creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

[UCI]I804:24011-200000234481

2007년 8월
석사학위논문

초음파 비파괴 검사를 이용한 C/C 브레이크 디스크 특성연구

조 선 대 학 교 대 학 원

기계설계공학과

허 욱

초음파 비파괴 검사를 이용한 *C/C* 브레이크 디스크 특성연구

The Characteristic Research of C/C Composite Brake Disk using Ultrasonic Nondestructive Evaluation

2007 년 *8* 월 일

조 선 대 학 교 대 학 원

기계설계공학과

허 욱

목 차

LIST OF TABLES ····· I

LIST OF FIGURES ····· II

ABSTRACT ····· III

제 *1* 장 서 론 ····· 1

1-1 연구배경 및 필요성 ····· 1

1-2 연구목적 및 방법 ····· 3

제 *2* 장 초음파 비파괴 검사 원리 ····· 4

2-1 초음파시험 방법 ····· 4

2-1-1 펄스반사법(Pulse Echo Method) ····· 4

2-1-2 투과탐상법(Through Transmission Method) ····· 6

2-2 초음파속도 측정 ····· 8

2-2-1 초음파 속도 측정시스템 ····· 8

2-2-2 피크지연측정법(Peak Delay Measurement Method) ··· 10

제 *3* 장 *C/C* 브레이크 디스크 시험편 ····· 13

제 *4* 장 실험 결과 및 고찰 ····· 19

4-1 초음파검사(Ultrasonic Testing) ····· 19

4-2-1 초음파 속도 측정 ····· 19

4-2-1-1 피크지연측정(Peak Delay Measurement Method) 19

4-2-2 C-스캔 관찰(C-scan Image) ····· 39

4-2-2-1 펄스반사법(Pulse Echo Method) ····· 39

4-2-2-2 투과탐상법(Through Transmission Method) ····· 50

4-2 광학현미경관찰(Microscopic Examination Testing) ····· 52

4-3 X-ray 관찰(Radiographic Testing) ····· 58

제 *5* 장 결 론 ····· 60

Appendix ····· 62

참 고 문 헌 ····· 64

LIST OF TABLES

Table 1 Velocity depending on position from part Ⅰ to part Ⅱ 22

Table 2 Velocity depending on position from part Ⅲ to part Ⅳ 23

Table 3 Velocity analysis depending on position 24

Table 4 Density of each piece 29

Table 5 Velocity of each piece for thickness direction 29

Table 6 Velocity of each piece for redial direction 32

Table 7 Velocity of each piece for circumferential direction 36

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Principle of pulse echo method ····· 5
Fig. 2 Principle of through transmission method ····· 7
Fig. 3 Ultrasonic Testing System ····· 9
Fig. 4 Peak-Delay Measurement Method for ultrasonic velocity using contact dry-coupling transducers with 1 MHz and 12.5 mm in diameter ····· 11
Fig. 5 Schematic of Peak-Delay Measurement Method ····· 12
Fig. 6 Software for Peak-Delay Measurement Method ····· 12
Fig. 7 Schematic of C/C composite fabrication ····· 15
Fig. 8 Carbon/Carbon composite brake disk ····· 16
Fig. 9 Cutting of C/C composite brake disk ····· 18
Fig. 10 Stack sequence of C/C composite brake disk ····· 18
Fig. 11 Velocity measurement of C/C composite brake disk ····· 21
Fig. 12 Velocity analysis depending on location and angle of C/C composite brake disk ····· 24
Fig. 13 Velocity analysis of each Part through the chart ····· 25
Fig. 14 Decision of direction of each piece for velocity measurement ····· 28
Fig. 15 Velocity analysis for thickness direction depending on density ····· 30

Fig. 16 Velocity analysis for radial direction depending on density ····· 33
Fig. 17 Velocity analysis for circumferential direction depending on density ····· 37
Fig. 18 A-scan and C-scan image of C/C composite brake disk using pulse-echo method ····· 41
Fig. 19 C-scan image using pulse-echo method with front surface of C/C composites brake disk ····· 42
Fig. 20 Analysis of amplitude and time depending on scan area43
Fig. 21 Analysis of C-scan image of each Part using back-wall echo of Pulse-echo method ····· 45
Fig. 22 Analysis of C-scan image using back-wall echo of Pulse-echo Method according to direction of each piece ····· 48
Fig. 23 Analysis of C-scan image using back-wall echo according to direction of a under piece ····· 49
Fig. 24 Decision of scan area in Part Ⅲ of C/C composite brake disk ····· 50
Fig. 25 C-scan image of C/C composite brake disk at front surface of C/C composites using through transmission method with transducer that is 5MHz and 6.35 mm in diameter ····· 51
Fig. 26 Cutting location of a cut-out piece for Microscopic Examination Testing ····· 53

Fig. 27 Position for microscopic examination testing in cutting section ····· 53
Fig. 28 Microscopic examination testing of 80 magnifications about the upper piece ····· 54
Fig. 29 Microscopic examination testing of 80 magnifications about the under piece ····· 55
Fig. 30 Microscopic examination testing of 80 magnifications about No. ② piece ····· 56
Fig. 31 Microscopic examination testing of 80 magnifications about No. ⑥ piece ····· 57
Fig. 32 Radiographic Testing of each piece that is from No. ① to No. ⑥ ····· 59
Fig. 33 Mechanized air-coupled ultrasonic C-scan in the laboratory using a commercially available scanner ····· 62
Fig. 34 Air-coupled ultrasonic testing using noncontact air-coupled transducers (400kHz , 25.5 mm in diameter) ··· 63

ABSTRACT

The Characteristic Research of C/C Composite Brake Disk using Ultrasonic Nondestructive Evaluation

Wook Heo
Advisor : Prof. Yang, In-Young, Ph. D.
Dept. of Mechanical Design Engineering
Graduate School of Chosun University

These day, The composites used Carbons have been increasing use in field of automobiles, ship, building and aircraft industry because it has been improved a fuel-efficient by losing their weight. Especially, the Carbon/Carbon(C/C) composite material of lots of composites has excellent mechanical properties which are greater specific strength, specific stiffness, heat-resisting property in super high temperature and excellent anti-abrasion than material alloys. C/C composite has been used in wings, brake disk and chief parts in field of aircraft and used in prosthetic

valve in the medical profession. It is desirable to perform ultrasonic testing to study physical characteristic and homogeneity of the C/C composite materials. In this work, we performed a peak-delay measurement method to measure ultrasonic velocity of C/C composite brake disk which involved inhomogeneity and conducted A-scan, B-scan, C-scan, microscopic examination testing and radiographic testing to observe the stack sequence and physical properties. We had put inspection material into water tank for scan image of C/C brake disk using automated acquisition scanner and mapped a ultrasonic image to study inhomogeneity of material properties. Pulse-echo method using a low frequency transducer based on amplitude and time-of-flight of the ultrasonic pulse were used for estimating ultrasonic time-of-flight. Surface of C/C brake dis was observed with using an electron microscope and those were compared with ultrasonic image. Therefore variation of ultrasonic velocity was correlated to those of material density, which is based on the peak-delay measurement method.

제 1 장 서 론

1-1 연구배경 및 필요성

최근, 기계구조물에 대한 안정성, 에너지 절감을 위한 경량화, 지구 환경을 보호하기 위한 친환경성 등이 문제점이 제기됨에 따라 각 산업분야에 단일금속으로부터 합금 및 복합재료 형태로 사용되고 있다. 특히, 항공기 및 자동차 분야에 사용되는 탄소/탄소 복합재료(Carbon Fiber Reinforced Carbon Composite:이하 C/C 복합재료라 한다.)는 항공기 산업 발달과 더불어 응용분야가 점차 확대 되었다. 초기 항공기 브레이크 디스크는 유기질 재료, 금속/세라믹 합금으로 사용되어 왔으나 1970년대부터 C/C 복합재료의 사용이 점차 증가되어 왔으며 국내에서는 1990년대부터 활발히 연구가 진행되고 있다.

C/C 복합재료는 2500℃ 고온에서 강도유지 및 열전도도, 저밀도, 초고온 마찰과 마모특성, 열충격 저항성 등의 기계적 성질이 우수하여 항공기 부품뿐만 아니라 로케트 노즐, 우주왕복선 내화타일, 고급차량 및 경주용 차량의 브레이크 디스크 등에 적용되어왔으며 화학적으로 안정하여 내식재료 사용 및 생체적합성으로 인한 인공심장 판막, 인공혈관, 인공뼈, 인공관절 등에 이용되어왔다.[1]

C/C 복합재료의 탄소기지재는 일반 섬유보강섬유와 달리 액상함침법과 기상증착법에 의해 적용될 수 있다. 액상침상함침 공정에서 탄소기지물질 전구체로서 페놀수지와 퓨란수지와 같은 열경화성 수지 또는 열가소성수지가 사용되어진다. 이러한 전구체 물질들 중에서는 공정의 편의성 때문에 페놀수지가 가장많이 사용되어지고 있다. 그러나 페놀수지는 탄소수율이 낮고 산소와 같이 헤테로 원자(heteroatom)가 많기 때문에 탄화공

정중에 많은 열수축현상을 보인다.[2] 이러한 C/C 복합재료는 탄화공정 후 질량손실이나 수지의 열수축현상 등으로 인해 미세기공(micro void)이나 미세크랙(micro crack)발생하며, 탄화공정 중 보강재와 기지물질사이의 열팽창계수 차이로 인하여 심한 경우 보강재의 손상을 초래하거나 재료내부의 물성치 변화를 동반한다.[5]

1990년대 서울대학교에서는 C/C 복합재료에 최적설계 및 구조특성에 관한 연구로 피치분말과 흑연분말을 페놀수지에 첨가하여 기성물질변성이 C/C 복합재료의 물성에 미치는 영향을 분석하여 피치분말과 흑연분말을 첨가량이 증가함에 따라 굽힘성질과 층간전단력이 증가됨을 밝혔다.[3]

E. Fitzer, W. Fritz 그리고 A. Gkogkidis는 다양한 열처리온도, 섬유분율, 섬유배열을 가지는 일방향 및 2방향 C/C 복합재료에 대하여 마찰 및 마모실험을 통해 열처리 온도 및 섬유분율이 증가함에 따라 마찰 및 마모는 감소함을 나타내었다.[4]

C/C 복합재료 브레이크 디스크의 경우 내부적 특성 즉 열수축 현상(thermal shrinking phenomena)으로 발생하는 미세기공 및 크랙의 분포, 탄화공정으로 인한 섬유분율의 분포 등이 고르지 못함으로 인해 국부적인 마찰 및 재료의 조기 손상 등을 초래하며 C/C 브레이크 디스크의 수명 단축 및 경제적 손실, 사고의 위험 등이 내재 되므로 재료의 제작과정 후 안정성 검사가 수행되어야 한다.

C/C 복합재료는 각 종 기계들의 주요부품에 사용되는 중요 재료로 균질성(Homogeneity) 및 안정성(stability) 평가에 대한 정확한 연구가 이루어지지 않은 실정이다. 따라서 본 논문에서는 C/C 복합재료의 섬유분율 및 섬유배열(fiber orientation), 열처리 온도(heat treat temperature) 등 제작과정의 변화에 따라 C/C 복합재료 브레이크 디스크 특성의 변화를 고려한 제작 후의 균질성을 비파괴 평가법을 이용하여 정량적으로 평가함으로

써 최적의 균질성을 유지할 수 있는 C/C브레이크 디스크 설계 자료를 얻고자 하였다. 이러한 균질성 및 안정성을 검토하기 위해 재료의 특성을 보존하며 특성을 연구 할 수 있는 비파괴 검사법을 택하였다. 비파괴검사 방법 중 초음파는 선박 및 제철 산업분야의 용접부위 결함검사, 의료분야의 진찰용으로 많이 사용되고 있으나, 재료의 종류, 음향 임피던스(Impedance), 기계적 성질(mechanical property) 등에 민감하게 반응하므로 내부의 결함(defect) 검사, 초음파 속도 측정을 통한 재료의 불균질성(inhomogeneity) 등을 연구 할 수 있다. 그러므로 이러한 초음파의 특성을 C/C 브레이크 디스크 평가 및 연구에 이용하게 되었다.

1-2 연구목적 및 방법

본 연구에서는 C/C 복합재료 제조과정 중에 발생할 수 있는 재료의 불균질성에 대하여 다양한 초음파 검사 방법으로 시험편을 측정하여 실험결과들의 상관관계를 증명함으로써 초음파 평가법에 대한 신뢰성을 높일 뿐만 아니라 C/C 복합재료 브레이크 디스크의 안정성을 평가하고자 하였다. C/C 브레이크 디스크의 균질성을 평가 하는 방법으로는 자체 설계 제작된 초음파 비파괴 검사 스캔 시스템을 이용하여 수침조 내에서 수직 탐촉자를 사용 펄스 반사 모드 및 투과모드로 전체 및 부분적인 초음파 A-스캔, B-스캔, C-스캔을 실시하며 C/C 복합재료 브레이크 디스크의 전체적인 초음파 투과 속도 측정을 위해 접촉매질을 사용하지 않는 건식 저주파수 트랜스듀서를 이용한 접촉식 초음파 투과모드로, 피크지연 측정법 및 오버랩 측정법(Over-lap method)을 이용하였다. 또한 초음파 비파괴 검사 시 검사물질에 전혀 영향을 주지 않은 Air-scan 검사 도입 및 초음파 비파괴 검사 자동화 통합 시스템 구축을 목표로 한다.

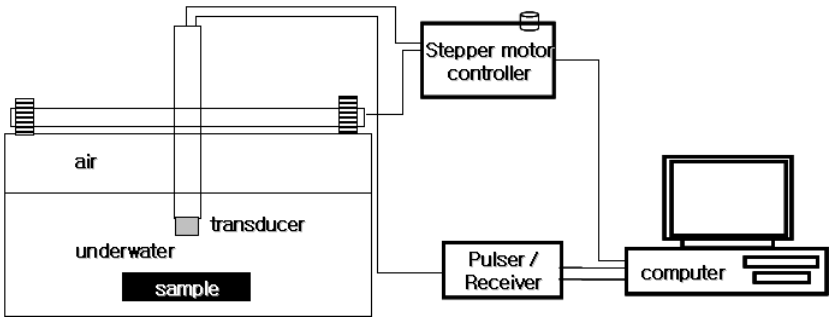
제 2 장 초음파 비파괴 검사 시스템

2-1 초음파시험 방법

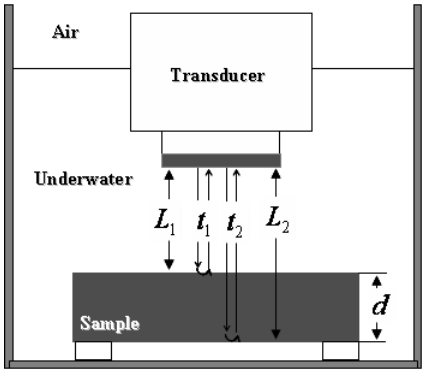
본 장에서는 초음파 비파괴 검사의 탐상원리에 분류로 크게 두 가지로 나누었다. 펄스반사법과 투과탐상법으로 나누었으며 이들을 다시 표시방법 분류하여 전체적인 초음파 특성 및 속도를 파악하기 위해 A 주사표시법(A-scan Presentation)과 C 주사표시법(C-Scan presentation)으로 실시하였으며 정확한 초음파 속도 측정을 위해 접촉식(Contact Method)인 접촉 매질을 사용하지 않는 피크지연측정법(Peak delay Measurement Method)과 및 비접촉식(Non-Contact Method)인 Air-scan 장비를 이용하여 실험을 실시하였다.

2-1-1 펄스반사법(*Pulse Echo Method*)

한 개의 초음파 탐촉자(transducer)를 이용하여 초음파를 송신(transmitting), 수신(receiving)하고 시험편의 한 면만으로 탐상이 가능하도록 결함에코(fault echo)가 저면에코(bottom echo)보다 앞에 나타나게 하는 방법으로 가장 일반적으로 사용되고 있다. C/C 브레이크 디스크(Carbon/Carbon Composite Brake Disk) 내의 균질성(homogeneity)을 평가하기 위한 방법으로 적용되었으며 자체 제작된 수침조 속에서 수직탐촉자를 이용하여 실시하였다. 펄스 반사법을 이용하여 A-scan과 C-scan을 실시함으로써 시험편에 대한 전체적인 초음파 특성을 파악할 수 있었다. 실험에 적용된 원리는 Fig. 1과 같으며 주파수(frequency)가 2.25MHz이며 직경(diameter)이 12.5mm 탐촉자를 사용하였다.



(a) schematic of Pulse Echo Method



(b) Velocity measurement

L_1(Water distance) $\geq \frac{1}{4}t + \frac{1}{4}'' = \frac{1}{4}t + 6.35(mm)$

$L_2 \geq \frac{1}{4}t + \frac{1}{4}'' + d(mm) = \frac{1}{4}t + 6.35mm + d(mm)$

d : Sample thickness(㎜)

t_1 : Cycle time of ultrasonic between transducer and sample surface(㎲)

t_2 : Cycle time of ultrasonic between transducer and sample bottom(㎲)

V : Speed of sound in material(㎧) $= \frac{2(L_2 - L_1)}{t_2 - t_1}$

Fig. 1 Principle of pulse echo method

2-1-2 투과탐상법(Through Transmission Method)

두 개의 초음파 탐촉자를 이용하여 하나는 송신탐촉자(transmitting transducer)로 다른 하나는 수신탐촉자(receiving transducer)로 사용하여 두 개의 탐촉자 사이에 시험편을 놓고 양면에서 마주보게 배치하여 검사하는 방법이다. 투과탐상방법은 펄스반사법의 원리의 응용으로 볼 수 있으며 물을 접촉매질로 하는 수침법을 이용하였다. 수침조 속에 제작된 지그(jig)를 이용하여 지그 양단에 탐촉자를 고정시킨 후 실험하였다. 투과탐상법은 A-scan, B-scan, C-scan의 이미지 처리를 위해서도 적용되었다. 투과탐상법은 펄스반사법에 비해 측정범위가 제한적이나 C-scan 이미지 처리시 더욱 유용하였다. 펄스반사법을 이용한 C-scan image 처리는 저주파수 탐촉자 사용시 시험편의 저면 에코의 크기가 매우 작아 측정이 어려워 고주파수(10MHz 이상) 탐촉자를 이용하였지만 투과탐상법에서는 비교적 적은 주파수에서도 이미지처리가 가능하였다. 또한 이 방법은 피크지연측정법과 Air-scan에서도 적용되었다. 본 논문에서 응용된 방법은 Fig. 2와 같으며 Fig. 2(a)는 실험에 사용된 장비의 개략도이며 Fig. 2(b)는 투과탐상법에 의한 시험편 내의 초음파 속도 계산법이다. 이 계산법은 펄스반사법에 의한 실험결과와 거의 일치함을 알 수 있었다.

