

초음파 판파와 신경회로망 기법을 적용한 리벳홀 부위의 균열 크기 평가

Evaluation of Size for Crack around Rivet Hole Using Lamb Wave and Neural Network

최상우*, 이준현**

Sang-Woo Choi* and Joon-Hyun Lee**

초 록 리벳이음은 응력집중 등에 의한 피로균열 발생 가능성이 높은 구조특성을 가지므로 구조물의 안전성 확보를 위하여 비파괴 평가 방법에 의하여 리벳홀 주위 균열에 대한 평가가 요구되고 있다. 유도 초음파의 일종인 Lamb파는 판형상의 구조물의 비파괴 평가에 적합하며, 신경회로망은 비파괴 평가 기술에서 결함의 크기 및 종류 인식에 관하여 가장 효율적인 기법으로 많은 연구자들에 의해 적용되어 왔다. 본 연구에서는 항공기의 스킨재료로 적용되는 Al2024-T3판재에 대하여 유도초음파의 일종인 판파를 적용하여 리벳홀 주위 균열 신호를 검출하였으며, 또한 리벳홀 주위 균열의 크기 평가를 위하여 백프로퍼게이션 알고리즘을 적용한 신경회로망을 적용하였다. 이때, 초음파 트랜스듀서와 시편편 사이의 불균일 접촉에 의한 오차를 줄이기 위하여 초음파 파형에서 시간 및 주파수 성분의 특성을 추출하여 신경회로망에 적용하였다. 그리고 이들 판파신호에서 추출한 시간 및 주파수 성분의 특성은 균열 크기 결정에 유용하게 적용될 수 있음을 증명하였다.

주요용어: 균열, 리벳, 초음파 판파, 펄스에코, 신경회로망

Abstract: The rivet joint has typical structural feature that can be initiation site for the fatigue crack due to the combination of local stress concentration around rivet hole and the moisture trapping. From a viewpoint of structural assurance, it is crucial to evaluate the size of crack around the rivet holes by appropriate nondestructive evaluation techniques. Lamb wave that is one of guided waves, offers a more efficient tool for nondestructive inspection of plates. The neural network that is considered to be the most suitable for pattern recognition has been used by researchers in NDE field to classify different types of flaws and flaw sizes. In this study, crack size evaluation around the rivet hole using the neural network based on the back-propagation algorithm has been carried out by extracting some features from the ultrasonic Lamb wave for Al2024-T3 skin panel of aircraft. Special attention was paid to reduce the coupling effect between the transducer and the specimen by extracting some features related to time and frequency component data in ultrasonic waveform. It was demonstrated clearly that features extracted from the time and frequency domain data of Lamb wave signal were very useful to determine crack size initiated from rivet hole through neural network.

Keywords: Crack, Rivet, Ultrasonic Lamb Wave, Pulse-echo, Neural Network

1. 서 론

일반적으로 리벳이음(rivet joint)은 구조용 강관 또는 형강 등을 영구적으로 접합하는데 사용되며 그 적용영역은 항공기, 철근 구조물, 철교, 선체 등의 대형 구조물뿐만 아니라 보일러, 가스탱크 등에 이르기까지 폭넓게 응용되고 있다. 특히 항공기의 경우 스킨패널(skin panel)의 리벳홀 주위에 국부적인 응력집중 및 부식 등에 의한 피로 균열의 발생이 보고되고 있으며[1] 따라서 항공기의 안정성확보 및 효율적인 유지 보수를 위하여 이들 균열에 대한 정량적인 비파괴 평가기술이 요구된다. 일반적으로 재료 또는 구조물의 균열검출을 위한 비파괴 평가 기법중 초음파를 이용한 비파괴 평가 방법은 체적파(Bulk-wave)가 가장 널리 이용되고 있으나[2] 항공기 스킨패널과 같은 비교적 박판 구조물에 있어서는 이들 초음파 모드(mode)의 적용이 불가능하다.

관련 유도초음파(guided wave)는 기존의 체적파(Bulk-wave)인 종파와 횡파에 비해 상대적으로 저주파수 영역에서 발생하는 새로운 형태의 초음파로 그 진행방향이 구조물의 길이 방향으로 유도되는 특성을 갖고 있다. 특히 본 연구에서 대상으로 하는 항공기 스킨패널(skin panel)의 경우와 같이 경계조건으로서 자유표면을 갖는 얇은 평판일 경우 유도초음파의 일종인 판파(Lamb-wave)가 발생하게 되며, 이와 같이 하여 발생된 판파(Lamb-wave)의 초음파 거동 및 초음파 산란장 등의 특성평가를 통해 항공기와 같은 박판 구조물의 비파괴 평가에 유용하게 응용할 수 있음이 최근의 연구결과들[3,4]에 의해 보고되고 있다. 초음파 판파를 이용하여 균열의 크기 및 깊이를 측정하고자 할 경우 중요한 문제점중의 하나는 초음파 트랜스듀서와 측정재료사이의 커플링(coupling)영향이 중요한 문제점으로 지적되고 있으며 이를 해결하기 위하여 자기보상(self-calibrating) 초음파 기법[5] 등과 같은 새로운 초음파 적용기술이 시도되기도 하였다. 특히, 일반적으로 초음파를 이용한 균열 탐상에 있어서 균열의 크기와 위치 측정의 정확성은 검사자의 숙련도에 따라 달라질 수 있으므로 정확하고 정량적인 탐상을 위하여 최근 시간영역 또는 주파수영역의 초음파 신호를 신경회로망에 적용하는 연구가 활발히 수행되고 있다[6-7].

