

## 정량적 초음파 시험을 위한 결함분류와 크기산정의 새로운 기법

### New Approaches to Flaw Classification and Sizing for Quantitative Ultrasonic Testing

송 성 진\*

Sung-Jin Song

(1996년 10월 17일 접수, 1997년 6월 10일 채택)

#### ABSTRACT

In modern high performance engineering applications, the structural integrity of materials and structures are quite often evaluated using fracture mechanics. This evaluation in turn requires information on the flaw geometry (location, type, shape, size, and orientation). The ultrasonic nondestructive evaluation (NDE) method is one technique that is commonly used to provide such information. Flaw classification (determination of the flaw type) and flaw sizing (prediction of the flaw shape, orientation and sizing parameters) are very important issues for quantitative ultrasonic NDE. In this paper new approaches to both classification and sizing of flaws are described together with extensive review of previous works on both topics. In the area of flaw classification, a methodology is developed which can solve classification problems using probabilistic neural networks, and in the area of flaw sizing, a time-of-flight equivalent (TOFE) sizing method is presented. The techniques proposed here are in a form that can be used directly in many practical applications to quantitative estimates of the flaw's significance.

#### 1. 서 론

대부분의 공업재료, 기계부품 그리고 기계구조물은 여러가지 결함을 내포하고 있다. 그 중에서도 특히 최근들어 첨단 기계재료로서 그 활용이 날

로 증가하고 있는 섬유강화 복합재료와 여러가지 기계부품 및 기계구조물의 접합공정으로 가장 널리 사용되고 있는 용접부는 그 제조공정의 특성상 결함이 발생할 가능성이 매우 높을 뿐 아니라, 사용 도중의 손상으로 결함이 성장하는 경우가 많

\*조선대학교 공과대학 기계설계공학과

다. 이러한 결함중 피로균열을 포함한 균열성 결함은 구조물의 기계적 강도에 치명적 영향을 미치며, 경우에 따라서는 예기치 않은 파괴를 일으키기도 한다. 따라서 재료 및 구조물에 존재하는 결함을 검출하고 그 영향을 정량적으로 평가하는 것은 기계구조물의 품질보증과 구조물의 안정성 확보를 위한 핵심적인 과제이다.

결함의 영향평가는 주로 파괴역학적인 방법을 사용하여 이루어지고 있는데, 이를 위해서는 먼저 결함에 대한 정량적인 정보가 필요하다. 결함의 위치, 종류, 크기, 방향등 결함에 대한 정량적인 정보는 비파괴 시험을 통해 얻어지는데, 최근 산업현장에서 가장 널리 적용되고 있는 비파괴 시험중의 하나가 초음파 시험(Ultrasonic Testing)이다.

산업현장에서 사용되고 있는 재래식 초음파 시험은 결함의 검출과 위치 파악에는 대단히 효율적인 방법이지만, 정량적 결함분석을 위해 필요한 결함의 종류판별과 크기산정에는 아직도 많은 문제를 안고 있다. 따라서 초음파 시험을 통해 결함의 종류를 정확히 판단하고, 결함의 크기를 정량적으로 산정할 수 있는 기법의 개발에 대한 연구가 비파괴 평가 분야에서 꾸준히 수행되었다. 그러나 지금까지 수행되어 온 대부분의 연구가 새로운 기법에 대한 제안과 이에대한 실험실적 검증 위주로 이루어지고 있어 실제 산업현장 적용에까지는 미치지 못하고 있는 실정이다. 더구나 이 연구들은 결함의 종류 판별과 크기 산정을 두가지 별개의 과제로 다루고 있으나, 이 두 문제는 실제로는 “결함 평가”라는 하나의 문제이기 때문에, 현장적용을 위해서는 두 문제에 대한 동시 연구가 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 지금까지 비파괴평가 분야에서 수행되어 온 결함의 종류 판별과 크기 산정에 대한 종래의 연구들을 면밀히 분석하고, 이를 바탕으로 결함의 영향을 정량적으로 평가하는 데 직접 활용할 수 있는 결함분류와 크기 산정의 새로운 기법을 제안하고 그 효율성을 검증코자 한다.

## 2. 초음파시험에 의한 결함 분류

현재 산업현장에서 사용되는 재래식 초음파 시험에서 결함의 종류 판별은 작업자가 초음파 탐촉

자를 결함 주위로 움직일 때 나타나는 에코동패턴(Echodynamic pattern)의 변화를 이용하여 실시한다<sup>1,2)</sup>. 그러나 이 작업은 작업자의 경험과 지식에 크게 좌우될 뿐 아니라, 많은 경우 실제적인 문제를 해결하는데 미흡한 점이 대단히 많다.

이러한 문제를 해결하기 위해 초음파 시험에서 얻게 되는 결함 신호의 진폭을 이론적 예측치와 비교함으로써 정량적인 결함 분류를 실시하는 기법들이 다수 개발된 바 있다. 예를 들어, Shcherbinskii and Belyi<sup>3)</sup>는 탠덤방식(Tandem method)으로 측정된 결함의 “형상인자(Form factor)”를 활용하는 방법을 제안한 바 있으며, Volpinkin<sup>4)</sup>은 이러한 개념을 용접결함의 종류 판별에 적용시킨 연구를 수행한 바 있다. 그리고 Gruber<sup>5)</sup>의 “위성펄스기법(Satellite-pulse technique)”도 이러한 범주의 연구에 속한다. 또한 Chiou and Schmerr<sup>6)</sup>는 의사 펄스-에코 방식의 초음파 시험에서 구한 결함 신호의 비행시간차와 모드변환 회절신호의 진폭차를 이용하여 결함의 종류를 판별하는 기법을 개발한 바 있다. 한편으로는 결함신호의 진폭정보 대신에 주파수 영역 상의 특징들을 사용하여 결함을 분류하려는 연구도 수행되었는데<sup>7,8)</sup>, Fitting and Adler<sup>9)</sup>가 이러한 연구들을 자세히 정리한 바 있다.

앞에서 언급한 이러한 연구들은 초음파 결함신호에서 결함의 종류를 판별하는데 핵심적인 역할을 하는 “강한 특징(Strong features)”을 추출해 내고 이를 활용하는 것을 전제로 하고 있다. 그러나 불행히도 대부분의 실제적인 문제들은 이렇게 단순한 기법으로 해결할 수 없는 경우가 대부분이기 때문에, 이러한 복잡한 문제의 해결을 위해 “초음파 형상인식(Ultrasonic pattern recognition)”에 대한 연구가 수행되었다. 초음파 형상인식 기법은 1) 결함신호를 채취하고, 2) 채취한 결함신호로부터 결함분류에 유용한 특징을 추출하고, 그리고 3) 이 결함신호의 특징을 기초로 적절한 의사결정 알고리즘을 이용하여 결함을 분류하는 세가지 단계로 구성되어 있다. 초음파 형상인식에 관한 초기 연구는 Rose와 그 동료들<sup>10-12)</sup>에 의해 수행되었다. 그들은 시간영역의 초음파 신호로부터 물리적 현상에 기초한 특징들을 추출하였고, Fisher의 선형판별함수를 이용하여 결함분류를 실시하였다. Burch and Bealing<sup>13)</sup>은 철강용접부의 내부결함을 분류하기 위해 Rose와 비슷한 기법을 사용하였는

데, 분류기로서 최단거리 분류기(Minimum distance classifier)를 사용하였다. 그리고 그후 Burch<sup>14)</sup>는 이러한 기법을 수직결합과 근사수직결합을 분류하는데 사용한 바 있다.

최근 인공지능분야의 발전으로 인해 결합분류에 인공지능기법을 활용하는 연구가 활발히 수행되고 있다. 예를 들어, Mucciadi<sup>15,16)</sup>는 초음파 결합신호의 Power spectrum에서 추출한 특징들을 사용하여, 결함을 분류하는 기법을 발표한 바 있는데, 이 연구에서 Mucciadi는 적응학습회로망(Adaptive learning network)를 분류기로 사용하였다. Koo<sup>17)</sup>는 적응학습회로망과 초음파 탐상시험에 대한 이론적 모형, 그리고 신호처리기법을 결합시킨 결합분류 시스템을 개발한 바 있으며, Schmerr<sup>18,19)</sup>는 법칙에 근거한 전문가시스템(Rule-based expert system)을 개발한 바 있다.

