

금속와이어 흡음재의 물리적 특성에 관한 연구 A Study on the Physical Characteristics of Steel-Wire Sound Absorbing Materials

°주경민* · 이동훈†** · 용호택**

Kyung-Min Ju, Dong-Hoon Lee and Ho-Taek Yong

Key Words : Absorption Coefficient(흡음계수), Acoustic Impedance(음향임피던스), Boyle's Law(보일법칙), Porosity(공극율), Specific Flow Resistivity(고유유동저항), Porous Sound Absorbing Materials(다공성 흡음재)

ABSTRACT

In this study, the physical characteristics of steel-wire sound absorbing materials with different thickness and bulk density is experimentally obtained in terms of the porosity and specific flow resistivity. Based on the experimental results, the following conclusions can be made. The porosities of steel-wire sound absorbing materials are smaller than those of general absorbing materials, which are inversely proportional to the volume densities. For the porosity measurement with a good accuracy, the dynamic correction based on the system compliance should be involved in porosity measurement. In addition, the flow condition for the precise measurement of the specific flow resistivity of steel-wire sound absorbing materials should be limited in the laminar flow region.

1. 서 론

소음방지 목적으로 쓰이는 종래의 흡음재는 단순히 우수한 흡음성능만을 필수요건으로 하였으나, 최근의 흡음재는 성능못지 않게 배수성, 방염성, 단열성, 비산성, 내구성과 같은 다양한 물성값을 중요하게 여기고 있다. 예를 들면 고속제트의 방출로 야기된 제트소음의 저감 또는 지하철과 고속철도의 터널내부의 소음저감에 쓰이는 흡음재는 흡음성능 못지않게 비산 억제성이나 방염성을 기본요건으로 하고 있다. 이와 같은 흡음재의 다양한 요구조건에 착안하여 본 연구에서는 페타이어의 처리과정에서 생산되는 금속와이어를 이용하여 흡음재의 개발을 시도하게 되었다.⁽¹⁾ 페타이어는

파쇄시 고무칩, 고탄소강의 금속와이어 그리고 나일론 코드사로 분리된다. 이 중에서 고무칩은 칩 또는 분말의 형태로 가공되어 보도블록 및 건축재료로 재활용되고 있으며, 나일론 코드사는 보일러용 연료로 사용되고 있다. 그러나 금속와이어는 단순히 고철로 매각되고 있으며, 또 다른 부가가치를 갖는 제품으로의 재활용은 되지 않고 있다. 금속와이어로 제조된 흡음재는 자체의 자중때문에 앞서 언급한 비산의 문제는 없으며 화재에도 안전하다. 다만 만족할만한 흡음성능을 갖는지의 여부가 최대 관심사였으나, 저자들의 선행연구에서 금속와이어 흡음재의 흡음성능은 입증된 바 있다.⁽²⁾

따라서 금번 연구에서는 각기 다른 두께와 체적 밀도를 갖는 금속와이어 흡음재를 제조하고 시험하여 흡음재의 물성값을 확보하고자 한다. 시험물성값은 흡음재의 음향특성에 중요한 영향을 미치는 공극율과 고유유동저항값이다. 공극율과 유동저항 측정과 관련해서는 최근까지 다수의 연구결과가 발표된 바 있으나⁽³⁻⁶⁾, 본 연구에서는 주로 참고

* 서울산업대학교 산업대학원 기계공학과

** 서울산업대학교 기계공학과

† E-mail : Ldh@snut.ac.kr, Tel : 02-970-6331

문헌 [7,8]을 참고하여 설계/제작된 실험장치를 이용하여 실험하였다.

2. 실험

2.1 공극율측정

Fig. 1은 흡음재의 공극율을 측정하기 위한 실험장치도이다.

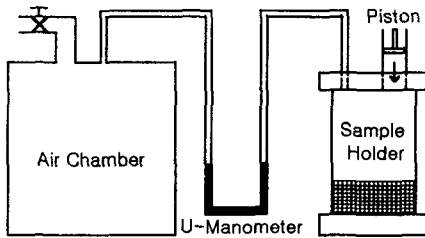


Fig. 1 Experimental setup for porosity measurements.

