

工學碩士 學位論文

疲勞龜裂進展舉動에 따른 音響放出특성
및 劣化에 따른 超音波특성 평가

指導教授 南起祐

이 論文을 2002年 8月 20日에 提出함



2002年 8月

釜慶大學校 大學院

學研協同 機械工學科

朴小順

朴小順의 工學碩士 學位論文을 認准함

2002 年 6 月

主 審 工學博士 金 善 振



委 員 工學博士 金 永 守

(印)



委 員 工學博士 南 起 祐

(印)

목 차

Abstract	5
1. 연구배경	7
2. 오스테나이트계 스테인리스강	
2.1 오스테나이트계 스테인리스강의 종류 및 특성	8
2.2 오스테나이트계 스테인리스강 용접부의 특성	10
3. 탄성파에 의한 비파괴 검사법	
3.1 초음파탐상(UT)법	15
3.1.1 초음파의 정의 및 계측 방법	15
3.1.2 초음파 파라미터에 의한 물성 분석법	16
3.1.3 L _{CR} 파(표면파)에 의한 잔류응력 분석법	19
3.2 음향방출(AE)법	
3.2.1 음향방출의 특징 및 응용분야	22
3.2.2 음향방출의 정의 및 발생기구	23
3.2.3 음향방출 신호의 처리 및 분석법	24
3.3 탄성파의 신호처리 및 해석 알고리즘	26
4. 시험편 및 실험방법	
4.1 시험편	31
4.2 실험방법	
4.2.1 미세조직 관찰 및 경도 시험	33
4.2.2 피로시험 및 음향방출시험	33

4.2.3 초음파 시험	34
4.2.4 탄성파의 시간-주파수 분석	34
5. 시험 결과 및 고찰(I)	
5.1 미세 조직 관찰	36
5.2 경도 측정	37
5.3 피로 균열 진전 거동 특성	
5.3.1 피로균열의 발생과 진전	37
5.3.2 STS 316L 용접부의 피로균열 진전 거동 특성	39
5.3.3 STS 316L 용접부의 피로파면관찰	41
6. 시험 결과 및 고찰(II) : 비파괴(탄성파) 시험	43
6.1 펄스반사법에 의한 용접부의 초음파 속도 및 감쇠계수	44
6.2 펄스반사법에 의한 저면에코의 STFT 분석	46
6.3 초음파법에 의한 열화 평가	48
6.3.1 열화처리에 의한 조직 변화	49
6.3.2 초음파 파라미터 분석에 의한 열화 평가	57
6.4 L _{CR} (표면파)법에 의한 잔류응력 분석	64
6.5 Paris법칙의 재료상수와 초음파 파라미터와의 상관관계	66
6.6 피로균열진전 거동에 따른 음향 방출	68
7. 결론	75
참고문헌	77
Nomenclature	79
감사의 글	80

Fatigue Crack Propagation Behavior and Degradation Characteristic Evaluation by Ultrasonic and Acoustic Emission Method

So-Soon park

University-Research Interdisciplinary program of Mechanical
Engineering, Graduate School
Pukyong National University

Abstract

Austenite stainless steels had been used as the structural material for the energy environment facilities, because austenite stainless steels like STS316L have superior mechanical properties of which toughness, ductility, corrosion resistant and etc. However, those welded structures in-service are receiving severe damage due to increasing of the aged degradation by using at the environments such as Cl⁻ gas atmosphere, stress, and high temperature. And those damages cause a sudden break of structures in-service. Therefore, it is necessary to develop on-line monitoring system in order to prevent sudden accidents under in-service facilities. Most studies until now have been carried out against fatigue crack behaviors of weldments, but were not well studied on nondestructive evaluation method of ones.

In this study, the fatigue crack propagation behaviors and the AE (acoustic emission) characteristics were investigated for the weldments of STS316L steel used with vessels of the nuclear power plant. Also, the degradation characteristics of STS316L weldments were investigated by ultrasonic parameters such as ultrasonic velocity, attenuation factor and

frequency. And, the relationship between ultrasonic parameters and destructive parameters such as material constants of Paris' law was evaluated. And, the relationship among ultrasonic parameters, grain structure, standard distribution, grain anisotropy, ferrite contents and mechanical properties such as residual stress, hardness and etc. according to the degree of degradation were evaluated, too. The main results are given as follows:

- (1) The residual stress of weldments could be evaluated by ultrasonic parameters such as L_{CR} wave velocity and L_{CR} wave frequency, and the formula to express the residual stress was made by these investigated parts.
- (2) There was a proportional relationship between ultrasonic velocity (or frequency) and material constant, C of Paris' law. Also, there was a proportional relationship between ultrasonic attenuation factor and material constant, m of Paris' law. The results of these investigated parts could be found in proportion to each other.
- (3) Degradation characteristics could be evaluated by ultrasonic parameters. According to the increasing of grain sizes, standard distributions, residual stresses and ferrite contents, ultrasonic velocities and frequencies were decreased, while ultrasonic attenuation factors were increased.
- (4) AE method could be confirmed that utilize to detect the fatigue crack initiation and to predict the fatigue crack life.

