

복합재 연소관의 초음파 결함 분석 프로그램 개발

김동륜* · 임수용* · 정상기* · 이경훈*

A Development of Ultrasonic Defect Analysis Program for Composite Motor Case

Dongryun Kim* · Sooyong Lim* · Sangki Chung* · Kyunghoon Lee*

ABSTRACT

A defect analysis program of the composite motor case was developed to apply the ultrasonic signal processing method on basis of the ultrasonic pulse-echo method and the defects of FRP delamination and FRP/Rubber disbond in the composite motor case could be quantitatively measured. The defects detected in the composite motor case were in agreement with the results measured with the computed tomography and video microscope. This paper was described about the development process of the defect analysis program to convert the ultrasonic test data into the C-Scan image.

초 록

초음파 결함 분석 프로그램은 초음파 반사법을 기반으로 초음파 신호 처리 기법을 적용하여 개발되었고, FRP 층간분리 및 FRP/내열고무 미접착 결함을 정량적으로 측정할 수 있었다. 복합재 연소관에서 검출된 결함은 절단하여 전산화 단층촬영 및 영상 현미경으로 분석하였고, 결함 분석 프로그램의 결과와 일치하였다. 본 논문은 복합재 연소관의 초음파시험 데이터를 C-Scan 영상으로 변환하여 결함을 분석할 수 있는 프로그램 개발 과정을 기술하였다.

Key Words: Ultrasonic Inspection(초음파 검사), Multi-layered Structure(다중 접착 구조물), C-Scan Image(C-Scan 영상), Defect Analysis Program(결함 분석 프로그램)

1. 서 론

복합재 연소관의 안정성은 전체 유도무기 시스템의 성공 여부와 직결되었으며, 복합재 연소관에 일정 크기 이상의 결함이 존재하면 추진제

연소시 고온·고압의 연소 환경에서 치명적인 결함으로 나타나 추진기관의 내열 파괴에 의한 구조 파괴까지 초래할 수 있다. 그러므로 복합재 연소관의 제품 성능을 보장하기 위해서는 결함을 효과적으로 검출할 수 있는 비파괴시험 기법이 필수적으로 요구된다. 복합재 연소관은 고감쇠 복합적층구조물이므로 판독이 상대적으로 용

* 국방과학연구소 1기술연구본부 6부

† 교신저자, E-mail: ndtpro@hanmail.net

이하고 결함을 형상화하기 쉬운 방사선투과시험을 적용하고 있다.

방사선투과시험은 비파괴시험 기법 중에서 국내에도 오랜 경험과 숙련된 기술을 보유하고 있어 비교적 손쉽게 복합재 연소관의 품질보증기법으로 활용하고 있지만, FRP 층간분리 및 FRP/내열고무 계면 미접착과 같은 면적형 결함은 접선방향으로 X-ray를 투과하기 때문에 방사선투과시험의 촬영 횟수에 따라 검사 시간과 비용이 비례적으로 증가하는 단점이 있으므로 상대적으로 결함 검출 능력이 제한된다. 이를 극복하기 위하여 방사선투과시험을 대체할 수 있는 초음파시험 개발이 절실히 요구되었다.

초음파시험을 개발하기 위하여 복합재 연소관에서 발생할 수 있는 결함들을 모사할 수 있는 모의결함 시편을 제작하였고, 모의결함시편을 이용하여 FRP와 내열고무에 대한 초음파 물성을 측정하였다. 초음파시험이 복합재 연소관에 적용 가능한지를 판단하기 위해 접착매질/FRP/내열고무/공기층에 대한 초음파 신호를 모델링하여 초음파 신호를 예측하였다[1, 2].

복합재 연소관의 초음파시험 기술은 초음파 신호 처리 기법과 구동부를 제어하는 메카니즘을 이용하여 초음파 자동화 검사 시스템을 구축하였으며, 초음파 자동화 C-Scan 검사 시스템으로부터 계속되는 대용량의 초음파 신호들은 초음파 결함의 특성을 분석하여 자동으로 결함을 분석할 수 있는 프로그램을 개발하였다.

본 논문은 초음파 결함 분석 프로그램으로 복합재 연소관의 초음파 신호에 대해 C-Scan 영상을 구현하는 방법에 대해 기술하였다.

