

論文

탄소/탄소 복합재 브레이크 디스크의 초음파 비파괴평가에 관한 연구

임광희* · 정현조** · 양인영***

A Study on the Ultrasonic Nondestructive Evaluation of Carbon/Carbon Brake Disks

Kwang-Hee Im*, Hyunjo Jeong** and In-Young Yang***

ABSTRACT

It is desirable to perform nondestructive evaluation (NDE) to assess material properties and part homogeneity for carbon/carbon (C/C) composites because the manufacturing of C/C brake disks requires complicated and costly processes. In this work several ultrasonic techniques were applied to carbon/carbon brake disks for the evaluation of spatial variations in material properties that are attributable to the manufacturing process. In a carbon/carbon brake disk manufactured by a combination of pitch impregnation and CVI (chemical vapor infiltration method), the spatial variation of ultrasonic velocity was measured and found to be consistent with the nonuniform densification behavior in the manufacturing process. Low frequency (5 MHz) through-transmission scans based on both amplitude and time-of-flight of the ultrasonic pulse were used for mapping out the material property inhomogeneity. These results were compared with those obtained by dry-coupling ultrasonics. A good correlation was found between ultrasonic velocity and material density on a set of small blocks cut out of the disk. Pulse-echo C-scans at higher frequency (25 MHz) were used to image near-surface material property anomalies associated with certain steps in the manufacturing process, such as the placement of spacers between disks during the final CVI.

초 록

탄소/탄소 복합재료는 일반적으로 다단계의 제조과정과 고가의 제작비용이 요구되며, 재료성질과 한 부품 내에서의 성질의 균질성을 파악하기 위하여 비파괴평가를 실시하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 탄소/탄소 브레이크 디스크의 제조과정 중에 발생할 수 있는 재료의 공간적인 불균질성을 평가하기 위하여 다수의 초음파 기법을 적용하였다. 피치함침과 CVI 방법에 의해 제작된 탄소/탄소 브레이크 디스크에서 초음파 속도의 공간적인 변화를 측정하였으며 그 결과는 제조과정중의 불균일한 밀도화와 잘 일치하였다. 저주파수(5MHz), 투과법에 의한 초음파 펄스의 진폭 및 주행시간 스캔을 수행하여 재료성질의 불균질성을 평면지도로 나타내었다. 또한 이 결과를 건식 접촉법으로 측정한 결과와 비교하였다. 디스크로부터 일련의 작은 시편들을 절단하여 각각 초음파 속도와 밀도를 측정하였으며, 이들 사이에는 좋은 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 고주파수(25MHz), 펄스에코 방법에 의한 C-스캔을 실시하여 제조과정 중의 특정 단계(예를 들

* 조선대학교 수송기계부품 공장자동화 연구센터

** 부산대학교 기계공학부

*** 조선대학교 기계공학부

면 최종 CVI 과정에서 디스크 사이에 스페이서 설치하기)와 관련하여 발생하는 디스크 표면 근처에서의 재료성질의 불균질성을 탐지할 수 있었다.

1. 서 론

탄소/탄소(Carbon/Carbon : 이하 C/C라고 한다.) 복합재는 탄소섬유와 탄소매트릭스로 이루어져 있기 때문에 열에 대한 안정성이 뛰어나고 마찰 및 마모특성이 우수하며 또한 고온에서 내열성이 요구되는 구조물응용에 적합하고 금속재료에 비해서 대략 40% 정도의 중량을 감소 시킬 수 있는 선진재료이다. 따라서 구조경량화 및 고온에서 강도가 요구되는 우주·항공분야의 로켓노즐, 제트엔진의 부품, 우주선의 고온 구조물, 브레이크 디스크, 엔진 피스톤 등의 고온구조용 재료로 널리 사용되고 있다.

특히, C/C 복합재료는 그 대표적인 응용예로서 항공기 디스크 브레이크를 들 수 있다. 강재(steel) 브레이크 디스크와 비교할 때, C/C 브레이크를 사용함으로써 경량화 뿐 만 아니라 이차록 횡수를 약 2배이상 증가 시킴으로서 경제적인 운용이 가능하다[1]. 이러한 이유로 항공기용 브레이크 제작회사에서는 C/C 복합재를 이용하여 브레이크의 고정판(stator) 및 회전판(rotor) 등을 제작하고 있다[2,3]. 그러나 C/C 복합재료의 제조과정은 고온열처리 함침/탄화과정, CVI 및 CVD 등의 다단계의 제조과정이 필요로하기 때문에 FRP같은 종래의 복합재료와의 제조과정에 비해 대단히 복잡하다. C/C 복합재료 제조과정은 프리폼(preform)을 제작하고, 이렇게 제조된 프리폼을 탄화(carbonization) 공정, 그리고 고온열처리 함침 및 탄화공정이 반복되고, 고밀도화를 위한 CVI(chemical vapor infiltration)공정 등으로 나눌 수 있다. 이러한 다단계의 제조과정으로 인해 질량손실이나 수지의 수축 등으로 인해 보이드와 크랙이 발생한다. 이로 인해 재료내부의 물성치를 크게 변화시킬 수 있다. 특히, 항공기 브레이크는 다양한 성능인 높은 열용량, 우수한 고온강도, 열충격저항, 파단신율, 마찰, 마모특성, 고열전도성 등을 요구한다. 이와같은 제품의 특성은 재료내부의 밀도 또는 탄성계수와 같은 성질의 균질성에 의해 좌우되므로 이들 성질의 검사, 특히 비파괴적 검사/평가(NDE)가 필수적이라고 할 수 있다. 특히 초음파는 재료내부의 결함이나 성질의 불균질성에 민감하게 반응하므로 초음파 비파괴 검사가 적합하다. 또한 초음파의 전파속도는 재

