

Double speaker 1/2파장 열음향 냉동기의 성능 평가

송규조*, 박종호**, 이성노**

The Performance Investigation of Double-speaker-1/2 Wavelength Thermoacoustic Refrigerator

Song Kyu Joe*, Park Jong Ho**, Lee Sung Ro**

Key Words : Thermoacoustic(열음향), Frequency(주파수), Stack(적판), COP(성적계수)

Abstract

A thermoacoustic refrigerator, using a resonant standing acoustic wave, has been built. It employs a loudspeaker to sustain a standing wave in a resonance tube. The stack of plates is 0.075mm-thick plastic sheet(Mylar), spirally wound to make a 40mm-diameter assembly 80mm long, and two heat exchanger are installed. The refrigerant is Helium gas. The description of thermoacoustic refrigerator are presented. The directly measured performance of the resonator. T_c/T_h (temperature ratio) and COP/COP_c (normalized by carnot's COP) are plotted versus the thermal load Q applied to the cold end, for various speaker power.

1. 서론

열음향 냉동은 증기 압축식 냉동기에 비해 큰 동력을 필요로 하지 않는 저온 냉동 기술 중 하나로 스피커와 같은 음향 발생 장치가 기존 냉동기의 압축기로 대체되어 있으며 CFC를 냉매로 사용하는 대신에 헬륨, 아르곤 등 환경에 무해한 기체를 사용하고, 구조가 비교적 간단하여 유지 보수가 쉬워 기계적 신뢰도가 높은 것이 특징이다. 스피커의 진동 부분을 제외하면 가동부가 없고 구조가 단순하기 때문에 저가적으로 제작할 수 있다. 그러나 저효율이 문제가 되고 있어 그것을 보완하기 위한 연구가 계속 진행되고 있다. 무한 매질 안에서 소리가 전파되는 경우 열은 소리의 전파 방향을 따라 매질을 통하여 확산되며 관에서 소리가 전파되는 경우 열은 매질을 통해 관 안에서 확산된다. 균일 온도로 관내 발생한 정재파에 대해 관벽을 따라서 순열(net heat)의 이동이 있으며 Merkli 와 Thomson⁽¹⁾에 의하여 관내 정재파 속도배 영역에서 압력 배 영역으로 열이 전달된다는 것이 발견되었다. 이 현상은 Rott⁽²⁾에 의해 열음향학적 흐름(thermoacoustic streaming: 열음향 냉동)이라고 명명되었다. 그 반대의 경우로 관내에서 음파를 발생시키려면 상당한 온도 구배가 관에 주어지게 되는데 그것을 최초로 설명하고자 한 사람이 1850년 Sondhauss⁽³⁾였다. Taconis⁽⁴⁾ 진동이라고 알려진 이 효과는 관이 극저온 용기에 삽입되거나 그 반대인 경우로, 용융된 유리관을 유리병에 접합할 때 볼 수 있다. 이 현상은 1969년 Rott가 이론적으로 설명하였으며 이 열음향 음향 발생과 열음향 냉동을 같이 고려하여 열음향 효과라고 말한다. 음향 냉동기의 예

로 남아프리카의 Concil for Scientific and Industrial Research에서 제작한 반파장 구동용 twin speaker U형 냉동기가 있으며 공명관은 유리섬유이고 cooling power 100 w 이다. 실험용 냉동기로는 Bimorph piezoelectric을 구동기로 쓰는 소형 냉동기가 있고 적판 재질은 cotton wool이며 4.2 KHz에서 약 30 °C의 온도차를 나타낸다. STAR (Space ThermoAcoustic Refrigerator)라고 명명된 1/4 파장용 냉동기는 매질로 He & Argon 혹은 He & Xenon의 혼합기체를 사용하는데 평균 압력은 10 기압이다. polyester film의 재질인 길이, 79 mm, 직경 38 mm의 적판을 사용하여 100-200 °C의 온도차를 보인다. 1/2 파장 냉동기는 말단에 또 하나의 적판을 설치하여 효율 향상을 이룰 수 있고 공명관 구조가 단순하기 때문에 쉽게 구조 변경이 가능한 장점이 있다. 그렇기 때문에 본 논문에서는 1/4 파장 열음향 냉동기보다 공명관의 구조가 단순하나 손실이 조금 더 높아서 1/4 파장 열음향 냉동기에 비해 덜 알려진 1/2 파장 냉동기를 제작하고 냉동 능력 등을 실험하였다.