2. 초음파 신호 모델링 및 분석

2.1 투과법 및 반사법

복합재 연소관은 고감쇠 재질로 이루어진 복합적층구조물이며, 복합재 내부에는 섬유적층 방향에 따라 미세한 다수의 기공이 포함되어 있고, 각 층간의 음향 임피던스가 불일치한다. 일반적으로 복합재 연소관의 초음파시험을 위해

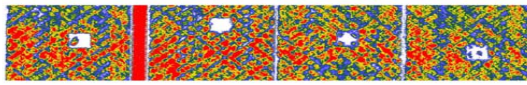
초음파시험 결과의 해석이 비교적 용이한 투과법을 적용하고 있는데, 투과법은 복합재 연소관과 같이 다중 경로의 초음파 반사가 수반되어 초음파 신호가 급변하는 경우에 이용된다. 투과법은 초음파 신호 해석이 용이하고 결함 검출 능력도 우수하지만, 검출된 결함 길이만 측정 가능하고 결함 깊이를 측정할 수 없다.

투과법은 송신과 수신에 분리된 2개의 초음파 탐촉자를 이용하여 한 쪽 탐촉자에서는 초음파를 발생시키고, 한 쪽 탐촉자에서는 초음파를 수신하여 내부 결함을 검출하는 시험 기법이다. 투과법은 초음파 신호 전달을 위해 연소관 내부와 외부로 접촉매질인 물을 사용하게 되는데 복합재 연소관 내부에 흡수된 수분을 완전히 건조시키기 위한 추가 공정과 비용이 소요되며, 불완전한 건조 시 복합재 연소관과 추진제 접착계면에서 치명적인 미접착 결함을 유발시킬 수 있다.

반사법은 송신 및 수신을 겸용한 1개의 초음파 탐촉자를 이용하여 복합재 연소관 내에 초음파를 송신하고 복합재 연소관 내부 및 저면에서 반사되는 초음파 신호를 수신하여 내부 결함을 검출하는 시험기법이다. 반사법은 투과법과 달리 결함 길이와 깊이를 측정할 수 있지만, 복합재 연소관과 같은 고감쇠 복합적층구조물에서는 초음파 투과능력이 낮고 초음파 반사 신호의 중첩으로 인하여 신호 해석이 어렵다.

복합재 연소관은 일정한 길이 이하의 FRP 층간분리는 허용되나, FRP/내열고무 미접착은 허용되지 않는다. 그러므로 결함 깊이를 측정할 수 있는 반사법 개발이 절실히 요구되었다. 고감쇠 복합적층구조물의 결함 검출을 위한 초음파시험 개발을 착수하기에 앞서서 예비 실험으로써 투과법과 반사법을 Fig. 1에서 비교하였다.

Figure 1(a)는 FRP/내열고무 미접착 1개와 결함 깊이가 다른 FRP 층간분리 3개를 갖고 있는 모의결함시편에 대해 투과법을 실시하여 취득한 C-Scan 영상이다. Fig. 1(a)에서 보듯이 FRP/내열고무 미접착과 FRP 층간분리가 모두 검출되었으나, 단지 투과된 초음파 신호로 결함을 판정함으로써 FRP/내열고무 미접착과 FRP 층간분리를 C-Scan 영상으로 구별할 수 없었다.



(a) Through Transmission Method



(b) Pulse Echo Reflection Method

Fig. 1 C-Scan Image of Composite Motor Case

Figure 1(b)는 동일한 모의결합시편에 대해 반사법을 이용하여 취득한 C-Scan 영상이다. Fig. 1(b)에서는 Fig. 1(a)와 달리 FRP 층간분리는 검출되지 않았고, FRP/내열고무 미접착만 흐릿하게 검출되었다. FRP 층간분리를 검출하지 못한 이유는 FRP 층간분리에서 다중 반사되는 초음파 신호와 접착매질/FRP 계면의 반사 신호를 분리하지 못하였기 때문이었다.

FRP 층간분리는 검출되지 않았지만 계측된 초음파 신호를 정밀하게 분석한다면 반사법으로도 복합재 연소관의 FRP 층간분리 및 FRP/내열고무의 미접착 결함을 검출할 수 있다고 판단하였다. 이를 위하여 복합재 연소관의 결함 분석 프로그램을 개발하게 되었으며, 복합재 연소관에 존재하는 결함의 식별도를 높이기 위하여 거리진폭보상곡선, 결함 검출 레벨, 초음파위상분석 및 칼라매핑 등의 초음파 신호처리 기술을 결함 분석 프로그램에 적용하였다.

