

터빈 로터 디스크 키웨이의 초음파 신호로부터 균열정보의 추출을 위한 신호처리 알고리즘의 개발

Ultrasonic Signal Processing Algorithm for Crack Information Extraction on the Keyway of Turbine Rotor Disk

이종규*, 서원찬**†, 박찬**, 이종오***, 손영호***

Jong-Kyu Lee*, Won-Chan Seo**†, Chan Park**, Jong-O Lee***, and Young-Ho Son***

초 록 본 연구에서는 터빈 로터 디스크 키웨이에 발생하는 균열의 상세 정보를 추출하기 위하여 초음파 신호처리 알고리즘을 개발하였다. 초음파 검사 시스템에 의한 터빈 로터 디스크 키웨이 시험편의 초음파 신호로부터 B-주사 이미지를 구성하였다. 구성된 B-주사 이미지를 2차원 신호처리를 위한 입력영상으로 이용하여, 전처리, 균열후보영역 검출, 균열영역 판별 및 균열정보 추출의 4단계로 알고리즘을 구성하였다. 개발된 초음파 신호처리 알고리즘을 이용한 실험을 통하여, 개발된 알고리즘이 키웨이 부위에 발생하는 균열의 특징 정보 추출에 의한 균열의 정량적인 평가에 효과적임을 확인하였다.

주요어: 터빈 로터디스크, 초음파 탐상검사, 초음파 신호처리, 균열검출, 균열정보 추출, 자동화 시스템

Abstract An ultrasonic signal processing algorithm was developed for extracting the information of cracks generated around the keyway of a turbine rotor disk. B-scan images were obtained by using keyway specimens and an ultrasonic scan system with x-y position controller. The B-scan images were used as input images for 2-Dimensional signal processing, and the algorithm was constructed with four processing stages of pre-processing, crack candidate region detection, crack region classification and crack information extraction. It is confirmed by experiments that the developed algorithm is effective for the quantitative evaluation of cracks generated around the keyway of turbine rotor disk.

Keywords: Turbine Rotor Disk, Ultrasonic Test, Ultrasonic Signal Processing, Crack Detection, Crack Information Extraction, Automatic System

1. 서 론

산업분야의 전반에 걸쳐 구조물의 안정성 확보는 아무리 강조해도 지나침이 없는 중요한 과제이다. 특히, 사회 기간산업의 하나인 발전소의 경우, 발전설비의 안전성을 유지하고 가동율을 향상시키기 위하여 사고 예방에 노력하고 있지만 발전소의

가동년수의 증가에 따른 설비의 주요부품이 손상되어 발전설비의 가동중지 사례가 증가하고 있는 실정이다.

원자력 및 화력발전소의 에너지 변환 기구는 보일러, 터빈 및 발전기로 구성되어 있으며, 터빈설비의 경우, 지속적인 부하 상태 혹은 급격한 부하 변동 상태에서 운전되며, 또한 고온 증기 분위기 속

에서 가동되기 때문에 균열발생의 주요 원인인 진동, 피로, 부식 등의 열악한 환경조건에 놓이게 된다[1,2]. 터빈 로터 디스크에서 거의 대부분의 균열은 응력이 가장 많이 집중되는 키웨이 부위에서 발생하는 것으로 보고되고 있으며(Fig. 1 참조), 이러한 부위의 균열은 응력부식균열의 형태가 가장 두드러진 것으로 알려져 있다[3,4].

현장에서 검출된 균열은 재가동하기 전에 제거되어야 하며, 균열을 제거하기 위해서는 균열의 위치 및 크기와 같은 균열의 상세정보를 파악해야 하지만 통상적인 검사방법에 의해서는 신속하고 정확하게 평가하기 어려운 실정이다. 터빈 로터 디스크의 검사방법으로는 검사기간이 짧고 균열의 특징을 보다 쉽게 규명할 수 있는 초음파를 이용한 비파괴검사의 적용이 일반적이다[5].