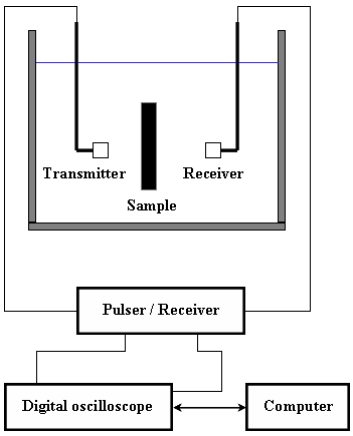
투과탐상법에서 초음파 속도 측정을 위해 사용된 식은 식 (1)과 같다.

$$V = V_w\left(\frac{2(t_w - t_m)}{t_3 - t_1} + 1\right) \quad \cdots\cdots (1)$$

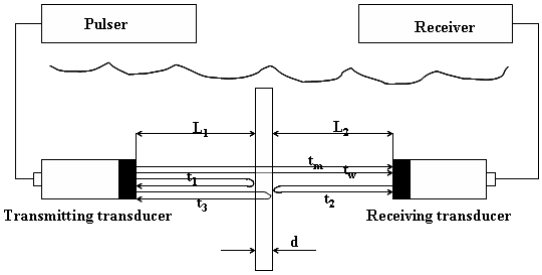
V : 시험편을 통과하는 초음파 속도

V_m : 물속을 통과하는 시험편의 속도

식에 대한 기호 설명은 Fig. 2와 같다.



(a) schematic of Through Transmission Method



(b) Velocity measurement

L_1 : Distance between transmitting transducer and sample surface(㎜)

L_2 : Distance between receiving transducer and sample surface(㎜)

d : Sample thickness(㎜)

t_1 : Cycle time of ultrasonic between transmitting transducer and sample surface(㎲)

t_2 : Cycle time of ultrasonic between receiving transducer and sample bottom(㎲)

t_3 : Cycle time of ultrasonic between transmitting transducer and sample bottom(㎲)

t_m : Time of ultrasonic from transmitting transducer to receiving transducer with the sample(㎲)

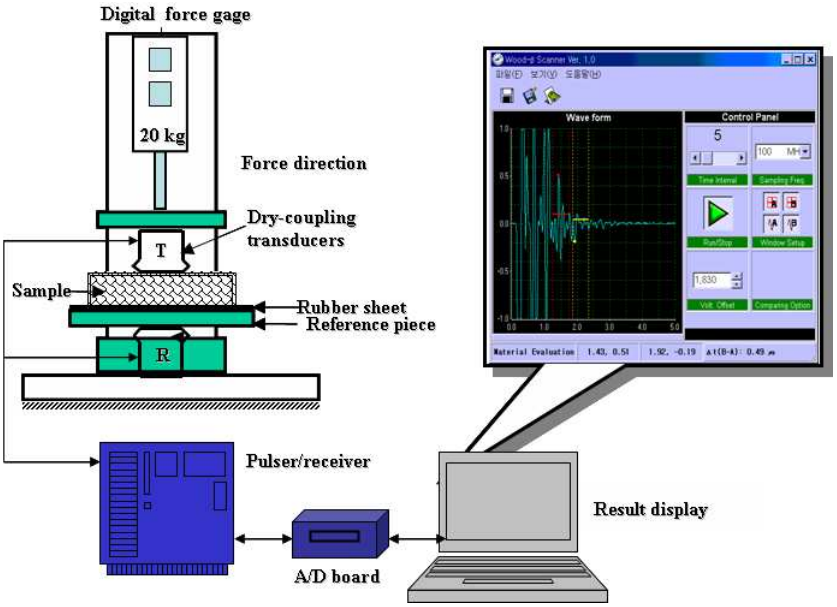
t_w : Time of ultrasonic from transmitting transducer to receiving transducer without the sample(㎲)

Fig. 2 Principle of through transmission method

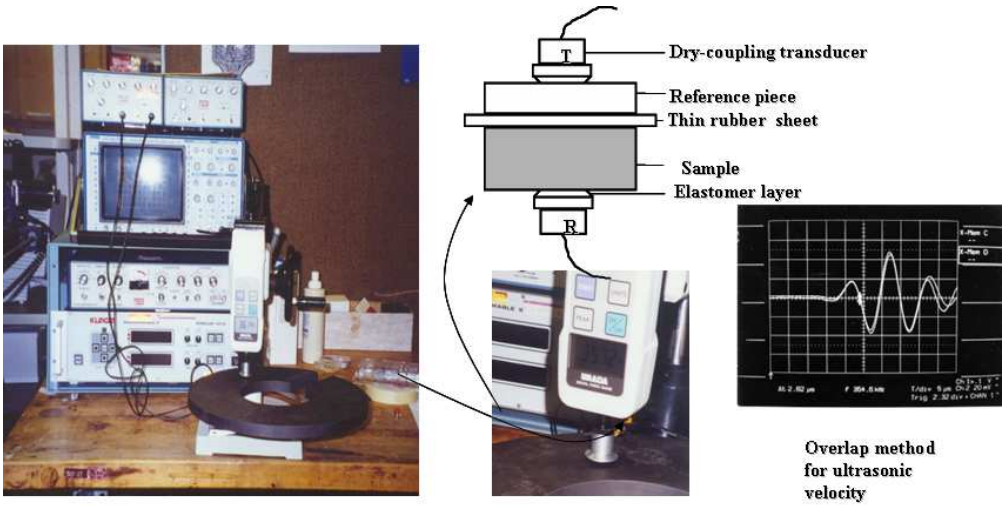
2-2 초음파속도 측정

2-2-1 초음파 속도 측정시스템

시험편에 대한 균질성 여부를 판단하기 위해 초음파 속도를 측정하였으며 이에 대한 측정시스템으로는 Fig. 3(b)와 같이 수침법으로 실시하는 초음파 비파괴 검사 시스템을 이용 하여 시험편에 대하여 A-scan, B-scan, C-scan을 실시하였다. Fig. 3에 속도 측정 시스템의 개략도를 나타냈다. 초음파 비파괴 검사 시스템은 시험편의 전면과 배면의 에코를 공진크기와 주행시간의 모드를 이미지로 나타낼 수 있다. 시험편에 대한 초음파 스캔을 통한 이미지 처리는 결함검사 및 품질관리에 대한 신뢰성을 부여하며 시험편에 대한 불균질성(inhomogeneity)을 해석하는데 유용한 NDE기법이다. 초음파 속도 측정방법은 Fig. 3과 같은 장비 내에서 펄스반사법과 투과탐상법 모두 수침조 내에서 행해졌다. C/C 브레이크디스크는 고밀도화를 시키기 위하여 CVI공정이 이루어지는데 이 공정 중에 여러개의 디스크를 한 번에 적층하여 고밀도화를 시키기 위해 디스크사이에 튜브모양인 스페이셔바가 사용되었다. 이로 인해 브레이크디스크의 표면에 미소자국(anomalous regions)을 C-스캔으로 관찰하기 위하여 주파수가 10-25MHz인 탐촉자가 사용되었다. 또한 속도 측정방법으로는 접촉매질을 사용하지 않은 건식법으로 이용되는 드라이커플링 드랜스듀서(KD50-1, Ultran Lab.)가 C/C 브레이크 디스크의 전체적인 속도 측정을 위해 두께방향으로 지정된 위치에서 사용되었다. 절단된 시험편에 대한 두께 방향, 반경방향, 원주방향으로 속도 측정을 위해서 위와 동일한 건식탐촉자를 이용하여 동일한 방법으로 실험을 실시하였다. 신뢰성 향상을 위해 다양한 방법을 적용하였으며 Fig. 3(b)와 같이 펄스중첩법(Pulse Overlap Method)을 이용하기도 하였다.



(a) schematic of velocity measurement system



(b) schematic of Pulse over lap method

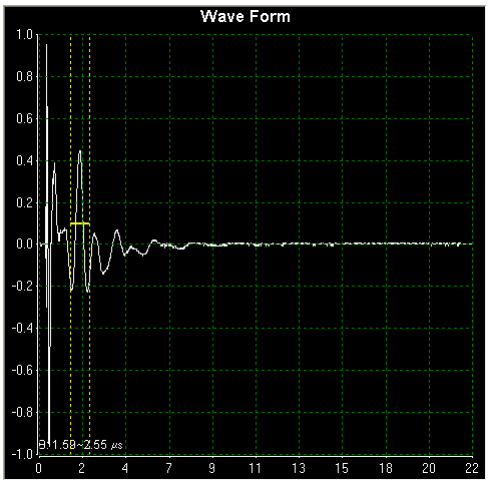
Fig. 3 Ultrasonic Testing System

2-2-2 피크지연측정법*(Peak Delay Measurement Method)*

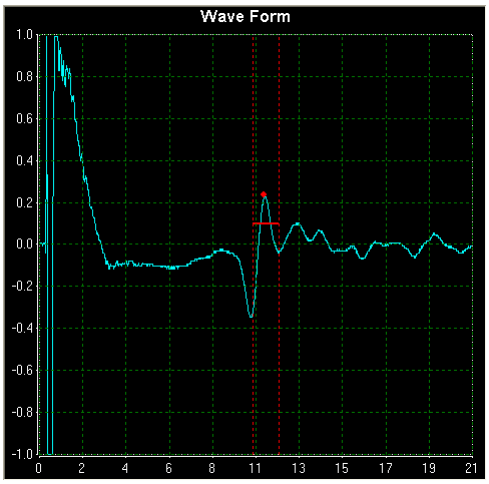
피크지연 측정방법은 Fig. 5와 같이 탐촉자와 시험편 사이에 기준시험편(Reference Sample)을 추가함으로써 분해능이 낮은 송신 펄스에 대한 시험편 표면의 에코(echo)와 저면에코를 정확하게 측정하여 시험편 내의 초음파 속도 측정에 정밀도(precision)를 높이는 방법이다. 이 때 시험편과 기준시험편 사이에 두께 1mm이하의 고무시트(robber sheet)를 삽입하여 시험편들 사이에 초음파의 산란감쇠를 최소화 시킨다. 탐촉자는 접촉매질을 사용하지 않는 드라이 커플링 트랜스듀서(dry coupling transducer)를 사용하며 직접 접촉식인 평면형 트랜스듀서이며 파나메트릭스사의 5052PR인 스파이크 전압펄서/리시버를 이용하여 초음파를 발생시켰다. 실험 방법은 시험편에 의한 RF파형을 오실로스코프(Oscilloscope)에서 잡고 컴퓨터에서 저장하였으며 오실로스코프 상에서 2개의 에코는 독립적으로 이동이 가능하며 스크린에서 에코를 저장 및 비교하여 측정하는데 매우 편리하다. 이때 초음파속도를 구하기 위하여 Fig. 4(a)와 같이 먼저 시험편과 유사한 파형을 갖은 기준 시험편의 주행시간(reference signal)을 측정하여 저장한다. 그리고 Fig. 4(b)와 같이 기준 시험편과 C/C 브레이크 디스크 조각을 함께 겹쳐서 주행시간을 측정한다. Fig. 4(c)는 Fig. 4(a)의 기준 시험편에 대한 RF파형을 모니터에 불러들인 후에 C/C브레이크 디스코 조각을 겹친 상태에서 RF파형을 동시에 확인하여 시간차를 측정한다. 이 때 에코의 간격은 Fig. 6과 같이 자동 측정 및 저장한다. 계산식은 아래와 같다.

$$V = \frac{l}{\Delta t} \quad \cdots\cdots (2)$$

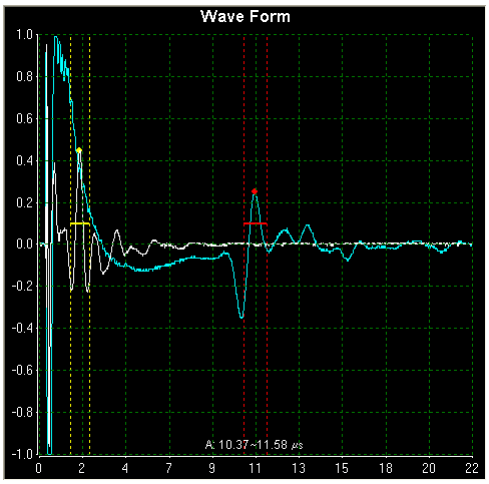
l은 시험편의 전체 길이 이면 Δt는 두 피크사이의 시간차이다.



(a) Reference signal



(b) Specimen signal



(c) Measurement of time-gap between reference and specimen signal

Fig. 4 Peak-Delay Measurement Method for ultrasonic velocity using contact dry-coupling transducers with 1 MHz and 12.5 mm in diameter

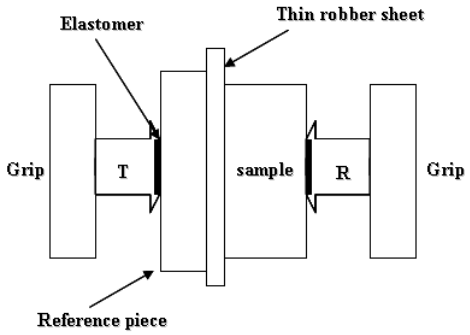


Fig. 5 Schematic of Peak-Delay Measurement Method

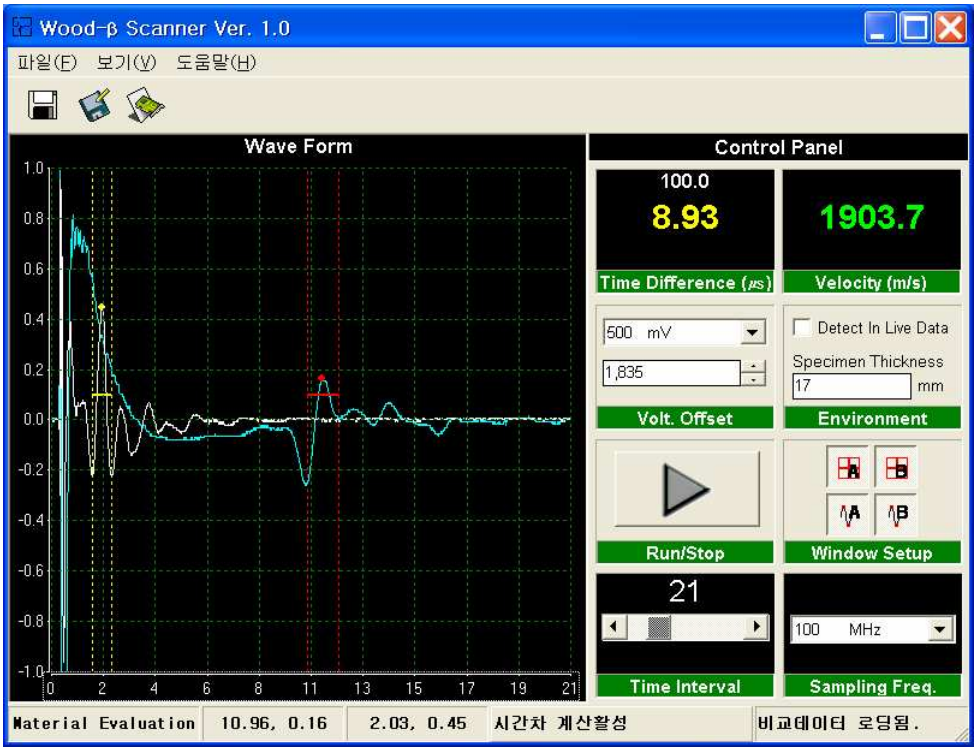


Fig. 6 Software for Peak-Delay Measurement Method

제 3 장 C/C 브레이크 디스크 시험편

C/C 복합재료 제작과정은 다단계과정을 통해 제작되기 때문에 단가가 매우 높고 복잡하다. C/C 복합재료 제조과정은 Fig. 7과 같이 프리폼(preform)을 제작하고, 이렇게 제조된 프리폼을 탄화(carbonization)공정, 흑연화(graphitization)공정, 그리고 고온열처리 함침(pitch impregnation) 및 탄화공정이 2~3회 반복되며, 고밀도화를 위한 CVI(chemical vapor infiltration)공정 등으로 나눌 수 있다. CVI방법으로 강화된 C/C 브레이크 디스크는 22개의 절단된 섬유(chopped fiber)와 콜타르피치(coal tar pitch)가 함유된 24층의 직물플라이(cloth plies)로 구성되어있다. 크기는 Fig. 8(a)와 같이 링 모양으로 이루어져 있으며 외경이 330.4mm, 내경이 130.4mm, 두께가 23.2mm로 이루어져 있다. 시험편의 두께는 버니어캘리퍼스를 이용하여 시험편의 내경부분과 외경부분 및 중간 부분을 나누어 수회에 걸쳐 측정하였다. 측정결과 내경 부분의 두께는 23.0mm이나 외경 부분의 두께는 23.2mm로 약간 오차가 있었다. 이는 시험편의 제작과정 중 냉각속도 차 및 고밀도화 과정 중 밀도분포의 차로 인한 변형으로 간주된다. 시험편에 대한 정밀한 측정을 위해 다양한 검사를 실시하였으며 시험편 내부의 세부적인 검사를 위해 다이아몬드 커터기를 이용하여 절단하였다. C/C 브레이크 디스크의 속도 측정 완료 후 절단 부위를 결정하였고 Fig. 8(b)와 같이 부분적인 관찰을 위해 Part Ⅰ에서 Part Ⅳ까지 나누어 절단 하였다. Part Ⅳ에 대해서는 양끝부분을 Fig. 9(b)와 같이 절단하였고 더욱 세부적인 관찰을 위하여 Fig. 9(c)와 Fig. 9(d)와 같이 절단하였다. Fig. 9(c)는 Fig. 9(b)의 왼쪽 부분으로 전체적인 초음파 속도 측정 시 초음파의 속도차가 가장 큰 부분으로 더욱 정밀하게 측정하기 위하여 절단하였고, 초음파 속도와 밀도의 상관관계 검사를 위해 밀도 측정

