



딱따구리 원리를 이용한 고충격 측정

박성민, 윤상희*
(인하대학교 기계공학과)

1. 머리말

고충격 하중(high-g shock)에 노출된 구조물에서 발생하는 충격 혹은 진동을 확인하는 가장 기본적인 방법은 가속도 센서로 측정하는 방법이다. 최근 미소기전복합시스템(microelectromechanical system, MEMS) 기술이 급격히 발전함에 따라 가속도 센서는 경박단소화되어 작은 크기의 구조물에 직접 부착이 가능하기 때문에 상기 구조물에 발생하는 큰 움직임뿐만 아니라 미소진동 혹은 변형까지 측정할 수 있다. 고충격 신호를 측정하기 위해 널리 사용되는 가속도 센서는 압전전하형 가속도 센서(piezoelectric accelerometer)와 압전저항형 가속도 센서(piezoresistive accelerometer) 등이 있다.

고충격 환경에서 구조물의 충격 혹은 진동을 가속도 센서로 측정함에 있어 핵심이 되는 과제는 고진폭(예를 들어, 1,000 g 이상) 가속도 성분에 대해 가속도 센서의 감지소자(sensing element)을 보호하는 기술과 동시에 고주파수(예를 들어, 10 kHz 이상) 가속도 성분이 위의 감지소자에 전달되는 것을 차단하는 기술이다. 먼저, 가속도 센서에 입사되는 가속도의 크기가 설계 기준값 이상이 되면 센서 내 감지소자가 물리적으로 파손되기 때문에 감지소자의 소재 및 형상을 최적화하거나 감지소자의 움직임을 제한하는 스톱퍼

(stopper) 등을 추가적으로 구성하여야 한다. 또한 (진폭은 작지만) 10 kHz 이상의 주파수 영역에 있는 가속도 성분은 가속도 센서 혹은 센서 내 감지소자에 공진(resonance)을 발생시킬 수 있고 동시에 가속도 센서에 영점 변화(zero shift)를 일으키게 된다. 이는 고충격 신호를 측정하는 가속도 센서는 고주파수 가속도 성분과 기계적으로 분리되어야 함을 의미한다. 상술하면, 가속도 센서 내·외부에 기계적 필터를 구성하여 가속도 센서 혹은 감지소자에 고주파수 가속도 성분이 전달되지 못하도록 하고 측정방향 이외의 방향에 대한 감지감도(sensitivity)를 낮추며 센서 영점의 변화를 억제시켜야 한다. 지금까지 고진폭 가속도 환경을 견딜 수 있는 내고충격 설계기술에 대해 활발한 연구가 진행되어 왔으나, 고충격 환경에서 필연적으로 존재하는 고주파수 가속도 성분으로부터 가속도 센서를 보호하고 더 나아가 위의 고주파수 성분이 센서에 전달되지 못하도록 하는 방법에 대한 이전 연구는 전무하다시피 했다.

자연 속에 존재하는 생물체는 오랜 시간 동안 진화의 과정을 거쳐 다양하고 거친 환경 속에서 생존과 번식에 적합한 형질을 가지도록 변화하여 왔다. 따라서 자연계에 존재하는 생물체는 해당 생물체의 생존 및 번식에 최적화된 생물학적 특성을 가지고 있다고 할 수 있다. 이에 최근에는 많은 연구자들이 생물체의 특성을 이용하여 기