료의 탄성계수와 밀도와 직접적인 상관관계가 있다. Kline[4] 등은 C/C 복합재료의 불균질성이 기계적 성질에 미치는 영향을 유한요소법을 이용하여 수행하였으며, Chang[5] 등은 탄화/흑연화공정에 따라 동적 기계적 성질을 조사하였으며, 또한 Moore[6] 등은 C/C 복합재료 제조과정동안 불균질성을 비파괴 기법을 이용하여 모니터링할 수 있는 기술의 유효성을 나타내주었다. C/C 복합재료의 제조공정에 따라 기계적성질 및 불균질성 등을 조사하고있지만, 재료의 두께 및 면내방향에 따라 초음파속도 및 밀도의 상관관계를 정량적으로 평가한 사례는 찾아보기 힘들다.

따라서 본 연구에서는 완제품 C/C 브레이크 디스크를 검사하기 위하여 여러 가지 초음파 NDE 기술[7,8]이 적용이 되었다. 먼저 브레이크 디스크에 재료의 균질성을 검사하기 위하여 물속에 검사체를 넣고 초음파 펄스를 이용하여 투과법(through-transmission)으로 진폭(amplitude)모드 및 주행거리모드인 C-스캔 방법을 사용하였다. 또한 두께방향 및 면내방향의 초음파 종파속도를 측정하기 위하여 건식 접촉법(dry-coupling method)을 사용하였다. 이 방법으로 접촉매질로 인한 측정오차를 최소화 줄일 수 있으며, 또한 접촉매질이 시험체내부를 오염시키는 것을 방지할 수 있다. 사용된 건식 접촉 트랜스듀서는 그 끝이 얇은 고무로 되어있어 접촉매질을 대용하고 있다. 디스크의 미세구조, 밀도변화 및 초음파 속도 사이의 상관관계를 구하기 위하여 디스크의 반경방향으로 몇 개의 블락으로 시편을 절단하여 아르키메데스 방법으로 밀도를 측정하고 단면의 조직을 광학현미경으로 관찰하였다. 또한 펄스 반사법에 의한 초음파 C-스캔을 사용하여 디스크의 표면 바로 아래의 미소 불균질성까지도 탐상하였다.

2. 실 험

2.1 C/C 복합재료 제조방법

C/C 복합재료 제조방법은 세라믹 제조방법과 유사하다. 탄소직물(carbon fabric)과 절단된 섬유(chopped carbon fibers)가 성형과정인 탄화과정동안 프리커서(precursor)로 작용하는 콜타르피치(coal tar

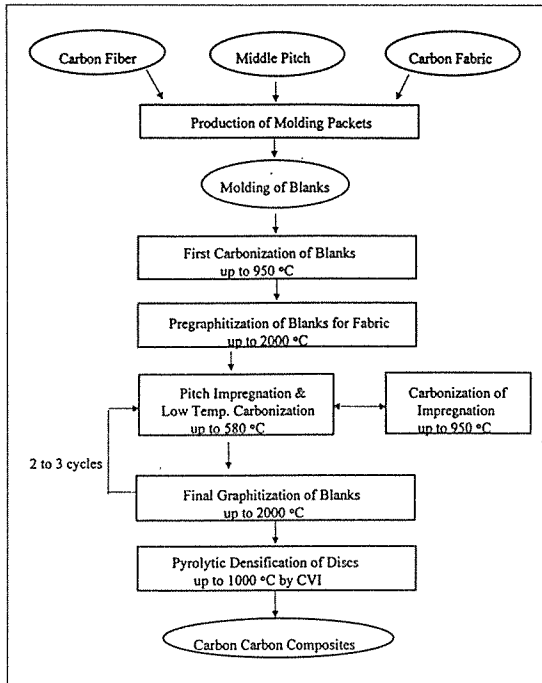


Fig. 1. Schematic of carbon/carbon composite fabrication

pitch)와 조합이다. 이때 콜타르 피치(coal tar pitch)와 절단된 섬유 이용하는 경우에는 어느 정도의 수축을 감소를 시킬수 있으나 탄소재료의 제조중에 대표적인 취약점은 탄화공정중에 프리커서(precursor)의 질량손실과 수축이다. C/C 복합재료의 제조과정은 Fig.1에 나타냈다. 우선 제조과정은 콜타르 피치(coal tar pitch)를 탄소섬유에 함침을 하여 경화시킨후에 모olding을 한다. 약 950℃에서 탄화공정을 걸쳐, 약 2,000℃에서 흑연화 및 고온열처리 함침 및 탄화공정이 수차례반복되었다. 그리고 기계적인 물성치를 더욱 향상시키기 위하여 CVI (chemical vapor infiltration)제조기법이 적용되었다.