후 속도 측정을 하였다. Fig. 8(c)의 시험편은 다시 6등분하여 마이크로미터와 전자저울(10^{-6}까지 측정 가능)을 이용하여 밀도를 측정하였으며 두께방향(thickness direction), 원주방향(circumferential direction) 및 반경방향(radial direction)에 대하여 초음파 속도를 측정하였다. Fig. 9(c)는 19.7mm(폭)×23.2mm(두께)×90.5mm(길이)로 절단하였으며 내경부분을 ①로 하고 외경부분을 ⑥으로 하여 다시 6등분하였다. Fig. 9(d)는 Fig. 9(b) 시험편의 오른쪽 부분으로 20.0mm(폭)×23.2mm(두께)×90.5mm(길이)와 같이 절단 하였으며 시험편의 적층구성을 확인하기 위하여 원주 방향으로 3분의 1지점에서 2등분하여 적층구성을 관찰하였다. Fig. 9(d)의 시험편 절단 시 두께 3분의 1지점은 Fig. 10에서 보면 두 가지 형태로 적층되어 있음을 알 수 있는데 이러한 부분을 둘 다 관찰 할 수 있는 지점이다. Fig. 10은 시험편의 적층구성을 관찰두께 방향에서 관찰한 개략도이다. 전체적인 단면 형상은 Fig. 10과 같으며 17개의 층으로 구성되어 있으며 두 가지의 적층구성이 반복되는 것을 알 수 있다. 두께가 약 1mm인 층과 1.53mm인 3개의 층이 하나의 층을 구성하여 약 4.6mm 두께로 1mm인 층과 반복적으로 구성되고 있음을 알 수 있다. 하지만 여기서 반복되는 두께 또한 일정하지 않으며 약 0.5mm이내의 오차범위를 갖고 있다. 적층구성에 대한 불안정은 시험편 절단 후 자세히 관찰되었으며 외경부다 내경부분의 적층구성이 휘어져 있는 현상을 육안으로도 관찰이 가능하였다. 적층 구성은 전자현미경 관찰시 자세히 다루기로 한다.

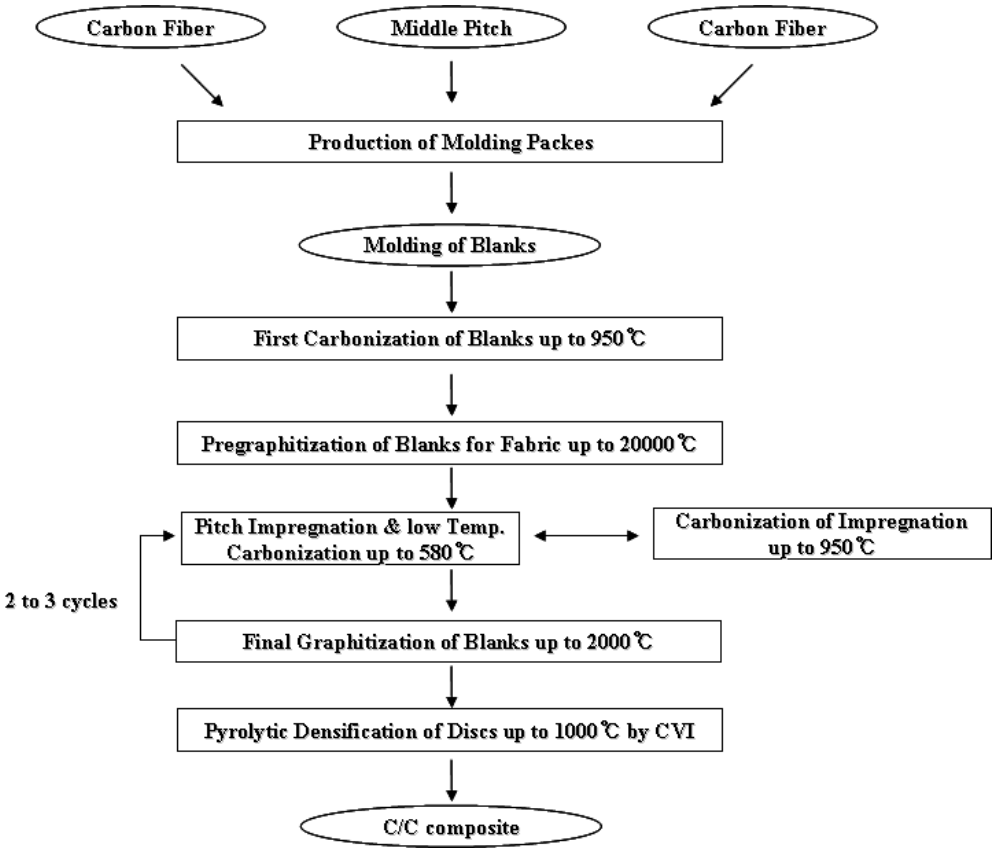
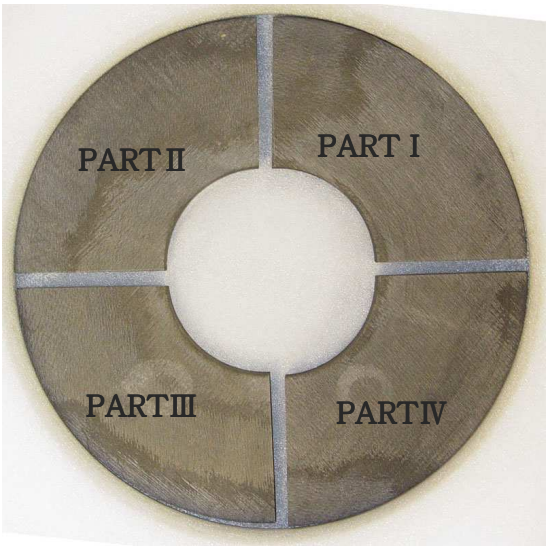


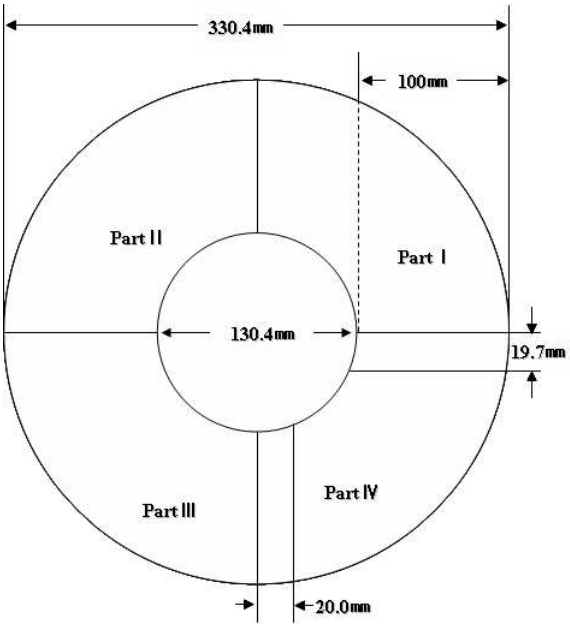
Fig. 7 Schematic of C/C composite fabrication

(a) Picture of Carbon/Carbon brake disk

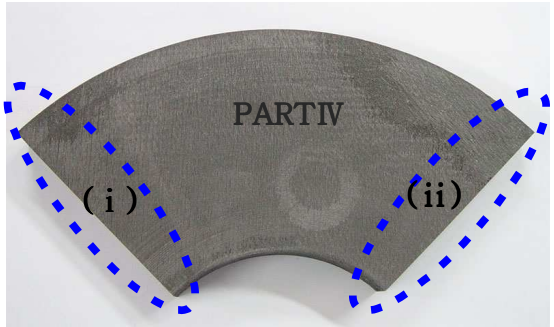


(b) Picture of Carbon/Carbon brake disk after cutting

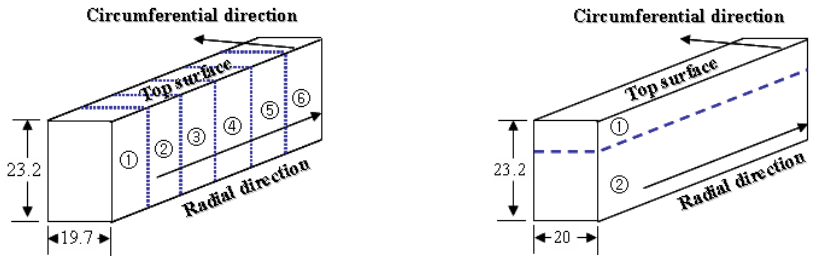
Fig. 8 Carbon/Carbon composite brake disk



(a) Dimensions of the brake disk and location of cut-out pieces on top view of C/C brake disk



(b) Location of cut-out pieces of part Ⅳ



(c) Thickness direction cutting of a cut-out piece

(d) Radial direction cutting of a cut-out piece

Fig. 9 Cutting of C/C composite brake disk

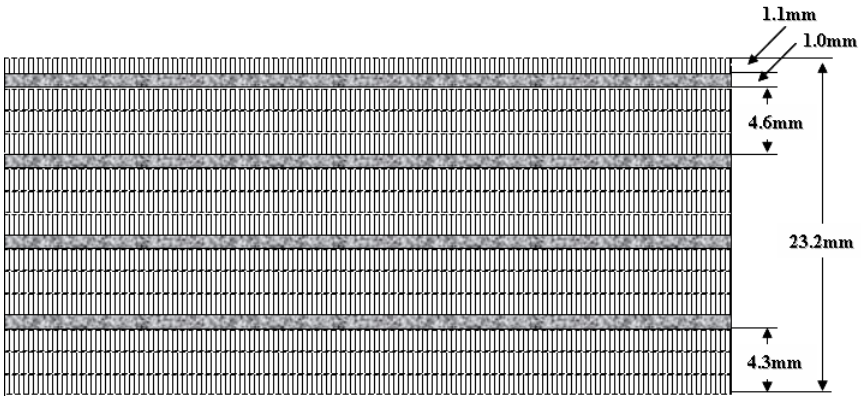


Fig. 10 Stack sequence of C/C composite brake disk

제 4 장 C/C 브레이크 디스크 검사

4-1 초음파검사(Ultrasonic Testing)

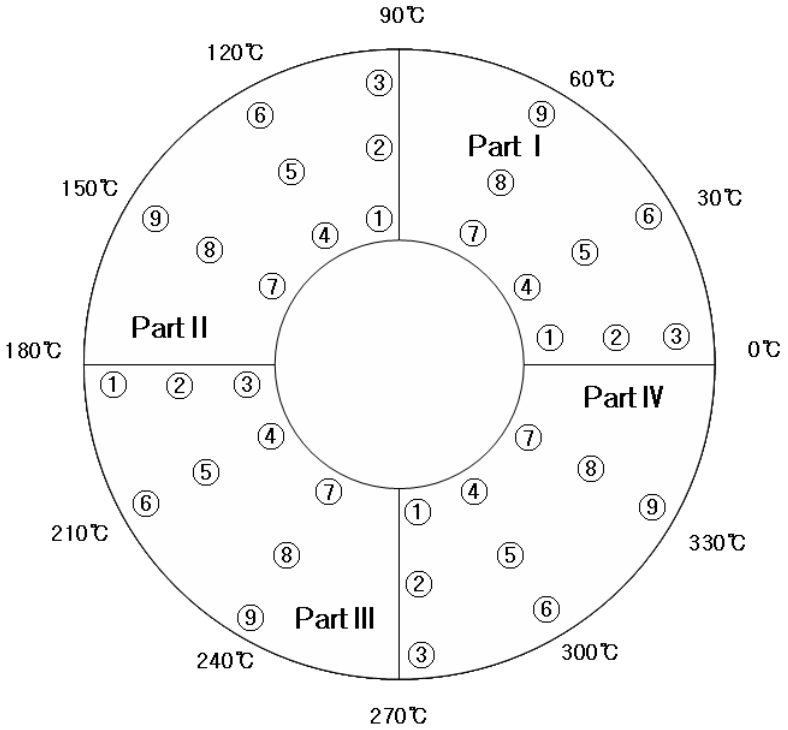
4-2-1 초음파 속도 측정

4-2-1-1 피크지연측정(Peak Delay Measurement Method)

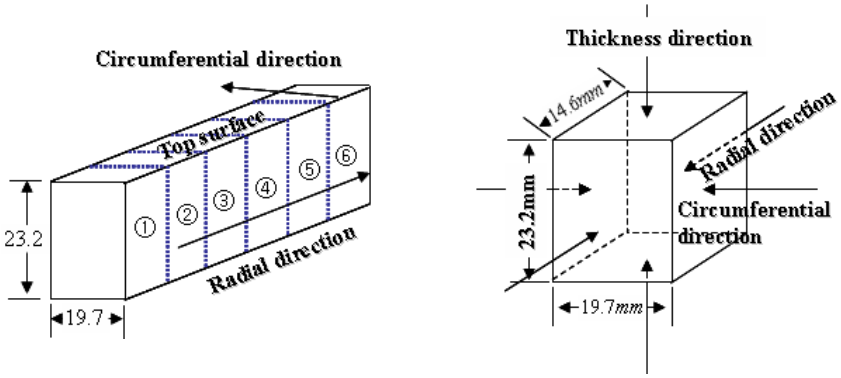
초음파는 용접부위 및 금속재료에 대한 결함 검사를 바탕으로 많은 산업현장에 적용되어왔으며 1990년대부터 초음파를 이용한 복합재료의 비파괴 검사에도 적용되고 있다. 금속부위 결함과 같은 정확한 에코가 형성되는 것은 아니지만 C/C브레이크 디스크의 초음파의 속도 검사를 통하여 재료 내부 특성을 평가하였다. 피크지연측정에 대해서는 Fig. 5와 Fig. 6에 자세한 설명이 되어 있어 여기서는 생략하기로 한다. Fig. 11과 같이 C/C 브레이크 디스크를 Part별로 구별하여 9개의 지점을 정하여 절단하기 전 전체적인 속도를 측정하였다. Fig. 11(a)와 같이 측정 완료 후 가장 속도의 차가 큰 부분을 정하여 Fig. 11(b)와 같이 절단 하였다. 절단된 6개의 시험편에 대해 Fig. 11(c)와 같이 두께방향, 원주방향, 반경방향으로 구별하여 피크지연측정법으로 실험을 실시하였다.

Table 1과 Table 2는 Fig. 11(a)의 각 부분들을 피크지연측정으로 두께와 초음파 통과 시간 측정을 통한 속도를 측정한 것이다. 전체적인 두께는 23.2mm에서 23mm의 범위를 가지며 평균 두께는 23.13mm이며 Part Ⅲ의 평균 두께가 23.16mm으로 최저 두께인 Part Ⅰ의 23.08mm보다 0.08mm 더 두꺼운 것으로 나타났다. 초음파 속도 또한 각 위치별로 상이한 결과 값이 나타났다. 그래서 Table 3을 통해 C/C 브레이크 디스

크의 위치와 각도에 따라 초음파 속도를 분석하였다. 외경 보다는 내경부위로 갈수록 색이 진함을 알 수 있는데 이는 속도가 더욱 빠르다는 것을 나타내고 있다. 또한 Fig. 13은 Fig 12를 Part별로 나타낸 것이다. Part Ⅰ에서 Part Ⅳ까지 각 Part 별로 구별하여 분석하였으나 C/C 브레이크 디스크의 외경부분 보다는 내경부분의 속도가 더욱 빠르게 나타남을 확인할 수 있었다. Table 1과 Table 2에서 보면 Part Ⅰ의 평균 속도는 2.6717㎜/㎲이며 최고 속도는 2.2776㎜/㎲으로 Fig. 11(a) Part Ⅰ의 ④의 위치에 해당하며 최저 속도는 2.416㎜/㎲으로 Fig. 11(a) Part Ⅰ의 ③의 위치에 해당한다. Part Ⅱ의 평균속도는 2.688㎜/㎲이며 최고 속도는 2.851㎜/㎲으로 Fig. 11(a) Part Ⅱ의 ①의 위치에 해당하며 최저 속도는 2.533㎜/㎲으로 Fig. 11(a) Part Ⅱ의 ⑨의 위치에 해당한다. Part Ⅲ의 평균 속도는 2.689㎜/㎲이며 최고 속도는 2.881㎜/㎲으로 Fig. 11(a) Part Ⅲ의 ⑦의 위치에 해당하며 최저 속도는 2.478㎜/㎲으로 Fig. 11(a) Part Ⅲ의 ⑥의 위치에 해당한다. 마지막으로 Part Ⅳ의 평균 속도는 2.708㎜/㎲이며 최고 속도는 3.403㎜/㎲으로 Fig. 11(a) Part Ⅳ의 ⑦의 위치에 해당하며 최저 속도는 2.427㎜/㎲으로 Fig. 11(a) Part Ⅳ의 ⑥의 위치에 해당한다. Table 3은 내경 부분, 중간 부분, 외경 부분에 대한 속도를 분석한 값으로 내경부근의 평균 속도는 2.840㎜/㎲이며 중간부분의 평균 속도는 2.712㎜/㎲, 외경부근에 대한 평균 속도는 2.515㎜/㎲이다. C/C 브레이크 디스크의 전체적인 평균 속도는 2.689㎜/㎲이다. 외경부근이 전체적으로 초음파 속도가 낮고 두께는 높은 것으로 나타났으며 내경부근에서는 초음파 속도가 전체적으로 높으며 두께 낮은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 Fig. 13을 보면 더욱 자세히 알 수 있다. 각 위치에 따른 속도를 그래프로 나타낸 것인데 외경에서 내경으로 갈수록 속도가 높아지고 있음을 나타낸다.



