

자기변형 트랜스듀서 패치설계를 위한 위상최적설계 적용사례 Applications of Topology Optimization for the Design of a Magnetostrictive Transducer Patch

*, #선경호¹, 조승현², 김우철³, 김윤영⁴

*, #K. H. Sun(suniekh@ideallab.snu.ac.kr)¹, S. H. Cho², W. Kim³, Y. Y. Kim⁴

^{1,4} 서울대학교 기계항공공학 멀티스케일설계창의연구단, ² 한국표준과학연구원, ³ 삼성전자

Key words : Topology Optimization, Magnetostrictive Transducer, Magnetostrictive Patch, Torsional Wave

1. 서론

자기장과 기계적 변형 사이의 연성현상인 자기변형 효과(magnetostrictive effect)⁽¹⁾는 여러 분야에서 독자적인 응용 가능성을 지니고 있다. 특히, 자기변형 물질은 자기(magnetic)상태와 탄성(elastic)상태의 양방향 에너지 교환이 가능하기 때문에, 액추에이터와 센서로 동시에 사용될 수 있는 미케니즘(mechanism)을 지니고 있다. 따라서, 이러한 자기변형 물질을 이용한 연구들이 탄성과 응용 분야⁽²⁻⁶⁾ 및 지능 구조 분야에서 활발하게 진행되고 있다^(7,8). 본 논문에서는 주로 탄성파를 발생/측정하는데 사용되는 자기변형 트랜스듀서에 적용된 위상최적설계 사례를 다루고자 한다.

자기변형 물질은 인가된 자화 방향에 따라서 신장 혹은 수축을 하게 되는데, 이러한 특성을 이용하면 시편과의 직접적인 접촉 없이 탄성파를 발생시킬 수 있다. 특히, 자성 패치(ferromagnetic patch)와 솔레노이드 코일로 단순 구성된 패치타입(patch-type) 자기변형 트랜스듀서⁽²⁻⁶⁾는 비자성 도파체(nonferromagnetic waveguide)에서 특정한 모드의 탄성파를 발생시키는데 유용하다. 이 트랜스듀서는 비자성 도파체의 표면에 붙어있는 패치가 자기변형 효과로 인하여 동적 변형을 반복하게 되면, 그 접합부위에서 탄성파가 발생되는 원리를 이용한다. 이러한 패치 타입 자기변형 트랜스듀서의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 인자로는 패치의 형상을 들 수 있는데, 이는 패치의 형상에 따라 기계적인 변형 패턴과 자기장의 이동경로가 결정되기 때문이다. 따라서, 본 논문에서는 위상최적화(topology optimization)를 이용하여 자기변형 패치의 형상을 설계한 적용사례에 대해서 살펴보고자 한다.

일반적으로 원통형 도파체에서 비틀림 파(torsional wave)⁽³⁾의 유용성은 널리 알려져 있는데, 기존의 방법들은 대부분 실험적 시행 착오에 근거하여 설계되어 왔다^(3,5). 본 논문에서는 위상최적화를 이용한 비틀림 파 발생을 최대화할 수 있는 패치의 두 가지 형상설계 사례로서, 자기장 최적화를 이용한 설계형상과 자기-기계 연성모델(magneto-mechanical coupled model)을 이용한 설계기법과 그 결과를 제시하고자 한다⁽¹⁰⁾.

2. 자기장 해석을 이용한 자기변형 패치 설계

자기장 최적화를 이용한 자기변형 패치의 설계는 패치에 자속(magnetic flux)을 집중시키기 위한 자기 요크(magnetic yoke) 설계문제로 생각할 수 있다⁽⁴⁾. 문제 정식화를 위해서 Fig. 1 과 같은 설계모델을 고려하면, 설계영역은 패치의 좌우에 붙어있는 유한요소로 이산화되어 있는 부분이며 비 설계영역 또한 해석을 위해 이산화되어 있다. 기호 ⊙ 와 ⊗ 는 전류의 방향을 의미하며, ⊙ 는 전류가 지면위로 나옴을 의미하며 ⊗ 는 그 반대를 의미한다.

위상 최적화 설계를 위해 밀도법(density method)⁽⁹⁾을 사용하였으며, 투자율(permeability) μ 는 다음과 같은 밀도 ρ 의 함수로 가정하였다.

