

기체역학적 충격파의 입사에 의해 유도된 초유동헬륨중의 충격파

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)

Shock Waves in He II induced by a Gas Dynamic Shock Wave Impingement

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 - Two modes of shock waves propagating in He II (superfluid helium), this is a compression and a thermal shock waves, were studied experimentally by using superconductive temperature sensors, piezo pressure transducers and Schlieren visualization method with an ultra-high-speed video camera (40,500 pictures/sec). The shock waves are induced by a gas dynamic shock wave impingement upon a He II free surface. It is found that the shock Mach number of a transmitted compression shock wave is up to 1.16, and the shock Mach number of a thermal shock wave coincides well with the second sound velocity under each compressed He II state condition. The temperature rise ratio of an induced thermal shock wave to that of an incident gas dynamic shock wave was found to be very small, as small as 0.003 at 1.80K.

1. 서 론

본 연구는 초유동충격파관장치[1-3]를 이용해서 초유동헬륨 (He II) 중에 강한 압축충격파(제1음파 기원)와 열충격파(제2음파 기원)를 동시에 발생시켜, 이 2종류의 충격파를 초전도 온도 센서, 압력센서, 초고속 비디오 카메라등을 이용해서 계측한 것이다. 본 연구가 종래의 He II 중의 충격파에 관한 연구와 크게 다른 점은, 상술한 2종류의 강한 충격파가 He II 중에 동시에 발생된다는 점 이외에도 종래의 히터에 의한 가열방법 대신에 기체가 충격 압축될 때의 급격한 온도 상승을 가열원으로 사용한 점에 있다. 종래의 충격파 연구는, 초유동 헬륨의 특이한 전 열현상에 의해 발생하는 열충격파의 독특한 비

선형성 등의 물리적 흥미가 선행한 점과, 극저온 환경에서 강한 압축충격파를 발생시키는 장치의 미비했던 점등의 이유로, 열충격파의 연구에 거의 한정되어 있었다.

He II중에서의 2종류의 충격파의 이해는, 단순한 물리적 흥미뿐만 아니라, He II를 냉매로 사용하는 경우의 공학적 응용면에 있어서도 대단히 중요한 의미를 가진다. 요즘, He II는 우주공학에 있어서, 초전도 마그넷과 적외선 탐사 등의 극저온 냉각을 필요로 하는 검지기 등의 냉각에, 우수한 냉매로서 자주 사용되고 있다. 최근에는 보다 우수한 냉각성능을 가진다는 이유로, 포화 He II보다도 가압 He II가 보다 고빈도로 사용된다. 그러나, 초전도 마그넷의 퀘칭발생과 또는 검지기의 발열과 같은 급격한 발열이 He II중에 있을 경우, He II에는 강한 열충격파와 강한 압력진동이 발생하고, 그 후, 급격한 헬륨 증발이 일어나, 냉매 전체로서의 급격한 체적팽창이 일어날 수 있다. 이렇게 되면, 헬륨증기의 폭발 등의 안전성에 대단히 중요한 문제로 발전할 수 있다. 그러나, 이와 같은 압력진동을 포함한 He II중의 고도로 비정상적인 열유동현상은 아직도 충분히 해명되어 있지 않다. 그 주된 이유는, 대량의 열입력이라는 조건하에서의 열충격파의 연구와 강한 압력충격파의 연구가 충분히 되어 오지 않은 점에 있다. 본 연구에서는, 2종류의 강한 충격파의 거동을 파악하여 He II중의 고도로 비정상적인 열유동현상을 이해하는 것을 연구목적으로 하고 있다.

2. 초유동 충격파관 장치

본 연구에서 사용한 초유동 충격파관 장치에서는, 충격파관의 고압부에 충전한 고압의 헬륨가스를, 퀘 오픈 벨브 (MO Valve)를 열어, 포화

헬륨 증기 중에 급방출시켜, 헬륨증기 중에 기체 역학적 충격파를 발생시켜, 이것을 He II의 자유표면에 충돌입사 시킨다. 이 실험장치인 초유동 충격파관 장치 및 온도측정에 사용한 초전도 온도센서, 압력측정에 이용한 압력센서에 대해서는 참고문헌[4]에 상세하기 때문에 여기서는 반복하지 않는다. 가시화 측정에는, 초고속 비디오 카메라 (최고속 40,500 장/초, FASTCAM-ultima-3, photron사)를 사용하여, 현상의 동적인 거동을 관찰했다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 전형적인 가시화 측정결과