초음파 검사로 결함을 검출하고 평가하기 위해서는 초음파 신호로부터 기하학적인 의사지시 신호와 구별되는 결함신호의 추출이 요구되며, 이러한 특징의 추출은 검사원에 의해 직접 수행되고 있는 실정이다[6]. 특히, 터빈 로터 디스크 키웨이 부위와 같이 형상이 복잡한 경우의 결함 평가는 고도의 숙련도와 전문적인 지식이 필수적이며, 전문 검사자의 숙련도와 경험에 따라 결함검출의 능력 차이가 크다[7]. 또한 장기간의 검사로 검사자의 피로에 따른 검사의 부정확성, 수동적인 검사절차로 발생하는 검사의 신뢰성 저하, 가동중단 기간의 연장 등 많은 어려움을 갖고 있다.

따라서 전문 검사원과 같은 능력을 가진 초음파 탐상검사를 위한 자동화 시스템의 개발이 요구되며, 이는 전문가가 아니라도 쉽게 초음파 신호를

분석하고 평가할 수 있는 신뢰성 높은 방법으로 기대되어지고 있다.

2. 초음파탐상검사 및 신호처리 시스템

2.1. 초음파탐상검사

연구에 사용된 실험 장치로는 직접접촉법 초음파 탐상을 위해 자동초음파탐상기를 사용하였다. 초음파탐상검사시 진동자 직경이 0.375 in.이며 중심주파수가 5 MHz인 탐촉자를 사용하였다. 펄스와 리시버는 임펄스 형태의 파형을 발생시킬 수 있는 Krautkramer사의 US 15 초음파 결합 검출기를 사용하였으며, 수신된 초음파 아날로그 데이터를 Tektronix TDS 410A 디지털 오실로스코프로 보내어 디지털 변환하여 저장하였다. 주 시 시험편에서 수집된 데이터의 저장 간격은 0.5 mm이며, 접촉법에 사용한 탐촉자, 샘플링 시간 및 접촉매질은 Table 1과 같다.

실험은 실제 현장에서 발생하는 균열과 초음파탐상을 재현하기 위하여 아크릴을 이용한 모형시험편을 제작하였다. Fig. 2에 모형시험편과 키웨이 및 가공균열의 제원을 나타내었다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 키웨이의 중심 O에서 저면을 기준으로 반

Table 1 Transducer and couplant

	Contact technique
Transducer	Sigma transducers
Sample time	10ns
Couplant	Glycerine

Table 2 Specifications of simulated specimens

	Crack angle(°)	Crack length(mm)
S0	No crack specimen	
S30	30	2
S45	45	2
S90	90	2

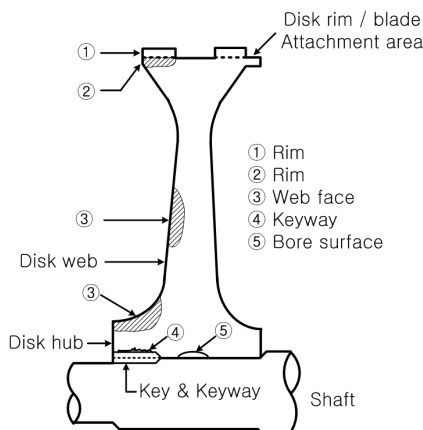


Fig. 1 Schematic diagrams of turbine rotor disk cracking problem area

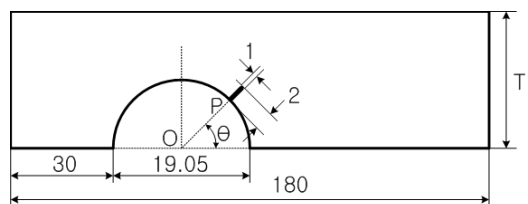


Fig. 2 Shape of simulated specimen and cracks

시계방향으로 경사각(θ)이 30°, 45° 및 90°인 곡면상의 P지점에서 경사각과 동일한 각도로 폭 1 mm, 길이 2 mm인 균열을 가정하였다. Table 2에 각각의 모형시험편에 대한 균열의 각도 및 균열의 길이를 나타내었다.

