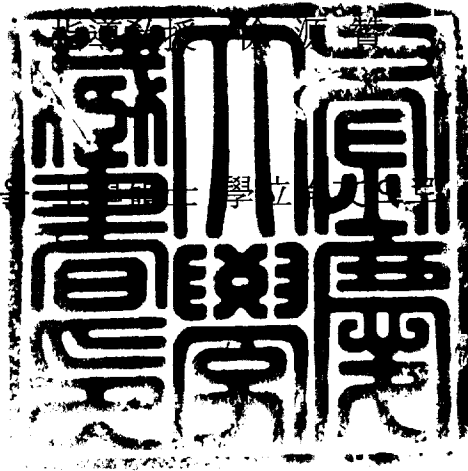


工學碩士 學位論文

터빈로타 디스크 키웨이의 결함 검출을 위한
초음파 신호처리 알고리즘 개발

이 論文을 工學碩士學位에 提出함



2006年 2月

釜慶大學敎 大學院

소재프로세스공학과

金 杜 勇

金杜勇의 工學碩士 學位論文을 認准함

2005 년 12 월 22 일

主 審 工學博士 李 秉 雨



委 員 工學博士 金 星 圭



委 員 工學博士 徐 源 贊 印



목 차

목차	i
Abstract	iii
 제 1 장 서 론	 1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 목적	6
 제 2 장 초음파 검사 및 신호처리	 7
2.1 초음파 검사	7
2.1.1 초음파 검사의 개요	7
2.1.2 초음파 검사의 분류	9
2.2 신호처리 알고리즘	11
2.2.1 신호처리의 적용배경	11
2.2.2 신호처리 알고리즘	13
2.3 실험 장치 및 초음파 신호처리 시스템	16
2.3.1 실험 장치	16
2.3.2 모형 시험편 제작 및 직접 접촉법	17
2.3.3 초음파 신호처리 시스템	21

제 3 장	초음파 신호처리 알고리즘	23
3.1	전 처리	23
3.1.1	초음파 신호의 RF 파형	23
3.1.2	초음파 신호의 근접평균법	26
3.1.3	초음파 신호의 입체 형상화	28
3.1.4	초음파 신호의 B-주사 영상	34
3.2	결함후보영역의 검출	40
3.2.1	2차원 평면영상	40
3.2.2	이치화 및 팽창 처리	42
3.2.3	분할 처리	43
3.2.4	정합 처리	44
3.2.5	차분 처리	46
3.3	결함영역의 판별	48
3.4	결함의 특징분석 및 정보획득	52
제 4 장	결 론	60
참고문헌		62

**Development of the Ultrasonic Signal Processing Algorithm
for Flaw Detection on the Keyway of Turbine Rotor Disk**

Doo-Yong Kim

*Department of materials Processing Engineering,
Graduate School, Pukyong National University*

Abstract

Cracks occurring at the keyway of turbine rotor disk in a power plant are sometimes caused by stress corrosion, and they have caused a fatal failure of the turbine during the operation of a power plant. The ultrasonic flaw detection technique is applied to detect these cracks. The crack information as position, depth, size and orientation isn't easy to determine quantitatively because of the complex geometry of the turbine rotor disk. To acquire characteristics of these cracks, ultrasonic signal processing algorithm was constructed using the contact method of ultrasonic flaw detection.

The ultrasonic signal processing algorithm is composed of four processing steps, pre-processing, detection of crack candidate region, classification of crack region and analysis of crack information. In the pre-processing step, it is shown four reflected signal peaks which include the top of keyway, the crack tip, the crack corner and the bottom of the specimen, respectively. Crack feature as scanning position, scanning time and amplitude are observed approximately through adjacent averaging processing, three dimensional image and B-scan image displaying. In detection of crack candidate regions step, various signal processing

algorithm is applied to detect crack candidate regions. In classification of crack regions step, crack regions are sorted out crack candidate regions by defining and thresholding features of crack. In analysis of crack features step, crack information are extracted by analyzing the ultrasonic signal of cracks.

The ultrasonic signal processing algorithm is developed to determine the information of keyway cracks, and it is considered as a useful technique to evaluate the characteristics of keyway cracks quantitatively.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

산업분야의 전반에 걸쳐 안정성 확보는 최근 들어 더욱 중요한 문제로 인식되어지고 있다. 기술적인 발전, 혁신적인 아이디어의 창출과 더불어 설비의 유지관리 및 안전사고의 최소화는 생산능률 상승과 관리비용 절감에 큰 역할을 한다.

사회기간 산업의 하나인 발전소의 경우, 발전소 내부에서 작동되고 있는 다양한 설비의 안전성 확보 및 능률 향상을 위하여 사고 예방을 위한 안전조치 및 안전설비가 개발되고 있으며, 이와 관련한 안전성 유지는 가장 중요한 요소로 인식되고 있다. 그러나 발전소의 가동 정도와 위험성이 해마다 증가하고 있으며, 설비의 주요 부품이 손상되어 발전설비의 가동 중지 사례가 늘고 있는 실정이다.

원자력 및 화력발전소의 에너지 변환기구는 보일러, 터빈 및 발전기로 구성되어 있는데, 터빈설비의 경우, 가동 시 시동(start-up)이나 가동정지(shutdown)와 같이 계속적인 부하를 받고 있어 급격한 부하 변동 상태에 종종 놓이게 된다. 또한 고온 증기 분위기 속에서 가동되기 때문에 균열 발생의 주요 원인인 진동, 피로, 부식 및 침식 등의 조건에 놓이게 된다. 특히 터빈 로터 부분은 케이싱 내부로 유입되는 고온·고압증기의 열에너지를 기계적 에너지(회전력)로 변환시켜 발전기에 전달하는 부품으로, 그 제작에 특별한 주의를 요하는 주요 부품이다. Fig. 1-1의 터빈 로터 디스크의 구조를 보면 크게 회전축과 회전날개로 구성되어 있다. 회전축은 회전날개와 더불어 가장 큰 응력이 발생하는 부분으로 충분한 강도를 가지

면서, 무게중심이 잘 잡혀 진동이 발생하지 않도록 제작되어야 한다. 그리고 축과 디스크가 접촉하는 지점인 Disc Rim/Blade Attachment Area에서는 결함이 발생하기 쉬우므로 제작 및 유지관리에 많은 주의가 요구된다.

터빈 로터 디스크에서 균열이 발생하는 부위는 Fig. 1-2에 나타낸 바와 같이 크게 키웨이(keyway), 중심공, 디스크 표면 및 디스크 림(disk-rim) 등이 있으나, 거의 대부분의 균열은 응력이 가장 많이 집중되는 키웨이 부위에서 발생된 것으로 보고 되고 있다. 이러한 부위의 균열은 대부분 입계균열의 많은 가치를 형성한 형태이며, 균열 부근에는 나트륨, 염화물, 황산염, 탄산염, 수산화물, 구리 산화물이 존재하고, 균열의 틈 사이에 산화물이나 부식 생성물이 채워져 있는 것으로 조사되었다. 균열의 발생은 응력부식균열(stress corrosion crack), 수소기인균열(hydrogen induced crack) 및 부식 피로 등이 주원인이며, 그 중에서 응력부식균열의 형태가 가장 두드러진 것으로 나타났다^[1-4].

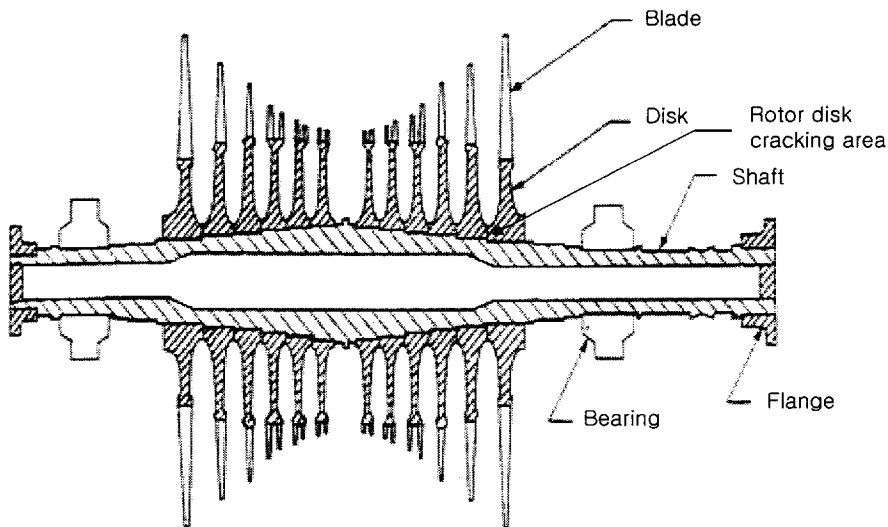


Fig. 1-1. Schematic diagram of turbine rotor disk cross-section

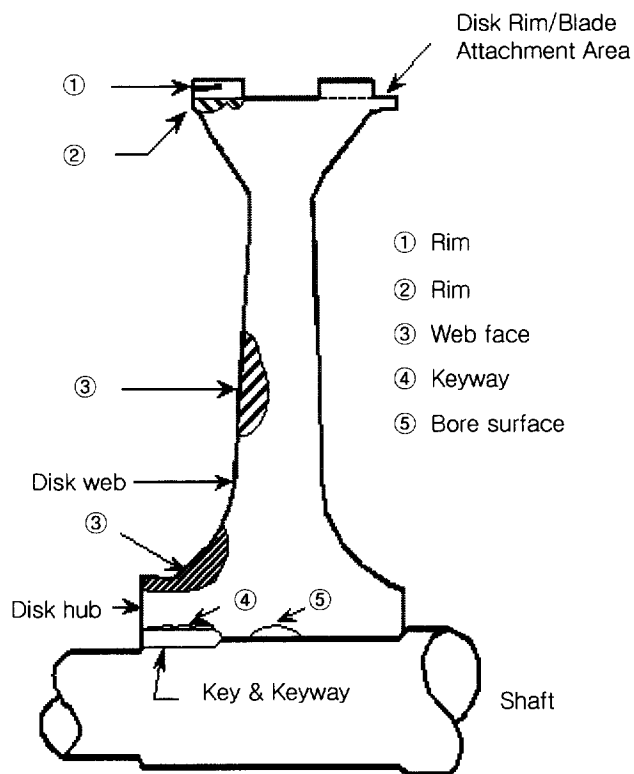


Fig. 1-2. Schematic diagram of rotor disk cracking area

응력부식균열은 일반적으로 내식성이 우수한 재료에 발생되며, 표면에 부동태막이 형성되어 있지만 그 피막에 외적 조건에 의한 국부적인 응력 집중의 원인으로 파괴된다. 응력집중부의 균열은 단일적으로 일어날 수도 있고, 미세한 균열이 밀집한 형태로도 발생될 수 있다. 어떠한 경우에는든 균열은 극히 미세한 균열선단(crack tip)을 가진 많은 복잡한 형태의 가지(branch)를 형성하는 경향이 있다^[5]. 실제 현장에서 검출된 균열은 재가동하기 전에 제거되어야 하며, 균열을 제거하기 위해서는 균열의 위치 및 크기와 같은 균열의 특징들을 파악해야 하지만 통상적인 검사방법에 의해서는 정확하게 평가하기 어려운 실정이다.

일반적인 균열의 검사 방법으로는 비파괴검사를 사용하며 초음파탐상검사(UT), 자분탐상검사(MT) 및 침투탐상검사(PT) 등이 적용되고 있다. 터빈 로터 디스크의 경우, 웹(web) 및 림·블레이드 연결부는 바깥부위에 존재하는 위치 특성상 접근성이 용이하기 때문에 자분탐상검사나 침투탐상검사로 가능하나, 허브(hub), 키웨이 및 중심공 표면 부위는 디스크 로터에서 분리하지 않는 한 접근이 불가능하다. 자분탐상검사는 표면에 존재하는 결함을 검출하는데 우수한 비파괴 시험법이지만 투입되는 노동력, 블레이드의 분리, 발전소의 정기검사 기간의 장기화를 초래함에 따라 대체 검사방법이 요구되고 있다. 이에 따라 상대적으로 검사기간이 짧고 균열의 특징을 보다 쉽게 규명할 수 있는 초음파를 이용한 비파괴시험이 적용이 요구되고 있다^[6].

균열을 검출·평가하기 위한 초음파탐상법으로는 펄스-에코법, 투과법, 균열선단 회절신호법등이 사용되고 있으며, 반사파의 시간차이와 진폭의 크기로 균열의 위치와 크기를 평가하기 위해 펄스-에코법이 주로 사용된다. 그러나 펄스-에코법은 탐촉자의 주파수 특성과 빔 폭의 영향으로 형상이 복잡한 피검체에서는 기하학적 형상에 의한 의사지시와 균열을 구분

하는데 어려움이 있다. 균열의 방향성(orientation) 및 균열의 형태(morphology)와 같은 반사된 초음파 진폭에 영향을 미치는 변수들과 키웨이 부위의 경우 그 기하학적 형상의 복잡성 때문에 균열의 크기를 평가하는데 상당한 어려움을 가지고 있다^[7-9].

초음파 검사로 결함을 검출하고 평가하기 위해서는 초음파 신호로부터 기하학적인 의사지시 신호와 구별되는 결함신호의 추출이 요구되며, 현재 이러한 특징의 추출은 직접 검사자(human operator)에 의해 수행되고 있는 실정이다. 검사자에 의한 검사는 적절한 훈련과 오랜 경험을 쌓으면서 초음파 신호로부터 중요한 패턴을 인식하는 능력을 갖추게 되지만, 거대한 양의 데이터로부터 관련 특징정보를 추출하고 분석하는 데에는 효과적이지 않다. 특히 터빈 로터 디스크 키웨이 부위와 같이 형상이 복잡한 경우의 결함 평가는 고도의 숙련도와 전문적인 지식이 필수적이다. 따라서 최근에는 전문 검사자와 같은 능력을 가진 초음파 탐상검사를 위한 자동화 시스템의 개발이 진행되고 있으며, 이는 전문가가 아니더라도 쉽게 초음파 신호를 분석하고 평가할 수 있는 방법으로 기대되어지고 있다.

본 연구는 초음파 검사를 수행하여 얻은 신호데이터를 사용하여 터빈 로터 디스크 키웨이의 결함 검출을 위한 초음파 신호처리 알고리즘의 개발을 연구목표로 하였다. 신호처리 알고리즘을 적용하여 획득한 결과는 인식하는 과정에서부터 즉각적인 평가와 데이터 재생, 보존(DB화), 호환이 간편해짐으로써 자동적인 수행능력을 발휘할 수 있다. 물론 데이터 분류의 복잡성, 결함특징 패턴의 모호성 등 시스템의 범용화 과정에서 많은 변수들이 존재하지만 검사의 효율성 및 설비의 안전성을 고려할 때, 기존의 전문 검사자에 의한 결함검출 방법과 비교하여 경제적인 효과와 능률적인 검사능력을 제시할 수 있을 것으로 생각된다.

