

비접촉 초음파 탐상 기법을 이용한 항공기 브레이크 디스크의 신뢰성 평가

곽남수*, 김재열**,#, 고가진***, 박대광*

*조선대학교 대학원 첨단부품소재공학과, **조선대학교 기계시스템공학과,
***조선대학교 대학원 기계시스템공학과

Reliability Evaluation of Aircraft Brake Disk using the Non-contact Air-coupled Ultrasonic Transducer Method

Nam-Su Kwak*, Jae-Yeol Kim**,#, Jia-Chen Gao***, Dae-Kwang Park*

*Dept. of Advanced Parts and Materials engineering, Graduate School of Chosun UNIV.,

**Dept. of Mechanical System Engineering, Chosun UNIV.,

***Dept. of Mechanical System Engineering, Graduate School of Chosun UNIV.

(Received 28 January 2016; received in revised form 24 March 2016; accepted 30 March 2016)

ABSTRACT

Carbon fiber-reinforced silicon carbide (Cf-SiC) and SiC / SiC composites have high thermal conductivity, and excellent corrosion and wear resistance, a low coefficient for thermal expansion and are lightweight. This is why they are commonly used in parts of the aerospace industry to develop an aircraft thrust deflector, jet vane, combustion chamber, elevens, body flap, and a shingle. So, understanding how this state-of-the-art Cf-SiC affects both internal and external crack detection and determining issues during the manufacturing process of composite materials, should be evaluated according to valuation techniques in the external environment. In this paper, we apply a non-contact air ultrasonic technique of non-destructive testing techniques to perform a study on internal defect detection identification and assessment of carbon-fiber reinforced silicon carbide composites to perform basic research and applied research.

Key Words : Aircraft Brake Disk(항공기 브레이크 디스크), NAUT(비접촉 초음파 탐상 기법), Reliability Evaluation(신뢰성 평가)

1. 서 론

현재 국내외 항공우주산업은 대규모 시설 및 연구개발 투자가 필수적인 분야로서 세계시장의

70% 이상을 점유하고 있는 서방 선진국에서는 수출산업 및 첨단산업 육성, 자주국방, 국위선양 등의 명백한 목적을 가지고 국가주도로 추진하고 있는 산업이다^[1].

항공우주용 첨단 신소재인 발사체 노출 부분은 고온, 고압의 가스가 배출되는 부분으로 기존의 사용되는 금속제인 몰리브데늄, 탄탈륨 그리고 텅스텐 등은 gas stream에 의한 erosion 및 corrosion 저

Corresponding Author: jykim@chosun.ac.kr
Tel: +82-62-230-7035, Fax: +82-62-230-7035

항성이 날아 그 수명이 매우 짧기 때문에 이에 대한 저항성이 우수한 세라믹 소재가 대체소재로 개발 및 적용되고 있다²⁾.

탄소섬유강화 복합재료(CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastics)는 경량, 높은 무게비 강도 및 강성도, 열적특성, 전기적 특성, 내부식성, 내충격성, 피로특성, 부품 일체화의 용이성 등의 많은 장점을 가지고 있다. 이러한 특성을 바탕으로 탄소섬유강화 복합재료는 항공기용 부품소재의 경량화, 내부식성 및 충격, 진동 등의 성능 향상, 금형 가격의 절감 등을 위하여 구조물, 외장 부품과 같은 기구 부품 및 엔진부품 등에 적용하기 시작하여, 현재 그 사용량이 급격하게 증가하고 있는 추세이다. 또한 탄소섬유강화 복합재료는 내약품성, 화학적 불활성 및 생체 친화성이 매우 우수하여 다양한 분야에서 응용이 가능하다³⁻⁵⁾.

탄소섬유 복합재의 큰 비강도(specific strength)는 금속 재료에 비하여 상대적인 최적 운용압력을 증가시켜 주고 있다. 특히 분리 조각형(segment)보다는 단일 형으로 제작한 것이 효과적이다. 이러한 특성은 적당한 크기의 단일형까지는 탄소 섬유 복합재의 장점이다⁶⁾.

이러한 항공우주산업은 개발과 제작 기간에 장기간 소요되고 다양한 소재와 많은 부품이 사용되기 때문에 이에따른 신뢰성과 안전성이 요구되며 소재나 부품의 제작과정이나 운용중의 신뢰성과 안전성을 확보하기 위해 물리적 거동특성을 비파괴적 기법을 통하여 판별하고 평가할 수 있는 정량적 신뢰성 평가 기법에 관한 연구가 필수적이다.