2. 열음향 기본 원리

정재파가 인가된 밀폐관은 관끝에서 압력 최대점이 나타난다. 관의 길이는 $\lambda/2$ 의 정수배와 같게 되고 기본 파장은 관길이의

2 배가 되면서 정수 하모닉만 존재한다. 따라서 $L = n \frac{\lambda}{2}$, $n = 1, 2, 3, \dots$ λ : 파장, L: 공명관 길이, 그러므로 1/2 파장 2/2 파장 3/2 파장 등이 형성되게 된다. Fig. 1.은 $\lambda/2$ 관의 기체 진동 속도와 진동 압력을 나타내고 있으며 서로 90도의 위상을 보이고 있어 열음향 현상을 나타내는 중요한 인자로 작용한다.

Fig. 2.는 double speaker 1/2파장 냉동기의 개략도로서 관 양쪽으로 한 쌍의 스피커, 한 쌍의 고온 열교환기, 한 쌍의 저온

* 충남대학교 대학원 aina@hanmir.com

** 충남대학교 기계공학과, jhpark@cnu.ac.kr

** 충남대학교 기계공학과, snlee@cnu.ac.kr

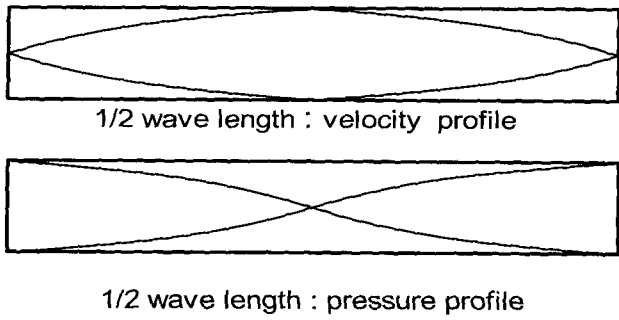


Fig. 1. pressure & velocity of $\lambda/2$ closed tube

입자의 열은 판을 향하여 전달되어 기체 온도는 $T_m + x_1 dT_m$ 가 된다. 세 번째 단계로 기체 입자는 원위치로 돌아오면서 단열 팽창에 의해 온도는 $T_m + x_1 dT_m - 2T_1$ 로 낮아지게 된다. 네 번째 단계로 판의 온도는 기체 입자의 온도 보다 높으므로 기체는 열을 흡수하여 $T_m - x_1 dT_m$ 의 원래 온도가 된다. 이 사이클은 소리의 진동으로 발생하는 일에 의해 열 dQ 가 펌핑이 된다. 개괄하면 전체 적판에 걸친 음파의 종진동을 매개로 기체 입자들도 같이 진동하면서 열이 인접한 기체 입자로 계속 전달이 되기 때문에 정상 상태에 도달할 때까지 계속 온도가 떨어진다.

3. 실험장치 및 제작

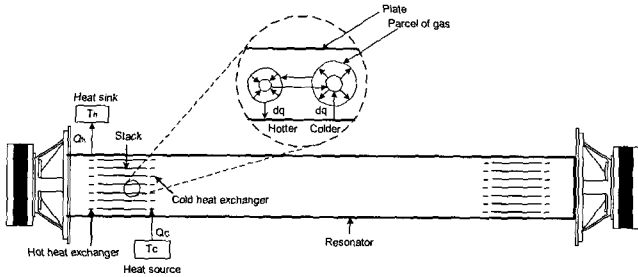


Fig. 2. Schematic diagram of double speaker $\lambda/2$ thermoacoustic refrigerator.