1.2 연구 목적

초음파 검사에 의한 결함검출은 터빈 로터 디스크 키웨이와 같이 형상이 복잡한 경우, 전문 검사자의 숙련도와 경험에 따라 크게 좌우된다. 또한 장기간의 검사로 검사자의 피로에 따른 검사의 부정확성, 수동적인 검사절차로 발생하는 검사의 신뢰성 저하, 설비 가동중단 등 많은 어려움을 갖고 있다. 초음파 검사를 통해 획득한 반사 신호에는 결함영역의 특징을 포함하고 있기 때문에, 이러한 신호데이터를 가공 처리하여 결함의 정보를 획득·평가하기 위하여 초음파 신호처리 알고리즘을 개발하였다.

서론에서는 터빈 로터 디스크 키웨이에 발생하는 균열의 기본적인 특성과 연구배경 및 연구목적에 대하여 기술하였다.

제 2장에서는 초음파 검사에 대하여 기술하였고, 신호처리 적용배경 및 신호처리 알고리즘을 설명하였다. 그리고 본 연구에 사용된 실험 장치, 모형 시험편의 제작 및 초음파 신호처리 시스템에 대해 기술하였다.

제 3장에서는 시스템을 크게 4단계로 나누어 기술하였다. 전처리, 결함 영역의 검출, 결함영역의 판별과정에 대하여 기술하였고, 판별된 결함의 특징분석단계에서는 결함의 위치, 거리 및 방향성 정보를 획득하여 결함 검출을 위한 자동화 시스템 구축의 가능성을 확인하였다.

제 4장에서는 본 연구의 결론을 요약하였다.

제 2 장 초음파 검사 및 신호처리

2.1 초음파 검사

2.1.1 초음파 검사의 개요

비파괴 검사는 품질관리 및 설비안정성 유지를 위하여 산업 전 분야에 걸쳐 필수적 기법으로 적용되고 있으며, 그중 초음파 검사는 복잡하고 미세한 결함부위 검출을 위한 방법으로 널리 사용되고 있다. 초음파 검사에 의한 결함검출은 시험편에 초음파를 전달하여 내부에 존재하는 불연속부로부터 반사한 초음파의 에너지 량, 초음파 진행시간 등을 분석하여 위치 및 크기를 정확히 알아내는 원리를 이용한다. 그 적용범위는 검사 대상인 시험편 내의 불연속부의 크기 및 두께, 시험편의 균일도 및 부식상태 등의 검사에서부터 유속측정, 콘크리트 검사까지 넓어지고 있는 추세이다.

초음파 검사는 그 원리에 따라 여러 가지 방법이 존재하며, 결함(불연속)을 검출하기 위한 초음파 탐상법으로 펄스-에코법이 가장 널리 사용되고 있다. 시험편의 내부결함 및 외부결함을 탐상하는 방법으로 많이 사용되고 있는 비파괴 검사에는 방사선 투과검사와 초음파 탐상검사가 있다. 초음파 검사는 방사선 투과검사에 비해 시험편의 두께가 두꺼워도 검사가 가능하고 불연속의 위치를 정확히 측정할 수 있으며, 검사 결과를 즉시 알 수 있다는 장점을 가진다. 그리고 방사선과 같이 인체에 유해하지 않으며 균열과 같은 면상의 결함 검출 능력이 탁월하다. 반면 대부분의 경우 검사결과를 검사자의 검사 보고서에 의존해야 하며 결함의 종류를 식별하기 어렵고 금속조직의 영향을 받기 쉬운 단점이 있다. 이러한 특징을

고려해볼 때, 초음파 검사는 검사원의 능력에 따라 검사의 신뢰도가 좌우되는 문제점이 존재하나, 다른 비파괴 검사에 비해 결함검출능력이 뛰어나며, 근년의 새로운 장비개발에 의해 검사의 신뢰도 역시 점차 높아지고 있는 실정이다^[10].

2.1.2 초음파 검사의 분류

초음파 검사는 크게 5가지로 분류가 가능하다. 원리에 의한 분류, 진동 방식에 의한 분류, 탐촉자 수에 의한 분류, 접촉방식에 의한 분류, 화면에 의한 분류로 나뉘어져 있는데, 본 연구에서는 원리에 의한 분류의 펄스 반사법, 진동방식에 의한 분류의 수직 탐상법, 접촉방식에 의한 분류의 직접접촉법, 화면에 의한 분류의 A-주사 및 B-주사 방식을 적용하였다.

펄스 반사법은 초음파 검사에서 가장 광범위하게 사용되는 방법으로 시험편에 짧은 초음파 펄스를 송신하여 시험체내의 결함이나 저면에서 반사되어 돌아온 파를 스크린 상에 나타내어 결함의 크기, 위치, 깊이를 측정하는 방법이다. 수직탐상은 음파를 입사표면에 대해 수직으로 보내는 것으로 일반적으로 종파를 사용하며 아주 특별한 경우에만 횡파를 사용한다. 주로 내부결함의 검출에 사용된다.

직접접촉법은 탐촉자를 검사대상 표면위에 직접 접촉시켜 검사하는 방법으로 간단한 장비로도 높은 검사감도를 유지할 수 있는 장점을 가지고 있는 반면, 탐촉자를 표면에 접촉시키는 압력에 따라 반사파의 진폭이 달라질 수 있으므로 주의가 필요하다.

화면에서의 표현 방식에 따른 분류는 A-주사 및 B-주사로 나뉘며, A-주사 표시는 화면상에 나타나는 특정 에코의 주사위치에 대해 시간 축 상으로 나타나는 결함의 진폭을 추정할 수 있다. B-주사 표시는 물체의 표면과 저면 그리고 결함의 반사 신호를 화면상에 나타내며 결함의 깊이와 길이를 나타내는데 사용한다. Fig. 2-1에 A-주사, B-주사 및 입체 영상의 예를 나타낸다.

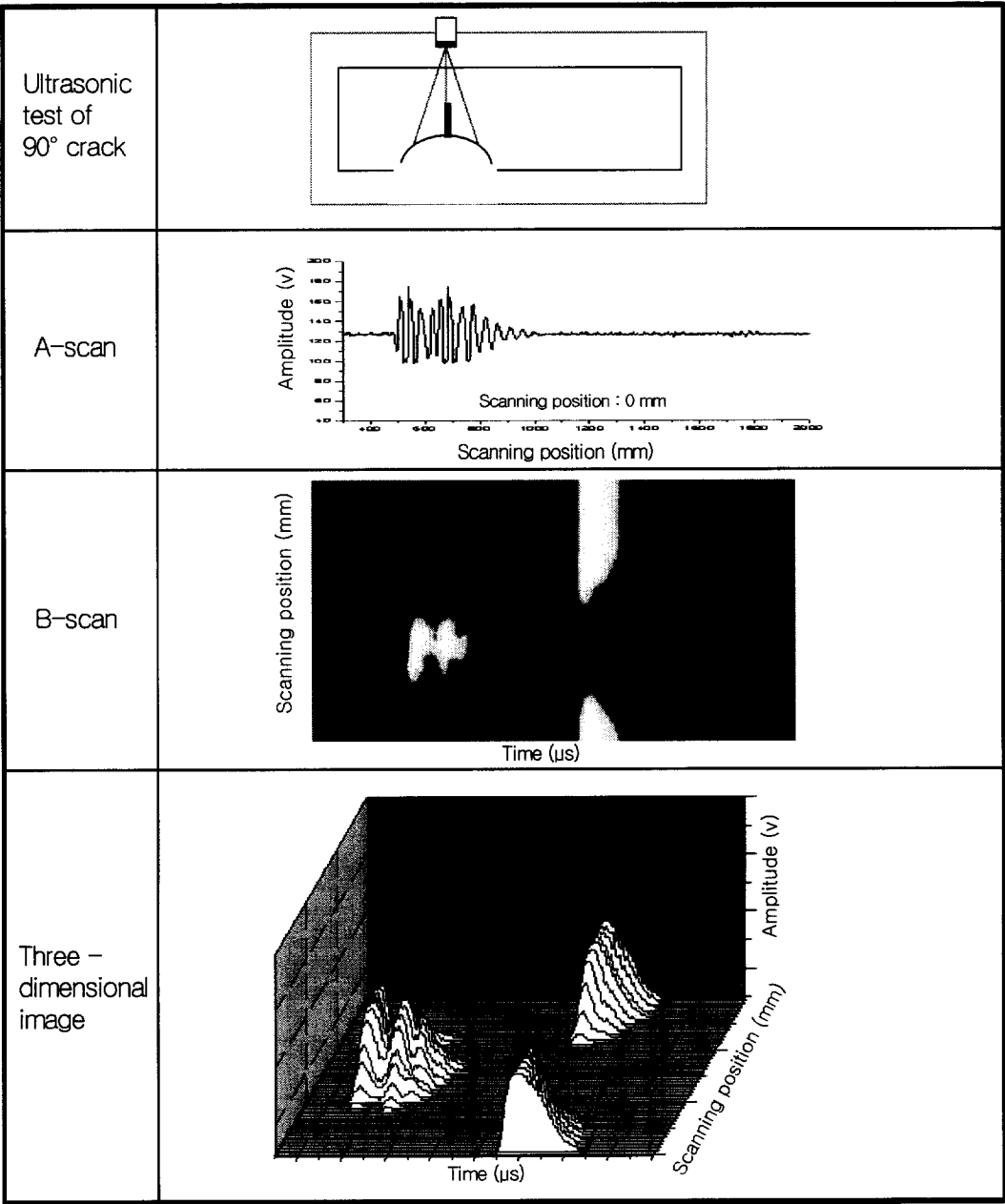


Fig. 2-1. Images of A-scan, B-scan and three dimension

2.2 신호처리 알고리즘

2.2.1 신호처리의 적용배경

결함의 검출 및 평가는 파괴역학적인 방법을 사용하여 이루어지고 있으며, 이를 위해서는 먼저 결함에 대한 개략적인 특징정보가 필요하다. 결함의 위치, 크기, 방향등의 정보는 비파괴검사로 얻어진다. 특히 초음파 검사는 다른 비파괴 검사에 비하여 결함의 검출능력이 우수하고 검사대상물에 적용이 용이하다는 장점을 가지고 있어 광범위하게 사용되고 있다^[11].

초음파를 이용한 결함의 평가는 크게 결함의 종류 판별과 크기 산정으로 나눌 수 있다. 결함 종류 판별의 경우, 재료 중에 존재하는 결함의 종류를 초음파 시험에 있어서의 기본적인 결과표시 정보만으로 판정하는 것은 일반적으로 불가능하다. 그러나 결함의 발생원인에 따라서 형상, 크기, 방향성, 발생위치 등에 대한 특징을 가지고 있으므로, 그들의 특징으로부터 검출된 결함의 종류를 추정하는 것은 가능하다^[12]. 이러한 특징들은 피검체의 제조방식, 작동방식에 따라 생길 수 있는 결함에 대한 검사자의 전문적인 지식과 결함에 대응되는 초음파 에코의 특징에 대한 검사자의 경험에 크게 좌우되기 때문에 많은 실제현장에서 발생하는 문제를 해결하는데 미흡한 점이 많다.

현재 산업현장에서 사용되는 초음파 시험에서 결함의 크기 산정은 대부분 초음파 결함신호의 진폭을 이용하여 이루어지고 있다. 결함의 크기가 초음파 탐촉자의 직경보다 작은 경우에는 평저공(flat-bottom hole)이나 구(sphere)를 크기가 알려진 대비 산란체(reference scatterer)와 비교하여 결함의 크기를 산정하는 거리-진폭-크기(distance-Gain-Size ; DGS)곡선을 사용하는 방법이 이용되고 있다^[13]. 이 곡선은 결함의 크기가 대체로

탐촉자의 직경보다 작은 경우에만 적용이 가능하기 때문에, 결함의 크기가 큰 경우에는 dB drop법, 문턱값법 등과 같은 에코 동 패턴을 사용하여 결함 크기를 선정한다. 그러나 이 방법으로는 결함의 위해도 평가를 위한 파괴역학적 계산에 이용할 수 있을 정도로 정량적인 결과를 얻기가 대단히 어려운 실정이다.

따라서 이러한 문제점을 보완하기 위해 초음파 검사로 얻은 결함 신호의 진폭을 이론적 예측결과와 비교함으로써 정량적인 결함 분류를 실시하는 방법과 결함 신호의 주파수영역 특징을 사용하여 결함을 분류하는 방법들이 개발되었다. 이러한 연구들은 초음파 결함 신호에서 결함의 종류를 판별하는데 핵심적인 역할을 하는 ‘강한 특징(strong features)’을 추출해 내고, 이를 활용하는 것을 전제로 하고 있다. 그러나 대부분의 실제적인 문제들은 이렇게 단순한 방법으로 해결할 수 없는 경우가 대부분이기 때문에, 이러한 복잡한 문제점의 해결을 위하여 초음파 형상인식(ultrasonic pattern recognition) 및 신경회로망, 초음파 신호처리 등을 이용한 분류기, 검출기, 식별시스템에 대한 연구가 수행되고 있다^[14-16].

결함 검출에서 가장 중요한점은 초음파 결함 신호에서 어떤 특징을 추출하여 사용하느냐에 달려 있기 때문에 가능한 한 강한 특징을 많이 선택하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 이러한 결함 신호를 추출하는 방법으로 신호처리 알고리즘을 적용하였다.

2.2.2 신호처리 알고리즘

초음파 검사로 획득한 신호데이터를 사용하여 결함에 대한 정보를 얻기 위해서는 전 처리, 결함후보영역의 검출, 결함영역의 판별 그리고 결함의 특징분석 및 정보획득의 4단계로 나누어 알고리즘을 구성하였다. Fig. 2-2에 신호처리 알고리즘의 처리흐름을 나타낸다.

2.2.2.1 전 처리

신호처리에 사용되는 데이터는 키웨이에 결함이 없는 초음파 반사 신호(결함경사각 0°)와 결함경사각 30° , 45° 및 90° 에서 반사된 신호데이터로, 데이터 내부에는 주사위치, 주사시간, 진폭의 3가지 변수 값을 포함하고 있다. 이것은 반사 신호들의 특징을 판별하기 위해 신호처리 알고리즘의 입력 데이터로 사용된다. 입력 데이터의 잡음 제거 및 반사 신호의 피크를 전파경로에 따라 구분하기 위하여 근접평균법을 실시하고, 입체 영상 및 B-주사영상을 통하여 결함 신호에 대한 반사 신호들의 개략적인 주사위치, 주사시간 및 진폭을 관찰한다.