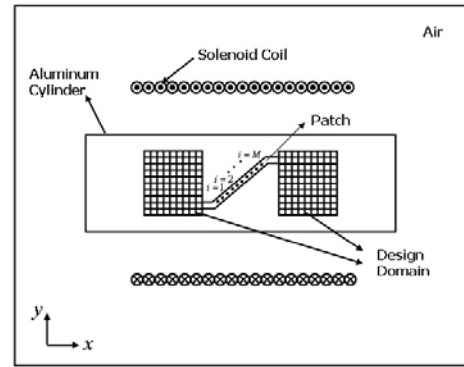


Fig. 1 Problem definition for topology optimization of the magnetic yoke

$$\mu = \mu_0 \{1 + (\mu - 1)\rho\} \quad (1)$$

식 (1)에서 μ_0 는 자유공간의 투자율을, μ 는 설계영역에서의 자기변형 물질의 상대 투자율을 나타낸다. 최적화 문제는 다음과 같이 패치에서의 자속의 세기를 최대화 하는 문제로 정의할 수 있다.

$$\text{Maximize: } f = \left(\sum_{i=1}^M i_i(\rho) \right)^2, \quad 0 \leq \rho \leq 1 \quad (2)$$

여기서, i_i 는 사각형 패치의 i 번째 위치에서의 자속 밀도(magnetic flux density)를 나타내며, M 은 자속 밀도계산을 위해 사용된 절점의 개수를 나타낸다. Fig. 2 는 최종적으로 최적화된 형상을 나타낸 것으로, 중앙에 위치한 패치에 최대한의 자속을 전달하기 위해서 V 자 형상의 요크가 설계되었음을 알 수 있다. 이러한 V 형태의 요크가 부착된 자기변형 패치의 성능은 참고문헌 [4]에 실험적으로도 입증되어 있다.

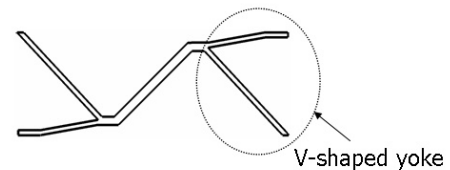


Fig. 2 Magnetostrictive patch having V-shaped yokes at their ends

3. 자기-기계 연성모델을 이용한 자기변형 패치 설계

2 절에서는 자기장 최적화를 통한 자기변형 패치의 형상을 소개하였다. V 형태의 요크가 부착된 패치의 경우 일련의 감쇠(damping)처리를 해 주지 않으면 원하지 않는 모드의 탄성파가 발생할 수 있다는 문제점이 발견되었다⁽⁵⁾. 따라서, 보다 정확한 설계를 위해서는 자기장과 기계적 변형 사이의 연성된 해석모델을 사용하는 것이 바람직하다. 본 절에서는 최근 제안된 1 차원 변환(transduction) 이론⁽⁶⁾에 근거하는 자기-기계 연성모델⁽¹⁰⁾을 이용한 설계형상기법을 고찰하고자 한다.

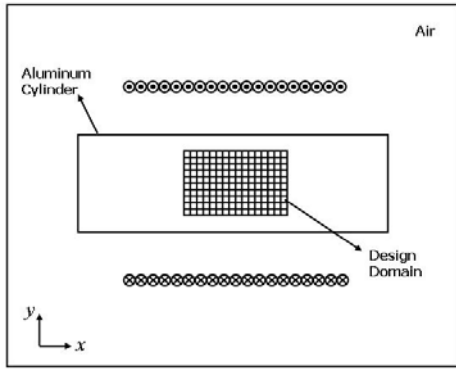


Fig. 3 Problem definition for topology optimization of the patch considering magneto-mechanical coupled model

패치타입 자기변형 트랜스듀서의 해석을 위한 자기-기계 연성모델에서는 인가된 자기장의 크기와 방향에 따라서 자기변형 패치가 변형하게 되고, 그에 따라서 도파체의 접합 부위에 응력이 발생하게 된다. 즉, 패치의 변형에 따라 발생된 응력으로 인한 도파체의 변형형태를 예상할 수 있기 때문에, 최종적으로 인가된 자기장 영향 하에서 도파체에 발생하는 응력 분포를 계산할 수 있다. 이러한 연성 해석과 더불어, 위상최적화 과정에서는 식 (1)과 함께 또 다른 설계변수인 접합지수(bonding index) b 를 도입하였다⁽¹⁰⁾. Fig. 3에서는 설계모델이 도시되어 있는데, Fig. 1과 달리 설계영역은 패치가 부착될 수 있는 유한요소로 이산화된 전체 영역이다. 최적화 문제는 다음과 같이 실린더에 발생하는 전단응력을 최대화 하는 것인데, 이는 최대 비틀림 파를 발생시키기 위해서는 접합부에서의 전단응력이 최대화 되어야 하기 때문이다.

$$\text{Maximize: } f = \left(\sum_{i=1}^d \sigma_x(\rho, b) \right)^2, 0 \leq \rho \leq 1, 0 \leq b \leq 1 \quad (3)$$

여기서, d 는 설계영역의 총 요소 개수이다.