최근에 들어 신경회로망(Neural networks)을 이용하려는 연구도 또한 다양하게 수행되고 있다. 신경회로망은 인간 두뇌의 구조와 작동원리를 모형화할 수 있다는 독특한 장점때문에<sup>20,21)</sup> 최근 이를 활용하는 연구가 급증하고 있는데, 신경회로망은 단순한 처리요소(Processing elements)들이 서로 대단히 밀접하게 연결되어 있는 구조를 지니고 있는데, 이 단순처리 요소들이 외란에 대해 동시에 반응하면서 매우 빠른 속도로 데이터를 처리한다. 또한 신경회로망은 입력층에 제시된 학습표본을 통해 입력과 출력사이의 연관관계를 추론할 수 있을 뿐 아니라, 한번 학습이 완료되면 새로운 표본이 제시될 때 그 표본에 대한 결과를 매우 신속히 구할 수 있는 독특한 장점을 지니고 있다. 특히 역전파 알고리즘(Back-propagation algorithm)이 제안된 후<sup>22)</sup>, 여러 분야에서 그 응용이 더욱 널리 확산되고 있는데, 비파괴 평가 분야에서도 신경회로망의 활용이 지속적으로 확대되고 있다. 특히 비파괴 평가 분야에서 역전파 신경회로망(Back-propagation neural networks; BPNN)은 여러가지 결함분류와 크기산정문제에 적용된 바 있다<sup>23-26)</sup>. 그러나 이 역전파 신경회로망은 몇가지 중대한 단점을 가지고 있기 때문에 적용상에 많은 문제를 또한 내포하고 있다.

다행히도 신경회로망이 가지고 있는 여러가지 장점을 모두 갖추고 있으면서도 역전파 신경회로망이 가지고 있는 단점을 가지지 않는 새로운 신경

회로망이 Specht에 의해 제안된 바 있는데 이 신경회로망이 곧 확률신경회로망(Probabilistic neural network; PNN)이다<sup>27-30)</sup>. 비파괴 평가분야에서는 Song and Schmerr<sup>31)</sup>가 PNN을 결함분류기로 활용한 바 있으며, 최근에 Song<sup>32)</sup>이 PNN을 적용하는데 수반되는 특징추출, 특징선택, 결함분류의 세부과제를 자세히 논의한 바 있다.

본 연구의 첫번째 주제인 결합분류기법 개발에 대해서는 실제적인 결함분류 문제에서 가장 큰 관심사항이 되는 문제인 균열(Crack)을 여타 다른 형태의 결함들인 비균열성 결함(Non-crack)과 어떻게 구별할 수 있는지에 대한 문제를 초음파 형상인식을 이용하여 해결하는 기법을 제시코자 하며, 특히 PNN을 결함분류기로 적용하는 적용상의 세부기술에 대해 논의코자 한다.

### 3. 초음파시험에 의한 결함 크기산정

현재 산업현장에서 사용되는 재래식 초음파 시험에서 결함의 크기산정작업은 초음파 결합신호의 진폭을 이용하여 이루어지고 있다. 결함의 크기가 초음파 탐촉자의 직경보다 작은 경우에는 평저공(Flat-bottom hole)이나 구(Sphere)를 크기가 알려진 대비산란체(Reference scatterer)와 비교하여 결함의 크기를 산정하는데, 이 방법은 거리-진폭-크기(Distance-Gain-Size; DGS)곡선을 사용하는 방법으로 알려져있다. KrautKramer에 의해 처음으로 제안된<sup>33,34)</sup> 이 DGS곡선은, 실제 산업현장에서 널리 활용되고 있는 매우 중요한 대비곡선임에도 불구하고 이 곡선에 대한 연구는 최근까지 별로 수행되지 않고 있었다. 다행히 최근에 Schmerr and Sedov<sup>35)</sup>와 Sedov, Schmerr and Song<sup>36)</sup>이 평저공에 대한 펄스-에코 시험모델을 개발한 이후, Song, Schmerr and Sedov<sup>37)</sup>가 이 모델을 이용하여 이론적 DGS곡선을 작성하는 기법을 개발한 바 있다. 이 이론적 DGS곡선은 초음파탐촉자의 원거리 음장뿐 아니라 근거리 음장내에서도 실험적인 DGS곡선과 잘 일치하고 있어 실제 산업현장에서 이론적 대비곡선으로 활용이 가능하리라 판단된다.

DGS곡선은 결함의 크기가 대체로 탐촉자의 직경보다 작은 경우에만 적용이 가능하기 때문에, 결함의 크기가 큰 경우에는 에코동패턴을 사용하

여 결함크기를 산정한다<sup>1,2)</sup>. 그러나 이 방법으로는 결함의 위해도 평가를 위한 파괴역학적 계산에 이용할 수 있을 정도로 정량적인 결과를 얻기가 대단히 어려운 실정이다.

초음파 결함신호의 진폭은 여러가지 시험변수에 의해 진폭의 변화가 심하기 때문에 진폭정보에 의존하여 결함의 크기를 산정하는 재래식 초음파 시험은 실제적용상의 어려움이 많다. 이러한 제약을 극복하기 위한 방법으로 초음파의 비행시간(Time-of-flight)이나 비행시간과 진폭을 동시에 이용코자 하는 기법이 개발되었다. 이러한 기법으로는 비행시간회절(Time-of-Flight Diffraction; TOFD) 기법<sup>39~41)</sup>과 위성펄스(Satellite-Pulse)기법<sup>4,42)</sup> 등이 있다. 그러나 이러한 기법이 특정문제에서는 좋은 결과를 보여주고 있으나, 여전히 결함의 방향과 크기에 대한 정량적인 정보를 충분히 제공하는 데에는 만족스럽지 못한 실정이다.

결함의 기하학적 형상에 대한 보다 자세한 정보를 얻기 위하여 여러가지 영상화(Imaging)기법이 또한 개발된 바 있다<sup>43)</sup>. 이러한 기법으로는 Synthetic Aperture Focussing Technique(SAFT)<sup>44,45)</sup>, Amplitude and Transit Time Locus Curves(ALOK)<sup>46)</sup>, 음향홀로그래피<sup>47)</sup>, 그리고 초음파 토모그래피(Tomography)<sup>48)</sup> 등이 있다. 이러한 기법들은 결함에 대해 매우 정밀하고 자세한 주사를 행한 후, 이로부터 얻은 다량의 데이터를 처리해야 하기 때문에, 시간과 경비가 많이 드는 약점을 가지고 있다. 뿐만 아니라 이러한 처리를 거쳐 얻은 결함영상도 파괴역학적 계산에 곧바로 적용될 수 없는 경우가 허다하다.

산업현장에서 사용되는 기존의 결함 크기산정 방법과 결함 영상화 기법 사이의 중간에 위치하는 결함 크기산정기법이 또한 개발되었는데, 이를 “등가결함 크기산정(Equivalent flaw sizing)”이라 부른다. 이 기법에서는 결함을 찾아낸 후 그 결함의 기하학적 특징을 가장 잘 나타낼 수 있는 최적 타원체나 혹은 타원으로 결함의 크기를 표현한다. 이 기법은 초음파가 체적결함(Volumetric flaws)으로부터 산란되는 과정을 기술하는 Born근사법<sup>49,50)</sup>이나, 균열로부터 산란되는 초음파를 기술하는 Kirchhoff 근사법<sup>51)</sup> 등 초음파 산란에 대한 이론적 모형을 바탕으로 개발되었는데, Schmen<sup>52)</sup>은 이 두가지 결함(즉, 체적결함과 균열)에 모두 적

용시킬 수 있는 통일된 알고리즘을 개발한 바 있다.

