

원자력급 흑연의 산화 정도에 따른 초음파특성 변화 및 초음파탐상의 타당성 연구

Feasibility of Ultrasonic Inspection for Nuclear Grade Graphite

박재석*[†], 윤병식**, 장창희***, 이종포*

Jae Seok Park*[†], Byung Sik Yoon**, Chang Heui Jang*** and Jong Po Lee*

초 록 최근 VHTR(very high temperature reactor)에 대한 연구에서 흑연이 노심내 구조재, 반사재, 감속재로서 가장 적절한 재료로 인식되고 있다. 운전온도는 약 900℃로 원자로 내부에 유입되는 소량의 불순물에도 흑연은 산화되기 쉬우며 산화된 흑연은 공극률이 증가하며 구조재료로서 가져야 할 파괴인성이 낮아진다. 본 연구에서는 산화 전후의 흑연에 대하여 초음파특성을 측정하고, 이를 기반으로 흑연에 대한 초음파탐상검사의 유효성을 타진하였다. 흑연의 초음파특성 측정 결과 초음파속도는 탄소강의 약 1/2, 음파 감쇠는 5배 이상, 신호대잡음비는 약 1/3로 측정되었다. 산화 후, 초음파속도는 as-received 상태에 비하여 미소하게 감소되었으나 초음파감쇠는 200% 이상으로 그 차이가 두드러지게 나타났다. 신호대잡음비에 기반하여 POD(probability of detection)을 산출한 결과, 100 mm 미만의 깊이를 가지는 측면공(SDH; side drilled hole)는 산화 전후에 큰 차이를 나타내지 않으므로 해당 깊이를 가지는 결합에 대해서 초음파탐상검사는 비교적 신뢰성 있는 검사를 수행할 수 있다고 판단된다. 상용 자동초음파탐상 장비에서의 테스트 결과 80 mm이하의 깊이에서는 인적오류가 크지 않을 것으로 예상할 수 있었으며, 위상배열 초음파 기법을 통한 검사를 수행한 결과 역시 양호한 신호대잡음비로 측면공들을 모두 검출할 수 있었다.

주요용어: 흑연, 초음파탐상, POD

Abstract Graphite material has been recognized as a very competitive candidate for reflector, moderator, and structural material for very high temperature reactor (VHTR). Since VHTR is operated up to 900-950℃, small amount of impurity may accelerate the oxidation and degradation of carbon graphite, which results in increased porosity and lowered fracture toughness. In this study, ultrasonic wave propagation properties were investigated for both as-received and degraded material, and the feasibility of ultrasonic testing (UT) was estimated based on the result of ultrasonic property measurements. The ultrasonic properties of carbon graphite were half, more than 5 times, and 1/3 for velocity, attenuation, and signal-to-noise (S/N) ratio respectively. Degradation reduces the ultrasonic velocity slightly by 100 m/s, however the attenuation is about 2 times of as-receive state. The results of probability of detection (POD) estimation based on S/N ratio for side-drilled-hole (SDHs) of which depths were less than 100 mm were merely affected by oxidation and degradation. This result suggests that UT would be reliable method for nondestructive testing of carbon graphite material of which thickness is not over 100 mm. In accordance with the result produced by commercial automated ultrasonic testing (AUT) system, human error of ultrasonic testing is barely expected for the material of which thickness is not over 80 mm.

Keywords: Graphite, Ultrasonic Testing, POD

1. 서론

원자력급 흑연은 우수한 열전도도 및 전기 전도도를 가질뿐만 아니라 화학적으로도 매우 안정적이므로 최근 연구 중인 제 4세대 VHTR에서 핵연료를 담고 있는 구조재 및 감속재의 후보재료로 거론되고 있다[1]. VHTR의 운전온도는 900-950℃로 흑연이 매우 빠르게 산화하는 온도이나, 불활성기체를 냉각제로 사용하므로 정상상태에서는 흑연의 산화가 문제되지 않는다. 그러나 미소한 불순물의 유입에도 흑연은 쉽게 산화되며 산화로 인한 공극률을 증가는 구조재료로서 가져야할 강성 및 파괴인성에 직접적인 영향을 주게 되고, 결과적으로 원자로의 건전성 및 안전성에 영향을 미치게 된다[2,3]. 본 연구에서는 as-received 상태와 산화된 상태의 원자력급 흑연에 대한 초음파특성의 변화를 관찰하고, 구조재료로서의 건전성을 확인하기 위한 초음파탐상검사의 유효성에 대하여 평가한다.