(a) Location of velocity measurement of C/C composite brake disk



(b) Cutting location of a cut-out piece

(c) Velocity measurement direction of a piece

Fig. 11 Velocity measurement of C/C composite brake disk

Table 1 Velocity depending on position from part Ⅰ to part Ⅱ

division	location	velocity(㎜/㎲)	thickness(㎜)	time(㎲)
part Ⅰ	1	2.750	23.10	8.40
	2	2.686	23.10	8.60
	3	2.416	23.00	9.52
	4	2.776	23.10	8.32
	5	2.726	23.12	8.48
	6	2.546	22.91	9.00
	7	2.748	23.19	8.44
	8	2.723	23.20	8.50
	9	2.674	23.00	8.60
	average	2.672	23.08	8.65
part Ⅱ	1	2.851	23.15	8.12
	2	2.647	23.19	8.76
	3	2.600	23.09	8.88
	4	2.782	23.15	8.32
	5	2.698	23.2	8.60
	6	2.584	23.05	8.92
	7	2.809	23.15	8.24
	8	2.686	23.10	8.60
	9	2.533	23.00	9.08
	average	2.688	23.12	8.61

Table 2 Velocity depending on position from part Ⅲ to part Ⅳ

division	location	velocity(㎜/㎲)	thickness(㎜)	time(㎲)
part Ⅲ	1	2.812	23.20	8.28
	2	2.736	23.20	8.48
	3	2.522	23.20	9.2
	4	2.782	23.15	8.32
	5	2.756	23.15	8.40
	6	2.478	23.00	9.28
	7	2.871	23.20	8.08
	8	2.749	23.20	8.44
	9	2.495	23.15	9.28
	average	2.689	23.16	8.64
part Ⅳ	1	2.743	23.15	8.44
	2	2.685	23.20	8.64
	3	2.473	23.15	9.36
	4	2.749	23.20	8.44
	5	2.723	23.2	8.52
	6	2.427	23.2	9.56
	7	3.403	23.18	8.28
	8	2.731	23.05	8.44
	9	2.436	23.00	9.44
	average	2.708	23.15	8.79

Table 3 Velocity analysis depending on position

location	*inner(㎜/㎲)*	*middle(㎜/㎲)*	*outer(㎜/㎲)*
0℃	2.750	2.686	2.416
30℃	2.776	2.726	2.546
60℃	2.748	2.723	2.674
90℃	2.851	2.647	2.600
120℃	2.782	2.698	2.584
150℃	2.809	2.686	2.533
180℃	2.812	2.736	2.522
210℃	2.782	2.756	2.478
240℃	2.871	2.749	2.495
270℃	2.743	2.685	2.473
300℃	2.749	2.723	2.427
330℃	2.803	2.731	2.436
average	2.840	2.712	2.515

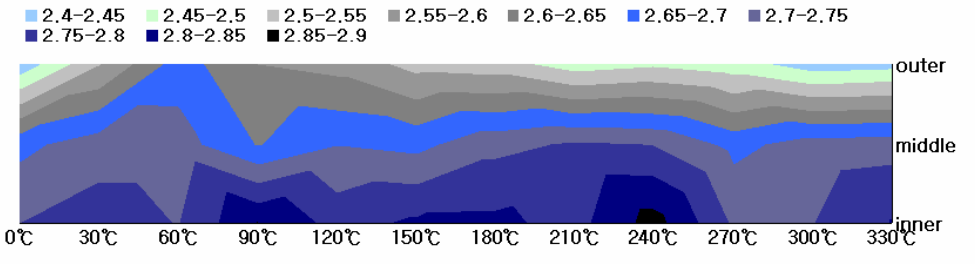
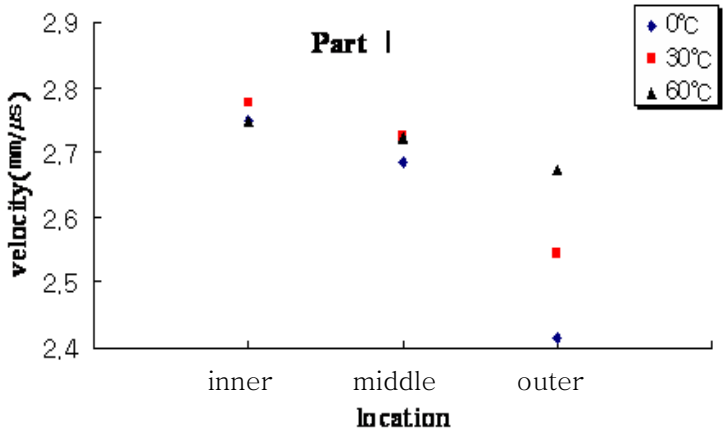
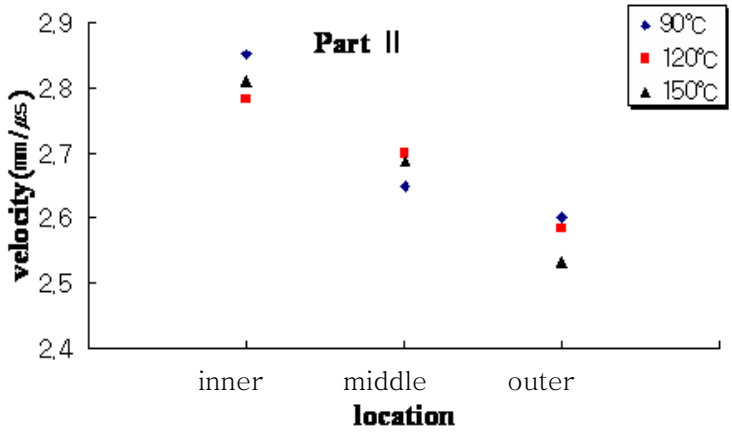


Fig. 12 Velocity analysis depending on location and angle of C/C composite brake disk

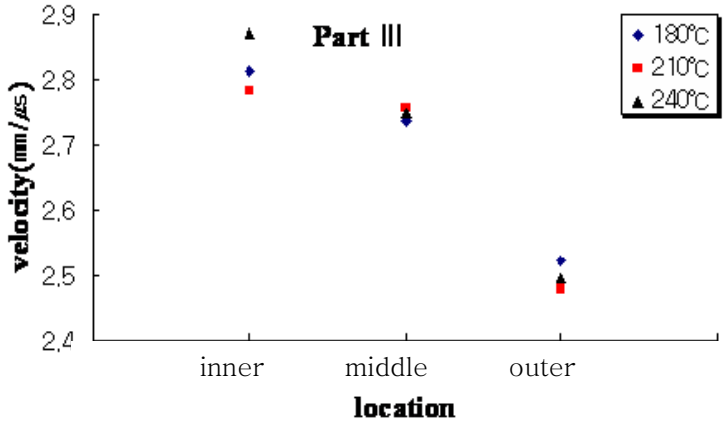


(a) Velocity analysis of Part Ⅰ

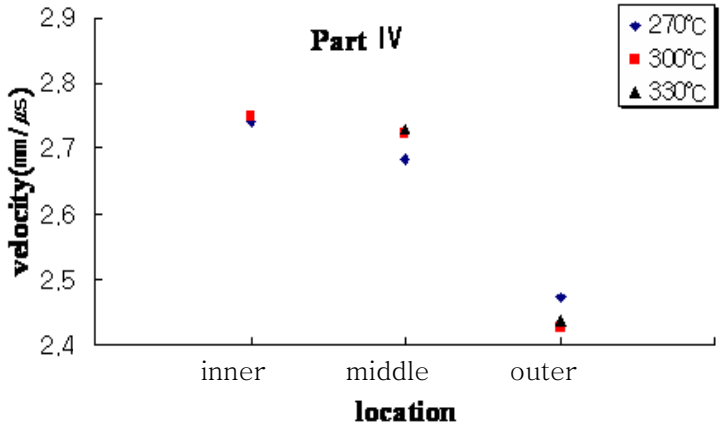


(b) Velocity analysis of Part Ⅱ

Fig. 13 Velocity analysis of each Part through the chart



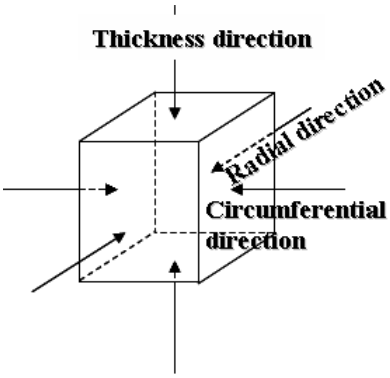
(c) Velocity analysis of Part Ⅲ



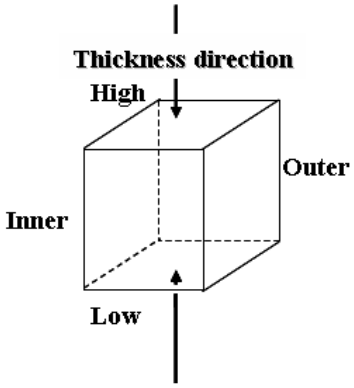
(d) Velocity analysis of Part Ⅳ

Fig. 13 Continued

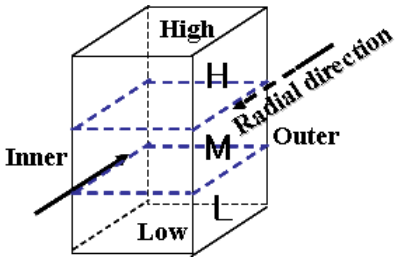
Fig. 14는 Fig. 11(b)와 같이 절단된 시험편에 대해서 3방향으로 초음파 속도 측정 방법을 타나냈다. Fig. 14(b)는 시험편의 두께 방향(thickness direction)에 대하여 중앙부분을 측정하였으며, Fig. 14(c)는 반경방향(radial direction)에 대하여 상(High), 중(Middle), 하(Low)로 나누어 실험을 하였다. 또한 Fig. 14(d)는 원주방향(circumferential direction)에 대하여 내경에서 외경 방향으로 I(Inner), M(middle), O(outer) 세부분으로 나누어 측정하였다. 절단된 시험편에 버니어캘리퍼스를 이용하여 각 모서리의 두께를 측정하여 부피를 결정하고 10^{-6}g까지 측정되는 전자저울을 이용하여 질량을 측정함으로써 각 C/C브레이크 디스크 각각의 조각에 대한 밀도를 결정하였다. Table 4에 C/C 디스크 브레이크 각각의 조각에 대하여 밀도를 나타냈다. 평균적인 밀도는 1.756×10^{-3}g/㎣(or 1.756×10^{3}kg/㎥) 이었으며 가장 높은 밀도는 내경 부분으로 ①번에 해당하며 1.794×10^{-3}g/㎣이었다. 가장 낮은 밀도는 외경 부분으로 ⑥번에 해당하며 1.692×10^{-3}g/㎣이었다. Fig. 15는 두께 방향에 대한 초음파 투과 속도와 밀도와의 관계를 나타냈으며, Fig. 15(a)는 시험편의 각 부분에 대한 초음파 투과 속도를 Fig. 15(b)는 시험편의 가부분에 대한 밀도를, Fig. 15(c)는 밀도와 초음파 속도와의 관계를 나타냈다. 이상으로부터 내경부분에서 고밀도 분포가 나타났고 외경부분에 저밀도가 나타남을 확인 할 수 있었다. Table 5는 두께 방향에 대해 속도를 측정한 값으로 전체적인 두께 평균은 23.03㎜이며 평균 초음파 투과 시간은 8.53㎲, 평균속도는 2.707㎜/㎲이었다. 브레이크 디스크 조각의 최고 속도는 Fig. 15(a)와 같이 ①번이 가장 높았으며 최저속도는 ⑥번이 나타내었다. 즉 밀도가 높은 내경 부분이 가장 높은 초음파 투과 속도를 나타내며 밀도가 낮은 외경부분에서 가장 낮은 초음파 투과 속도가 측정 되었다. 또한, Fig. 15(c)로 부터 밀도가 높을수록 투과속도가 높아지는 것을 확인 할 수 있었다.



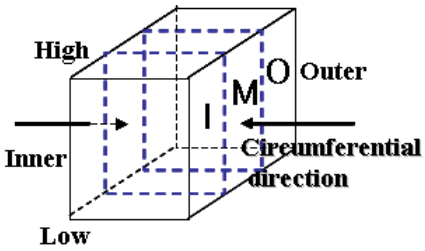
(a) Direction of velocity measurement



(b) Velocity measurement of thickness direction



(c) Velocity measurement of redial direction



(d) Velocity measurement of circumferential direction

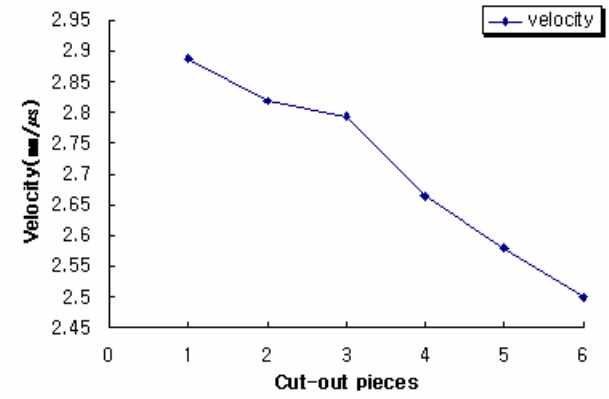
Fig. 14 Decision of direction of each piece for velocity measurement

Table 4 Density of each piece

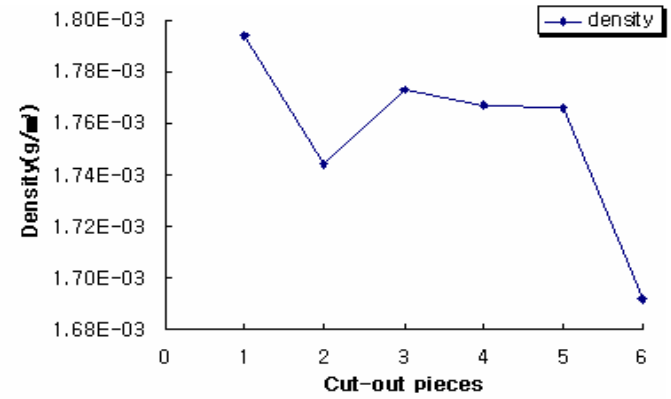
Cut-out piece	density	
	(g/mm^3)	(kg/m^3)
①	1.794×10^{-3}	1.794×10^{3}
②	1.744×10^{-3}	1.744×10^{3}
③	1.773×10^{-3}	1.773×10^{3}
④	1.767×10^{-3}	1.767×10^{3}
⑤	1.766×10^{-3}	1.766×10^{3}
⑥	1.692×10^{-3}	1.692×10^{3}
average	1.756×10^{-3}	1.756×10^{3}

Table 5 Velocity of each piece for thickness direction

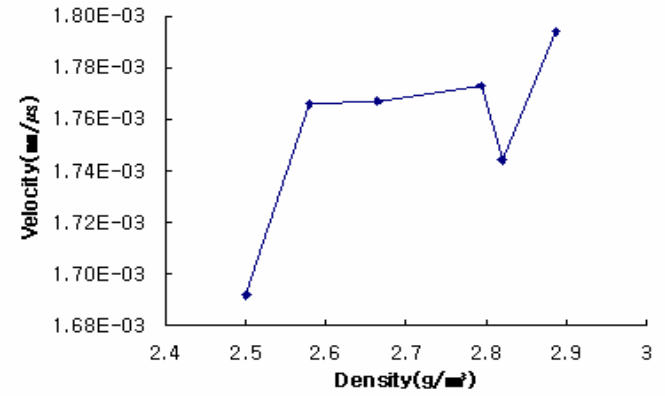
Cut-out piece	thickness direction speed		
	distance(㎜)	time(㎲)	velocity(㎜/㎲)
①	23.10	8.00	2.888
②	23.12	8.20	2.820
③	23.02	8.24	2.794
④	23.02	8.64	2.664
⑤	23.01	8.92	2.580
⑥	22.90	9.16	2.500
average	23.03	8.53	2.707



(a) Ultrasonic velocity of each piece



(b) Density of each piece



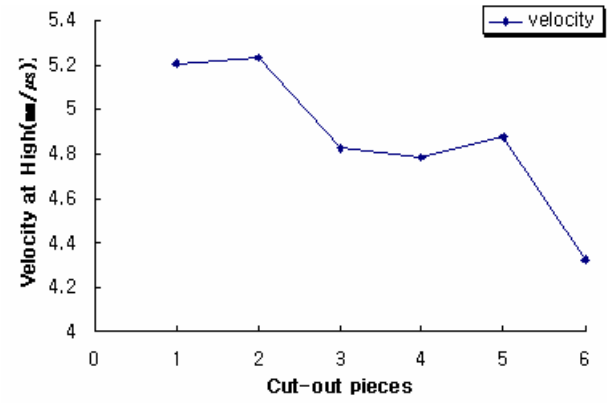
(c) Analysis of velocity depending on density

Fig. 15 Velocity analysis for thickness direction depending on density

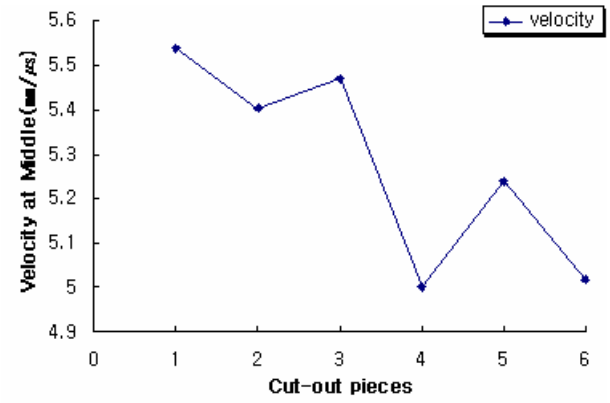
Table 6은 각각의 C/C브레이크 디스크 조각에 대해 Fig. 14(c)와 같이 상(H), 중(M), 하(L)로 나누어 초음파 속도를 측정한 결과이다. 절단과정 중에 발생 할 수 있는 오차를 확인하였으며, 또한 각 위치별로 간격을 측정하여 이를 속도 계산식에 반영하였다. 평균 두께는 14.58㎜이며 평균 투과 시간은 2.87㎲로 평균속도는 5.087㎜/㎲이었다. 이는 두께방향보다 약 1.9배 빠른 속도를 보였는데 이는 적층구성과 섬유 방향에 의한 영향으로 사료된다. 초음파의 진행 경로를 고려해 볼 때 두께 방향에 대해서는 C/C 복합재료의 적층 시 발생하는 내부 미소 간격 및 적층방향의 상이로 인하여 진행의 방해를 받지만 반경방향에 대해서는 복합재료의 층을 따라 이동하기 때문에 속도의 차가 발생하는 것으로 사료된다. 각 C/C 브레이크 디스크 조각에 대한 반경 방향의 상, 중, 하의 위치에 대한 속도는 전체적으로 중(M) 부분이 상(H), 하(L) 부분 보다 빠른 경향을 보였으며 Fig. 16(a)와 Fig. 16(d)에서 보는 바와 같이 외경으로 갈수록 속도가 줄어들고 있음을 확인 할 수 있었다. 반경방향에 대한 상(H) 부분에서는 Fig. 16(a)와 같으며 ⑤번을 제외한 나머지 조각들은 외경부분으로 갈수록 속도감소를 확인 할 수 있으며 중간(M) 부분과 하(L) 부분에서는 일정하지는 않지만 외경부분으로 갈수록 속도가 줄어들고 있음을 알 수 있다. Fig. 16(e)는 밀도와 속도의 관계를 나타낸 것인데 ⑤번 조각이 ⑥번과 ④번 조각보다 밀도가 더 높아 속도에 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 또한 Fig. 16(e)와 같이 밀도가 증가 할수록 속도의 증가는 다소 차이가 있으나 증가 하는 경향이 있음을 알 수 있다. ②번 조각은 다른 시험편에 비해 밀도는 높으나 평균속도(mean speed)가 현저하게 낮게 나타나는 것을 알 수 있는데, Fig. 16(a)에서 Fig. 16(c)를 보면 ②번에 대한 투과 속도는 상(H), 중간(M)부분에 대해서는 높으나 하(L) 부분에서 낮음을 볼 수 있는데 이는 시험편의 적층구성에 따른 영향으로 사료된다.