* E-mail : sanghee.yoon.75@gmail.com

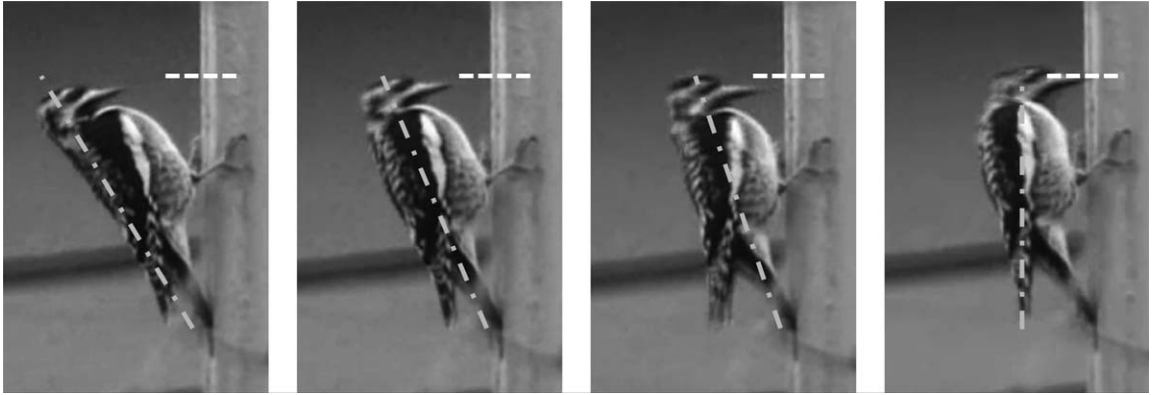


그림 1 붉은부리 딱따구리 나무 쪼기 연속사진

존에 풀지 못한 공학적 난제들을 해결하려고 한다. 이 글에서는 딱따구리 내에 존재하는 내고충격 방법에 대해 살펴본 후 딱따구리 원리를 이용한 고충격 측정방법을 소개하고자 한다.

2. 딱따구리 충격흡수 원리

딱따구리의 생태학적 특성을 살펴보면, 딱따구리는 부리를 이용해 나무를 쪼아서 구멍을 뚫고 긴 혀를 집어넣어 그 안에 살고 있는 곤충의 애벌레를 잡아먹는다. 딱따구리가 부리로 나무를 쪼는 속도는 매우 빨라서 초당 약 20회 수준이고 그때 발생하는 감가속도 수준은 1,200 g 수준이지만 딱따구리는 이 과정에서 뇌 손상과 충격으로 인한 의식불명(g-force induced loss of consciousness, G-LOC)이 없을 뿐만 아니라, 심지어는 두통조차 겪지 않는다. 이는 딱따구리가 나무를 쪼는 과정 중에 가지는 자세와 특유의 내골격 구조 때문인 것으로 알려져 있다⁽¹⁾.

딱따구리가 나무를 두드릴 때 자세를 살펴보면, 몸체는 나무와 수평인 자세를 유지하지만 상대적으로 긴 꼬리 및 꼬리 깃털은 나무표면에 붙이는 방법으로 균형을 유지하면서 부리를 나무와 수직인 방향으로 반복적으로 움직인다(그림 1). 이 때 부리를 포함한 머리는 절대 위아래 혹은 좌우 방향으로 움직이지 않는다. 따라서 두뇌 조직에 치명적인 손상을 주는 전단력(shear force)의 발생을 최소화하고, 오로지 수직력(normal force)

만 발생 및 전달되도록 한다.

또한 딱따구리는 나무를 쪼는 과정 중에 발생하는 고충격 하중으로부터 자신의 뇌를 보호하기 위해 머리 부위에 특유의 내골격 구조와 조직 특성을 가지고 있다. 딱따구리 머리 부위의 X선 컴퓨터 단층촬영(X-ray computed tomography) 이미지를 살펴보면(그림 2), 부리(beak), 설골(hyoid bone), 두개골 전면부의 다공성 뼈(porous bone), 그리고 두개골(skull) 등이 다른 조류와 다른 특징을 알 수 있다⁽²⁾. 먼저, 부리는 몸체에 비해 큰 크기를 가지고 탄성체로 되어있을 뿐만 아니라 스스로 날카로워지는 기능(self-sharpening)과 끌(chisel) 형상을 가지고 있어, 나무를 쪼는 과정에서 발생하는 충격이 뇌 부위에 직접 전달되는 것을 방지하고 또한 그 충격의 크기를 최소화한다. 둘째, 다른 조류에서는 볼 수 없는 혀를 지탱하는 설골은 근건(musculotendinous) 재료로 구성되어 있고, 입 바닥부터 시작해 두개골을 감싼 후 콧구멍까지 연결되어 있다. 따라서 설골은 입사되는 충격이 뇌에 직접 전달되는 것을 막고 동시에 그 자신을 통해 분산 흡수한다. 즉, 입사되는 충격에 대해 우회 전달로를 제공하는 동시에 균일하게 분산시키는 역할을 하게 된다. 셋째, 부리와 두개골 사이에 존재하는 고밀도 다공성 특징을 가지는 다공성 뼈는 전달된 충격하중 혹은 가속도가 집중되지 않도록 하고 더불어 일종의 기계적 저역통과 필터(mechanical low-pass filter)로써 고주파수 충격성분을 차단하는 역할을 수행한다. 마지막으로 딱따