2. 다공성 재질에서의 음파감쇠 및 POD

2.1. 다공성 재질에서의 음파감쇠

음파 진행에 수반되는 감쇠는 산란과 흡수 두 가지 방식이 있으며 이들은 근본적인 작용 원리가 다르다. 산란에 의한 음파 감쇠는 결보기 감쇠이며 실제로 파동 에너지가 사라지는 것은 아니다. 이러한 에너지는 초음파탐상검사에 더 악영향을 미치게 되는데 Fig. 1에서 보였듯이 이들 산란파는 재질 내부를 무작위로 진행하며 초음파탐상검사에 있어서는 배경잡음을 형성하여 신호대잡음비는 더욱 낮아지기 때문이다[4].

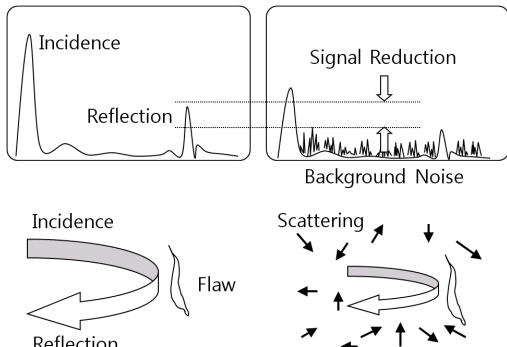


Fig. 1 Attenuation by scattering and increased background noise

이들 감쇠는 공히 감쇠 지수함수로 표현할 수 있다. 임의의 한 지점에서 음파의 진폭을 A_0 라 하면, z 만큼 진행한 후의 음파 진폭 A 는 다음과 같이 쓸 수 있다,

$$A = A_0 e^{-\alpha z} \tag{1}$$

$$\alpha = \frac{1}{z} \cdot 20 \log_{10} \frac{A_0}{A} \tag{2}$$

여기서, α 는 감쇠계수이며 감쇠의 원인에 따라 그 정의는 상이하다. e 는 네퍼 상수(Naper's constant)이며 약 2.71828이다. 산란에 의한 음파 감쇠의 대표적인 예는 재료의 결정입계의 크기가 초음파의 파장과 비교되는 경우 산란에 의하여 발생하는 결보기 감쇠이다. 이 외에도 재료내의 여러 가지 불균일성, 예를 들어 결정격자의 전위 역시 산란에 의한 결보기 감쇠를 야기한다[4].

2.2. 신호대잡음비 및 POD

비파괴검사의 결과는 인적요소에 영향을 많이 받으므로 신호대잡음비에 근거한 POD만으로 해당 비파괴검사법의 성능을 완전히 정량화 할 수는 없다. 그러나 현재까지 제시된 방법 중 가장 객관적이고 정량적으로 비파괴검사법의 유효성을 평가할 수 있다는데 POD의 의미가 있다[5].

Fig. 2는 신호대잡음비에 근거한 POD의 기본 개념을 보여준다. 반사신호의 크기뿐만 아니라 노이즈 수준도 여러 번 측정하여 정규분포곡선을 작성하고 측정된 노이즈의 통계 결과에서 문턱값을 결정한다. Fig. 2의 D'의 경우, 반사신호의 분포가 노이즈 분포와 거의 완전히 분리되어있다. 그러나 D와 같이 노이즈 분포와 중첩되는 영역이 있을 경우, 인적오류에 의하여 'false call' 이나 'missing'을

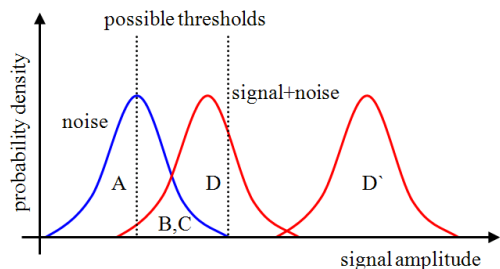


Fig. 2 POD based on S/N ratio

유발할 수 있다. 이를 정량화 하는 것이 POD의 목적이며,

$$POD = \frac{NTP}{NTP + NFN} \quad (3)$$

로 쓸 수 있다[5]. 여기서 NPT는 'true positive'의 수, NFN은 'false negative'의 수이다. 본 실험에서는 측정의 수가 매우 많은 경우, 측정된 값은 정규 분포를 가진다고 가정하였으며, 이 경우 POD는 아래와 같다.