Table 6 Velocity of each piece for redial direction

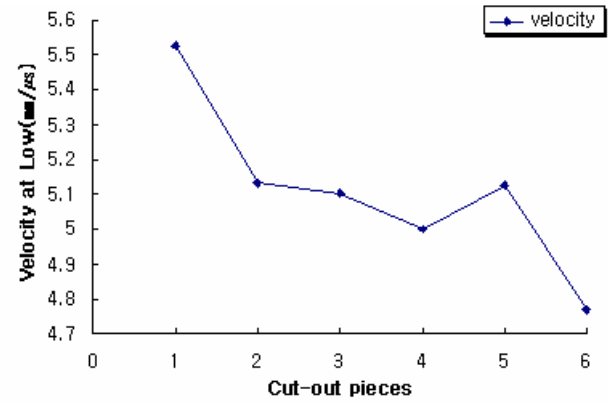
Cut-out piece	location	radial direction speed		
		distance(㎜)	time(㎲)	velocity(㎜/㎲)
①	high	15.20	2.92	5.205
	medium	15.50	2.80	5.536
	low	15.70	2.84	5.528
②	high	13.40	2.56	5.234
	medium	13.40	2.48	5.403
	low	13.35	2.60	5.135
③	high	15.25	3.16	4.826
	medium	15.31	2.80	5.468
	low	15.31	3.00	5.103
④	high	13.20	2.76	4.783
	medium	13.20	2.64	5.000
	low	13.20	2.64	5.000
⑤	high	15.40	3.16	4.873
	medium	15.51	2.96	5.240
	low	15.58	3.04	5.125
⑥	high	14.70	3.40	4.324
	medium	14.65	2.92	5.017
	low	14.50	3.04	4.770
average		14.58	2.87	5.087



(a) Velocity analysis at High of each piece

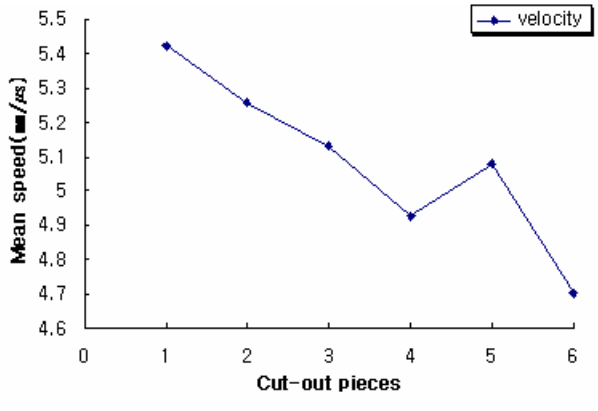


(b) Velocity analysis at Middle of each piece

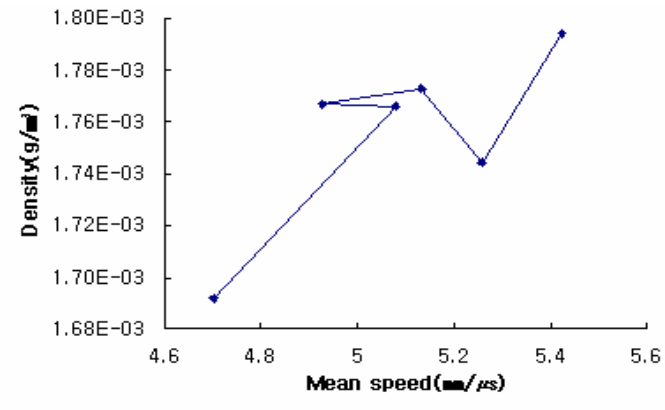


(c) Velocity analysis at Low of each piece

Fig. 16 Velocity analysis for radial direction depending on density



(d) Mean speed of each piece



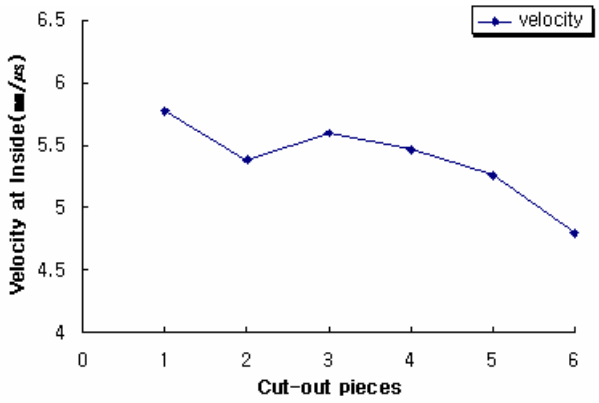
(e) Analysis of mean speed depending on density

Fig. 16 Continued

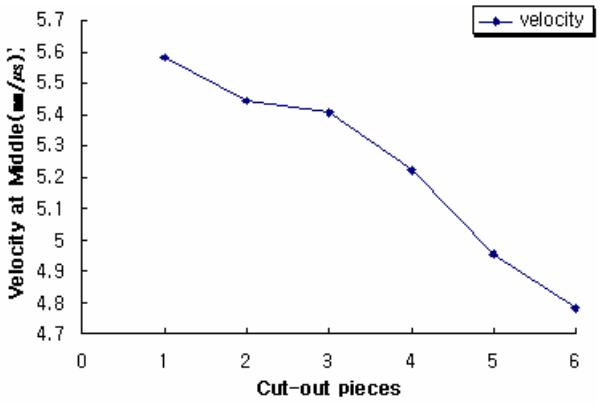
Table 7에는 Fig. 14(d)와 같은 측정 방법으로 C/C 브레이크 디스크 조각을 원주방향으로 측정한 값으로, 각 조각에 대해 내경(inside)에서 외경(outside)부분으로 I(Inner), M(Middle), O(Outer)로 나누어 속도를 측정한 결과를 나타냈다. 평균 두께는 19.67㎜이고 평균 초음파 투과 시간은 3.74㎲로 평균 속도는 5.274㎜/㎲이다. 두께방향의 속도보다 약 1.95배 빠른 속도이며 반경 방향에 비해 약 1.04배 빠른 것으로 나타났다. 반경방향과는 속도가 거의 근사함을 알 수 있으며 두께 방향으로는 반경방향과 마찬가지의 이유로 속도가 빠른 것으로 사료된다. 각 시험편의 I, M, O 부분에서 초음파 속도의 일정한 모습은 없지만 Fig. 17(d)와 같이 6개의 시험편중 ①번 시험편이 가장 빠른 평균 속도를 나타내고 있으며 ⑥번 시험편이 가장 낮은 속도를 나타내고 있는데 이는 두께방향의 속도와 마찬가지로 밀도의 영향으로 사료된다. Fig. 17(a) ~ (c)는 원주 방향 위치에 따른 속도를 분석한 것으로 내경부분과 중간부분은 속도가 일정하게 감소하고 있음을 나타내고 있으며 외경부분에 대해서는 ①번과 ②번을 제외한 나머지 시험편에 대해 일정하게 감소하고 있음을 나타내고 있다. Fig. 17(d)를 보면 ②번 시험편이 주위보다 속도가 낮음을 알수있는데 이는 ①번과 ③번에 비해 낮은 밀도의 영향으로 사료된다. Fig. 17(e)에는 각 조각들의 평균 속도와 밀도의 관계를 나타냈다. X축을 평균속도로 하였으며 Y축을 밀도로 하였다. 가장 좌측에 있는 것부터 ⑥번 시험편을 나타내며 ③번부터 ⑤까지는 밀도 증가에 따른 미세한 평균속도의 증가를 나타내고 있으며 ②번 시험편에 대해서는 ⑥번 시험편을 제외한 다른 시험편들보다 현저하게 낮은 평균속도를 나타내고 있음을 확인 할 수 있다. 이는 반경방향에서의 속도 측정에서도 볼 수 있었던 결과로 동일한 영향으로 사료된다.

Table 7 Velocity of each piece for circumferential direction

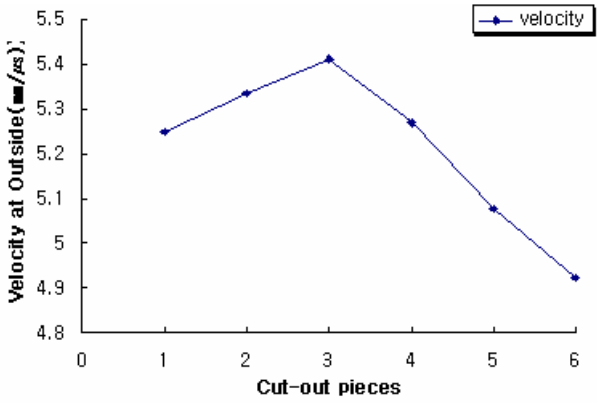
Cut-out piece	location	circumferential direction speed		
		distance(㎜)	time(㎲)	velocity(㎜/㎲)
①	high	19.40	3.36	5.774
	medium	19.20	3.44	5.581
	low	18.90	3.60	5.250
②	high	19.80	3.68	5.380
	medium	19.60	3.60	5.444
	low	19.20	3.60	5.333
③	high	20.15	3.60	5.597
	medium	19.90	3.68	5.408
	low	19.70	3.64	5.412
④	high	20.10	3.68	5.462
	medium	19.85	3.80	5.224
	low	19.60	3.72	5.269
⑤	high	20.00	3.80	5.263
	medium	19.82	4.00	4.955
	low	19.70	3.88	5.077
⑥	high	19.97	4.16	4.800
	medium	19.70	4.12	4.782
	low	19.50	3.96	4.924
average		19.67	3.74	5.274



(a) Velocity analysis at Inside of each piece

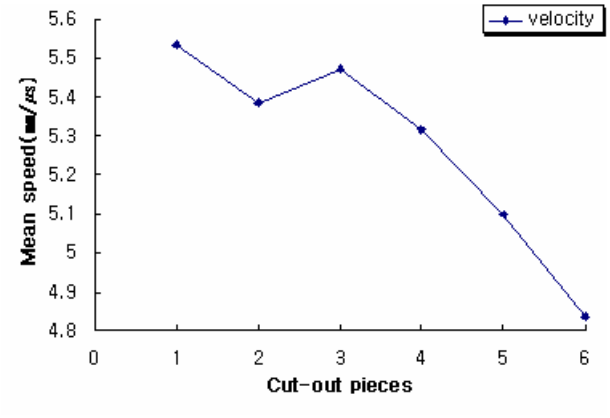


(b) Velocity analysis at middle of each piece

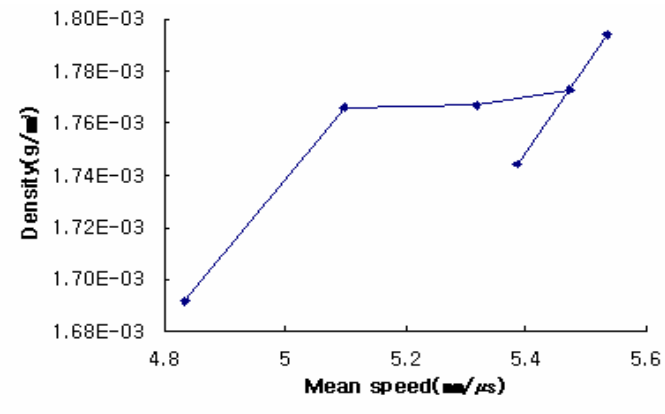


(c) Velocity analysis at Outside of each piece

Fig. 17 Velocity analysis for circumferential direction depending on density



(d) Mean speed of each piece



(e) Analysis of mean speed depending on density

Fig. 17 Continued

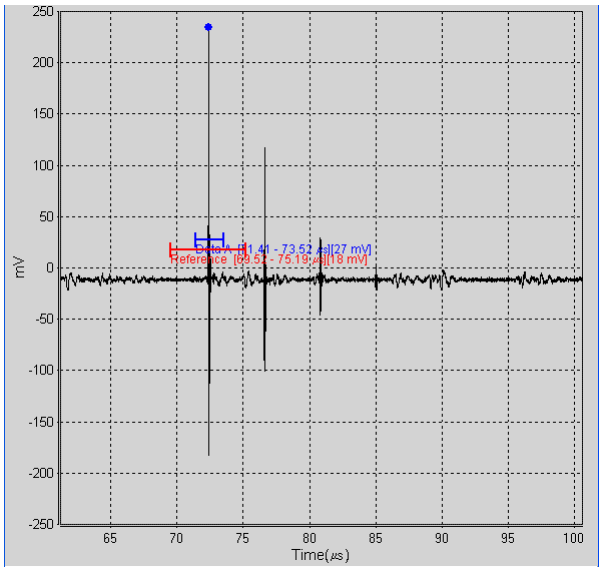
4-2-2 C-스캔표시법(C-scan Image)

4-2-2-1 펄스반사법(Pulse Echo Method)

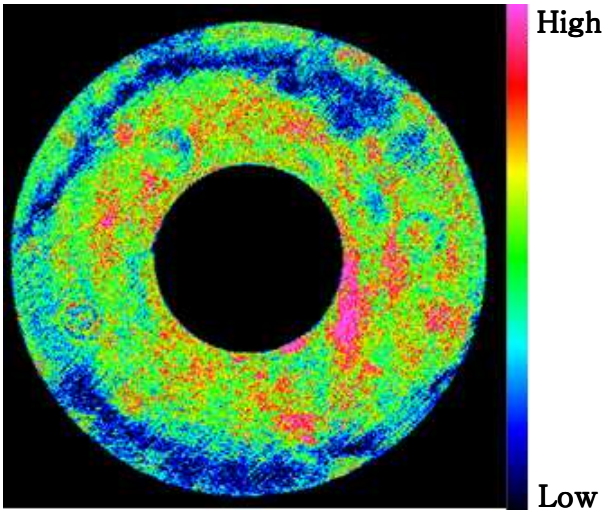
펄스반사법은 Fig. 1과 같은 원리로 하였으며 Fig. 8(a)와 같이 C/C 브레이크 디스크 시험편 전면에 대해 전체적인 C-스캔을 실시하였다. Fig. 8(b)와 같이 Part 별로 저면 에코(back wall echo)를 이용하여 실시하였다. Fig. 18(a)은 펄스반사법을 이용한 Z-scan과 C-scan 이미지를 나타냈다. 탐촉자를 C/C 브레이크 디스크 위에 올려놓은 후 표면에코(surface echo)에 대한 기준 위치를 설정해 주고 전면 에코의 피크점을 지정한 후 스캔영역을 설정한다. 스캔 영역은 360㎜(가로)×360㎜(세로)이며 횡방향으로 움직일 때 한번에 360㎜씩 움직이며 세로 방향으로는 1.0㎜가 움직이도록 설정한다. Fig. 18(a)는 C/C 브레이크 디스크를 통과하는 A 스캔의 모습을 볼 수 있는데 표면에코가 일정한 간격으로 나타나며 이에 대한 시간을 측정 할 수 있다. 이것은 물거리(water distance)와 탐촉자에서 시험편의 배면까지의 거리를 계산하면 수침법(water bath) 이용시 C/C 브레이크 디스크의 초음파 투과 속도를 계산 할 수 있다. Fig. 18(b)는 브레이크 디스크의 전체적인 모습을 스캔한 모습이며 우측에 있는 바(bar)는 신호증폭(amplitude)의 크기를 나타낸 것으로 위로 갈수록 신호증폭이 크다는 것을 나타낸다.