2.2. 초음파 신호처리 시스템

Fig. 3에 균열정보 추출을 위한 초음파 신호처리 시스템의 개략도를 나타내었다. 초음파 검사로부터 초음파 신호펄스를 얻으며, 이때의 아날로그 신호는 오실로스코프를 통하여 디지털 데이터로 변환되어 PC에 저장된다. 개발된 초음파 신호처리 알고리즘에 의하여 디지털 데이터는 처리·해석되어 균열정보를 획득한다.

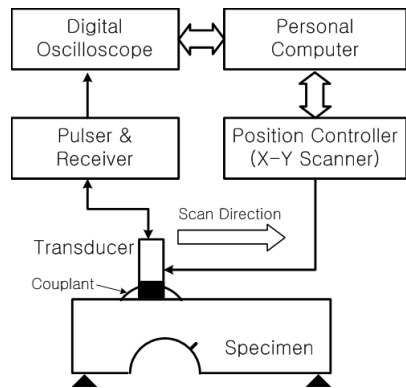


Fig. 3 Ultrasonic signal processing system

3. 초음파 신호처리 알고리즘

Fig. 4에 균열정보추출을 위한 초음파 신호처리 알고리즘의 흐름도를 나타내었다. 이하 초음파 신호처리 알고리즘을 4단계로 나누어 각각에 대하여 간략히 설명하였다.

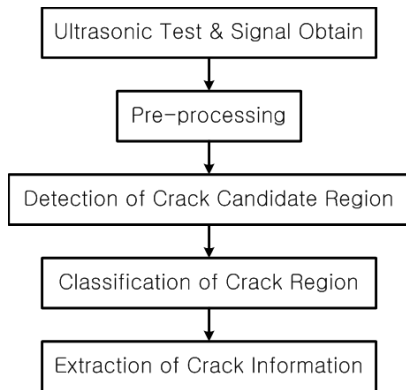


Fig. 4 Basic flow of ultrasonic signal processing

3.1. 전처리

3.1.1. 초음파 신호의 RF 파형

초음파 신호처리 알고리즘의 초기 입력 데이터로는 자동초음파탐상에 의해 얻어진 아날로그 신호를 디지털 변환하여 사용하였다. 입력 데이터는 균열경사각이 각각 0°, 30°, 45° 및 90°인 시험편에 대하여 초음파 검사를 실시하였으며, 이때 획득한 데이터에 대하여 각각 S0, S30, S45 및 S90으로 명명하였다. 직접접촉법으로 획득한 각각의 반사파형 데이터에서 균열로부터의 반사 신호가 최대진폭을 나타내는 주사위치의 RF파형을 Fig. 5에 나타내었다.

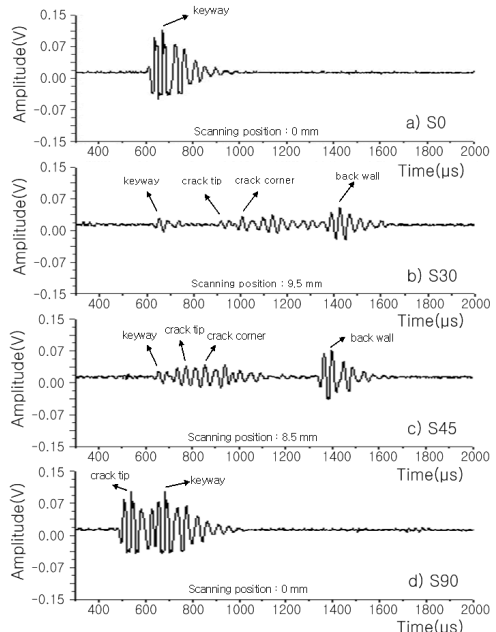


Fig. 5 RF waveform of ultrasonic signal

3.1.2. 초음파 신호의 신호처리파형 : 근접평균법

초음파 탐상에서의 결함은 시간영역에서 두 개의 고정된 점 사이의 전파시간(time of flight)의 변화와 초음파의 진폭변화로 검출될 수 있다[8]. 원 데이터에 포함되어 있는 잡음 성분을 제거하고, 각 반사 신호가 하나의 기준 값에 대하여 한

방향으로 나타날 수 있도록 하기위하여 데이터의 진폭값에 절대값을 취한 후, 40점 근접 평균(40 points adjacent averaging)을 수행하여 진폭 포락선(amplitude envelope)을 구하였다. 여기서 40점 근접평균을 적용한 이유는 예비실험의 결과 원 데이터의 보존과 잡음제거에 효과가 있기 때문이다. Fig. 6에 Fig. 5의 RF과형을 40점 근접평균 처리한 과형을 나타내었다.

