

자동화 손상 검색을 위한 비접촉식 레이저 초음파 영상화

Noncontact Laser Ultrasonic Imaging for Automated Damage Detection

박 병 진* · 안 윤 규** · 손 훈***
Park, Byeongjin · An, Yun-Kyu · Sohn, Hoon

요 약

최근, 레이저 초음파 영상화 기법은 구조물의 비접촉식 손상 진단을 위해 널리 연구되고 있다. 초음파 영상화 기법의 가장 큰 장점은 비접촉식으로 구조물의 손상을 진단할 수 있고, 가진 및 측정 지점을 자유로이 이동할 수 있다는 점이다. 따라서 이는 고온이나 동적상태의 구조물에 적용이 가능하며, 시간과 공간상의 충분한 데이터를 획득할 수 있으므로 역문제 (Inverse problem)를 해결할 필요 없이 완전한 초음파의 전파 형상을 얻을 수 있다. 지난 연구들에서는 충분한 가진력 혹은 측정 민감도를 확보하기 위해 가진 레이저와 부착형 센서의 조합이나 부착형 가진 트랜스듀서와 센싱 레이저의 조합으로 초음파 영상을 획득하고자 하였다. 하지만 이들 조합은 가진 혹은 측정 지점이 구조물에 부착되어 있어 완전한 비접촉식 기법을 구현하지 못하였다. 이를 극복하고자 레이저와 EMAT 센서 등의 조합이 시도되어 왔으나, 이 또한 EMAT 센서의 적용 거리에 따른 한계점을 지니고 있다. 본 연구에서는 가진 레이저 (Nd:Yag)의 스캐닝을 통해 다양한 가진 점에서 발생한 초음파가 탄성체 구조물을 통해 전파되고, 이를 센싱 레이저 (Laser Doppler Vibrometer)를 이용하여 측정함으로써 비접촉식 초음파 영상화를 구현하였다. 나아가, 정상파 필터 (Standing-wave filter)를 이용하여 구현된 초음파 영상으로부터 손상 영향만 검출해 내는 기법을 개발했다. 개발된 기법은 복합재 시편의 층간박리 (Delamination) 진단을 통해 검증하였다.

keywords : 비접촉식 구조물 손상 진단, 레이저 초음파 영상화, 무기재 손상 진단, 가진 레이저 (Nd:Yag), 센싱 레이저 (Laser Doppler Vibrometer)

1. 서 론

댐과 교량, 항공기 등 많은 구조물의 경우 주요 부재들의 손상을 조기 감지하지 못해 발생하는 사고들로 인한 사회경제적 손실이 크다. 이에 따라 효과적인 안전진단 기법 개발에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 특히 유도파 기반의 안전진단 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 유도파 기술은 대상 구조물에 유도파를 발생시키고 그 신호를 측정하여 구조물의 손상 유무 및 특성을 판단하는 기술로, 다른 파동에 비해 넓은 거리까지 전파가 가능하고 작은 손상에도 민감하게 반응하는 등의 장점이 있다(Raghvan and Cesnik, 2007). 그러나 유도파를 이용한 대부분의 안전진단 기법은 부착형 센서를 이용하였기에 감지 영역이 특정 영역에 한정되고 전력 및 데이터 전송을 위한 추가 장비를 필요로 한다. 이를 해결하기 위해 레이저 스캐닝 진동계를 이용하여 초음파 장(Ultrasonic wave field)을 영상화하는 기법이 개발되었으나(Staszewski et al,

* 학생회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 석사과정 b.park@kaist.ac.kr

** 학생회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 ayk2028@kaist.ac.kr

*** 정회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 부교수 hoonsohn@kaist.ac.kr

2004), 이 역시 유도파 생성을 위해 압전소자 등의 부착형 트랜스듀서를 이용하였기에 완전한 비접촉식 기술이라 할 수 없고, 측정 과정에서 표면 상태에 크게 영향을 받는 등의 단점이 있다.