Fig. 19(a)는 직경 12.7㎜, 주파수는 5MHz이고 평면형 탐촉자(flat transducer)를 사용하여 표면에코를 기준으로 360㎜×360㎜크기로 스캔한 결과를 나타냈다. 일부 외경부분에 낮은 신호증폭을 나타내고 있는데 표면이 고르지 못하다는 것을 나타내는 것으로 사료된다. 또한 내경과 외경 끝부분은 파란색, 즉 낮은 신호증폭을 나타내고 있는데 이는 시험편의 끝

부분(edge) 현상에 의한 것으로 사료된다. 시험편 표면에 대한 더욱 정확한 관찰을 위해 고주파수(high frequency) 탐촉자를 이용하여 다시 실험을 하였다. 실험방식은 Fig. 18에 설명한 바과 같으며 탐촉자를 제외한 모든 조건을 동일하게 주었다. Fig. 19(b)는 직경 12.7㎜, 주파수 20MHz, 초점거리 50.4㎜인 탐촉자를 사용하여 실험을 실시하였다. Fig. 19(a)보다 매우 선명하게 표면을 관찰 할 수 있는데 이는 고주파 수탐촉자 사용에 따라 고분해능(high resolution)을 얻을 수 있기 때문이다. 전반적으로 외경부분이 신호증폭(amplitude)이 매우 낮으며 중간 부분과 내경부분부분에서의 표면에코가 높게 나타남을 관찰 할 수 있었다. Fig. 20은 C스캔 영역 내에서 위치에 따른 신호증폭을 확인 할 수 있도록 시간과 신호증폭의 관계를 RF파형(RF-wave)으로 나타냈다. Fig. 20(a)부분은 Fig 19.(b)의 브레이크 디스크 위에서 A-scan 이미지를 나타낸 것으로 붉은색 쪽으로 이동할수록 게이트(gate) 영역내의 신호증폭이 증가하며 파란색 쪽으로 이동할수록 신호증폭이 낮아짐을 관찰 할 수 있다. Fig. 20(b)는 C/C 브레이크 디스크 외에 한 지점을 선택했을 때의 A-scan으로 아무런 데이터를 얻을 수 없음을 의미한다. C/C 브레이크 디스크 중간부분에서 링모양(ring)의 형상을 볼 수 있는데 이는 고밀도화를 위해 CVI공정 시 사용되는 재료에 의한 미소자국으로 사료된다.

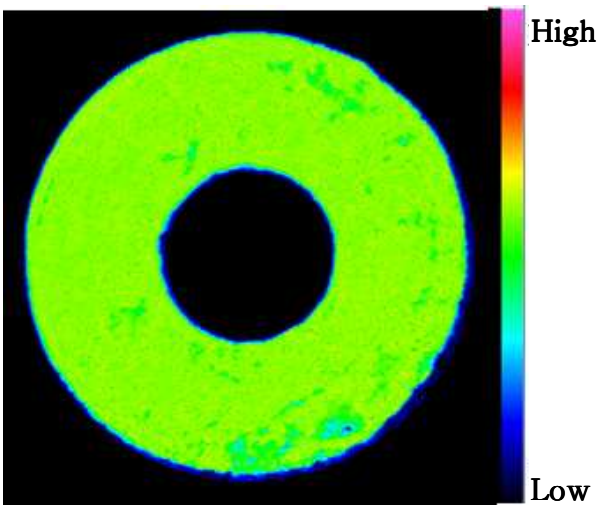


(a) Designation of gate for C-scan image processing

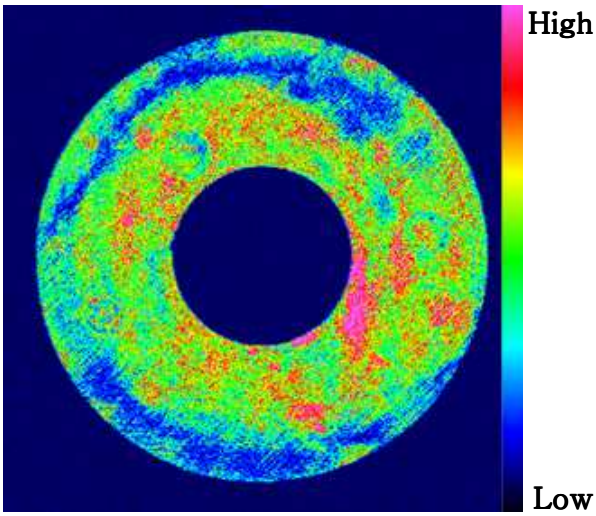


(b) C-scan image of C/C composite brake disk

Fig. 18 A-scan and C-scan image of C/C composite brake disk using pulse-echo method

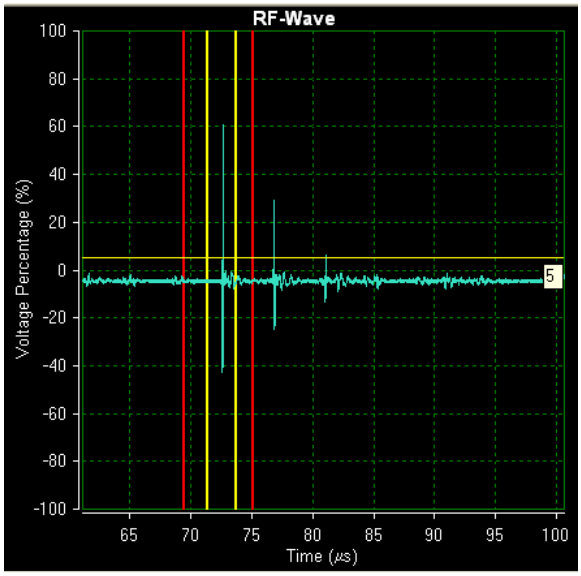


(a) C-scan image of C/C composite brake disk using a 5MHz transducer and 12.7 mm in diameter

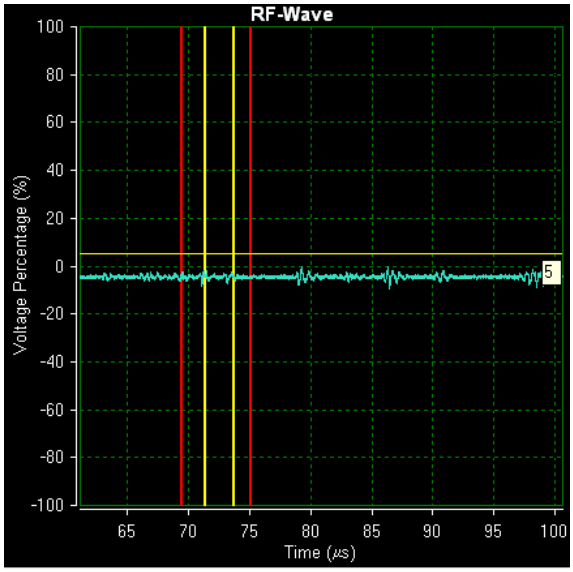


(b) C-scan image of C/C composite brake disk using a 20MHz transducer, 12.7 mm in diameter and focused 50.4 mm

Fig. 19 C-scan image using pulse-echo method with front surface of C/C composites brake disk



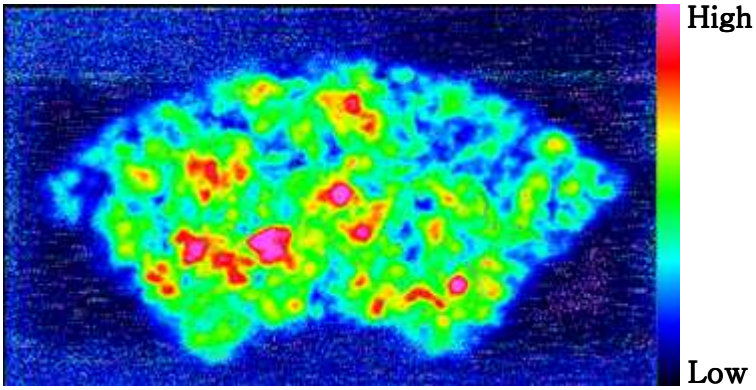
(a) Analysis of amplitude and time in C-scan image of C/C composite brake disk



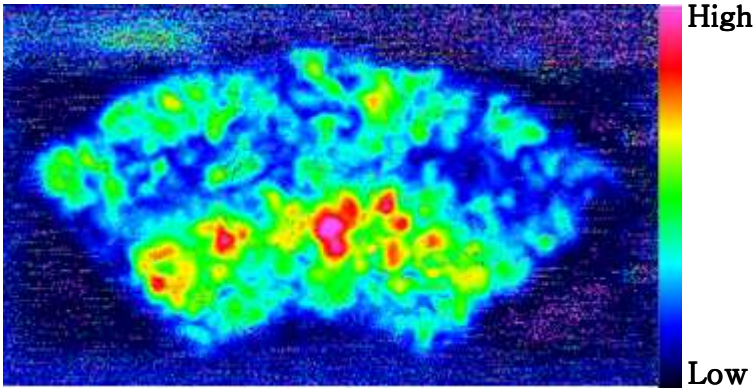
(b) Analysis of amplitude and time out C-scan image of C/C composite brake disk

Fig. 20 Analysis of amplitude and time depending on scan area

Fig. 21은 Fig. 7(b)의 각 Part에 따라 저면에코를 이용하여 C 스캔한 이미지를 나타냈다. 측정 방법은 수침조(immersion tank) 내에서 펄스에코 반사법을 이용하였다. 탐촉자는 파나메트릭사(Panametrics Co. Ltd)의 평면형(flat)이며 주파수는 1MHz, 직경은 1inch인 제품을 사용하였다. 스캔영역(scan area)은 250㎜(가로)×160㎜(세로)로 설정하였으며 세로 이동 간격은 1㎜로 설정하여 스캔하였다. Fig. 21(a)는 Part Ⅰ에 대하여 C 스캔한 것으로 내경부분과 중간부분이 높은 신호진폭을 나타내며 외경부분이 낮은 신호진폭을 나타내고 있음을 확인 할 수 있다. 외경부분에 파란색 영역이 넓은 이유는 적층사이의 미소 간격(micro interval)이 다수 존재하여 초음파의 감쇠와 산란이 많이 발생한 것으로 사료된다. 또한 이러한 적층사이의 미소 간격은 밀도의 저하를 가져와 초음파 속도를 느려지게 하는 원인으로 사료된다. Fig. 21(b)는 Part Ⅱ에 대하여 Fig. 21(a)와 동일하게 실험한 것으로 중간부분을 중심으로 외경부분과 내경부분의 신호진폭의 크기가 크게 달라지는 것을 관찰 할 수 있다. 내경부분에 빨간색의 분포, 즉 높은 신호진폭이 주로 나타나며 중간부분 이후부터는 낮은 신호진폭을 타나내고 있는데 이는 Fig. 21(a)와 동일한 영향으로 판단되며 미소 간격의 분포가 더욱 높기 때문으로 사료된다. Fig. 21(c)의 Part Ⅲ와 Fig. 21(d)의 Part Ⅳ 또한 Fig. 21(a), Fig. 21(b)와 동일한 조건하에서 실험이 진행되었으며 실험결과 또한 비슷한 경향을 나타내었으며 Fig. 21(d)의 Part Ⅳ는 Fig. 11(a)와 같이 피크지연측정법(Peak delay measurement method)을 이용한 초음파 속도 측정 실험 시 가장 큰 초음파 투과 속도 차를 나타내었는데 C 스캔 결과 역시 다른 Part들보다 큰 신호진폭의 차를 나타내고 있다. Part Ⅳ는 정밀 분석을 위해 양 끝부분이 19.7㎜와 20㎜로 절단된 상태에서 실험이 행해졌다.

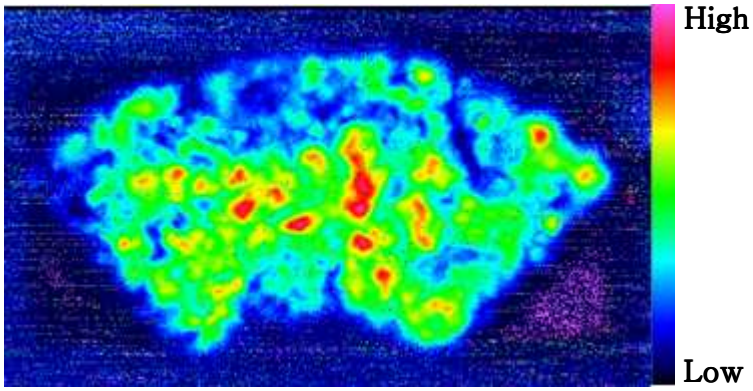


(a) Back-wall echo C-scan image for Part Ⅰ using pulse echo method in immersion tank with flat transducer that is 1 MHz and 1 inch in diameter(Panametrics Co. Ltd.)

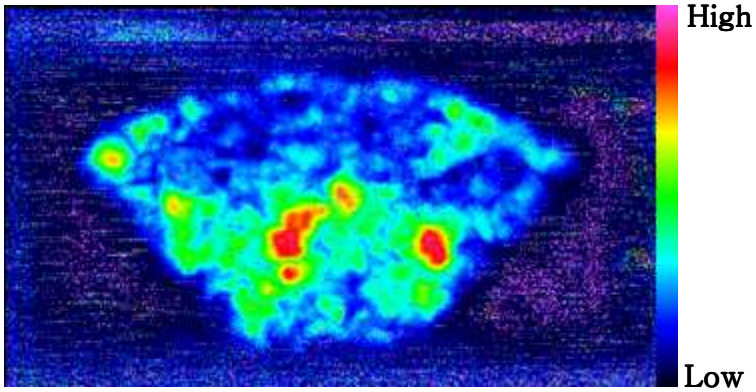


(b) Back-wall echo C-scan image for Part Ⅱ using pulse echo method in immersion tank with a flat transducer that is 1 MHz and 1 inch in diameter(Panametrics Co. Ltd.)

Fig. 21 Analysis of C-scan image of each Part using back-wall echo of Pulse-echo method



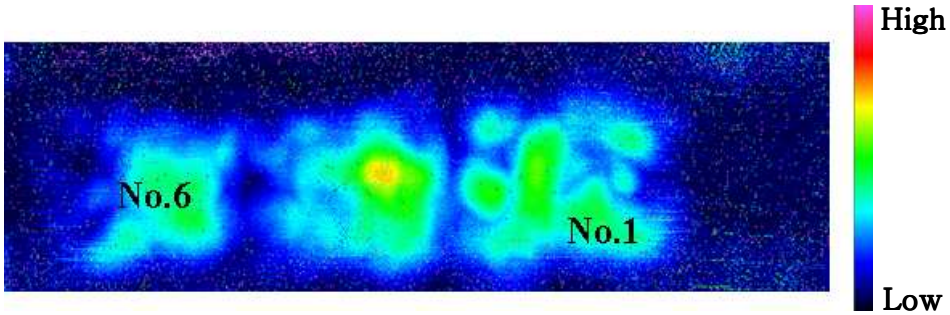
(c) Back-wall echo C-scan image for Part Ⅲ using pulse echo method in immersion tank with flat transducer that is 1 MHz and 1 inch in diameter(Panametrics Co. Ltd.)



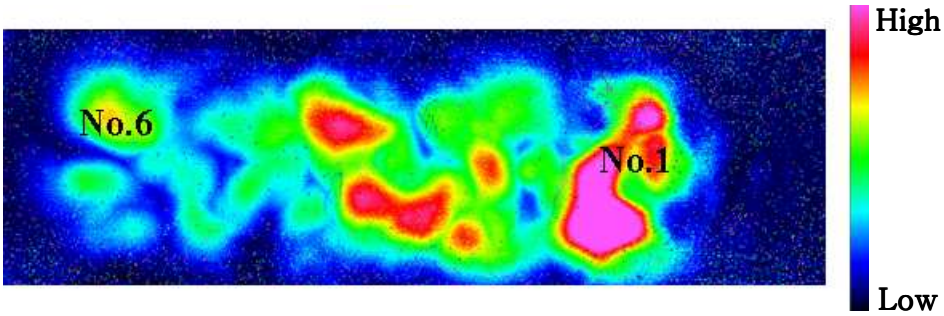
(d) Back-wall echo C-scan image for Part Ⅳ using pulse echo method in immersion tank with flat transducer that is 1 MHz and 1 inch in diameter(Panametrics Co. Ltd.)

Fig. 21 Continued

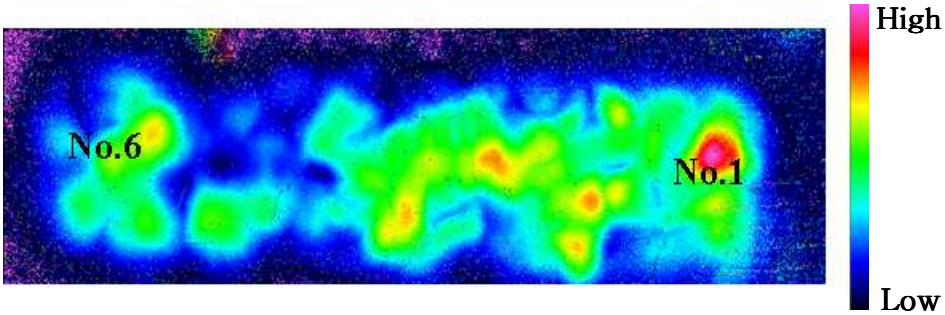
Fig. 22는 Fig. 11(a)와 같이 절단된 시험편들에 대해 두께방향, 원주방향, 반경방향에 대해 C 스캔한 것으로 평면형의 1inch, 1MHz의 탐촉자를 사용하여 실험을 실시하였다. Fig. 22(a) ~ (C)까지 모두 수침조 내의 저면에코를 이용하는 펄스반사법을 이용하여 C 스캔을 실시하였다. 시험편 ①번에서 ⑥번까지 평행하게 놓은 후 각 시험편들을 방향에 맞게 놓은 후 한 번에 스캔하였다. 좌측, 즉 ①번을 내경부분으로 하고 우측, 즉 ⑥번을 외경부분으로 하여 실험을 실시하였다. Fig. 22(a)는 두께 방향에 대해 측정한 것으로 두께 방향에 대해서는 중간부분③번, ④번 제외하고 전체적으로 낮은 신호진폭을 나타내고 있다. Fig. 22(b)는 원주방향에 대해 측정한 것으로 ①, ②, ③번은 높은 신호진폭을 ④번과 ⑤번은 낮은 신호진폭을 나타내었다. Fig. 22(c)는 반경방향에 대해 C 스캔한 것으로 ①번에서 신호진폭이 높게 나타났으며 ⑤번에서 가장 낮은 신호진폭을 나타났다. 각 시험편들의 각 방향마다 신호진폭이 다른 것은 피크지연측정법에 의한 초음파 속도 측정 시 초음파의 속도는 두께 방향보다 원주방향과 반경방향에서 두 배에 가까운 빠른 속도를 나타내었는데 섬유의 방향특성에 기인한 것으로 판단하였다. C 스캔 이미지 역시 두께 방향보다는 반경방향과 원주방향에서 더욱 뚜렷이 잘 나타났는데 이 또한 동일한 영향으로 사료된다. Fig. 23은 Fig. 8(b)의 두 개의 조각 중 아랫부분을 스캔한 것으로 (a)는 시험편의 두께방향으로 실시하였으며 (b)는 원주방향으로 실시한 결과를 나타냈다. Fig. 23(a)는 내경(inner)부분이 속도가 높게 나타났으며 내경보다는 중간이 중간보다는 외경부분의 신호진폭의 크기가 낮게 나타났다. Fig. 23(b)에서는 중간부분이 가장 높으며 외경부분이 가장 낮게 나타났다. 이는 시험편의 두께가 얇아 모서리(edge)의 영향을 크게 받은 것으로 사료된다.



