

초음파 유량계에 사용되는 초음파 진동자 특성향상에 관한 연구

현병국* · 황상윤* · 안용관* · 박성하*

A Study on the Improvement of Characteristics of the Ultrasonic Transducer Used in Flowmeter

Byung-Gook Hyun*, Shang-Yoon Hwang*, Yong-Kwan Ahn*, Sung-Ha Park*

Key Words: Mason's equivalent circuit(메이슨 등가회로), Piezoelectric vibrator(압전진동자)
, Ultrasonic flowmeter(초음파유량계)

ABSTRACT

For the piezoelectric vibrator, PZT, in a general transmit-receive sensor using the ultrasonic flowmeter, the characteristics of frequency response relating to the backing materials were analyzed with the Mason equivalent circuit for design, and the sensitivity of fabricated transducer relating to the matching materials was measured and discussed. The results those were measured in water for the transmit-receive characteristics of each transducer can be applied to the flowmeter sensor.

1. 서론

초음파의 이용은 전자파와 마찬가지로 음향신호에 포함된 정보를 이용하는 것과 음향에너지 자체를 이용하는 것으로 나눌 수 있다. 이러한 초음파의 이용에서 음향에너지 자체를 이용하는 것은 특정 매질에 지속적으로 음향 에너지를 가하여 매질의 특성을 변화시켜 주는 것으로 마멸(abrasion), 가열, 공동현상(cavitation), 혼합 등의 현상을 발생시키며 초음파 세척, 초음파 용접(welding)등 주로 공업적 목적으로 사용되며, 음향신호를 이용하는 경우는 수신된 음향신호의 분석을 통해 원하는 정보를 추출하여 이용하는 것으로 광선이나 전자파로는 불가능한 수중 및 지질탐사에 응용되어 현재 비파괴 재료 시험, 초음파 현미경, 초음파 영상, 의료용 초음파

영상진단기, 정밀 계측 등의 다양한 분야에 사용되고 있다. 그리고 음향신호를 이용하면서 높은 출력을 필요로 하는 SONAR, 어군탐지기 등과 같은 산업용 또는 군사용 응용 예도 많다. 본 논문에서는 초음파 전파시간 측정 유량계에 사용할 트랜스듀서를 만들기 위하여 초음파 진동자를 사용하였다. 이러한 다양한 적용분야를 가진 초음파진동자는 1921년경 프랑스의 Langevin이 수정을 이용하여 발생시킨 이래로 발전을 거듭해 오면서 니켈, 페라이트 등을 이용한 자왜 진동자로부터 오늘날에는 BaTiO₃, ZnO, PZT, PVDF 등을 이용한 여러 가지 압전진동자들이 개발되었다. 그 중에서 현재 초음파 진동자 재료로 널리 이용되는 압전세라믹 PZT는 유전율이 수정의 400배나 되는 강유전체이므로 전기회로와의 임피던스 정합이 우수하고, 그 특성이 안정적이므로 송신용 초음파 트랜스듀서에 적합한 재료인 것으로 잘 알려져 있다.⁽¹⁾ 그러나 이러한 PZT를 이용하여 물 속에서 음파를 송신할 때 부하매질인 물과 PZT의 임피던스 차이가 상당히 크기 때문에 효율적인

* (주)창민테크 연구소

E-mail: figfarm@hotmail.com

에너지 전달 목적 이외에도 PZT의 보호와 방수 및 트랜스듀서 외형유지 등의 역할을 수행하기 위하여 어느 정도의 강도를 가져야 하므로 그 재질 및 두께의 선정이 아주 중요하다. 일반적으로는 정합층의 두께를 공진주파수의 1/4파장으로 하고 있지만, 실제로 이러한 물성치를 갖는 물질을 구하기란 어렵다. 이러한 초음파 진동자를 이용한 초음파 유량계의 적용 유체 매질에 대해서, 가스용으로 쓰일 경우에는 40~120kHz, 하천용으로 쓰일 경우에는 120~600kHz, 상수도용으로 쓰일 경우에는 600~1200kHz의 대역의 주파수를 주로 사용한다. 물에서 사용하는 정합층의 두께는 $\lambda/2$ 로 하는데 여기에서는 유체내에서 절연 및 외부충격에 대해 보호할 수 있는 두께 2.55mm로 제작하였다.