2.2.2.2 결함후보영역의 검출

키웨이에 존재하는 결함정보를 획득하기 위해서는 결함영역의 검출이 필요하며, 이러한 영역처리를 위하여 반사 신호를 2차원 평면으로 변환하였다. 평면상에 나타나는 영역은 키웨이, 균열선단, 균열모서리, 저면으로 나누어지며, 균열선단 및 균열모서리가 나타나는 균열영역을 검출하는 방법이 요구된다. 따라서 결함이 존재하는 평면과 결함이 없는 평면의 차분처리를 통하여 결함일 가능성이 높은 결함후보영역을 검출한다.

2.2.2.3 결함영역의 판별

차분처리로 검출된 영역은 결함후보영역으로 결함이 아닌 영역도 포함되어있기 때문에 결함영역이 될 수 있는 특징량을 선정하여 결함영역을 판별한다.

2.2.2.4 결함의 특징분석 및 정보획득

판별된 결함영역은 키웨이와 저면에 대한 상대적인 주사위치, 주사시간의 위치특징을 가지고 있으므로 결함의 위치, 거리 및 방향성의 결함정보를 획득할 수 있다. 여기서 5가지의 결함특징으로는 진폭이 최대가 되는 지점에서의 키웨이와 균열선단 및 균열모서리의 시간차이, 진폭이 최대가 되는 지점에서의 균열선단 및 균열모서리의 수평 주사위치, 그리고 진폭이 최대가 되는 지점에서의 균열선단 및 균열모서리의 위치관계이며, 이러한 특징분석을 통하여 균열정보를 획득한다.

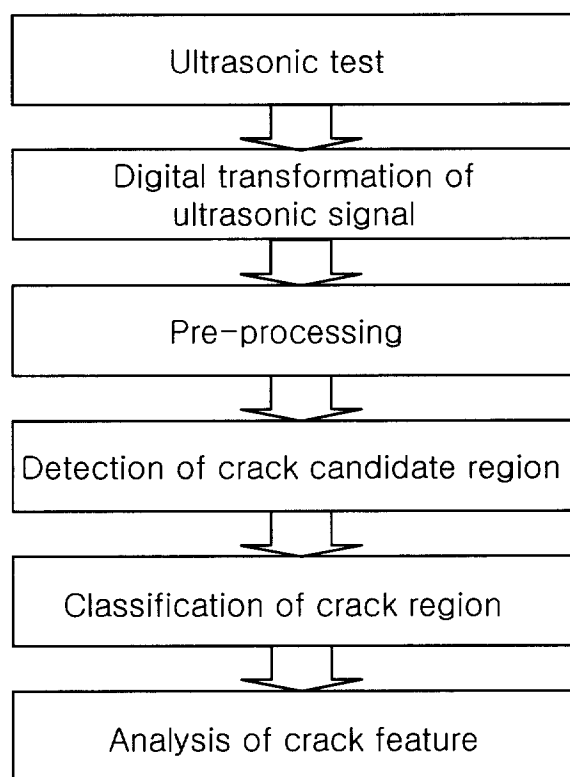


Fig. 2-2. Processing flow of ultrasonic signal processing algorithm in this paper

2.3 실험 장치 및 초음파 신호처리 시스템

2.3.1 실험 장치

본 연구에 사용된 실험장치로는 초음파 시험의 직접접촉법 탐상을 위해 자동초음파탐상기를 사용하였으며, 초음파 신호의 디지털 변환에는 Tektronix TDS 410A 디지털 오실로스코프를 사용하였다. 신호처리단계의 하드웨어 요소로 퍼스널 컴퓨터, 데이터처리 전용보드(Frame grabber)가 필요하였고, 소프트웨어로 Matrox Image Library, Spy programming source, 파형분석을 위한 Peak Fit, Origin등이 사용되었다. 그밖에 대량의 데이터 변환처리, 특징분석, 다차원 출력을 위하여 다양한 신호처리 및 영상처리 관련 소프트웨어를 C++로 개발·사용하였다.

2.3.2 모형 시험편 제작 및 직접 접촉법

실제 현장에서 발생하는 결함과 결함탐상을 재현하기 위하여 아크릴을 이용해 모형시험편을 제작하였다. 초음파 검사는 모형시험편에 자동초음파탐상기를 사용하여 신호를 획득하였으며, Fig. 2-3에 아크릴로 제작한 시험편의 사진을 나타내었다. Fig. 2-4에 모형시험편과 결함이 발생하는 키웨이 지역의 제원을 모식도로 나타내었다. 균열은 Fig. 2-4에 나타낸 바와 같이 키웨이 중심 O에서 저면을 기준으로 경사각(θ)이 30° , 45° 및 90° 인 곡면 상의 P지점에서 경사각이 동일한 폭이 1mm, 길이가 2mm인 균열을 가정하였다. Table 1에 각각의 모형시험편의 종류에 대한 균열의 각도(균열경사각) 및 균열의 길이를 나타내었다.

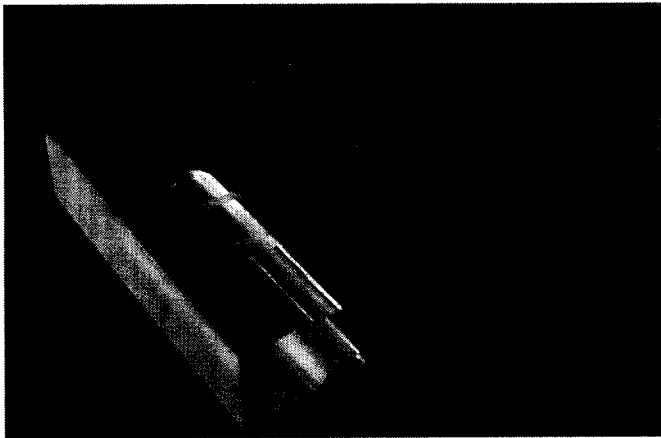


Fig. 2-3. Photograph of specimen

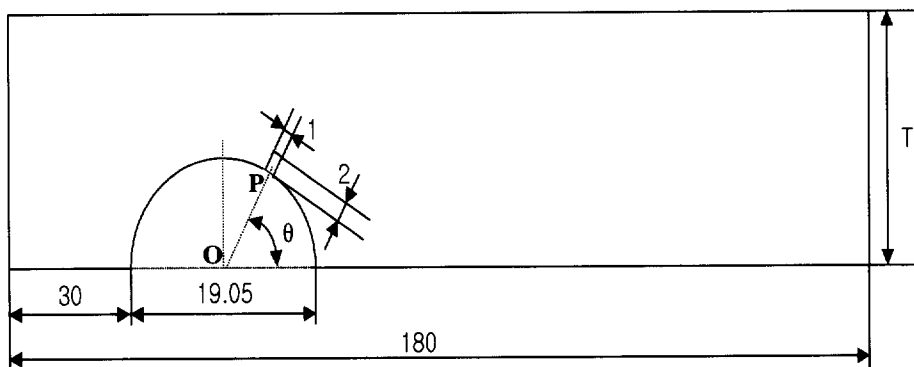


Fig. 2-4. Typical geometry of specimen and crack

Table 1. Crack angle and length of each specimen

Specimen	Crack angle (θ ; degree)	Crack length (mm)
S0	—	—
S30	30	2
S45	45	2
S90	90	2

Fig. 2-5에 초음파 검사를 위해 사용한 직접접촉법의 모식도를 나타내었다. 초음파 검사에 사용한 탐촉자는 진동자 직경이 0.375 in.이고 중심주파수가 5MHz인 탐촉자를 사용하였다. 펄서와 리시버는 임펄스 형태의 파형을 발생시킬 수 있는 Krautkramer사의 USD 15 초음파 결함 검출기를 사용하였으며, 수신된 초음파 아날로그 데이터를 Tektronix TDS 410A 디지털 오실로스코프로 보내어 디지털 변환하여 저장하였다. 주사시 시험편에서 수집된 데이터의 저장 간격은 0.5mm이며, 접촉법에 사용한 탐촉자, 샘플링 시간 및 접촉매질은 Table 2와 같다.

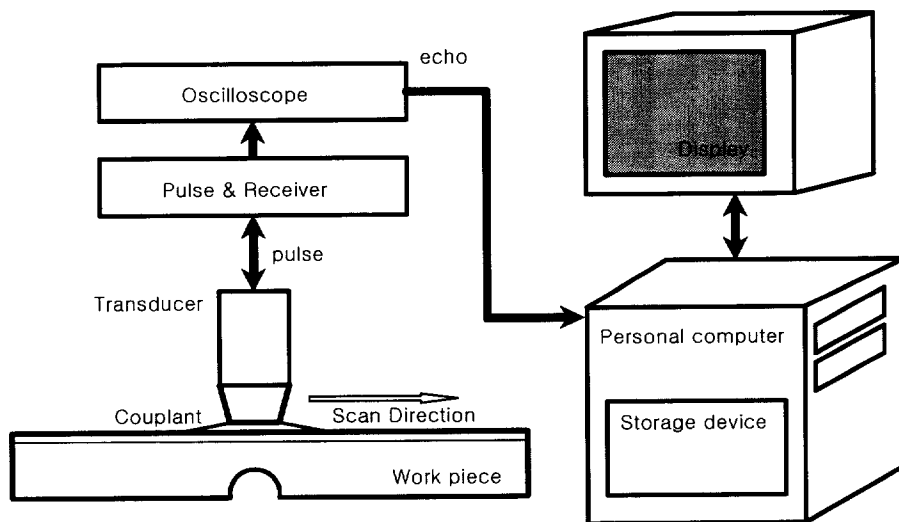


Fig. 2-5. Schematic diagram of ultrasonic test with direct contact method

Table 2. Transducers and couplants used in ultrasonic testing

	Contact technique
Transducer	Sigma transducers
Sampling time	10ns
Couplant	Glycerine

2.3.3 초음파 신호처리 시스템

Fig. 2-6에 전체 시스템의 개략도를 나타낸다. 초음파 검사로 직접접촉법을 사용하여 초음파 신호펄스를 얻어 탐상모니터에서 신호파형을 관찰한다. 반사된 아날로그 신호는 오실로스코프를 통하여 디지털 데이터로 변환되어 퍼스널 컴퓨터의 입력데이터로 사용된다. 개발된 초음파 신호처리 알고리즘에 의하여 획득한 결함정보는 모니터로 최종 출력된다.

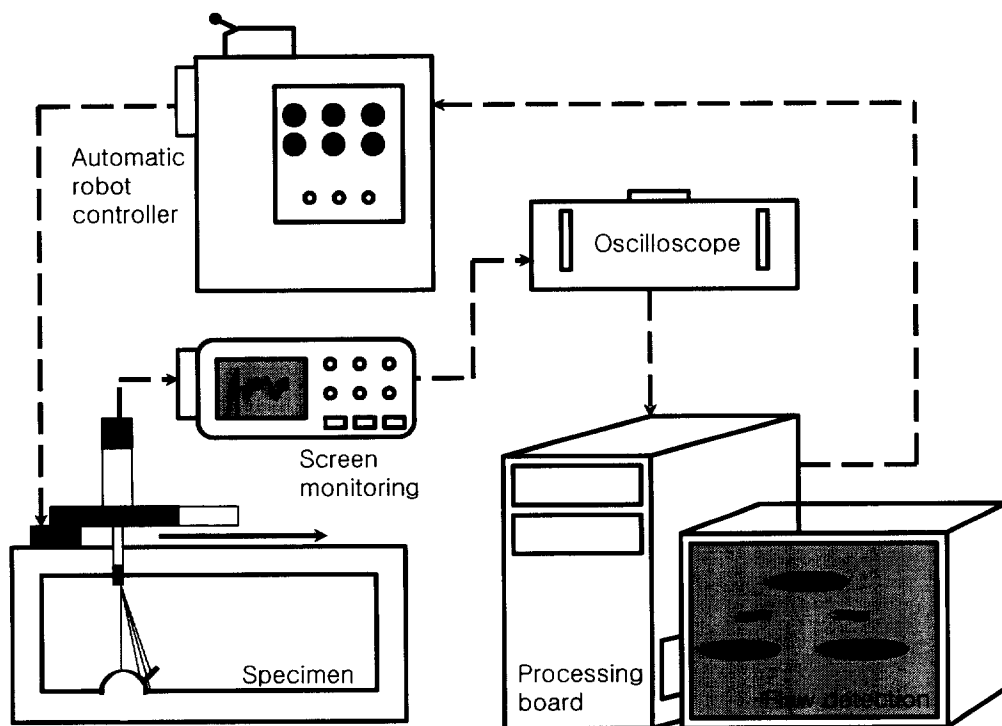


Fig. 2-6. Schematic diagram of ultrasonic signal processing system for flaw detection

제 3 장 초음파 신호처리 알고리즘

3.1 전 처리

3.1.1 초음파 신호의 RF 파형

초음파 신호처리 알고리즘의 초기 입력 데이터로는 균열에서 반사된 아날로그 신호를 디지털 변환하여 사용하였다. 입력 데이터는 균열 경사각의 각도가 각각 0° , 30° , 45° 그리고 90° 인 시험편에 대하여 초음파 검사를 실시하였으며, 이때 획득한 데이터에 대하여 각각 S0, S30, S45 및 S90으로 명명하였다. 집적접촉법으로 획득한 각각의 반사파형 데이터에서 균열로부터의 반사 신호가 최대진폭을 나타내는 주사위치의 RF파형을 Fig. 3-1에 나타낸다. Fig. 3-1 a)의 S0데이터는 균열이 존재하지 않는 시험편에 대한 RF파형으로 키웨이와 저면의 파형을 동시에 관찰하기 위하여 키웨이와 저면이 만나는 경계지점의 데이터를 나타내었다. Fig. 3-1 b), c)의 S30, S45데이터는 d) S90데이터와 비교하여 균열에서 반사된 신호의 진폭이 상대적으로 작음을 알 수 있다. 이것은 수직 입사하는 초음파가 균열에 대하여 경사각을 가지고 입사하므로 초음파를 반사하는 면적이 작고 초음파 산란의 정도에 따른 감쇠의 영향으로 생각된다. 균열경사각이 작을수록 균열의 깊이 및 키웨이 정점으로부터의 수평거리가 증가하기 때문에, 균열에서 반사된 신호가 최대 진폭을 나타내는 지점의 주사위치 및 주사시간이 균열경사각이 감소함에 따라 증가됨을 데이터에서 관찰할 수 있었다.