등가결함 크기산정 기법은 다음과 같은 두가지 과정으로 구성되어 있다. 1) 초음파시험에 의해 결함의 중심으로 부터 결함선단까지의 거리를 나타내는 “등가반경(Equivalent radius)”의 측정과 2) 측정된 등가반경으로 부터 최적타원체나 타원을 구하는 최적화 과정이다. 등가반경은 등가결함 크기산정 기법의 정확성에 가장 큰 영향을 미치는 핵심요소인데, 이 등가반경의 측정은 초음파 결함신호로부터 적절한 신호처리기법을 통해 결정한다. 그러나 불행이도 이 과정은 소위 “시간원점(Zero-of-time)문제”를 완전히 해결하지 못한 상태이며, 이를 해결하기 위한 연구가 현재 진행중에 있다<sup>53~56)</sup>. 두번째 과정은 최적화 알고리즘의 효율에 관한 문제인데, 과거에는 매우 복잡한 비선형 최적화 문제를 풀어야했기 때문에 시간과 정확성에서 많은 문제가 있었지만, 최근에 Chiou and Schmen<sup>59)</sup>가 이러한 복잡성을 해소할 수 있는 매우 좋은 방법을 개발하였다. 이들은 이 최적화과정을 단순한 선형최소자승 문제와 고유치문제의 해를 구하는 두 단계로 분할하여 원하는 해를 구하였다.

본 연구의 두번째 주제인 결함 크기산정 문제에서는 등가결함의 크기를 결정하는 새로운 기법을 제안코자하는데, 이 기법은 비행시간값을 사용하여 등가결함 크기를 산정하기 때문에 “비행시간 등가결함 크기산정법”(Time-of-Flight Equivalent (TOFE) Sizing method)이라 명명하였다.

#### 4. 확률신경회로망에 의한 결함분류

여기에서는 결함의 종류판별을 위한 효율적인 기법으로서 확률신경회로망(PNN)의 적용기법에 대해 논의코자 한다. 이를위해 먼저 PNN의 구조와 학습 그리고 결함분류에 대해 간략히 설명하고, 이를 용접부내에 있는 결함을 균열(Crack)과 비균열(Not-crack)로 분류하는데 적용시킴으로서 결함분류에 있어 PNN의 효율성에 대해 검증코자 한다.

##### 4.1 확률신경회로망의 구조

Fig. 1에 확률신경회로망의 구조를 나타내었다. PNN은 4개의 층(Layer)으로 구성되어 있다. 첫째 층은 입력층으로서 여기를 통해 각 표본의 특징 벡터( $X_i$ )가 PNN에 공급된다. 두번째 층은 패턴층으로서 입력층에 공급된 표본의 특징값  $X_i$ 에 가중치  $W_{ij}$ 를 곱한 결과들의 합을 받아들여, 그 값에 지수 함수를 적용한 값을 출력시킨다. 세번째 층은 합산층으로서, 합산층의 각 노드(node)들은 패턴층의 노드들 중 자신과 같은 범주에 속한 노드들에만 연결되어 있는데, 연결된 패턴층의 노드들의 출력의 합을 입력으로 받아들인 후 여기에 사용자가 정의한 파라미터인  $C_i$ 를 곱하여 그 결과를 출력시킨다. 마지막으로 네번째 층은 출력층으로서 최종적인 출력이 결함 분류 과정에 사용된다.

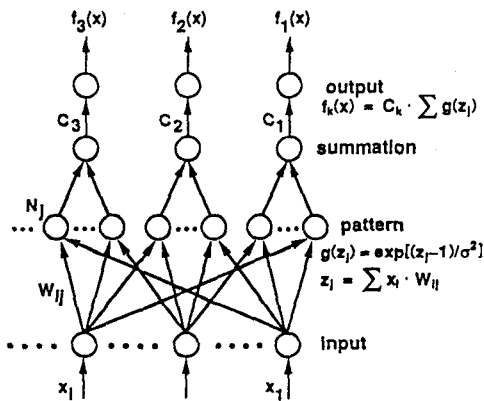


Fig. 1 Architecture of probabilistic neural networks

다른 종류의 신경회로망과는 달리, PNN의 구조는 주어진 문제가 가지고 있는 결함 종류의 수와 학습과정에서 사용된 학습표본의 수에 의해 완전히 결정된다. 즉 출력층과 합산층의 노드의 수는 결함종류(즉 범주)의 수와 같고, 패턴층의 노드수는 학습표본의 수와 일치하며, 입력층의 노드수는 특징벡터의 특징수와 동일하다. 그리고, PNN에는 세가지 종류의 가중치가 존재한다. Fig. 1의  $W_{ij}$ 는 학습 표본의 특징벡터들의 특징값을 그대로 사용하기 때문에 학습 표본으로부터 직접 결정된다.  $W_{ij}$ 이외에도 PNN내에는 조절가능한 파라미터로서 사용자가 정의하는 파라미터인  $C_i$ 와 전달 함수내의 평활화 계수  $\sigma$ 가 있다.

### 4.2 PNN의 학습과 결함분류

PNN의 학습과정은 매우 간단한 다음의 3과정으로 이루어져 있다. (1) 학습 표본이 주어지면 패턴층에 이에 해당하는  $j$ 번째 노드  $N_j$ 를 설정한다. (2) 만약에  $X_{ij}(i=1, 2, 3, \dots, M, j=1, 2, \dots, N)$ 를 주어진  $j$ 번째 학습표본의  $i$ 번째 특징이라고 하면, 패턴층의  $j$ 번째 노드와 입력층의  $i$ 번째 노드를 잇는 연결선의 가중치  $W_{ij}$ 를  $X_{ij}$ 와 같게 한다. (3) 그리고 마지막으로 패턴층의  $j$ 번째 노드를 주어진 학습 표본이 속해있는 범주에 해당하는 합산층과 연결한다.

학습과정에서 특징적인 것은 가중치  $W_{ij}$ 가 반복 과정이 없이 “순간적”으로 결정된다는 것이며, 따라서 학습도 “순간적”으로 완료된다는 점이다. 또한 이 학습과정에서 PNN은 학습 표본으로부터 Parzen window 방법을 통해 각 범주별 확률밀도 함수를 계산한다는 점이 또한 주목할 만하다.

일단 회로망의 훈련이 끝나면 사용자 정의의 파라미터인  $C_i(i=1, 2, 3)$ 와 평활화 파라미터  $\sigma$ 를 선택해야 한다.  $C_i$ 는

$$C_i = \frac{h_i l_i}{n_i} \dots \dots \dots (1)$$

로 정의된다. 여기에서  $h_i$ 는  $i$ 번째 범주의 사전확률,  $l_i$ 는 손실계수,  $n_i$ 는  $i$ 번째 범주내의 학습표본의 수이다. 따라서 사용자가 균열과 같은 어떤 특정 범주에 더 큰 비중을 두고 싶을 때에는 손실계수  $l_i$ 에 큰 값을 지정할 수 있다.

평활화 계수  $\sigma$ 는 패턴층내에 있는 각 패턴들의 개별적인 중요도를 조절하는 계수로서  $\sigma$  값을 작게 하면 개개의 패턴에 대한 중요성을 강조하게 되고,  $\sigma$  값을 크게 하면 많은 패턴들의 평균적인 거동을 강조하게 된다.

PNN의 학습과 회로망 파라미터에 대한 선택이 끝나면, 이 PNN을 이용하여 시험표본에 대한 결함분류를 수행할 수 있다. PNN의 결함분석 알고리즘은 “주어진 시험표본에 대한 출력층의 노드중 최대값(이 값은 곧 최대 예상손실을 의미함)을 갖는 범주를 그 시험표본의 범주로 결정한다”라고 할 수 있다. 이것은 곧 PNN이 Bayes법칙에 따라 결함분류를 수행함을 말한다.

### 4.3 초음파 특징 추출과 PNN

본 연구에서는 미국 Westinghouse사가 연구를 위해 특별히 제작하여 결함의 종류, 위치 그리고 대략적인 크기를 알고 있는 용접결함을 내포하고 있는 강용접 시험편에서 채취한 A-스캔 협대역 초음파 결함 신호를 사용하였다. 이 시험편의 대략적인 크기는 길이 875mm×폭 630mm×두께 270mm이며 일반 강재로된 시험 상부를 스테인리스강으로 약 6.0mm 정도 클래딩(cladding)하였기 때문에, 이 시험편에서 채취한 초음파 결함신호는 매우 많은 노이즈 성분을 포함하고 있다. 균열에서 104개, 그리고 비균열성 결함에서 135개, 총 239개의 결함신호를 수집하여 이중 120개의 결함신호를 학습표본으로 하고 나머지를 시험표본으로 사용하였다.