본 논문에서는 위에서 언급한 한계점들을 극복하기 위해 Nd:Yag 펄스 레이저의 가진 스캐닝과 레이저 진동계를 이용한 측정을 통한 비접촉식 초음파 영상화 기법을 개발했다. 이를 통해 얻은 영상으로부터 손상의 존재 여부와 그 위치를 쉽게 확인할 수 있으며, 영상 처리 기법을 이용하여 손상 부분만을 강조시킨 영상 또한 얻을 수 있다. 층간박리(delamination)가 발생한 복합재 시편에 개발된 기법을 적용함으로써 그 성능을 검증할 수 있었다.

2. 초음파 영상화 및 영상 처리 기법

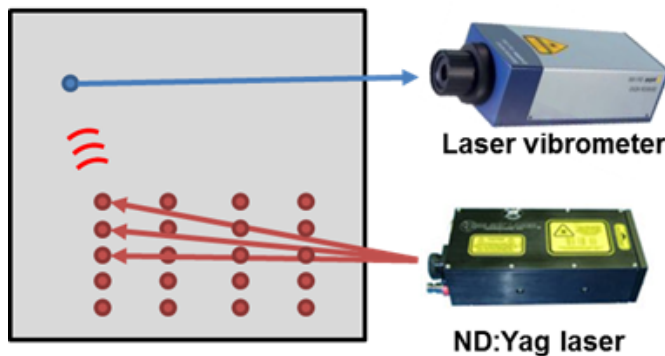


그림 1. 비접촉식 초음파 영상화 기법의 개략도

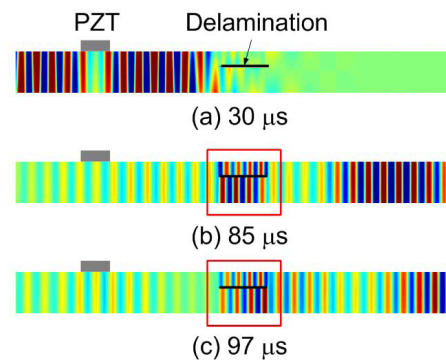


그림 2. 층간박리 영역에서 정상파의 형성 (Dutta, 2010)

개발된 기법을 통한 비접촉식 초음파 영상화는 그림 1과 같은 과정을 통해 이루어진다. Nd:Yag 레이저를 구조물에 조사하면 열팽창에 의해 초음파가 발생하고 이를 레이저 진동계를 이용하여 측정할 수 있다 (Scruby and Drain, 1990). 상반 원리 (Reciprocal theorem)에 따르면 측정된 파동은 측정지점에서 초음파를 발생시켜 생성지점에서 측정된 것과 동일하다. 따라서 여러 지점을 Nd:Yag 레이저로 조사하고 고정된 한 지점에서 레이저 진동계로 파동을 측정하면, 이는 고정된 초음파 원(Ultrasonic wave source)에서 발생한 파동을 원하는 공간 영역에 대해 측정된 것과 같다. 이 공간 정보를 이미지화 시켜 시간에 대해 나타내면 초음파장의 진행을 영상화할 수 있다.

얻어낸 초음파 정보로부터 각 지점에서의 파동 에너지를 계산할 수 있고, 이를 통해 전 시간 영역에 대한 정보를 하나의 이미지로 나타낼 수 있다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 진행하던 초음파는 층간박리 영역 내에 간혀 정상파를 형성하게 되는데(Hayashi and Kawashima, 2002; Dutta 2010), 이 때문에 다른 지점에 비해 더 높은 파동 에너지 값을 가진다. 따라서 파동 에너지가 특히 높은 영역을 찾음으로써 손상의 위치를 확인할 수 있다. 본 연구에서는 손상 영역을 강조하기 위하여 정상파 필터(Standing wave filter)를 사용하였다. 정상파 필터는 층간박리 영역에서 정상파가 형성된다는 점에 착안하여 측정된 초음파장에서 정상파 정보만 추출하여 영상화시키는 기법이다(Dutta 2010; Sohn et al, 2011).