2.2 초음파 신호 모델링

초음파가 복합재 연소관에 입사하게 되면 초음파는 물질의 내부를 압력파의 형태로 진행하게 되는데 이중재료의 경우, 경계면에서 두 재료의 음향 임피던스 차이 및 진행파 종류에 의하여 다양한 형태의 전파 특성을 나타내게 된다. 초음파는 경계면에서 반사하는 성분과 투과하는 성분으로 나누어지는데 음향 임피던스에 따라

반사와 투과 비율이 정해진다. 복합재 연소관은 FRP와 내열고무가 접착된 고감쇠 복합적층구조물이고, 초음파가 복합재 연소관에 입사되면 초음파가 연소관 내부로 진행하면서 복합재 연소관 접착계면에서 반사와 투과 현상이 반복되어 초음파 신호가 복잡해진다.

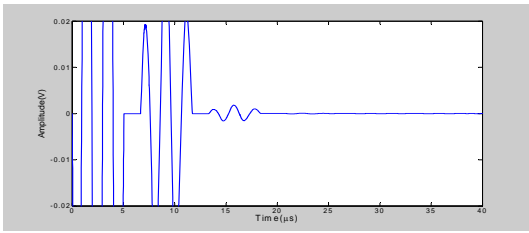
초음파 신호 모델링은 복합재 연소관 내로 입사하는 초음파 전달 현상을 규명하기 위해 실시하였고, 복합재 연소관에 반사법을 적용한 초음파시험 기술 및 결함 분석 프로그램 개발의 가능성 여부를 알기 위해 실시하였다.

복합재 연소관과 같이 다중 접착계면을 갖는 구조물의 초음파 전달 현상을 규명하기 위해 이항계수를 이용하여 시스템 응답 함수를 계산하였고, 탐측자에 발생하는 실제 파형을 계측하여 입력 함수로 이용하였다. 선형시스템에서는 시스템 응답 함수와 입력 함수에 대해 콘볼루션 적분을 수행하여 Fig. 2와 같은 초음파 출력신호를 얻을 수 있었다.

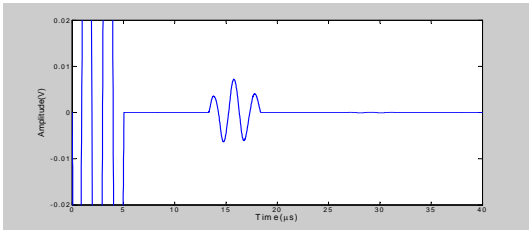
Figure 2(a)는 복합재 연소관의 FRP 층간분리에 대한 초음파 모델링 신호이며, FRP 층간분리로 인하여 다중 반사 신호가 계측될 것으로 예측하였다. 제 1 반사 신호는 초음파 진폭이 높게 측정되었고, 제 2 반사 신호는 초음파가 대부분 산란 및 흡수되어 에너지를 잃기 때문에 초음파 신호가 급격히 낮아졌다. FRP/내열고무 계면 반사 신호와 내열고무 저면 신호가 계측되지 않았다.

Figure 2(b)는 복합재 연소관에 존재하는 FRP/내열고무 미접착에 대한 초음파 모델링 신호이다. FRP/내열고무 미접착 반사 신호는 계측되었으나, 내열고무 저면 신호가 계측되지 않고 있다. Fig. 2(c)는 무결함의 복합재 연소관에 대한 초음파 모델링 신호이다. FRP/내열고무 계면 반사 신호와 내열고무 저면신호가 중첩되어 계측되고 있다.

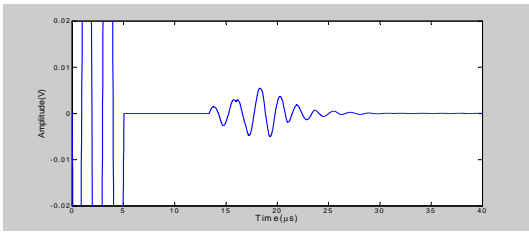
복합재 연소관 내부에 결함이 있으면 내열고무 저면 신호가 계측되지 않을 것이며, FRP 표면에서 결함까지 초음파가 진행할 때 소요되는 시간을 측정하면 결함의 깊이를 측정할 수 있다.