Fig. 4에서는 황동 스피커 하우징과 스테인레스 스피커 하우징을 장착한 double speaker $\lambda/2$ 열음향 냉동기의 전경을 보이고 있다. 스피커가 하나가 장착된 $\lambda/2$ 열음향 냉동기의 공기 냉매 사용 실험에서 가장 큰 저온부 도달 온도를 보인 746 cm 공명관 길이를 참조로 구리 공명관(40.5 cm)과 2 단 공명관 두 개(19.6 cm + 14.6 cm)를 사용하여 길이를 맞춘 다음 공명관 양끝에 두 개의 스피커 하우징을 부착하여 제작하였다. 스피커 하우징 덮개는 황동 재질로 스피커 동력선과 열전대들을 외부로 인출할 수 있는 feedthrough를 설치하였고 작동 기체를 인입시키기 위한 피팅과 밸브등을 설치하였으며 냉동기 내 압력을 인지하기 위하여 압력 변환기(Keller, PA-21SR/80444.5-10)를 설치하였다. 음향 동력원은

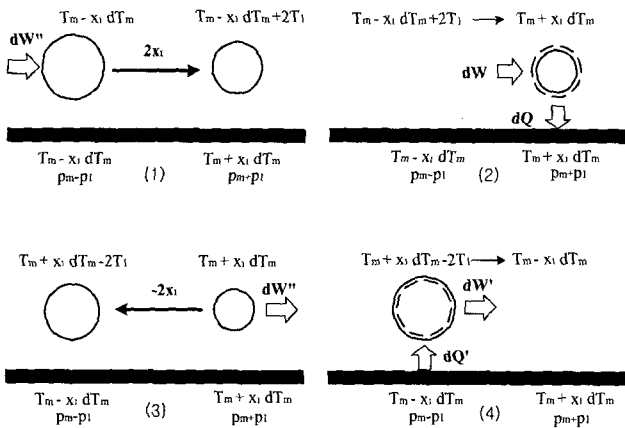


Fig. 3. Typical fluid parcels in a thermoacoustic refrigerator's stack

열교환기, 한 쌍의 적판(stack)을 장비하고 있다.

Fig. 3.의 열흐름 개략도를 보면 적판을 따라서 기체 입자가 진동할 때 온도 변화를 동반하게 되는데 온도 변화의 주원인은 음압에 의한 기체 단열 압축과 팽창이며 부원인은 적판으로의 열전달 결과이다. 기체 입자의 진동 중심을 $x=0$, 진동 거리를 x_1 , 평균 온도를 T_m , 온도 구배를 dT_m , 온도 변화를 T_1 , 평균 압력을 P_m , 압력 변화를 P_1 이라고 하면 진동하는 기체 입자에 근접한 저온측 적판의 온도는 $T_m - x_1 dT_m$ 이고 고온측 적판의 온도는 $T_m + x_1 dT_m$ 이다. 우선 첫 번째 단계로 기체 입자가 $2x_1$ 만큼 움직여 단열 압축된다. 그러면 온도는 $T_m - x_1 dT_m$ 에서 $T_m - x_1 dT_m + 2T_1$ 으로 상승하게 된다. 두 번째 단계로 $T_1 > x_1 dT_m$ 이라고 하면 등압 조건에서 기체

