

초유동 충격파관 장치의 고레이놀즈수 유동실험에의 응용

양 형석*, H. Nagai**, Y. Ueta, K. Yanaka, M. Murakami
Institute of Engineering Mechanics and Systems, University of Tsukuba

* 현재, 홍익대학교 부설 과학기술연구소

** 현재, 일본 우주개발사업단 (NASDA)

Application of Superfluid Shock Tube Facility to experiment of High Reynolds number flow

H.S. Yang*, H. Nagai**, Y. Ueta, K. Yanaka, M. Murakami

Institute of Engineering Mechanics and Systems, University of Tsukuba

*presently, Research Institute for Science & Technology, University of Hong-ik

**presently, National Space Development Agency of Japan

yanghs@wow.hongik.ac.kr

Abstract - The particle velocity in superfluid helium (He II) induced by a gas dynamic shock wave impingement onto He II free surface were studied experimentally by using Schlieren visualization method with an ultra-high-speed video camera.

It is found from visualization results that a dark zone in the immediate vicinity of the vapor-He II interface region is formed because of the high compressibility of He II and is developed toward bulk He II with the flowing-down speed of the vapor-He II interface. The mass velocity behind a transmitted compression shock wave that is equal to the contraction speed of He II amounts to 10 m/sec, the Reynolds number of which reaches 10^7 . This fact suggests that the superfluid shock tube facility can be applied to an experimental facility for high Reynolds number flow as an alternative to the superfluid wind tunnel.

1. 서 론

고레이놀즈수 유동에 대한 연구는 최근 항공 우주공학의 발달로 그 중요성이 대두되고 있으며, 보다 높은 레이놀즈수 유동을 재현하기 위해 고속유동 실험장치인 풍동장치의 개발이 진행되고 있다. 그러나, 작동유체를 공기, 즉 실험조건이 상온인 경우, 실험장치의 규모는 보통 실험실 규모의 크기로는 고 레이놀즈수유동을 발생시킬 수 없으며, 그 크기는 건물 전체를 차지할 정도로 대규모이다. 그래서 최근의 경향은 액체 질소 등을 이용한 저온환경에서 구동되는 저온풍동을 고 레이놀즈수 유동 연구에 응용하고 있다.

본 연구에서는 실험실 규모에서 10^7 정도의 고레이놀즈수 유동 실험장치로의 초유동 충격파관 장치의 응용 가능성에 대해서 소개한다.

실험 장치인 초유동 충격파관 장치와 측정수단은 참고 문헌[1,2]에 자세하기 때문에 본고에서는 생략한다.

2. 실험결과 및 고찰

2.1 He II의 충격파압축

Fig. 1에 슈리렌(Schlieren)법을 이용하여 가시화한 결과를 보인다. 이것은 초기온도 2.00K, 투과압축 충격파에 의한 압축은 0.2MPa정도이다. 이 사진들에서 주목할 점은, 초유동헬륨을 전파하는 압축 및 열충격파의 2종류의 충격파가 촬영되어 있다는 점과 기체역학적 충격파의 충돌 후 액면근처에 검게 보이는 층의 형성에 있다. 충격파들에 대해서는 참고문헌 [2]에 서술했으므로, 여기에서는 그 검은 층의 형성에 대해서 설명한다. 사진들에서 보이는 것처럼, 기체역학적 충격파의 입사 후, 액면근방에 검게 보이는 층이 형성되어, 시간이 경과함에 따라 원래의 위치에서 밑쪽으로 두꺼워 진다. 기체역학적 충격파의 입사전 사진에서, He II의 자유계면은 메니스커스(meniscus)의 영향으로 약간의 두께가 촬영되어 있다. 기체역학적 충격파의 입사 후, 투과압축충격파가 He II중에 전파하면, He II는 압축률이 높기 때문에 압축에 의해 액면은 낮아지고, 따라서 투과압축충격파의 배후에는 일정류가 생기게 된다. 이 때에, 충격파관벽에 접하고 있는 액면은 충격파관 벽에 박막을 남기면서 낮아지기 때문에, 관벽에는 원래의 액면위치에서 낮아진 위치까지 막두께를 증가하면서 액막이 남아, 그 부분의 빛의 굴절에 의해 검게 보인다. 즉, 이 부분은 투과압축충격파에 의한 압축 때문에 액면이