The application of this study can be used as the basic data to develop "Nondestructive Long Distance On-Line Monitoring Systems" as well as to predict the fatigue crack life of welded structures according to the aged degradation and the damage without disjoining or stopping in-service.

1. 연구배경

오스테나이트계 스테인리스강은 인성, 연성, 내식성 등 우수한 기계적 성질을 가지므로 극저온에서 고온에 이르기까지 광범위한 온도 범위와 다양한 사용조건에서 폭넓게 사용되고 있다. 특히 에너지 환경설비용 구조재료로 304나 316등의 300계열의 오스테나이트 스테인리스강이 주로 사용되어 왔으나 300계열의 오스테나이트 스테인리스강은 염화물 분위기에서 피팅, 입계부식 및 응력부식에 취약한 문제점을 나타내는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁻⁴⁾ 이러한 내식성 향상을 위해 저탄소 오스테나이트계 스테인리스강이 개발되었고 316L, 316LN, 304L, 304LN 등을 들 수 있다. 그러나 이들 300계열의 오스테나이트강의 용접구조물에서는 용접부의 조성, 조직의 불균일 및 용접잔류응력 때문에 반복 응력 및 부식 환경 하에서 경년열화의 가속으로 인해 심각한 문제가 되고 있다. 특히 원자력 관계시설의 경우 시설의 취급물질 특성상 가동중의 갑작스런 파단은 대형인명사고를 유발하게 되므로 안전사고 발생 방지를 위해 균열 발생 감시시스템 및 잔여 수명 예측 시스템의 개발이 절실히 요구되고 있다. 그러나 지금까지는 주로 용접잔류응력, 용착부의 조성, 용접균열 및 용접부의 피로 거동에 관해서만 다루어져 왔고⁽⁵⁻¹⁰⁾, 비파괴적 평가에 의한 용접부의 피로거동에 관련된 연구는 아직 미미한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 비파괴적인 방법에 의해 가동중 원자력 관계시설 용접부의 경년열화에 따른 잔여수명을 예측하고 피로균열의 발생 및 균열진전거동을 감시하기 위한 능동적인 감시시스템개발의 기초적 자료를 마련하고자 한다. 그 일환으로 가동중인 시설의 가동중단이나 해체 없이도 열화도나 피로균열발생 및 균열진전거동의 감시가 가능한 초음파 탐상(Ultrasonic Test : UT)법과 음향방출(Acoustic Emission : AE)법을 도입하고 현재 원자력 관계 시설 등 환경 에너지 시설에 많이 사용되고 있는 STS 316L 및 그 용접부를 소재로 하여 피로균열 진전 특성 및 탄성파 특성을 연구하였다. 먼저 초음파 탐상법에 의해 모재부(base metal : BM) 열영향부(heat affected zone : HAZ), 용착부(weld metal : WM)의 종파속도,

감쇠계수 및 잔류응력분포 상태를 분석하였으며, 시간-주파수 분석을 행하여 중심주파수 분포를 분석하였다. 이들 각각의 초음파 파라미터와 각 부의 경도, 입도, 조직, 잔류응력, 피로수명 등과의 상관관계로부터 원자력 배관소재인 STS 316L 용접부의 기계적·금속조직학적 특성과 초음파 파라미터와의 상관 관계를 연구하고 균열생성 및 열화에 따른 손상 평가 기술 개발을 시도하였다. 또한 AE법으로는 피로균열의 발생 및 진전 거동에 따른 AE신호로부터 AE신호의 중심주파수분포, event수, 스펙트럼 에너지분포 등의 AE파라미터를 분석하고 이러한 AE거동 분석을 통해 원자력 배관시설의 가동 중 감시기술로써의 AE 기법 적용을 시도하였다. 그러나 AE법에 의해 검출된 음향방출신호에는 수많은 노이즈를 포함하고 있으며 균열진전에 따른 탄성파(진신호)의 방출위치 변화로 수신완료시의 진행 거리 차이에 의한 파의 감쇠 차 등, 분석상의 오차를 유발할 수 있어 정량적인 평가에는 한계가 있으며 이러한 문제 해결을 위해 먼저 raw signal의 denosing기법과 source location의 정확한 적용 기법 등의 개발이 우선되어야 할 것이나 아직까지는 기술상의 문제로 정량적 평가가 난이 하므로 AE법에 의한 피로균열거동의 감시의 적용가능성만을 검토하고자 한다.

