

## 산화제펌프 입구에서 캐비테이션 발생 가능성 및 위험성 평가

김철웅\* · 문인상\*\* · V.A.베르샤드스키\*\*\*

### The Possibility and Risk of Generation of Cavitation at the inlet of the Turbopump

Cheul-Woong Kim\*, In-Sang Moon\*\*, V.A. Bershadskiy\*\*\*

**Keywords :** Cavitation(캐비테이션), Liquid oxygen(액체산소), Latent heat(잠열), LOx pump(산화제 펌프), LOx feeding line(산화제 공급배관)

#### Abstract

Upon a turbopump's running, cavitation may occur at the inlet of the LOx pump by pressure drop and heat transfer along the LOx feeding line. Since the cavitation can cause serious damage to the pump or to stop running, the absence of the cavitation at the inlet of a turbopump should be confirmed before the using the turbopump.

In the present study, the calculation of the volume fraction of LOx gas phase at the inlet of the pump are performed with different temperatures of LOx in the tank, pressure drops and heat transfers along the feeding line.

This calculation method can be applied to define the limits of thermal and hydraulic characteristics during the design of a LOx feeding system.

#### Nomenclature

$\Delta P$  - LOx 탱크와 펌프 입구에서의 압력차이  
 $P_t$  - LOx 탱크에서의 압력  
 $T_t$  - LOx 탱크에서의 온도  
 $P_{in}$  - 펌프 입구에서의 압력  
 $T_{in}$  - 펌프 입구에서의 온도  
 $V_t, V_g$  - 액체산소의 부피 및 가스산소의 부피  
 $r$  - 잠열계수  
 $c_t, c_m$  - 탱크와 펌프입구에서 포화선도상의 비열  
 $\phi$  - 유동내 기체상(gas phase)의 포함 비율  
(기체상의 부피 대 전체부피)  
 $q$  - 열전달량

#### 1. 서론

캐비테이션은 유체내에 국소적으로 액체압력이 저하하여 액체온도에 해당하는 포화증기압보다 작아질 때 액체 중에 미세한 기포가 발생, 급격히 크게 성장한 후 파괴되는 현상으로 펌프의 효율저하 뿐만 아니라 구조상의 손실을 가져올 수 있다. 캐비테이션이 구조물을 파괴하는 매커니즘은 충격파와 극저온 및 취성(fragility)증가로 설명이 가능하다. 펌프 구조물 근방에서 기포의 소멸은 구조물에 충격파를 가하고 이로인하여 구조물에는 작은

흡입이 발생한다. 이때 극저온 유체와의 접촉으로 인하여 구조물의 강도가 증가하면 연성이 낮아지고 취성이 증가한다. 따라서 적은 응력영역에서 흡입의 크기가 증가하며 결국 파쇄가 일어나게 된다. 따라서 액체산소 등의 극저온유체에서 발생하는 캐비테이션은 일반 상온의 액체에서보다 물리적 파괴가 빠르게 진행된다. 그러므로 터보펌프의 운전시 산화제 펌프의 입구에서 캐비테이션이 발생되지 않음이 확실히 보장될 필요가 있다. 산화제 공급라인에 있어서 캐비테이션이 일어나기 쉬운 상황으로는 배관 외부로부터의 열공급, 각종 압력손실(중력압력손실, 점성압력손실, 굽은 관이나 밸브에서의 압력손실), 공급 계통의 냉각 부족 등을 들 수 있다. 따라서 가급적 산화제탱크와 펌프 사이의 배관은 짧고 단열이 잘 되어 있어야 하며, 배관의 형상이 굽지 않고 내부 표면이 매끄러운 것이 요구된다.