본 논문에서는 탄소섬유 강화 탄화규소 복합재의 내부결함 검출 평가를 위하여 비접촉 공중 초음파 탐상기법(non-contact air-coupled ultrasonic testing method)을 적용한 정량적 비파괴 평가기법에 관한 연구를 수행하고자 한다.

2. 자동 탐상 화상장치

2.1 시스템의개요

본 시스템은 고감도 Air Probe, High power 초음

파 신호 처리용 PXI 고속디지털이저, 카운터 보드, Pulser Receiver, 주파수 필터가 장착된 Pre-amp 등으로 구성되어 있어 고속 대용량 디지털 데이터처리가 가능하며, 구형 Burst 파를 사용하여 고감도 송신 프로브와 수신 프로브를 통해 측정된 고체와 공기 간에 음향임피던스 차이를 Labview 기반의 DLL소스가 코딩된 측정 프로그램에서 디지털 신호 처리된 초음파 투과율로 재료의 내부 결함 크기 및 위치 등을 검출 할 수 있다. 또한 3축으로 구성된 정밀스테이지를 통하여 최대 600×600mm의 평면을 0.1~20mm pitch(0.1mm step), 1~500 mm/sec(1mm/sec step, resolution ±50μm)로 스캔하고 화상화가 가능하다.

탐상면에 결함이 있는 경우 결함 에코 높이에 대응하여 표시점의 휘도를 높인다. 컬러표시의 경우에는 색을 변화 시키고 결함 에코를 검출하기 위한 검사범위(탐상면으로 부터의 거리)를 게이트에 의해 이동시키거나 에코 높이 대신 결함 에코까지의 시간변화를 색별로 표시하면 탐상 면으로부터 일정 깊이마다 표시한 결함의 평면도(C-Scan)가 얻어진다. 본 시스템은 초음파탐상에서 A-scan 데이터를 이용하여 임의의 gate를 설정하고 peak level을 이미지화하는 C-scan방식의 원리를 사용하였다.

점집속탐촉자를 사용할 경우, 집속거리를 설정하여 결함 부분에 집중되므로 미세결함 검출과 동시에 선명한 고해상력의 화상 취득이 가능하다.

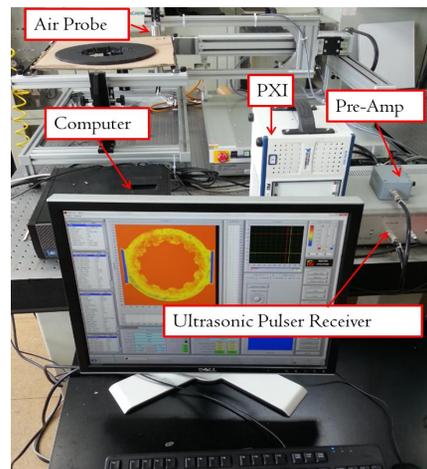


Fig. 1 Auto image scanning equipment

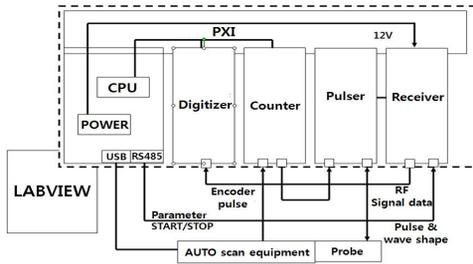


Fig. 2 Configuration of NAUT system using pulser receiver with PXI chassis combined

따라서 본 시스템은 기존에는 적용이 곤란했던 항공기, 자동차용 탄소섬유 복합재료의 박리 검사 등을 물 등의 접촉매질을 필요로 하지 않고 비접촉으로 검사하는 것이 가능하다. 자동 스캔 화상 장치는 Fig. 1와 같다. Fig. 2에서는 Pulser receiver를 이용한 NAUT시스템의 구성을 나타내고 있다.