(a) FRP Delamination



(b) FRP/Rubber Disbond



(c) No Defect

Fig. 2 Simulation Results of Composite Motor Case

3. 초음파 결함 분석 프로그램 개발

3.1 초음파 결함 분석 프로그램

복합재 연소관의 초음파 결함 분석 프로그램은 Visual C++과 Delphi 7.0을 이용하여 작성하였으며, 복합재 연소관의 FRP 층간분리 및 FRP/내열고무 미접착을 정량적으로 검출하기 위해 개발하였다. 초음파 결함 분석 프로그램은 대용량의 초음파시험 데이터의 판독 신뢰도 향상을 위해 결함을 가시화하여 판독자가 보다 쉽게 결함을 판독할 수 있게 작성하였다.

결함 분석 프로그램은 거리진폭보상 곡선, 초음파 위상 분석, 결함 검출 레벨, 칼라 매핑을 적용하여 결함을 정량적으로 측정할 수 있다. 결함 분석 프로그램으로 초음파 C-Scan 장비로부

터 취득한 초음파시험 데이터를 로딩하면 표면 정렬된 B-Scan 영상이 자동 생성된다. 표면 정렬은 초음파시험 데이터의 시간 0 μs 로부터 시작하여 첫 파형의 Amplitude가 70%이상인 시간을 찾아서 그 시간을 10 μs 위치로 이동 정렬하여 복합재 연소관의 외경 치수 오차 및 굴곡을 보정할 수 있다.

복합재 연소관은 초음파 감쇠계수가 큰 고감쇠재질이므로 초음파 투과 거리에 대한 초음파 진폭을 보정할 수 있는 거리진폭보상 기능을 포함하고 있으며, 복합재 연소관의 기하학적 치수 및 초음파 음속을 입력하면 B-Scan 영상에서 재질에 따른 검사 구간이 자동으로 생성된다. 초음파 위상 분석 기법을 적용하여 정밀하게 결함을 측정할 수 있고, 각 재질에 대한 결함 검출 레벨은 스크롤바를 이용하여 조정할 수 있다.

복합재 연소관의 초음파시험 데이터는 초음파 신호처리 기법을 적용하여 C-Scan 영상으로 변환된다. C-Scan 영상에서 결함이 없는 영역은 그레이 영상으로 표시되고, 만약 결함이 검출되면 칼라매핑에 의해 결함은 해당 깊이에 상응하는 색상의 영상으로 표시되므로 결함을 가시화하여 분석이 용이하도록 개발되었다. C-Scan 영상에서 검출된 결함은 A-Scan 신호 및 B-Scan 영상과 연동하여 결함 깊이를 측정할 수 있고, 결함 영역을 지정하면 결함 길이를 측정할 수 있다.

Figure 3은 복합재 연소관의 초음파 결함 분석 프로그램의 전체화면이다. C-Scan창, A-Scan 창 및 매개변수 창으로 구성되었으며, C-Scan 창은 탭을 이용하여 B-Scan으로 전환될 수 있다.

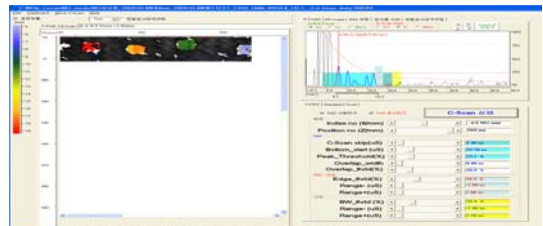


Fig. 3 Graphic User Interface of Ultrasonic Defect Analysis Program for Composite Motor Case

3.2 결함 검출 레벨 설정

결함 검출 레벨은 초음파 모델링 신호와 모의 결함시편을 이용하여 실험으로 측정한 초음파 신호를 분석하여 설정하였다. 복합재 연소관이 무결함인 경우 초음파는 접촉매질/FRP 계면에서 반사하고, FRP/내열고무 계면에서 반사하며, 내열고무 저면에서 반사한다. FRP 층간분리가 있는 경우 접촉매질/FRP 계면에서 반사하고, FRP 층간분리에서 반사한다. FRP/내열고무 미접착이 있는 경우 접촉매질/FRP 계면에서 반사하고, FRP/내열고무 계면에서 반사한다.

