

배관 내에서 R600a 냉매의 유동양식이 간헐류일 때 발생하는 유동 소음 특성 분석

Analysis of the Acoustic Noise Characteristics of R600a Refrigerant when the Flow Pattern in a Pipe is Intermittent Flow

한형석* · 김민성** · 정의봉†

Hyung-Suk Han*, Min-Sung Kim**, Weui-Bong Jeong†

1. 서 론

기포소음의 특성은 기포의 형태와 크기에 따라 달라지기 때문에, 배관 내의 유동양식은 기포소음과 밀접한 관계를 가진다. 특히 슬러그류(Slug flow)나 처언류(Churn flow)와 같은 간헐류의 경우 배관의 직경보다 크고 긴 기포로 배관 내에서 큰 소음원이 된다.

본 연구에서는 배관 내에 간헐류를 발생시켜 이들의 주파수 특성을 실험적으로 분석하였다. 특히 실험 결과 얻어진 기포의 주파수와 동일한 체적을 가지는 자유롭게 떠오르는 기포의 고유 주파수(Minaert 주파수)가 어느 정도 차이가 나는지 실험을 통해 확인 하고 이를 이론식과 비교하였다. 또한 건도 증가를 통해 간헐류를 성장시켰을 때, 즉 슬러그류를 처언류로 천이시켰을 때 소음 특성을 실험을 통해 분석하였다.

2. 배관 내 긴 슬러그 기포의 소음 특성

일반적으로 파이프 내의 기포는 기포의 크기가 파이프의 내경보다 클 경우 길이가 긴 원통 형태의 기포를 가지게 된다. 특히 2상 유동 양식과 연관 시켜 볼 때 이러한 원통형 기포는 슬러그(Slug) 기포 또는 테일러(Taylor) 기포라 한다. 따라서 기포의 길이가 파이프의 내경보다 큰 슬러그 기포에 대해 하나의 슬러그를 Fig. 1과 같이 원통형 기포라고 가정하면 기포의 진동은 배관 벽면으로 인해 반경 방향으로 구속되게 된다. 따라서 기포의 진동은 길이방향으로만 진동한다고 가정하면 기포 길이에 대해 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$l = l_0 + a \sin \frac{2\pi t}{T} \quad (1)$$

여기서 l 은 기포중심에서 기포 한 쪽 끝까지의 거리, l_0 는 기포중심에서 기포 한 쪽 끝까지의 초기 거리, a 는 진동 진폭, t 는 시간, T 는 기포의 진동 주기이다.

또한 기포가 거리 x 에 따라 늘어날때 기포의 팽창과정을 단

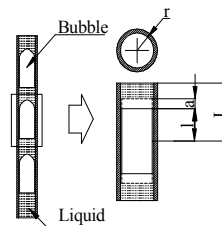


Fig. 1 Circular cylinder shape bubble(Taylor bubble)

열 과정이라고 가정하면 기포의 초기 압력(p_0)과 기포를 둘러싸고 있는 외부 압력 간의 비(p)는 식 (2)와 같이 주어지게 된다.

$$\frac{p_0}{p} = \left(\frac{v^k}{v_0^k}\right) = (1 + \frac{x}{l})^{-\kappa}, \quad \text{where } \kappa = \frac{C_p}{C_v} \quad (2)$$

여기서 v 는 기포의 체적, v_0 는 기포의 초기 체적, κ 는 비열비, C_p 는 정압 비열, C_v 는 체적 비열이다.

식 (2)을 이항 급수로 전개하여 다시 쓰면 식 (3)과 같이 된다.