캐비테이션의 발생은 로켓 발사의 실패를 가져오기도 하는데, 1999년 11월 15일에 발생한 일본의 H-II로켓(LE-7 엔진)사고와 같이 직접적인 사고의 원인이 될 수도 있고, 2004년 12월 21일에 미국에서 발사된 Delta-IV Heavy의 임무완수 실패처럼 간접적인 원인이 될 수도 있다. LE-7엔진의 경우, 액체산소 터보펌프와 액체수소 터보펌프가 모두 정상상태로부터 어떤 예고도 없이 불과 0.5초 사이에 급격히 정지되었는데 사고의 원인은 펌프 인두서에 발생한 캐비테이션의 비정상현상과 역류에 의해 유발된 반복/변동응력이 인두서에 균열을 주고, 이어 피로균열이 진전하여 익의 불안정 파괴를 가져옴으로써 실속한 엔진이 급정지되었으며 파편의 충돌 등에 의한 온도 및 압력상승으로 펌프 케이싱이 파손되고, 액체수소의 누설 및 엔진으로부터의 역류가 엔진 각부의 파손에 이르게 하였다.

Delta-IV Heavy의 경우에는 산화제 공급라인에서의 유동압력이 한계값 이하로 낮아짐에 따라 기체산소가 발생했고 엔진정지

\* 한국항공우주연구원 엔진그룹, kimcw@kari.re.kr

\*\* 한국항공우주연구원 엔진그룹, insang@kari.re.kr

\*\*\* 한국항공우주연구원 러시아초정전문가, vabersh@rambler.ru

센서에까지 다달았다. 엔진정지센서부근에 액체상(liquid phase)이 없어졌으므로 시스템컨트롤 컴퓨터는 센서로부터의 결과를 기계화된 임무설계(cyclogram)의 스톱틀링 및 엔진 정지신호로 착각하여 정해진 시간보다 미리 엔진을 정지시켰다. 이로 인하여 2개의 나노-위성을 잃었고, 유효화물이 계획된 위치에 올려지지 않았다.

위 사고사례에서 보는 바와 같이 캐비테이션 현상의 발생 방지는 펌프 내부 뿐만이 아니라 공급계에 있어서도 중요한 설계 과제중 하나이다. 다만 공급계에서 발생한 캐비테이션은 액체산소가 포화온도보다 낮을 경우 응축에 의하여 펌프 입구에서 소멸될 수도 있다.

본 논문에서는 LOx 탱크와 LOx 펌프 사이를 연결하는 배관의 압력 손실 및 열공급량을 예상하고 그에 따라 LOx 펌프 입구에서 캐비테이션이 발생하는가와 발생한다면 어느 정도의 기체상이 발생하는가를 이론적으로 계산하였다.

계산 방법은 LOx 공급계에 대한 기본적인 이해와 공급계 설계에 있어서 운용 한계값을 구하는데 이용될 수 있다.

## 2. 본론

### 2.1 과제의 정의

LOx 탱크로부터 나온 산화제는 공급계 라인을 거쳐 펌프로 들어간다. 공급라인을 통하여 열전달과 저항으로 인한 압력증가는 피할 수 없으며 이때 펌프 입구에서는 LOx의 기화가 일어날 수 있고 잠열로 인하여 액상은 냉각되기도 한다.

이러한 물리적 현상의 주요 파라미터는 탱크내 액체 산화제 온도, 도관에서의 압력손실(탱크압력 - 펌프입구 압력), 열전달량과 잠열이다. LOx 펌프의 안정적인 운영을 위하여는 탱크내부압력이 일정할 때 탱크내 액체산소의 온도변화와 배관에서의 압력손실 변화 그리고 열전달의 변화에 따라 산화제 펌프 입구에서 캐비테이션이 발생하는지, 그렇다면 가스상은 어느 정도인지를 평가하고, 유효흡입수두(NPSH)에 대한 계산이 필요하다.

### 2.2 물리적 명료화 및 조건

과제의 해결을 위하여 그림 1에서와 같이 LOx 탱크, 배관, 펌프를 단순화하였다. 탱크내부압은 항상 0.3MPa로 일정하다고 가정하였고,  $T_i$ 와  $\Delta P$ ,  $q$ 를 변화시키면서 LOx 펌프 입구에서의 기체상 발생 정도를 계산하였다. 배관에서는 오직 열전달과 압력손실만이 존재하며 유동은 1차원 유동이다.