2.2 초음파의 투과 및 반사이론

NAUT를 이용하여 탐상하는 경우, 공기 중으로 초음파가 시험편 표면에 수직으로 입사하게 되면 일부는 표면에서 수직으로 반사하고 나머지는 수직으로 투과한다. 이 때 초음파 에너지의 대부분은 표면에서 반사되고 일부만 투과하게 된다. 표면에서 음파의 반사량은 공기와 시험편의 음향 임피던스(acoustic impedance, Z)비에 의해 좌우되는데, 표면에서의 반사와 굴절현상은 초음파탐상 시험에서 결함 등의 검출에 있어 중요한 역할을 한다. 음향 임피던스 Z (kg/m^2s)는 초음파가 전파 되는 재료의 밀도 ρ 와 재료의 음속 V 의 곱, 즉 식(1)에서 나타내는 매질 고유의 값을 음향 임피던스라고 한

다^[7]. 또한 초음파는 두 매질간의 음향 임피던스(Z) 차이가 클수록 투과하기 어려워진다. 음향 임피던스는 서로 다른 재질에서의 음속 차에 기인하며, 음파의 진행을 방해하는 것을 의미한다^[8].

$$Z = \rho \cdot V \quad (1)$$

여기서 ρ :재료의 밀도

V :재료의 음속

Fig. 3은 두 매질의 경계면에서 초음파의 손실을 개략적으로 나타낸 것이다. 표면 A로 수직 입사되어 투과되는 초음파의 에너지 손실은 식(2)에 의해 나타낼 수 있다.

$$dB_{transmissionloss} = 10 \log_{10} \left[\frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \right] \quad (2)$$

그리고 표면 A에서 반사되는 초음파 신호의 에너지 손실은 식(3)에 의해 나타낼 수 있다.

$$dB_{reflectionloss} = 10 \log_{10} \left[\frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \right] \quad (3)$$

3. NAUT 자동 화상 탐상

3.1 시험편 준비

최근에서는 섬유제조방법을 다양화하여 제조되는 SiC 섬유의 크기와 형상을 조절함으로써 그 응용 분야를 개척하는 시도를 하고 있다.

한편 국내의 산업체 중, 대양산업에서는 국내 출연연구소와 방위산업체와 공동으로 피치 함침공정을 이용한 Cf-C 복합소재를 이용하여 군사용 로켓 노즐 개발을 시도하여 제품개발과 성능평가를

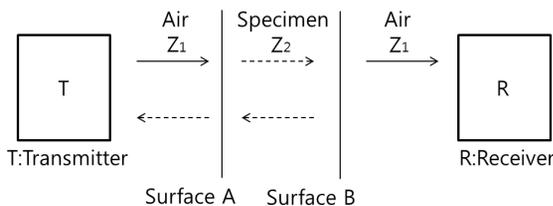


Fig. 3 Transmission losses at the air/specimen interfaces

수행한 바 있으며, 민간항공용 로켓 엔진 확대부 소재를 Cf-C 복합소재로 개발하여 성능평가를 수행한 바 있다.

또한 한국에너지기술원과는 정부사업에 참여하여 철강 진공침탄 열처리용 래디언트 튜브(radiant tube) 및 래디언트 버너 노즐용 Cf-SiC 복합소재 국산화 개발을 성공적으로 수행하였으며, 이 사업을 통해 LSI 공정을 이용한 Cf-SiC, SiCf-SiC 복합소재 생산을 위한 수지함침 시스템, 필라멘트 와인딩 시스템, 고온진공저항가열로, 고온 진동유도가열도 등의 기초장비를 구축하고 있다.

(주)DACC에서는 ADD, KARI 등의 연구기관 함께 군수용, 항공용 Cf-C 복합소재 제품을 개발하여 국내에서 가장 처음으로 상품화 한 기업으로 CVD 및 피치 함침 공정을 이용한 Cf-C 복합소재 제조기술을 확보하고 있다. 또한 1990년대 후반부터는 산학연 공동으로 탄소/탄소 복합체 개발을 수행해 왔으며, 10여간의 개발기간을 거쳐 현재, F-16 탄소/탄소 브레이크 디스크를 개발을 완료하여 한국공군 및 해외시장에 양산 공급 중에 있다.

이외에도 (주)DACC에서는 군수용 추진기관 내열 부품을 1990년대 초부터 연구개발 하였으며, 현재 제품의 양산화가 이루어진 상태이며, 2009년도 현대자동차/현대모비스와 공동으로 Cf-SiC 복합체를 재료로 하는 자동차용 브레이크 시스템 개발을 완료하고, 양산시스템을 구축하고 있다.