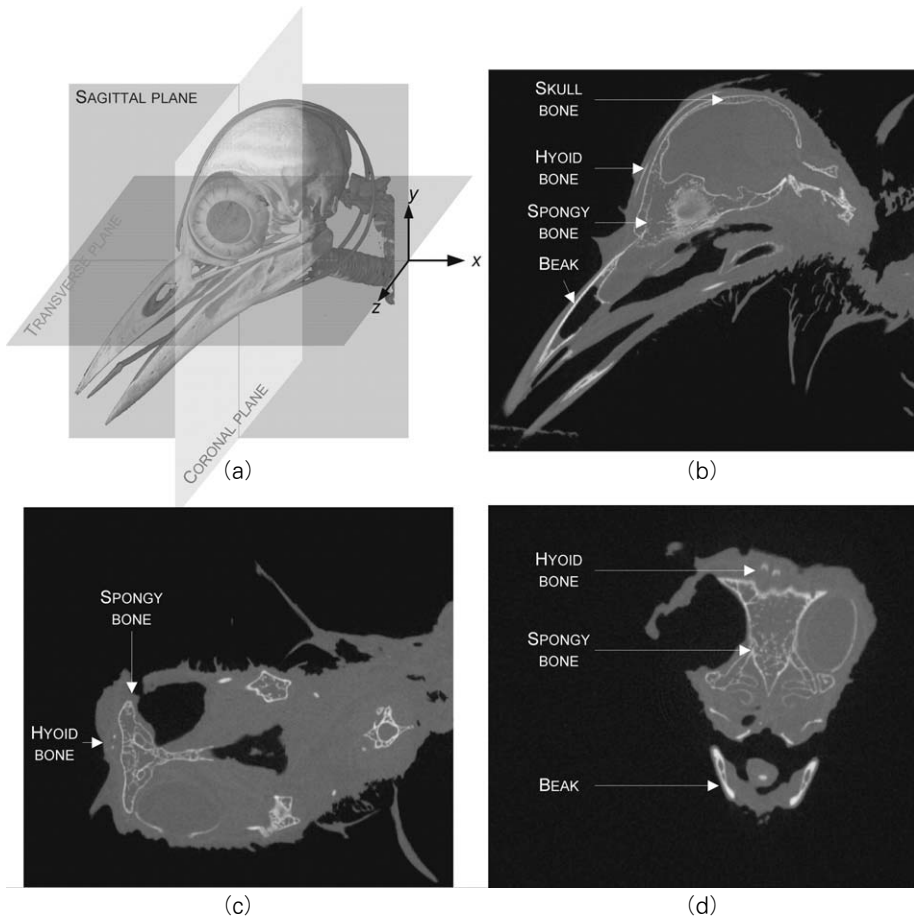


그림 2 황금면 딱따구리 머리의 x선 컴퓨터 단층촬영 이미지

구리의 두개골은 그 크기가 뇌의 것과 유사하여 타 조류에 비해 적은 뇌척수액(cerebrospinal fluid)을 가지고 있다. 이는 두개골까지 전달된 충격이 뇌척수액을 통해 뇌까지 전달되는 것을 방지하게 된다. 딱따구리는 앞에서 언급된 4가지 내골격 구조와 조직 특성을 이용하여 나무를 쪼는 과정 중에 발생하는 고충격 하중으로부터 자신의 뇌를 보호하게 된다.