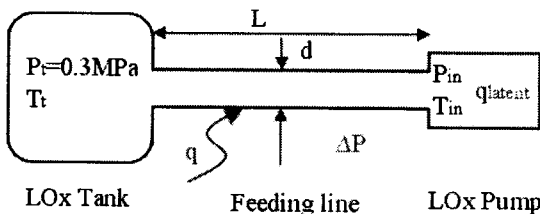


Fig. 1 The outline of a LOx feeding system.

첫 번째 과제는 배관에서 열전달이 일정하고 탱크내 산소의 온도가 변할 때 펌프 입구에서의 가스상 발생 여부를 평가하는 것이고, 두 번째 과제는 탱크내의 산소온도가 고정된 상태에서 열전달량이 변할 때 펌프 입구에서의 가스상 발생 여부를 평가하는 것이다. 각각의 경우에 있어서 미리 정해진 도관내 압력강하값들을 고려하여 계산이 수행되었다.

### 2.3 수학적 모델링

계산에 사용된 수학적 모델은 다음과 같다.

에너지 관계식

$$T_{in} = T_i c_p / c_m + q \cdot L \cdot d \cdot \pi / (c_m \cdot m) - \delta_{in} \cdot r \cdot \rho_{g,in} / (c_m \cdot \rho_{l,in}); \quad (1)$$

가스 포함 정도를 나타내는 부피비

$$\delta_{in} = V_{g,in} / V_{l,in}; \quad (2)$$

기체상의 포함 정도

$$\phi = \delta_{in} / (1 + \delta_{in}) \quad (3)$$

기체상을 포함한 유동에서의 밀도관계식

$$\rho_{in} = \rho_{l,in} (1 - \phi) + \rho_{g,in} \phi; \quad (4)$$

유효흡입수두식

$$NPSH = \frac{(P_{in} - P_v)}{\rho} \quad (5)$$

### 2.4 계산 및 결과분석

계산을 위하여 LOx의 열역학적 성질은 러시아의 자료를 기준으로 내삽법으로 구하였고  $T_i=94.11K$ 에 대하여  $q=0kW/m^2$ 과  $q=150kW/m^2$ 일때 LOx 펌프입구에서의 기체상 포함정도를 식(1), (2), (3)를 이용하여 표1과 같이 구하였다.

Table 1 Thermodynamic properties of oxygen and calculated volume fraction of the gaseous oxygen.

$\Delta P$	$P_{in}$	$T_{in}$	$r$	$C_s$	density		$\phi$	
					liquid	gas	$q=0$	$q=150$
0	0.30	102.03	199.1	1.714	1078.56	12.23	0	0
0.05	0.25	99.81	201.7	1.705	1090.35	10.32	0	0
0.06	0.24	99.296	202.28	1.703	1093.05	9.937	0	0
0.07	0.23	98.782	202.86	1.701	1095.74	9.551	0	0
0.08	0.22	98.268	203.44	1.699	1098.44	9.166	0	0
0.09	0.21	97.754	204.02	1.698	1101.13	8.780	0	0
0.10	0.20	97.24	204.6	1.696	1103.83	8.395	0	0
0.11	0.19	96.614	205.28	1.694	1107.03	8.003	0	0
0.12	0.18	95.988	205.96	1.693	1110.24	7.612	0	0
0.13	0.17	95.362	206.64	1.691	1113.44	7.220	0	0.454
0.14	0.16	94.736	207.32	1.690	1116.65	6.829	0	0.647
0.15	0.15	94.11	208.0	1.688	1119.85	6.437	0	0.747
0.16	0.14	93.3	208.82	1.687	1123.92	6.036	0.566	0.817
0.17	0.13	92.49	209.64	1.686	1127.99	5.635	0.736	0.860
0.18	0.12	91.68	210.46	1.684	1132.06	5.235	0.823	0.892
0.19	0.11	90.87	211.28	1.683	1136.13	4.834	0.868	0.913
0.20	0.10	90.06	212.1	1.682	1140.20	4.433	0.899	0.930

$T_i=94.11K$ 에 대하여  $q=0kW/m^2$ 일때 배관내에서의 압력손실이 0.15MPa까지는, 즉 펌프입구압이 0.15MPa(펌프 입구압 = 탱크에서의 압력 - 압력손실)일때 까지, 가스상이 발생하지 않고 이보다 큰 압력손실에서 급격히 가스상이 증가한다.