초고속 비디오 카메라를 이용해서, 기체역학적 충격파의 충돌 입사후의 He II 자유표면 근방을 촬영한 일련의 사진을 Fig. 1에 보인다. 이때의 He II 초기 온도는 2.00 K이고, 투과압축충격파에 의한 압축은 0.2 MPa 정도이다. 이 일련의 사진은 슈리렌 사진이므로, He II의 밀도 구배를 표시하고 있다. 사진은, 상부의 좌측부터 기체역학적 충격파의 충돌입사 후의 경과시간 순으로 정리되어 있으며, 사진 밑에 그 경과시간을 표시했다. 기체역학적 충격파의 충돌후 20 μ sec의 사진에, 투과압축충격파(C.S.)의 파면이 보이며, 이것은 전파속도가 빠르기 때문에 이 이후의 사진에는 보이지 않는다. 열충격파(T.S.)는 70 μ sec의 사진에서 확인되며, 370 μ sec의 사진까지 천천히 전파하는 모습이 연속적으로 촬영되어 있다. 여기서 주목할 점은, 열충격파의 파면이 슈리렌법에 의해 가시화되었다는 것이다. 열충격파의 본질은 제2음파, 즉 순수한 온도파이기 때문에 그것에 동반하는 압력의 변화는 크지 않다. 그러나, 열충격파의 경우는, 급격한 온도 변화에 의해 그에 상응하는 밀도변화가 생겨, 그 밀도 구배가 여기에 비쳐지고 있는 것이다. 이에 의해, 가시화측정으로부터도 열충격파의 정보를 얻을 수 있으며, 온도측정과 함께 가시화측정도 열충격파의 연구에 있어서 중요한 측정수단인 것이 확인되었다.

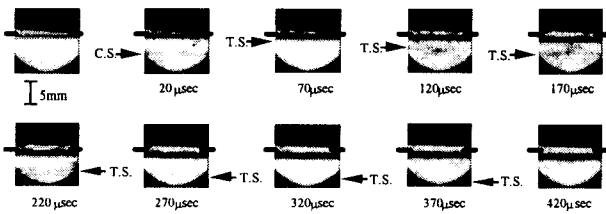


Fig. 1. Typical visualization result taken by ultra-high-speed video camera (Schlieren method). Time written below each picture indicates the time after a gas dynamic shock wave impingement. Initial temperature, 2.00 K; pressure rise by a transmitted compression shock wave (C.S.), 0.2 MPa. T.S., thermal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

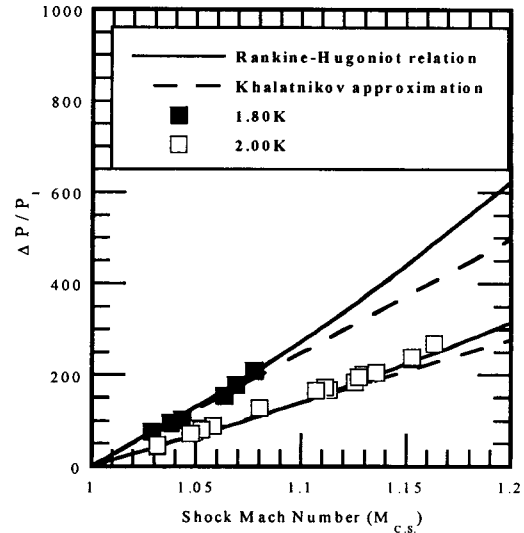


Fig. 2. Pressure rise from shock compression caused by a transmitted compression shock wave represented as a function of shock Mach number for two He II temperature

한편, 이 사진에서 또 다른 주목할 점은, 기체 역학적 충격파의 충돌후에 나타나는 액면근처의 검게보이는 층에 대해서이다. 이것에 관해서는 참고문헌[5]에서 자세히 서술한다.