2.2 시험편 형상

본 연구에서 이용된 C/C 브레이크 디스크[9]는 직물플라이(cloth plies)와 절단된 섬유(chopped fiber)로 이루어졌으며, 피치함침(pitch impregnation)과 제조과정마지막 단계에서 CVI (chemical vapor infiltration)방법으로 밀도가 강화된 디스크의 크기는 두께가 17 mm, 외경이 322 mm, 내경이 135 mm 인 링모양으로 이루어졌다. 이때 브레이크 디스크를 수중 C-

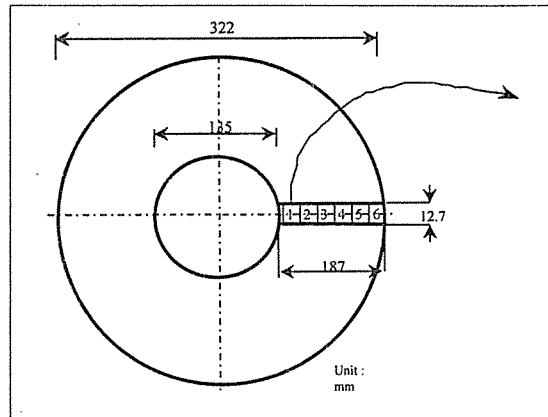


Fig. 2. Dimensions of the brake disk and location of the six small cut-out pieces on top view of a C/C brake disk

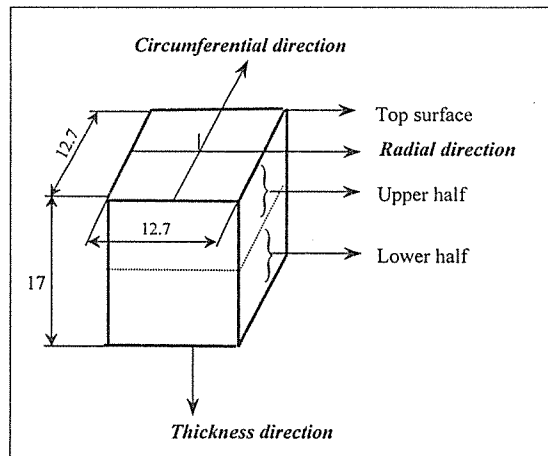


Fig. 3. Direction configuration for small cut-out piece from C/C brake disk

스캔 하였으며 또한 접촉매질을 사용하지 않은 건식접촉법[10]인 트랜스듀서로 속도측정을 하였다. Fig.2와 같이 디스크의 일부분을 반경방향으로 6개의 블락으로 절단하였다. 각블락의 크기는 12.7×12.7×17mm (가로×세로×높이)이다. 그리고 Fig. 3과 같이 6개의 블락을 C/C 브레이크 디스크의 상면에서 두께방향(thickness direction), 반경방향(radial direction) 및 원주방향(circumferential direction)으로 구분하여 나타냈다.

2.3 NDE 기법

초음파 C-스캔이미지는 품질관리와 신뢰성 등을 부여하기 위하여 재료의 불균질성을 해석하는데 유용한

NDE기법이다. 초음파 측정방법은 Fig.4 와 같이 펄스에코우 모드방법과 투과법 모드방법이 수침조내에서 모두 행해졌다. C-스캔장비는 시험편의 전면과 배면의 에코우를 진폭과 주행거리의 모드를 이미지로 나타낼 수 있다. 이때 진폭변화를 그레이상과 칼라상으로 하여 비디오상에서 0에 250까지 나타낼 수 있다. 시험편의 피크 대 피크의 초음파 진폭과 주행거리모드는 재료의 강성과 전도성과 같은 물리적인 재료의 물성치에 영향을 미치는 밀도, 미소구조 및 보이드의 성질에 상관관계를 맺고 있다.

C/C 브레이크 디스크를 고밀도화를 시키기위하여 CVI공정이 이루어졌다. 이 공정중에 여러개의 디스크를 한 번에 적층하여 고밀도화를 시키기 때문에 디스크사이에 튜브모양인 스페이서바가 사용되었다. 이로 인해 브레이크 디스크의 표면에 미소자국(anomalous regions)을 C-스캔으로 관찰하기 위하여 주파수가 10-25MHz 트랜스듀서가 사용되었다. 이 트랜스듀서는 시험편의 표면과 수직탐상 하였으며 모델명이 5052PR의 펄서/리시버가 이용이 되었다. 최초의 펄스 후에 RF파형을 피크 대 피크를 이용하여 C/C 브레이크 디스크를 주사하였다. 주사된 이미지는 보다 나은 이미지를 얻기위해 소프트웨어인 이퀄라이저를 이용하여 처리를 하였다. 또한 브레이크 디스크의 내부에는 수차례의 탄화 및 함침공정과 흑연화공정으로 인해 미소보이드가 존재하며, 이러한 보이드는 재료의 강도 및 강성에 크게 영향을 미친다.

본 실험에서는 C/C 브레이크 디스크의 보이드로 인해 산란의 영향을 최소화하기 위하여 수침내에서 저주

파수인 1-5MHz 트랜스듀서를 투과법으로 주사하였으며, 또한 C/C 브레이크 디스크의 면내방향의 섬유종류에 의한 영향을 고려하기 위하여 C-스캔이미지를 나타냈다.