$T_i=94.11K$ 에 대하여  $q=150kW/m^2$ 일때 압력손실이 0.12MPa(즉, 펌프입구압이 0.18MPa)일때까지 가스상이 발생하지 않으며 이후 영역에서는 logarithm 형태의 기포발생 증가선도를 갖는다.

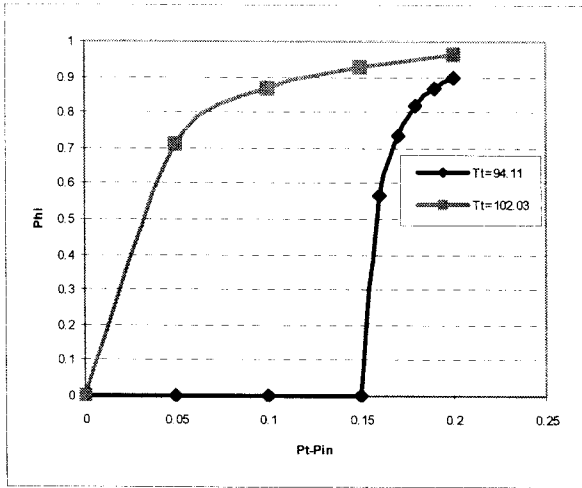


Fig. 2 The growth of volume fraction of the gas phase due to temperature of LOx in the LOx tank.

그림 2는 탱크내 액체산소의 온도가 각각 94.11K와 102.03K 이고 배관에서의 열전달이 없다는 가정하에서 압력강하에 따른 펌프입구에서 기체상의 포함 정도를 보여준다.  $T_i=102.03K$ 일 경우에는 배관에 저항에 의한 압력강하가 없다는 이상적인 조건에서도 기체상이 발생하기 시작한다.  $T_i=94.11K$ 일 경우, 압력강하가 0.15MPa이하일때는 펌프입구에서는 오직 액상만이 존재하며, 0.15MPa이 넘는 압력강하에서 기체상 발생하고 매우 급격히 증가한다

만약 펌프입구에서 유동내 10%의 기체상이 허용된다고 한다면  $T_i=94.11K$ 일 경우, 압력강하는 0.152MPa까지 허용되며,  $T_i=102.03K$ 인 경우에는 0.007MPa정도까지가 허용될 수 있다.

그리고  $T_i=94.11K$ 의 경우, 영역  $\Delta P$ 가 0~0.15MPa까지에서는 국부적으로 기포가 생겨도 응축이 일어나서 기포가 자연적으로 소멸될 수 있다. 이러한 현상은 0~0.15MPa의 범위에서 유동의 온도가  $T_{sat}$ 보다 낮기 때문에 발생된다.

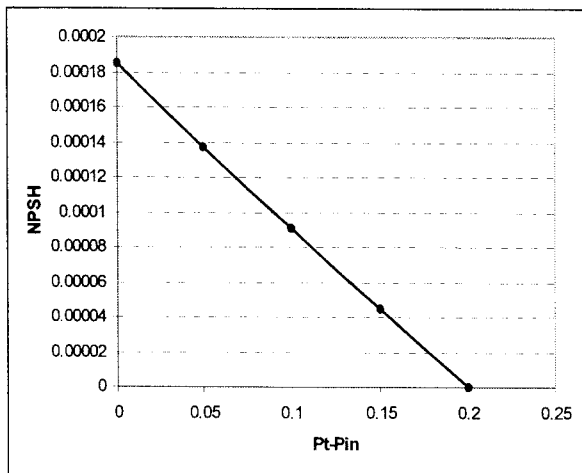


Fig. 3 NPSH for different pressure-drops in the pipeline.