현재는 (주)DACC와 한국에너지기술연구원에서 ‘열보호용 내열 실리콘카바이드(SiC) 복합재료 및 경량화 기술’ 개발사업을 진행하고 있으며, 이 사업을 통해 우주 발사체 노즐용 탄화규소섬유 강화 탄화규소 복합소재 제조를 위한 원천기술 개발과 시제품 개발연구를 진행 중에 있다.

본 논문에서는 (주)DACC에서 개발한 항공기용 Cf-C 브레이크 디스크를 양산제품을 대상으로 비접촉 공중 초음파 탐상 기법을 적용한 비파괴 검사 기초 실험 및 응용연구를 수행하고자 한다.

비접촉 공중 초음파 탐상기법을 이용한 항공기용 Cf-C 브레이크 디스크의 C-Scan 모드 탐상을 위하여 정상시험편과 결함시험편을 제작하였다. Cf-C 브레이크 디스크 정상시험편 및 결함시험편의 제작 사항은 Fig. 4(a),(b)에 나타내었다. Fig. 5는 제작된

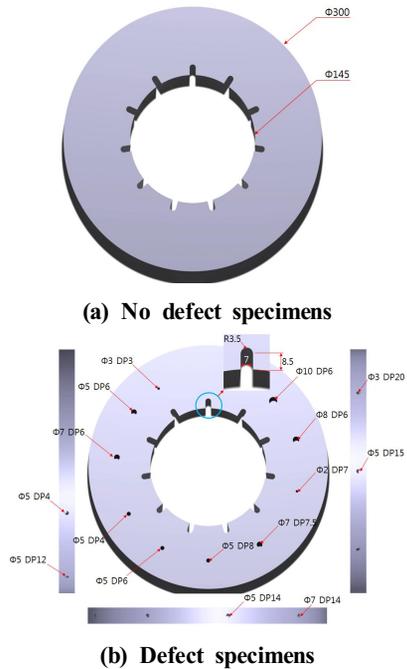


Fig. 4 Design of Cf-C brake disc specimens

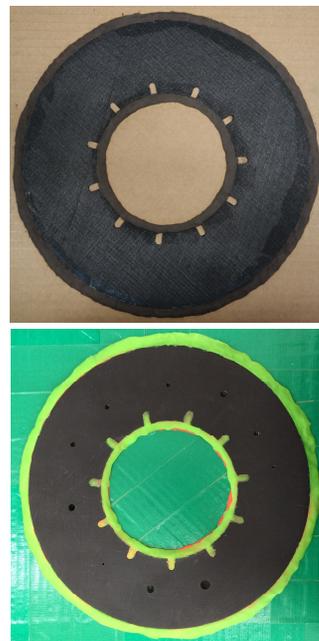


Fig. 5 Specimens of Cf-C brake disc

Cf-C 브레이크 디스크 정상시험편과 결함시험편의 실물을 나타내고 있으며, Fig. 5는 마스킹 후의 시험편을 나타내고 있다. 마스킹지를 부착하는 것은 비접촉 공중 초음파 탐상 시 입사된 초음파가 시험편의 표면을 따라서 초음파가 방출되는 현상이 발생되어지며, 이는 투과율 손실이 발생되어 고출력 감도를 갖는 송신 부 초음파 프로브가 결함 신호를 검출할 수 없게 되어 진다⁹⁾.

3.2 탐상 조건 및 실험 방법

브레이크 디스크의 화상탐상 수행에 앞서 Averaging count, Gain, Trigger mode 등과 같은 화상 탐상조건을 Table 1에 제시하였다.

실험 시, 비접촉 공중 자동 결함 scan 시스템을 이용한 결함 화상화 방법은 NI Controller 장치의 전원을 켜고 화상 S/W를 실행시킨 후 정밀스테이지 통신상태 설정, 디지털이저 세팅, Pulse Counter 세팅, 측정 조건 설정값을 입력한다. 실행 프로그램을 통해 원점복귀, 기준위치 이동 등을 수행하여 결함 화상 탐상 이전의 조건과 일치시킨다. Pulser Receiver 설정 화면에서는 구형Burst 투과 신호를 A-Scope 로 검출하기 위해서 Gain Frequency, Voltage, Wave Number, LPF, HPF, 등을 조정하고 측정 범위 설정 화면에서 측정 원점, 대각점, pitch, 속도 등을 설정하고 위와 같은 조건이 충족 되었을 때 화상 스캔을 수행하였다. 이와 같이 scan이 시작되면 송신 전압, 주파수, 파수, 화상 수 정위치, 수평시간, gate 위치를 통해 화상결과를 파악한 후 최종 화상을 취득한다.