본 연구에서는 성능이 우수한 초음파장치의 개발 하기에 앞서 그 장치에 사용되는 초음파 트랜스듀서의 특성 향상에 대해서 논의하였다. 실용성을 고려하여 주변에서 쉽게 구할 수 있을 뿐 아니라 트랜스듀서의 내구성을 향상시킬 수 있는 물질을 PZT 압전체의 배면체⁽²⁾ 및 정합층^(3,4)으로 사용할 경우에 대한 이론적 특성을 실험과 비교하여 트랜스듀서의 특성향상에 대한 유효성을 확인하였다.

2. Mason 등가회로를 이용한 응답특성

본 논문에서 다루어지게 될 초음파 트랜스듀서가 부하매질과 압전체 그리고 배면체의 단순구조를 가지는 경우일 때의 다이어그램과 이러한 트랜스듀서의 송수신 응답특성을 알기 위하여 Mason 등가회로⁽⁵⁾를 사용하였는데 그림 1(a)와 그림 1(b)에 각각 나타내었다. 여기서, 흡음층의 두께는 충분히 두껍고, 접착층의 두께는 충분히 얇다고 가정하였으며, 각층에서의 손실을 무시하여 등가회로의 각각의 파라미터는 다음과 같은 값을 가지게 된다.

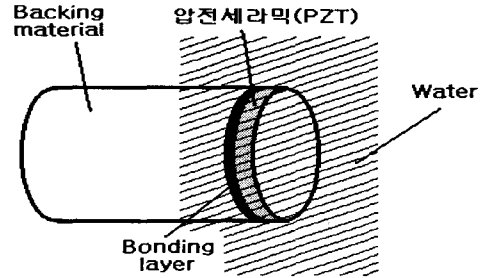
Z_L : 음향부하의 음향특성임피던스

Z_b : 배면체의 음향특성임피던스

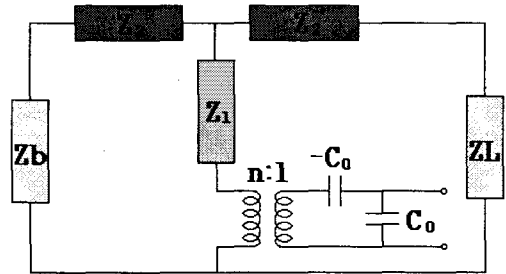
Z_0 : 압전세라믹(PZT)의 음향특성임피던스

k : 파수, d : 압전세라믹(PZT)의 두께,

C_0 : 압전세라믹(PZT)의 체동용량



(a) 초음파 트랜스듀서의 일반적 구조



(b) Mason 등가회로

그림 1. 초음파 트랜스듀서의 구조 및 등가회로

$$Z_1 = -j \frac{Z_0}{\sin(kd)}, Z_2 = -j Z_0 \tan\left(\frac{kd}{2}\right)$$

$$\text{단, } j = \sqrt{-1}$$

또한, 권선비에 해당하는 n 은,

$$n = k_t A \frac{\sqrt{Z_0 v \epsilon^s}}{d} \quad (1)$$

로 주어지는데, 여기서, k_t 는 전기-기계 결합계수, A 는 압전세라믹(PZT)의 면적, v 는 압전세라믹(PZT)의 음속, ϵ^s 는 변형(strain)이 일정할 때의 유전율이며, 모두 두께 방향에 대한 값이다.

본 논문에서는 배면체로 다루어지게 될 공기와 에폭시에 대한 경우에 대해서 단순한 비교를 위하여 이와 같은 해석을 하였으며, 그 시뮬레이션한 결과를 다음의 그림 2와 3에 각각 나타내었고, 이러한 평가에 사용된 물질을 표 1에 나타내었다.