이들 결함신호로부터 Table 1에 보인대로 총 14개의 특징(시간영역에서 10개, 주파수 영역에서 4개)을 추출하였다. 이 특징들은 균열로부터 초음파 빔이 산란될 때 이론적으로 예견되는 특징인 역대칭성(antisymmetry)을 제외하고는 대개가 채취된 결함신호의 특성을 고려하여 직관적으로 결정된 특징들이다.

Table 1 Features extracted from ultrasonic flaw signals

| Time Domain Features                                   |  |
|--|--|
| 1) number of signal groups                             |  |
| 2) pulse duration of the 1st group signal              |  |
| 3) pulse duration of the 2nd group signal              |  |
| 4) pulse duration of the 3rd group signal              |  |
| 5) energy of the 1st group signal                      |  |
| 6) energy of the 2nd group signal                      |  |
| 7) energy of the 3rd group signal                      |  |
| 8) interval between the 1st and the 2nd groups         |  |
| 9) interval between the 2nd and the 3rd groups         |  |
| 10) antisymmetry of signal                             |  |
| Frequency Domain Features                              |  |
| 11) number of maxima of the magnitude spectrum         |  |
| 12) number of minima of the magnitude spectrum         |  |
| 13) number of deep minima of the magnitude spectrum    |  |
| 14) number of shallow minima of the magnitude spectrum |  |

그리고 이상의 초음파 특징들을 이용하여 결함 분류를 수행할 수 있도록 PNN을 구성하였는데, 이 PNN은 14개의 입력층 노드와 120개의 패턴층 노드, 그리고 2개의 합산층 및 출력층 노드를 가지고 있으며, 패턴층 노드의 전달 함수로서 지수함수를 사용하였다.

#### 4.6 성능 평가 기준

결함분류 성능을 평가하기 위하여 “정확한 채택율(correct accept rate)”, (CA)<sub>i</sub>와 “오류 기각률(false reject rate)”, (FR)<sub>i</sub>등 두가지 평가 기준을 선택하였다. (CA)<sub>i</sub>와 (FR)<sub>i</sub>는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$(CA)_i = \frac{m_i}{n_i} \quad (i=1,2,3) \dots\dots\dots (2)$$

$$(FR)_i = \frac{\sum_j m_{ji}}{\sum_j n_j} \quad (j \neq i) \dots\dots\dots (3)$$

여기에서 m<sub>i</sub>는 범주 i에 속한 총 n<sub>i</sub>개 시험표본 중 정확히 분류된 시험표본 수이며, m<sub>ji</sub>는 범주 j에 속한 n<sub>j</sub>개의 시험표본 중 범주 i로 잘못 분류된 시험표본의 수를 나타낸다.

#### 4.7 PNN의 성능

Fig. 2a에 σ = 0.1, l<sub>i</sub> = 1(i=1,2,3)인 경우의 PNN의 성능을 나타내었으며, Fig. 2b, c는 각 결함 범주에 대한 손실계수 l<sub>i</sub>를 다르게 취했을 때의 PNN의 성능을 나타내었다.

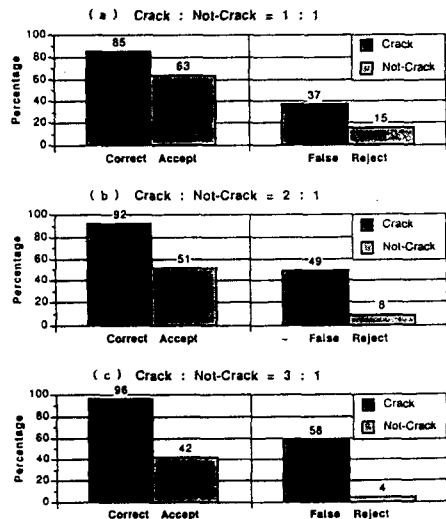


Fig. 2 Influence of the choice of the l<sub>i</sub> parameter on PNN performance

잘 알려진 바대로 균열은 여타 다른 결함보다도 훨씬 중요하기 때문에 균열을 다른 결함으로 오분

류했을때 입게되는 피해는 상대적으로 클 수밖에 없다. 그래서 균열에 대한 손실계수를 높게 책정하면 (Fig. 2b, c) 균열에 대한 정확한 채택율이 향상되는데, 이때 유의해야할 점은 균열에 대한 오류 기각률도 동시에 증가한다는 점이다.

Fig. 2에 보인 PNN의 성능은 불행히도 통상 얻기를 희망하는 높은 정확도에 비해서 상당히 낮은 값을 보여주고 있다. 이렇게 결함분류 정확도가 낮은 이유는 초음파 결함 신호자체에 많은 량의 노이즈를 함유하고 있는 등 데이터 자체의 특성에 기인한다고 보여진다. 최근 많은 연구 결과에서 PNN이 K-최근접 분류기(K-nearest neighbor classifiers: KNN)이나 BPNN으로 얻을 수 있는 것보다 더 우수한 성능을 보인다고 보고되고 있다.<sup>30~32)</sup>

### 5. 비행시간 등가결함 크기산정기법

등가결함 크기산정을 위한 새로운 기법으로서 비행시간 등가결함 크기산정(Time-of-Flight Equivalent(TOFE) Flaw Sizing; 이하 TOFE크기산정)기법에 대해 논의한다. 이를 위해 먼저 TOFE 크기산정 알고리즘에 대해 간략히 설명하고, 이를 용접부와 복합재내의 균열성 결함 크기산정에 적용한 예를 통해 이 기법의 효용성을 검증코자 한다.

#### 5.1 TOFE크기산정 기법

Fig. 3에 TOFE크기산정을 위한 수침 초음파 시험의 실험배치를 개략적으로 나타내었다. 초음파탐촉자는 매질 1(보통 물을 사용)의  $X_T$  위치에 존재하며, 이 초음파 탐촉자에 발진된 초음파빔은 매질 1에서  $n_1$ 의 방향으로 진행하여 매질 1과 매질 2의 경계점  $X_1$ 을 통해 매질 2로 입사한다. 매질 2에는 결함이  $X_C$ 의 위치에 존재하는데, 이때 빔입사점  $X_1$ 에서 입사되어  $n_2$ 의 진행방향으로 결함에 도달한 초음파빔과는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$(X_1 - X_C) \cdot n_2 = H_2 + r_e \quad \dots \dots \dots (4)$$

여기에서 윗첨자 j는 j번째 측정시에 대한 값들을 의미하며,  $H_2$ 는 초음파빔이 결함과 최초로 만나게 되는 접선평면과  $X_1$ 점과의 거리를 나타내며,  $r_e$ 는 등가반경(Equivalent radius)으로서  $X_C$ 와 접

선평면과의 거리를 나타낸다.

이 값들은 A-scan 초음파 탐상 신호로부터 쉽게 결정할 수 있다. 즉, 초음파빔이  $X_T$ 를 출발하여  $X_1$ 에 도달할 때까지의 비행시간  $\Delta T_1$ 와,  $X_1$ 으로부터 결함의 접선평면까지의 비행시간  $\Delta T_2$ 는 A-scan초음파탐상신호에서 쉽게 결정할 수 있다. 매질 1에서의 초음파의 진행속도를  $C_1$ 이라 하고, 매질 2에서의 초음파의 진행속도를  $C_2$ 라 하면,  $X_T$ 와  $X_1$ 의 거리  $H_1$ 는  $H_1 = C_1 \cdot \Delta T_1$ , 그리고  $H_2 = C_2 \cdot \Delta T_2$ 로 주어진다. 또한 매질 2에 입사하는 초음파빔의 입사점은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$X_1 = X_T + H_1 \cdot n_1 \quad \dots \dots \dots (5)$$

그리고  $n_2$ 는 Snell의 법칙에 의해 구할 수 있다. 이렇게 하면 식(4)의 변수중 결함중심점  $X_C$ 와 등가반경  $r_e$ 를 제외한 값들이 모두 결정된다.