3.3 탐상 결과 및 고찰

Fig. 6 (a), (b)는 초음파 송신 주파수 340kHz 일 때, 마스킹된 정상시험편의 C-Scan 결과 및 스캐닝 축인 x축에 대한 에코높이 신호를 측정하여 분석한 결과이다. Fig. 7 (a),(b)은 정상시험편의 초음파 송신 주파수 400kHz 일 때, C-Scan 결과 및 에코높이 신호 분석 결과이다.

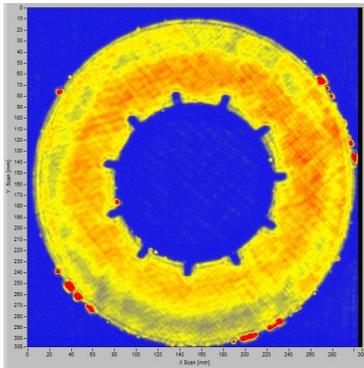
Fig. 8 (a),(b)는 초음파 송신 주파수 340kHz 일

때, 마스킹된 결함시험편의 C-Scan 결과 및 스캐닝 축인 x축에 대한 에코높이 신호를 측정하여 분석한 결과이다. Fig. 9 (a), (b)은 초음파 송신 주파수 400kHz 일 때, 마스킹된 결함시험편의 C-Scan 결과 및 스캐닝 축인 x축에 대한 에코높이 신호를 측정하여 분석한 결과이다.

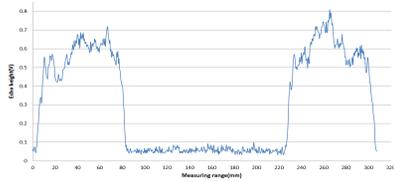
마스킹 되어진 시험편의 탐상실험은 인가되는 초음파 주파수 대역을 340kHz, 400kHz 설정하여 측정된 C-Scan 화상결과를 비교분석하였다. C-Scan 화상 결과 추출은 에코높이 측정을 통하여 컬러맵으로 표시된다. 투과율이 최고값을 갖는 부분은 적색(red), 투과율이 중간값을 갖는 부분은 노란색(yellow), 투과율이 최소값을 갖는 부분은 청색(blue)로 표시한다. Fig. 10은 본 시스템에서 구현하는 C-Scan 모드의 컬러맵 표시방법을 나타낸 것이다.

Table 1 Experiment of condition

Condition	No Defect Specimens	Defect Specimens
Velocity in TP(m/s)	340	340
Tx voltage(V)	300	300
Tx frequency(kHz)	340 / 400	340 / 400
Gain(dB)	22.9 / 30.1	31.1 / 36.4
Sampling frequency(MHz)	10	10
Scan speed(mm/s)	50	50
Scan pitch(mm)	0.5	0.5



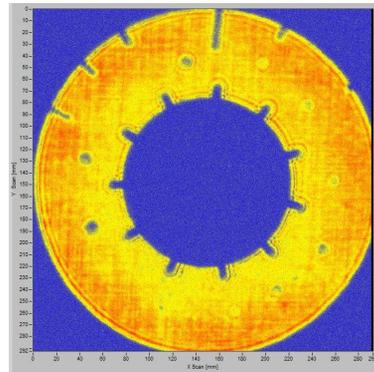
(a) Image of C-Scan mode



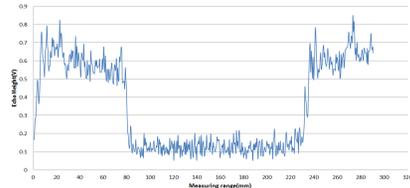
(b) Echo height in x-axes(scanning axes)

Fig. 6 Results of C-Scan inspection

(No defect specimens_masking_340kHz)