본 연구에서는 초음파 판파(Lamb-wave)를 이용하여 항공기 동체의 스킨패널(skin panel)로 일반적으로 많이 이용되고 있는 경량화 구조용 재료인 알루미늄 2024-T3 패널의 리벳홀에서 발생하는 미소균열 크기의 정량적인

평가 가능성에 대하여 연구하였다. 특히 본 연구에서는 리벳홀 부위의 미소균열로부터 반사되어오는 초음파 판파 신호로부터 트랜스듀서와 시험편 사이의 커플링(coupling)영향과 무관한 시간 및 주파수 성분의 특징 추출(feature extraction)을 실시하여 이 데이터를 신경회로망에 학습시켜 정량적인 균열크기를 평가하였다.

2. 신경회로망의 원리와 구조

본 연구에서 사용된 신경회로망은 다층퍼셉트론(multi-layer perceptron)의 신경회로망으로 Fig. 1과 같이 입력층(Input layer), 은닉층(Hidden layer) 그리고 출력층(Output layer)의 3개의 층으로 구성되어 있다[8].

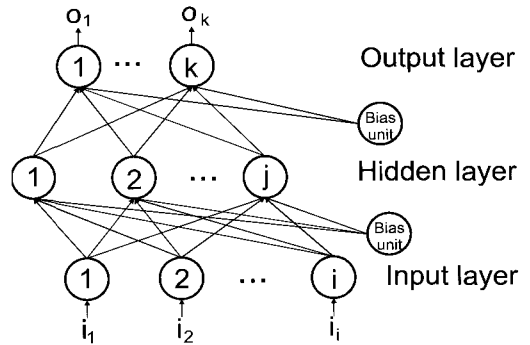


Fig. 1 Architecture of neural network

특히 본 연구에서 사용된 신경회로망의 구조는 입력유니트가 3개, 은닉유니트가 8개, 그리고 출력유니트가 1개로 구성되어 있다. $i_i(i=1,2,...,i)$ 이 입력패턴의 값이고 $y_n(n=1,2,...,k)$ 이 출력패턴의 값일 때 j 개의 은닉유니트값 $x_m(m=1,2,...,j)$ 와 k 개의 출력유니트의 값 $o_n(n=1,2,...,k)$ 은 다음 식 (1), (2)와 같다. 여기서 w 는 연결강도, θ 는 바이어스값 그리고 f 는 시그모이드(sigmoid)함수를 나타낸다. 식 (1)과 같이 입력유니트 값 i_i 은 입력층과 은닉층 사이의 연결강도 w^h_{mi} 와 곱하고 은닉층의 바이어스 값 θ^h_m 과 합하여 시그모이드 함수 f 를 취하여 은닉유니트 값 x_m 이 된다. 여기서 윗첨자 h 는 입력층과 은닉층 사이의 연결강도 및 바이어스입력을 뜻하고 아랫첨자 m 은 1번째 입력유니트에서 m 번째 은닉 유니트로의 연결을 뜻한다. 그리고 net 는 시그모이드 함수, f 의 입력이 되는 입력값과 연결강도와와의 곱들의 합과 바이어스값과의 합을 나타내는 매개변수값을 나타낸다.

$$net_m^h = \sum_{i=1}^n w_{mi}^h i_i + \theta_m^h \dots\dots\dots (1)$$

$$x_m = f_m^h(net_m^h)$$

식 (2)에서 동일한 방법으로 은닉유니트 값 x_m 은 은닉층과 출력층 사이의 연결강도 w_{nm}^o 와 곱하고 출력층의 바이어스 값 θ_n^o 과 합하여 시그모이드 함수 f 를 취하여 출력유니트를 통하여 출력값 o_n 으로 출력된다. 여기서 윗첨자 o 는 은닉층과 출력층 사이의 연결강도 및 바이어스 입력력을 뜻하고 아랫첨자 nm 은 m 번째 은닉 유니트에서 n 번째 출력 유니트로의 연결을 뜻한다.

$$net_n^o = \sum_{m=1}^k w_{nm}^o x_m + \theta_n^o \dots\dots\dots (2)$$

$$o_n = f_n^o(net_n^o)$$

출력패턴과 출력층의 출력유니트값의 오차함수 E 는 다음 식 (3) 같이 정의된다.

$$E = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^k (y_n - o_n)^2 \dots\dots\dots (3)$$

본 연구에서는 초음파 파형을 수신하고 수신된 파형 데이터로부터 특성을 추출한다. 추출된 특성 중 일부를 신경회로망에 학습시키고 신경회로망의 학습에 사용되지 않은 나머지 데이터는 학습된 신경회로망에 입력하여 출력된 결과와 데이터의 실제 결과를 비교하여 신경회로망의 정확성을 평가한다.