Fig. 3-1 b)의 S30데이터의 경우, 균열선단의 높이가 키웨이 정점보다

낮기 때문에 키웨이 신호가 먼저 나타나고, 그 후에 균열선단에서 반사된 신호가 나타나고 있는 것을 관찰할 수 있었다. 이것은 균열경사각이 작아질수록 키웨이 정점과 균열선단 사이의 거리가 멀어지기 때문에 초음파의 전파경로가 길어져 키웨이에서 반사된 신호와 균열선단에서 반사된 신호의 시간차가 커지고 있는 것을 알 수 있었다.

Fig. 3-1 c)의 S45데이터의 경우에는 균열선단의 높이가 키웨이 정점보다 약간 낮고 균열과 키웨이가 만나는 모서리 지점은 균열선단 보다 낮기 때문에 키웨이 정점의 신호가 가장 먼저 나타나고, 균열선단에서 반사된 신호가 그 다음에 나타나며, 모서리 지점에서 반사된 신호는 균열선단에 반사된 신호 바로 뒤에 피크를 보이고 있다. 그리고 주사위치가 키웨이 정점에서 8.5mm 떨어져 있기 때문에 저면에서 반사된 신호가 나타남을 알 수 있었다.

Fig. 3-1 d)의 S90데이터의 경우에는 균열선단이 키웨이 정점보다 2mm 높기 때문에 키웨이 정점에서 반사된 신호보다 균열선단에서 반사된 신호가 먼저 나타났다. 또한, 균열선단에서 반사된 신호의 진폭이 키웨이에서 반사된 신호의 진폭보다 크게 나타난 것은 균열선단이 초음파의 입사각과 수직상태로 1mm의 폭을 가지고 있고, 키웨이의 초음파반사 면적이 균열선단에 비해 상대적으로 크지만 키웨이 지역은 곡면을 가지고 있기 때문에 입사점으로 되돌아오지 못하고 산란되는 반사 신호의 영향으로 판단된다. 그리고 균열이 키웨이 정점에 위치해 있기 때문에, 주사위치가 원점인 곳에서는 저면신호가 나타나지 않았다.

Fig. 3-1 a), b), c) 및 d)에서 균열경사각이 감소할수록 균열선단에서 반사된 신호와 모서리에서 반사된 신호의 시간차가 감소하는 것을 관찰할 수 있었다. 이것은 균열경사각이 감소할수록 균열선단과 균열모서리의 높이 차가 작아지므로 초음파의 전파경로가 짧아지기 때문이다.

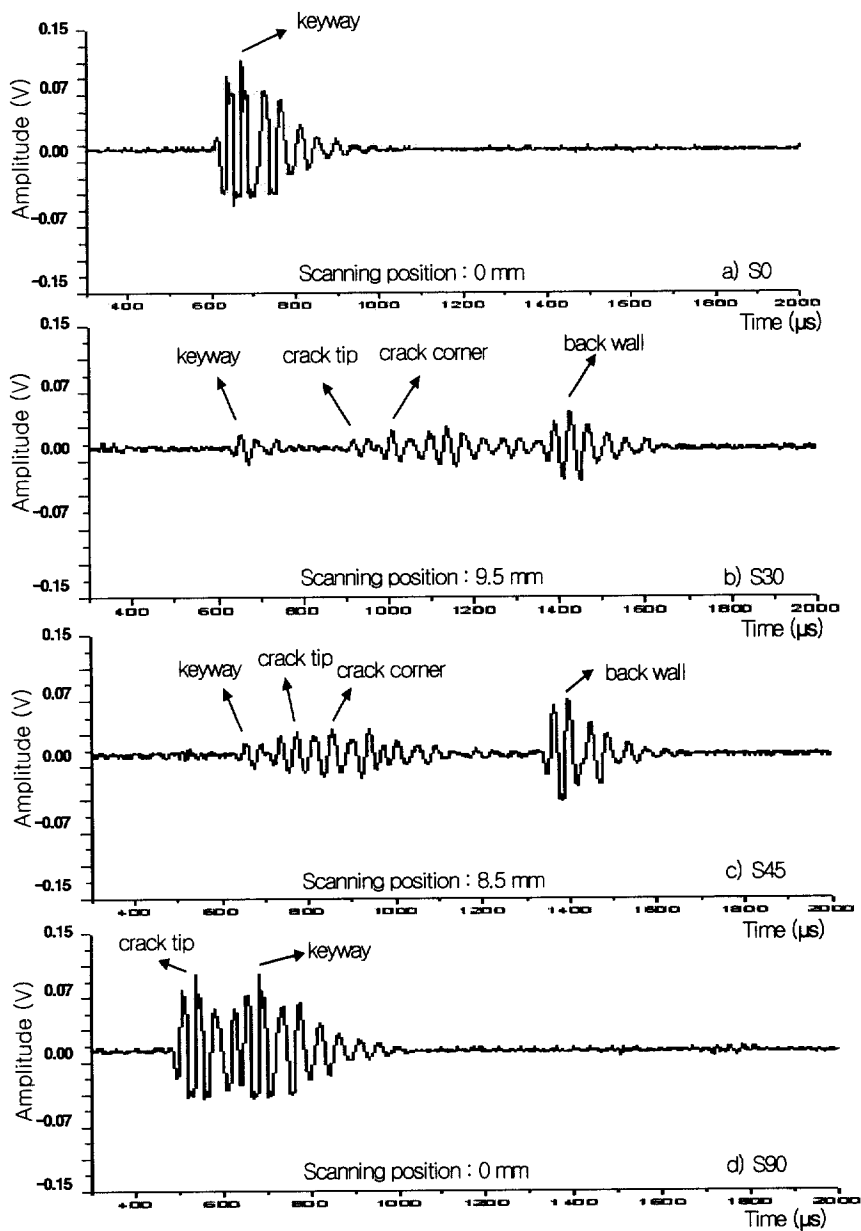


Fig. 3-1. Obtained ultrasonic RF signals a) S0, b) S30, c) S45 and d) S90

3.1.2 초음파 신호의 근접평균법

초음파 탐상에서의 결함은 시간영역에서 두 개의 고정된 점 사이의 전파시간(time of flight)의 변화와 초음파의 진폭변화로 검출될 수 있다. K. Date 등, A. J. hayman, D. K. Mak에 의하면 전파시간의 변화와 진폭 변화에 대한 정보는 균열의 높이, 위치, 그리고 각도 측정에 유용하게 사용될 수 있음이 보고 된 바 있다^[7-9]. 따라서 본 연구에서는 원 데이터에 포함하고 있는 잡음 성분을 제거하고, 각 반사 신호가 하나의 기준값에 대하여 한 방향으로 나타날 수 있도록 하기위해 데이터의 진폭 값에 절대값을 취한 후, 40점 근접 평균(40 points adjacent averaging)을 수행하여 진폭 포락선(amplitude envelope)을 구하였다. 여기서 40점 근접평균을 적용한 이유는 다른 근접평균법과 비교하여 우수한 잡음제거 효과를 가지기 때문이다. 특히 균열에서 반사된 신호가 최대 진폭을 나타내는 주사위치에서 주사 시간에 따라 나타나는 진폭 포락선의 연관성이 강하여 키웨이 및 저면에 대한 균열반사영역(균열선단·균열모서리)의 피크가 확연히 구분되어 나타났기 때문에, 균열영역의 검출과정에 적합할 것으로 판단하였다.

Fig. 3-2는 S0, S30, S45 그리고 S90에서 최대 진폭을 나타내는 Fig. 3-1의 파형을 40점 근접평균처리하여 나타낸 것이다. Fig. 3-1의 RF파형과 비교하여 각 반사 신호의 전파 시간차이 및 진폭크기는 최대 피크를 통해 판별이 가능하므로, 결함의 위치, 거리, 각도의 정보를 획득하려는 이후의 신호처리 과정에 유용할 것으로 판단되었다.

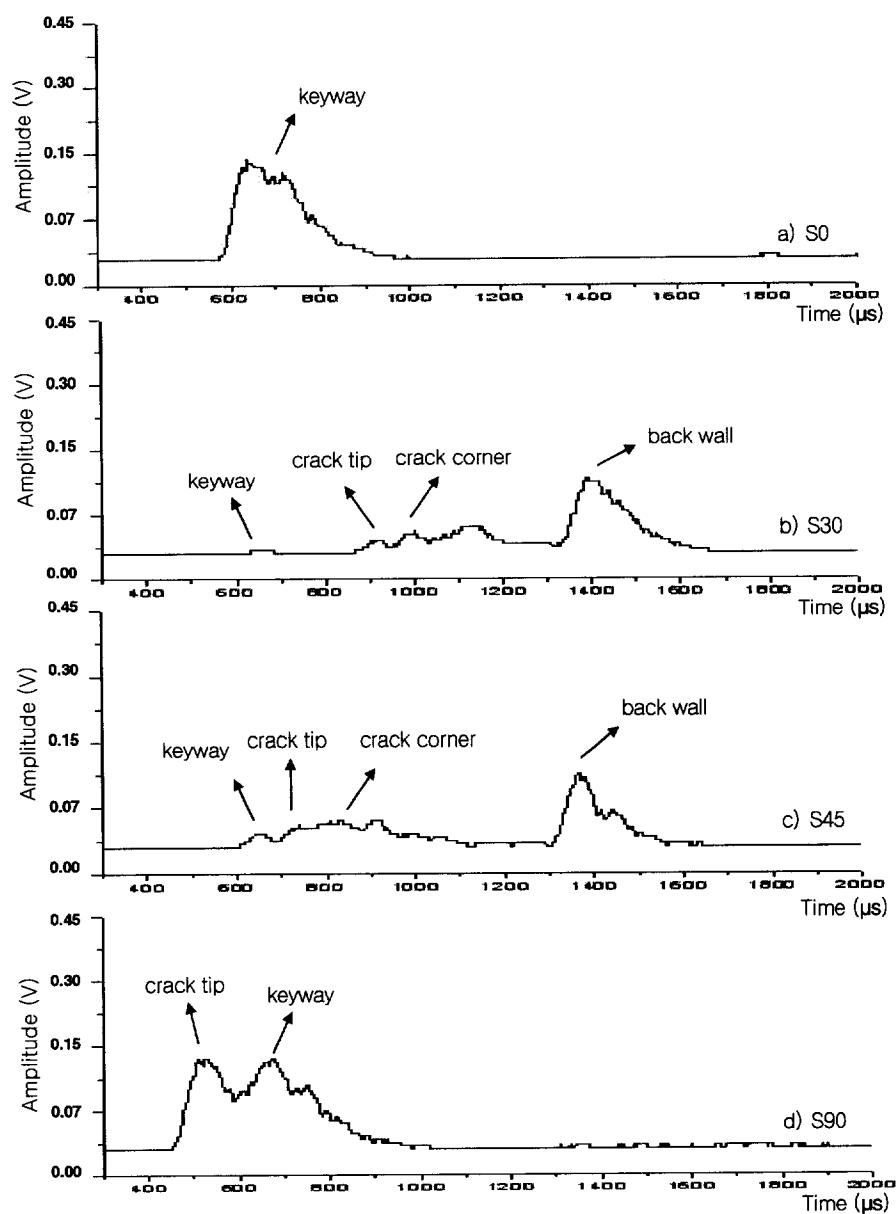


Fig. 3-2. Obtained ultrasonic signals after 40 points adjacent averaging

3.1.3 초음파 신호의 입체 형상화

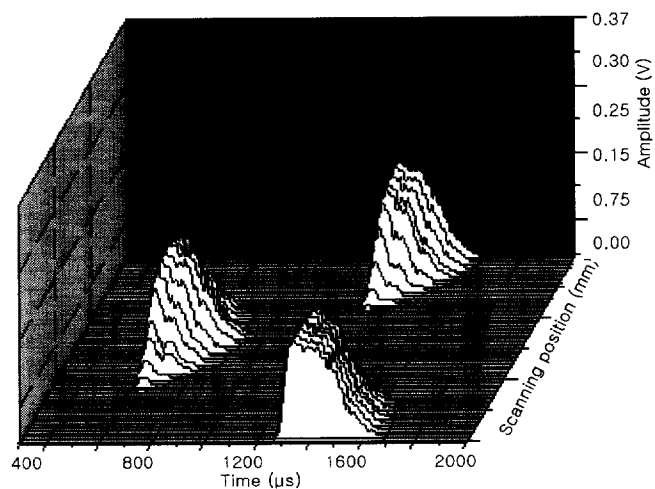
근접 평균법을 통해 변환된 신호에 대하여 탐촉자의 이동범위에 따른 진폭 포락선 파형을 누적하여 3차원 형상으로 작성한 그림을 Fig. 3-3~Fig. 3-6에 나타내었다.

Fig. 3-3은 결함이 없는 S0에 대해 입체 형상화한 것으로 a)는 전체적인 반사 신호를 형상화한 것이며, 주사시간 약 600 μ s지점에 나타난 돌출부(lobe)는 키웨이에서 반사된 신호를 나타내고, 주사시간 약 1300 μ s지점에 나타난 돌출부는 저면에서 반사된 신호를 나타낸다. 키웨이 신호와 저면 신호 사이에는 아무런 지시가 나타나지 않으며, 이것은 결함이 없다는 것을 의미한다. Fig. 3-3 b)와 c)는 반사 신호의 단면도로서 주사 위치에 대한 각 반사 신호의 진폭변화 추이를 나타낸 것이다. Fig. 3-3 b)는 키웨이에서 반사된 신호의 진폭변화를 나타낸 것이며, Fig. 3-3 c)는 저면에서 반사된 신호의 진폭 변화를 나타낸 것이다. 키웨이 정점을 원점으로 주사를 시작하였으므로, 원점에서 키웨이 정점에 대한 반사 신호가 최대 진폭을 가진다.

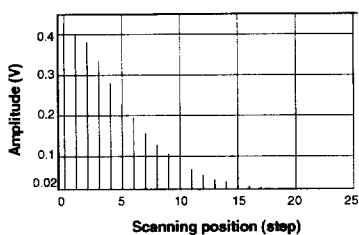
Fig. 3-4는 S30에 대한 것으로, 키웨이에서 반사된 신호와 저면에서 반사된 신호 사이에 지시가 나타나며, 주사시간 약 900 μ s~1050 μ s지점에서 균열에 대한 지시가 나타나는 것을 볼 수 있었다. 또한 균열선단의 지시와 균열과 키웨이가 만나는 모서리 영역의 지시가 구분되어 나타남을 알 수 있었다. Fig. 3-4 b)와 c)의 주사위치를 보면, 균열모서리의 신호가 균열선단의 신호보다 먼저 검출되며, Fig. 3-4 a)를 보면 전파시간에 대해서는 균열선단 신호가 균열모서리보다 먼저 나타나는 것을 볼 수 있었다. 또한 균열이 키웨이 정점의 위치에 상대적으로 가까운 곳에 존재하는 S45, S90 시편에서보다 균열 신호가 검출되는 주사위치가 늦어짐을 알 수 있었다.