실험장치는 Fig. 1에서 보듯이 시료고정실, U형 액주계 그리고 공기저장탱크로 구성된다. 시료고정실의 크기는 지름 5cm, 길이 20cm인 아크릴관으로 제작하였으며, 고정실 상부에는 체적변화를 주기 위해 지름 1.514cm 그리고 길이 5.78cm인 소형 실린더에 피스톤이 장착되어 있다. 실린더의 절면에는 피스톤의 행정거리를 확인할 수 있도록 눈금자가 부착되어 있다. 또 U형 액주계의 안지름은 0.5cm이며, 비중 0.83인 등유가 채워져 있다. 또 측정중에 주변대기압과 시료고정실의 체적변화에 대한 압력교란을 최소화하기 위하여 액주계의 출구에는 비교적 큰 컴플라이언스(compliance)를 갖는 체적 17576 cm³정도의 공기저장탱크를 설치하였다.

공극율 측정실험은 시료고정실에 대상흡음재를 장착한 다음 공기저장탱크의 출구에 부착된 밸브를 개방하여 전시스템을 평형상태가 되도록 한다. 그리고 저장탱크의 밸브를 닫은 후, 액주계가 평형상태인가를 확인한다. 평형상태가 확인되면 피스톤의 이동으로 변화된 액주계의 압력차를 측정한다. 피스톤의 또 다른 이동조건에서도 이와 같은 방식으로 실험을 반복수행한다. 본 연구에서 피스톤의 이동으로 변화된 체적범위는 0.71-18.37 (cm³)이다. 특히 공극율 측정실험은 보일법칙(Boyle's law)이

만족되는 일정한 온도를 유지하는 실험실에서 수행하였다. 만일 온도조건이 크게 변화할 때는 동적 보정값을 얻기 위한 시험을 반복수행하였다.

2.2 유동저항측정

Fig. 2는 흡음재의 유동저항을 측정하기 위한 실험장치도이다.

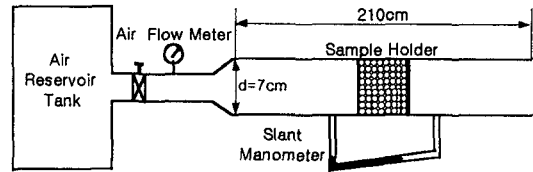


Fig. 2 Experimental setup for flow resistance measurements.

흡음재가 장착된 관은 아크릴관으로 총길이는 210cm이며, 안지름은 공극율 측정장치와 동일한 5cm로 하였다. 관내로 유입되는 유동의 안정화를 위해 관의 입구측에 디퓨저를 설치하였다. 흡음재는 시료고정실에 장착되어 관로 중간에 삽입된다. 흡음재를 통과한 유동의 압력차는 경사 마노미터를 설치하여 측정하였다. 또 관로에 공급되는 공기유량은 관로 입구측에 설치된 유량계를 이용하여 측정하고 조절하였다. 유량범위는 음압레벨 100dB~145dB범위에 대응하는 음의 입자속도를 구하여 결정하였다. 음파의 입자속도값을 토대로 관지름 5cm일 때의 레이놀즈수를 계산하면 50~2878정도가 된다.

본 연구에 쓰인 금속와이어는 페타이어를 파쇄한 후, 열분해 연소를 통하여 와이어에 부착된 고무를 탈착하므로써 얻었다. 와이어 지름은 0.2mm와 1mm 두 종류이며, 파쇄과정에서 30-50mm정도의 길이로 절단된다. 본 연구에서는 0.2mm 와이어만으로 흡음시료를 제작하였으며, 흡음재의 제원과 물성치는 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Steel-wire absorbing materials used for this study.

Steel wire No.	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
Thickness, l (cm)	2.3	2.5	4.2	4.9	6
Diameter, d (cm)	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9
Density, ρ (g/cm ³)	1.453	2.164	1.465	1.613	0.999

3. 관련이론

3.1 공극율 계산

흡음재의 공극율을 산출하기 위해 Fig. 3과 같이 이상기체가 충전된 이상적인 밀폐계를 고려해 보기로 한다.

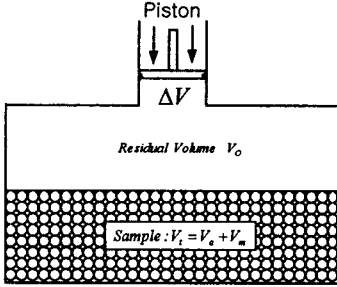


Fig. 3 An idealized system for measuring porosity of porous absorbing materials.