Fig. 4는 식 (3)을 통해 얻어진 최적화된 형상을 나타낸 것으로 패치가 변형에 관여하는 본체부분(main body)과 자속의 통로로만 이용되는 꼬리부분(tail part)으로 나눠짐을 알 수 있다. Fig. 4에 나타난 패치는 기존의 선행연구에서 실험적인 방법으로 고안되고 검증된 Z형상의 패치⁽⁵⁾와 사실상 동일하다. 따라서, Fig. 4를 얻기 위해 제안된 위상최적화 기법(자기변형물질의 유무와 자기변형물질과 도파체의 접합유무를 설계변수로 한 위상최적화 기법)의 타당성을 확인할 수 있다.

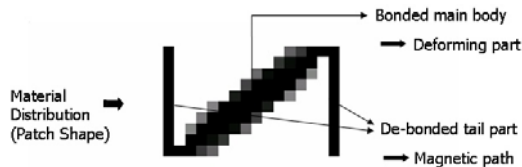


Fig. 4 Optimized final patch configuration

4. 결론

본 논문에서는 자기변형 트랜스듀서의 패치설계를 위한 위상최적설계 적용사례를 살펴보았다. 자기장 최적화를 통해서 V 형태의 요크를 지닌 패치의 형상 얻을 수 있었으며, 자기장과 기계적 변형을 동시에 고려한 연성모델을 적용한 경우에 있어서는 Z형상의 패치가 설계되었다. 특히, 최근 개발된 최적화 기법에는 패치와 도파체간의 접합상태를 추가의 설계변수로 고려함으로써 최적의 해를 효율적으로 구할 수 있었다. 따라서, 향후 이러 설계방법을 확장하여 보

다 다양한 패치형태의 자기변형 트랜스듀서의 설계에 적용할 수 있을 것으로 예상된다.

후기

본 연구는 과학기술부 창의적 연구 진흥 사업(과제번호: 2007-019)의 지원을 받은 것으로 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Jiles, D. C., "Theory of the magnetomechanical effect," J. Phys. D, **2**, 1537-1546, 1995.
2. Kwun, H., and Bartels, K. A., "Magnetostrictive sensor technology and its applications," Ultrasonics, **3**, 171-178, 1998.
3. Kim, Y. Y., Park, C. I., Cho, S. H., and Han, S. W., "Torsional wave experiments with a new magnetostrictive transducer configuration," J. Acoust. Soc. Am., **11** (6), 3459-3468, 2005.
4. Park, C. I., Kim, W. C., Cho, S. H., and Kim, Y. Y., "Surface-detached V-shaped yoke of obliquely bonded magnetostrictive strips for high transduction of ultrasonic torsional waves," Appl. Phys. Lett., , 224105, 2005.
5. Park, C. I., Cho, S. H., Kim, Y. Y., "Z-shaped magnetostrictive patch for efficient transduction of a torsional wave mode in a cylindrical waveguide," Appl. Phys. Lett., , 17410, 2006.
6. Cho, S. H., Lee, J. S., and Kim, Y. Y., "Guided wave transduction experiment using a circular magnetostrictive patch and a figure-of-eight coil in nonferromagnetic plates," Appl. Phys. Lett., , 224101, 2006.
7. Chen, X., and Anjanappa, M., "Health monitoring of composites embedded with magnetostrictive thick film without disassembly," Smart Mater. Struct., **1**, 20-32, 2006.
8. Ghosh, D. P., and Gopalakrishnan, S., "Coupled analysis of composite laminate with embedded magnetostrictive patches," Smart Mater. Struct., **14**, 1462-1473, 2005.
9. Bensoe, M. P., Sigmund, O., "Material interpolation schemes in topology optimization," Arch. Applied Mech., , 635-654, 1999.
10. Sun, K. H., Cho, S. H., and Kim, Y. Y., "Magneto-mechanical coupled topology optimization of a magnetostrictive patch for torsional wave transduction maximization," Proceedings of 7th WCSMO Conference, 2012-2017, 2007.