Fig. 5 및 Fig. 6의 초음파신호로부터 균열에 대한 정보의 추출은 전문 검사자로서도 상당한 숙련과 경험이 필요하며, 검사의 신뢰도 향상을 위한 새로운 방법의 개발이 필요함을 알 수 있다.

3.1.3. 초음파 신호의 B-주사 영상

전 처리과정의 마지막 단계로 B-주사 영상(B-Scan image)을 통해 균열의 상대적인 위치, 거리, 크기를 관찰하였다. 각각의 시험편에 대한 0.5 mm 간격의 탐상신호를 이용하여 주사 위치에 대한 전파시간 및 진폭의 B-주사 영상을 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7의 수평축은 주사 위치를 나타내며, 수직축은 초음파의 전파시간을 나타낸 것으로 저면에서의 반사 신호를 기준으로 상대적인 전파시간을 깊이로 나타내었다. 그리고 색도는 진폭을 나타낸다. Fig. 7에서 약 -7.5 mm 주위의 영역은 키웨이에서 반사된 신호이며, 약 0.0 mm 주위에 나타난 영역은 저면에서 반사된 신호이다. 또한, 균열

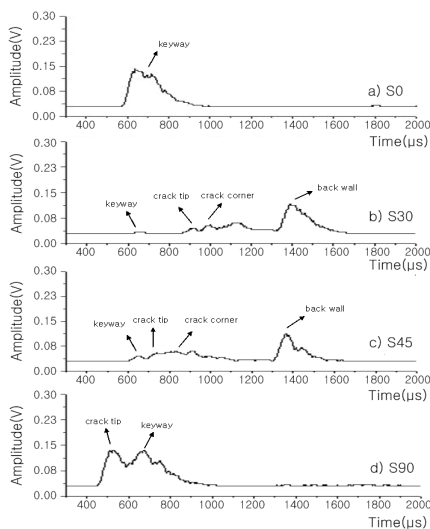


Fig. 6 Amplitude envelope after 40 points adjacent averaging

로 인한 신호라 생각되어지는 영역이 관찰됨을 알 수 있다. 이러한 사실은 Fig. 7의 B-주사 영상으로부터 키웨이영역, 저면영역 및 균열영역을 구별할 수 있음을 의미한다.

3.2. 균열후보영역의 검출

B-주사 영상에서 키웨이와 저면 그리고 균열영역에 대한 상대적인 위치를 구별할 수 있음에 착안하여, 균열정보의 추출을 위한 방법으로 B-주사 영상을 2차원 평면의 영상처리 방법으로 균열영역의 검출을 시도하였다.

이러한 처리를 구현하기 위해 균열이 존재하는 평면영상과 균열이 없는 평면영상을 비교하여 균열영역을 검출하였다.

3.2.1. 2치화 및 팽창처리

균열이 없는 평면영상의 정보로 S0의 데이터를 이용하였다. Fig. 8과 같이 키웨이와 저면을 분리하기 위하여 2치화 처리(binartization)를 하였으며, 2치화 처리된 평면영상은 팽창처리(expanding, 3×21 filter)를 실시하였다.