3. 딱따구리 원리를 이용한 고충격 측정 및 내고충격 장치

딱따구리의 충격흡수 원리로부터 고충격 측정 혹은 내고충격 장치를 설계함에 있어 다음 4가지에 중점을 두어야 함을 알 수 있다. 첫째, 딱따구

리의 부리처럼 해당 가속도 센서 혹은 장치의 외곽부위는 높은 강도를 가지는 소재로 구성함으로써, 변형 및 파손의 발생을 방지하여야 한다. 둘째, 설골의 형상과 근건 소재를 모사하여 외곽부위 내부에 점탄성 소재 기반의 구조물을 구성하여 입사된 충격을 균일하게 분산시켜야 한다. 셋째, 딱따구리의 다공성 뼈의 역할과 유사하게 고충격 측정 혹은 내고충격 장치에 입사되는 가속도 성분 중에 고주파수 성분을 차단할 수 있는 기계적 저역통과 필터를 구성하여야 한다. 마지막으로 딱따구리의 두개골처럼 고충격 측정 혹은 내고충격 장치의 핵심장치(가속도 센서 혹은 보호해야 할 전자부품 등)를 둘러싸는 고강도 소재의 하우징을 추가적으로 구성해야 한다. 이를 바탕으로 딱따구리 원리를 이용한 고충격 측정

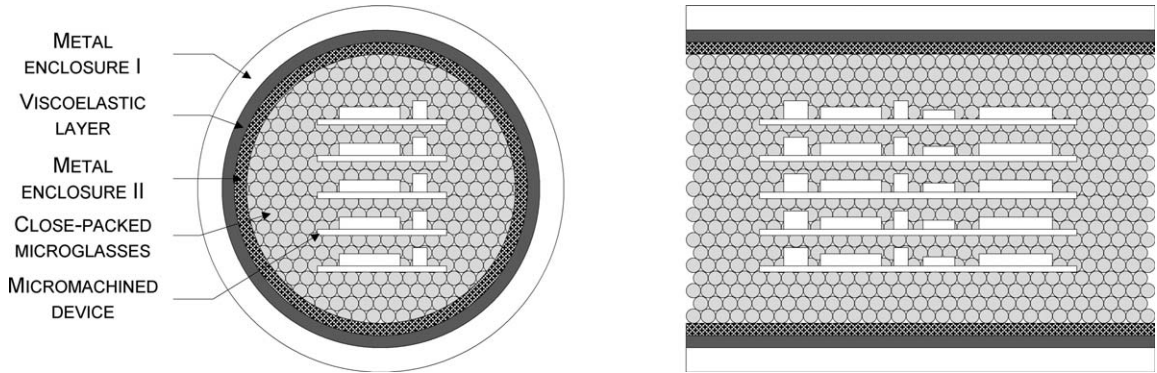


그림 3 딱따구리를 모사한 고충격 측정 및 내고충격 장치

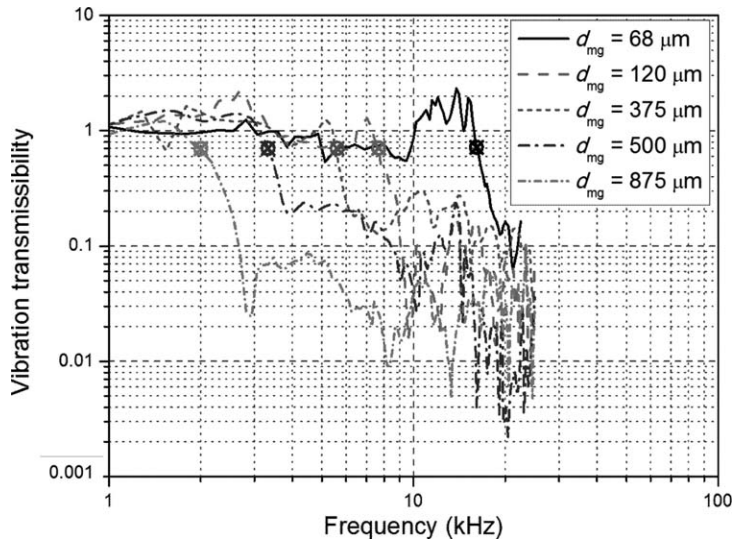


그림 4 밀집 미소유리 가루의 기계적 저역통과 필터링

및 내고충격 장치를 다음과 같이 구성하였다. 딱따구리의 부리는 스테인리스 외부하우징으로, 설골은 점탄성 소재 방진층으로, 다공성 뼈는 고강도 미소유리 가루를 밀집시키는 방법으로, 마지막으로 두개골은 또 다른 스테인리스 하우징으로 모사하였다(그림 3).