배면체	밀도(kg/m ³)	음속(m/s)	임피던스(Rayl)
Air	1.21	343	415
Epoxy	1126	2330	2.63×10^6

표 1. 배면체 및 압전체의 물질특성

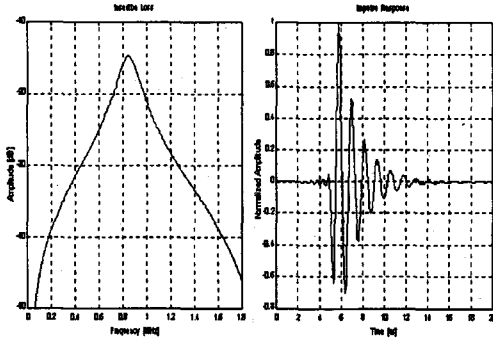


그림 2. 배면체가 공기인 경우 삽입손실과 응답파형

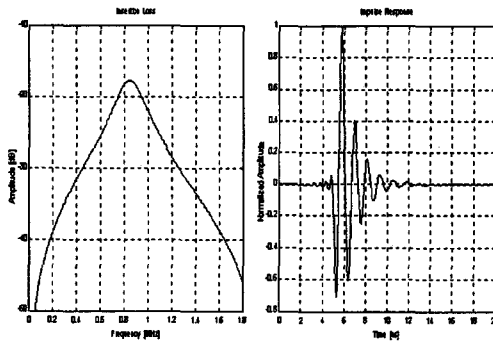
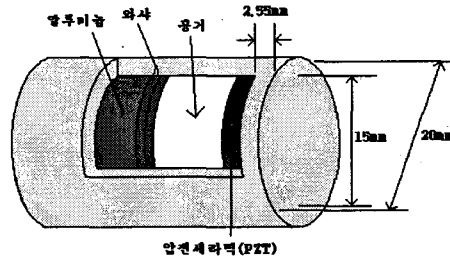


그림 3. 배면체가 에폭시인 경우 삽입손실-응답파형

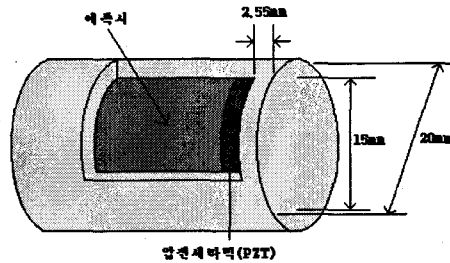
위와 같은 결과에서 배면체에 에폭시를 사용할 경우에는 대역폭이 넓음을 알 수 있으며, 공기를 사용할 경우에는 대역폭은 좁지만 감도가 에폭시보다 좋음을 알 수가 있다. 이와 같은 결과를 가지고 실제 실험과 비교하였다.

3. 초음파 트랜스듀서의 제작

그림 4에서 배면체가 공기인 경우와 에폭시인 경우에 대해서 각각 그 제작방법을 달리한 트랜스듀서의 구조를 나타내었다. 그리고 표2는 실제 쓰인 매칭매질의 물성을 나타내었는데, 실제 두께와 이론두께($\lambda/2$)가 차이가 나는 이유는 외부전압에 압전진



(a) 배면체가 공기인 경우



(b) 배면체가 에폭시인 경우

그림 4. 배면체에 따른 트랜스듀서 구조

표 2. 매칭매질의 물질 특성

매질	밀도 (kg/m ³)	음속 (m/s)	임피던스 (Rayl)	이론두께 (mm)	실제두께 (mm)
Brass	8500	4340	40×10^6	2.55	2.55
Al	2700	6300	17×10^6	3.7	
P.E.	955	1894	1.81×10^6	1.11	
Teflon	2160	1825	3.94×10^6	1.07	

동자 PZT가 영향을 안주는 최소한의 두께를 기준으로 하여 제작하였다.

4. 감도 측정 및 정도 고찰

실제 제작한 초음파 트랜스듀서를 가지고 다음의 그림 5와 같은 측정 시스템으로 측정하였다. 제작한 초음파 트랜스듀서는 3차원 이동장치에 장착되어 있으며, 펄스와 수신증폭은 UR-1000 초음파 다회선 유량계용 보드((주)창민테크)를 사용하여 측정하였다. 이러한 측정시스템을 사용하여 실험하는 방법은 3차원 이동장치를 이용하여 두 센서간의 정

확한 alignment를 하고 난 후 UR-1000으로 센서에 펄스를 인가하여 수신된 신호를 오실로스코프 (Tektronix. TDS 3052)로 수신파형을 data로 다운로드하고 컴퓨터로 그 data를 분석하였다. 그리고 다음의 그림 6, 7, 8, 9는 센서간 거리가 500mm이고, 배면체가 에폭시와 공기에 대한 전체 파형을 비교한 것이며, 그림 10, 11은 거리가 500mm이고, 배면체와 매칭매질에 따른 파형에 대한 비교를 나타낸 것이다. 그림 12, 13, 14, 15는 각각의 매칭매질과 배면체에 대하여 거리에 따른 수신전압을 나타낸 것이다.

