

메타물질을 이용한 내진설계

Earthquakeproof Engineering by Metamaterials

김상훈

Sang-Hoon Kim

Key Words : Earthquake(지진), Metamaterials(메타물질), Acoustics(음향학)

ABSTRACT

We introduced an earthquake-resistant design using acoustic metamaterials. There are two way in that field: one is a cloaking method and the other is a shadow zone method of seismic waves. Cloaking is a general property of a wave that changes the direction depending on the refractive index. Metamaterials control the propagation and transmission of specified parts of the wave and demonstrate the potential to render an object seemingly invisible. The shadow zone is a method of negative modulus using many huge resonators and it attenuates the amplitude of the wave exponentially. We compared and explained the fundamental principles of the two methods.

1. 서 론

메타물질이란 물질의 구성입자 크기보다 훨씬 큰 파장의 파동을 이용하여 자연계에서 흔히 나타나지 않는 성질을 인공적으로 만들어낸 것을 통칭하여 이른다^(1,2). 메타물질은 크게 전자기메타물질과 음향메타물질로 나눌 수가 있는데 전자기메타물질은 물질의 전자기적 성질을 결정하는 2대 요소인 전기유전율과 자기투자율을, 음향메타물질은 물질의 음향학적 성질을 결정하는 2대 요소인 밀도와 탄성률을 자연계에 나타나지 않는 범위로 확장하는 것이다.

지진파는 여러 파장을 가진 음향파가 불균일하게 섞인 것이므로 음향메타물질연구의 대상이다. 지진파는 P파와 S파 같은 진원에서 발생하는 3차원으로 퍼져나가는 몸체파가 있고, 이들 몸체파가 표면에 도달하여 진앙을 중심으로 2차적으로 생성되는 L파

와 R파 같은 표면파가 있다^(3,4). 이 중에 건물을 부수고 재산과 인명에 피해를 입히는 것은 표면파다. 표면파는 몸체파에 비하여 속력은 늦으나, 파장이 길고, 표면으로부터 파장 이내 깊이로만 진행하기 때문에 쉽게 소멸하지 않는다. 일반적으로 표면파의 파장은 100m내외이고 주파수는 20Hz이하의 초저주파로 인간의 귀에는 거의 들리지 않는다.

메타물질을 이용한 내진설계는 지진파를 파동적으로 다루는 것인데 크게 클로킹(cloaking) 방법과 음영대(shadow zone) 방법의 두 가지가 있다. 둘 다 건물 자체는 손댈 필요가 없이 건물 주변에 내진설계를 한다는 특징이 있다. 이 논문에서는 이 두 가지의 원리를 소개하고 그 장단점을 간략히 비교한다.

2. 클로킹 방법

모든 파동은 진행하다가 매질의 굴절률이 더 큰 물질을 만나면 중앙으로 꺾이고, 더 작은 물질을 만나면 바깥으로 꺾인다. 이 각도는 스넬법칙(Snell's law)을 따른다.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1)$$

† Corresponding Author ; Member, Mokpo National Maritime University
E-mail : shkim@mmu.ac.kr
Tel : 061-240-7359, Fax : 061-240-7201

클로킹이란 물체의 주변을 굴절률이 점층적으로 변하는 물질로 싸서, 물체의 바깥쪽에서 안으로 들어오면서 굴절률을 점차 줄여오는 것이다. 그러면 파동이 물체를 통과하는 대신에 Fig. 1처럼 물체의 표면을 따라 돌아나가게 된다.

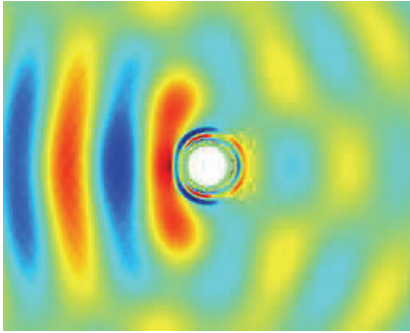


Fig. 1 Cloaking of an elastic wave. The wave can not penetrate the inside of the cylinder.