3. 실험방법

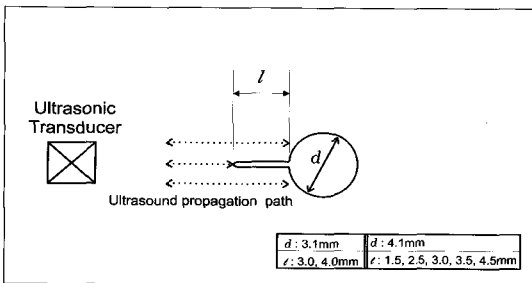


Fig. 2 Schematic diagram showing micro-crack initiated from rivet hole and the location of ultrasonic transducer to generate Lamb wave

시험편은 항공기 스킨패널(skin panel)로 많이 사용되는 알루미늄 2024-T3를 사용하여 제작하였다. Fig. 2와 같이 두께 1.6mm의 알루미늄 2024-T3 판재에 직경 $d=3.1, 4.1$ mm의 리벳홀을 드릴가공후 방전가공의 일종인 와이어 커팅에 의하여 미소 균열을 가공하였다. 본 연구에서의 미소 균열의 길이 l 은 직경 4.1mm의 리벳홀에 대해서 1.5mm, 2.5mm, 3.0mm, 3.5mm, 4.5mm이고, 직경 3.1mm의 리벳홀에 대해서 3.0mm, 4.0mm이다.

Fig. 3은 본 연구에서 사용한 초음파 측정 실험장비의 구성도이다. 중심 주파수가 5 MHz인 표면파 트랜스듀서가 적용되었고, 초음파의 전파방향은 Fig. 2와 같이 균열의 길이 방향과 평행한 방향이다. 리벳홀로부터 약 25mm 전방에 위치한 트랜스듀서로부터 두께 1.6mm의 얇은 판재인 시험편에 전달된 표면파는 판파(Lamb-wave)의 형태로 유도되어 균열선단과 리벳홀에서 각각 반사된 후 펄스에코법(Pulse-echo)에 의하여 다시 동일한 트랜스듀서로 수신된다.

시험편의 리벳홀과 균열로부터 각각 반사된 초음파 판파의 신호를 펄서 리시버 및 디지털 오실로스코프를 사용하여 다음과 같이 수신한다. 즉, 펄스 리시버에서 필터링되고 증폭된 수신초음파 신호는 LeCroy 9310A 디지털 오실로스코프에서 100MHz의 샘플링주파수로 디지털화되며, 초음파 신호의 잡음을 감소시키기 위하여 50개의 파형을 평균화하였다. 이들 초음파 신호의 파형 데이터는 HP B1321 위크스테이션으로 전송되고, 전송된 파형 데이터로부터 C언어로 구성된 프로그램에 의하여 신경회로망의 입력을 위한 시간 및 주파수 성분 데이터의 특징(feature)이 추출된다. 추출된 특징 데이터의 일부는 C언어 프로그램으로 구성된 신경회로망의 학습에 사용되었고, 신경회로망의 학습에 사용되지 않은 나머지 데이터 특징들은 학습된 신경회로망의 정확성 평가를 위하여 적용되었다.

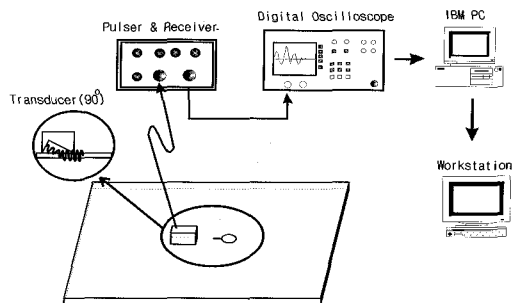


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup for ultrasonic pulse-echo technique

4. 실험결과 및 신경회로망 적용

4.1. 리벳홀 및 균열로부터 반사되는 에코의 특성

Fig. 4는 리벳홀 직경이 $d=4.1\text{mm}$ 인 경우에 대한 리벳홀과 균열에서 반사된 초음파 파형을 나타낸 것으로 균열크기, $l=3.5\text{mm}$ 인 경우의 예이며, 균열크기, $l=2.5\text{mm}, 3.5\text{mm}, 4.5\text{mm}, 3.0\text{mm}$ 의 경우에 대한 초음파 파형에서는 균열선단과 리벳홀에서 반사된 초음파 에코가 확연하게 구별되었다. Fig. 4의 파형에서 보이는 바와 같이 시간 축에서 첫 번째 나타나는 낮은 진폭의 신호는 균열선단에서 반사된 것이며, 두 번째로 나타나는 상대적으로 높은 진폭의 신호는 리벳홀에서 반사된 것이다.