$$POD = 1 - CDF \quad (4)$$

여기서, $PDF = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]$ 는 확률밀도함수, $CDF = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf}\left[\frac{x-\mu}{2\sqrt{\sigma}}\right]\right)$ 는 누적밀도함수이다[1].

3. 실험장치 및 시험편

Fig. 3은 흑연에서의 초음파특성을 측정하기 위한 실험장치의 전경을 보여준다. 흑연은 내부에 기공이 많이 분포하므로 비교적 감쇠가 작은 종파를 사용하였으며 사용된 탐촉자는 중심주파수 1.07 MHz, 직경 3/8 inch, 그리고 30%의 대역폭을 가지는 단일소자 탐촉자 및 64소자 위상배열 탐촉자이다. 초음파특성 측정에 사용된 pulser/receiver는 파나메트릭스의 5800, 신호수집은 텍트로닉스의 TDS3032 및 750을 사용하였다.

사용된 시험편은 as-received 및 산화된 상태의 원자력급 등방성 흑연 IG-110으로, 초음파특성 측정



Fig. 3 Ultrasonic propagation property measurement system

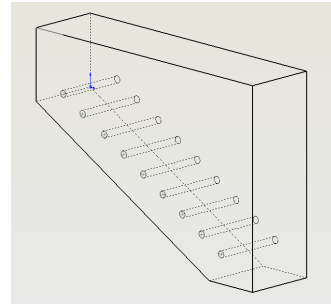


Fig. 4 SDH specimen for estimation of POD and AUT system

Table 1 Dimension and application of specimen

L × W × H	용도
160 × 140 × 50	- POD 측정 - 자동 초음파탐상 장비 적용 - 위상배열 초음파 기법 적용
5 × 15 × 20	초음파속도 및 감쇠 측정
15 × 15 × 20	DAC 측정

을 위한 시험편은 5 mm 및 10 mm의 두께의 쿠폰, POD 작성 및 상용 초음파탐상검사 장비를 적용하기 위한 시험편은 깊이 40-120 mm의 범위에서 10 mm 간격의 깊이를 가지는 측면공이 가공된 마름모 형태이다(Fig. 4, Table 1).

열화된 시험편은 모두 600°C의 온도에서 20분간 산화한 것으로 그 미세조직은 Fig. 5(b)에 나타난 바와 같다. 산화온도가 높을수록 급격하게 산화가 일어날 뿐만 아니라 표면과 내부의 산화정도 차이가 크며 기공의 크기가 고르지 못하다. 즉, VHTR 환경에서 불순물 유입으로 구조재 산화가 발생할 경우 저온에서 장기간 산화된 경우보다 그 손상의 정도가 크다.

또한, 상용으로 사용되는 자동초음파탐상 장비를 이용하여 영상화된 결과를 관찰하고자 미국 웨스팅하우스의 IUX 및 지텍의 μTomoscan를 사용하였다.

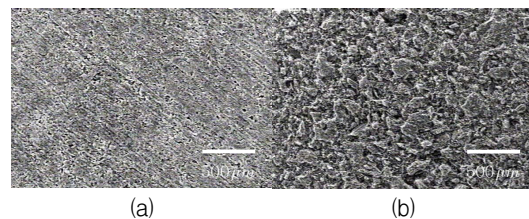


Fig. 5 Surface of (a) as-received and (b) oxidized IG-110 graphite specimen

4. 결과 및 고찰

4.1. 초음파속도 측정

Fig. 6은 초음파속도 측정의 예를 보여준다. 첫 번째 신호는 delay line과 시편의 경계, 즉 시편의 표면에서 반사된 신호이고 두 번째 신호는 시편의 아래 표면에서 반사된 신호이다.