2. 오스테나이트계 스테인리스강⁽¹⁻³⁾

2.1 오스테나이트계 스테인리스강의 종류 및 특성

FCC의 결정구조에 비자성체인 오스테나이트계 스테인리스강은 일반적으로 16~25wt%의 Cr 과 7~20wt%의 Ni을 함유한 Fe-Cr-Ni의 삼원계 합금으로서 내식성, 연성 및 내열성이 우수할 뿐만 아니라 용접성도 양호한 것으로 알려져 있다. 오스테나이트 조직 생성의 한계부근에서 가장 경제적인 조성은 18wt%Cr, 8wt%Ni의 조성을 가지는 18-8 스테인리스강이며 이로부터 개량된 각종 강이 개발되어 왔다. 다음은 오스테나이트계 스테인리스강을 분류하고 그 특성에 대하여 서술하였다.

일반적으로 오스테나이트계 스테인리스강은 마르텐사이트계 스테인리스강과 달리 급냉에 의해 경화되지 않지만 합금원소의 조성에 따라서는 변태가 일어나는 경우가 있다. 그 예로 STS 301은 상온에서의 오스테나이트 조직이 열역학적으로 불안정하기 때문에 냉간 가공을 받게 되면 마르텐사이트 조직으로 변태하게 되며 이러한 강을 준안정성(meta-stable) 오스테나이트계 스테인리스강이라 한다. 반면에 냉간 가공 전후에 조직의 변화를 나타내지 않는 강을 안정성(stable) 오스테나이트계 스테인리스강이라 하며 일반적으로 준안정성 오스테나이트계 스테인리스강이 안정성 오스테나이트계 스테인리스강에 비해 우수한 탄성응력, 항복응력, 연신 특성을 나타낸다. 또한 일반적으로 사용되는 오스테나이트계 스테인리스강은 일정량 이상의 C를 함유하고 있는데 상온에서의 C 고용도는 고온에서의 C 고용도 보다 낮아, 1100℃부근까지 가열한 후 서냉 처리 할 경우 온도 저하에 따른 C함량은 급격히 감소하며 냉각속도가 충분히 느린 경우에는 탄화물 $[(Cr,Fe)_{23}C_6]$ 이 오스테나이트 입계에 석출되고 입계부식을 용이하게 하여 강의 내식성을 감소시키는 요인이 되며 합금의 조성에 따라서 취성을 나타내는 σ -상이나 χ -상 등의 탄화물이 석출되어 상온에서 오스테나이트계 스테인리스강의 충격인성을 저하시키는 요인이 된다. 따라서 1100℃부근에서 급냉하는 고용체화처리(solution treatment)에 의해 균일한 오스테나이트 조직을 형성시켜 사용하며 이러한 강에 Ti이나 Nb을 첨가하여 Cr탄화물의 결정입계 석출을 방지한 강을 안정화된 오스테나이트계 스테인리스강이라 하고 STS 321, STS 347, STS 348을 예로 들 수 있다. 또한 C의 함량을 감소시켜 탄화물의 석출을 억제할 수 있는데 C함량을 0.03wt%이하로 낮춘 강을 저탄소 오스테나이트계 스테인리스강이라 하고 STS 304L, STS 316L을 예로 들 수 있다. 그러나 저탄소 오스테나이트계 스테인리스강의 경우, 항복응력이 낮아지는데 이를 보완하기 위하여 0.18wt%까지 N를 고용시켜 개선된 저탄소 오스테나이트계 스테인리스강이 개발되어 있으며 304LN, 316LN을 예로 들 수 있다. Fig. 2.1에 본 연구에 사용된 저탄소 오스테나이트계 스테인리스강의 Fe-Cr-Ni의 삼원계 상태도를 나타내었다.

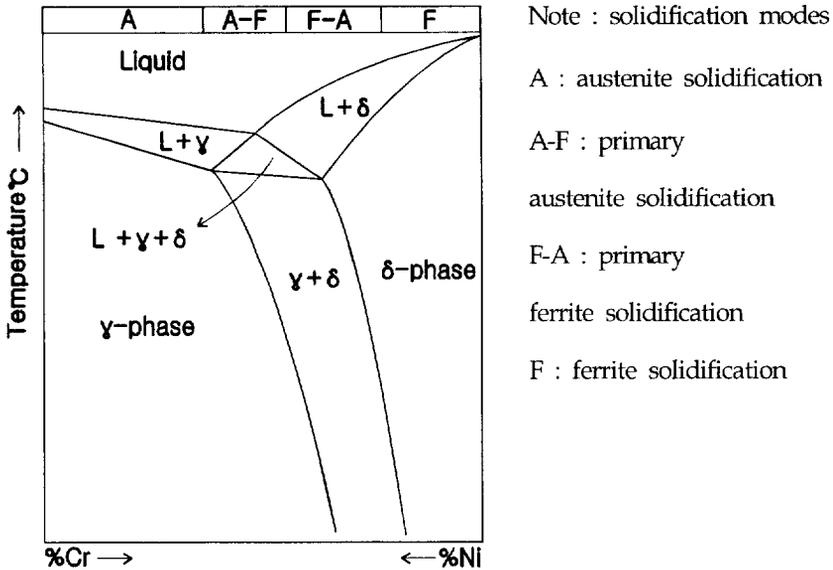


Fig. 2.1 Schematic pseudobinary phase diagram of low carbon austenitic stainless steels containing approximately 70% Fe