Fig. 3에서 V_t 는 흡음재의 전체체적, V_0 는 흡음재내의 기체의 체적 그리고 V_m 은 흡음재의 소재체적이라 할 때 흡음재의 공극율 $\sigma(\%)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma = \frac{V_0}{V_t} \times 100(\%) \quad (1)$$

또 밀폐계내에서 흡음재가 차지하는 체적을 제외한 잔여체적을 V_0 라 하면 밀폐계내에서의 기체의 총체적 $V = V_0 + V_m$ 가 된다. 밀폐계내의 대기압을 P_0 라 할 때 피스톤의 이동에 의해 밀폐계의 체적을 미소체적 ΔV 만큼 감소시키면, 밀폐계의 압력은 ΔP 만큼 증가하게 된다. 이와 같이 밀폐계의 이상기체가 등온압축될 때는 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$P_0 V = (P_0 + \Delta P)(V - \Delta V) \quad (2)$$

식 (2)에서 P_0 와 ΔV 는 알고 있는 값이고, ΔP 은 측정을 통해 알 수 있으므로 식 (2)로부터 밀폐계내의 기체의 총체적 V 는 다음식으로 구해진다.

$$V = [(P_0 + \Delta P) / \Delta P] \Delta V \quad (3)$$

따라서 식 (3)으로부터 얻어진 밀폐계내의 기체의 총체적 V 에서 잔여체적 V_0 를 제하면 다음과 같이 흡음재내의 순수기체만의 체적 V_a 를 얻을 수 있다.

$$V_a = V - V_0 \quad (4)$$

결과적으로 식 (4)의 결과를 식 (1)에 대입하면 흡음재의 공극율이 얻어진다. 이상에서 기술한 내용은 이상적인 밀폐계가 주변온도의 영향을 받지 않는 조건에서만 적용할 수 있다.

그러나 실제의 실험에서는 피스톤의 초기변위에 의해 유발된 시료고정실과 관로라인 그리고 공기탱크가 갖는 콤프라이언스 변화에 대한 동적보정값 V_{a1} 을 식 (4)에 포함시켜야 한다. 또 단계적으로 피스톤의 변위를 이동시키는 것에 의해 유발된 액주계가 갖는 콤프라이언스 변화에 대한 동적보정값 V_{a2} 의 추가적 보정이 필요하다. 따라서 실제 실험을 통해 흡음재내의 기체체적 V_a 만을 구하기 위해서는 동적보정 체적 V_{a1} 과 V_{a2} 가 반영된 다음의 식을 이용하여야 한다.

$$V_a = V - V_{a1} - V_{a2} \quad (5)$$

더욱이 실제 실험에서 식 (5)의 V 는 시료고정실에 흡음재가 장착된 상태에서 흡음재내의 공기체적, 시료고정실과 연결된 실린더내의 공기체적 그리고 시료고정실에서 액주계의 액면까지의 관로내의 공기체적을 합한 전체체적에 피스톤 이동으로 발생된 액주계의 눈금차에 상당하는 체적변화를 포함시켜야 하므로 식 (3)에 제시된 이상적인 밀폐계에서의 이론체적 V 와는 상당히 다르다. 즉 실제 실험에서는 피스톤의 이동으로 발생된 액주계의 눈금차에 상당하는 체적변화 ΔV_0 가 반영된 다음의 계산식으로 V 를 구하여야 한다.

$$V = [(P_0 + \Delta P) / \Delta P] \Delta V_0 \quad (6)$$

3.2 유동저항 계산

앞서 설명한 공극율과 함께 다공성 흡음재의 음향특성 파악과 음향임피던스 계산에 매우 중요한 또 다른 파라미터로는 흡음재의 고유유동저항을 들 수 있다. 고유유동저항 $R(g/sec \cdot cm^3)$ 는 흡음재 전후의 압력차 $\delta P(dyne/cm^2)$ 와 흡음재를 통과한 기체의 유량 $Q(cm^3/s)$ 를 알면 다음의 식으로 계산할 수 있다.

$$R = \frac{\delta P \times A}{Q \times l} \quad (7)$$

식 (7)에서 A 는 관단면적 (cm^2) 그리고 l 는 시료 두께 (cm)를 나타낸다.