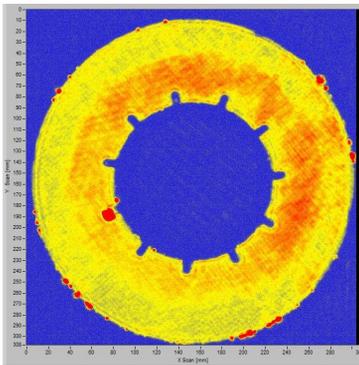
(a) Image of C-Scan mode



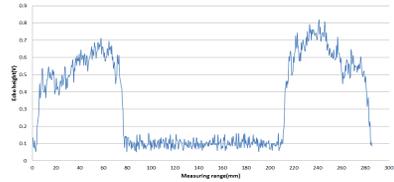
(b) Echo height in x-axes(scanning axes)

Fig. 8 Results of C-Scan inspection

(Defect specimens_masking_340kHz)



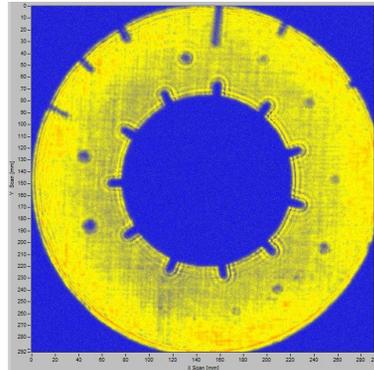
(a) Image of C-Scan mode



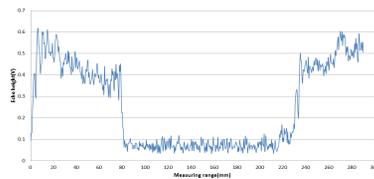
(b) Echo height in x-axes(scanning axes)

Fig. 7 Results of C-Scan inspection

(No defect specimens_masking_400kHz)



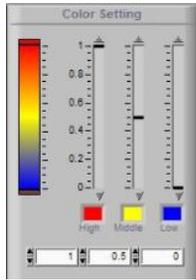
(a) Image of C-Scan mode



(b) Echo height in x-axes(scanning axes)

Fig. 9 Results of C-Scan inspection

(Defect specimens_masking_400kHz)



Color	Echo signal height
	1(Maximum)
	0.5(Midium)
	0(Minimum)

Fig. 10 Color map Display of C-Scan mode by echo signal

정상시험편과 결함시험편에 각각 340kHz 와 400kHz를 인가하여 비교 분석한 결과는 다음과 같다.

마스킹 작업을 통하여 초음파 에너지 방출을 억제시켜 마스킹 재료로 쓰인 접합판지부는 초음파 투과가 거의 이루어지지 않음을 알 수 있다. 따라서 정상시험편의 내·외측 단면형상 이 명확하게 탐상되었다. 하지만 클레이와 정상시험편 경계면 사이의 마스킹 접착불량으로 인해 공기층이 형성되어 초음파 투과율이 최고값을 가지게 되어 정상시험편의 외측과 내측부분에 적색부분이 검출되었다. 다시 설명하면, C-Scan의 화상처리를 위한 에코높이 신호를 측정하였을 때, 정상시험편의 경계면과 접합판지 사이에 기공부를 제거해주는 클레이가 정상 시험편 경계면 부근에 완벽한 접착이 되지 않아 제거되지 않은 기공부의 음향임피던스 차이가 크지 않으므로 높은 투과진폭이 형성된 것이다. 또한 정상시험편의 밀도차이에 의해서 에코높이 신호가 달라짐을 알 수 있다. 정상시험편의 외측부분의 경우는 에코높이 신호가 중간값에 분포하는 노란색을 나타내고, 내측부분의 경우에는 초음파 투과율이 높아 에코높이 신호가 최고값을 나타내므로 적색

분포를 보이고 있다. 이는 정상적인 초음파 투과가 진행되고 있음을 알 수 있다.

정상시험편의 경우, 초음파 송신 주파수 340kHz의 결과와 큰 차이점은 없지만 400kHz를 인가 시 초음파 빔이 단파장 성질이 강해지므로 초음파 빔 거리가 짧아지게 되어 수신부 탐촉자의 이득값 (gain)값을 증가시켜야 하므로 노이즈 발생이 커지고 송신부 진폭값이 불안정해지므로 HPF, LPF 등의 사용하여 진폭과 초음파 빔을 안정시켜야 하는 단점이 있다.

결함시험편 C-Scan탐상결과에서 확인할 수 있듯이 초음파 주파수 340kHz, 400kHz를 인가하였을 때 결함시험편의 인공결함부는 정상적으로 검출되었다.