Fig. 3-5는 S45에 대한 것으로, 균열선단과 키웨이 정점과의 높이 차이가 크지 않아 균열선단에서 반사된 신호와 키웨이에서 반사된 신호가 일부는 중첩되어 있고, 일부분은 근접해 있으며, 균열선단에서 반사된 신호가 키웨이에서 반사된 신호보다 약간 늦게 나타남을 관찰할 수 있었다.

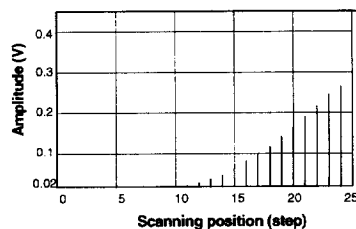
Fig. 3-6은 S90에 대한 것으로, 균열선단에서 반사된 신호와 키웨이에서 반사된 신호가 완전히 독립된 반사 신호로 나타나는데, 시간 축 상에서 앞쪽에 나타난 신호가 균열선단에서 반사된 신호이며, 다음에 나타난 신호가 키웨이에서 반사된 신호이다. 주사 방향(scan direction)은 키웨이 정점에서 멀어지는 방향으로 진행하기 때문에, 키웨이 신호가 나타나는 구간이 균열선단의 신호가 나타나는 구간보다 더 길어진다. 그리고 균열선단에서 반사된 신호의 진폭이 키웨이에서 반사된 신호의 진폭보다 더 큰 이유는 균열선단은 초음파의 입사각과 수직인 대략 1mm의 폭을 가지는 반면, 키웨이는 곡면을 가지고 있으므로 키웨이에서 반사된 초음파의 일부가 입사점으로 되돌아오지 못하고 산란되기 때문이다.



a) Integrated echo pattern

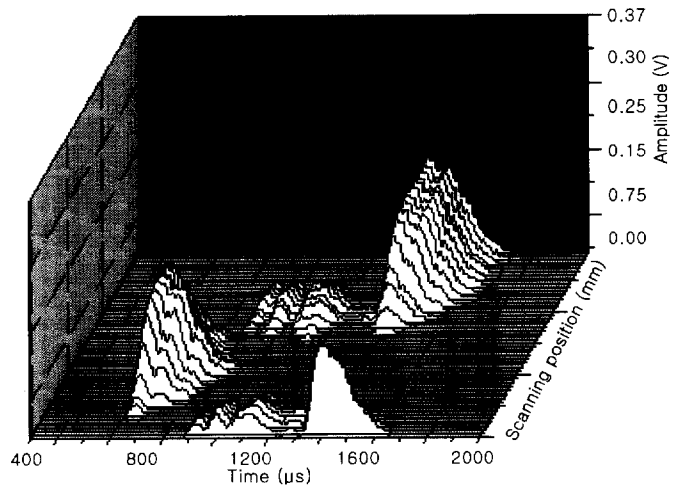


b) Keyway

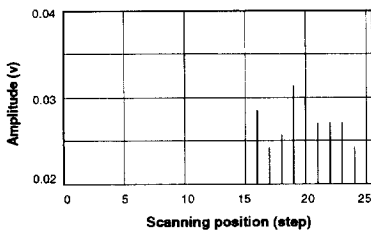


c) Backwall

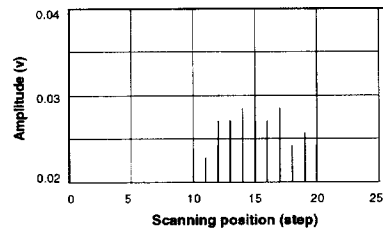
Fig. 3-3. 3-D plotting of S0, a) integrated echo pattern, b) amplitude distribution at keyway and c) backwall after pre-processing



a) Integrated echo pattern

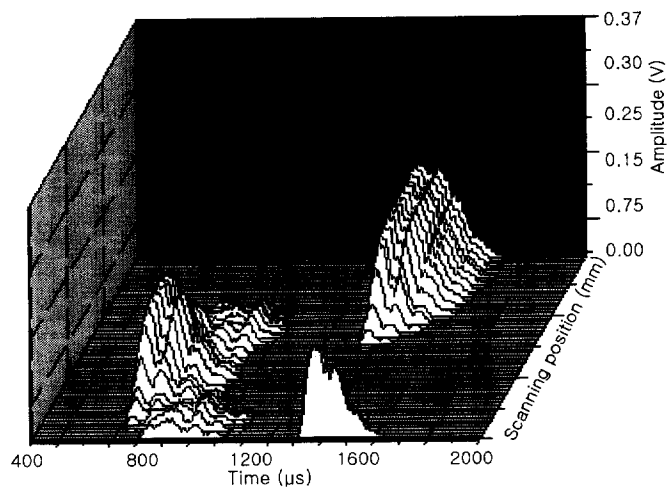


b) Crack tip

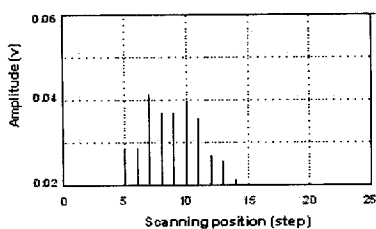


c) Crack corner

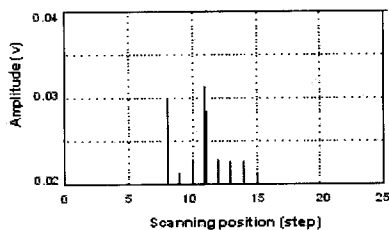
Fig. 3-4. 3-D plotting of S30, a) integrated echo pattern, b) amplitude distribution at crack tip and c) crack corner after pre-processing



a) Integrated echo pattern

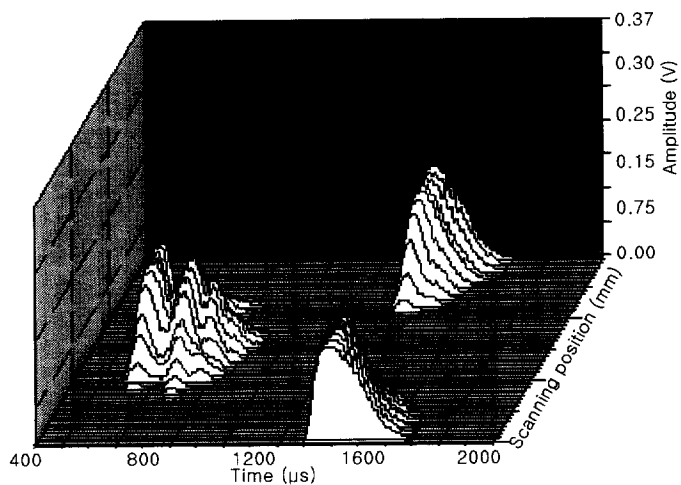


b) Crack tip

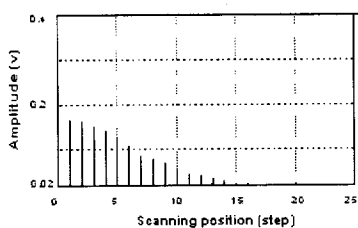


c) crack corner

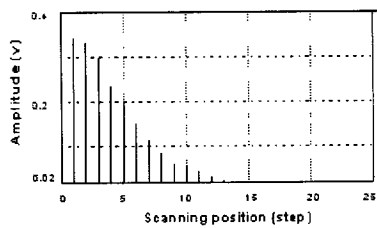
Fig. 3-5. 3-D plotting of S45, a) integrated echo pattern, b) amplitude distribution at crack tip and c) crack corner after pre-processing



a) Integrated echo pattern



b) Crack tip



c) Keyway

Fig. 3-6. 3-D plotting of S90, a) integrated echo pattern, b) amplitude distribution at crack tip and c) keyway after pre-processing

3.1.4 초음파 신호의 B-주사 영상

전 절에서는 RF파형, 근접 평균, 3차원 입체 형상화를 통하여 반사 신호의 주사위치, 주사시간 그리고 진폭에 대한 특징을 관찰할 수 있었다. 본 절에서는 전 처리과정의 마지막단계로 B-주사 영상을 통해 균열의 상대적인 위치, 거리, 크기를 평가하였다. Fig. 3-7~Fig. 3-10은 각각의 시험편에 대한 반사 신호의 B-주사 영상이다. 수평축은 주사 위치를 나타내며, 수직 축은 초음파의 주사시간 그리고 색도는 진폭을 나타낸다. Fig. 3-7~Fig. 3-10에서 전파시간 약 $-7.5\mu\text{s}$ 근방의 영역은 키웨이에서 반사된 신호이며, 전파시간 약 $0.0\mu\text{s}$ 근방에 나타난 영역은 저면에서 반사된 신호이다.

Fig. 3-7은 결함이 없는 S0에 대한 것으로 키웨이에서 반사된 신호와 저면에서 반사된 신호만 나타나며, 키웨이 신호 및 저면 신호가 원점을 기준하여 좌우로 상당히 대칭적임을 알 수 있었다. S90에 대한 Fig. 3-10의 경우에는 키웨이 영역 위쪽에 균열선단에 대한 영역이 나타났다. S90에서 키웨이 및 균열선단 이미지의 대칭성이 떨어져 있는데 이것은 접촉식 초음파 탐상법에서의 문제점인 탐촉자와 검사 대상 표면사이의 커플링 영향 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 3-8 및 Fig. 3-9는 S30, S45에 대한 것으로, 키웨이 정점을 중심으로 양쪽에 동일한 각도와 위치에 각각 균열이 존재함을 알 수 있었다. S30에 대한 Fig. 3-8의 B-주사 영상을 결함이 없는 시편의 B-주사 영상인 Fig. 3-7과 비교해 볼 때, 균열에 대한 영역이 키웨이에 대한 영역과 완전히 분리되어 나타나며, 균열에 대한 영역에서 첫 번째 영역은 균열선단을 나타내고, 두 번째 영역은 균열모서리를 나타냄을 알 수 있었다. 그러나 S45에 대한 B-주사 영상인 Fig. 3-9의 경우, 균열에 대한 영역이 키

웨이 영역과 일부 중첩되어 있어 균열에 대한 신호의 시작점을 찾기는 어려우나 균열선단과 모서리에 대한 영역이 분리되어 나타남을 알 수 있었다. 따라서 B-주사 영상에서는 균열의 각도가 증가할수록 균열에 대한 영역이 위쪽으로 상승하고, 키웨이 정점에 대한 수평 위치가 원점에 근접해 있음을 알 수 있었다.