그림 3에서는  $T_i=94K$ 일때 NPSH값을 계산하였다. 식(5)를 이용하기 위하여 표1의  $P_m$ 을 대입하였고 계산의 간편화를 위하여 동압을 고려하지 않았으며 포화압력은 1atm으로 가정하였다. 위 결과 중에서 압력강하가 0.15~0.2MPa인 영역에서는 기체상이 급격히 증가하므로 실제 NPSH와 큰 오차를 보일 것이 자명하다.

만약 허용 NPSH가 0.00014보다 커야한다고 하면, 배관내의

최대허용 압력강하는 0.05MPa이하로 해야만 한다.

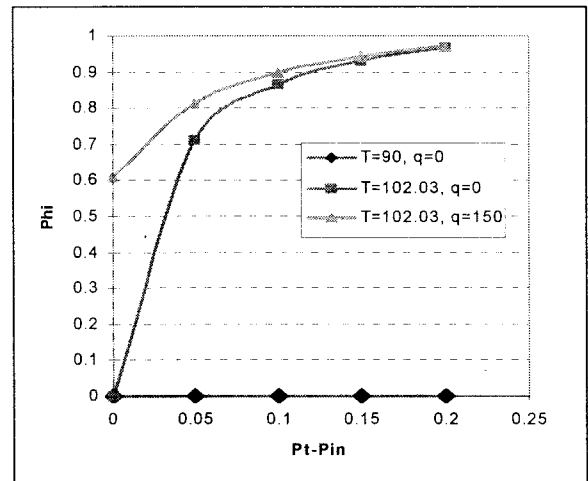


Fig. 4 The growth of volume fraction of the LOx gas phase with ultimate conditions of LOx feeding system.

그림 4는 한계상황에 대한 계산 결과이다.

$T_i=90K$ 이고  $q=0kW/m^2$ 일때의 결과는 압력강하가 0.2MPa(즉  $P_m=1atm$ )일때까지 전구간에서 기체상이 발생하지 않음을 보여준다.  $T_i=102.03K$ 이고  $q=150kW/m^2$ 일 경우에는 압력강하 전영역에서 기체상이 발생한다. 특히 전혀 압력강하가 없는  $\Delta P=0$ 인 상황에도 유동은 60%이상의 기포를 포함한다. 쉽게 예상되는 바와 같이  $T_i$ 가 낮을수록 캐비테이션 현상으로부터 안전하다는 점을 알 수 있다.

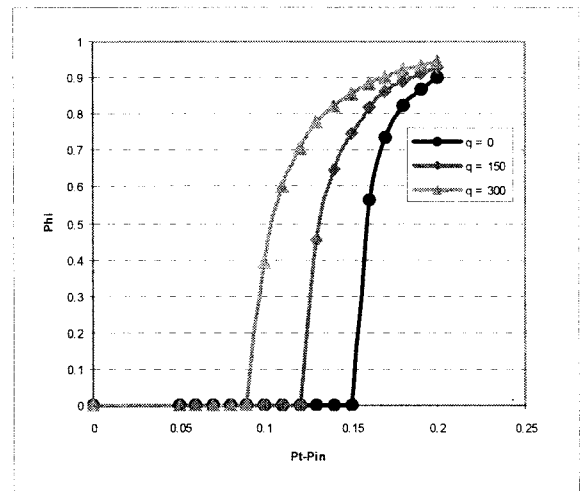


Fig. 5 The growth of volume fraction of the LOx gas phase due to heat transfer into the pipeline.

그림 5는  $T_i=94.11K$ 일때 배관의 표면을 통한 다양한 열전달 량에 따른 산화제펌프 입구에서의 기포발생 정도를 보여준다.