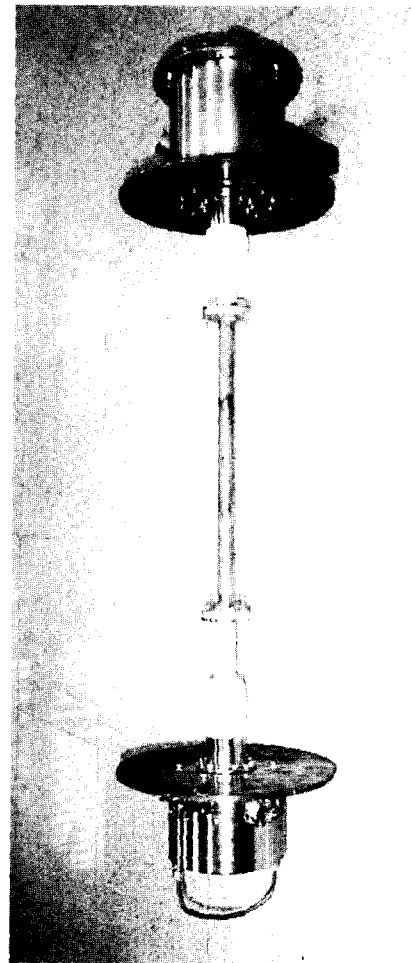


Fig. 4. Double-speaker $\lambda/2$ thermoacoustic refrigerator

고성능 확성기에 사용되는 Horn driver(SU-150EF 150watt)를 사용하였으며 냉동기에 공급한 구동 주파수는 합수 발생기 (Gold Star, F-8002)를 사용하여 정현파 신호를 발생시킨 뒤 증폭기 (Inkel, MA430)를 통하여 스피커를 구동시켰다. 스피커에 공급되는 동력은 전력량계(Voltec, PM300)로 측정하였으며 디지털 오실로스코프(Lecroy, 9310AM)에 연결하여 주파수를 관찰하였다. speaker housing에 인접하여 고온 열교환기를 설치하였으며 직경 300 mm, 두께 5 mm의 구리 원판을 사용하였다. 열교환기 중앙에는 40 mm 직경의 원안에 지름 1.5 mm의 구멍을 1.5 mm의 간격으로 방전 가공하여 공명기 쪽으로 음파를 보낼 수 있게 하였고 적판 고온부에서 발생한 열을 방출할 수 있게 하였다. 발생한 음파를 매개로 공명관 내 기체 입자들과 열교환을 하면서 열을 펌핑시키는 부품인 적판은 0.075 mm 두께의 플라스틱 재질인 Mylar 필름에 직경 0.37 mm 낫시 줄을 3~6 mm 간격으로 접착한 뒤 이것을 말아서 직경 40 mm와 길이 80 mm가 되도록 제작하여 사용하였다. 저온 열교환기는 펌핑된 저온을 유지시키는 열저장소의 기능을 하고 있다. 직경 40 mm, 두께 2.5 mm의 구리 재질이며 고온 열교환기와 같은 재원을 가진다. COP를 산출할 때 냉동 부하를 걸어 주는 히터부는 저온 열교환기를 감싸면서 적판이 들어 있는 확대관에서 축소관으로 가는 축소부(reducer) 역할을 겸하며 재질은 황동으로, 외측에는 망가닌 열선(Lake Shore, MW-36)을 길이 106.7 cm로 감았다. 1 차 단열은 아크릴 수지 실린더를 사용하였으며 길이는 77 mm, 두께는 5 mm로 적판에서 펌핑된 열을 외부로 유출되지 못하도록 금속 공명기 내부와 적판 사이에 삽입시켰다. 2 차 단열은 단열 테이프를 사용하였고 확대관, 축소부, 축소관 부근에 중점적으로 단열 테이프를 사용하였다. 공명관 본체는 직경이 다른 실린더로 구성되어 있으며 확대관 내경은 50 mm, 축소관 내경은 20 mm이고 두께는 공히 2 mm 이다. 확대관과 축소관의 연결은 45도 경사의 SUS304 테이퍼 관을 사용하여 MIG용접하여 연결하였고 다른 부품과의 연결은 플랜지를 사용하였다. 적판 저·고온부에서의 온도 측정은 K형 열전쌍을 설치한 뒤 Data logger(Fluke, HYDRA 26353)를 통하여 컴퓨터로 데이터를 수집하였다.

4. 실험 방법 및 결과 고찰

작동 주파수는 예비 실험으로부터 5 Hz간격으로 3 분 동안 주파수 sweeping을 하면서 저온부 온도 추이를 관찰하여 얻어진 최저 온도에 대한 주파수로 산정 되어졌다.

Fig. 5.는 공기를 냉매로 하고, 스피커들을 동시에 작동시켜 각각 10 W, 30 W, 50 W의 스피커 동력에 대하여 점증적으로 냉동 부하를 투입하여 고·저온부 온도비를 실험한 도표이다. 스피커 동력 10 W에서 120 Hz, 30 W에서 125 Hz, 50 W에서는 135 Hz로 인가되어졌다. 무부하 상태에서 10 W의 스피커 동력으로 -1.4 °C를, 30 W에서 -21.5 °C를 50 W에서 -35 °C를 기록하였다.

Fig. 6.는 Fig. 5로부터 산출된 데이터를 근거로 계산한 도표이다. 스피커 동력 50 W를 주고 냉동 부하를 8 W까지 주었을 때 6 W의 냉동 부하에서 가장 큰 COP인 1.58 % 를 보여주었다.