(a) C-scan image of thickness direction of each piece using Pulse-echo method with a transducer that is 1 MHz and 1 inch in diameter

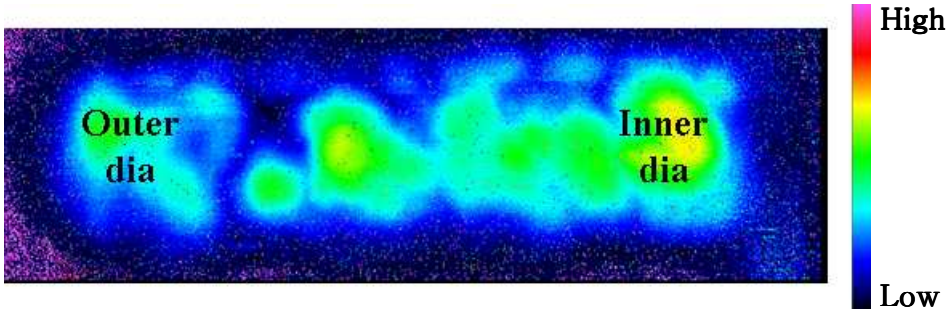


(b) C-scan image of circumference direction of each piece using Pulse-echo method with a transducer that is 1 MHz and 1 inch in diameter

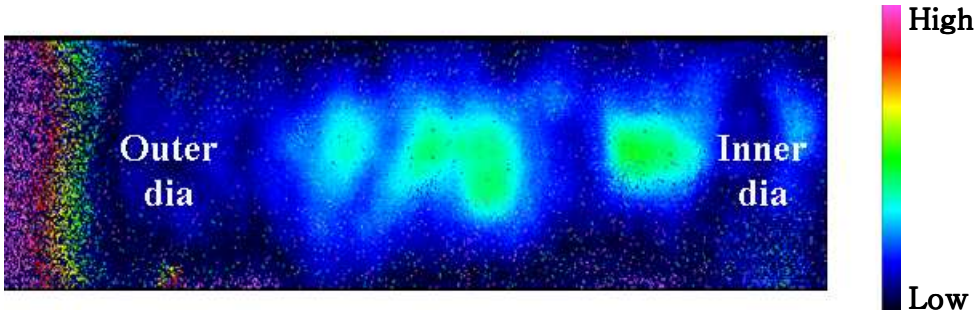


(c) C-scan image of radial direction of each piece using Pulse-echo method with a transducer that is 1 MHz and 1 inch in diameter

Fig. 22 Analysis of C-scan image using back-wall echo of Pulse-echo Method according to direction of each piece



(a) C-scan image of thickness direction of # cut sample using Pulse-echo method with a transducer that is 1 MHz and 1 inch in diameter



(b) C-scan image of circumferential direction of # cut sample using Pulse-echo method with a transducer that is 1 MHz and 1 inch in diameter

Fig. 23 Analysis of C-scan image using back-wall echo according to direction of a under piece

4-2-2-2 투과탐상법(Through Transmission Method)

투과탐상법은 제작된 지그(jig)의 제한으로 전체 영역에 대해서 한 번에 스캔하지 못하여 Part 별로 실시하였다. Fig. 24는 Part Ⅲ에 대한 스캔 영역을 표시한 것이다. 사용원리와 방법은 Fig. 2와 같으며 Fig. 18(a)와 같이 스캔할 표면에코 및 저면에코에 게이트를 걸어주고 피크점을 지정하여 스캔하는 방식으로 펄스반사법 실험과 동일한 방법으로 실시하였다. Fig. 25는 Fig. 24의 스캔영역(scan area) 부분에 대하여 표면에코(surface echo)를 기준으로 스캔한 결과를 나타냈다. 수침조 내에서 주파수는 5MHz, 직경은 6.35㎜ 인 탐촉자를 사용하였다. 스캔영역에 대해 다소 높은 신호증폭으로 나타났는데 이는 근거리에서 5MHz의 고주파수 탐촉자를 사용했기 때문으로 사료된다.

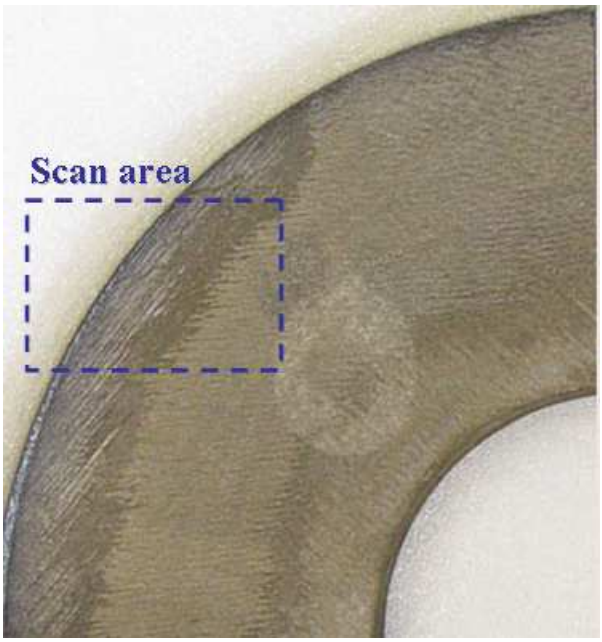
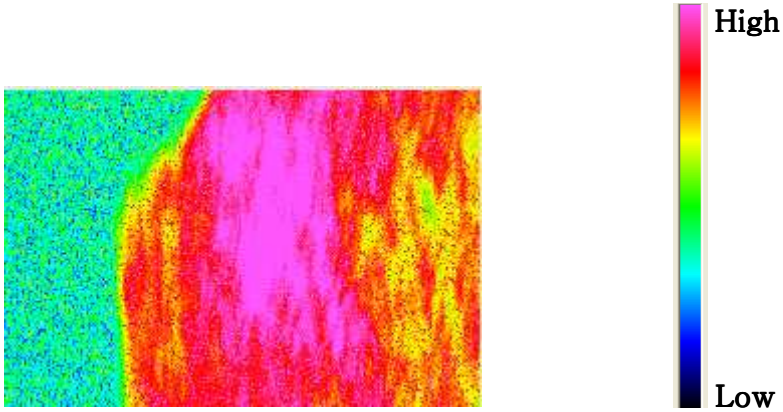
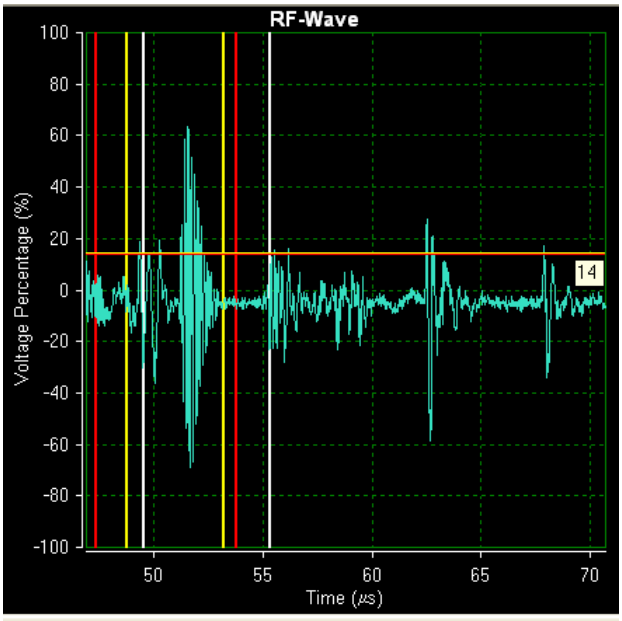


Fig. 24 Decision of scan area in Part Ⅲ of C/C composite brake disk



(a) C-scan image of Part Ⅲ (b) Amplitude

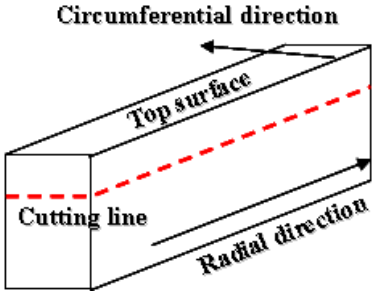


(c) Analysis of amplitude and time in C-scan image

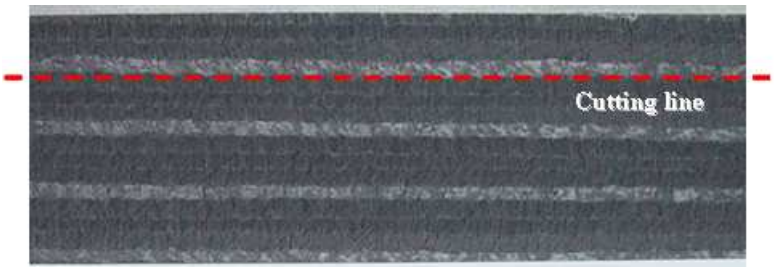
Fig. 25 C-scan image of C/C composite brake disk at front surface of C/C composites using through transmission method with transducer that is 5MHz and 6.35 mm in diameter

4-2 광학현미경관찰(Microscopic Examination Testing)

적층구성에 대해 더욱 면밀히 관찰하기 위해 적층지점에 대하여 다이아몬드 커터기를 이용하여 Fig. 26과 같이 절단하였으며 절단된 면들에 대해서는 폴리싱머신(polishing machine)을 이용하여 표면처리를 하였다. 절단된 면(cutting section)들에 대해 80배율인 광학현미경(microscope)으로 관찰 하였다. Fig. 26은 절단될 지점에 대해 표시 하였으며 Fig. 27은 절단된 면들에 대하여 관찰 지점을 표시하기 위하여 도식하였다. 내경부분, 중간부분, 외경부분으로 크게 세부분으로 구분하여 한 부분에 대하여 연속적인 촬영을 하였다. 위쪽 C/C 브레이크 디스크 조각과 절단된 면과 아래쪽 C/C 브레이크 디스크 조각은 원주방향으로의 육안관찰시 서로 다른 적층구성임을 확인 할 수 있다. 절단 후 현미경 관찰시 위쪽 디스크 조각은 45°의 적층구성을 나타내고 있으며 미소간격에 대해서는 외경보다는 내경부분이 적게 나타나면 간격의 크기 또한 내경부분이 더 적게 나타남을 관찰 할 수 있었다. Fig. 29는 C/C 브레이크 디스크 조각의 아랫조각을 절단면을 관찰한 것으로 0°의 적측구성을 나타내고 있다. (a)는 내경부분의 위치를, (b)는 중간부분, (c)는 외경부분을 나타냈다. (a)는 내경부분의 밀집함과 안정적인 구성을 볼 수 있지만 외경부분에 대해서는 다소 불안정한 물결모양의 적층형태를 확인 할 수 있으며 미소간격 크기에 대해서도 내경과 외경부위의 차를 확실히 나타나는 것을 관찰 할 수 있다. 이러한 현미경의 관찰은 초음파 투과속도 측정 및 펄스반사법을 이용한 저면에코를 기준으로 C 스캔 이미지 처리하였을 때의 의견을 뒷받침 할 수 있는 근거가 된다. Fig. 30은 Fig. 11(b) 시험편의 ②번에 대해 관찰한 것이며 Fig. 31은 ⑥에 대한 것으로 0° 구성을 이루는 적층부분에서 ⑥번 시험편이 더욱 미소간격 이 많이 발생하였다.

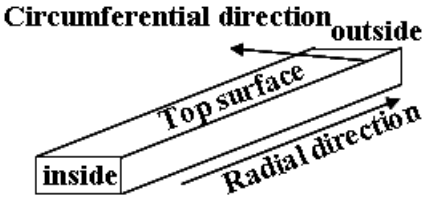


(a) Cutting location of a cut-out piece

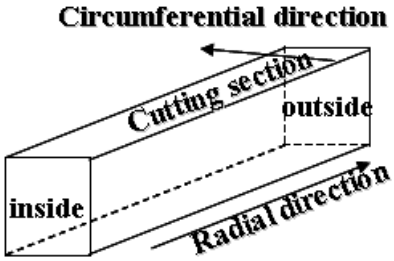


(b) Cutting location in a partial cross section of picture

Fig. 26 Cutting location of a cut-out piece for Microscopic Examination Testing

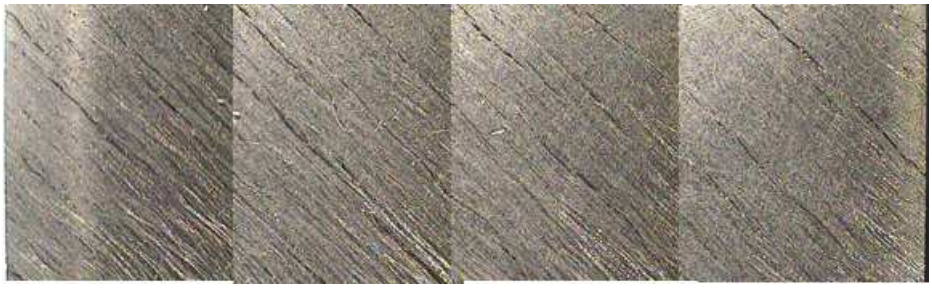


(a) The upper piece of a cut-out piece after cutting

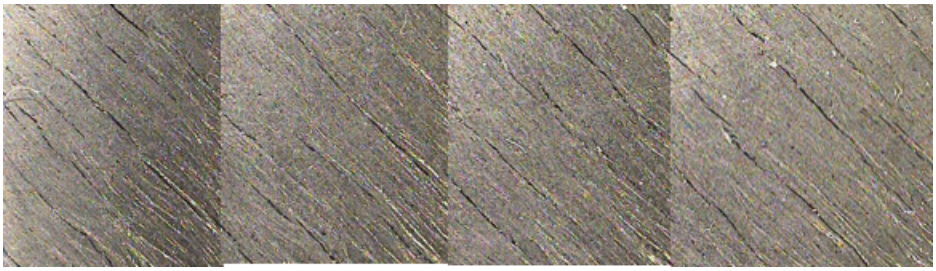


(b) The under piece of a cut-out piece after cutting

Fig. 27 Position for microscopic examination testing in cutting section



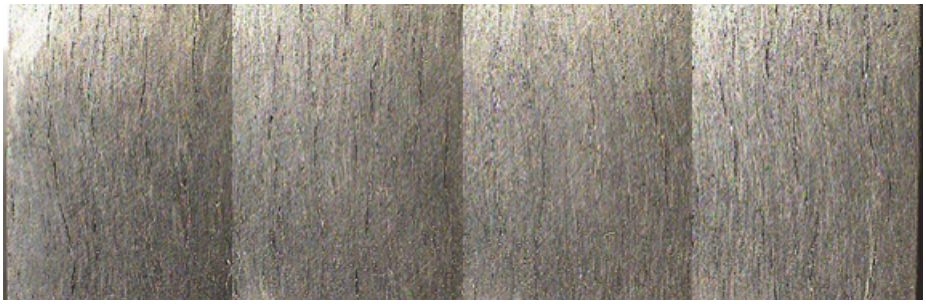
(a) Picture of inside position in cutting section of a upper piece



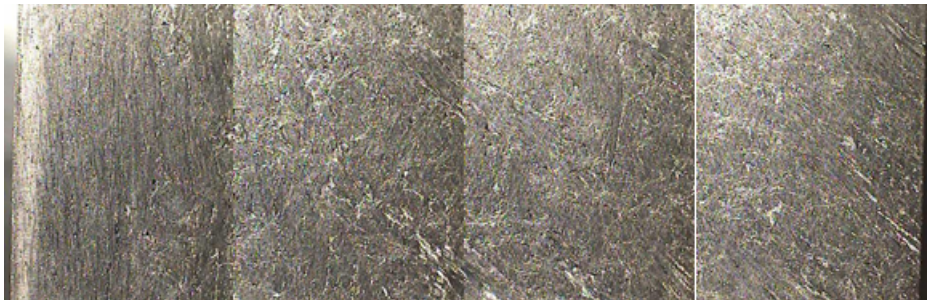
(b) Picture of middle position in cutting section of a upper piece

(c) Picture of outside position in cutting section of a upper piece

Fig. 28 Microscopic examination testing of 80 magnifications about the upper piece



(a) Picture of inside position in cutting section of a under piece



(b) Picture of middle position in cutting section of a under piece

(c) Ppicture of outside position in cutting section of a under piece

Fig. 29 Microscopic examination testing of 80 magnifications about the under piece