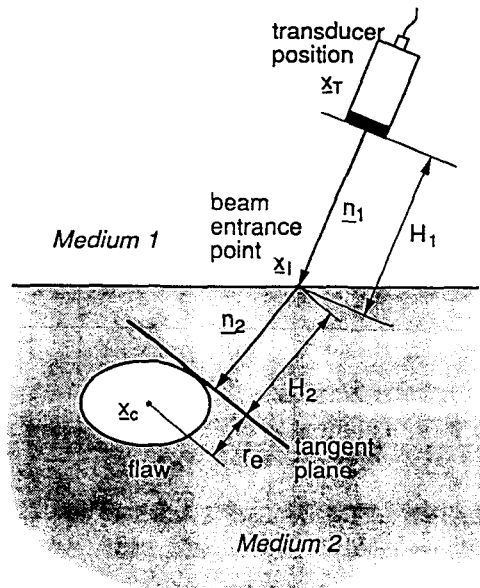


Fig. 3 The measurement geometry of the TOFE sizing method for a flaw embedded in a second medium

다행히도 Chiou and Schmerr<sup>57)</sup>는 등가결함  $r_e$ 가 대칭행렬 C와 단위벡터  $n_j$ 에 의해 다음과 같이 주어진다는 것을 밝힌 바 있다.

$$(r_e)^2 = n_2^T \cdot C \cdot n_2 \quad \dots \dots \dots (6)$$

식(6)을 식(4)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$F_j = (\underline{X}_1 \cdot \underline{n}_2)^2 - 2(\underline{X}_1 \cdot \underline{n}_2 - H^i_2)(\underline{X}_c \cdot \underline{n}_2) - \underline{n}_2 \cdot \underline{C} \underline{n}_2 + (\underline{X}_1 \cdot \underline{n}_2 - H^i_2)^2 = 0 \dots\dots\dots (7)$$

여기에서  $F_j$ 는 행렬  $\underline{C}$ 의 6개 요소( $C_{xx}$ ,  $C_{yy}$ ,  $C_{zz}$ ,  $C_{xy}$ ,  $C_{yz}$ ,  $C_{xz}$ )에 대한 선형함수이며 결합중심  $\underline{X}_c$ 의 3개 요소( $C_{cx}$ ,  $C_{cy}$ ,  $C_{cz}$ )에 대한 2차 함수이다. 따라서  $N$ 개의 서로 다른 위치에서 측정된 데이터로부터 식(8)의 값을 최소화 시키는 9개의 미지수( $\underline{C}$ 에 대해 6개,  $\underline{X}_c$ 에 대해 3개)를 비선형 최적화 기법을 사용하여 결정할 수 있다.

$$I(\underline{X}_c, \underline{C}) = \sum_{j=1}^N [F_j(\underline{X}_c, \underline{C}, \underline{X}_1^j, \underline{n}_2^j, H^i_2^j)]^2 \dots\dots\dots (8)$$

이렇게 해서 6개의  $\underline{C}$  파라미터가 결정되면, 그 다음으로 식(9)의 고유치 문제의 해를 구한다.

$$\underline{C} - \lambda \underline{I} = 0 \dots\dots\dots (9)$$

이 식(9)의 해로서 고유값은 등가결합을 나타내는 최적타원체의 3개의 주축반경( $a$ ,  $b$ ,  $c$ )의 제곱이 되고, 이에 대응하는 3개의 고유벡터는 세 주축의 방향을 나타낸다<sup>57)</sup>. 여기에서 주목할 점은 TOFE크기산정기법을 이용하면 결합의 중심  $\underline{X}_c$ 도 함께 결정된다는 사실이다. 즉, TOFE크기산정기법은 결합의 위치에 대한 사전정보를 필요로 하지 않기 때문에, 기존의 연구에서 제안된 등가결합 크기산정 알고리즘들이 공통적으로 안고 있는 “시간원점문제(Zero-of time problem)”를 해결할 수 있는 기법이라는 것이다.

이 TOFE크기산정기법은 전술한 대로 초음파빔의 비행시간을 측정한 후, 여기에 매질내의 음속을 곱하여 초음파빔의 입사점과 결합의 접선평면까지의 거리를 구하고 있다. 따라서 음속에 대한 값이 아주 작은 오차를 가지고 있더라도 이 오차는 매우 작은 결합에 대한 크기산정의 경우에는 무시할 수 없는 량이 된다. 따라서 이 TOFE기법은 “비교적 큰” 결합에 적용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

5.2 용접결합의 크기산정

용접은 여러가지 기계 및 구조물의 접합에 가장 널리 사용되는 핵심 접합기술로서 현재 산업분야에서 차지하는 비중이 매우 크다. 그런데 용접부는 여러가지 결함이 발생하고 성장할 가능성이 매우 높아, 기계 및 구조물의 안전성을 확보하기 위해서는 매우 세심한 주의가 필요하며, 따라서 용

접부내의 결함을 탐지하고 그 크기를 정확히 산정하는 것은 매우 중요한 일이다. TOFE크기산정기법은 용접결합 크기산정에 매우 유용하게 사용될 수 있으리라 사료되어, 여기에서는 용접부내에 특별히 가공한 평저공(flat-bottom hole)의 크기를 산정하는데 TOFE크기산정기법을 적용코자 한다. 평저공은 용접부내에 실재하는 균열을 모형화한 대표적 인공결함이다.

Fig. 4에 용접 시편내에 있는 평저공을 측정하는 수침초음파시험을 나타내고 있다. 이 실험에 사용된 용접시편은 1/2inch(12.7mm)두께의 연강판에 V-홈 개선면을 가공하고 이를 맞대기용접으로 완전히 접합시켰다. 용접 후에 시험편을 평탄하게 만들기 위해 밀링가공으로 용접덧살을 제거하고, 시험편의 두께를 11.5mm가 되도록 가공하였다. 그리고 용착금속부와 모재부에 직경 5mm의 평저공 2개를 깊이 3mm로 각각 가공하였다.

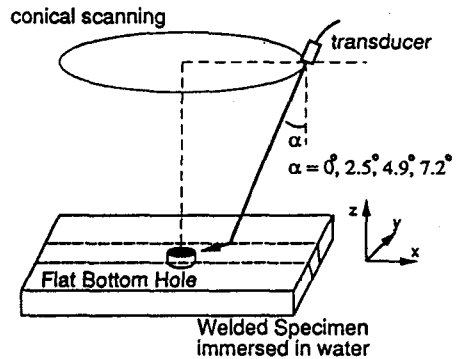


Fig. 4 Schematic diagram of the TOFE sizing setup for 5mm diameter flat-bottom holes fabricated in a mild steel welded specimen (immersion testing)

TOFE크기산정기법을 이용하여 결합크기를 결정하기 위해서는 초음파빔이 용접시편에 입사하는 입사점( $\underline{X}_1$ ), 시편내에서의 음속( $C_2$ ), 초음파의 진행방향( $\underline{n}_2$ ), 그리고 시편내에서 결합접선 평면까지의 초음파의 비행시간( $\Delta T_2$ )를 알아야 한다. 초음파빔의 입사점( $\underline{X}_1$ )는 초음파빔이 시편의 표면에서 반사하는 반사파를 측정함으로써 결정할 수 있다. 본 연구에서 실시한 실험의 경우 초음파탐촉자의 물속에서의 경사각(Fig. 4의  $\alpha$ )이 매우 작기 때문에( $\alpha = 0^\circ, 2.5^\circ, 4.9^\circ, 7.2^\circ$ ), 경사입사의 경우에도 표면반사파를 쉽게 감지할 수 있었다. 이



렇게 입사점이 결정되면, TOFE크기산정법 적용을 위한 초음파빔의 비행시간은 A-scan 초음파 신호로부터 쉽게 측정할 수 있다.