Fig. 7.은 한쪽 스피커를 작동시켜 각각 10 W, 30 W, 50 W의 스피커 동력을 인가시켜 실험한 도표이다. 스피커 동력 10 W에서 110 Hz, 30 W에서 115 Hz, 50 W에서는 125 Hz로 인가되어

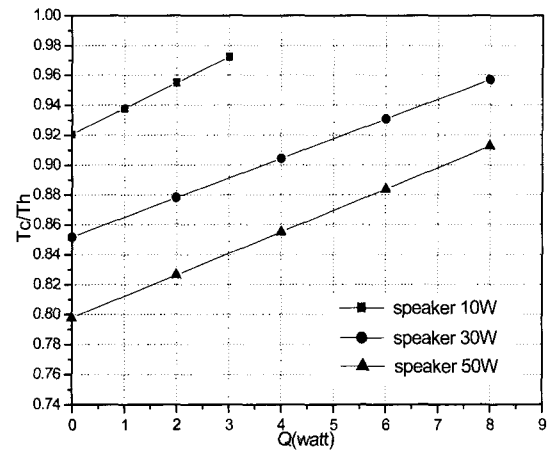


Fig. 5. Temperature ratio versus electric heater power (two speaker)

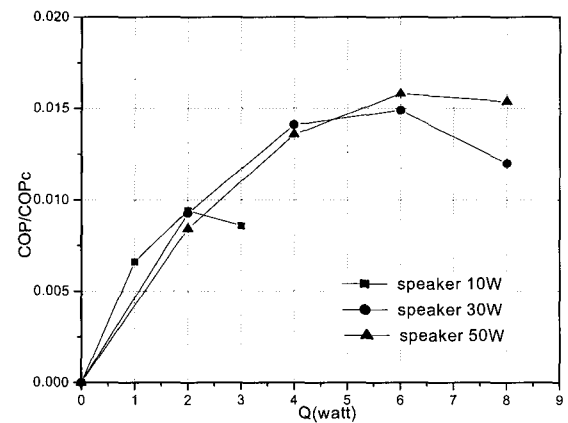


Fig. 6. Coefficient of performance normalized by Carnot's COP versus electric heater power (two speaker)

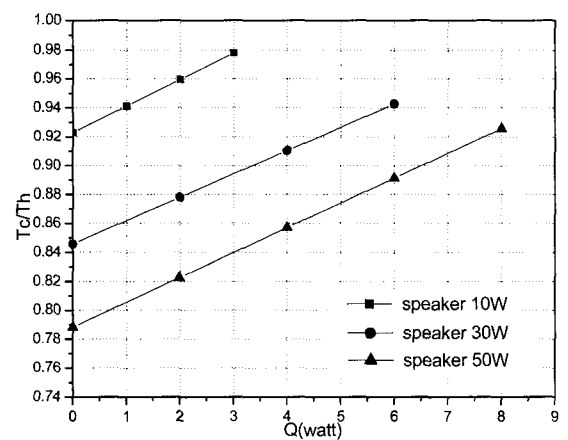


Fig. 7. Temperature ratio, versus electric heater power (one speaker)

4. 결론

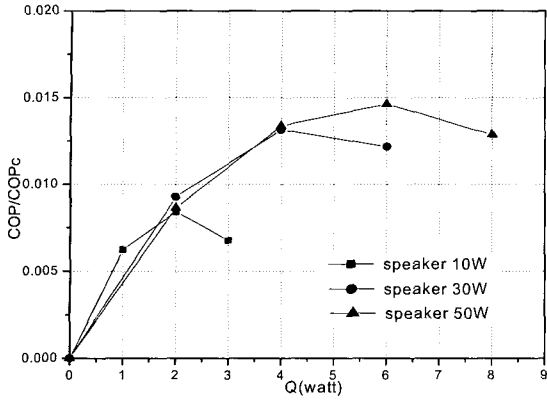


Fig. 8. Coefficient of performance normalized by Carnot's COP versus electric heater power (one speaker)