12개의 쿠편에서 두 신호의 TOF(Time of Flight) 및 두께를 측정하여 초음파속도를 계산하였다. 초음파속도는 평균 2407.0 m/s로 관측되었으며, 약 8.1%의 범위에서 표준편차 54.2 m/s로 분포하였다. 열화된 시편의 경우 평균 2285.90 m/s로 측정되었으며, 3.4%의 범위에서 표준편차 22.2m/s로 분포하였다. 두 경우 초음파속도는 약 100 m/s로 미소하게 감소하였다.

4.2. 초음파감쇠 측정

Fig. 7은 초음파감쇠 측정의 예를 보여준다. 속도 측정의 경우와 마찬가지로 첫 번째 신호는 시편과 delay line의 경계에서 시편 아래 표면까지 한번

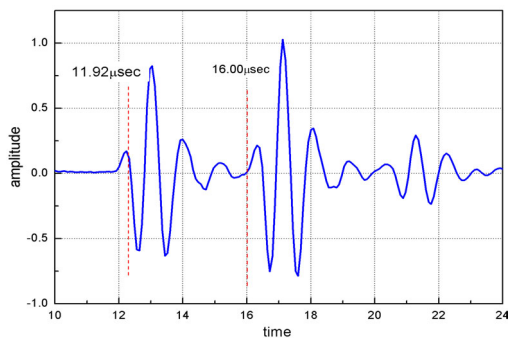


Fig. 6 Example of velocity measurement

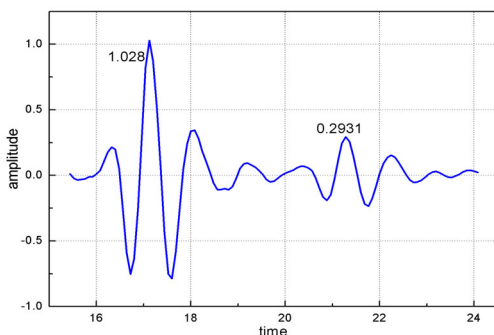


Fig. 7 Example of attenuation measurement

왕복한 후 도달한 신호이고 두 번째 신호는 두 번 왕복한 신호이다. 두께가 얇은 시편일수록 결보 기 감쇠에 의한 영향이 작고, 재료 특성에 가까우므로 5 mm의 쿠편을 이용하여 측정하였다. 음파 감쇠 측정 결과 평균 -0.918 dB/mm로 관측되었으며, 약 9.5%의 범위에 표준편차 2.51로 분포한다. 6 dB는 절반으로 감소하는 감쇠 양에 해당하므로 산화되지 않은 흑연의 경우 약 6 mm의 두께를 진행하는 동안 음파는 절반으로 감쇠한다. 산화된 흑연시편의 경우, 평균 -1.849 dB/mm 표준편차 0.4 2dB/mm로 측정되었다. 즉, 산화된 시편에서 초음파감쇠는 as-received 상태 보다 약 2배로 크게 증가한 것을 알 수 있다.

4.3. DAC (Distance Amplitude Curve) 분석

물성측정을 위해서는 두께가 얇은 시편을 이용하는 것이 좀 더 정확한 결과를 얻는다. 그러나 초음파 빔 행정이 길어지는 경우, 빔 퍼짐에 의한 결보기 감쇠가 발생하고 이는 빔행정이 길어질수록 그