2.4 속도측정

접촉매질을 사용하지 않은 건식법[10]인 드라이커플링 트랜스듀서가 C/C 브레이크 디스크의 두께방향, 원주방향 및 반경방향의 원하는 측정위치에서 초음파속도를 측정하기 위하여 이때 드라이 커플링 트랜스듀서(KD50-1, Ultrat Lab.)가 이용되었다. C/C 브레이크 디스크가 절단된 섬유 및 직물 등으로 구성되어졌기 때문에 감도가 높고 투과력이 우수한 대역이 좁은 초음파펄스 트랜스듀서를 이용하여 시험편의 초음파속도를 측정하였다. 본 실험에는 Fig. 5와 같이 직접접촉식인 평면형 트랜스듀서가 이용이 되었다. 이 트랜스듀서는 파나메트릭스사의 5052PR인 스파이크 전압펄서/리시버를 이용하여 초음파를 발생시켰다. 시험편에 의한 RF 파형을 오스로스코프상에서 잡고 저장하였다. 이 오스로스코프상의 2개의 에코우파는 독립적으로 이동 및 확장이 가능하다. 그리고 스크린상에서 에코우파를 확장, 전환, 저장 및 변형하여 측정하는데 매우 편리하다. 이때 초음파속도를 구하기 위하여 Fig. 6 에서와 같이 먼저 시험편과 유사한 파형을 갖은 기준판의 주행거리를 측정하고 그리고 기준판과 시험편을 함께 주행거리를 측정한다. 이때 기준판과 시험편의 주행거리에서 기준판의 주행거리를 빼서 시험편의 두께를 이 주행거리로 나누어서 초음파속도를 측정하였다. 이때 주행거리를 구할때는 Fig. 7과 같이 펄스중첩법을 이용하여 구하였다.

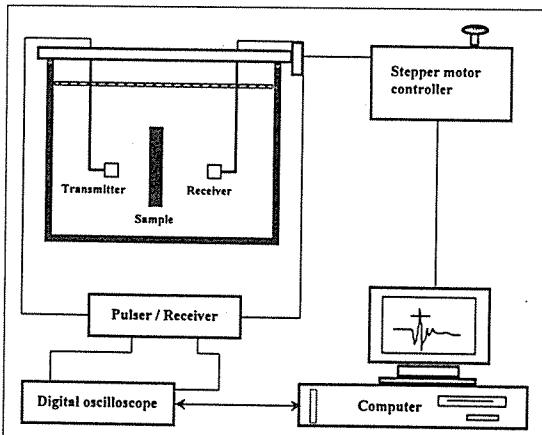


Fig. 4. Experimental setup for through-transmission scan mode in immersion tank

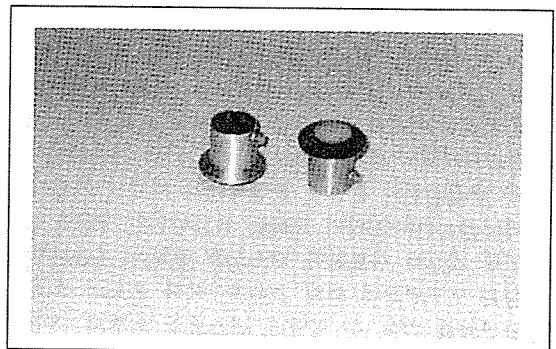


Fig. 5. Dry-coupling transducers for ultrasonic velocity (12.7mm in dia. 1MHz)

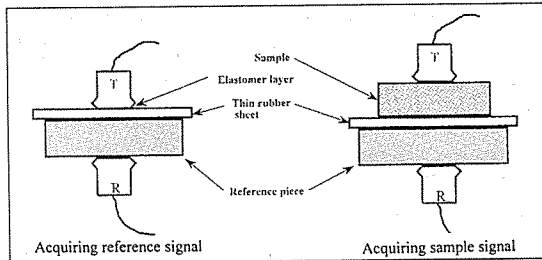


Fig. 6. Velocity measurement method using dry-coupling transducers. The transducers are 12.7 mm in diameter with an elastomer face layer and have a center frequency of 1MHz.

2.5 밀도 측정

초음파결과에 신뢰성을 부여하기 위하여 C/C 브레이크 디스크의 C-스캔 이미지의 진폭 및 주행거리의 모드변화가 가장 심한 3시방향의 부분을 12.7×12.7×17mm의 6개의 블락으로 다이몬드커터를 이용하여 절단하였다. 6개의 블락을 밀도를 측정하기 위하여 아르키메데스방법인 정밀전자저울 (Sartorius analytic balance, A200S, 1/10,000g)로 무게를 구하여 밀도를 구하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 C-스캔 이미지

C/C 브레이크 디스크를 이용하여 투과법인 C-스캔 이미지인 진폭 및 주행시간모드를 Fig.8에 나타냈다. 진폭모드 이미지에서 외경과 내경가장자리 근방에서는 진폭이 크게 나타났고 외경과 내경중앙부에는 다소 낮게 나타났다. 또한 주행시간은 외경과 내경의 가장자리 근방에서 낮게 나타났으며 외경과 내경중앙부에는 크게 나타났다. 이는 C/C 브레이크 디스크의 두께방향의 진폭 및 주행시간의 모드가 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. C/C 브레이크 디스크의 가장자리의 높은 진폭모드 이미지는 브레이크 디스크의 넓이(94mm)가 트랜스듀서의 지름(6.35mm)의 약 15배 가량되기 때문에 반경방향의 진폭과 주행시간의 차이는 가장자리 효과(edge effect)라기 보다는 재료성질의 불균질성에 기인한 것으로 사료된다. 디스크를 통하여 초음파투과 거동은 밀도변화에 의해 초음파감쇠와 속도의 변화와 상관관계를 찾을 수 있었다. 디스크의 외경과 내경의 가장자리 근방부분을 파괴해석에서 나타냈듯이 밀도가 높게 나타났으며 다소 보이드양(void content)이 낮다