2.2 오스테나이트계 스테인리스강 및 용접부의 특성

오스테나이트계 스테인리스강은 일반적으로 1,050~1,150°C의 온도구간에서 용체화처리를 하여 Cr 탄화물과 같이 석출물을 형성하는 합금원소를 조직 내에 고용화 상태로 만든 다음, 상온으로 급랭하여 고온에서 형성된 상이 상온에서 그대로 유지되도록 한다. 이러한 처리를 거친 상온의 조직은 합금원소들 강 중에 강제적으로 고용시킨 상태이므로 금속학적으로는 비평형 상태이지만, 상온에서는 조직 내의 합금원소의 확산속도가 상당히 느리므로 그 상태를 그대로 유지한다. 그러나 이러한 조직이 고온의 열처리를 받게 되면 합금원소의 확산속도가 증가하여 탄화물이나 금속간 화합물과 같은 석출물을 형성하게 된다. 따라서 용접을 실시하는 경우, 강은 용접 열원으로부터 수직한 거리에 따라 다양한 온도기울기가 형성되고, 용접금속에서 주된 문제를 야기하는 HAZ의 범위는 용접변수, 모재의 두께, 냉각속도 등에 따라 달라지며 용접에 의해 야기되는 문제점으로 부식과 고온 균열을 들 수 있다⁽¹⁾. 오스테나이트계 스테인리스강 용접부의 Fe-Cr-Ni의 삼원계 상태도와 페라이트 함량을 분석하는

Delong diagram을 각각 Fig. 2.2 와 Fig. 2.3에 나타내었고 Fig. 2.4에 탄화물 석출과 입계부식에 대한 온도와 유지시간의 영향을 나타내었다.

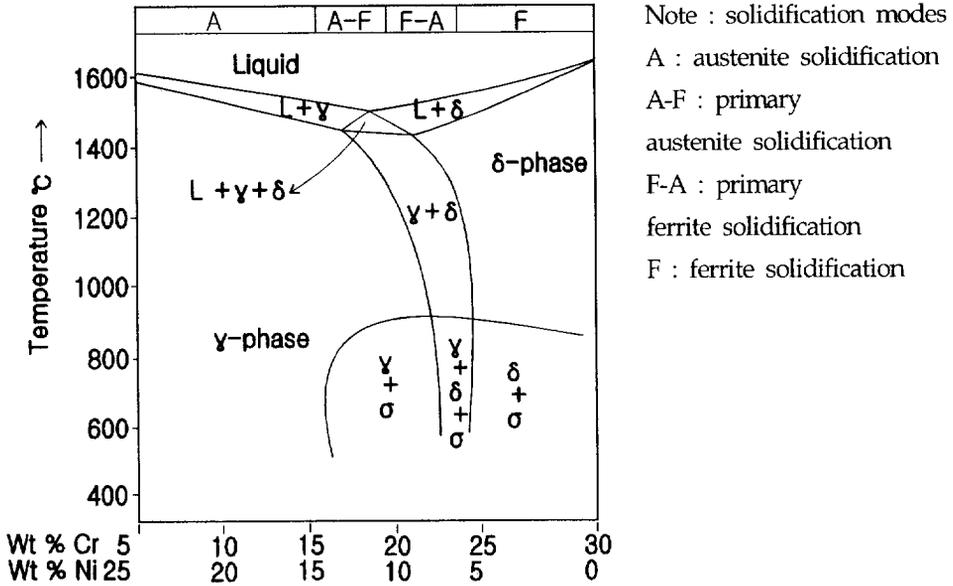


Fig. 2.2 Schematic pseudobinary phase diagram of austenitic stainless steels containing approximately 70% Fe