용접시험편의 용접부는 물성이 방향에 따라 달라지는 이방성을 나타내고 있다. 그러나 연강용접부의 경우 이 이방성이 그리 크지 않기 때문에 본 연구에서는 용접시험편을 등방성시료로 취급하였으며, 따라서, 시편내의 음속도 진행방향에 관계없이 모두 일정한 것으로 간주하였다.

각각의 평저공에 대하여 한쪽에서 원뿔모양의 주사(Conical scanning)선위의 서로 다른 측정위치에서 모두 19개의 비행시간 데이터를 수집하였다. 즉, 평저공에 대한 수직입사위치에서 1개의 데이터와, 탐촉자의 경사각  $\alpha$ 가 2.5°, 4.9°, 7.2°인 위치(이는 시편내로 굴절되어 진행되는 초음파빔의 진행방향이 각각 10°, 20°, 30°에 해당하는 위치임)에서 각각 6개의 데이터를 채취하였다. 이들 데이터로부터 TOFE크기산정기법을 활용하여 최적등가타원체에 대한 크기 파라미터들을 결정하였는데, 그 결과를 Table 2에 나타내었다.

Table 2 TOFE sizing results for 5mm diameter flat-bottom holes fabricated in a mild steel welded specimen (immersion testing)

| Parameter | Actual | Flat Bottom Hole |               |
|-----------|--------|------------------|---------------|
|           |        | in Weldment      | in Base Metal |
| location  | x      | 0.0              | 0.01          |
|           | y      | 0.0              | 0.06          |
|           | z      | -0.89            | -0.87         |
| size      | a      | 0.25             | 0.24          |
|           | b      | 0.25             | 0.27          |
|           | c      | 0.0              | 0.00          |

이 결과를 얻기 위해서는 전술한 바와 같이 비선형 최적화 과정을 거쳐야 하는데 이를 위해 임의로 설정한 결함중심위치( $X_{cx}=0.0$ ,  $X_{cy}=0.0$ ,  $X_{cz}=0.0$ )와 C파라미터( $C_{xx}=0.0$ ,  $C_{yy}=0.0$ ,  $C_{zz}=0.0$ ,  $C_{xy}=0.0$ ,  $C_{xz}=0.0$ ,  $C_{yz}=0.0$ )의 초기값으로부터 반복계산을 수행하였다. 이 반복계산은 용착금속내 평저공에 대해서는 14회, 모재내 평저공에 대해서는 44회의 반복계산이 수행되었는데, 이는 비선형 최적화 과정 수행시 통상 소요되는 반복계산 횟수보다 매우 적은 횟수이다. 또한 Table 2에 나타난 결과를 보면, 최적등가결함의 크기 파라미터들이 평저공(이것은 알고리즘상에서 원형균열로

인식됨)의 특징을 매우 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 특히 파라미터 중 c값이 0.0으로 나타났는데 이것은 TOFE크기산정기법이 평저공을 균열로 인식하였음을 의미하는데, 그 결과로 최적등가결함을 최적등가 타원으로 표현하고 있다. 또한, a와 b도 실제 평저공과의 오차가 모두 1.0mm이내로 나타났는데, 이는 TOFE크기산정기법이 실제적인 문제에 매우 효율적으로 적용될 수 있음을 보여 주고 있다.

### 5.3 복합재 내부 결함의 크기산정

섬유강화 복합재는 재래식 재료에 비해 우수한 기계적, 물리적 성질을 보유하고 있어 항공우주분야를 비롯한 다양한 분야로 그 적용범위가 확대되고 있다. 그러나 복합재는 이질재료의 보강, 생산공정의 복잡성등으로 인해 비균질하고 이방성 미시구조를 가지고 있기 때문에 생산공정중에 구조적 건전성을 저하시키는 결함의 발생확률이 높으며, 사용중에도 예기치 않은 손상에 의해 그 성능이 떨어지기 쉽다. 따라서 섬유강화 복합재 구조물의 신뢰성 확보를 위해서는 복합재 내부 결함을 검출하고 그 크기를 정확히 산정하는 것이 무엇보다도 중요하다. 이에 본 연구에서는 복합재 내부 결함의 크기산정에 대한 TOFE크기산정기법의 적용성을 실험을 통해 검증하였다.

Fig. 5에 복합재판 내부에 삽입시킨 "테프론 테이프(Teflon tape)"에 대한 수침 초음파 시험을 개략적으로 나타내었다. 이 실험에서 사용한 복합재판은 두께가 7.5mm이며, 강화섬유의 방향이 층에 관계없이 동일 방향으로 적층되어 있는 일방향 섬유강화 복합재이다. 섬유의 방향을 X-축(1-축)으로 할때, 이 복합재판의 탄성계수는  $C_{11}=139\text{GPa}$ ,  $C_{12}=C_{13}=7.2\text{GPa}$ ,  $C_{23}=7.6\text{GPa}$ ,  $C_{22}=C_{33}=15.6\text{GPa}$ ,  $C_{44}=4.0\text{GPa}$ ,  $C_{55}=C_{66}=7.4\text{GPa}$ 이며, 밀도는  $1.61\text{g/cm}^3$ 이다<sup>59)</sup>. 이 복합재판의 위쪽 표면으로부터 깊이 3.4mm의 위치에 직경 1/4inch(6.35mm)의 원형 테프론테이프(이는 원형 균열을 모형화한 것임)가 삽입되어 있다.

복합재판내에 있는 원형 테프론테이프의 크기를 TOFE기법을 이용하여 결정하기 위해서는 초음파빔의 입사점( $X_1$ ), 복합재내에서의 음파의 속도 및 진행방향( $\Omega_2$ ), 그리고 복합재내에서 초음파빔의 비행시간( $H_2$ )등을 결정해야 한다. 이러한 정보들

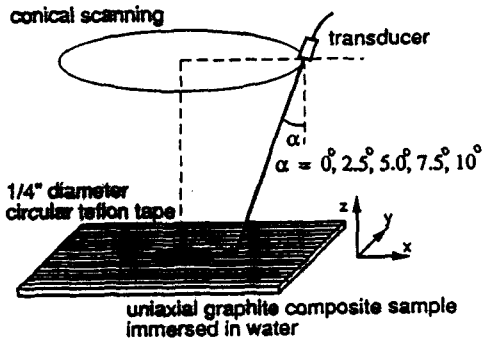


Fig. 5 Schematic diagram of the TOFE sizing setup for a 1/4inch (6.35mm) diameter circular teflon tape insert embedded in an uniaxial graphite/epoxy composite sample (immersion testing)

은 용접결합 크기산정시와 마찬가지로 A-scan 초음파 신호로부터 결정할 수 있다. 다만, 복합재는 매우 이방성이 강한 재료이기 때문에 음파의 속도가 진행방향에 대해 크게 변화한다. 본 연구에서는 이러한 속도이방성을 고려하기 위해 복합재판의 탄성계수를 이용하여 진행방향에 따른 속도를 계산하였다<sup>60)</sup>.

TOFE기법적용을 위해 용접결합크기산정의 경우처럼 한쪽면에서 원뿔모양의 주사를 실시하였으며, 총 13개의 테이퍼를 채취하였다. 측정위치는 수직입사위치에서 1개,  $\alpha = 2.5^\circ$ 와  $5.0^\circ$ 위치에서 각 4개, 그리고  $\alpha = 7.5^\circ$ 와  $10^\circ$ 의 위치에서 각각 2개이다. 이러한 데이터에 결합중심위치  $X_C$ 와 C 파라미터에 대한 초기 가정치( $X_{cx}=0.0$ ,  $X_{cy}=0.0$ ,  $X_{cz}=0.0$ ,  $C_{xx}=1.0$ ,  $C_{yy}=1.0$ ,  $C_{zz}=1.0$ ,  $C_{xy}=0.0$ ,  $C_{xz}=0.0$ ,  $C_{yz}=0.0$ )를 설정하고 TOFE크기산정기법을 적용하여 최적등가결합을 Table 3과 같이 결정하였다.