무결함인 복합재 연소관은 내열고무 저면 신호가 측정되지만, 결함이 내재된 복합재 연소관에서는 내열고무 저면 신호가 측정되지 않는다. 내열고무 저면 신호가 측정된다면 결함이 없으므로 초음파 전달이 용이하기 때문이고, 이를 이용하여 복합재 연소관의 결함 유무를 판단할 수 있다.

결함 검출 레벨은 FRP, FRP/내열고무 계면 및 내열고무 저면으로 나누어 설정하였다. FRP 층간분리 검출레벨은 FRP 층간분리로부터 반사되는 초음파 신호의 최대 진폭 크기에서 30%를 초과하는 영역을 결함으로 분류하였다. FRP/내열고무 미접착 검출레벨은 FRP/내열고무 미접착으로부터 반사되는 초음파 신호의 최대 진폭 크기에서 80%를 초과하는 영역을 결함으로 분류하였다. 내열고무 저면의 결함 검출 레벨은 무결함 초음파 신호의 최대 진폭 크기에서 50%이하인 영역을 결함으로 분류하였다. Fig. 4에서 A-Scan 창에 설정된 각 영역의 결함 검출 레벨을 볼 수 있다.

초음파는 반사계수가 양수인 경우 위상이 반전되지만, 음수인 경우 위상은 반전되지 않는다. 접촉매질/FRP 계면은 반사계수가 양수이므로 위상이 반전되지만, FRP 층간분리, FRP/내열고무 계면, 내열고무 저면은 반사계수가 음수이므로 위상이 반전되지 않는다. 그러므로 접촉매질/FRP 계면은 RF 신호의 양수 값을 표시하였고, FRP 층간분리, FRP/내열고무 계면, 내열고무 저면은 RF 신호의 음수 값을 표시하여 결함의 깊이를 정밀하게 측정할 수 있었다.

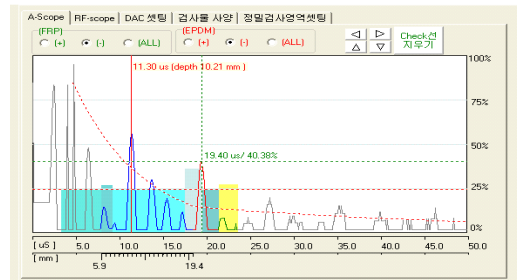


Fig. 4 Adjustment of Defect Detection Level

3.3 거리진폭보상 곡선

초음파가 접촉매질/FRP 계면을 투과하여 복합재 연소관으로 진행할 때 초음파 확산 및 FRP 적층면에서 산란에 의해 감쇠가 발생한다. FRP는 섬유 적층방향에 따른 다수의 미세한 기공이 포함되어 있어서 초음파 진행이 어려우므로 고감쇠 재질로 분류된다. FRP의 감쇠계수는 모의 결함시편을 이용하여 0.0977 dB/mm로 측정되었으며, 내열고무의 감쇠계수는 0.0358 dB/mm로 측정되었다.

복합재 연소관 내에 결함 깊이가 다르지만 같은 길이의 결함이 존재할 경우, 결함이 FRP 표면과 가까운 곳에 위치한다면 초음파 에너지 손실이 적어 결함을 과대 평가할 수 있고, 결함이 FRP 표면과 먼 곳에 위치한다면 초음파 에너지 손실이 많아 결함을 과소 평가할 수 있다. 그러므로 FRP 및 내열고무와 같은 고감쇠재질은 반드시 거리에 따라 진폭을 보상할 수 있는 거리진폭보상 곡선을 작성해야 한다.

Figure 5는 결함 분석 프로그램의 거리진폭보상 곡선 창이며, 모의결함시편에서 측정한 FRP 및 내열고무의 감쇠계수를 대입하면 감쇠법칙을 적용되어 거리진폭보상 곡선을 자동적으로 그려진다.

Figure 6은 모의결함시편에 대해 거리진폭보상 곡선을 적용하기 전과 후의 C-Scan 영상을 비교한 그림이다. 거리진폭보상 곡선을 적용하기 전에는 Fig. 6(a)와 같이 결함 위치가 FRP 표면과 가까운 결함만 측정되었으나, 거리진폭보상 곡선을 적용한 후에는 Fig. 6(b)와 같이 모든 결함이 검출되었다.