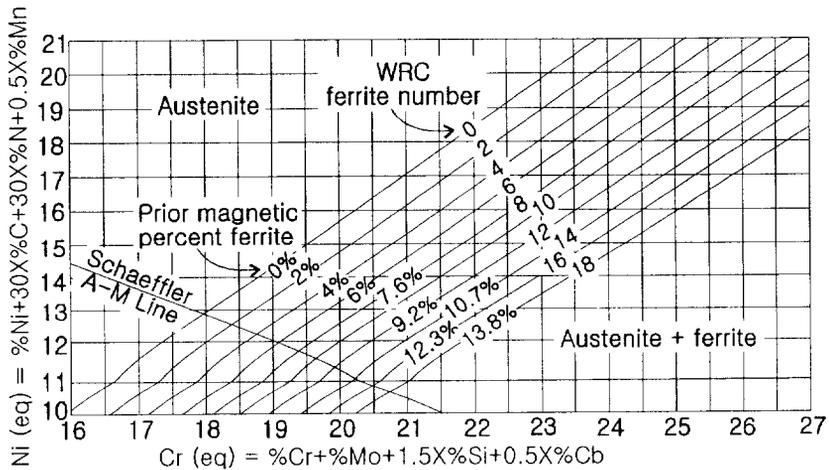


Fig. 2.3 Constution diagrams showing relationships between ferrite content and weld metal composition for stainless steels : Delong diagram
 © 1974 AWS

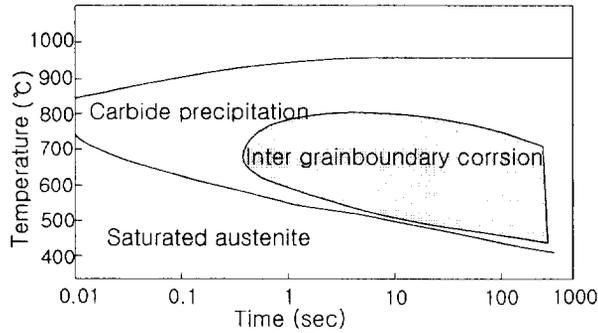


Fig. 2.4 Effect of time-temperature in the carbide precipitation and inter-grainboundary corrosion in STS316L

2.2.1 내식성

오스테나이트계 스테인리스강은 우수한 내식성을 갖는 재료로 널리 알려져 있다. 강이 내식성을 가지기 위해 필요한 합금성분 중의 Cr의 임계 요구량은 12%로 알려져 있으며, 그밖에도 Mo은 공식부식에 대한 저항성을 높이는 합금 원소이며 Ni은 응력부식 저항성을 높이는 역할을 한다.

2.2.2 탄화물의 석출

상온에서 오스테나이트계 스테인리스강 내의 C의 용해도는 0.006wt%이하로 대단히 낮으며, C는 Fe와 친화력이 강하므로 용해도 이상의 C는 Cr이나 Fe와 결합하여 결정입계에 $M_{23}C_6$ 형태의 탄화물을 석출하게 된다. 이러한 탄화물 내의 Cr함유량은 모재의 2~4배 이상이므로 그 주위에 Cr결핍층이 형성되고 내식성을 저하시켜 부식환경에 노출 시 입계부식의 원인이 된다. 스테인리스강 내의 탄화물의 형성은 온도와 시간, 합금원소의 영향을 받으며 온도가 높을수록 확산속도가 빨라지므로 탄화물의 형성속도가 빨라진다. 그러나 온도가 일정 값 이상으로 올라가는 경우에는 탄화물의 형성속도가 다시 감소하는데, 이는 온도가 올라갈수록 C의 고용도가 증가하기 때문이다. 온도 이외에도 여러 가지 합금원소의 영향으로, 높은 C함량은 석출속도를 증가시키며, Ni과 Si은 C의 활동도를 높여주어 석출속도를 더욱 증가시키는 반면 Ti나 Mo은 Cr보다 C와의 친화력이 더 강하므로, Cr탄화물의 생성을 억제시킬 수 있어 입계부식의 발생구간을 줄이는 역할을 한다.

2.2.3 금속간 화합물

σ -상은 Fe-Cr계 합금에서 나타나는 금속간 화합물의 일종으로 취성을 나타내며, 모상에 비해 많은 양의 Cr 및 Mo를 함유하므로 σ -상이 석출된 결정입계 주변에는 Cr 및 Mo 부족영역이 형성되고 내식성이 저하된다. 따라서 용접 후에 σ -상이 형성되면 용접부가 취성을 나타내며 사용 환경 하에서 입계부식을 발생시키므로 σ -상은 용접부 조직에서의 기계적 특성에 큰 악영향을 미친다. 시그마상의 형성을 피하는 가장 기본적이고도 확실한 방법은 σ -상이 형성되는 온도 영역을 피하거나, 시그마상의 석출이 발생하지 않도록 빠르게 냉각하는 것이다.