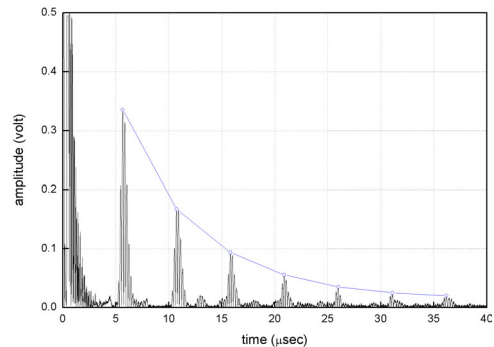


Fig. 8 A-scan image and DAC from carbon steel block of 15 mm thickness

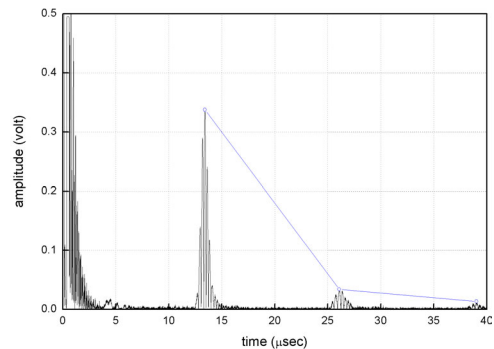


Fig. 9 A-scan image and DAC from carbon graphite block of 15 mm thickness

효과가 크게 나타난다. 15 mm의 두께를 가지는 흑연 쿠편을 이용하여 DAC를 작성하고(Fig. 9), 같은 두께를 가지는 탄소강의 경우와 비교하였다(Fig. 8). 15 mm 두께를 가지는 흑연 시편에서는 진폭이 약 1/10로 감쇠하였고, 이는 5 mm 쿠편에서 측정된 결과와 다르지 않다. 즉, 결보기 감쇠가 크게 발생하지 않는다. 탄소강의 경우와 비교할 경우 음파 감쇠는 약 5배에 해당한다.

4.4. POD 측정

측면공은 노치(notch) 또는 FBH(flat bottom hole)에 비하여 산란단면적(reflection cross section)이 작으므로 반사되는 신호의 크기가 작다. 이는 좀더 보수적으로 흑연에 대한 초음파탐상검사의 유효성을 검증하도록 한다.

POD는 Fig. 4와 같이 깊이 40 mm에서 120 mm 까지 10 mm 간격으로 5 mm 직경의 측면공이 가공된 시험편을 이용하였다. 측정장치의 설정은 산화 전/후 시험편에서 동일하게, 여기 에너지 10 μ J, 출력 임피던스 25 Ω , 20 dB의 증폭으로 실험을 하였으며, 하나의 측면공에 대하여 10회에 걸쳐 반사 신호를 측정된 통계값으로부터 2.2절에서 정의한 바에 따라 POD를 산출 하였다.

Fig. 10은 산화 전/후의 POD 측정결과를 비교하여 나타낸 것이다. 전체적으로 깊이가 얇은 측면공에 대하여는 as-received 및 산화된 상태의 시험편의 POD가 거의 동일하게 나타지만 측면공의 깊이가 100 mm 이상이 되면 그 값의 차이가 나타나기 시작하며, 깊이가 깊어질수록 그 차이가 커진다. 실험에 사용된 측면공 중 가장 깊은는 120 mm의 경우

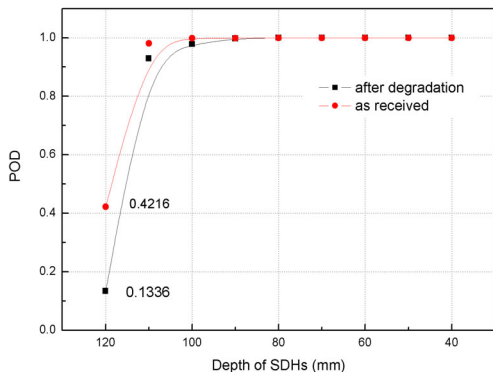


Fig. 10 POD calculation result from SDH

각각의 POD는 0.4216, 0.1336으로 산화된 흑연은 as-received 상태에 32%의 값만 가진다.