Fig. 6 (b), Fig. 7 (b), Fig. 8 (b), Fig. 9(b)에서 볼 수 있듯이 340kHz 인가 할 때보다 400kHz 로 송신 주파수 인가 시, 수신되는 에코 높이 신호가 감소되고 있다. 따라서 탄소복합체의 Air-coupled transducer 타입을 이용한 초음파 탐상 시에는 340 kHz 대역내의 송신 주파수를 사용 하는 것이 초음파 감쇠 및 확산손실을 최소화 할 수 있으며 에코 높이 신호의 감소를 최소화 시킬 수 있다고 판단된다.

4. 결론

본 연구는 비접촉식 초음파 탐상 시스템을 이용하여 C-Scan 모드를 통한 항공기 브레이크 디스크의 내부결함 검출성능에 대한 연구를 수행하여 비접촉 공중 초음파 탐상기법의 유용성에 대해 고찰한 결과 다음과 같은 결론이 도출 되었다.

1. C-Scan 모드(평면화상) 비접촉 공중 초음파 탐상 실험을 통하여 Cf-C 브레이크 디스크의 단면 탐상 실험을 수행한 결과, Cf-C 브레이크 디스크의 인공 평면부 결함 $\phi 10mm$ 2개, $\phi 8mm$ 1개, $\phi 7mm$ 2개, $\phi 5mm$ 3개, $\phi 3mm$ 1개, $\phi 2mm$ 1개를 검출 할 수 있었으며, 인공 측면부 결함 $\phi 5mm$ DP4 1개, $\phi 5mm$ DP12 1개, $\phi 5mm$ DP14 1개, $\phi 7mm$ DP14 1개,

$\phi 5mm DP15$ 1개, $\phi 3mm DP20$ 1개를 검출할 수 있었다.

2. 탐상 시 $340kHz$ 인가 할 때보다 $400kHz$ 로 송신 주파수 인가 시, 수신되는 에코 높이 신호가 감소되고 있다. 따라서 탄소복합체의 Air-coupled transducer 타입을 이용한 초음파 탐상 시에는 $340kHz$ 대역내의 송신 주파수를 사용 하는 것이 초음파 감쇠 및 확산손실을 최소화 할 수 있으며 에코 높이 신호의 감소를 최소화 시킬 수 있다고 판단된다.

후 기

“본 논문은 한국연구재단의 지원으로 수행된 2015년도 기초연구사업 3차년도 연구결과임. (No.2013R1A1A2010421)”. 또한“ 이 논문은 2015년 교육부와 한국연구재단의 지역혁신창의인력양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (2014H1C1A1066959) ”.

REFERENCES

1. Kim, K. S. and Park S. J., “Technique Status of Carbon Fibers-reinforced Composites for Aircrafts”, *Elastomers and Composites*, Vol. 46, No. 2, pp. 118-124, 2011.
2. Bader, M. G., “6.01 The Composites Market” in *Comprehensive Composite Handbook*, Vol. 6 Design and Application, Ed. by A. Kelly and C. Zweben, Elsevier Science, 2000.
3. Mahieux, C. A., “Cost Effective Manufacturing Process of Thermoplastic Matrix Composites for the Traditional Industry: the Example of Carbon-fiber Reinforced Thermoplastic Flywheel”, *Composite structures*, Vol. 52, No. 3, pp. 517-521, 2001.
4. Ha, M. S., Kwon, O. Y., and Choi, H. S., “Improved Electrical Conductivity of CFRP by Conductive Nano-particles Coating for Lightning Strike Protection”, *Composites Research*, Vol. 23, No. 1, pp. 31-36, 2010.
5. Donnet, J. B. and Bansal, R. C., *Carbon Fibers*, CRC Press, 1998.
6. Lee, T. H., “Applications of Carbon Fiber to the Aerospace”, *KSPE Fall Conference*, pp. 511~514, 2011.
7. Poudel, A., Strycek, J., and Chu, T. P., "Air-coupled Ultrasonic Testing of Carbon-carbon Composite Aircraft Brake Disks," *Materials Evaluation*, Vol. 71, No. 8, pp. 987-994, 2013.
8. Takahashi, M., Hoshino, H., and Ogura, Y., "Development of Non Contact Air Coupled Ultrasonic Testing," *Proceedings of JSAE*, pp. 320-321, 2009.
9. I. K. Park, "Ultrasonic C-scan Technique for Nondestructive Evaluation of Spot Weld Quality", *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol.14, No.2, pp.112, 1994.