우선, 밀집된 고강도 미소유리 가루의 저역통과 필터 기능을 확인하였다. 크기가 다른 5종류의 밀집된 미소유리 가루를 가진기(vibration exciter)에 각각 체결한 후 10 g, 0.1 ~ 25.0 kHz의 진동을 가해주면서 진동 전달률(vibration transmissibility)을 측정하였다⁽³⁾. 그 결과 밀집된 미소유리 가루는 저역통과 기능을 할 수 있고 더

불어 차단 주파수(cut-off frequency)는 미소유리 가루의 크기로 조절할 수 있음을 확인하였다(그림 4). 이를 통해 딱따구리의 다공성 뼈가 기계적 저역통과 필터 기능을 하는 것을 실험적으로 확인할 수 있었다.

마지막으로 그림 3과 같은 딱따구리를 모사한 내고충격 장치를 이용하여 전자부품을 고충격 환경에서 보호할 수 있는지 확인하였다. 약 60,000 g의 고충격 실험을 수행한 결과 이전 방법(고강도 수지를 이용한 전자부품 몰딩, 73.6% 생존)에 비해 전자부품의 고충격 환경 내 생존성을 99.3%까지 획기적으로 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 또한 압전저항형 가속도 센서를 이용

하여 고충격 측정을 실시하였다. 기존 방법을 적용한 경우에는 일반적으로 영점 조정이 되지 않는 압전저항형 가속도 센서에서조차 영점 조정이 일어나거나 센서가 물리적으로 파손되었다. 그러나 이 글에서 제안한 방법을 적용한 경우에는 상기 문제점들 없이 성공적으로 100,000 g 이상의 고충격 가속도를 성공적으로 측정할 수 있었다.

4. 맺음말

이 글에서는 딱따구리 머리 부위에 존재하는 특유의 내골격 구조와 조직 특성을 기계공학적으로 분석 및 이해한 후 이를 기초로 고충격 환경 내에서 사용할 수 있는 내고충격 장치와 고충격 측정방법에 대해 살펴보았다. 이와 같이 생체모방형 접근방법은 기존에 사용되던 방법들이 가지는 기술적 한계를 획기적으로 극복할 수 있는 방향을 제시해 주었고, 더불어 지금까지 이 분야에서 상대적으로 비중이 적게 다루어졌던 기계적 필터 구성의 중요성을 확인시켜 주었다. 딱따구리를 모사한 내고충격 장치와 고충격 측정방법은 고충격 환경에서 핵심 기계 및 전자부품을 보호하거나 혹은 발생된 가속도를 기존 상용 가속도 센서를 이용하여 측정할 수 있는 등 관련된 항공, 우주 및 군사 분야에 널리 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

생체모방 기술은 자연계에 존재하는 생물체의 구조, 기능, 그리고 더 나아가서는 디자인적인 요소를 공학적으로 이해한 후 그 이해를 바탕으로 다양한 공학적 난제를 해결하는 새로운 접근방법이다. 이 글에서 보인 사례처럼 생체모방 기술은 종래 기술이 해결하지 못한 난제를 해결할 수 있는 ‘자연이 가져다 준 혁신’인 것이 사실이지만 생물체의 특징적인 요소에 대한 잘못된 분석 및 이해, 그리고 그에 대한 과신을 통해 ‘이카루스 증후군(Icarus syndrome)’이 있을 수 있음을 명심해야 할 것이다. **KSNVE**

참고문헌

- (1) Yoon, S.-H. and Park, S., 2011, A Mechanical Analysis of Woodpecker Drumming and Its Application to Shock-absorbing Systems, *Bioinspiration & Biomimetics* 6, 016003.
- (2) Yoon, S.-H., Roh, J.-E. and Kim, K. L., 2009, Woodpecker-inspired Shock Isolation by Microgranular Bed, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42, 035501.
- (3) Yoon, S.-H. and Kim, K. L., 2006, Passive Low Pass Filtering Effect of Mechanical Vibrations by a Granular Bed Composed of Microglass Beads, *Applied Physics Letters* 89, 021906.