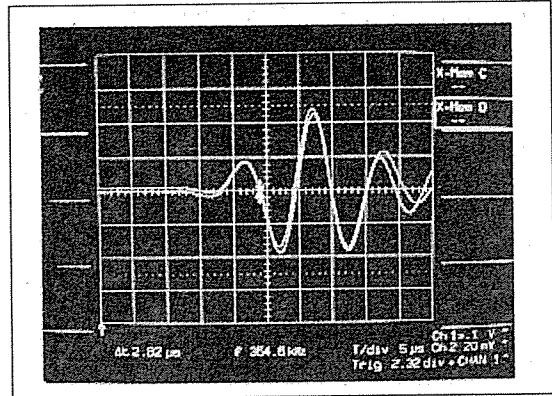


Fig. 7. The pulse-overlap method applied to C/C composites

고 생각되며 초음파감쇠는 낮게 나타났으며 속도는 높게 나타났다. 외경과 내경사이의 중앙부는 가장자리 영역과는 달리 밀도가 낮게 나타났으며 (보이드양이 높게 나타남) 그 결과 감쇠가 높아 속도가 낮게 나타났다 [11]. 이원인은 C/C 브레이크 디스크의 고밀도화 주요 공정인 피침침(pitch impregnation) 및 CVI 공정중에 디스크의 내경과 외경의 가장자리를 따라 고밀도화가 효과적이기 때문에 가장자리근방에 있는 영역은 외경과 내경중앙부에 있는 영역보다 고밀도화가 C/C 복합재료의 밀도에 영향을 미쳤기 때문이라 사료된다. Fig. 8 은 방사성방향의 C/C 브레이크 디스크의 불균질성을 보여주고 있다. 만약 시계방향 5시와 11시 방향으로 선을 따라서 디스크의 왼쪽부분은 오른쪽부분보다 밀도화가 높게 나타났다. Fig. 9 는 C/C 브레이크 디스크로부터 절단된 6개 블락의 면내의 반경방향과 원주방향으로 진폭과 주행거리의 모드를 C-스캔 이미지로 나타냈다. Fig.9 의 너버링(numbering)은 C/C 브레이크 디스크의 절단위치와 같다. 전술수침 투과법에 의한 UT 결과의 진폭모드는 면내방향의 6개의 블락의 반경방향 및 원주방향 모두 하단부분이 높게 상단부분에 비해 높게 나타났다. C/C 복합재료 브레이크 디스크의 두께방향의 내경 및 외경의 가장자리 부근이 감쇠가 적어 진폭모드가 높게 나타나서 주행거리가 짧게 나타나지만, 면내방향에서는 특히 하단부분이 감쇠가 낮고 진폭모드가 높게 나타났지만 주행거리 모드에서는 두께방향과는 반대현상이 나타났다. 또한 6개의 블락의 면내방향-상단부분을 관찰하면 약간의 진폭모드가 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 일부분의 상단과 하단부분은 Fig. 10과 같이 광학현미경으로 관찰한 결과 절단된 섬유와 직물로 이루어졌다. 이때 광학현미경에 의

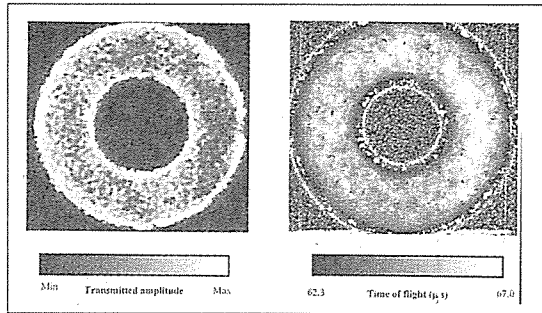


Fig. 8. Carbon/carbon brake disk images showing amplitude and time-of-flight variations. Displayed are peak-to-peak amplitude and time-of-flight of through-transmission signal. Transmitter and receiver are 5MHz, 6.35 mm in diameter and no focus transducer. Scan areas were 330×330 mm

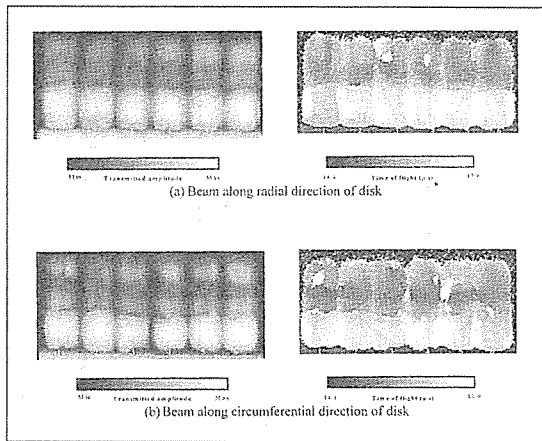


Fig. 9. Amplitude and time-of-flight images of six cut-out pieces showing nonuniformity in thickness direction. Transmitter and receiver are 5MHz, 6.35 mm in diameter and no focus transducer. Scan areas were 100×28 mm