2.2.4 용접부의 부식성

오스테나이트계 스테인리스강의 부식에는 합금원소나 불순물원소의 결정입계 편석 즉 Cr탄화물의 결정입계 형성에 의한 입계부식, 낮은 열전도도 및 높은 열팽창계수에 기인하여 생성된 응력부식을 들 수 있다. 또한 오스테나이트계 스테인리스강의 용접과 관련된 부식은 모재와 용착금속간의 조직의 차이나 화학조성의 차이에 의한 갈바닉(galvanic)부식, 용접열에 기인한 Cr탄화물의 입계석출에 의한 입계부식, 그 외에 Ti 및 Nb를 첨가한 안정화된 오스테나이트계 스테인리스강에서 발생하는 나이프 라인 어택(knife line attack)이 있고 잔류응력에 기인한 응력부식을 들 수 있다. 오스테나이트계 스테인리스강은 열전도율이 낮고 열팽창계수가 높기 때문에 용접 후 용착금속에 높은 잔류응력이 형성된다. 이러한 용접잔류응력이 높은 부위가 Cl⁻이온 부식환경에 노출될 경우 응력부식이 일어나고 HAZ에 결정립을 가로지르는 형태의 균열이 발생한다. 오스테나이트계 스테인리스강에 대한 Cl⁻이온 부식환경, 용접잔류응력, 이러한 재료, 환경, 응력의 3가지 요인의 상호작용에 의해 발생한 균열을 응력부식균열(SCC)이라 한다.

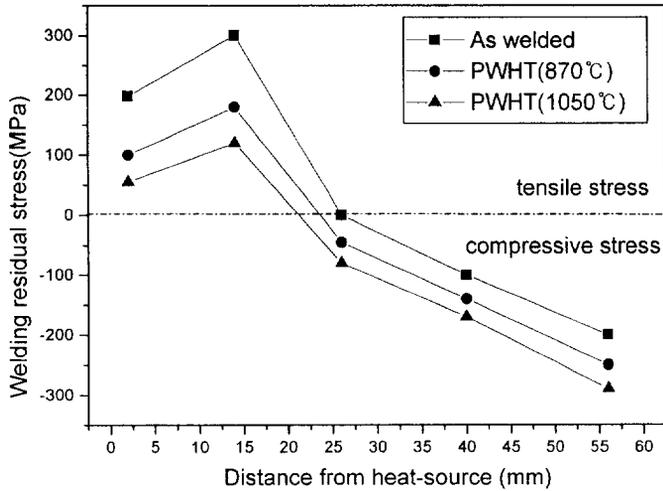


Fig. 2.5 Residual stress by welding process of austenitic stainless steel (PWHT : Post weld heat treatment)

2.2.5 용접부의 고온균열

오스테나이트계 스테인리스강의 용접부는, 오스테나이트상이 FCC구조를 가지므로 BCC구조인 페라이트계 스테인리스강보다 수소고용도가 높아 저온균열(수소취화균열)이 발생할 위험성은 거의 없다. 그러나 수지상 입계에 편석물을 쉽게 형성시키는 S, P, Si 등의 합금원소에 대한 고용도가 낮아 고온균열에 대한 저항성은 매우 낮다. 고온균열에는 용접금속의 응고 시 발생하는 응고 균열, HAZ에서 주로 발생하는 액화균열, 그리고 응고완료 후 연성이 저하된 부위에 발생하는 연성저하균열을 들 수 있다. 고온균열은 수지상의 입계에 형성되는 취약한 상이 용접 시에 발생하는 열응력, 수축응력, 구속응력 등의 용접 응력에 의해 결정입계를 따라서 발생하는 것으로 알려져 있다.

3. 탄성파에 의한 비파괴 검사법

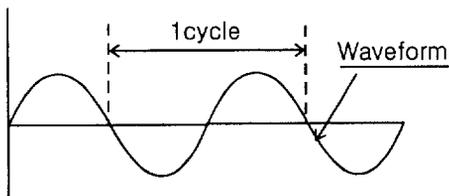
일반적으로 초음파신호와 음향방출 신호를 통칭하여 탄성파(elsatic wave)라 하며, 이러한 탄성파에 의한 비파괴 검사법은 인체에 무해하며 가동중 검사가 가능하다는 장점 등으로 인해 최근 산업분야에서 널리 응용되고 있다.

3.1 초음파 탐상법

초음파 탐상법은 표면 및 내부 불연속을 검출하기 위해서 고주파의 음파빔(초음파)을 재료내로 입사시켜 초음파와 물질간의 상호작용을 검출·분석하여 결함의 존재여부, 조직분포, 열화정도 등 재료의 물성을 평가하는 비파괴 시험법으로 펄스반사법, 투과법, 공진법으로 분류 된다.