$q=0kW/m^2$ 일 경우에는 압력강하가 0.14MPa에서,  $q=150kW/m^2$  일때에는 압력강하가 0.12MPa에서,  $q=150kW/m^2$  경우에는 압력강하가 0.09MPa에서 캐비테이션이 발생하기 시작한다. 즉, 계산 결과는 열공급이 많을수록 적은 압력강하에서 기화 현상이 시작됨을 보여준다. 이 결과는 산화제 공급관의 단열이 필요함을 확인시켜준다.

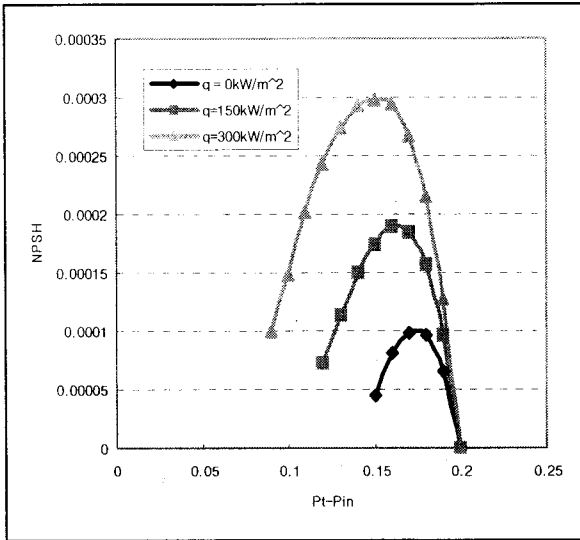


Fig. 6 NPSH for different heat transfers into the pipeline.

그림 6은  $T_i=94.11\text{K}$ 일때  $q=0\text{kW/m}^2$ ,  $q=150\text{kW/m}^2$  그리고  $q=300\text{kW/m}^2$ 일때 NPSH를 구한 결과이다. 위 결과는 배관 내에서의 NPSH를 계산한 결과로  $q$ 가 클수록 NPSH가 증가하는 경향을 보이는데, 이는 실제 펌프내에서의 NPSH와는 무관하게 열전달로 인한 밀도 감소 및 동압 증가와 관련되어 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 산화제 펌프입구에서의 캐비테이션 발생 가능성 및 위험성에 대한 이론적인 고찰을 하였다. LOx 탱크와 LOx

펌프 사이를 연결하는 배관의 압력 손실 및 열공급량을 가정하고 그에 따라 LOx 펌프 입구에서 캐비테이션이 발생하는가와 발생한다면 어느정도의 기체상이 발생하는가를 계산하였다.

계산 결과는 캐비테이션으로부터 터보펌프의 안전성을 높이기 위하여 배관에서의 압력강하를 작게, 열전달을 적게 그리고 탱크내 액체산소의 온도를 낮게 해야한다는 지극히 기초적인 해결방법을 정량적인 수치로써 확인해준다.

비록 계산은 실제 엔진 작동시의 데이터를 이용하지는 않았지만 계산 방법은 LOx 공급계에 대한 기본적인 이해와 공급계 설계에 있어서 운용 한계값을 구하는데 이용될 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

- [1] 신병록, 2002, "일본 H-II로켓 8호기의 사고분석과 개선책", 과학재단소식, Vol. 202, pp. 34~37.
- [2] T.Giese, E.Laurien, 2000, "A Three Dimensional Numerical Model for the Analysis of Pipe Flows with Cavitation", Nuclear Technology 2000, Jahrestagung Kerntechnik. Bonn.
- [3] I.Cholnie, 2005, "Delta-IV and Her Superheavy Sisters," Novosti kosmonavtiki, 2005. Vol. 15, No 6, pp. 48-50.
- [4] V.V.Sychev, A.A.Vasserman, A.D.Kozlov, G.A.Spiridonov, V.A.Nsymarny, 1987, "Thermodynamic properties of oxygen"
- [5] Hiroharu Kato, 2002, "Recent Topics on Cavitation Research", The Second National Congress on Fluids Engineering, pp.1~4.
- [6] P.B. Whalley, 1996, "Two-Phase Flow and Heat Transfer", Oxford University Press.
- [7] C.E. Brennen, 1995, "Cavitation and bubble dynamics", Oxford University Press.