$$p - p_0 = \frac{\kappa p x}{l} \quad (3)$$

액체의 경계면에서의 기포 경계면의 속도와 기포 중심에서 " L " 떨어져 있는 액체 입자의 속도는 식 (4)의 관계를 가진다. 여기서 식 (1)을 시간에 대해 일차 미분하면 액체의 경계면에서의 기포 경계면의 속도는 식 (5)와 같으며, 기포벽면의 속도로 인한 거리 " L " 지점에서의 액체 입자의 속도는 식 (4)로부터 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dL}{dt} = \frac{dl}{dt} \quad (4)$$

$$\frac{dl}{dt} = \frac{2\pi a}{T} \cos \frac{2\pi t}{T} \quad (5)$$

$$\frac{dL}{dt} = \frac{2\pi a}{T} \cos \frac{2\pi t}{T} \quad (6)$$

Fig. 1에서와 같이 관내에 길이 " $2 \times l$ "인 슬러그 기포가 N 개 있다고 했을 때 기포 길이가 최대가 될 때의 퍼텐셜 에너지와 기포벽면의 속도가 최대가 될 때의 운동에너지는 식 (7) 및 (8)과 같이 쓸 수 있다.

$$-N \times \int_{v_0}^v (p - p_0) dV = N \times \frac{\kappa p \pi r^2 a^2}{l} \quad (7)$$

$$2N \times \frac{1}{2} \int \left(\frac{dL}{dt}\right)_{\max}^2 dm = N \times \frac{4\pi^3 \rho r^2 a^2 (L-l)}{T^2} \quad (8)$$

† 교신저자; 부산대학교 기계공학부

E-mail : wbjeong@pusan.ac.kr

Tel:(051)510-2337,Fax:(051)517-3805

* 국방기술품질원

** 부산대학교 기계공학부 일반대학원

여기서 r 은 배관 반경, ρ 는 기포 주위 액체의 밀도이다.

따라서 에너지 보존 법칙에 따라 식 (7)과 식(8)을 같다고 하여 계산하면 기포의 고유 진동수(f_n)는 식 (9)와 같다.

$$f_n = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\kappa p}{\rho l(L-l)}} \quad (9)$$

위와 같은 가정과 계산을 통해 내경보다 큰 길이를 가지는 슬러그 기포에 대해 기포의 고유주파수가 기포의 길이와 기포 내부 및 외부 유체의 특성에 따라 달라짐을 예측해 볼 수 있으며 반경 R 을 가지는 탱크 내에서 자유로이 떠오르는 기포의 고유주파수인 식 (10)과 차이가 남을 알 수 있다.

$$f_n = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi R} \sqrt{\frac{3\kappa p}{\rho}} \quad (10)$$

3. 실험

3.1 실험 셋업 및 조건

Fig. 2는 배관 내 냉매의 유동 양식에 따른 소음 특성을 파악하기 위한 시험 장치이다. 본 연구에서의 시험 조건은 Table 1과 같다.

3.2 실험 결과

앞서 언급한바와 같이 건도가 매우 작은 조건에서는 슬러그 기포가 발생하기 시작되며 히터 열량 증가를 통해 냉매의 질량 건도를 증가시키게 되면 슬러그 기포가 성장하여 그 발생 빈도수가 증가하게 됨을 알 수 있었다.

여기서 히터 열량을 추가로 증가하게 되면 배관 내 냉매의 질량 건도는 더 증가하게 되며 슬러그 기포는 불규칙적으로 진동하면서 처언류로 천이되어 감을 알 수 있었다.

디지털 캠코더 촬영 결과, 배관 내 기포의 길이는 약 20mm~50mm 정도의 분포를 가지며 기포 간 액적의 길이는 건도 증가에 반비례함을 알 수 있었다. 이러한 기포 및 액적의 크기에 대한 고유주파수는 2절의 식 (9)를 통해 예측할 수 있으며 이는 동일한 체적을 가지는 떠오르는 기포의 고유주파수인 1657Hz($l=20\text{mm}$), 1447Hz($l=30\text{mm}$), 1315Hz($l=40\text{mm}$) 및 1220Hz ($l=50\text{mm}$)에 비해 작음을 알 수 있다.

