.
5. J.B. Riestler and R.A. Bajura.(1982): ASME Paper, 82-WA/HT-34