그러나 균열크기, $l=1.5\text{mm}$ 인 경우의 초음파 파형인

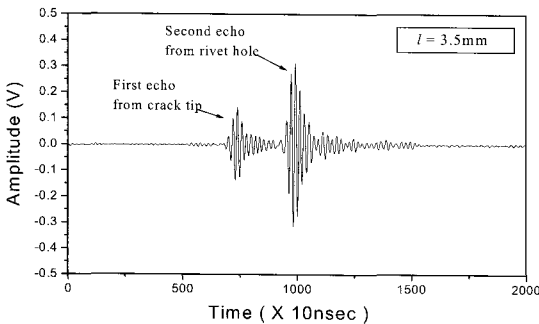


Fig. 4 Typical example of ultrasonic waveform (rivet hole diameter d : 4.1mm, crack length l : 3.5mm).

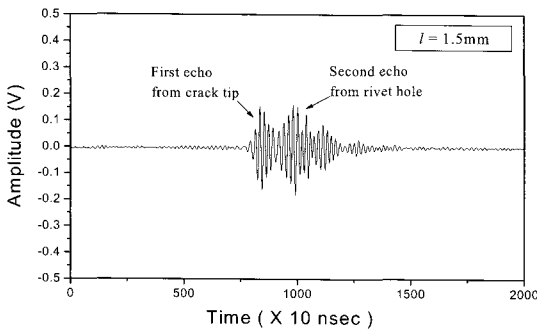


Fig. 5 Typical example of ultrasonic waveform (rivet hole diameter d : 4.1mm, crack length l : 1.5mm).

Fig. 5의 결과에서는 균열선단에서 반사된 초음파 에코와 리벳홀에서 반사된 초음파 에코가 중첩되어 있고, 특히 리벳홀에서 반사된 에코 즉, 시간영역에서 두 번째로 나타나는 에코는 다른 크기 균열의 초음파 파형에서 나타난 리벳홀에서 반사된 에코에 비하여 낮은 진폭을 나타내고 있다. 이것은 접촉식 초음파 탐상법에 있어서의 큰 문제점인 시험편과 트랜스듀서 사이의 커플링영향(coupling effect)[5]과 모드변환(mode conversion) 때문이며, 보다 정량적이고 신뢰성 높은 초음파 탐상기술을 위하여 이를 보완하는 대책이 필요하다. 한편, 접촉식 초음파 탐상법에서 시험편과 트랜스듀서 사이의 커플링영향은 이와 같이 리벳홀 및 균열선단에서 반사된 에코의 진폭 높기로 나타남으로, 본 연구에서는 리벳홀에서 발생된 미소균열의 크기를 평가하기 위하여 시험편과 트랜스듀서 사이의 커플링영향을 받지 않는 초음파 파형의 시간 및 주파수성분의 특징(feature)을 신경회로망에 적용하였다. 트랜스듀서와 시험편 사이의 커플링 영향을 받지 않는 초음파 파형의 시간성분 특징중 한 가지는 균열선단에서 반사된 에코와 리벳홀에서 반사된 에코 사이의 시간 차이 δt 이다. 시간축에서 두 에코의 대표점 사이 거리가 이 두 에코사이의 시간 차이가 된다. 두 에코 사이의 시간 차이를 측정하기 위하여 시간축에서 각각의 에코를 대표하는 점을 지정하여야하나 초음파 파형의 에코는 여러 개의 교번하는 피크를 가지게되므로 각 에코에 대한 대표적인 피크 하나를 정하기 위한 기준이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 절대적인 진폭의 크기를 나타내는 RMS(Root Mean Square)파형을 계산하여 피크의 대표점을 지정하였다. 즉, RMS파형에서 여러 개의 피크를 가지는 에코는 하나의 피크로 나타나게 되며 각 에코의 대표점은 이 RMS파형에서의 피크의 최대값을 나타내는 지점이 된다. Fig. 6은 두 에코 사이의 시간차이 δt 를 구하기 위한 RMS파형을 계산하는 방법을 나타낸 것으로서 Fig. 4 그리고 Fig. 5와 같은 초음파 파형의 진폭 데이터를 아래의 식 (4)에 의하여 초음파 진폭의 시간 변화에 대한 RMS값으로 나타낼 때 구간의 이동을 나타낸 것이다. 식 (4)에서 T 는 초음파 파형의 한 주기를 나타내며, v_i 는 초음파 파형의 진폭 데이터를 나타낸다. 각 초음파 진폭의 RMS는 Fig. 6에서와 같이 초음파 파형의 한 주기, T 구간에서 계산되며, 각 구간은 초음파 파형 데이터의 한 점(one sampling point)씩 이동한다.

$$RMS_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i+T-1} v_i^2}{T}} \dots\dots\dots (4)$$