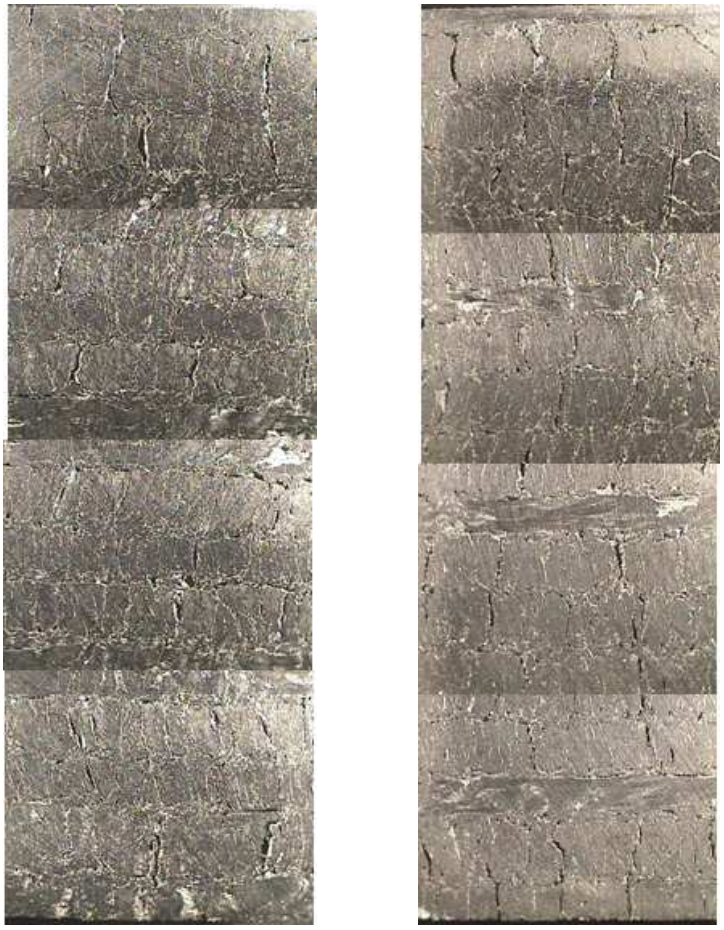
(a)

(b)

(a) Analysis of No. ② piece for circumferential direction

(b) Analysis of No. ② piece for radial direction

Fig. 30 Microscopic examination testing of 80 magnifications about No. ② piece



(a) (b)

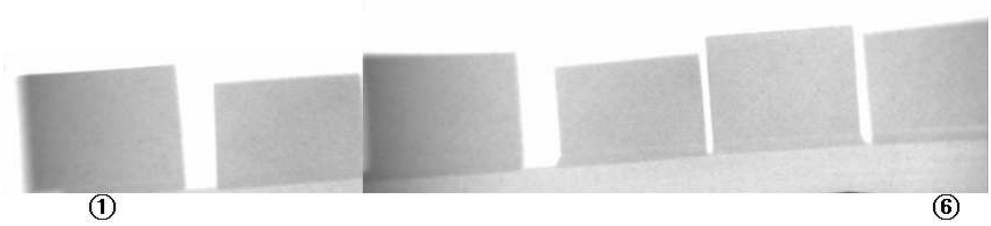
(a) Analysis of No. ⑥ piece for circumferential direction

(b) Analysis of No. ⑥ piece for radial direction

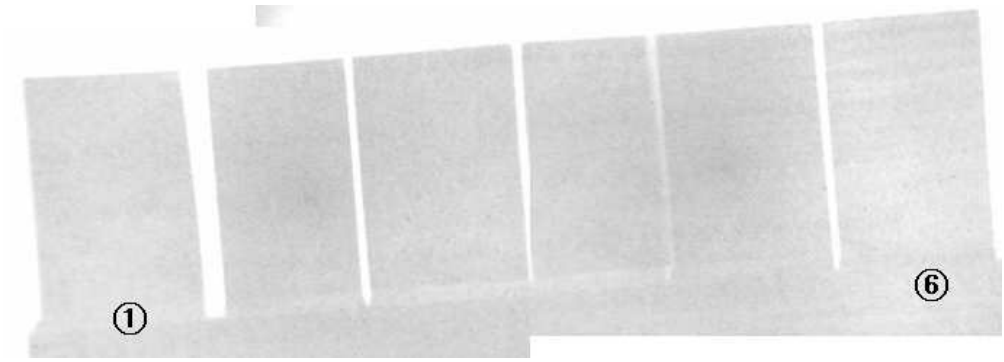
Fig. 31 Microscopic examination testing of 80 magnifications about No. ⑥ piece

4-3 X-ray 관찰(Radiographic Testing)

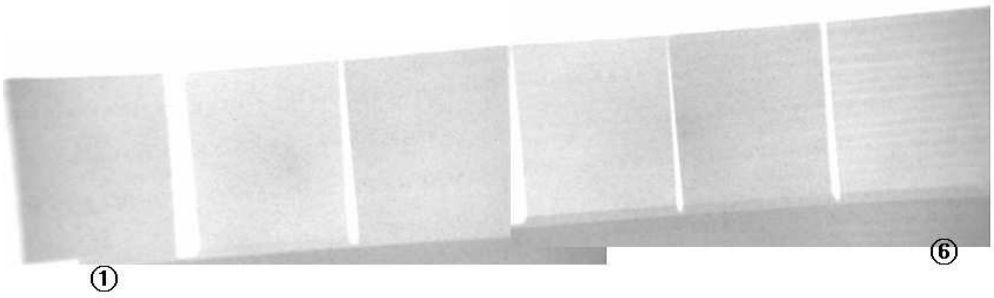
비파괴 검사는 크게 6가지로 나누는데 초음파에 대한 검사는 앞에서 실시했던 결과와 같으며 X-ray을 투과시켰을 때의 반응을 관찰하기 위해 X-ray 방사능 검사를 하게 되었다. X-ray 방사능 검사는 산업현장에서 금속재질의 제품에 대한 결함(defect) 검사에 주로 사용되며 결함의 위치 및 개수 등을 정확히 파악할 수 있는 유용한 비파괴 검사이다. 방사능 검사 또한 초음파 비파괴 검사와 동일하게 Fig. 11(b)의 ①번부터 ⑥반까지의 조각들에 대해 Fig. 32와 같이 두께방향, 원주방향, 반경방향으로 나누어 검사를 실시하였다. Fig. 32(a)에 C/C 브레이크 디스크 각 부분을 X-ray가 지나가는 방향으로 두께방향을 맞추어 투과 시킨 사진을 나타냈다. X-ray는 투과성이 좋아 복합재료에 대해서는 그냥 투과하는 성질이 있으며 Fig. 32(a)의 정확한 분석은 다소 어려웠다. 하지만 투과 되는 빛의 양의 차이에 따라 농도가 조금씩 다르게 나타나는데 좌측에 있는 ①번과 ③번 시험편이 다소 진하게 나타났으며 원주방향에 대해서는 Fig. 32(b)에서와 같이 ⑥번 시험편을 제외하고 나머지 시험편들은 X-ray 투과량이 비슷한 수준으로 관찰 되었다. 반경방향에 대해서는 Fig. 32(c)에서와 같이 ②번 시험편을 제외하고 모두 비슷한 수준으로 관찰 되었다. 방사능 검사를 통해 C/C 브레이크 디스크에 대한 정밀한 검사는 초음파 비파괴 검사가 더 뛰어남을 알 수 있었다. 하지만 X-ray에 대해 더욱 많은 연구가 이루어진다면 복합재료에 대한 연구에도 유용하게 사용될 수 있을거라 판단한다.



(a) X-Ray image for thickness direction of C/C composite brake disk



(b) X-Ray image for Circumferential direction of C/C composite brake disk



(c) X-Ray image for radial direction of C/C composite brake disk

Fig. 32 Radiographic Testing of each piece that is from No. ① to No. ⑥

제 5 장 결 론

다양한 비파괴 검사법을 이용하여 C/C 브레이크 디스크의 특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 피크지연측정법을 이용하여 C/C 브레이크 디스크의 두께방향에 대한 초음파 투과 속도를 측정한 결과 내경부분의 평균속도는 2.840㎜/㎲, 중간부분의 평균 속도는 2.712㎜/㎲, 그리고 외경부분의 평균속도는 2.515㎜/㎲로 나타났으며 내경부분에서 외경부분으로 갈수록 속도가 늦게 나타남을 확인 할 수 있었다.

2. 절단된 C/C 브레이크 디스크 조각을 피크지연측정법으로 두께방향, 원주방향, 반경방향에 대하여 초음파 투과 속도를 측정한 결과 두께방향의 평균속도는 2.707㎜/㎲로 나타났으며, 원주방향의 평균속도는 5.274㎜/㎲로 두께방향의 평균속도에 비해 1.95배 빠르며, 반경방향의 평균속도는 5.087㎜/㎲로 두께방향의 평균속도에 비해 1.90배 빠르게 나타났다.

3. C/C 브레이크 디스크의 밀도와 초음파 속도와의 관계를 분석하기 위하여 각 조각에 대하여 밀도를 측정하였으며, 측정결과 평균밀도는 1.756×10^{-3}g/㎣이었으며, 내경부분에 위치한 ①번 조각이 1.794×10^{-3}g/㎣으로 가장 높게 나타났으며 외경부분에 위치한 ⑥번 조각이 1.692×10^{-3}g/㎣으로 가장 낮게 나타났다. 그 결과 C/C 브레이크 디스크에 대한 초음파 투과 속도와 밀도와의 관계는 밀도가 높을수록 초음파 투과 속도가 높게 나타남을 확인 할 수 있었다.

4. C/C 브레이크 디스크에 대하여 전체적인 균질성 평가를 위해 C-scan 표시법을 적용하였다. C/C 브레이크 디스크의 각 Part를 펄스반사법으로 측정한 결과 내경부분에서 높은 신호진폭과 외경부분에서 낮은 신호진폭을 관찰 할 수 있었다.

5. C/C 브레이크 디스크의 적층구성을 확인하기 위해 두께방향, 원주방향, 반경방향에 대하여 80배율의 광학현미경으로 관찰하였다. 적층구성은 0°와 45°의 적층구성을 보이며 내경부분이 외경부분보다 미세균열 및 기포의 수가 적게 나타났다. 하지만 내경부분의 경우 일부 뒤틀림변형(warpage)이 관찰되었다.

6. C/C 브레이크 디스크의 특성을 연구하기 위하여 X-ray검사를 적용하였다. 검사결과 두께방향에 대한 측정은 ①번과 ③번이 잘 투과되지 않았다. 원주방향과 반경방향에 대해서는 ⑥번과 ②번 시험편이 잘 투과되었는데 전체적으로 투과량이 비슷하여 판단에 어려움이 있었다.

Appendix

Air-coupled 초음파 비파괴 검사*(Air-coupled ultrasonic testing)*

지금까지의 연구는 탐촉자와 시험재료의 접촉을 통해 이루어지고 있다. 시험편과 탐촉자의 접촉은 접촉매질의 사용을 의미하게 되는 이러한 접촉매질에 장시간 노출되게 되면 결국 시험편에도 나쁜 영향을 줄것이다. Fig. 33 비접촉 방식의 Air-coupled 초음파 비파괴 검사로써 초음파를 내보내는 탐촉자(transmitter)와 이를 수신하는 탐촉자(receiver)를 시험편과 일정한 거리를 유지하며 검사하는 방식이다. 탐촉자와 연결된 Air scan 장비에서 검사결과를 표시하며 이를 다시 컴퓨터로 받아서 동시에 분석이 가능하게 제작되어 있다. Fig. 34는 주파수가 400kHz, 직경이 25.5㎜인 Air-coupled 탐촉자(air-coupled transducer)를 이용하여 피크지연측정법을 통하여 실험한 결과이다. 초기단계여서 아직 송신펄스 및 표면에코에 대한 분해능이 매우 낮은 편이며 지속적인 연구가 이루어진다면 초음파 비파괴 검사에 혁신적인 시험방법을 제시할 수 있을 거라 생각한다.

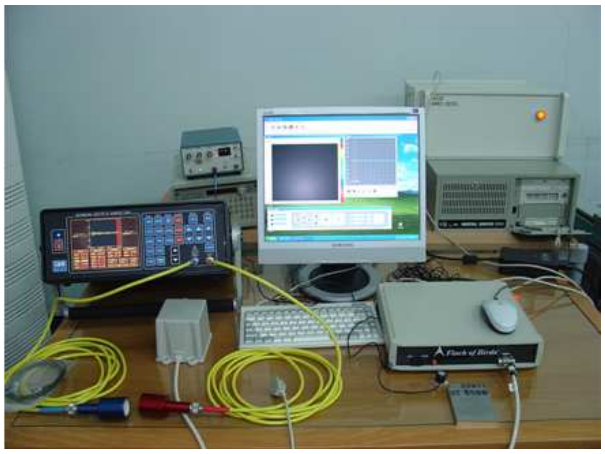
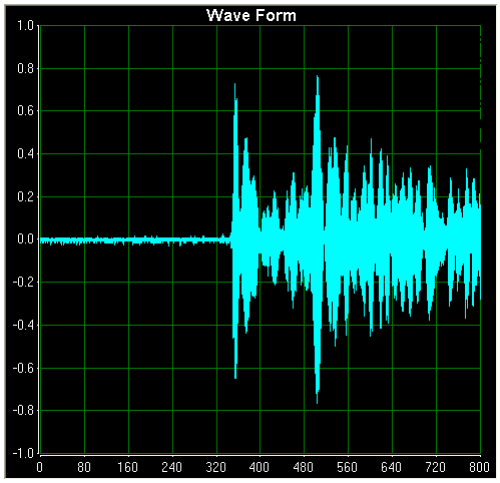
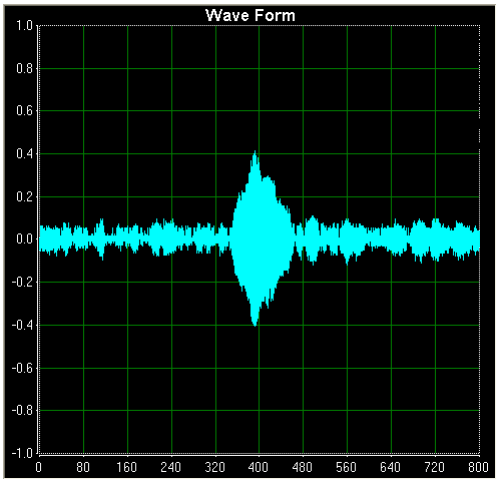


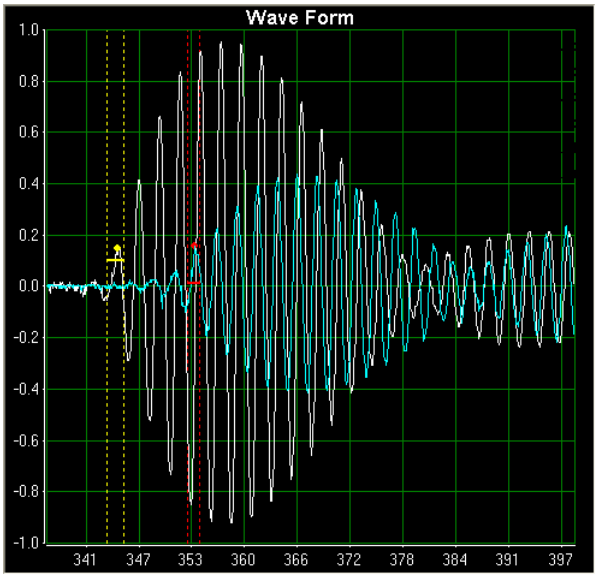
Fig. 33 Mechanized air-coupled ultrasonic C-scan in the laboratory using a commercially available scanner



(a) Reference signal



(b) Specimen signal



(c) Measurement between reference and specimen signal

Fig. 34 Air-coupled ultrasonic testing using noncontact air-coupled transducers (400kHz , 25.5 mm in diameter)

참 고 문 헌

(1) Seong T. Woo and Jea R. Youn, "Friction and Wear Behavior of Carbon/Carbon Composite for aircraft Break Material.", Jounal of KSLE(1993), Vol. 9, No. 1, pp.62-69

(2) R. J. Zaldivar, R. W. Kobayashi, G. S. Rellick and J. M. Yang. "Carbon" Vol. 29, pp.1145

(3) Yi Woon Jeong and Tae Jin Kang, "Mechanical Properties of Carbon/Carbon Composite Fabricated with Modified Matrix.", Journal of Korean Fiber Society(1997), Vol. 34, No. 11, pp.771-775

(4) Bajian Pu and Qizhen Huang. "Triborogical Characteristics of C/C Composite.", Lanzhou Carbon Industry Cooperation.

(5) G. Rellick, Carbon(1990), Vol. 28, pp.589

(6) Im K. H., Park N. S., Kim Y. N.and Yang I. Y., "A Study on Impact Characteristics of the Stacking Sequences in CFRP Composites Subjected to Falling Weight Impact Loading", International Journal of Automotive Technology, Vol. 4, No. 4, pp.203-211,2003.

(7) Buckley J. D.,"Caron-Carbon, An Overview." Ceramic Bulletin, Vol. 67, No. 2, 1988, pp. 364-368

(8) Fitzer E., "The Future of Carbon-Carbon Composites," Carbon, Vol. 25, 1987, pp.163-190

(9) 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

(10) 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

(11) 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

(12) Stimson I. L. and Fisher R.,"Design and Engineering of Carbon Brakes," Phil. Trans. R. Soc. Lond, A 294, 1980, pp. 583-590

(13) 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

(14) Carbon/Carbon Brake Disk Was Provided by a Certain Company

(15) 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

(16) 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

(17) 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

(18) Seong. T. Woo and Jae R. Youn, 1993, "Friction and Wear Behavior of Carbon/Carbon Composites for Aircraft Brake Material", Journal of KSLE, Vol. 9, Nov. 1, pp.62-63

(19) Joon-seok. Lee and Tea Jin. Kang, 1997, "Effect of Surface Treatment of Carbon fiber on the Impact Property of Carbon/Carbon Composites", Journal of Korean Fiber Socity, Vol. 34, Nov. 12, pp.884-885