모든 음향파는 속력이 밀도 ρ 와 탄성률 B 의 함수 $v = \sqrt{B/\rho}$ 로 주어지며, 굴절률은 이의 역수다. 따라서 밀도나 탄성률 중에 적어도 하나를 변화시키면 굴절률을 변화시킬 수 있다. 이를 탄성과 모형에 처음으로 적용한 것은 2008년에 Farhat 그룹이다^(5,6). Fig1 은 컴퓨터 시뮬레이션 모형으로서 내부 원통의 반지름은 30cm이고 주파수는 250Hz다. 파동이 물체 주변을 돌아나가는 것을 볼 수 있다.

클로킹 방법은 건물 각각을 굴절률을 변화시키는 물질로 싸야 된다. 따라서 건물마다 주변에 충분한 공간이 필요하다. 또 지진파를 건물 주위로 돌리는 것이므로 주위의 다른 건물들이 별도의 내진설계를 하지 않으면 대신 피해를 입게 된다는 한계가 있다.

2. 음영대 방법

인공음영대 방법은 2012년에 Kim 그룹에 의해 소개되었는데 메타물질로 지진파가 통과하지 않는 인공 음영대를 만들어 특정 건물이 아닌 한 지역 전체를 보호하는 것이다^(7,8). 지진파는 음향파의 일종이므로 밀도와 탄성률 중이 하나라도 음수가 되면 속력이 허수가 된다. 속력이 허수가 되면 굴절률과 파수벡터도 허수가 되어 평면파인 경우 파의 진폭이 다음처럼 지수적으로 감소한다.

$$\begin{aligned} \exp(ikx) &= \exp(2\pi inx/\lambda) & (2) \\ &= \exp(-2\pi |n|x/\lambda) \\ &\equiv \exp(-\kappa x). \end{aligned}$$

κ 는 $\kappa = \frac{2\pi |n|x}{\lambda}$ 로 정의되는 감쇠계수다. 굴절률이 클수록, 파동의 이동거리 x 가 길수록, 파장이 짧을수록 빨리 감쇠함을 알 수 있다. x 는 공명통 지대의 폭으로 이를 조절하면 원하는 진도로 지진파를 소멸시킬 수 있다⁽⁷⁾.

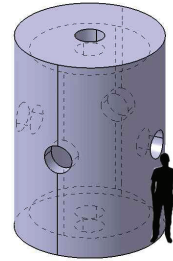


Fig. 2 Structure of a meta-cylinder for a seismic wave.

이 방법은 탄성률을 음수로 만드는 것인데, 탄성률이 음수가 되려면 밖에서 압력이 가해질 때 내부에서 부피가 축소되는 것이 아니라 팽창해야 한다. 이 음의 탄성률을 구현하는 것이 메타물질로서 음파의 공명현상이다. 레이저란 원자를 공명시켜 나오는 빛을 이용하는 것이고, 전자레인지의 분자를 공명시켜 나오는 열을 이용하는 것이고, 관악기는 관을 공명시켜 나오는 소리를 이용하는 것이다. Fig. 2 같은 다수의 거대 공명통을 이용하여 지진파를 차단하는 기술은 거대한 인공원자를 만들어 지진파의 압력으로 공명시키는 것으로서 지진파 에너지의 일부는 초저주파의 소리로 바뀌어 공기 중으로 날아가고, 다른 일부는 열로 바뀌어 사라지게 된다.

내진설계는 Fig. 2 같은 메타원통, 즉 거대한 공명통 수천 혹은 수만 개를 지진이 올 가능성이 큰 길목의 지하에 매립함으로써 이루어진다. 공명통을 매립한다는 것은 전기공학적으로 LC 공진회로를 설치하는 것과 같다. 공명통의 입구 구멍은 유도기에 해당하고 공명통 내부는 축전기에 해당하기 때문이다. 압력파의 공명이 전자기파의 공명과 유사한 현상이다.