다음의 Fig. 7은 앞의 식 (4)에 의하여 리벳홀 직경 $d=4.1\text{mm}$ 경우의 초음파 파형을 초음파 진폭의 RMS값으로 나타낸 결과로써 균열선단에서 반사된 에코와 리벳홀에서 반사된 에코는 각각 하나의 피크로 나타나게 되었다. Fig. 7로부터 각 균열크기에 대한 초음파 파형에서의 두 에코 즉, 균열선단에서 반사된 것과 리벳홀에서 반사된 각각의 에코들이 두 개의 큰 피크로 나타나므로 각 피크의 최고점으로서 그 대표점을 쉽게 지정할 수 있게 되었다. Fig. 7에서 각 균열 크기에 대한 초음파 진폭의 RMS파형을 비교해보면 균열의 크기가 증가할수록 두 피크 사이의 거리가 증가함을 알 수 있다. 이것은 균열의 크기가 증가할수록 리벳홀과 균열선단 사이의 초음파 전파 시간(time of flight)의 차이가 커지기 때문이다. 즉, 트랜스듀서와 리벳홀 사이의 초음파 전파 시간이 고정되어 있는 반면 균열의 크기가 증가할수록 트랜스듀서와

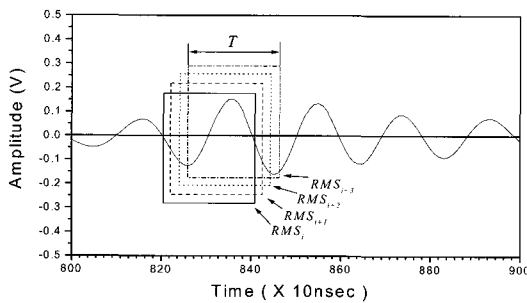


Fig. 6 Time ranges for calculating R.M.S. value of ultrasonic amplitude with moving window

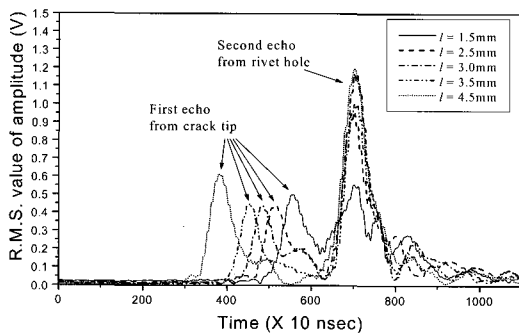


Fig. 7 Variation of R.M.S values of ultrasonic amplitude as a function of time for various crack length (rivet hole diameter $d : 4.1\text{mm}$)

균열선단 사이의 초음파 전파 시간이 점차 감소하기 때문이다. 두 피크에서 두 번째 피크 즉, 리벳홀에서 반사된 에코에 대한 피크가 더 높게 나타남을 알 수 있고, 이것은 초음파가 반사되는 불연속 경계면의 면적이 균열선단보다 리벳홀에서 더 넓기 때문이다. 피크의 높이는 전체적으로 유사한 크기이지만 소수의 경우 상대적으로 적은 값을 가지는 경우도 있었으며, 이것은 앞의 Fig. 5에서 보여주는 바와 같이 트랜스듀서와 시험편 사이의 커플링(coupling)의 영향 때문이라고 할 수 있다.

Fig. 8은 리벳홀의 직경 d 가 3.1mm 이고 균열의 크기, l 이 3.0mm , 4.0mm 인 경우의 리벳홀과 균열에서 반사된 초음파 파형 데이터를 앞의 식 (4)에 의하여 시간 변화에 대한 초음파 진폭의 RMS(Root Mean Square)파형으로 나타낸 것이다. Fig. 8의 리벳홀 직경이 $d=3.1\text{mm}$ 인 경우의 초음파 진폭의 RMS파형에서 리벳홀에서 반사된 에코는 앞의 Fig. 7에서 보여준 리벳홀의 직경이 $d=4.1\text{mm}$ 인 경우의 리벳홀에서 반사된 에코보다 그 진폭의 크기가 작음을 알 수 있고, 이는 시험편과 트랜스듀서 사이의 커플링영향 등에 의한 초음파 신호 진폭의 불규칙성이기도 하지만 리벳홀의 직경이 감소하여 두 번째 에코가 반사되는 불연속 경계면의 면적이 감소하였기 때문이기도 하다. 또한 앞의 Fig. 7의 결과와 동일하게 Fig. 8에서는 균열의 크기가 증가할수록 두 피크사이의 거리가 증가함을 알 수 있다. 한편, 균열크기가 $l=4.0\text{mm}$ 인 경우의 초음파 진폭의 RMS파형에서 대부분의 경우와 동일하게 균열선단에서 반사된 에코에 비하여 리벳홀에서 반사된 에코의 진폭 크기가 크게 나타남을 알 수 있으나, 균열크기 $l=3.0\text{mm}$ 경우의 초음파