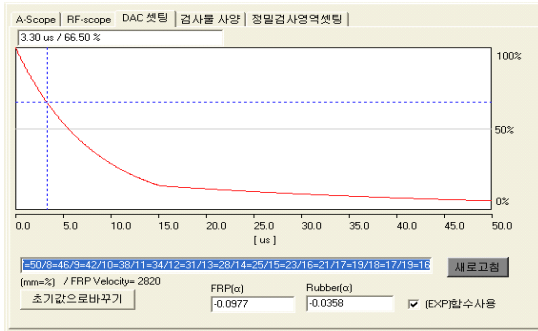
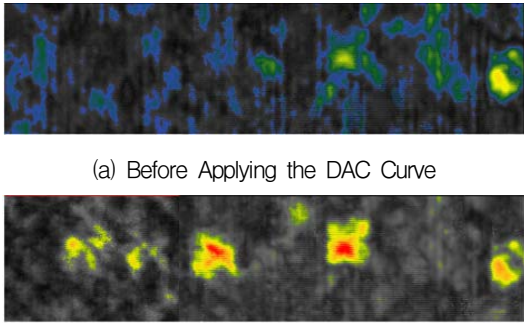


Fig. 5 Distance Amplitude Correction Curve Of Composite Motor Case



(a) Before Applying the DAC Curve

(b) After Applying the DAC Curve

Fig. 6 C-Scan Image of Artificial Defect Specimen

3.4 칼라매핑 적용

FRP/내열고무 미접착은 FRP 층간분리보다 복합재 연소관에 치명적 영향을 미치므로 FRP/내열고무 미접착과 FRP 층간분리는 반드시 구별되어야 한다. FRP 층간분리도 결함 깊이에 따라 합부 판정이 달라지므로 결함 깊이를 판독자가 손쉽게 알 수 있는 칼라매핑을 적용하였다.

칼라매핑은 결함 깊이에 따른 칼라 인덱스를 지정하여 결함 영역은 칼라 색상으로 표시하고, 무결함 영역은 그레이 색상으로 표시하여 결함을 가시화하는 기법이다. Fig. 7은 모의결함시편에 대해 칼라매핑이 적용된 C-Scan 영상이다. 결함 깊이에 따라 FRP/내열고무 미접착 및 FRP 층간분리가 구별됨을 알 수 있고, FRP 층간분리도 결함 깊이에 따라 다른 색상으로 표시됨을 알 수 있다.

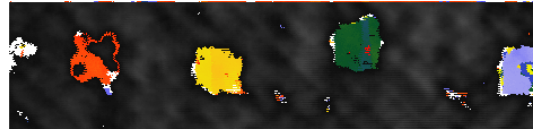


Fig. 7 C-Scan Image of Artificial Defect Specimen Applied by the Color Mapping Method

4. 결함 분석 프로그램 검증

4.1 복합재 연소관 절단 및 결함 확인

복합재 연소관의 초음파시험 데이터는 결함 분석 프로그램을 적용하여 C-Scan 영상으로 변환하였으며, 일부 복합재 연소관에서 합부 판정 기준을 초과하는 FRP 층간분리가 검출되었다. 초음파시험을 검증하고 복합재 연소관 제작 과정에서 FRP 층간분리가 발생한 원인을 규명하기 위해 복합재 연소관을 절단하였다.

복합재 연소관에서 무결함 시편과 결함 시편을 채취하였으며, 검출된 결함을 보다 정밀하게 분석하기 위해 전산화 단층촬영 장비를 이용하여 단층촬영 영상을 취득하였고, 영상 현미경으로 결함 표면을 확대하여 분석하였다. Fig. 8의 좌측은 전산화 단층촬영 영상이고, 우측은 영상 현미경 영상이다.