공명통의 공명진동수는 헬름홀츠(Helmholtz) 공명통의 공명주파수를 따르므로 아래의 지진파의 진동수에 맞추어 제작한다. 탄성률이 음이 되는 부분은 이 공명진동수부터 위쪽이다⁽⁹⁾.

$$\omega_o = c \sqrt{\frac{S}{L_e V}} \quad (3)$$

c 는 지진파의 속력으로 대략 $1 \sim 3 \text{ km/sec}$ 이다. S 는 공명통 입구의 면적이고, V 는 공명통 내부의 부피, 그리고 L_e 는 공명통에 뚫린 구멍의 유효목길이다⁽⁷⁾. 구멍이 여러 개 뚫린 경우는 유도기의 병렬 연결과 같다.

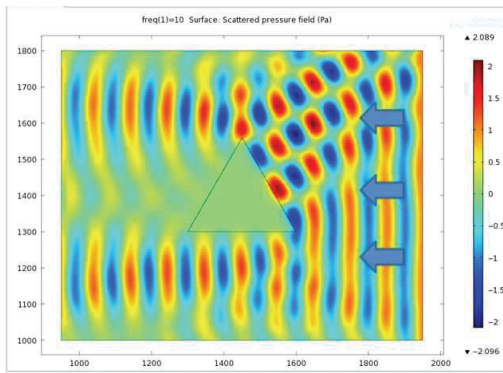


Fig. 3. Artificial seismic shadow zone around a triangular meta-region.

지진파가 균일한 파가 아니므로 다양한 크기의 공명통을 혼합하여 지진파가 올 가능성이 있는 경로에 공명통의 구멍을 맞추어 집단적으로 매립한다. 그러면 Fig. 3 같은 지진파가 급격히 약화되는 음영대가 생긴다. 위 그림은 삼각형 모양으로 매립하였을 경우인데, 주파수는 10Hz, 파장은 100m, 삼각형의 한 변은 300m로 하였다. 임피던스가 삼각형지대 외부는 양이고 내부는 음이므로 일치하지 않아 지진파의 일부는 반사된다.

3. 결 론

메타물질로 지진파를 제어하는 방법에는 두 가지가 있는데 하나는 지진파를 건물 주위로 돌리는 클로킹 방법이고, 다른 하나는 인공 음영대를 조성하여 지진파를 중간에 차단하는 방법이다. 이 중에 두 번째 방법이 주위의 건물에 피해를 입히지 않고 한

지역을 면적으로 보호하는 것이므로 부작용이 없고 비용도 저렴하여 전 세계적으로 가장 각광받고 있다⁽¹⁰⁾. 하지만 실제 실현가능성은 아직 미지수이다.

참 고 문 헌

- (1) Smith, D. R., Pendry, J. B. and Wiltshire, M. C. K., 2004, *Metamaterials and Negative Refraction*, Science, Vol. 305, pp. 788-792.
- (2) Pendry, J. B., 2003, Positively negative, Nature, Vol. 423, pp. 22-23.
- (3) Aki, K. and Richards, 2002, *Quantitative Seismology*, 2nd, University Science, New York.
- (4) Villaverde, R., 2009, *Fundamental Concepts of Earthquake Engineering*, CRC, New York.
- (5) Farhat, M., Guenneau, S. and Enoch, S., 2009, Ultrabroadband Elastic Cloaking in Thin Plates, Physical Review Letters, Vol. 103, No. 2, pp. 024301.
- (6) Farhat, M., Guenneau, S. and Enoch, S., 2012, Broadband cloaking of bending waves via homogenization of multiply perforated radially symmetric and isotropic thin elastic plates, Physical Review B, Vol. 85, No. 2, pp. 020301(R).
- (7) Kim, S.-H. and Das, M. P., 2012, Seismic Waveguide of Metamaterials, Modern Physics Letters B, Vol. 26, No. 17, pp. 1250105.
- (8) Kim, S.-H., 2012, Seismic Wave Attenuator Made of Acoustic Metamaterials. Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 131, No. 4, pp. 3292
- (9) Kwon, B.-J., Jo, C., Park K.-C. and Oh I.-K., 2012, Wave Propagation Characteristics of Acoustic Metamaterials with Helmholtz Resonators, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. Vol. 23, No. 2, pp. 167-175.
- (10) Piore, A., Jul./Aug. 2012, How to Make an Earthquake Disappear, Discover Magazine, pp. 70-72.