2치화 처리는 영상에서 특징을 추출하기 위한 전처리 방법의 하나로, 주어진 영상과 문턱값을 비교하여 문턱값 이상인 화소는 "1"의 값을 문턱값 미만인 화소는 "0"의 값을 가지도록 계산된다. 본

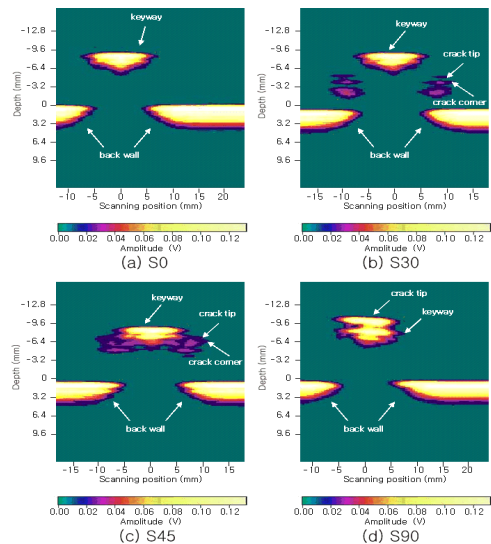


Fig. 7 Ultrasonic B-Scan images of each specimens

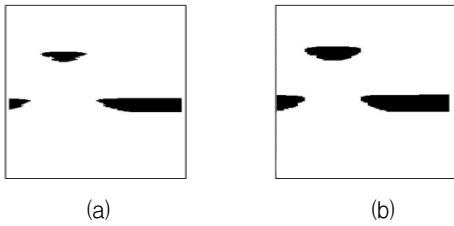


Fig. 8 Plane images after (a) the binarization and (b) the expanding processing

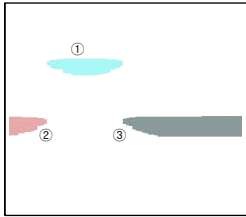


Fig. 9 Plane image after segmentation processing

논문에서의 문턱값의 결정은 자동 2치화 기법(Otsu method)을 이용하였다[9].

팽창처리는 근방화소(8-neighbors) 값이 "1"이면 "0"의 값을 가지는 화소의 값을 "1"로 변화시키는 처리로 2치화 처리 후의 영상에서 유의영역의 구멍(hole)을 메우거나 처리 회수의 화소만큼 확대하는 기능을 한다.

3.2.2. 영역분할 처리

Fig. 9는 Fig. 8(b)의 평면 영상에서 유의한 3개의 영역을 분할한 영상이다. 본 영역 분할 처리(segmentation)는 3개의 영역을 독립적으로 분할하고, 이때 획득한 영역의 정보를 다음의 정합처리단계에서 키웨이 및 저면에 대한 위치적 대응에 이용하기 위함이다[10].

영역분할처리는 인접하여 연결된 모든 화소를 동일한 영역으로 하고, 다른 연결 성분에는 다른 영역으로 하는 일련의 흐름작업적 처리이다[10].

3.2.3. 정합 처리

균열이 없는 평면영상과 균열이 있는 평면영상의 비교를 위하여 두 평면영상에 존재하는 유의한 3개 영역에 대한 위치적인 정합이 필요하다. 정합처리(template matching)는 설정한 template와 탐색 영역 내의 부분 영역과의 상관계수(correlation coefficient)

를 이용하여 유사영역을 탐색하는 처리이다.

Fig. 10에 정합처리한 후의 결과를 나타낸다. Fig. 10(a)는 균열이 없는 평면영상에서 정합처리를 위해 설정한 3개의 template를 사각형으로 나타내었다. 3개 영역에 대한 각각의 template는 평면영상의 좌측상단(0, 0)에서 출발하여 주사 위치별 전파 시간(우측하단)에 따른 방향으로, 비교되는 영역의 데이터 값의 차이가 최소인 지점의 위치(x, y)를 정합위치로 결정하였다. Fig. 10(b), (c) 및 (d)에 각각의 균열경사각에 대하여 키웨이 및 저면의 3개 영역의 정합위치의 좌표값을 나타내었다.

3.2.4. 차분 처리

균열영역을 검출하기 위하여 3개의 영역에 대한 정합위치 정보를 이용한 차분처리(subtraction)가 필요하다. 차분처리는 두개의 대응되는 화소들의 모든 쌍들 사이의 차를 계산하여 얻어진다.