Table 3 TOFE sizing result for a 1/4inch (6.35mm) diameter circular teflon tape insert embedded in an uniaxial graphite/epoxy composite sample (immersion testing)

| Parameter | Actual | Best-fit ellipsoid |       |       |
|-----------|--------|--------------------|-------|-------|
|           |        | (1)                | (2)   |       |
| location  | x      | 0.0                | -0.02 | -0.11 |
|           | y      | 0.0                | 0.05  | 0.05  |
|           | z      | -0.340             | -0.34 | -0.34 |
| size      | a      | 0.318              | 0.27  | 0.30  |
|           | b      | 0.318              | 0.26  | 0.26  |
|           | c      | 0.0                | 0.00  | 0.00  |

Table 3에 보인 바와 같이, TOFE크기산정기법을 통해 테프론 테이퍼를 원형 균열(Table 3의 (1)의 경우)로 재현할 수 있었는데, 이 경우 주축의 최대 오차는 약 0.5mm 정도로 매우 정확한 결과를 얻을 수 있었다. Table 3의 (2)의 경우는, 복합재판의 이방성을 무시하고 등방성판으로 간주했을 때(즉, 방향에 따른 초음파 속도의 변화를 무시하고 모두 동일속도를 갖는 것으로 가정했을 때) TOFE 크기산정 결과를 또한 나타내고 있다. 이 경우에는 원형테프론 테이퍼를 타원으로, 그리고 결합중심의 위치를 실제 위치로부터 약 1.1mm 정도 치우친 곳에 있는 것으로 인식하고 있다. 양 경우 모두 초기 가정치로부터 (1)의 경우 11회, (2)의 경우 14회의 적은 반복을 통해 최종값을 도출하고 있다. 위의 결과로부터 재료내 음속 데이터값의 정확도가 TOFE크기산정기법의 정확도에 미치는 영향이 매우 큼을 알 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 정량적 초음파시험을 위해 반드시 해결해야 할 핵심기술인 결합의 종류판별과 크기산정 기법에 대해 지금까지 수행되어 온 기존의 연구내용을 면밀히 검토하고 이를 바탕으로 산업 현장에 곧바로 적용할 수 있는 새로운 기법을 제안하였다.

효율적이고 신뢰성 높은 결합분류 기법으로서, 본 연구에서는 초음파 영상인식 기법을 선택하고, 특히 확률신경회로망을 적용하는 새부기술을 체계적으로 제시하였다. 본 연구에서 PNN은 용접결합을 균열과 비균열로 분류하는 실제적인 문제에서 매우 우수한 결합분류 능력을 나타내었는데, 이로써 PNN이 용접결합을 비롯한 다양한 종류의 결합 분류시 매우 훌륭한 분류기로서 활용될 수 있다는 점을 확인하였다.

결합의 크기산정을 위해, 본 연구에서는 새로운 등가결합 크기산정 기법인 비행시간등가(TOFE) 크기산정기법을 개발하였다. 이 TOFE크기산정 기법은 초음파신호 중 외란에 대해 가장 안정적인 인자인 비행시간 값을 사용하기 때문에 매우 다양한 실제적인 문제에 쉽게 적용할 수 있다. 본 연구에서 보인바대로 TOFE크기산정법은 용접부내에 있는 평저공의 크기를 매우 정확하게(오차범위 1.

0mm이내에서) 결정하였을 뿐아니라, 이방성 재료인 복합재판내의 원형결함도 매우 정확하게 그 크기를 산정하였다. 이러한 예는 TOFE크기산정법이 실제적인 문제에 적용될 수 있는 매우 효율적인 크기산정 기법임을 확인시켜준 것이다.

본 연구에서는 제안된 결함의 종류 판별과 크기산정에 대한 새로운 기법들은 초음파시험, 신호처리, 최적화, 신경회로망등 다양한 기법을 적절히 사용하고 있는데, 본 연구에서 실험적으로 검증한 문제 이외에도 많은 실제적인 문제에 성공적으로 적용될 수 있을 것이다.

이 논문은 1995년도 조선대학교 학술연구비지원 및 자동화시스템 우수연구센터 기가재 활용에 의해 연구되었음.

### 참 고 문 헌

- 1) International Institute of Welding, The Evaluation of Ultrasonic Signals, Cambridge, England, Welding Institute for International Institute of Welding, 1987.
- 2) International Institute of Welding, Handbook on the Ultrasonic Examination of Welds, Cambridge, England, Welding Institute for International Institute of Welding, 1977.
- 3) V. G. Shcherbinskii and V. E. Belyi, New informative index for the nature of flaws in ultrasonic inspection, Soviet Journal of Non-destructive Testing, Vol. 11, pp. 279~288. 1975.
- 4) A. K. Volpinkin, Diffracted waves and their application in ultrasonic nondestructive testing II. Practical application of diffracted waves, Soviet Journal of Nondestructive Testing. Vol. 21, pp. 143~154, 1985.
- 5) G. J. Gruber, Defect identification and sizing by the ultrasonic satellite-pulse technique, Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 1, pp. 263~273, 1980.
- 6) C. P. Chiou and L. W. Schmerr, A quasi-pulse-echo technique for ultrasonic flaw classification, Ultrasonics, Vol. 29, pp. 471-481, 1991.
- 7) O. R. Gericke, Determination of the geometry of hidden defects by ultrasonic pulse analysis testing, Journal of Acoustical Society of America, Vol. 35, pp. 364~368, 1963.
- 8) O. R. Gericke, Ultrasonic spectroscopy in Research Techniques in Nondestructive Testing, Ed. R. S. Sharpe, London. Academic Press, pp. 31~61, 1970.
- 9) D. W. Fitting and L. Adler, Ultrasonic Spectral Analysis for Nondestructive Evaluation, New York, Plenum Press, 1981.
- 10) J. L. Rose, Element of a feature-based ultrasonic inspection system, Materials Evaluation, Vol. 42, pp. 210~218, 1984.
- 11) J. L. Rose, Y. H. Jeong, and C. T. Cooper, A methodology for reflector classification analysis in complex geometric welded structures, Materials Evaluation, Vol. 42, pp. 98~106, 1984.
- 12) J. L. Rose, J. Nestleroth, L. Niklas, O. Ganglbauer, J. Ausserwoeger and F. Wallner, Flaw classification in welded plates employing a multidimensional feature-based decision process, Materials Evaluation, Vol. 42, No. 4, pp. 433~438, 443, 1984.
- 13) S. F. Burch and N. K. Bealing, A physical approach to the automated ultrasonic characterization of buried weld defects in ferritic steel, NDT International, Vol. 19, pp. 145~152, 1986.
- 14) S. F. Burch, Objective characterization of welding defects using physical based pattern recognition techniques, in Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, eds. D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Plenum Press, New York, Vol. 7B, pp. 1495~1502, 1988.
- 15) A. N. Mucciardi, R. Shankar and M. F. Whalen, Application of adaptive learning networks to NDE methods, Interdisciplinary Program for Quantitative Flaw Definition Special Report Third Year Effort, 1976.