4. 결과 및 고찰

4.1 공극율 측정결과

Fig. 4는 공극율 실험장치에서의 동적보정값 V_{d1} 과 V_{d2} 를 구하기 위하여 흡음재를 설치하지 않은 상태에서 피스톤을 이용하여 ΔV_e 만큼의 미소 체적을 변화시킬 때마다 측정된 미소압력차 ΔP 를 식 (6)에 대입하여 V 를 구한 결과이다.

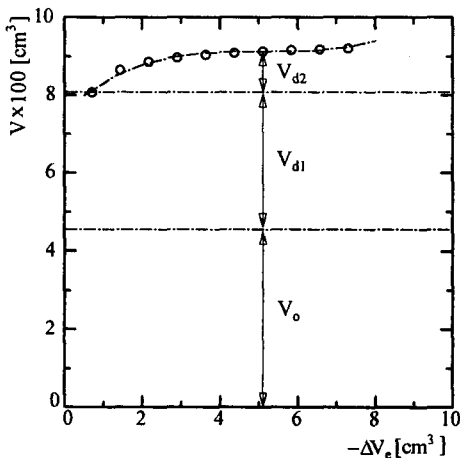


Fig. 4 Calibration of the porosity measurement system.

도시된 결과에서 V 는 최초의 체적변화에서만 급격히 증가하고, 이후의 체적변화에 대해서는 다소

증가하다가 포화되는 추세를 보인다. 전자의 경우는 동적보정체적 V_{d1} 에 그리고 후자의 경우는 동적보정체적 V_{d2} 에 상응하는 V_{d0} 으로 간주할 수 있다. 따라서 흡음재를 장착하고 ΔV_e 를 변화시키면서 구한 V 결과에서 동적보정체적 V_{d1} 과 V_{d2} 를 제하면 흡음재에 충전되어 있는 공기체적 V_a 만을 얻게 된다. 참고로 결과에 도시된 V_0 는 시료고정실에 장착된 흡음재를 제외한 잔여체적과 시료고정실에서 액주계의 액면까지의 공기체적을 뜻한다.

Fig. 5는 식 (5)와 식 (6)에 제시된 동적보정 절차를 이용하여 기준시험편의 공극율을 측정된 결과이다. 기준시험편은 공극율 37.7%를 갖도록 아크릴로 제작하였다. 결과에서 보듯이 측정된 공극율은 기준시험편의 실제 공극율과 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 측정오차는 0.265%이다.

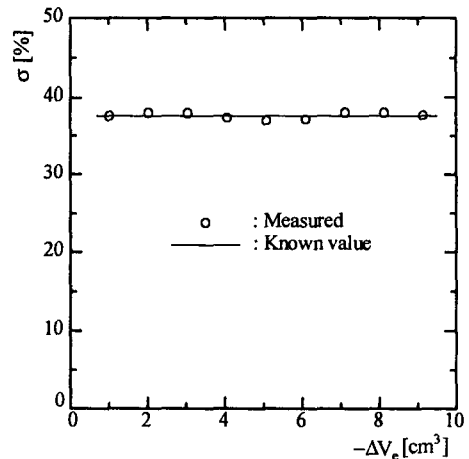


Fig. 5 Measured porosity for test sample of porosity 37.7%.

Fig. 6은 시험하고자 하는 금속흡음재를 시료고정실에 번갈아 장착하면서 체적변화(입력)에 따른 압력차(출력)를 구한 결과이다. 도시된 결과는 5종류의 흡음재를 이용하여 실험하였으며, 실험결과들이 서로 일치하는 관계로 5개의 데이터가 한점에 중첩되어 있는 것을 볼 수 있다. 또 횡축에 도시된 피스톤이동에 의한 체적변화를 입력변수로 보고, 종축에 도시된 압력차를 출력변수로 간주할 때 두 변수의 관계가 정비례가 됨을 볼 수 있다. 이것은 본 연구의 공극율 측정을 위한 파라미터의 작동법

위(체적변화, 즉 피스톤의 변위)가 선형범위에 있음의 의미한다.

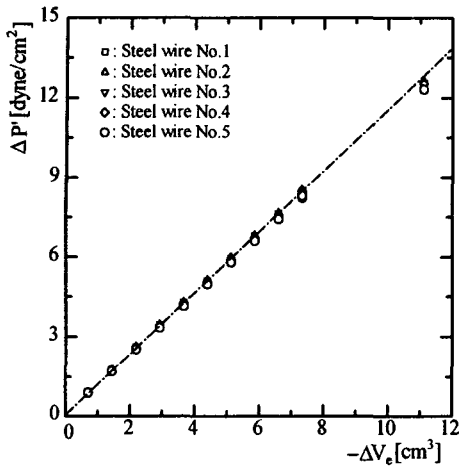


Fig. 6 Volume change(input) vs. pressure difference(output).