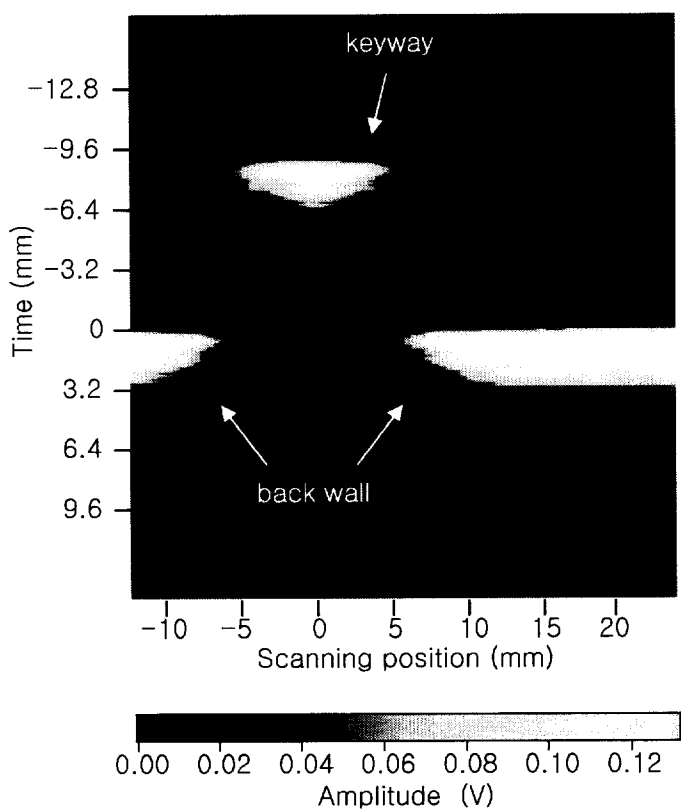


Fig. 3-7. Ultrasonic B-Scan image of S0

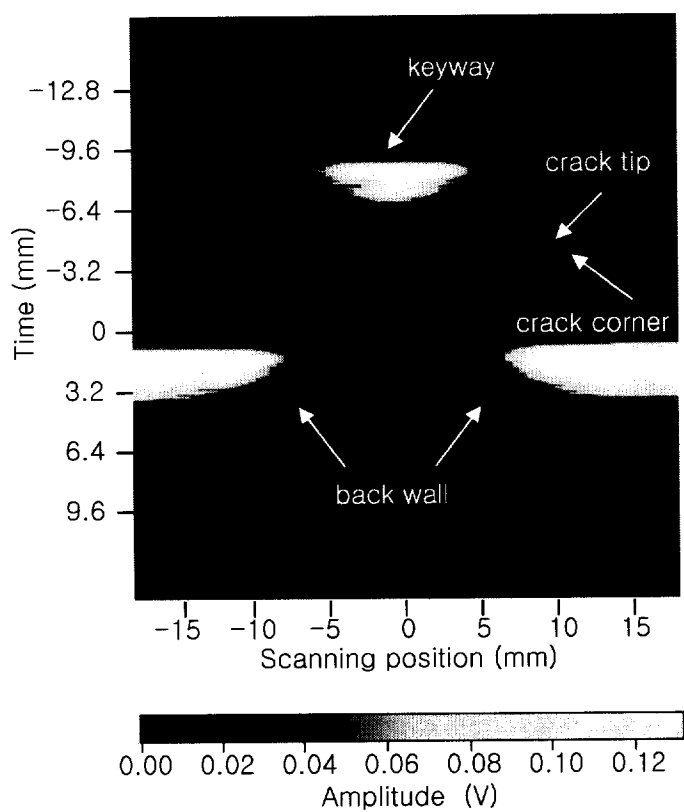


Fig. 3-8. Ultrasonic B-Scan image of S30

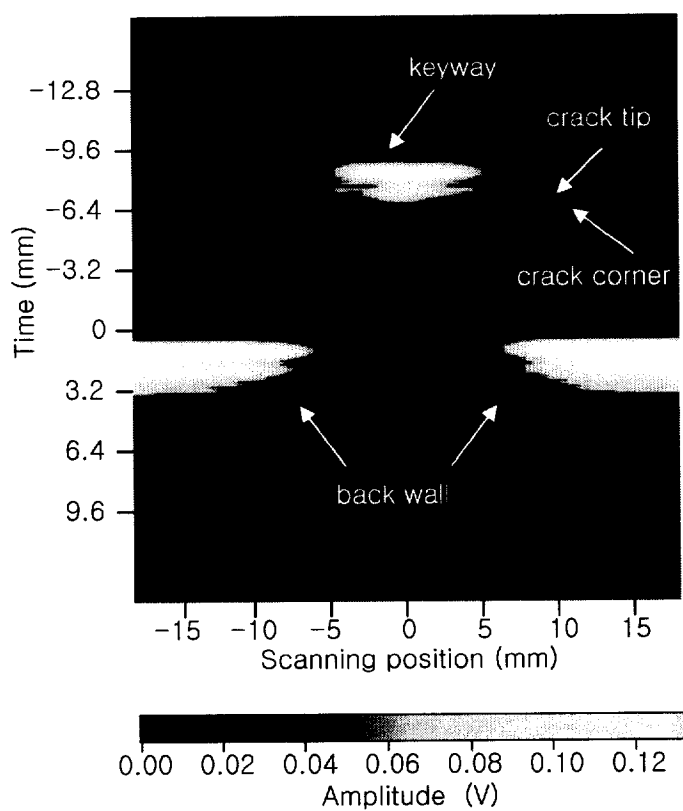


Fig. 3-9. Ultrasonic B-Scan image of S45

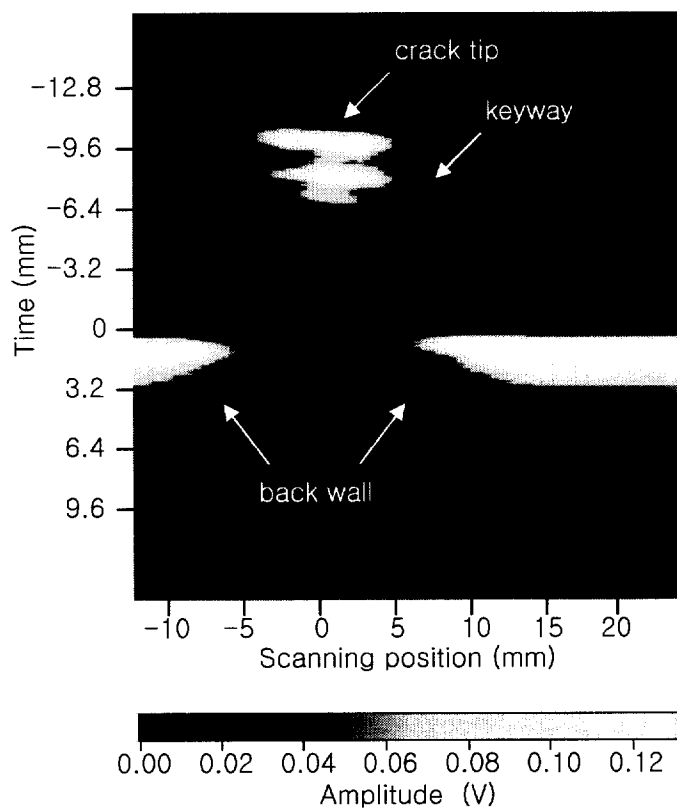


Fig. 3-10. Ultrasonic B-Scan image of S90

3.2 결함후보영역의 검출

전 처리 과정을 통하여 결함에 대한 반사 신호의 위치적인 특징을 관찰하였다. 그리고 B-주사 영상에서 키웨이와 저면에 대한 상대적인 결함영역의 위치를 구별할 수 있음을 착안하여, 결함의 특징을 획득하기 위한 방법으로 반사 신호를 2차원 평면으로 나타내어 결함영역의 추출을 시도하였다. 이러한 처리를 구현하기 위해 결함이 존재하는 평면영상과 결함이 없는 평면영상을 비교하여 균열선단 및 균열모서리를 포함하는 결함영역을 검출하는 알고리즘을 구성하였다.

3.2.1 2차원 평면영상

결함영역의 검출을 위한 신호처리 알고리즘의 효과적인 처리를 위하여 근접평균 처리된 데이터를 2차원 평면영상으로 나타내어 영역처리를 수행하였다. 이것은 전 처리단계에서 결함반사영역에 해당되는 균열선단 및 균열모서리의 피크가 키웨이와 저면에 대해 뚜렷이 구별되어 2차원 신호 처리로 결함영역의 검출이 가능할 것으로 판단되었기 때문이다. Fig. 3-11에 각각의 데이터를 처리하여 2차원 평면의 형태로 나타내었다.

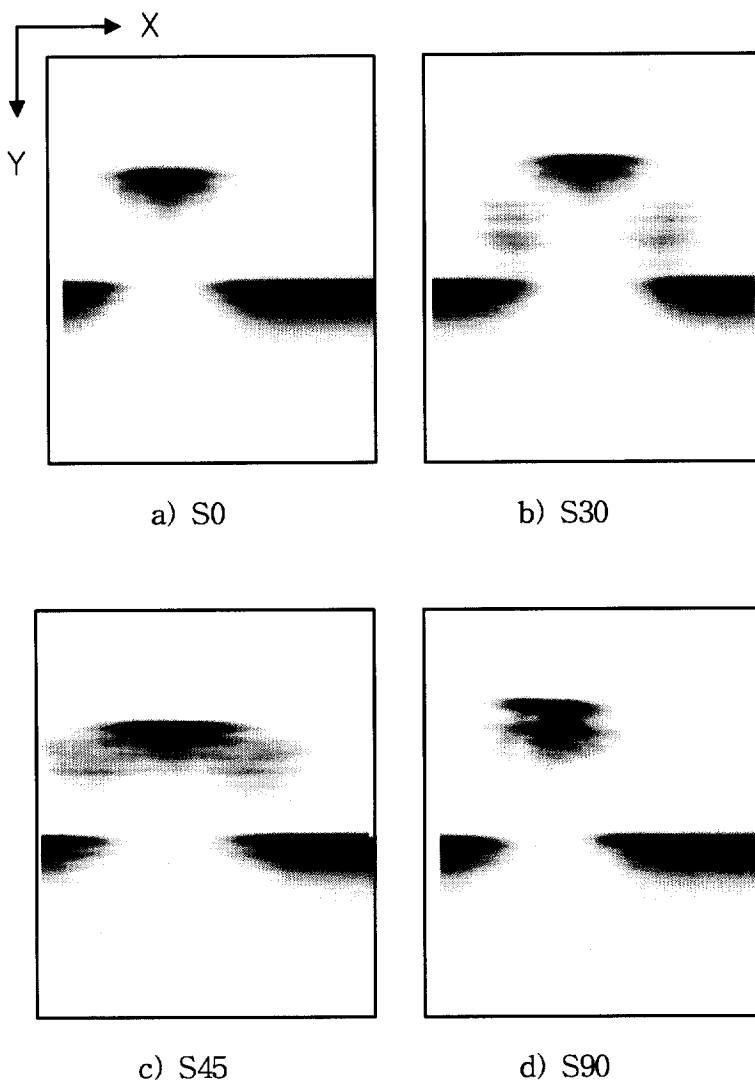


Fig. 3-11. 2D images after adjacent averaging processing of S0, S30, S45 and S90 data

3.2.2 이치화 및 팽창 처리

결함 영역을 검출하기 위해서는 결함이 존재하는 평면과 결함이 없는 평면의 비교연산이 필요하다. 따라서 결함이 없는 평면영상의 생성이 요구되었고, 결함이 존재하는 모든 평면영상에 적용할 수 있는 무결함 평면영상의 생성을 위해 초음파 검사로 획득한 0진호의 데이터를 이용하였다. 이 데이터에는 키웨이와 저면에서 반사된 신호만이 존재하여, 3개의 영역(키웨이 1개 영역, 저면 2개 영역)을 분할처리 하였다. 키웨이와 저면을 분리하기 위해 2치화 처리를 하였으며, 이때 반사 신호의 데이터 값을 0~255 범위로 변환하고, 자동 2치화처리 후에 배경은 255, 물체는 0으로 분리하였다. 2치화 처리된 평면영상은 한 데이터 값을 중심으로 좌우방향으로 1, 상하방향으로 10만큼 팽창시키는 필터링처리(3×21)를 수행하였다^[17]. Fig. 3-12 a)에 S0을 이치화한 평면영상을 그리고 b)에 팽창 처리한 평면영상을 나타낸다.

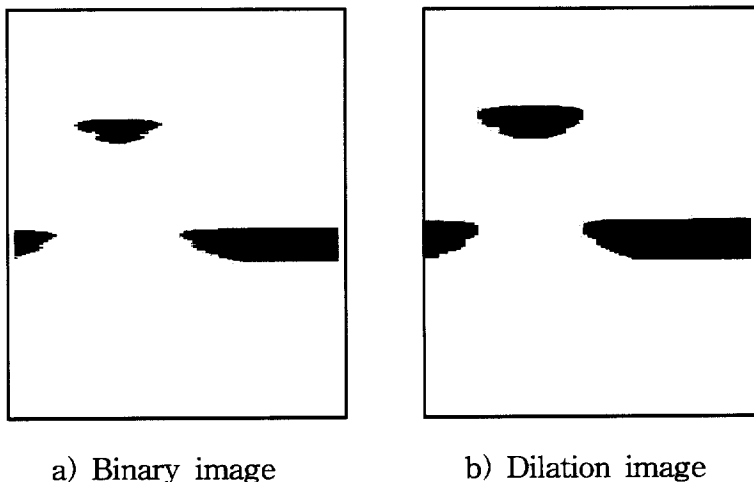


Fig. 3-12. 2D images of S0 after binary and dilation processing

3.2.3 영역분할 처리

본 절의 영역분할처리는 이전 단계까지 처리된 평면에서 유의한 3개의 영역을 분할하는 처리이다. 본 처리는 3개의 영역을 독립적으로 분할함으로써, 다음의 정합처리단계에서 키웨이 및 저면에서의 위치적인 대응이 보다 정확하게 수행될 것이라고 판단되었기 때문이다. Fig 3-12 b)의 영상을 이용하여 분할 처리한 결과를 Fig. 3-13에 나타낸다.

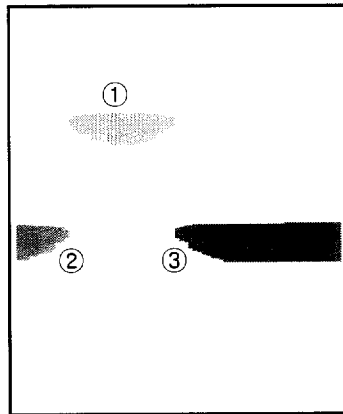


Fig. 3-13. 2D image after segmentation processing of Fig. 3-12 b)

3.2.4 정합 처리

결합이 존재하는 평면영상과 결합이 없는 평면영상을 비교하기 위해서 두 평면영상의 위치적인 정합이 필요하다. 분할된 3개영역에 대한 정합처리의 결과 값인 가로축과 세로축의 정합값(x, y)은 비교되는 영역사이에서 데이터 값의 차이가 최소가 되는 지점으로의 이동 정도를 의미한다. Fig. 3-14에 정합처리 후의 결과 및 정합값을 나타낸다. Fig. 3-14 a) S0은 결합이 없는 평면영상에서 정합처리를 위해 설정한 template를 사각형으로 나타내었다. 3개 영역에 대하여 template는 Fig. 3-11에서 b) S30, c) S45 및 d) S90 평면영상의 왼쪽상단(0, 0)에서 출발하여 주사위치별 주사시간(우측하단)에 따른 방향으로 정합 처리하며, 비교되는 영역의 데이터 값이 최소가 되는 지점을 정합값(x, y)으로 결정하였다. Fig. 3-14 b), c) 및 d)는 각각 S30, S45 및 S90에 대하여 정합값만큼 이동한 결과영상을 나타낸다. Fig. 3-14에 나타낸 바와 같이 각각의 균열경사각에 대한 평면영상과 결합이 없는 평면영상에서 분할된 키웨이와 저면의 3개 영역이 성공적으로 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

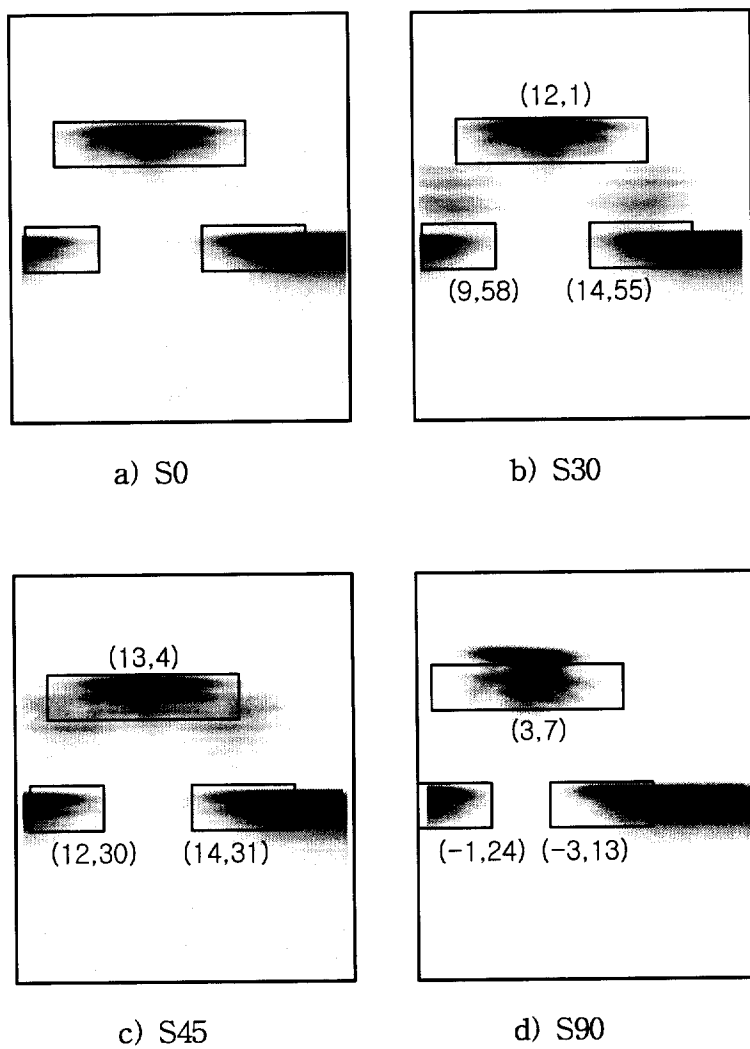
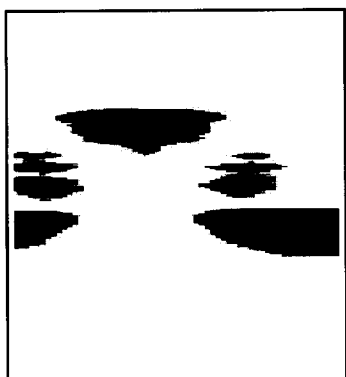


Fig. 3-14. Results after template matching processing

3.2.5 차분 처리

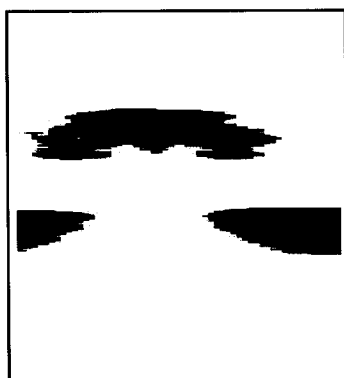
정합 처리 후 두 평면의 비교를 통하여 결함영역을 검출하기 위하여 차분처리과정이 필요하였다. 결함이 존재하는 평면인 Fig. 3-14의 b) S30, c) S45 및 d) S90과 결함이 없는 평면인 Fig. 3-14의 a) S0을 2치화 처리 후, 팽창(2×5) 처리하여 두 평면을 차분하였다. Fig. 3-15에 차분처리 후의 평면영상을 나타낸다. 결함영역을 포함하는 결함후보영역이 검출되었음을 알 수 있다.