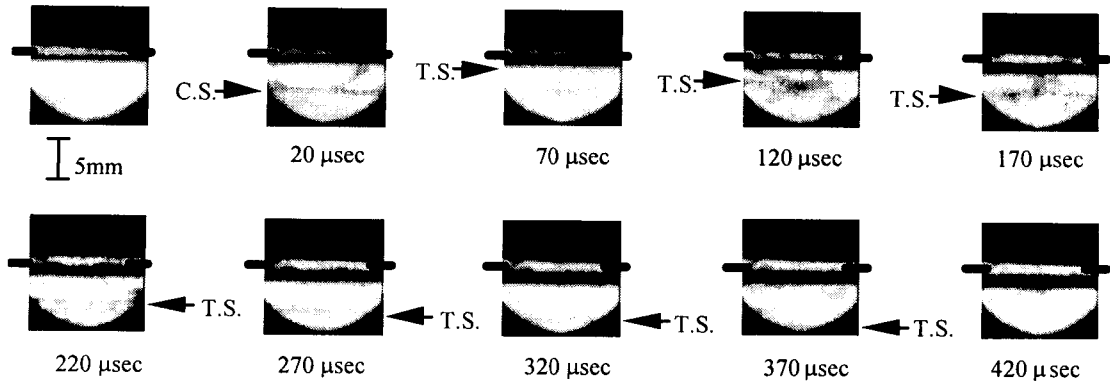


Fig. 1. Typical visualization result taken by ultra-high-speed video camera (Schlieren method). Time written below each picture indicates the time after a gas dynamic shock wave impingement. Initial temperature, 2.00K; pressure rise by a transmitted compression shock wave (C.S.), 0.2MPa. T.S., thermal shock wave; C.S., transmitted compression shock wave.

낙하할 때, 창에 잔유하고 있는 메니스커스부분의 연장으로 생긴다고 생각된다.

액면거동과 검게 보이는 층의 관계를 보다 자세히 조사하기 위해, 1.80K과 2.00K에서 검은 층의 성장을 투과압축충격파에 의한 압력상승비로 Fig. 2에 나타내었다. 이 그래프에는, 다른 실험온도와 다른 액면의 높이의 데이터를 함께 표시하기 위해, 검은 층의 최대폭, 즉 투과압축충격파가 충격파관의 끝면에 도달했을 때의 폭 (x)을 액면의 높이 (L)로 무차원화해서 표시하였다. 그리고, 이 층의 성장과 액면낙하의 관계를 조사하기 위해, 등온압축율 (κ)로부터 계산한 액면 낙하거리를 직선으로 해서 이 그래프에 함께 표시하였다. 계산에 이용한 식을 이하에 보인다.

$$\frac{x}{L} = \kappa \cdot \Delta P|_T \quad (1)$$

$$\text{단, } \kappa = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dP}|_T$$

여기에서, $\Delta P|_T$ 는 등온 압축에 의한 압력상승비를 표시하고 있다.

충격압축에 의한 액면낙하거리를 등온 압축률로부터 구한 낙하거리와 비교한 이유에 대해서 간단히 서술한다. 통상, 약한 충격파의 경우, 충격압축에 의한 변화는 단열압축으로 근사된다. 그러나 He II의 경우는 정압비열(C_p)와 정적비열(C_v)의 값이 거의 같으므로, 이 조건에서 열역학적관계식을 이용하면, 등온압축율과 단열압축율 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_T \approx \left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_S$$

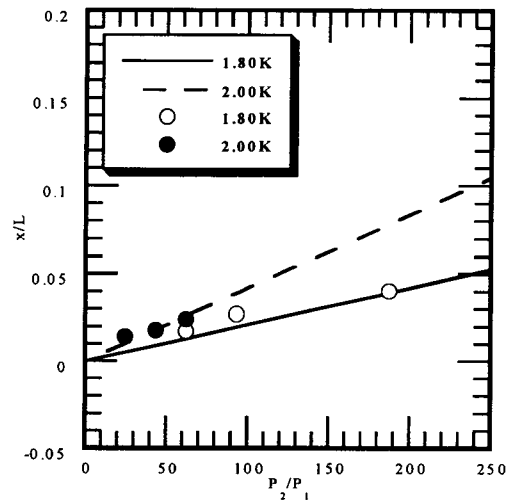


Fig. 2. The distance of contraction He II -vapor interface induced by a transmitted compression shock wave. The solid and broken lines indicate the calculated values with the isothermal compressibility. x/L , linear shrinkage/liquid depth; P_2/P_1 , pressure rise ratio by a transmitted compression shock wave. (1, initial state; 2, compression state)