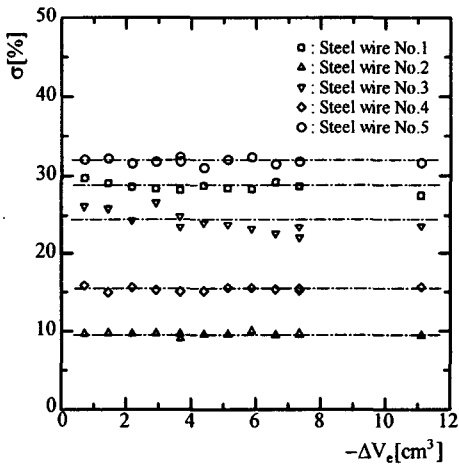


Fig. 7 Measured porosity with the corrected volume change for steel wire sound absorbing materials.

Fig. 7은 체적변화에 따른 금속와이어 흡음재의 공극율 측정결과이다. 측정결과를 흡음재 종류별로 산술평균한 평균공극율로부터 편차를 구해 보면 측정결과에 대부분이 1%미만의 차이를 나타낸다. 다만 금속와이어 흡음재 No.3의 경우만이 ±2%의 차이를 나타낸다.

Fig. 8은 흡음재의 밀도와 흡음재 종류별로 산술 평균한 평균공극율과의 관계를 도시한 것이다. 도시된 결과에서 금속와이어 흡음재의 밀도가 커질

수록 공극율은 감소하는 경향을 보인다. 공극율값이 추세선으로부터 다소 이탈되는 것은 흡음재의 불균질때문이라 사료된다.

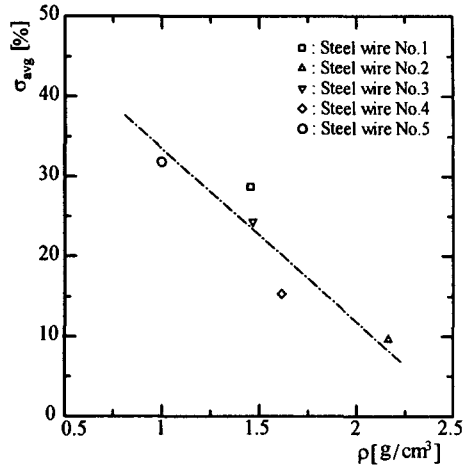


Fig. 8 Relationship between the average porosity and volume density for steel wire sound absorbing materials.

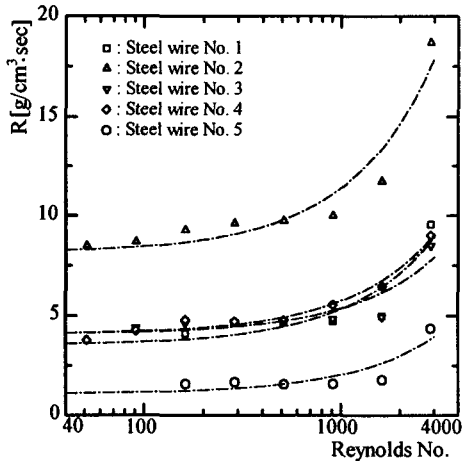


Fig. 9 Specific flow resistivity vs. Reynolds number.

Fig. 9는 금속와이어 흡음재의 고유유동저항을 측정한 결과이다. 결과에 도시된 심볼은 레이놀즈 수 50~2878범위에서 측정한 유동저항값을 나타내며, 일점쇄선은 추세선을 나타낸다. 층류영역내에서는 유동저항값이 레이놀즈수의 증가에 따라 거의 일정한 값을 유지하는 반면에, 난류영역에서는 저항이 커지게 된다. 따라서 유동저항값을 이용하여 흡음성능을 계산할 때는 층류영역에서 측정된

저항값을 이용하는 것이 바람직하다.