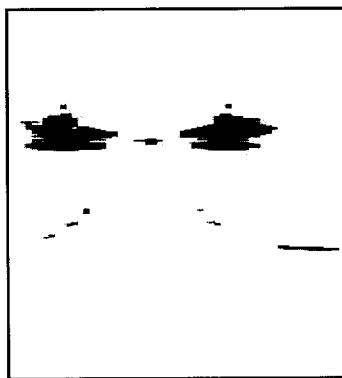
a) S30



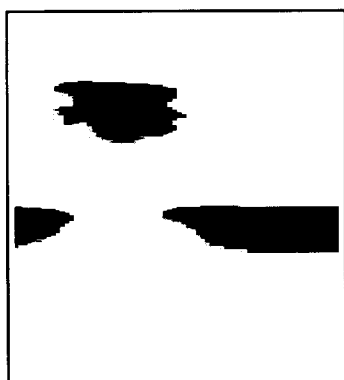
b) Crack candidate regions of S30



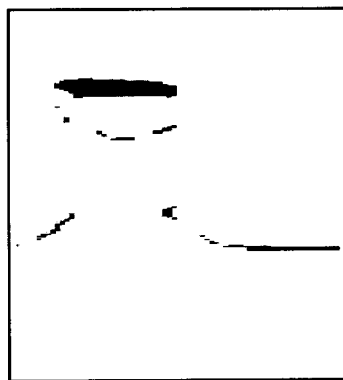
c) S45



d) Crack candidate regions of S45



e) S90



f) Crack candidate regions of S90

Fig 3-15. 2D images after subtraction processing S30, S45 and S90

3.3 결함영역의 판별

전 단계까지의 처리과정에서 검출된 결함후보영역은 결함영역은 물론, 키웨이영역과 저면영역의 경계 등을 포함한 노이즈영역도 검출되었다. 이들 결함후보영역에서 결함영역만을 추출하기 위하여 결함영역에 대한 특징량을 선정하여 결함영역이 될 수 있는 특징량의 조건을 Table 3과 같이 정의하였다. 위치조건의 특징량은 저면영역 아래에서 검출된 결함후보영역을 제거한다. 면적조건의 특징량은 각각의 결함후보영역의 면적이 균열경사각 90°인 시험편의 균열면적의 1/5이상인 경우는 결함영역으로 판별한다. 형상조건의 특징량은 결함후보영역의 수평방향 길이에 대한 수직방향 길이의 비가 2.5미만이거나 4.0이상인 경우는 '키웨이의 경계영역 또는 결함영역에 반(反)하는 영역'으로 결함영역이 아니라고 판별한다.

Table 4는 위치조건의 특징량을 적용하여 결함이 발생하지 않는 저면아래에 위치한 영역을 제거한 결과로, Fig. 3-15 b), d), f)의 차분처리로 검출된 결함후보영역의 개수와 위치조건의 특징량을 적용한 후의 결함후보영역의 개수를 나타낸다. Fig. 3-16은 위치조건의 특징량을 적용한 영상이며, 각각 7개, 5개, 5개의 결함후보영역이 남아있는 것을 알 수 있다.

Table 5는 결함후보영역에 대한 면적조건 및 형상조건의 특징을 적용한 후의 결함영역의 개수를 나타낸다. 결함영역으로 판별된 각각의 영역에 대한 3개의 특징량을 정리하여 Table 6에 나타내었다. Fig. 3-17에 최종적으로 결함영역으로 판별된 결과를 나타내었다. Fig. 3-17의 결과에서 알 수 있듯이 각각의 시험편에 존재하는 결함을 정확히 검출할 수 있었으며, 이는 본 연구의 초음파 알고리즘 신호처리 알고리즘이 결함후보영역에서 결함영역만을 판별할 수 있다는 것을 의미한다.

Table 3. Features and threshold conditions to classify crack region

	Threshold conditions
Position	Erase : over than scanning depth of backwall (130mm)
Area	Accept : over than threshold. (about 30 = 1/5 × area scanned area of crack(1mm×2mm))
Shape	Accept : $0.25 \leq V/H \leq 4.0$ (H : h-length, V : v-length)

Table 4. Numbers of crack candidate region after position term applied

	S30	S45	S90
Crack candidate region	39	18	22
Results	7	5	5

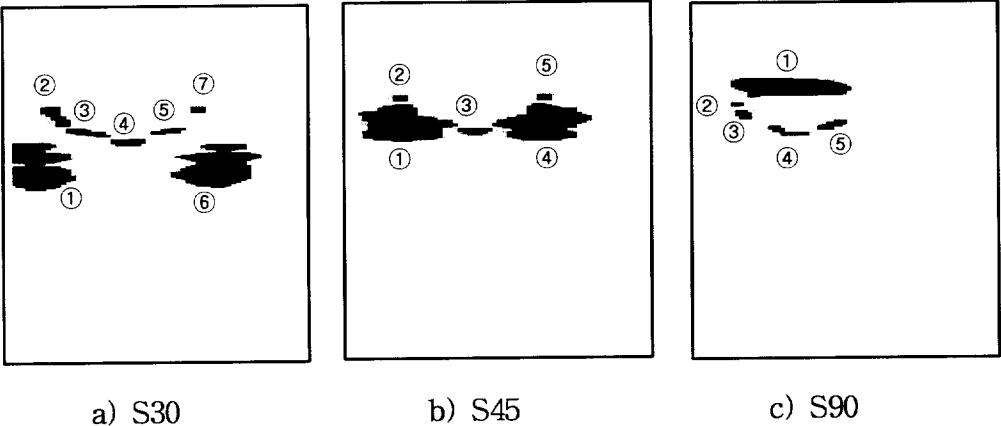


Fig. 3-16. Crack candidate regions after position term applied

Table 5. Numbers of crack candidate regions after area and shape terms applied

Features	S30	S45	S90
Area(mm ²)	① 171	① 171	① 165
	② 17	② 7	② 3
	③ 19	③ 15	③ 11
	④ 18	④ 164	④ 19
	⑤ 12	⑤ 7	⑤ 17
	⑥ 183		
	⑦ 8		
	①, ⑥	①, ④	①
Shape	① 6.0, 4.3	① 10, 3.2	① 6.0, 1.8
	② 2.0, 1.2	② 1.0, 0.6	② 2.0, 0.3
	③ 4.0, 0.8	③ 3.0, 0.7	③ 2.0, 0.8
	④ 3.0, 0.7	④ 10, 3.2	④ 5.0, 1.0
	⑤ 3.0, 0.6	⑤ 1.0, 0.5	⑤ 3.0, 0.9
	⑥ 9.0, 4.0		
	⑦ 1.0, 0.6		
	①, ②, ⑥, ⑦	①, ②, ④, ⑤	①, ③, ⑤
Results	2 (①, ⑥)	2 (①, ④)	1 (①)

Table 6. Features of crack regions

	S30		S45		S90
	①	⑥	①	④	①
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

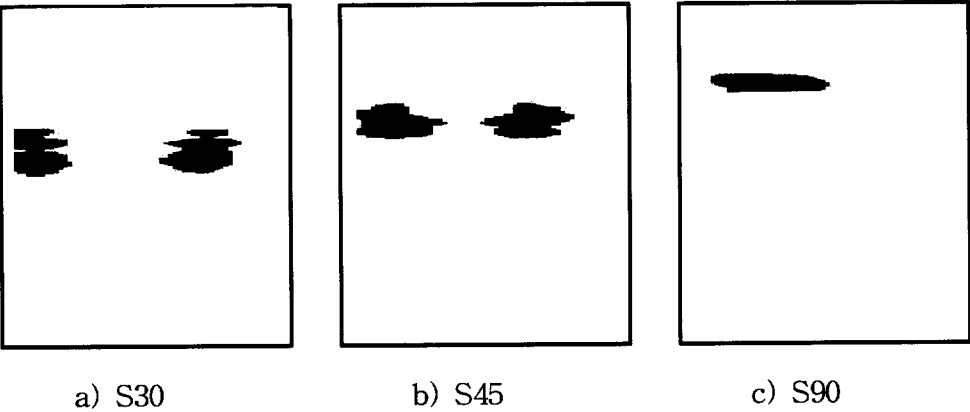


Fig. 3-17. Results images of crack regions

3.4 결함의 특징분석 및 정보획득

전 절까지는 각각의 균열경사각을 가진 시험편의 반사 신호로부터 결함 후보영역을 검출하였고, 검출된 결함후보영역에 대한 특징량을 추출하여 정의된 임계치와의 비교를 통하여 결함영역만을 판별하였다. 본 절에서는 판별된 결함영역의 특징을 분석하여 결함에 대한 상세정보를 획득한다.

결함영역과 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 결함의 각도를 알 수 있다. 최종적으로 시험편에 존재하는 각각의 결함에 대한 결함의 위치, 깊이 그리고 방향성에 관한 정보를 획득할 수 있다. Fig. 3-17 a) S30, b) S45 및 c) S90에 나타난 각각의 결함영역에 대하여 주사 위치 및 최대진폭 도달시간을 도식화하여 Fig. 3-18~Fig. 3-20에 나타내었다. 각각의 그림에서 균열선단 및 균열모서리는 최종 판별된 결함영역의 데이터를 이용하여 나타내었으며, 결함영역의 위치 및 깊이의 상대적 특징값을 얻기 위하여 키웨이 및 저면을 그림에 표시하였다.

Fig. 3-18은 S30시험편에서 검출한 결함영역에 대한 특징값으로써 주사 위치별 반사 신호의 진폭이 최대가 되는 도달시간에 따라 키웨이, 균열선단, 균열모서리, 저면 순으로 나타나며, 키웨이 정점에 대하여 균열선단 및 균열모서리의 깊이차이는 각각 3.8mm, 4.9mm이다. 키웨이 정점에 대하여 균열선단 및 균열모서리에서 반사된 신호가 최대진폭이 되는 동그라미 표시지점의 주사위치는 각각 9.5mm, 8.0mm이며, 동그라미 표시지점에 해당하는 주사위치는 균열선단 및 균열모서리의 진폭이 최대가 되는 균열의 위치로써 두 반사 신호를 연결하는 방향성은 30.2°의 각도를 가진다.

Fig. 3-19는 S45의 결함영역에 대한 특징값으로써 주사위치별 반사 신

호의 진폭이 최대가 되는 도달시간에 따라 S30의 결과와 같이 키웨이, 균열선단, 균열모서리, 저면 순으로 나타나며, 균열영역이 키웨이에 근접해 있다. 키웨이 정점에 대하여 균열선단 및 균열모서리의 깊이차이는 각각 1.5mm, 2.5mm이다. 키웨이 정점에 대하여 균열선단 및 균열모서리에서 반사된 신호가 최대진폭이 되는 동그라미 표시지점의 주사위치는 각각 8.0mm, 7.0mm이며, 동그라미 표시지점에 해당하는 주사위치의 균열선단 및 균열모서리의 진폭이 최대가 되는 균열의 위치로써 두 반사 신호를 연결하는 방향성은 46.1°의 각도를 가진다.

Fig. 3-20은 S90의 결함영역에 대한 특징값으로써 주사위치별 반사 신호의 진폭이 최대가 되는 도달시간에 따라 균열선단, 키웨이, 저면 순으로 나타나며, 키웨이 정점에 대하여 균열선단의 깊이차이는 1.8mm이며, 균열모서리는 존재하지 않으므로 0mm이다. 키웨이 정점에 대하여 균열선단에서 반사된 신호가 최대진폭이 되는 동그라미 표시지점의 주사위치는 정점이므로 0mm이며, 균열모서리는 존재하지 않으므로 0mm이다. 동그라미 표시지점에 해당하는 주사위치의 키웨이와 균열선단의 진폭이 최대가 되는 위치로써 두 반사 신호를 연결하는 방향성은 90°의 각도를 가진다.

Fig. 3-18~Fig. 3-20의 특징값을 분석하여 획득한 결함의 상세정보를 5개의 파라메타로 정의하여 나타내었다. 결함에 대한 5개의 파라메타는 Fig. 3-21에 나타낸 바와 같다. Fig. 3-21에서 F1과 F2는 키웨이 정점에 대한 균열선단과 모서리의 깊이에 대응되는 특징으로, F1은 키웨이 정점에 대한 최대 진폭을 갖는 반사 신호의 도달시간과 균열선단에 대한 최대 진폭을 갖는 반사 신호의 도달시간 차이를 거리로 계산한 값이다. F2는 키웨이 정점에 대한 최대 진폭을 갖는 반사 신호의 도달시간과 균열모서리에 대한 최대 진폭을 갖는 반사 신호의 도달시간 차이를 거리로 계산하여 나타낸다. F3과 F4는 키웨이 정점에 대한 각 반사영역의 수평 위치에

대응되는, 균열선단과 균열모서리에서 반사된 신호가 최대 진폭을 나타낼 때의 주사위치 차이를 나타낸다. 그리고 F5는 각각의 균열경사각에서 반사된 신호의 진폭이 최대가 되는 위치에서의 도달시간을 연결하여 각도로 나타내었다.