균열영역이 없는 평면영상인 그림 10(a)와 균열영역이 존재하는 Fig. 10(b), (c) 및 (d)를 차분처리하여 그 결과를 Fig. 11에 각각 나타내었다. Fig. 11의 결과로부터 균열영역을 포함한 균열후보영역이 검출되었음을 알 수 있다.

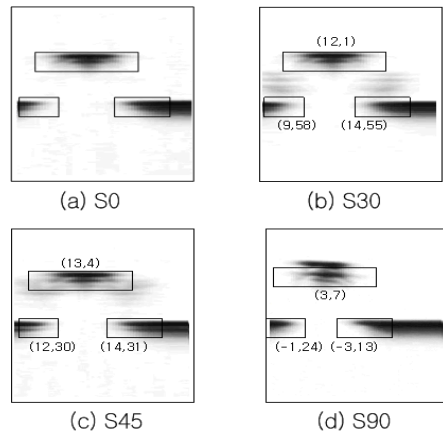


Fig. 10 Resulting images after the template matching processing



Fig. 11 Resulting images after the subtraction processing

3.3. 균열영역의 판별

이전까지의 처리단계에서 검출된 균열후보영역은 균열영역은 물론, 키웨이영역과 저면영역의 경계를 포함한 잡음영역도 검출되었다. 이들 균열후보영역에서 균열영역만을 판별하기 위하여 균열영역에 대한 특징량으로서 위치, 크기 및 형상을 선정하였다. 이때 선정의 기준이 되는 특징량으로서는 균열후보영역에서 균열영역과 잡음영역을 정확히 구분할 수 있으면서 최소한의 수의 특징량을 이용하는 것이 중요하다. 또한, 잘못 선정된 특징량이나 틀리게 설정된 특징량의 조건은 알고리즘의 성능에 치명적인 영향을 미친다. 선정된 각각의 특징량에 대한 조건을 Table 3과 같이 정의하였다.

Table 3의 위치조건, 면적조건 및 형상조건 특징을 적용한 후의 결과영상을 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12에서 나타낸 바와 같이 균열영역의 개수는 각각 2개, 2개 및 1개이며, 균열영역으로 판별된 각각의 영역에 대한 특징량을 정리하여 Table 4에 나타내었다. Fig. 12 및 Table 4의 결과에서 알 수

Features	Threshold conditions
Position	Erase : over than scanning depth of backwall (130mm)
Area	Accept : over than threshold. (about 30 = 1/5 × scanned area of crack)
Shape	Accept : $0.25 \leq V/H \leq 4.0$ (H : h-length, V : v-length)

Table 4 Results of classifying the feature values of the crack region

	S30		S45		S90
Position (mm)	64.2~123.4		64.8~95.6		47.1~87.5
Area (mm ²)	171	183	171	164	165
Shape	0.7	0.4	0.3	0.3	0.3
Result of Classification	Crack region	Crack region	Crack region	Crack region	Crack region

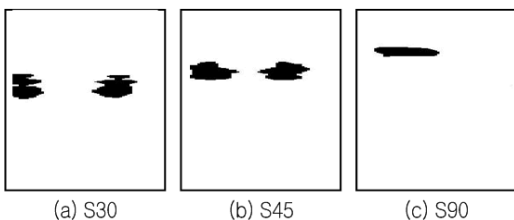


Fig. 12 Resulting images of the final crack region

있듯이 각각의 시험편에 존재하는 균열영역을 검출할 수 있었으며, 이는 본 연구의 초음파 신호처리 알고리즘이 균열영역만을 검출·판별할 수 있다는 것을 의미한다.

3.4. 균열의 특징분석 및 정보추출

3.4.1. 균열의 특징분석

본 절에서는 판별된 균열영역의 특징을 분석하여 균열에 대한 상세정보를 획득한다. 균열영역과 키웨이 영역의 상대적인 위치를 분석하면, 균열선단 및 균열모서리에 대한 깊이 및 위치를 알 수 있고, 균열선단 및 균열모서리에서 반사된 신호의 진폭이 최대가 되는 지점을 연결하면 균열의 각도를 알 수 있다. 최종적으로 시험편에 존재하는 균열에 대한 위치, 깊이 그리고 방향성에 관한 정보를 획득할 수 있다.