Fig. 10은 금속와이어 흡음재의 밀도와 유동저항과의 관계를 레이놀즈수를 매개변수로 하여 도시한 것이다. 결과에 제시된 데이터군을 난류데이터군 A와 층류데이터군 B로 나누어 관심의 대상인 층류데이터군만을 고찰하기로 한다. 층류데이터군 B에서는 밀도가 작은 경우의 유동저항값은 레이놀즈수와 관계없이 거의 일정한 값으로 유지되지만, 밀도가 점차 커질수록 유동저항값의 변화폭은 크게 되며 레이놀즈수에 종속되는 것을 알 수 있다. 또한 동일크기의 밀도조건에서 레이놀즈수가 커짐에 따라 유동저항값도 크게 되는 것을 알 수 있다.

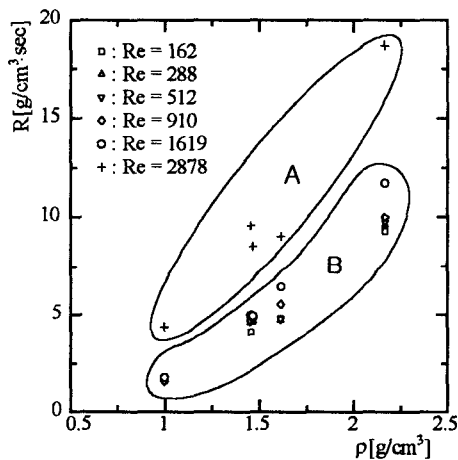


Fig. 10 Relationship between the flow resistivity and volume density for steel wire sound adsorbing materials.

5. 결 론

본 연구에서는 금속와이어 흡음재의 물리적 특성값인 공극율과 고유유동저항을 측정하였으며, 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 시료고정실, 관로, 공기저장탱크의 콤플라이언스 변화에 대한 동적보정체적과 피스톤 이동에 의한 액주계의 콤플라이언스 변화에 대한 동적보정체적을 각각 구하여 실제 체적계산에 반영시키므로써 흡음재의 공극율을 정확히 측정할 수 있었다.
- 2) 공극율 측정을 통해 금속와이어 흡음재로 제조

할 수 있는 공극율 범위는 약 8-33% 정도임을 알았다.

- 3) 금속와이어 흡음재의 유동저항값은 다른 다공성 흡음재와 마찬가지로 층류영역에서는 레이놀즈수와 관계없이 거의 일정한 값을 갖지만, 난류영역에서는 저항값이 커지게 된다. 따라서 고유유동저항의 측정은 층류영역내에서 이루어져야 한다. 또 밀도가 작은 흡음재의 유동저항값은 레이놀즈수와 관계없이 거의 일정한 값을 갖지만, 밀도가 큰 흡음재의 유동저항값은 레이놀즈수에 좌우됨을 알았다.

참 고 문 헌

- (1) 배재근, 황진우, 김민배, 이동훈, 2001, "흡음재료로서 패타이어 금속Chip의 재활용 가능성 검토", 2001년 춘계 폐기물 관련학회 공동학술대회 논문집(1) pp.465~468.
- (2) 이승, 박상준, 이동훈, 배재근, 김민배, 2001, "금속와이어 흡음재의 음향특성", 한국소음진동공학회 2001년도 추계학술대회 논문집, pp.1341-1346.
- (3) Beranek, L., 1942, "Acoustic Impedance of Porous Materials," J. Acoust. Soc. Am., Vol.13, pp.248-260.
- (4) Nichols, R. H., 1947, "Flow-Resistance Characteristics of Fibrous Acoustical Materials," J. Acoust. Soc. Am., Vol.19, No.5, pp.866-871.
- (5) Lannace, G., Lanniello, C., Maffei, L., and Romano R., 1999, "Steady-State Air Flow and Acoustic Measurement of the Resistivity of Loose Granular Materials," J. Acoust. Soc. Am., 106(3), Pt.1 pp.1416-1417.
- (6) Stinson, M. R. and Daigle, G. A., 1988, "Electronic System for the Measurement of Flow Resistance," J. Acoust. Soc. Am., 83(6), pp.2422-2428.
- (7) Champoux, Y., Stinson, M. R. and Daigle, G. A., 1991, "Air-Based System for the Measurement of Porosity", J. Acoust. Soc. Am., 89(2), pp.910-916.
- (8) Brown, R. L. and Bolt, R. H., 1942, "The Measurement of Flow Resistance of Porous Acoustic Materials," J. Acoust. Soc. Am., 13(4), pp.337-344.