4.5. 자동초음파 탐상 장비 적용

Fig. 11-13은 상용 자동초음파탐상 장비를 이용

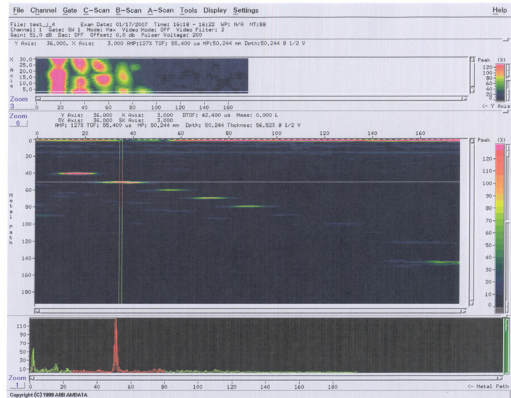


Fig. 11 AUT result for 50 mm SDH

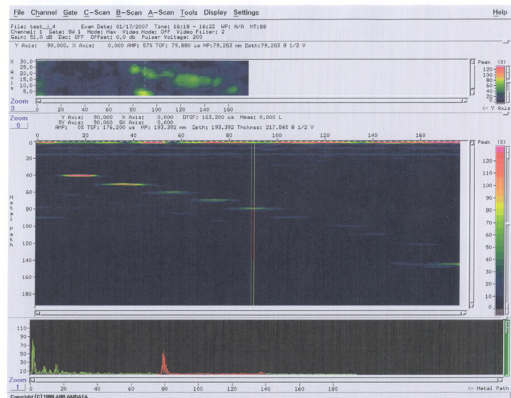


Fig. 12 AUT result for 80 mm SDH

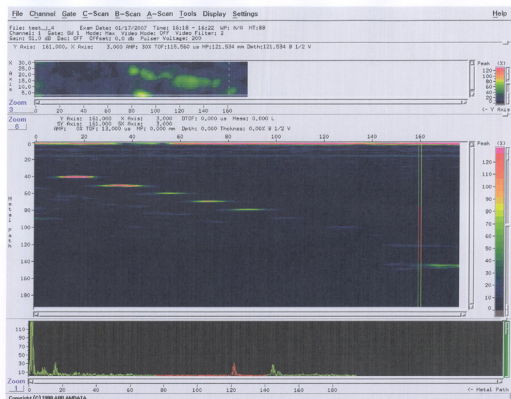


Fig. 13 AUT result for 120 mm SDH

한 검사 결과를 보여준다. 탐촉자는 200V의 크기와 200 nm의 폭을 가지는 사각파에 의하여 여기되며, 수신단의 증폭도는 51 dB, 주사간격은 1 mm이다. 90 mm 이상의 깊이를 가지는 측면공에 대한 B-스캔, C-스캔은 명확하지 않으나, A-스캔을 관찰해보면 120 mm의 측면공에서도 30% FSH로 명확한 반사 신호가 관측되었다.

4.6. 위상배열 초음파 기법 적용

위상배열 초음파 기법을 이용하여 산화된 상태의 흑연 시험편(Fig. 4)의 측면공에 대하여 탐사를 하였다. 64개의 압전소자를 가진 2.0 MHz의 TRL (transmitter/ receiver side-by-side L waves) 위상배열 탐촉자를 사용하였다. Fig. 14와 18의 붉은색 커서로 표시된 부분은 각각 60 mm, 120 mm의 깊이에서 반사된 신호로 시험편의 전 범위 40-120 mm에 걸쳐 양호하게 측면공이 검출이 됨을 알 수 있었다. 검출된 신호는 Fig. 14에서부터 18까지 나타내었다.

5. 결론

본 실험을 통하여 얻은 주된 결론은 아래와 같다.

- 1) 원자력급 흑연에 대한 초음파특성 측정 및 초음파탐상검사의 유효성에 대한 평가하기 위하여 산화된 상태의 흑연에 대하여 실험을 수행하였다. 초음파속도는 as-received 상태와 비교하여 미소하게 감소된 것으로 측정되었으며, 감쇠특성은 산화에 따라서 두드러지게 나타났다.
- 2) 물성측정 결과 초음파속도는 강재의 약 1/2, 음파 감쇠는 5배 이상, 신호대잡음비는 약 1/3로 측정되었으며, 같은 두께를 가지는 탄소강과 DAC를 비교함으로써 물성측정 결과에 대한 정성적/직관적 판단을 할 수 있었다.
- 3) POD를 산출 결과, 90 mm 이하의 깊이를 가지는 측면공은 열화 전후에 큰 차이를 나타내지 않으므로 해당 깊이를 가지는 결함에 대해서 초음파탐상검사는 비교적 신뢰성 있는 검사를 수행할 수 있을 것으로 판단된다.
- 4) 상용 AUT system에서의 테스트 결과, 80 mm이하의 깊이에서는 B/C-스캔 모두 명확한 결과를 얻을 수 있으므로 인적오류가 크지 않을 것으로 예상할 수 있다.