3.2 투과 압축충격파의 충격파 마하수

투과압축충격파에 의한 압축에 동반하여 일어나는 압력변화를 충격파 압력상승비로 하여 충격파 마하수 ($M_{c.s.}$)에 대하여 나타낸 그래프를 Fig. 2에 보인다. 비교를 위해, Khalatnikov의 근사식[6]의 결과를 파선으로, He II에서의 충격파 이론식(Rankine-Hugoniot)을 실선으로 하여 함께 나타내었다. 이 결과로부터, 기체역학적 충격파의 액면 충돌입사에 의해 He II중에 발생하는 투과 압축충격파의 충격파 마하수는, 본 연구의 경우 1.16 정도까지 인 것을 알 수 있다. 실험결과, 충격파 마하수가 증대함에 따라 약비선형 근사해인 Khalatnikov 근사해로부터, 비선형효과를 고려한 Rankine-Hugoniot의 관계식으로 이행하는 것을 보이고 있다. 물론, 충격파 마하수가 작은 경우, 즉 약한 압축충격파의 경우는, 간단한 계산으로 구하여 지는 Khalatnikov 근사해로도 잘 근사할 수 있다. 한편, 투과압축충격파에 의한 충격압축에 의해 생기는 온도변화비를, 충격파 마하수에 대해서 나타낸 그래프를 Fig. 3에 보인다. 이 그래프로부터, He II는 열팽창계수값이 매우 작아 그것을 무시한 결과, 즉 온도변화가 없다고 근사한 Khalatnikov 근사해($\Delta T = 0$)와는 다르게 실제로는 투과 압축충격파에 의해 수 mK에서 수십 mK에도 달하는 온도저하가 유도되는 것을 알 수 있다. 이와 같은 충격파의 압력과 온도측정에 의해, 충격파 마하수가 작은 경우(예를 들어, $M_{c.s.} < 1.1$)의 압력은 Khalatnikov 근사로 변화

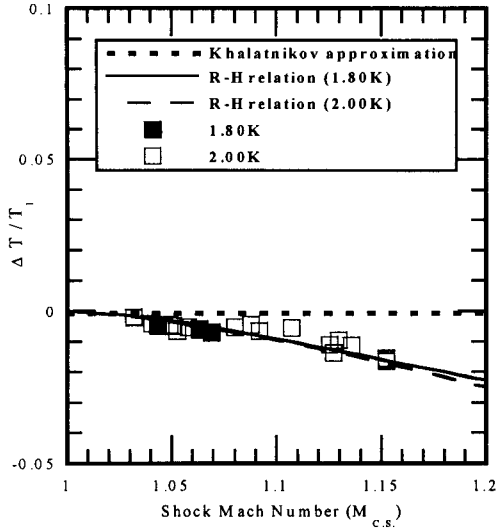


Fig. 3. Temperature jump from shock compression caused by a transmitted compression shock wave represented as a function of shock Mach number $M_{c.s.}$ for two He II temperatures. The dotted line is the Khalatnikov approximation. Solid and broken lines indicate Rankine-Hugoniot Relation

하나, 온도변화는 0이 아닌 유한의 값이 얻어져, Khalatnikov 근사보다도 고차 오더의 항에 상당하는 값이 얻어졌다. 그러므로 온도의 변화에 있어서는 충격파 마하수가 작은 경우에도 Khalatnikov 근사해로는 타당한 값을 예측할 수 없다.

3.3 열충격파의 온도 진폭

기체 역학적 충격파의 충돌입사에 의해 He II 중에 유도된 열충격파의 온도진폭비($\Delta T_{Ts}/T_1$)를, 기체역학적 충격파에 동반하는 증기중의 온도 상승비 ($\Delta T_V/T_1$)에 대해 He II의 몇 개의 초기온도로 나타낸 그래프를 Fig. 4에 보인다. 이 횡축의 증기중의 온도상승비는, 실험적으로 구한 충격파 마하수 (M_G)를 이용하여, 이하의 기체역학의 충격파 이론식으로부터 구한 값이다.

$$\frac{\Delta T_V}{T_1} = \frac{[2(\kappa-1)M_G^2 + (3-\kappa)][(3\kappa-1)M_G^2 - 2(\kappa-1)]}{(\kappa+1)^2 M_G^2} - 1$$

여기에서, 첨자 1은, 기체역학적 충격파의 충돌입사전의 상태를 나타내고 있다. 증기의 온도 상승 (ΔT_V)가 작은 경우는, 각 초기온도에 대해서 공통으로, 증기 온도 상승에 대해서 선형적으로 열충격파의 온도진폭도 증가하나, 2.00 K 이하의 온도에서는, 어느 정도 이상으로 증기 온도 상승이 높아지면, 온도 진폭은 선형관계를 밀도는 어떤 일정치에 접근하는 것과 같이 되나, 2.14 K의 경우에는 어떤 값 이상의 $\Delta T_V/T_1$ 에 대해서는 열충격파의 온도진폭이 0로 된다. 이 경우에