Fig. 12(a), (b) 및 (c)에 나타낸 각각의 균열영역에 대하여 각각의 주사 위치별 최대진폭 전파시간(상대적인 전파시간을 깊이로 나타내었음.)을 도식화하여 Fig. 13~Fig. 15에 나타내었다. 또한, 균열선단 및 균열모서리에서 반사된 신호의 진폭이 최대가 되는 주사 위치를 ○표시 하였다. Fig. 13~Fig. 15에서 균열선단 및 균열모서리는 최종 판별된 균열영역의 A-주사 데이터로부터 획득하였으며, 균열영역의 상대적 위치 및 깊이를 표시하기 위하여 키웨이 및 저면을 함께 나타내었다.

3.4.2. 균열정보의 추출

Fig. 13~Fig. 15로부터 각각의 특징값(주사위치 및 주사시간)을 분석하여 획득한 결함의 상세정보를 Fig. 16에 나타낸 5개의 파라메타로 정의하였다. Fig. 16에서 F1과 F2는 키웨이 정점에 대한 균열선단과 모서리의 깊이에 대응하며, F3과 F4는 키웨이 정점에 대한 각 반사영역의 수평 위치에 대응하는 주사위치의 차이를 나타낸다. 그리고 F5는 각각의 균열경사각에서 반사된 신호의 진폭이 최대가 되는 위치에서의 주사시간을 연결하여 각도로 나타내었다.

위에서 정의한 5개의 파라메타를 이용하여 Table 5에 각각의 시험편에 대한 실험결과인 균열에 대한 상세정보를 나타내었다. 또한, 추출한 균열정보로부

터 균열의 위치, 깊이 그리고 균열경사각을 계산하여 시험편에 존재하는 균열의 실제 값과 함께 도식화하여 Fig. 17에 나타내었다. Table 5 및 Fig. 17의 결과로부터 시험편에 존재하는 균열의 실제 값과 추출 값 사이에 근사한 오차는 있으나, 균열의 위치, 깊이 및 방향성이 양호하게 추출되었음을 확인할 수 있었다.

Table 5 Detailed information of crack in each specimens

Specimen Parameter	S30	S45	S90
F1(mm)	3.8	1.5	-1.8
F2(mm)	4.9	2.5	0
F3(mm)	9.5	8.0	0
F4(mm)	8.0	7.0	0
F5(°)	30.2	46.1	90.0

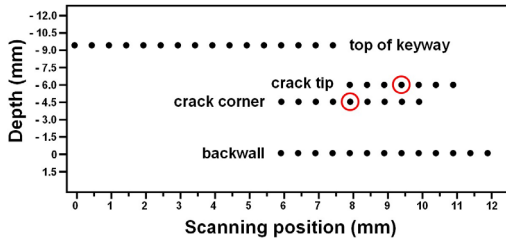


Fig. 13 Peak amplitude and its position at scanning position vs. depth in the crack region of S30

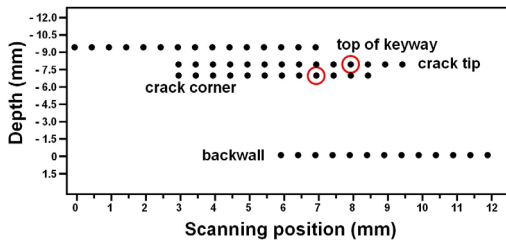


Fig. 14 Peak amplitude and its position at scanning position vs. depth in the crack region of S45

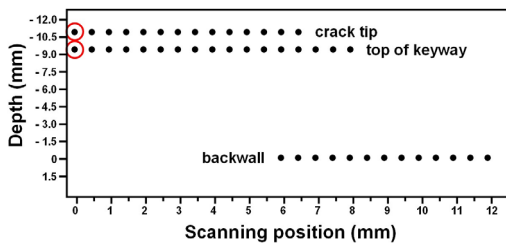


Fig. 15 Peak amplitude and its position at scanning position vs. depth in the crack region of S90