즉, 등온압축율은 단열압축율에 거의 같다. 한편, He II의 물성 데이터에 대해서는, 단열 압축율은 데이터의 입수가 어렵기 때문에, 본 연구에서는, 등온 압축율을 이용해서 실험결과를 비교하였다.

실험결과는, 약간의 오차는 있으나, 1.80K과 2.00K의 실험결과 모두, 검은 층의 성장과 등온 압축율로부터 구한 액면낙하거리는 일치하고 있는 것을 보이고 있다. 이 결과로부터, 검은 층의 성장은 액면의 낙하거리를 나타낸다고 알 수 있다. 또한, 같은 압력비에 대해서는, He II물성에

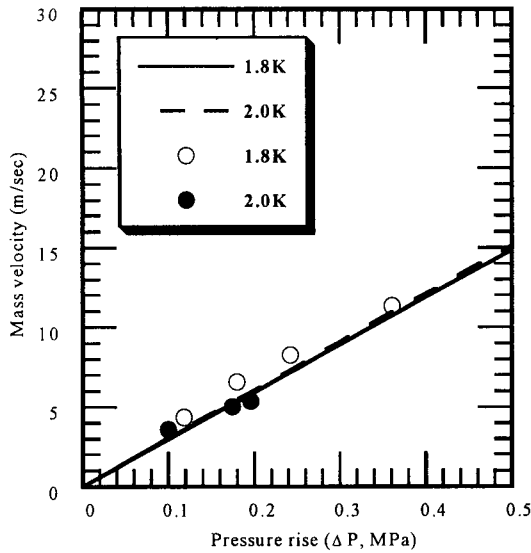


Fig. 3. Mass velocity behind a transmitted compression shock wave plotted against the pressure rise by a transmitted compression shock wave. The solid and broken lines are Khalatnikov approximation

의해 높은 온도 쪽의 액면낙하가 큰 것을 보이고 있다.

전술한 것처럼, 초고속 비디오카메라에 의한 가시화측정으로부터 액면낙하거리를 관측할 수 있으며, 이 낙하거리의 시간변화, 즉 액면낙하속도를 이용하면, 투과압축충격파에 의해 유도되는 투과압축충격파의 배후의 He II 일정류 속도를 구할 수 있다. 이 일정류 속도를, 압력 상승치에 대해 나타낸 그래프를 Fig. 3에 보인다. 또한, 비교를 위해 Khalatnikov의 근사해[3]도 함께 나타내었다.

$$v = \frac{\Delta P}{\rho a_1} \quad (2)$$

본 실험에서 조사된 압력상승 조건에서는, 투과압축충격파에 의해 유도된 일정류의 속도는 최대 10m/sec정도 였다. 또한, 발생된 투과압축충격파가 비교적 약한 충격파였기 때문에, 이 정도의 압력상승에서는 Khalatnikov 근사식으로 근사될 수 있다.

2.2 초유동 충격파관 장치의 고 레이놀즈 유동 실험에의 응용

레이놀즈 수는 주어진 유동중의 관성력과 점성력과의 비를 나타내는 무차원 수이며, 다음과 같이 정의된다.

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} = \frac{u d}{\nu} \quad (3)$$

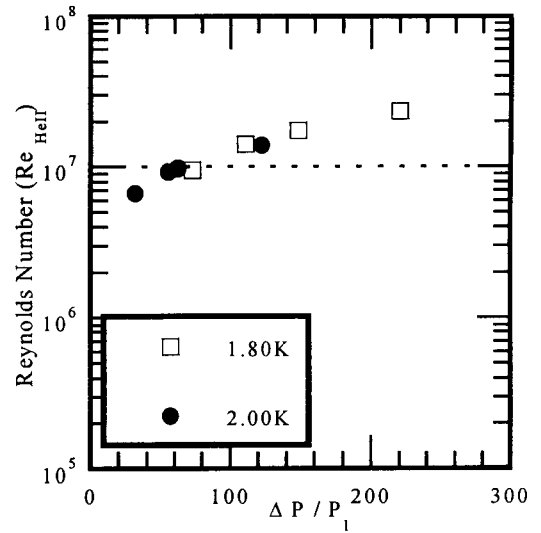


Fig. 4. High Reynolds number flow realized behind a transmitted compression shock wave.