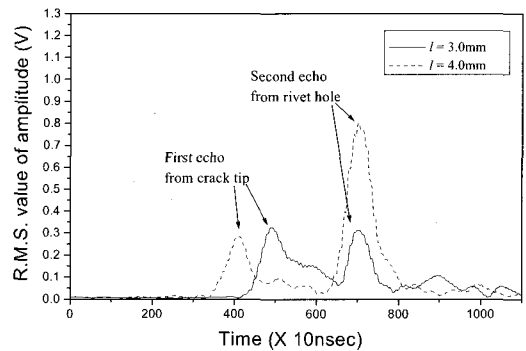


Fig. 8 Variation of R.M.S values of ultrasonic amplitude as a function of time for two different crack length (rivet hole diameter $d : 3.1\text{mm}$)

신호의 RMS파형에서는 균열선단에서 반사된 초음파 에코와 리벳홀에서 반사된 에코가 비슷한 진폭크기를 가짐을 알 수 있었다. 이로부터 Fig. 5와 Fig. 7의 결과에서 관측되어지는 시험편과 트랜스듀서 사이의 커플링 영향이 본 결과에서 나타나고 있음을 알 수 있다.

4.2. 신경회로망의 적용

일반적으로 신경회로망을 이용한 균열크기의 정량적인 평가를 위하여 무엇보다도 각 실험조건에서 측정된 초음파 파형에 있어서 유의한 초음파 파형 특성 추출(feature extraction)이 기본적으로 요구되어지며, 특히 앞의 Fig. 5와 Fig. 7~8의 각 실험결과에서 보여주는 초음파 트랜스듀서와 측정 시험편 사이의 커플링영향이 존재하는 경우에는 이들 영향을 최소화할 수 있는 인자들의 추출이 요구된다. 따라서, 본 연구에서는 신경회로망의 학습을 위하여 초음파 트랜스듀서와 시험편 사이의 커플링(coupling)영향을 최소화하기 위하여 초음파 신호의 시간 및 주파수 성분의 데이터들을 이용하였다. 본 연구에서 사용하고자 하는 초음파 파형에 있어서의 시간 성분의 데이터 추출은 이미 본 연구자들이 선행한 연구에서 알루미늄 시험편 저면에 존재하는 균열의 크기결정을 위한 신경회로망의 적용연구에 있어서 그 유용성이 입증된 것으로,[9,10] 이 외에도 K. Date 등, D. K. Mak 그리고 A. J. Hayman에 의해 균열의 높이, 위치, 그리고 각도 측정에 유용하게 사용될 수 있음이 보고되고 있다[11-13].

본 연구에서 초음파 트랜스듀서와 시험편 사이의 커플링 영향을 최소화하는 신경회로망의 입력을 위한 특성 중에서 시간성분의 특성은 Fig. 9에서 나타낸 초음파 파형에서의 파의 지속시간, Δt 그리고 Fig. 10에서 나타낸 초음파 신호 RMS파형의 두 피크사이 시간차이, δt 로 추출되었다. 그리고 Fig. 11에서 나타내는 바와 같이 RMS 파형의 Fourier 변환 데이터에서의 두 번째 피크 주파수가 주파수 성분의 신경회로망의 입력 특성이 된다.

신경회로망의 첫 번째 입력 특성인 파의 지속시간을 구하는 방법은 Fig. 9에서 보여주는 바와 같이 앞의 Fig. 4와 Fig. 5 등과 같은 시간영역 초음파 파형 데이터에서 20 μ s의 수신 받은 전체 구간동안의 초음파 파형 진폭 데이터의 절대값들의 평균치를 기준값(threshold)으로 하고, 이 기준값을 초과하는 첫 지점과 마지막으로 초과하는 지점의 시간차이를 파의 지속시간 Δt 로 하였다. 이와 같은 시간영역의 초음파 파형 진폭에 대한 절대값들의 평

균치를 추출하여, 초음파 파형의 진폭에 대한 상대적 값을 이용함으로써 트랜스듀서와 시험편 사이의 커플링(coupling)영향을 최소화하였다.

신경회로망의 두 번째 입력 특성인 초음파 진폭의 RMS파형에서 두 피크의 시간 차이 δt 를 구하는 방법은 다음 Fig. 10에서와 같이 미소 균열 선단 및 리벳홀에서 각각 반사된 두 개의 피크의 시간차이로 하였다. 즉 미소 균열 선단에서 반사된 첫 번째 피크의 최대값과 리벳홀에서 반사된 두 번째 피크의 최대값 사이의 시간 차이이다. 미소 균열 선단과 리벳홀에서 반사된 두 피크사이의 시간 차이 δt 는 각 에코의 시간역(time domain) 위치에 의존하며 초음파 트랜스듀서와 시험편 사이의 커플링 영향으로 나타나는 초음파 파형의 진폭변화와는 관계없으므로 트랜스듀서와 시험편 사이의 커플링 영향을 받지 않는다.