이와 같은 결과에서, 공기를 배면체로 할 때가 에폭시를 배면체로 할 경우에 비해서 수신 효율이 좋을 이론과 비교하여 알 수가 있다. 그리고 수신효율의 좋은 순서대로 나열하면 P.E. - Teflon - Aluminum - Brass 순인 것으로 알 수가 있다.

즉, 물의 임피던스(1.5×10^6 [Rayl])와 비슷한 매질이 물과 임피던스 매칭이 잘되어 효율이 개선됨을 알 수 있다. 실제 초음파 트랜스듀서를 제작하려 할 때, P.E. 또는 Teflon 재질을 사용하여 제작하는 것이 수신효율 측면에서 유리함을 실험을 통하여 알 수가 있다.

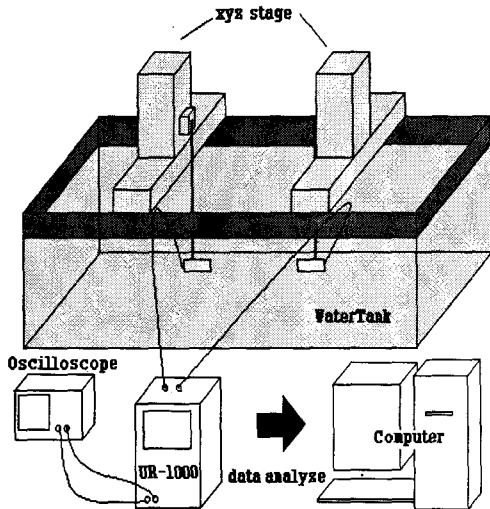


그림 5. 측정시스템

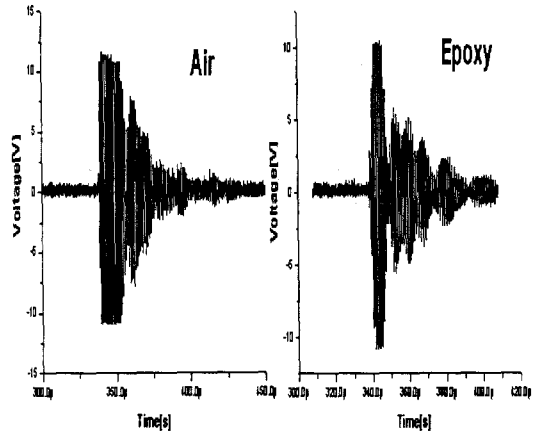


그림 6. 배면체에 따른 수신파형(매칭:Brass)

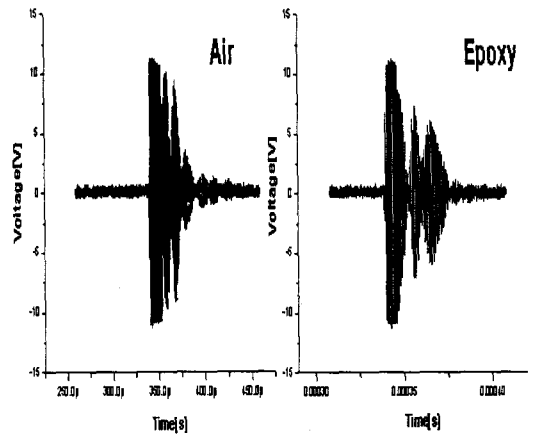


그림 7. 배면체에 따른 수신파형(매칭:Aluminum)

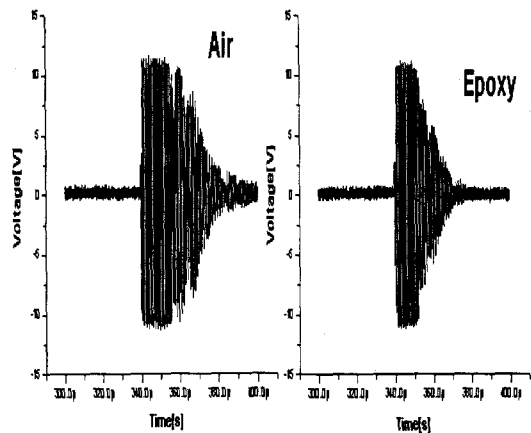


그림 8. 배면체에 따른 수신파형(매칭:P.E.)