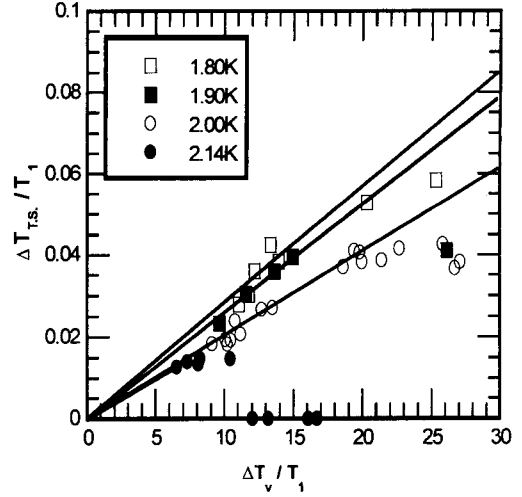


Fig. 4. Temperature amplitude of the thermal shock wave (DTT. S.) plotted against the temperature jump (DTV) by the gas dynamic shock wave. The lines are simple guides to eyes.

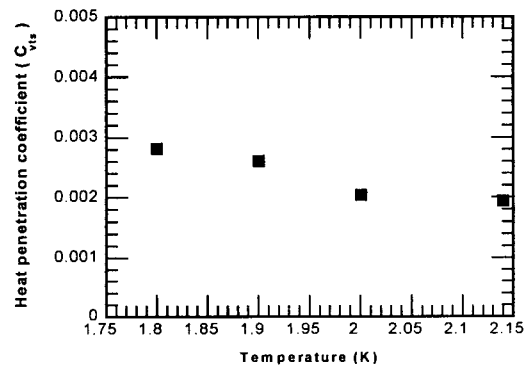


Fig. 5. Heat penetration coefficient (C_{vts}) from heated helium vapor to thermal shock wave found from the experimental data shown in figure 4.

는 λ 선에 근접해 있기 때문에, 충격압축에 의해 λ 선을 가로 지르는 상변화[7]가 일어나, He I상태가 됐기 때문에, 열충격파가 형성되지 않은 것이다.

증기의 온도 상승이 작은 경우의 열충격파의 온도 진폭은, 증기 온도가 상승함에 따라 선형적으로 증가하나, 그 증가경향은 온도에 따라 다른 것을 알 수 있다. 또한, 이 기울기 $\Delta T_{Ts}/\Delta T_V$ 는, 자유계면위의 압축증기로부터 자유계면을 통과하여 He II중에 열충격파로 전달되는 열의 비율을 나타내며, 이를 여기에서는 열관통계수(C_{vts})라 하며, Fig. 5에 그 값들을 He II의 온도에 대해서 나타내었다. 이 값들은 발열체(고온증기)와 열충격파의 온도진폭비를 부여할 수 있는 지표에 해당한다고 생각된다. 한편, 강한 충격압축에 의해 증기의 온도상승이 큰 경우에는, 작은 온도상승의 경우에 구한 열관통계수를 밀도는 열

이 He II에 전달된다. 이것은, 강한 기체역학적 충격파의 압축에 의해 액면 자체 온도가 λ 점 온도 이상으로 상승해 버렸기 때문으로 생각된다. 이때, 전열에 의해 액면의 바로 밑부분에는 He I층이 형성되고, 그 속을 열전도에 의해 확산적으로 열이 전달되어, λ 점 이하의 온도 이하로 된 지점에서 열충격파가 그 하부의 He II를 전파하기 시작한다. λ 점온도에 까지 달하는 대량의 열 입력에 의해, 액면근처의 He II에는 고밀도의 양자화 와(vortice)가 발달하여, 그 와와의 간섭에 의해 열충격파의 진폭 및 파형이 상당히 제한된다. 이 때문에, 열충격파의 온도진폭은 증기 온도 상승치와의 선형관계로부터 벗어나, 그 결과, 열관통 계수를 밑도는 열이 He II중으로 운반된다고 생각된다.

3.4 열충격파의 충격파 마하수

열충격파는, 그 전파속도가 투과압축충격파에 비해 상당히 느리기 때문에, 선행하는 압축충격파에 의해 압축된 He II중을, 투과 압축충격파에 의해 발생된 입자속도[5]가 중첩된 속도로 느리게 전파한다. 이 점을 고려하여, 외견상의 열충격파의 전파속도로부터 입자속도를 제하는 방법에 의해, 열충격파의 전파속도를 구할 수 있다. 그 결과를 Fig. 6에 보인다. 비교하기 위해서, 각 온도에서의 가압상태의 제2음파 음속도 함께 나타냈다. 이 결과로부터, 기체역학적 충격파의 충돌입사에 의해 발생된 열충격파는, 거의 가압상태의 제2음파의 속도로 전파하는 것을 알 수 있다. 즉, 열충격파의 충격파 마하수는 거의 1이다.