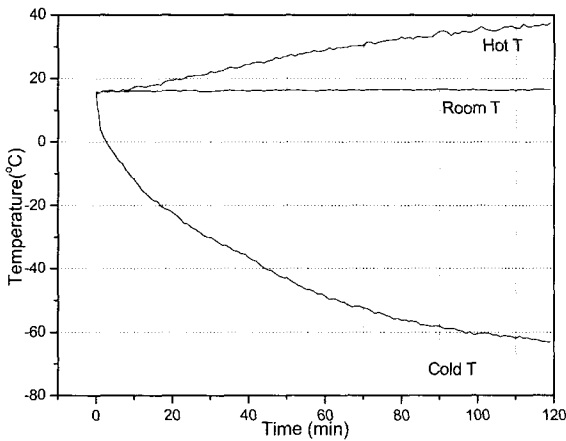


Fig. 9. Temperature profiles according to time (air)

졌다. 무부하 상태에서 10 W의 스피커 동력으로 $-1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 를, 30 W에서 $-22.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 를 50 W에서 $-39\text{ }^{\circ}\text{C}$ 를 기록하였다.

Fig. 8.은 Fig. 7.으로부터 산출된 데이터를 근거로 계산한 도표이다. 스피커 동력 50 W를 주고 냉동 부하를 8 W로 주었을 때 6 W의 냉동 부하에서 가장 큰 COP인 1.46 %를 보여주고 있다.

실험을 시작할 때는 두 개의 스피커를 쓰면 저온부 도달 온도가 더 내려 갈 것이라고 생각하였는데 실험 결과는 하나의 스피커를 사용했을 때와 비슷한 온도를 기록하였다. 원인은 2 단 공명기에 있는 것으로 사료된다. 열 손실과 점성 손실을 감소시키기 위해 2 단 구조를 채택하였는데 소 직경관의 길이가 길어지면서 상대편 관에 음향 에너지를 효과적으로 전달할 수 없었어 열음향 효과에 대한 상승 효과를 볼 수 없으므로 개별적인 냉동기로 작동하고 있는 것을 볼 수 있었다. 차후 이런 형태의 냉동기를 제작할 때에는 2 단 공명관을 지양하고 음향 에너지를 관 전체에 전달할 수 있는 대 직경관의 채용이 바람직할 것이다.

Fig. 9.은 2 개의 스피커를 사용하고 100 W의 스피커 동력을 주었을 때 나타나는 온도 이력들을 보여주고 있다. 주파수는 130 Hz로 작동 후 2 시간 경과 뒤에 $-63\text{ }^{\circ}\text{C}$ 를 보이고 있다.

double speaker $\lambda/2$ 열음향 냉동기를 제작하여 각 실험 조건에 따른 구동 주파수를 찾아내고 그 주파수들을 사용하여 실험에 적용하여 실험한 결과 스피커 입력 동력 10 W에서는 $-1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 를, 30 W에서 $-21.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 를 50 W에서 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 를 기록하였다. 50 W의 스피커 입력 동력으로 스피커를 하나만으로 구동하였을 때 두 개를 구동했을 때 보다 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 가 더 강하하였는데 두 개를 작동시켰을 때 서로 정확한 위상이 맞지 않아서 손실이 발생한 결과였다. 두 개의 스피커를 사용한 목적은 공명관에 서로 음압 상승 작용을 시켜 COP를 높이는 것이었는데 2단 공명관의 소 직경관이 열 및 점성 손실을 작게 하는 역할도 하지만 음향 에너지를 감소시키는 역할도 하기 때문에 목적에 부합하지 못했으며 추후 개량을 하여 최적 성능을 보이는 연구가 필요하다. 하지만 본 냉동기로도 스피커 입력 동력 100 W 인가 시 최고 $-63\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 저온 강하를 보여 냉동기로서의 역할을 충분히 하고 있어 개량 시 성능 향상이 기대된다.

참고문헌

- [1] Merkli. P. and Thomann. H, "Thermo- acoustic Effects in a Resonant Tube", *J. Fluid Mech.*, Vol.70, (1975), pp.161.
- [2] Rott. N, "Thermoacoustic," *Z. Angrew. Math. Phys.*, Vol.20, (1969), pp.135.
- [3] Sondhauss,C., "Uiber die Schallschwing- ungen der Luft in erhitzten Glasrohren undin gedeckten Pfeifen von ungleicher Weite" ,*Ann.Phys(Leipzig)*, vol.79, (1850), pp.1.
- [4] Tacaois.K.W, "Vavor-liquid equilibrium of solutions of ^3He in ^4He ", *Physica*, vol.15, (1949), pp.738.