Table 7은 5개의 파라메타를 이용하여 각각의 균열경사각에 대한 상세 정보를 나타내며, 균열의 위치, 깊이 그리고 방향성에 관한 결함정보를 도식화하여 Fig. 3-22에 나타내었다. Fig. 3-22의 결과로부터 약간의 오차를 내포하고 있으나, 개발한 초음파 신호처리 알고리즘을 이용하여 균열의 상세정보를 정량적으로 검출 가능함을 확인할 수 있었다.

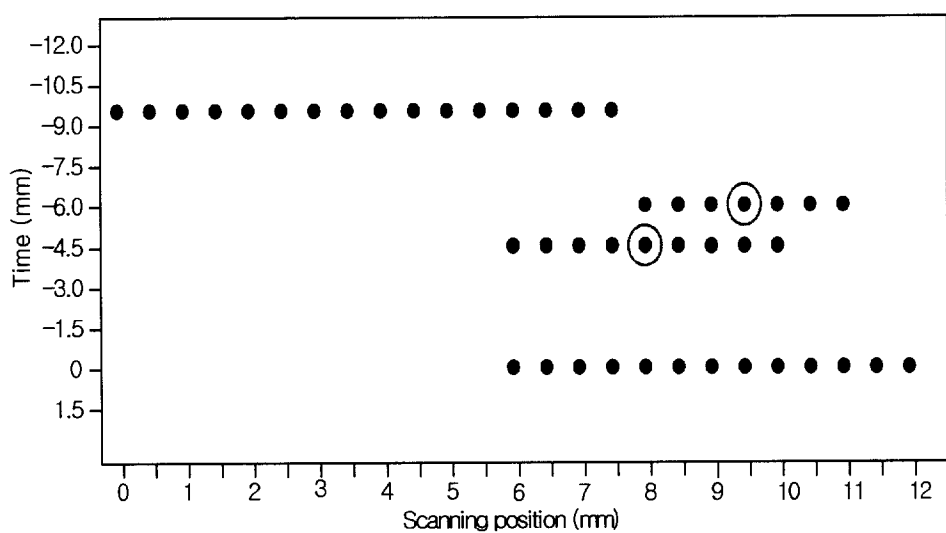


Fig. 3-18. A-scan image of scanning time being the maximum amplitude of crack region for the scanning position of S30

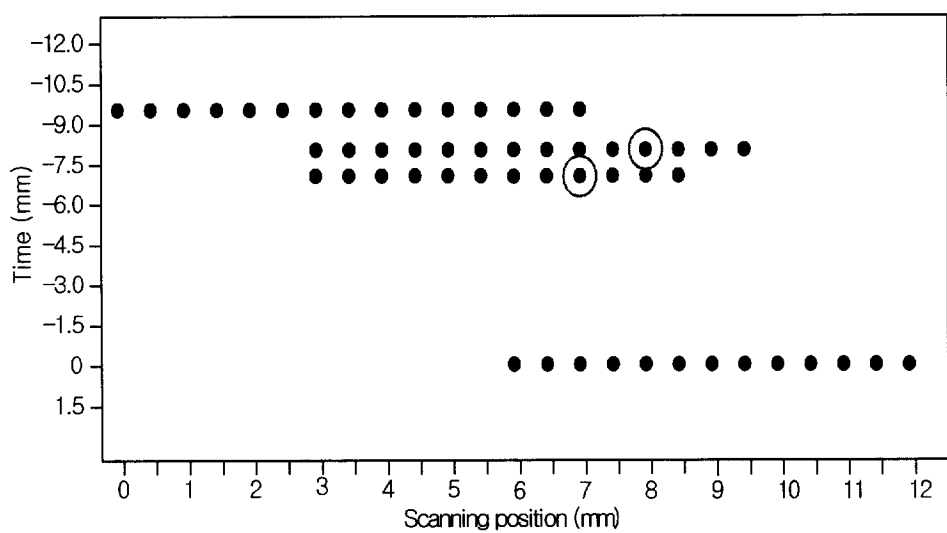


Fig. 3-19. A-scan image of scanning time being the maximum amplitude of crack region for the scanning position of S45

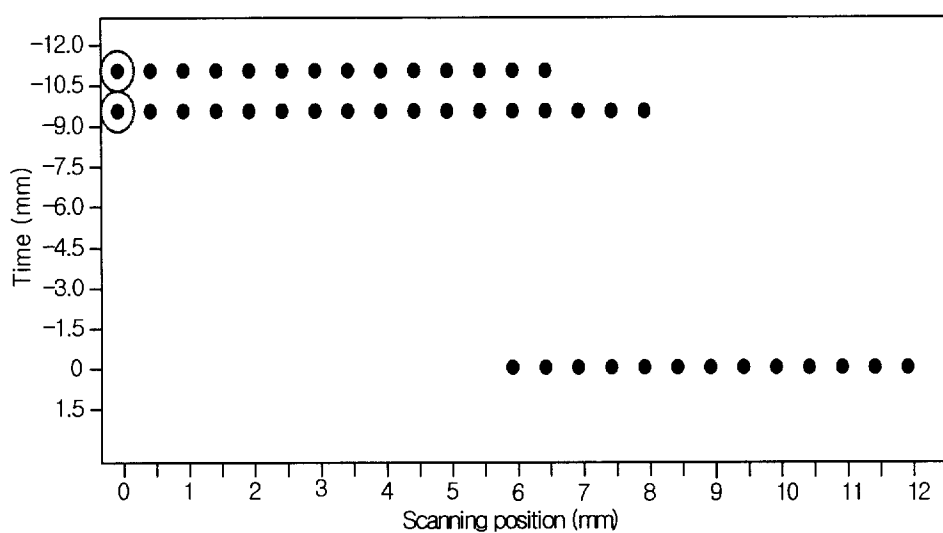


Fig. 3-20. A-scan image of scanning time being the maximum amplitude of crack region for the scanning position of S90

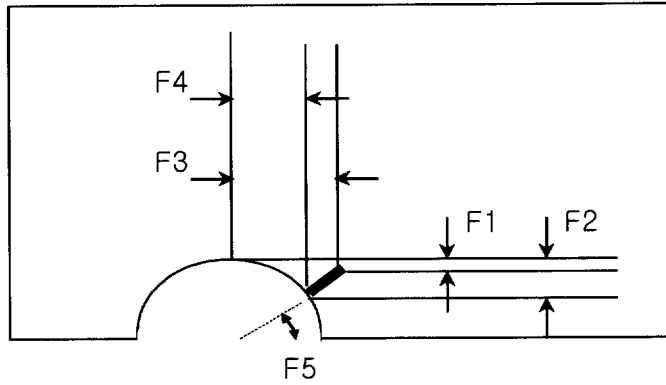


Fig. 3-21. Scanning position considering returning time difference and amplitude of ultrasonic echo

Table 7. Obtained information by analyzing the crack region

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

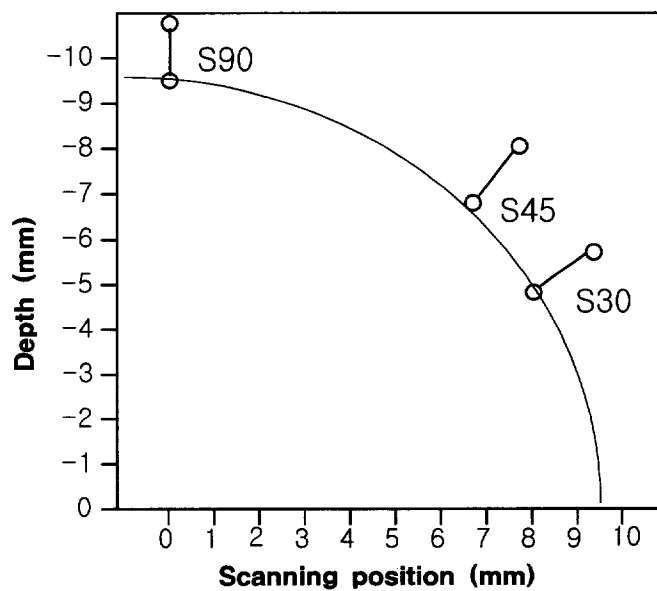


Fig. 3-22. Crack information related to position, depth and angle of S30, S45 and S90

제 4 장 결 론

본 논문에서는 터빈 로터 디스크의 키웨이에 발생하는 결함을 검출하기 위하여 초음파 신호처리 알고리즘을 개발하였다. 개발한 초음파 신호처리 알고리즘을 이용하여 터빈 로터 디스크 키웨이 시험편에 존재하는 결함을 검출하였으며, 검출된 결함에 대하여 정량적 평가를 하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 초음파 검사의 RF파형을 통하여 주사위치 및 진행경로에 따라 균열 영역이 키웨이에 중첩되거나 분리됨을 알 수 있었고, 분리되는 경우 키웨이와 두 반사 신호 사이의 깊이차이에 해당하는 시간차이가 보임을 알 수 있었다.

2) 근접평균 처리된 파형 및 3차원 입체형상화를 통하여 주사위치에 따른 초음파 빔의 경로 및 진폭특징을 관찰할 수 있었다.

3) B-주사 영상의 결함이 없는 평면영상과 결함이 존재하는 평면영상의 비교를 통하여, 키웨이 영역에 대한 결함영역의 상대적인 위치 및 거리를 알 수 있었다.

4) 신호처리 단계에서 각각의 균열경사각에 대한 반사 신호에서 결함영역을 검출하기 위하여 반사신호를 2차원 평면영상으로 변환하여 알고리즘을 적용한 결과, 결함영역을 성공적으로 검출할 수 있었다.

5) 검출된 결함영역의 특징을 분석하여 균열의 위치, 깊이 및 방향성에 관한 정량적인 정보를 획득할 수 있었다.

6) 본 연구에서 개발한 초음파 신호처리 알고리즘을 사용하여 터빈 로

터 디스크 키웨이의 결합검출을 위한 자동화 시스템 구축의 가능성을 확인하였다.

참고문헌

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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, July, 1973.
- [4] P. K. Nair, F. F. Lyle, Jr., J. E. Buckingham, 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] John R Lilley, "Stress Corrosion Crack Sizing in Steam Turbine Disks & Generator Retaining Rings", EPRI Turbine/Generator Workshop, July 20-23, 1993.
- [6] 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.

- [7] K. Date, H. Shimada and N. Ikenaga, "Crack height measurement - an evaluation of the accuracy of ultrasonic timing methods", NDT International. December pp. 315-319, 1982.
- [8] A. J. Hayman, "An Improved ultrasonic tip - corner timing method for sizing shallow surface-breaking cracks", British Journal of NDT, September pp. 295-299, 1985.
- [9] D. K. Mak, "Ultrasonic methods for measuring crack location, crack height and crack angle", Ultrasonics, September pp. 223-226, 1985.
- [10] 성원석, "초음파탐상개론", 건기원, pp. 11-49, pp. 101-127, 2001.
- [11] 송성진, "정량적 초음파 시험을 위한 결함분류와 크기산정의 새로운 기법", 한국산업안전학회지, 제12권, 제2호, pp. 3-16, 1997.
- [12] 이의중, 박익근, "최신 초음파탐상검사", 도서출판 골드, 1995.
- [13] J. Krautkramer and H. Krautkramer, "Ultrasonic Testing of Materials", 4th Edition, New York, Springer-Verlag, 1990.
- [14] V. G. Shcherbinski and V. E. Belyi, "New Information Index for the Nature of Flaws in Ultrasonic Inspection", Soviet Journal of Nondestructive Testing, Vol. 11, pp. 279-288, 1975.
- [15] G. J. Gruber, "Defect Identification and Sizing by the Ultrasonic Satellite-Pulse Technique", Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 1, pp. 263-273, 1980.
- [16] C. P. Chiou and L. W. Schmerr, "A Quasi-pulse-Echo Technique

for Ultrasonic Flaw Classification", Ultrasonics, Vol. 29, pp. 471-481, 1991.

- [17] Rafael C. Gonzalez and Richard E. Woods, "Digital Image Processing ", Green, pp. 531-571, 2004.

감사의 글

부경대학교에 입학한 98년도부터 현재 대학원 2년차까지 총 6년간의 학교생활을 하면서 많은 것을 배웠습니다. 특히, 저에게 석사과정은 정신적, 육체적으로 자신감과 인내심을 길러주었고, 학문적으로 자발적인 연구를 통한 학습으로 사회인으로 발돋움 하기위한 밑거름이 되었습니다. 석사과정동안 입원하는 일도 있었지만, 주위 분들의 도움으로 이렇게 논문을 낼 수 있게 되었고, 이 글을 빌어 감사의 말씀을 전하고자 합니다.

먼저 이 논문이 완성되기까지 부족한 저를 위해 학문적으로 아낌없는 충고와 지도를, 때론 제가 힘들어할 때 따뜻한 격려와 관심으로 석사과정을 무사히 이끌어주신 서원찬 교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 언제나 웃음으로 저에게 많은 조언을 주신 박홍일 교수님과 제 논문의 심사를 맡아주신 이병우 교수님, 김성규 교수님께 감사드리며, 수업과정을 통하여 많은 격려와 가르침을 주신 김우열 교수님, 조상명 교수님, 방국수 교수님, 이길근 교수님께 감사드립니다.

석사과정동안 학부생을 가르쳤던 시간, 수업시간에 발표를 위해 도서관을 들락날락했던 경험, 새벽동안 논문작업을 하며 같은 대학원선후배들과 고민했던 기억 등 바쁘게 하루하루를 지내오면서 매시간 최선을 다하며 함께 지내왔던 선후배들에게 고마움을 표시하고자 합니다. 저의 곁에서 논문 실험 및 작업에 도움을 준 실험실후배 박은대군과 영국이형 그리고 석사졸업동기인 고예환선배, 배종모선배, 박호일선배, 유광선선배, 김영주선배, 김인태선배 그 외 저와 실험실생활을 같이 했었던 영민이형, 두현이형, 성욱이형, 최창석군, 이선희군에게 감사의 마음을 전합니다.

마지막으로 힘겨운 2년동안 제가 곳곳하게 버틸 수 있도록 용기를 북돋

아 주시고, 밤늦게 들어와도 언제나 따뜻한 밥을 해주시며 저의 건강 때문에 노심초사 걱정해주신 아버지, 어머니 그리고 동생에게 이 논문을 바칩니다.