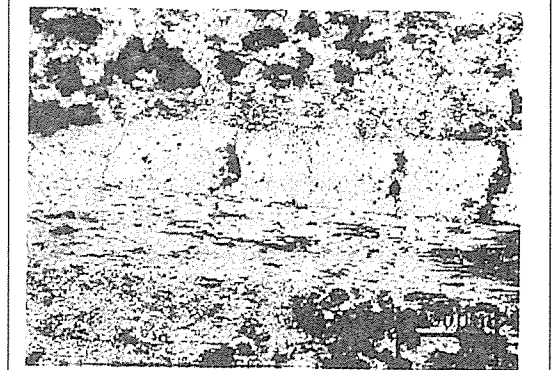
한 적층구조를 보면 일부분의 상단부분과 특히, 하단부분이 절단된 섬유로 이루어졌다. Fig. 10과 같은 침습유의 상대비율이 감쇠 및 속도에 영향을 미쳤다고 생각된다. 다시말해 면내방향에 있어서는 섬유종류에 의해서 C-스캔의 진폭모드 및 주행거리모드는 의존한다고 사료된다.

3.3 파괴해석

C/C 브레이크 디스크의 밀도변화가 외경과 내경의 가장자리에서 피치함침과 CVI 공정이 가장효과적으로 이루어지고 외경과 내경중앙부는 덜 효과적이기 때문이라고 생각되며 또한 C/C 브레이크 디스크의 초음파 감쇠와 속도의 변화의 원인이 되었다. 따라서 C/C 브



(a) Chopped fiber



(b) Typical pores

Fig. 10. Optical micrographs of one of the cut-out pieces

레이크 디스크의 불균질성을 나타내기 위하여 링모양인 디스크의 시계방향의 3시방향으로 6개의 작은 블락으로 절단하였다. Fig. 2 에서 표시한대로 블락 1~6은 각각 무게를 정밀 전자저울로 측정하여, 즉 아르키메데스 방법으로 밀도를 계산하였다. 6개의 블락의 밀도를 비교해보면 내경과 외경의 가장자리는 내경과 외경사이의 중앙부분보다 밀도가 대략 6%정도가 높게 나타났다. 이는 C/C 브레이크 디스크의 주요 제조공정과정인 피치함침과 CVI 공정과정중에 외경과 내경의 가장자리를 따라서 크게 고밀도화가 더욱 효과적이었다고 사료된다.

3.2 건식접촉법에 의한 속도측정

Fig. 11과 같이 원하는 측정위치 24포인트에서 C/C

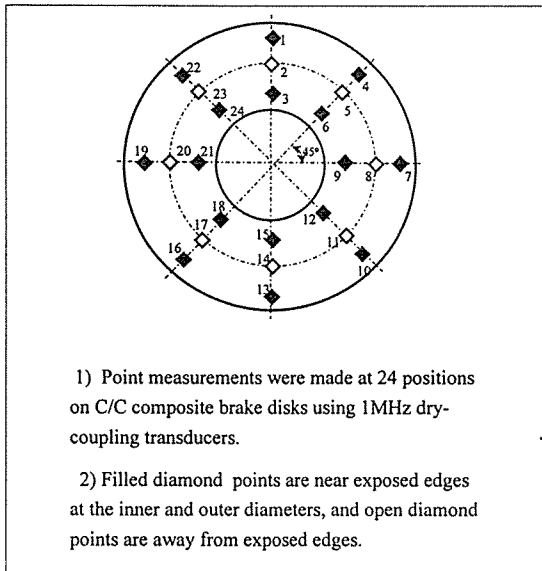


Fig. 11. Positions for velocity measurement using dry-coupling transducers

브레이크 디스크 두께방향의 종파속도를 측정하였다. 디스크의 외경과 내경가장자리 근방에 있는 측정위치는 채워진 다이아몬드형으로 나타나냈으며 외경과 내경중앙부분에는 초음파 속도측정위치는 빈 다이아몬드형으로 나타냈다 (Fig.12 에서도 같은 모양으로 나타냄). 측정된 초음파 속도는 1.63 mm/μs에서 1.82 mm/μs까지 다양하게 나타났다. Fig.13에는 속도와 위치는 일정한 패턴을 나타내주고 있다. 외경과 내경사이의 각위치의 속도는 외경과 내경근방의 영역의 속도보다 낮게 나타났다. 특히, 파괴해석에 의한 밀도변화에 따라 초음파속도를 증가함을 알 수 있었다. 이 속도측정횟수는 3번반복하였으며 Fig. 12의 범례는 3번 반복 속도측정을 나타냈다. 그리고 Fig. 14는 C/C 복합재료 브레이크 디스크의 C스캔의 진폭모드 및 주행거리모드의 기록이 제일 심한부분인 3시방향부분에 절단된 6개의 블락을 각각 면내방향의 상단 및 하단의 부분을 건식법인 트랜스듀서를 이용하여 초음파 속도를 나타냈다. C/C 브레이크 디스크의 두께방향의 초음파속도와는 달리 진폭모드가 높은 부분인 침입유로 대부분이 구성된 하단부분이 오히려 높게 나타났다. 또한 상단부분은 약간의 침입유만 있으며 대부분의 직물로 이루어졌다. 이 부분은 초음파속도가 하단부분에 비해 높게 나타났다. 이는 C/C 복합재료의 브레이크 디스크의 6개의 블락으로부터 면내 반경방향 및 원주방향의 초음