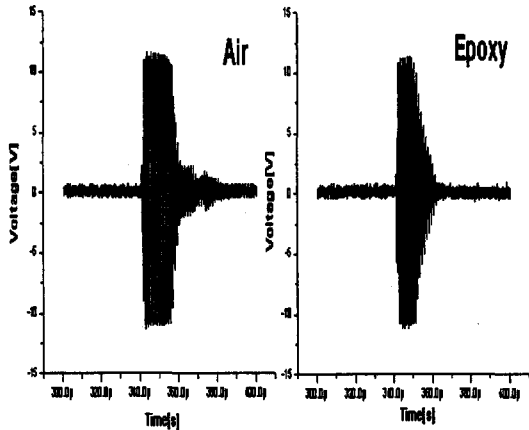


그림 9. 배면체에 따른 수신파형(매칭:Teflon)

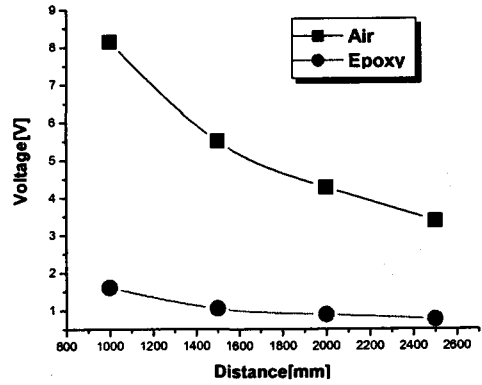


그림 12. 거리에 따른 수신전압(Brass)

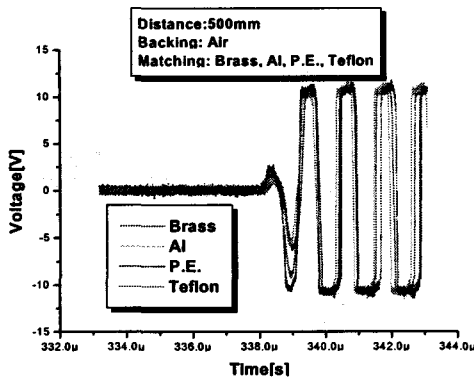


그림 10. 배면체가 공기일 때 매칭매질에 따른 파형 비교

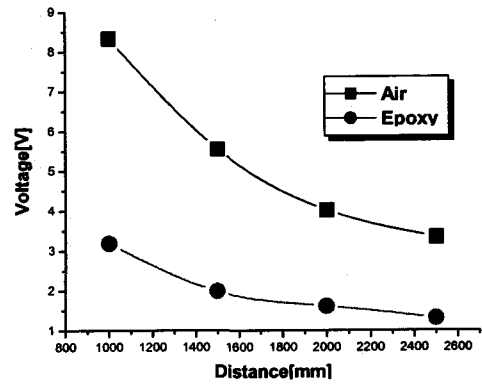


그림 13. 거리에 따른 수신전압(Aluminum)

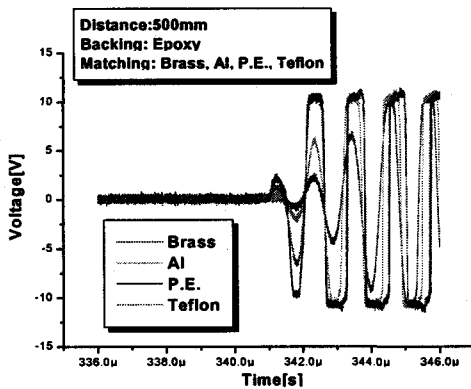


그림 11. 배면체가 에폭시일 때 매칭매질에 따른 파형비교

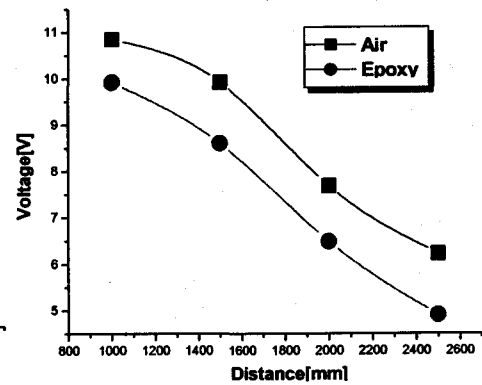


그림 14. 거리에 따른 수신전압(P.E)