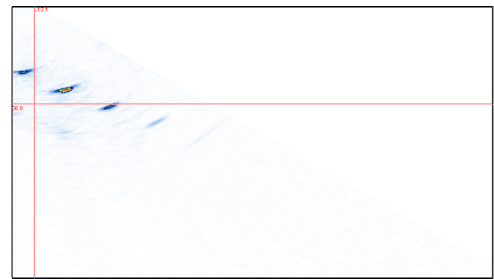


Fig. 14 Sectorial signal from 40-50 mm SDH



Fig. 15 Sectorial signal from 60-70 mm SDH

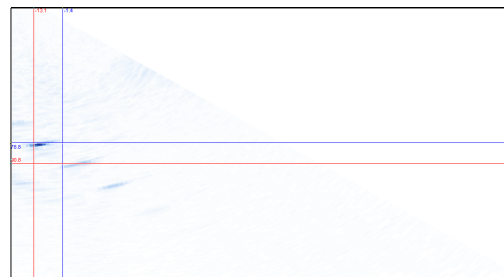


Fig. 16 Sectorial signal from 80-90 mm SDH

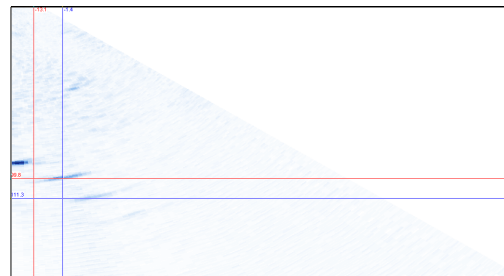


Fig. 17 Sectorial signal from 100-110 mm SDH

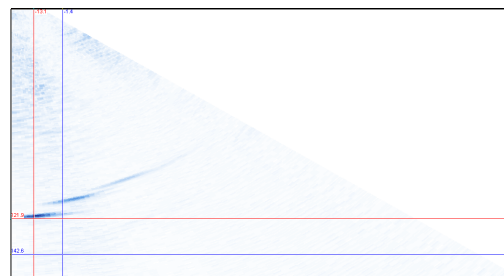


Fig. 18 Sectorial signal from 120mm SDH

- 5) 위상배열 초음파 기법을 통한 검사를 수행한 결과 양호한 신호대잡음비로 측면공들을 모두 검출할 수 있었다.

결론적으로 원자력급 흑연은 열화 전후 초음파특성에 약간의 차이를 보이지만 깊이가 매우 깊은 결함을 대상으로 하지 않는 한 흑연에 대한 건전성을 평가하기 위한 초음파탐상검사는 유효하다고 판단된다. 그러나 산화된 상태의 시험편은 표면조건이 양호하지 않아 산화상태에서 검사 및 초음파특성 측정은 상당한 어려움이 존재하므로 실제 초음파탐상검사가 적용되어야 하는 경우 적절한 표면처리 또는 성능이 우수한 주사장치가 수반되어야 할 것으로 보이며, 차후 POD 및 표면 해상도를 높이기 위해서는 좀 더 높은 주파수의 탐촉자를 사용하거나 경사각 횡파를 이용하는 등의 시도가 필요하다. 본 연구를 통하여 측정된 흑연의 음속은 일반적으로 사용되는 탐촉자재의 재료의 음속 보다 작으므로 경사업사를 구현하기 위한 보다 심도 있는 검토 및 실험 역시 필요하다.

참고문헌

- [1] P. Bilot, J. L. Seran, M. T. Calbrillat, H. Burlet, A. Terlain and J. P. Bonal, "CEA R&D program on structural materials for future gas-cooled nuclear systems," Basic studies in the Field of High-Temperature Engineering, Third Information Exchange Meeting, Japan, (2003)
- [2] L. Xiaowei, R. J. Charles, and Y. Suyuan, "Effect of temperature on graphite oxidation behavior," Nuclear Engineering and Design, Vol. 227, pp. 273-280, (2004)
- [3] I. M. Pickup, B. McEnaney and R. G. Cooke, "Fracture process in graphite and the effect of oxidation," Carbon, Vol. 24, No. 5, pp. 535-543, (1986)
- [4] H. F. Pollard, Sound Waves In Solids, (1977)
- [5] Martin Wall and Steve Burch, "Computer modelling and simulation for prediction of POD and inspection reliability," 3rd European-American Workshop on Reliability of NDE and Demining, pp. 10-13, (2002)