3. 복합재 시편 층간박리에 대한 초음파 영상화 기법 적용

개발된 비접촉식 영상화 기법을 통한 손상 감지를 검증하기 위해 5mm 두께의 복합재 평판 시편이 사용되었다. 층간박리의 발생을 모사하기 위해 약 103J의 충격을 가해 시편에 손상을 주었다. 손상이 있을 때의

영상 변화를 확인하기 위해 건전상태 영역과 층간박리가 존재하는 영역에 대해 초음파 영상을 얻고 이 영상으로부터 파동 에너지를 계산하여 단일 이미지로 만들어 비교해 보았다. 스캐닝 영역의 크기는 60mm×60mm 이며, 스캐닝 지점간의 거리는 약 1.6mm이다.

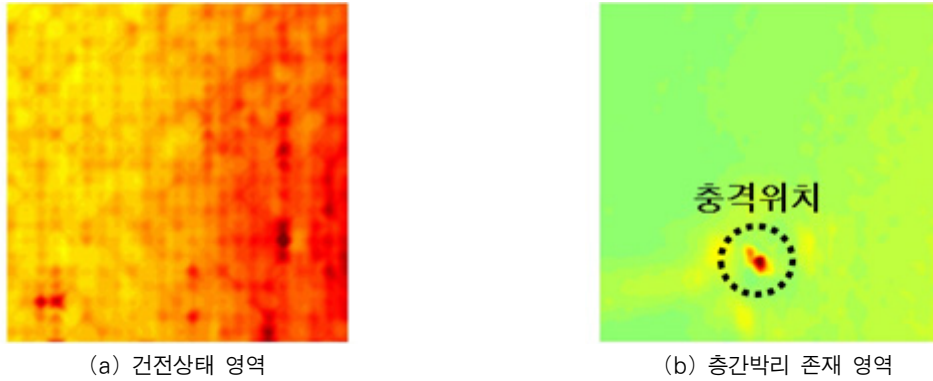


그림 3. 건전상태 영역과 층간박리 존재 영역에서의 파동 에너지 이미지의 비교.

그림 3(a)와 같이 손상이 없는 영역에서는 파동 에너지가 파동 진행 방향에 따라 감소할 뿐 전 영역에 걸쳐 큰 차이를 보이지 않는 반면, 그림 3(b)와 같이 손상이 존재하는 경우 손상 위치 근처에서 파동 에너지가 매우 큰 값을 보임을 확인할 수 있다. 이는 진행하던 초음파가 층간박리 영역에 갇히게 되면서 더 이상 진행하지 않고 층간박리 내부에 머물러 있기 때문이다. 따라서 개발된 비접촉식 영상화 기법을 통해 복합재의 손상 여부를 단순한 이미지 확인을 이용해 수행할 수 있음을 검증했다.

다만, 비록 그림 3(b)에서 손상 위치에서 큰 파동 에너지 값을 얻긴 했지만 파동 진행에 따른 에너지 차이 때문에 손상이 존재하지 않는 일부 영역도 다른 영역에 비해 상대적으로 높은 에너지를 갖게 된다. 이러한 효과를 제거하고 손상 위치만 강조하기 위해 위에서 언급한 영상 처리 기법인 정상과 필터를 적용해 보았다.



그림 4. 그림 3(b)의 파동 에너지 이미지에 정상과 필터를 적용한 결과.

그림 4에서 볼 수 있듯이 영상 처리를 하기 전에 비해 손상의 위치만 더욱 강조됨을 확인할 수 있다. 따라서 얻은 초음파 영상에 영상 처리 기법을 적용하면 더 쉽게 손상의 존재 여부를 확인할 수 있다.