전산화 단층촬영은 시험 조건을 같게 하기 위해 무결함 시편과 결함 시편을 포개어 고정된 후 동시에 촬영하였다. Fig. 8의 전산화 단층촬영 영상에서 상단은 무결함 시편이고, 하단은 결함 시편이다. 무결함 시편은 제작 당시에 포함된 미세한 기공만 검출되었으나, 결함 시편은 FRP 표면으로부터 일정한 깊이에 FRP 층간분리 및 기공 층이 검출되었다. 결함 시편의 FRP 층간분리 및 기공 층에 대해 영상현미경으로 관찰한 결과, Helical 층에서 FRP 층간분리 및 다수의 기공이 육안으로 확인 확인되었다.

전산화 단층촬영 및 영상현미경 분석 결과를 통하여 복합재 연소관의 초음파 결함 분석 프로그램에 대한 결함 검출 능력을 검증할 수 있었으며, 복합재 연소관의 품질보증의 수단으로 활용할 수 있음을 확인하였다.

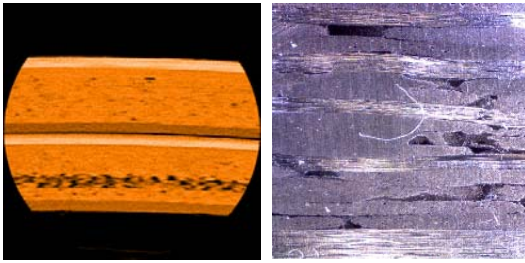


Fig. 8 Image of the Computed Tomography and the Video Microscope about Defect Specimen of the Composite Motor Case

4.2 검출 가능한 미접착 폭 예측

초음파시험으로 검출 가능한 최소 미접착 폭은 모의 결함 시편을 제작하여 측정하기가 곤란하기 때문에 FRP 층간분리 및 FRP/내열고무 미접착에 대해 삼중 매질에 대한 모델링을 하여 이론적으로 계산하고 예측하였다.

Figure 9는 에너지 보존의 법칙을 이용하여 삼중 매질에서 초음파의 반사율과 투과율을 나타낸 그래프로써, FRP 층간분리 및 FRP/내열고무 미접착의 폭이 $10 \mu\text{m}$ 인 경우는 99.9%가 반사될 것으로 예측되었으므로 FRP 층간분리 및 FRP/내열고무 미접착은 폭이 $10 \mu\text{m}$ 이상이면 초음파시험에서 검출될 수 있을 것으로 판단하였다 [3].

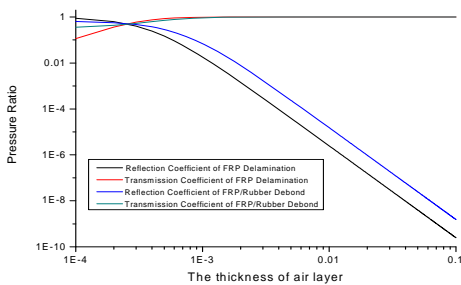


Fig 9. Expectation of Detectable Debonding Width about the FRP Delamination and FRP/Rubber Disbond Interface

5. 결 론

복합재 연소관의 초음파시험 데이터를 C-Scan 영상으로 변환하여 결함을 분석할 수 있는 프로그램을 개발하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 복합재 연소관 내부에 결함이 있으면 내열고무 저면 신호가 측정되지 않을 것이며, FRP 표면에서 결함까지 초음파가 진행할 때 소요되는 시간을 측정하면 결함 깊이를 측정할 수 있다.
- 2) 초음파 신호처리 기술을 적용하여 결함 분석 프로그램을 개발하면 복합재 연소관의 FRP 층간분리 및 FRP/내열고무 미접착을 정량적으로 검출할 수 있다.
- 3) 전산화 단층촬영 및 영상현미경 분석 결과를 통하여 복합재 연소관의 초음파 결함 분석 프로그램에 대한 결함 검출 능력을 검증하였다.

참 고 문 헌

1. S. A. Titov, R. G. Maev and A. N. Bogachenkov, "Pulse-echo NDT of Adhesively Bonded Joints in Automotive Assemblies", Ultrasonics, Vol. 48, 2008, pp.537-546
2. Hajian, M. Honarvar, F., "Reflectivity Estimation Using an Expectation Maximization Algorithm for Ultrasonic Testing of Adhesive Bonds", Materials Evaluation, Vol. 69, No. 2, 2011, pp.208-219
3. 김동륜, 류백능, "추진기관의 라이너/추진제 미접착 검출 기법 연구", 한국추진공학회지, 제 12권 제 2호, 2008, pp.40-47