3.1.1 초음파의 정의 및 계측 방법

초음파란 인간의 귀로 들을 수 있는 가청 주파수인 20Hz~20KHz 이상의 주파수를 갖는 음파를 말하며 초음파탐상에는 주로 주파수 0.5MHz~20MHz 영역의 초음파가 이용된다. Fig. 3.1은 음파의 파형과 주파수 결정방법을 나타내었다. 주파수(frequency : f)는 음파가 진행하는 매질에서 원자의 진동으로 1초당의 cycle수(Hz)로 표기한다. Fig. 3.2에 나타낸 초음파 계측 및 분석 시스템을 이용해 피검체 내부를 통과하여 송·수신된 초음파 신호로부터 신호처리 또는 실측계산에 의해 amplitude(진폭), velocity(속도), attenuation(감쇠), frequency(중심주파수) 등의 파라미터가 분석된다.



※ 1Hz= 1 cycle per sec

$$T = \frac{1}{f} \quad (T: \text{진동주기}, f: \text{주파수})$$

※ 진동 주기 : 1 cycle에 걸리는 시간

Fig. 3.1 Waveform and frequency

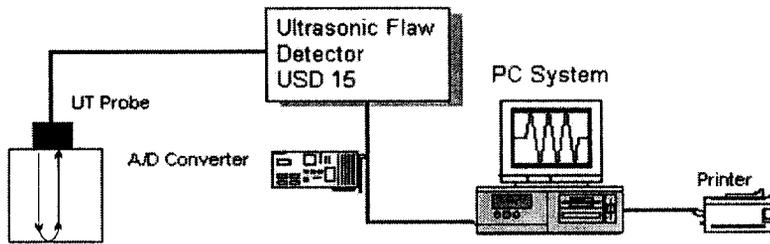


Fig. 3.2 Ultrasonic test and analysis system

3.1.2 초음파 파라미터에 의한 물성 분석법

초음파 탐상법은 공업적·학문적인 목적으로 다양하게 사용되고 있으며 초음파가 연구에 응용되는 전형적인 분야로 재료 물성 결정, 미세구조특성평가, 열화 평가, 결함의 탐상 등을 들 수 있다. Table 3.1은 초음파 분석법에 의한 재질특성의 분석 대상을 나타낸다. 이러한 재질특성의 분석은 속도, 감쇠, 후방산란, 임계각 반사, 주파수 분석, 노이즈, SNR(신호대잡음비) 등의 파라미터의 분석에 의해 가능하며 특히 속도, 감쇠계수 및 주파수 분포는 E(종탄성계수), G(전단계수), v (프와송비), ρ (밀도) 등과 같은 재료 물성의 계산 및 결함의 검출, 피로손상정도의 파악, 결정립 크기 결정 등 재료내부의 미시구조 상태 평가에 많이 사용되고 있다.

Table 3.1 Ultrasonic test methods for materials

1) 재료내부 및 표면에 존재하는 결함 검출 2) 두께 측정, 탄성률 측정, 3) 금속 조직 연구 4) 피검체의 제조 변수의 영향 평가 5) 기타 재료의 부식정도 측정 등 재료의 물리적 제특성 평가 및 연구		
방 법	내 용	대 상
속도 측정	음속 변화 측정	응력측정, 열화, 피로, 부식, 수소취화 등
감쇠 계수 측정	감쇠율 변화 측정	열화, 피로, 결정입도, 부식, 수소취화 등
주파수 분석법	주파수 분포의 변화	열화, 피로, 결정입도, 템프링 취화 등
L_{CR} 과 속도측정	표면파(L_{CR} 파)의 속도	잔류응력, 열화, 가동도 등
산란파 법	후방산란파의 진폭 특성	열화, 피로, 결정입도, 담금질깊이, 편석
L_{CR} 과 임계각법	표면파의 발생 임계각도	잔류응력, 피로, 냉간가공도 등
노이즈 분석법	후방산란파의 주파수 분석	열화, 피로 등

1) 초음파 속도 (V)

초음파의 속도는 재료의 물리적 특성과 파의 종류(또는 진동방식)에 따라 달라지며, 재료의 밀도, 프와송비 및 탄성계수에 따른 함수로 주어진다. 횡파는 탄성계수 및 밀도가 큰 고체 중에서만 전파되므로 액체·기체 중에서의 횡파속도는 구할 수 없다⁽²¹⁾. 보통 횡파는 종파의 50%, 표면파는 횡파의 90%의 속도를 가진다. 일반적인 초음파의 속도와 주파수와의 관계는 식(3-1)에 나타내었으며, 고체중의 종파속도는 식(3-2)에 나타내었다. 또한 표면파는 잔류 응력에 민감한 변화를 보이므로, 이를 이용하여 잔류 응력의 양을 6.4장의 식(3-9) 및 (3-10)에 의해 추정할 수 있다.⁽²⁵⁻²⁶⁾ 표면파의 속도(travel time) 식은 식(3-3)에 나타내었다.