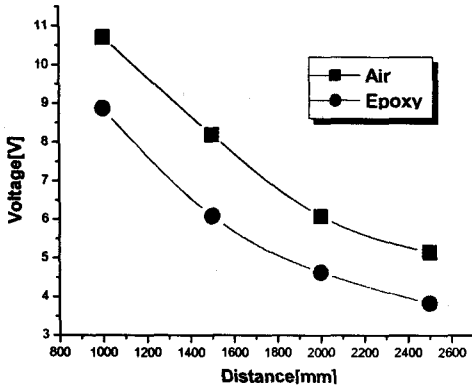


그림 15. 거리에 따른 수신전압(Teflon)

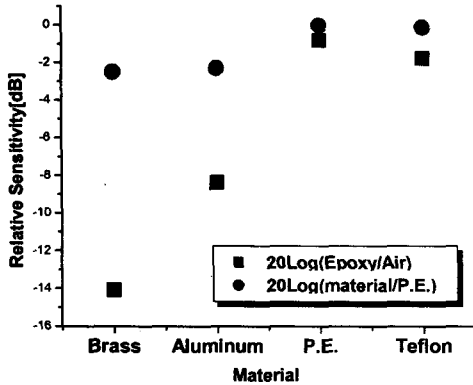


그림 16. 배면체와 매칭매질과의 수신효율비교

그리고 그림 16의 사각형 데이터는 배면체를 공기로 제작한 경우를 기준으로 하여 배면체가 에폭시일 경우에 매칭매질에 따라 측정된 수신감도의 상대적 감도차이($20\text{Log}(Epoxy/Air)$)를 나타낸 것이고 원형 데이터는 감도가 제일 큰 P.E.를 기준으로 하여 배면체가 공기일 때에 대한 상대 감도 차이($20\text{Log}(Material/P.E.)$)를 나타낸 것이다.

5. 결론

본 논문에서는 일반적인 물에서 사용되는 초음파 유량계의 정밀성을 높이는 방안으로 초음파 트랜스듀서의 특성향상을 그 목적으로 하였다. 두 배면체에 대해서 특성해석을 하여 실제 음향적 특성을 이론과 비교하였고, 또한 매칭매질을 달리 하였을 때의 수신감도를 실험을 통하여 알아보았다. 실제 초음파 트랜스듀서를 제작하려 할 때, P.E. 또는 Teflon 재질을 사용하여 제작하는 것이 수신효율 측면에서 유리함을 알 수가 있었으며, 좀 더 수신효율을 높이기 위해서는 물의 임피던스($1.5 \times 10^6[\text{Rayl}]$)와 비슷한 매질로 임피던스 매칭을 하면 수신효율이 개선됨을 실험적으로 알 수가 있다. 즉, 더 나아가 유체매질의 종류(화학물, 기름, 천연가스 등)에 따라 매칭매질의 선정의 기준으로 임피던스 매칭을 고려하여 유체와 임피던스가 유사한 매질을 선정하고, 또한 설치 환경에 부합되는 물질을 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

- (1) 한인환, 1997, 전자기술 입문 시리즈8, 알기쉬운 초음파응용, 技文社, pp.11~33.
- (2) 현병국, 이기욱, 하강열, 김무준, 배종립, 2000, PVDF 극소형 수중청음기의 제작 및 특성 평가, 한국음향학회, 제 19권, 제 1(s)호, pp.381~384.
- (3) 김동현, 김무준, 하강열, 1997, 다층 PVDF를 이용한 PZT/PVDF 복합구조 초음파 트랜스듀서의 특성 해석, 한국음향학회 학술별표대회 논문집제16권 1(s)호, pp.351-356.
- (4) 김무준, 하강열, 김성부, 이종규, 1995, 다층 PZT 초음파 트랜스듀서에 대한 새로운 전송선로형 등가회로의 제안, 한국음향학회 14(4), pp.29-37.
- (5) V.M. Ristic, 1983, Principle of Acoustic Devices, John Wiley & Sons, Toronto, pp.117-159.