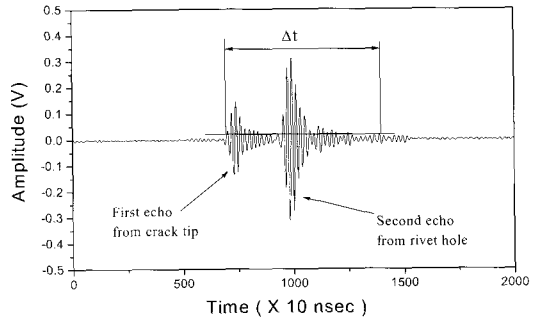


Fig. 9 Feature extraction of duration time Δt from measured ultrasonic waveform for neural network input

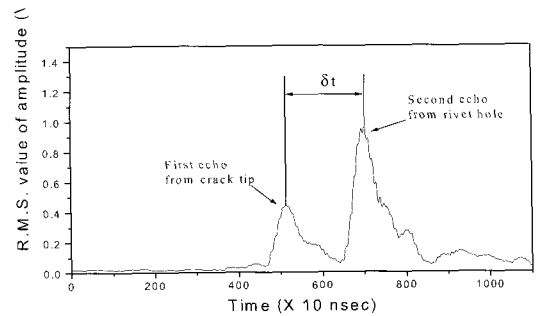


Fig. 10 Feature extraction of time distance δt between two peaks corresponding to reflection echo from crack tip and rivet hole for neural network input

신경회로망의 세 번째 입력 특성인 두 번째 피크 주파수는 초음파 신호에 대한 RMS 파형의 Fourier변환을 통하여 구한다. 다음의 Fig. 11과 같이 RMS파형의 Fourier변환을 통한 주파수역 데이터는 모든 균열크기에 대하여 첫 번째 피크의 주파수는 일치하지만 두 번째 피크는 균열의 크기가 증가함에 따라서 감소하는 경향을 나타내었다. 그중 대표적으로 리벳홀의 직경이 4.1mm일 때 균열길이가 1.5mm와 4.5mm인 예를 Fig. 11에서 나타내고 있다. 이와 같이 RMS파형의 주파수영역 데이터에서 두 번째 피크의 주파수는 균열크기 변화에 따른 영향을 나타내므로 신경회로망의 입력 특성으로 유용하게 적용되었다.

앞에서 설명한 초음파 파형의 시간 및 주파수 성분에서의 세 가지 특징을 신경회로망의 입력으로 하고 균열의 크기 l 을 출력으로 하여 다음과 같이 신경회로망을 학습시켰다. 본 연구에서는 시험편과 트랜스듀서 사이의 커플링 영향을 최소화하기 위하여 특별히 초음파 파형의 진폭높이와 관련된 성분을 배제하고 시간과 주파수 항목의 세 개의 입력 유니트를 사용하였다. 리벳홀 직경, $d=4.1\text{mm}$ 중에서 균열크기가 $l=1.5, 2.5, 3.5, 4.5\text{mm}$ 인 경우의 초음파 데이터의 특징들을 신경회로망의 학습을 위하여 이용하였다. 나머지 균열크기의 특징들 즉, 리벳홀 직경이 $d=4.1\text{mm}$ 이고 균열크기가 $l=3.0\text{mm}$ 인 초음파 데이터의 특성과 리벳홀 직경이 $d=3.1\text{mm}$ 이고 균열의 크기가 $l=3.0\text{mm}, 4.0\text{mm}$ 인 초음파 데이터의 특징들을 학습된 신경회로망의 정확성 평가를 위한 실제 균열 크기와 비교에서 사용하였다.

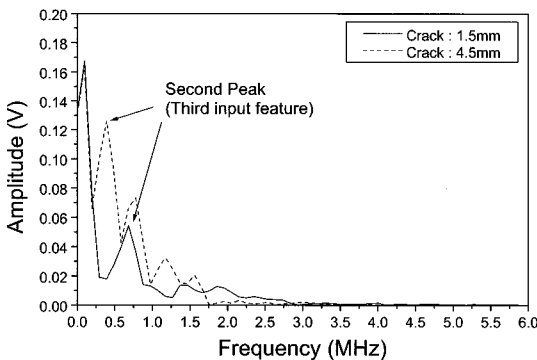


Fig. 11 Feature extraction of second peak frequency in FFT of R.M.S. waveform for neural network input

Table 1 Results of Neural Network

rivet hole sized (mm)	crack size l (mm)	neural network output(mm)	error(mm)
4.1	3.0	3.1423	0.1423 (4.74%)
3.1	3.0	3.0988	0.0988 (3.29%)
3.1	4.0	4.2735	0.2735 (6.84%)

그 결과로 신경회로망의 출력값과 실제 균열크기를 Table 1에서 비교하였다. 신경회로망의 학습은 오차함수 E 값이 1×10^{-3} 이내의 범위에 수렴할 때까지 1,253회의 반복학습이 수행되었다. 신경회로망의 학습에 사용된 리벳홀과 동일한 직경의 리벳홀에 대한 초음파 데이터의 특성을 입력한 경우 실제 균열크기 $l=3.0\text{mm}$ 에 대하여 신경회로망은 3.1423mm을 출력하여 실제 균열크기에 근사한 값을 나타내었다. 그리고 신경회로망의 학습에 사용된 초음파 데이터의 특징과는 다른 직경의 리벳홀에 대한 초음파 데이터의 특징 입력에 대한 신경회로망의 출력결과도 오차가 3.29% 및 6.84%로 정확하게 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 항공기의 구조용 재료에서 많이 적용되는 알루미늄 2024-T3 판재에 있어서의 리벳홀에서 발생한 미소 균열크기를 초음파 판파(Lamb wave)를 이용하여 평가하였다.