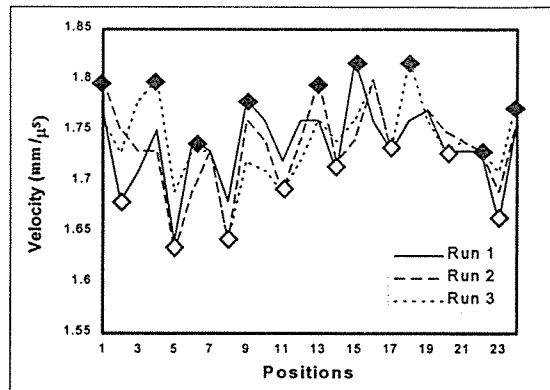


Fig. 12. Relationship between velocities and measurement positions on C/C composite brake disk

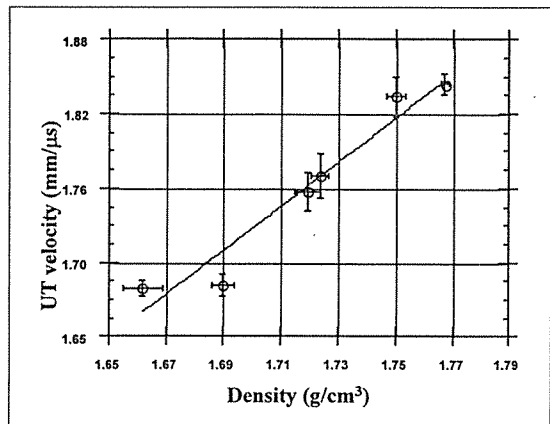


Fig. 13. Relationship between density and velocity variations for six cut-out pieces from C/C composite brake disk

파속도는 재료의 밀도에 의존하지않고 침입유와 직물의 함유량 즉, 섬유종류 및 보이드양에 의존한다고 사료된다.

3.4 표면불균질성의 관찰

전물 수침투과법 초음파스캔은 전체의 두께에 대해 전체적인 재료성질을 나타내주고 있지만, 표면에 있는 아주 미세한 결함은 나타내지 못하고 있다. 따라서 표면에 있는 아주미소한 재료의 성질을 찾기위하여 시험편 전면 에코우방법[12]을 이용하여 진폭모드를 적용할 수 있었다. Fig.15에서 나타낸바와 같이 이미지를 보면 디스크표면위에 일정한 간격으로 이루어진 4개의 튜브모양인 링을 찾을 수 있다. 이것은 CVI과정중에서 디스크가 일렬로 쌓을 때 간격을 유지하기 위한

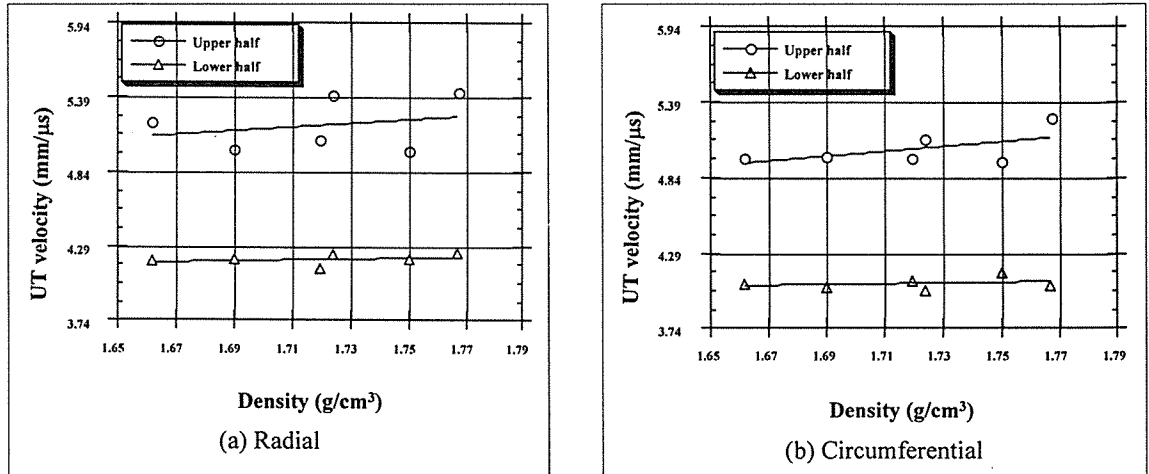
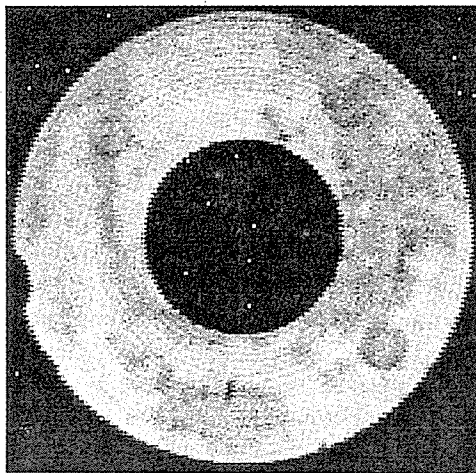
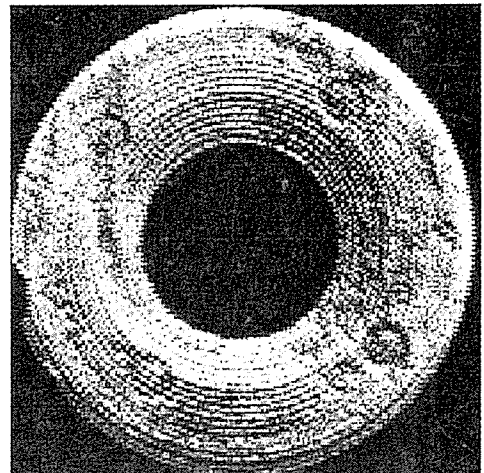