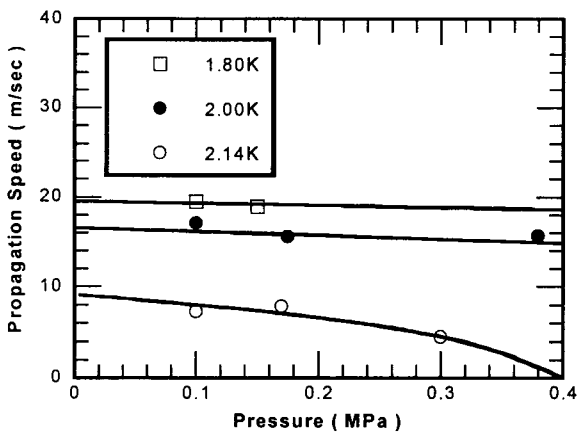


Fig. 6. Propagation speeds of thermal shock wave in shock-compressed He II. The three curves represent the second sound velocities in compressed He II at the three He II temperatures.

4. 결 론

본 연구에서는 He II에서의 충격파의 전파특

성을 조사하기 위해서 초유동충격파관장치를 이용하여 강한 압축충격파와 열충격파를 동시에 발생시켜, 이 2종류의 충격파의 거동을 초전도온도 센서, 압력센서, 초고속 비디오카메라 등으로 측정했다. 이하에 본 연구에서 얻은 결과를 정리한다.

- 1) 본 실험에서 얻어진 투과 압축충격파의 충격파 마하수는 1.16정도이고, 이 압축충격파에 동반하는 압력변화는, 충격파 마하수가 작은 경우는 간단한 계산인 Khalatnikov 근사해로도 근사할 수 있다.
- 2) 투과 압축충격파에 동반하는 온도변화는, 약비선형 근사식인 Khalatnikov의 근사해와는 달리, 수 mK에서 수십 mK에도 달하는 온도 저하가 계측되었다.
- 3) 열충격파의 온도 진폭은 증기의 온도 상승이 작을 경우는, 증기의 온도가 상승함에 따라 선형적으로 증가하며, 이 기울기로부터 열관통계수를 구했다.
- 4) 증기의 온도 상승이 높아지면 열충격파의 온도 진폭은 선형 증가 관계를 밑도는 어느 일정치로 수속되며, 이것은 액면 근방에 형성되는 와와의 간섭에 의한다고 추정된다.
- 5) 열충격파의 충격파 마하수는 거의 1이었다.

[참 고 문 헌]

- [1] H. Nagai, H.S. Yang, N. Takano, M. Murakami, "Development and Performance Test Results of Superfluid Shock-tube Facility", 일본 저온공학 논문지, Vol 33, pp. 403-409, 1998
- [2] H. Nagai, H.S. Yang, N. Takano, M. Murakami, S. Teraoka, "Development of superfluid shock tube facility", Adv. Cryo. Eng., Vol 43, pp.1393-1400, 1998
- [3] H.S. Yang, H. Nagai, N. Takano, M. Murakami, "Experimental investigation of thermal shock wave induced by gasdynamic shock wave impingement", Adv. Cryo. Eng., Vol. 45, pp.961-968, 2000
- [4] 양 형석, H.Nagai, Y.Ueta, K.Yanaka, M.Murakami, "초유동충격파관장치 및 측정수단" 2002 한국 초전도 저온공학회 발표집
- [5] 양 형석, H.Nagai, Y.Ueta, K.Yanaka, M.Murakami, "초유동충격파관장치의 고레이놀즈 수 유동 실험에의 응용", 2002 한국 초전도 저온공학회 발표집
- [6] I.M. Khalatnikov "Introduction to the Theory of Superfluidity", Benjamin, New York, 1965
- [7] H.S. Yang, H. Nagai, M. Murakami, Y. Ueta, "Temperature Measurement Study of Shock waves in He II Induced by a Gas Dynamic Shock Wave Impingement", 일본저온공학 논문지, Vol.36, pp.2-9, 2001