여기에서, ρ : 유체 밀도, u : 유속, d : 대표길이, μ : 점성계수, ν : 동점성계수이다.

He II중에는, 투과압축충격파의 배후에 일정류가 생기고, 그 속도는 Fig. 3에 보인 것처럼 약 10m/sec정도였다. 그 속도를 레이놀즈수로 환산해서 투과압축충격파의 압력상승치 (무차원)에 대해서 나타낸 그래프를 Fig. 4에 보인다. 이 그림의 횡축에 표시하고 있는 압축비는, 1.80K과 2.00K의 He II의 투과압축충격파에 의한 압력상승을 대응하는 온도의 포화증기압으로 나눈 값이다. 종축의 레이놀즈수(Re_{HeII})는 충격파압축에 의해 가압된 상태에서의 밀도와 점성계수를 이용하여, 충격파관의 단면의 짧은 변의 길이(0.02m)를 대표길이로 이용해서 계산했다. 이 그림에서, 투과압축충격파에 의한 압축비가 비교적 작은 경우, 예를 들어 약 100정도라도, 유도되는 레이놀즈수는 10^7 에 달하고 있는 것을 알 수 있다. 10^7 정도의 고 레이놀즈수 유동이 얻어지는 장치로서는, 대형 아니면 저온풍동장치가 일반적이다. 현재 미국에서는 He II를 작동유체로 하는 초유동 풍동장치가 건설되려고 하고 있다. 어느 경우라도, 이런 장치는 대형이고 많은 동력을 소비하기 때문에, 실험실 규모의 크기로 설치할 수는 없다. 그러나 초유동충격파관 장치는 실험실 정도의 크기로 10^7 이상의 고 레이놀즈수 유동을 발생시킬 수 있는 장치로서 이용할 수 있는 가능성이 있다. 즉 초유동충격파관 장치를 초유동풍동 장치에 대신하는 장치로 응용할 수 있는 가능성을 보이고 있다. 단지, 충격파배후의 일정류의 지속시간은, 투과압축충격파의 통과로부터 충격파관 밀면에서 반사한 반사압축충격파의 도달까지의 매우 짧은 시간 안에 종료한다. 이 때문에 만족하는 고 레이놀즈 유동 실험에 응용하기 위해서는, He II부분을 보다 길게 할 것과 충격파관의 밀면에서 반사하는 반사압축충격파의 제어 등이 필요하다.

3. 결 론

본 연구에서는 초고속 비디오카메라를 이용하여 He II의 충격파 압축에 의해 유도된 일정류를 측정하였다. 이하에 본 연구에서 얻어진 결과를 정리한다.

1) 기체역학적 충격파의 액면충돌에 의해 액면 근처에 유도되는 검게 보이는 층의 성장은, 액면 낙하 할때의 창에 잔유하고 있는 메니스커스의 연장이 주된 원인이다.

2) 투과압축충격파의 배후에 유도되는 일정류 속도는, 본 실험조건 내에서 최대 10m/sec 정도 였고, 등은 압축율을 이용해서 이 속도를 근사할 수 있다.

3) 일정류 속도를 레이놀즈수에 환산하면, 10^7 을 넘는 고 레이놀즈수에 상당하며, 이것은 초유동충격파관 장치가, 초유동풍동장치를 대신하는 고속유동 발생장치로서도 이용가능하다는 것을 시사하고 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] 양형석, H.Nagai, Y.Ueta, K.Yanaka, M.Murakami, "초유동충격파관장치 및 측정수단" 2002 한국 초전도 저온공학회 발표집
- [2] 양형석, H.Nagai, Y.Ueta, K.Yanaka, M.Murakami, "기체역학적 충격파의 입사에 의해 유도된 초유동헬륨층의 충격파" 2002 한국 초전도 저온공학회 발표집
- [3] I.M. Khalatnikov "Introduction to the Theory of Superfluidity", Benjamin, New York, 1965