Fig. 14. Ultrasonic velocity of the six cut-out pieces in the radial and circumferential direction



Transducer : 10MHz, 6.35mm dia. and no focus



Transducer : 25MHz, 6.35mm dia. and no focus

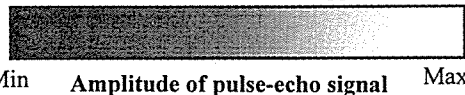


Fig. 15. Image shows four circular anomalous regions due to the placement of tubular spacers between disks during CVI process. Displayed is peak-peak amplitude of front echo. Scan area is 330 × 330 mm

스페이셔바가 이용이 되었기 때문이다. 그리고 시험편의 두께와 감쇠로 인하여 저면 에코우방법으로 진폭 및 주행거리의 C-스캔 이미지로 나타낼 수 없었으며 또한 접촉형 트랜스듀서를 이용하였으나 C/C 복합재료의 거친표면과 초음파의 산란으로 인해 에코우파에 영향이 미쳤다고 사료된다.

4. 결 론

C/C 브레이크 디스크 내부의 재료의 불균질성을 검사하기 위하여 여러 가지의 초음파 비파괴 검사하기 위하여 여러 가지의 초음파비파괴 검사 기법을 적용해 본 결과 수침법과 건식 접촉법이 효과적인 것으로 나타났다. 수침투과법에 의한 C-스캔을 수행하므로써 브레이크 디스크의 반경방향과 원주방향에 대하여 정성

적인 결과를 얻을 수 있었다. 접촉매질을 사용하지 않는 건식 접촉식 트랜스듀서로 펄스 반사법을 사용하여 두께 방향의 속도를 측정하여 C-스캔 이미지와 재료내부의 밀도변화 사이의 상관관계를 얻을 수 있었다. 디스크의 반경방향으로 측정된 초음파 감쇠와 속도 사이에는 일정한 관계가 있었으며, 이 변화는 파괴해석을 통하여 규명하였듯이 밀도변화에 기인한 것으로 사료된다. 브레이크 디스크는 외경과 내경의 가장자리부분이 초음파 감쇠가 작고 속도가 빨라 이 부분의 밀도가 상대적으로 높다는 것을 알 수 있었다. 면내방향에 있어서는 초음파속도는 밀도에 의존하지 않고 섬유함유량 및 보이드양에 의존하였다. 또한 표면 스캔을 통하여 제조과정에서 유발된 미소결함을 탐지할 수 있었다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 지정 우수지역협력연구센터인 조선대학교 수송기계부품 공장자동화 연구센터 사업인 1997년도 Post-Doc. 연수 연구비에 의해 지원되었음.

참 고 문 헌

- 1) Awasthi, S. and Wood, J. L., "C/C Composite Materials for Aircraft Brakes," *Advanced Ceramic Materials*, Vol. 3, No. 5, 1988, pp. 449-451.
- 2) Buckley, J. D., "Carbon-Carbon, An Overview," *Ceramic Bulletin*, Vol. 67, No. 2, 1988, pp. 364-368.
- 3) Fitzer, E., "The Future of Carbon-Carbon Composites," *Carbon*, Vol. 25, 1987, pp.163-190
- 4) Kline, R. A., Cruse, G., Striz, A.G. and Madaras, E. I., "Integrating NDE-Derived Engineering Properties with Finite Element Analysis for Structural Composite Materials," *Ultrasonics*, Vol. 31, No. 1, 1993, pp.53-59.
- 5) Chang, W., Tai, N. and Ma, C., "Dynamic Mechanical Properties of Carbon-Carbon Composites," *Journal of Materials Science*, Vol. 30, No. 1, 1995, pp.1225-1232.
- 6) Moore, L. and Kline, R., "Nondestructive Evaluation of Changes in Mechanical Properties in Carbon-Carbon Composites during Processing," *Journal of Composite Materials*, Vol. 28, No. 4, 1994, pp. 352-366.
- 7) Stimson, I. L. and Fisher, R., "Design and Engineering of Carbon Brakes," *Phil. Trans. R. Soc. Lond*, A 294, 1980, pp. 583-590.
- 8) Nam, J. and Seferis, J., "Initial Polymer Degradation As a Process in the Manufacture of Carbon-Carbon Composites," *Carbon*, Vol.30, No. 5, 1992, pp. 751-761.
- 9) Carbon/Carbon Brake Disk Was Provided by a Certain Company.
- 10) Hsu, D. K. , Liaw, P. K. , Yu, N. , Sainin, V. and Miriyala, N., " Nondestructive Characterization of Woven Fabric Ceramic Composites," *Symposium on Ceramic Matrix Composites : Advanced High Temperature structural Materials*, Boston, MA, 1994, Nov. 28-Dec.4.
- 11) Jeong, H. and Hsu, D. K., " Experimental Analysis of Porosity-Induced Ultrasonic Attenuation and Velocity Change in Carbon Composites," *Ultrasonics*, Vol. 33, No. 3, 1995, pp.195-203.
- 12) Hsu, D. K., Hughes, M. S. and Patton, T. C., " Ultrasonic Scans Using Low Frequency Unresolved Echoes," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 12, Plenum Press, New Yrok, 1993, pp.1595-1602.