- (1) 리벳홀로부터 발생한 미소 균열의 크기변화로 인하여 각 시험편으로부터 수신된 초음파 판파의 파형에서 각 균열선단과 리벳홀에서 반사된 각각의 예코는 각 균열길이의 변화에 대응하는 시간차이를 보임을 알 수 있었다.
- (2) 수신된 초음파 파형에서 초음파 트랜스듀서와 측정 시험편 사이의 커플링영향을 받지 않기 위하여 초음파 파형 데이터에서 시간 및 주파수 성분의 특징 즉, 시간영역 데이터에서는 파의 지속시간 Δt 와 균열선단에서 반사된 피크와 리벳홀에서 반사된 피크사이의 시간차이 δt 를 그리고 RMS파형의 주파수영역 데이터에서는 균열크기에 민감한 두 번째 피크의 주파수를 신경회로망의 입력으로 적용하였고, 그 결과에서 정확한 균열크기측정이 가능함을 보여주었다.
- (3) 특히 본 연구의 초음파 파형 데이터의 시간 및 주파

수 성분 특성을 신경회로망에 적용하는 방법은 초음파 파형의 진폭크기에 영향받지 않으므로 신경회로망의 학습에 이용된 리벳홀과 다른 직경을 갖는 리벳홀의 경우에 대한 초음파 데이터의 시간성분 특징을 입력하여도 신경회로망에서는 오차 7%미만의 정확한 균열크기 측정이 가능하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성 평가 센터의 지원하에 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Schijve, J., "Multi-Site-Damage of Riveted Joint : Durability of Metal Aircraft Structures," Proc. of the International Workshop on Structural Integrity of Aging Airplanes, edited by S. N. Alturi et al, Atlanta Technology Publication, Georgia, pp. 2-27, (1992)
- [2] Lee, Joon-Hyun, "Applicability of Ultrasonic Technique for Evaluation of Elastic Plastic Fracture Toughness of High Manganese Steel at Low Temperature," *KSME International Journal*, Vol. 9, No. 1, pp. 1-7, (1995)
- [3] 이준현, 이진경, 조윤호, "세라믹의 열충격 손상거동 및 초음파를 이용한 비파괴 평가기술에 관한 연구," 대한기계학회 1997년도 춘계학술대회 논문집A, pp. 242~246, (1997)
- [4] Rose, J. L., Barshinger, J. N., "Guided Wave Applications in Aging Aircraft," *Proc. of 14th WCNDT*, pp. 157-160, (1996)
- [5] Achenbach, J. D., Komsky, I. N., Lee, Y. C., and Angel, Y. C., "Self-Calibrating Ultrasonic Technique for Crack Depth Measurement," *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 11, No. 2, pp. 103-107, (1992)
- [6] Guo, Qing-Chun, "Crack Size Determination From Back-scattered Waves," Ph. D. Dissertation, Northwestern University, (1994)
- [7] Takadaya, M. and Mandai, T., "Crack Parameter Characterization by a Neural Network," The First US-Japan Symposium on Advances in NDT, pp. 321-326, (1996)
- [8] Jame A. Freeman and David M. Skapura, *Neural Networks Algorithms, Applications, and Programming Techniques*, Addison-Wesley Publishing Company, (1991)
- [9] 최상우, 이준현, "저면산란 초음파 신호 및 신경회로망을 이용한 균열크기 결정," 대한기계학회 1997년도 추계학술대회 논문집A, pp. 35-40, (1997)
- [10] 이준현, 최상우, "저면산란 초음파 신호 및 신경회로망을 이용한 균열크기 결정," 대한기계학회 논문집 A권, 제 24권, 제 1호, pp. 52-61, (2000)
- [11] Date, K., Shimada, H. and Ikenaga, N., "Crack Height Measurement - an Evaluation of the Accuracy of Ultrasonic Timing Methods," *NDT International*, December pp. 315-319, (1982)
- [12] Hayman, A. J., "An Improved Ultrasonic Tip-Corner Timing Method for Sizing Shallow Surface-Breaking Cracks," *British Journal of NDT*, September pp. 295-299, (1985)
- [13] Mak, D. K., "Ultrasonic Methods for Measuring Crack Location, Crack Height and Crack Angle," *Ultrasonics*, September pp. 223-226, (1985)