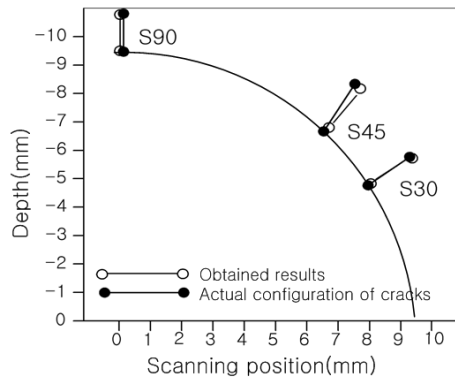


Fig. 17 Crack information extracted by developed algorithm

4. 결론

본 논문에서는 터빈 로터 디스크의 키웨이에 발생하는 균열정보를 추출하기 위하여 초음파 신호처리 알고리즘을 개발하였다. 개발한 초음파 신호처리 알고리즘을 이용한 실험을 통하여, 터빈 로터 디스크 키웨이 시험편에 존재하는 균열을 검출할 수 있었으며, 검출된 균열영역을 분석하여 균열의 위치, 거리 및 방향성에 대한 정보의 추출에 의하여 결함의 정량적인 평가가 가능함을 확인하였다.

금후의 과제로는 개발한 초음파 신호처리 알고리즘의 확장과 실제 구조물에서의 응용으로 생각된다.

참고문헌

[1] G. P. Singh, R. A. Cervantes and R. L. Spinks, "Ultrasonic nondestructive testing technique for the examination of low-pressure turbine disc rims," Material Evaluation, Vol. 41, No. 13, pp. 1511-1516 (1983)

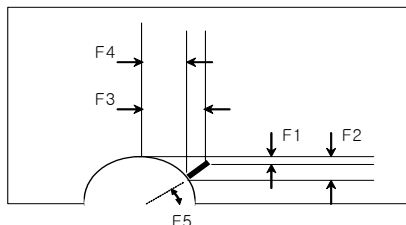


Fig. 16 Crack information by 5 parameters

- [2] J. F. Newman, "The corrosion potential of a 3% Cr-Mo steel in sodium hydroxide solutions and its relationship to stress corrosion cracking," CERL Note No. RD/2/N186/73, Central Electricity Research Laboratories, Leatherhead, England, July (1973)
- [3] F. F. Lyle, Jr. and H. C. Burghard, Jr., "Steam turbine disc cracking experience," EPRI Report NP-2429, Vol. 2, Project 1398-5, June (1982)
- [4] P. K. Nair, F. F. Lyle, Jr., J. E. Buckingham and H. G. Pennick, "Guidelines for predicting the life of steam turbine disks exhibiting stress corrosion cracking," EPRI Report Np-6444, Vol. 1, Project 1929-16, 2518-1, July (1989)
- [5] M. Koike, F. Takahashi, S. Kajiyama, H. Chiba and Y. Yoshida, "Development of an ultrasonic inspection technique for the dovetail of turbine rotor disks," Proceedings of the 13th International Conference on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries, pp.463-467, Kyoto, Japan, 22-25 May (1995)
- [6] 이의중, 박익근, "최신 초음파탐상검사", 도서출판 골드, (1995)
- [7] K. Date, H. Shimada and N. Ikenaga, "Crack height measurement - an evaluation of the accuracy of ultrasonic timing methods," NDT International, Vol. 15, pp. 315-319, December (1982)
- [8] D. K. Mak, "Ultrasonic methods for measuring crack location, crack height and crack angle," Ultrasonics, Vol. 23, pp. 223-226, September (1985)
- [9] N. Otsu, "A threshold selection method for gray-level histograms," IEEE Trans. Syst., Man. & Cybern., Vol. SMC-9, pp. 62-66, (1979)
- [10] Rafael C. Gonzalez and Richard E. Woods, "Digital Image Processing," Addison-Wesley Publishing Company, pp. 531-571, (2004)