Fig. 3~4는 Table 1의 4가지 건도조건에서 소음 및 가속도

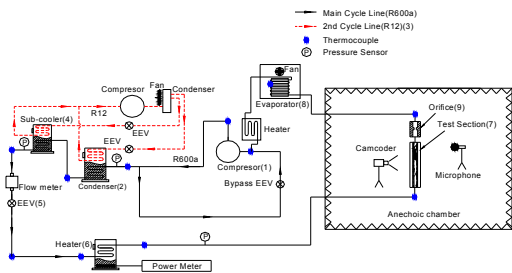


Fig. 2 Test setup

Table 1. Test conditions

Item	Value
High pressure	0.375Mpa ± 5%
Low pressure	0.125Mpa ± 5%
Vapor quality	0.02, 0.12, 0.24, 0.39
Mass flow rate	2.7kg/hr ± 10%

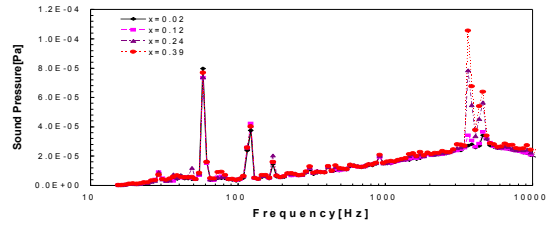


Fig. 3 1/12 octave spectra of the acoustic noise on the orifice

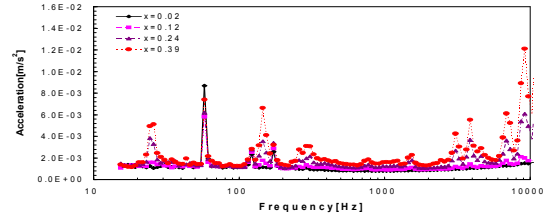


Fig. 4 1/12 octave spectra of the vibration on the orifice

의 1/12 옥타브 스펙트럼이다. Fig. 3에서 건도증가로 인한 슬러그, 처언 기포 증가로 인해 가장 큰 소음 변화율을 지는 주파수는 3~4kHz임을 알 수 있다. 이는 슬러그 또는 처언 기포가 사이트 글라스 후부에 설치되어 있는 오리피스를 통과하면서 오리피스 직경과 거의 동일한 반경을 가지는 기포($r=2.0\text{mm}$)로 분열되면서 발생하는 기포의 고유주파수($f_b=3.43\text{kHz}$)이다. Fig. 4의 가속도 스펙트럼으로 부터 130Hz 부근에서 건도 증가로 인해 소음 스펙트럼에 비해 상대적으로 큰 진동이 발생됨을 알 수 있으며 기포길이가 길고 기포와 액적비(L/l)가 큰 기포의 고유주파수와 유사함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구의 실험을 통해 R600a 냉매가 흐르는 배관 내에서 관경보다 큰 기포의 경우 동일한 체적을 가지는 자유로이 떠오르는 기포에 비해 소음의 주파수 성분이 크게 낮음을 알 수 있었다. 이는 배관 내에서 긴 슬러그 기포의 퍼텐셜 에너지와 운동에너지를 같다고 가정하여 계산한 기포의 고유주파수 계산결과와 유사하였다.

또한 냉매공급장치를 가지고 건도를 증가시켜 슬러그 기포를 만들고 이를 처언류로 천이시켜가며 소음을 측정할 결과 다음의 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 액적 길이가 매우 긴 초기 슬러그 기포의 경우 기포의 진동과 분열로 인한 소음은 크게 발생하지 않았다.
- (2) 슬러그류가 진행되어 기포의 발생빈도가 커져 슬러그 기포의 속도가 빨라지면 기포 소음 및 배관의 가속도 레벨이 커짐을 알 수 있었다. 특히 오리피스를 통과하면서 기포가 분열될 때 오리피스 직경과 동일한 기포의 고유주파수 성분의 소음이 매우 크게 발생함을 알 수 있었으며 이러한 현상으로부터 슬러그 기포가 오리피스를 통과할 때 오리피스 직경 크기로 분열됨을 예측할 수 있었다.
- (3) 슬러그류에서 처언류로 천이되면 기포의 크기분포가 넓어지며 기포의 진동이 심해지기 때문에 소음은 넓은 주파수에 걸쳐 발생하며 그 진폭도 커진다. 또한 오리피스를 통과할 때 오리피스 직경과 동일한 기포의 고유 주파수에서의 소음도 더 증가함을 알 수 있었다.