- 16) M. F. Whalen and A. N. Mucciardi, Inversion of Physically Recorded Ultrasonic Waveforms Using Adaptive Learning Network Models Trained on Theoretical Data, In Proc. ARPA/AFML Review of Progress in Quantitative NDE. ed. D. O. Thompson, Air Force Materials Laboratory Technical Report AFML-TR-78-205, pp. 341~367, 1979.
- 17) L. S. Koo, Ultrasonic flaw classification : an approach using modelling, signal processing, and adaptive learning, Ph. D. Dissertation, Iowa State University, 1987.
- 18) S. M. Nugen, L. W. Schmerr, K. M. Christensen, and B. K. Lovewell, Design and implementation of an expert system for flaw classification, Microcomputer Application, Vol. 9, pp. 1~8, 1990.
- 19) L. W. Schmerr, K. E. Christensen, S. M. Nugen, L.-S. Koo and C.-P. Chiou, Ultrasonic Flaw Classification-An Expert System Approach, in Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, eds. D. O. Thompson and D. E. Chimenti, New York : Plenum Press, Vol. 8A, pp. 657~664, 1989.
- 20) R. P. Lippmann, An introduction to computing with neural nets, IEEE ASSP Magazine, April, pp. 4~22, 1987.
- 21) Y. H. Pao, Adaptive Pattern Recognition and Neural Networks, Reading : MA, Addison-Wesley Publishing Co, Inc, 1989.
- 22) D. E. Rumelhart, G. E. Hinton and R. J. Williams, Learning internal representations by error propagation, in Parallel Distributed Processing, eds. D. E. Rumelhart, J. L. McClelland and the PDP Research Group, Cambridge, MA : MIT Press, Vol. 1, pp. 318~362, 1986.
- 23) L. Udpa and S. S. Udpa, Eddy current defect characterization using neural network, Materials Evaluation, Vol. 48, pp. 342~347, 353, 1990.
- 24) J. M. Mann, L. W. Schmerr and J. C. Moulder, Neural network inversion of uniform-field eddy current data, Materials Evaluation, Vol. 49, pp. 34~39, 1991.
- 25) L. M. Brown and R. DeNale, Classification of ultrasonic defect signatures using an artificial neural network, in Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, eds. D. O. Thompson and D. E. Chimenti, New York : Plenum Press, Vol. 10A, pp. 705~712, 1990.
- 26) D. Berry, L. Udpa and S. S. Udpa, Classification of ultrasonic signals via neural networks, in Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, eds. D. O. Thompson and D. E. Chimenti, New York : Plenum Press, Vol. 10A, pp. 697~704, 1990.
- 27) D. F. Specht, Probabilistic neural networks for classification, mapping, of associative memory, in Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, Vol. 1, pp. 525~532, 1988.
- 28) D. F. Specht, Probabilistic neural networks, Neural Networks, Vol. 3, pp. 109~188, 1990.
- 29) D. F. Specht, Probabilistic neural networks and polynomial adaline as complementary techniques for classification, IEEE Transactions on Neural Networks, Vol. 1, No. 1, pp. 111~121, 1990.
- 30) D. F. Specht, Enhancements to probabilistic neural networks, Proceedings of the IEEE International Joint Conference on Neural Networks, Vol. 1, pp. 761~768, 1992.
- 31) S. J. Song and L. W. Schmerr, Ultrasonic flaw classification in weldments using probabilistic neural networks, Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 11, No. 2, pp. 69~77, 1992.
- 32) S. J. Song, An ultrasonic pattern recognition approach to welding defect classification, to appear in Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing (in Korean).

- 33) J. Krautkramer and H. Krautkramer, *Ultrasonic Testing of Materials*, 4th Edition, New York : Springer-Verlag, 1990.
- 34) J. Krautkramer, Determination of the size of defects by the ultrasonic impulse echo methods, *British Journal of Applied Physics*. Vol. 10, pp. 240~245, 1959.
- 35) L. W. Schmerr and A. Sedov, The flat-bottom hole : an ultrasonic scattering model, *Research in Nondestructive Evaluation*, Vol. 1, pp. 181~196, 1989.
- 36) A. Sedov, L. W. Schmerr, and S. J. Song, Ultrasonic scattering of a flat-bottom hole in immersion testing : an analytic model, *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 92, pp. 478~486, 1992.
- 37) S. J. Song, L. W. Schmerr and A. Sedov, DGS Diagrams and Frequency Response Curves for a flat-bottom hole : A model-based approach, *Research in Nondestructive Evaluation*, Vol. 3, pp. 201~219, 1991.
- 38) M. G. Silk, A. M. Stoneham and J. A. G. Temple, *The Reliability of Nondestructive Inspection*, Bristol, England : Adam Hilger, 1987.
- 39) M. G. Silk, Sizing crack-like defects by ultrasonic means, in *Research Techniques in Nondestructive Testing*, Ed. R. S. Sharpe, Ch. 2, London : Academic Press, Vol. 2, 1977.
- 40) M. G. Silk, The use of diffraction based time-of-flight measurements to locate and size defects, *British Journal of NDT*, Vol. 26, pp. 208~213, 1984.
- 41) J. P. Charlesworth and J. A. G. Temple, *Engineering Applications of Ultrasonic Time-of-Flight Diffraction*, Somerset, England : Research Studies Press, 1989.
- 42) G. J. Gruber, G. J. Hendrix and W. R. Schick, Characterization of flaws in piping welds using satellite pulses, *Materials Evaluation*, Vol. 42, pp. 426~432, 1984.
- 43) C. F. Schuele, H. Lee and G. Wade, *Fundamentals of digital ultrasonic imaging*, *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, Vol. SU-31, pp. 195~217, 1984.
- 44) J. Seydel, Ultrasonic synthetic-aperture focusing techniques, In *Research Techniques in Nondestructive Testing*, Ed. R. S. Sharpe, New York : Academic Press, Vol. VI, pp. 1~48, 1982.
- 45) S. O. Harrold, Ultrasonic focusing techniques, in *Research Techniques in Nondestructive Testing*, Ed. R. S. Sharpe, New York : Academic Press, Vol. VI, pp. 49~106, 1982.
- 46) B. Grohs, O. A. Barbian, W. Kappes, H. Paul, R. Licht and F. W. Hoh, Characterization of flaw location, shape, and dimensions with the ALOK system, *Materials Evaluation*, Vol. 40, pp. 84~89, 1982.
- 47) B. P. Hildebrand and B. B. Brenden, *An Introduction to Acoustical Holography*, New York : Plenum Press, 1972.
- 48) L. S. Koo, H. R. Shafee, D. K. Hsu, S. J. Wormley and D. O. Thompson, Two-dimensional ultrasonic tomography in nondestructive evaluation by using area functions, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 37, pp. 148~158, 1990.
- 49) D. K. Hsu, J. H. Rose and D. O. Thompson, Reconstruction of inclusions in solids using ultrasonic Born inversion, *Journal of Applied Physics*, Vol. 55, pp. 162~168, 1984.
- 50) D. K. Hsu, D. O. Thompson and S. J. Wormley, Reliability of reconstruction of arbitrarily oriented flaws using multiview transducers, *IEEE Transactions of Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. UFFC-34, pp. 508~514, 1987.
- 51) A. Sedov and L. W. Schmerr, The time domain elastodynamic Kirchhoff approximation for cracks : the inverse problem, *Wave*

- Motion, Vol. 8, pp. 15~26, 1986.
- 52) L. W. Schmerr, A. Sedov and C. P. Chiou, A unified constrained inversion model for ultrasonic flaw sizing, *Research in Non-destructive Evaluation*, Vol. 1, pp. 77~97, 1989.
- 53) L. J. Bond, C. A. Chaloner, S. J. Wormley, S. P. Neal, and J. H. Rose, Recent advances in Born Inversion (weak scatterers), in *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Eds. D. O. Thompson and D. E. Chimenti, New York : Plenum Press, Vol. 7A, pp. 437~444, 1988.
- 54) C. A. Chaloner and L. J. Bond, Investigation of the 1-D inverse Born technique, *IEEE Proceedings*, Vol. 134, Pt. A, pp. 257~265, 1987.
- 55) R. B. Thompson, Status of implementation of the inverse Born sizing algorithm, in *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Eds. D. O. Thompson and D. E. Chimenti, New York : Plenum Press, Vol. 4A, pp. 611~621, 1985.
- 56) J. Yang and L. J. Bond, Errors in determining the flaw centroid by using area functions, in *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Eds. D. O. Thompson and D. E. Chimenti, New York : Plenum Press, Vol. 11, 1992.
- 57) C. P. Chiou and L. W. Schmerr, New approaches to model-based ultrasonic flaw sizing, *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 92, No. 1, pp. 435~444, 1992.
- 58) S. J. Song and L. W. Schmerr, An ultrasonic time-of-flight equivalent flaw sizing method, *Research in Nondestructive Evaluation*, Vol. 4, pp. 1~18, 1992.
- 59) B. P. Newberry, Paraxial approximations for ultrasonic beam propagation in liquid and solid media with applications to nondestructive evaluation. Ph. D. Thesis, Iowa State University, 1988.
- 60) B. A. Auld, *Acoustic Fields and Waves in Solids*, Vol. II, Ch. 9, New York : A Wiley-Interscience Publication, 1973.