개발된 비접촉식 영상화 기법을 이용해 다른 시편에 대해서도 손상 감지 검사를 수행해 보았다. 사용한 시편은 1.8mm 두께의 복합재 평판으로, 시편 중앙부에 충격을 가해 내부에 층간박리를 생성했다. 5mm 두께의 복합재 시편에 대해서와 마찬가지로 60mm×60mm 크기의 영역에 1.6mm 간격으로 스캐닝 지점을 설정해 영상을 구현했다. 그 결과 초음파 에너지 이미지와 정상과 필터 적용 이미지로부터 손상 위치만을 확인할 수 있었다(그림 5).

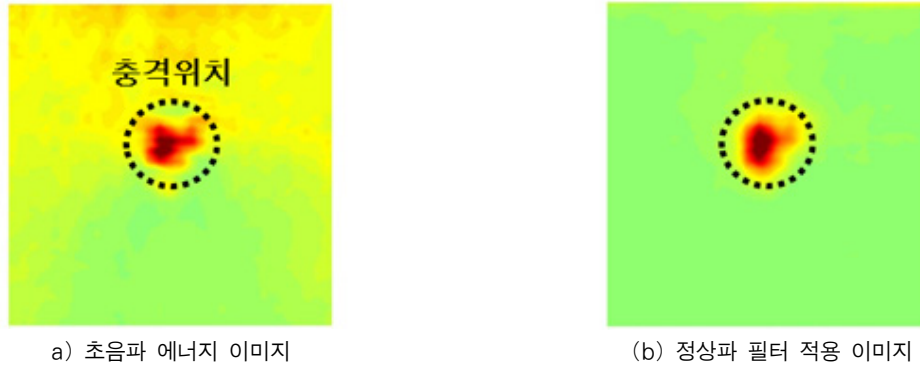


그림 5. 1.8mm 두께의 복합재 평판에 대한 초음파 영상화 결과

4. 결론

본 논문에서는 비접촉식 초음파 영상화 기법을 이용하여 복합재 시편들을 대상으로 영상 기반 손상 진단 기법을 검증해 보았다. 개발된 기법은 초음파의 생성 및 측정 과정에서 접촉식 트랜스듀서 및 센서를 사용하지 않는 완전한 비접촉식 영상화 기법이며 일반적인 레이저 스캐닝 진동계를 이용한 영상화 기법과 달리 구조물 표면 상태에 대한 의존도가 매우 낮아 추가적인 표면 처리를 최소화시킬 수 있는 등의 장점이 있다. 이 뿐만 아니라 얻은 초음파 장 영상에 정상파 필터를 이용한 영상 처리 기법을 적용하여 손상 위치만을 강조할 수 있음 역시 보였다. 앞으로 추가적인 영상 처리 기법 적용에 대한 검토 및 측정된 초음파 신호영상을 이용한 무기저 손상 진단 기법 개발을 통해 그 적용성을 확대해 나갈 예정이다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부에서 출연한 중견연구자지원사업 도약연구와 원자력기술개발사업 고유강점기술 육성 지원으로 이루어진 것으로, 각 사업의 연구 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- Dutta, D.** (2010) Ultrasonic techniques for baseline-free damage detection in structures, Ph.D dissertation, Carnegie Mellon University.
- Hayashi, T. and Kawashima, K.** (2002) Multiple reflections of Lamb waves at a delamination. *Ultrasonics*, 40(1-8), pp.193~197
- Raghvan, A and Cesnik, C.E.** (2007) Review of guided-wave structural health monitoring, *The shock and Vibration Digest*, 39(2), pp.91~114
- Scruby, C.B. and Drain, L.E.** (1990) *Laser ultrasonics: techniques and applications*, Adam Hilger, New York
- Sohn, H., Dutta, D., Yang, J.Y., DeSimo, M.P., Olson, S.E. and Swenson, E.D.** (2011) "Automated detection of delamination and disband from wavefield images obtained using scanning laser vibrometer," Accepted for *Smart Materials and Structures*
- Staszewski, W. J., Lee, B. C., Mallet, L. and Scarpa, F.** (2004) Structural health monitoring using scanning laser vibrometry: I. Lamb wave sensing, *Smart Materials and Structure*, 14, pp.251~260.