$$V = \lambda \cdot f \quad (\lambda : \text{파장}, f : \text{주파수}) \quad (3-1)$$

$$V_{L(\text{고체중종파속도})} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (3-2)$$

K : 탄성계수, E : 종탄성계수, ρ : 밀도, ν : 프와송비

$$V_{LCR} = \frac{W}{T} [m/sec] \quad (3-3)$$

V_{LCR} : 표면파 속도, T : travel time, W : 표면파 진행거리(82mm)

2) 초음파의 감쇠(α)

초음파가 매질내를 진행하는 중에 감쇠되는 요인으로 산란, 흡수, 모드변환, 전이손실, 반사 및 분산(확산)등을 들 수 있다. 보통 초음파의 감쇠 정도는 감쇠계수(dB/mm)로 나타내며 이를 관계식으로 나타내면 식(3-4)와 같다.^(21, 23-24)

$$\alpha_{\text{Total}} \text{ (dB/mm)} = \alpha_{\text{absorption}} + \alpha_{\text{diffusion}} + \alpha_{\text{scattering}} \\ + \alpha_{\text{transmode}} + \alpha_{\text{reflection}} \quad (3-4)$$

식(3-4)에서 초음파의 감쇠에 비교적 큰 영향을 미치는 인자는 $\alpha_{\text{absorption}}$, $\alpha_{\text{diffusion}}$, $\alpha_{\text{scattering}}$ 으로 그외 인자는 일정조건에 의해 제거할 수 있다.^(21, 24) 또한 $\alpha_{\text{diffusion}}$ 은 DGS(distance gain size)선도로 부터 쉽게 구할 수 있으며, $\alpha_{\text{scattering}}$

은 초음파의 주파수, 산란, 결정립 직경과 조직분포의 함수로 식(3-5)와 같다. 감쇠 관계식은 Manson의 다결정체 금속내 결정입계에서의 산란에 의한 관계 식으로부터 식(3-6)과 같이 간단히 나타낼 수 있다^(21, 24). 그러나 본 실험에 사용된 초음파는 중심주파수 5MHz(2~8MHz대의 주파수)이므로 식(3-1) 및 4.4 항의 속도로부터 파장의 길이가 결정립 직경의 0.1배를 초과한다. 따라서 결정 입계의 산란에 의한 파의 감쇠는 매우 작아 무시할 수 있다.^(21, 23-24)

$$\alpha_{\text{산란}} = \alpha(f, D, \mu, GD, \frac{D}{\lambda}) \quad (3-5)$$

μ : 입자내 다른 구조, GD : 결정립분포

$$\alpha_{\text{산란}} = \frac{H}{3} D^3 \left(\frac{\pi}{\lambda}\right)^4 = \frac{H}{3} D^3 \left(\frac{\pi f}{V}\right)^4 \quad (3-6)$$

H : 금속산란인자, D : 결정립직경, f : 주파수, λ : 파장

이러한 상관관계로부터 감쇠계수는 식(3-7)에 의해 간단히 구할 수 있다

$$\alpha \text{ (dB/mm)} = \frac{20 \log\left(\frac{B_1}{B_2}\right) - \Delta da}{2T} - \alpha_{\text{scatter}} \quad (3-7)$$

Δda : 확산손실분, 2T : 빔의 총 진행거리

3) 시간-주파수(f) 분석

초음파는 매질에 따라 다른 속도 값을 가지며, 일정분포의 주파수를 매질 내로 진행시키더라도 다중 반사되어 수신되는 저면에코의 주파수 성분은 각각 다르게 된다. 이는 매질의 특성 즉, 결정조직이나 미소결합, 잔류 응력 등의 분포상태나 부식, 석출 등의 재질의 열화정도 등에 의존한다. 따라서 초음파 탐상시스템과 실시간 시간-주파수 분석 프로그램을 이용하여 피검체의 다중 저면 반사파의 주파수의 분포상태 및 각 주파수성분의 진폭스펙트럼(음압 또는 초음파 빔량)을 분석함으로써 피검체의 결정립조직, 잔류응력, 미소결합 등의 분포 상태 및 부식, 석출 등에 의한 열화도를 실시간적으로 평가할 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구에서는 최근에 신호해석의 방법으로 많이 사용되고 있는 time-frequency analysis의 한 방법 중, raw 시그널의 시간영역을 짧

게 나누어 하나의 블록을 만들고 각 블록을 푸리에 변환함으로써 수신신호를 시간함수에 대한 주파수, 진폭에너지, 스펙트럼 등의 정보로 분석하는 Short-Time Fourier Transform(STFT법) 을 사용하였다.

3.1.4 L_{CR} 파(표면파)에 의한 잔류응력 분석법

잔류응력은 외력이 작용하지 않는 상태에서 구조물에 존재하는 응력으로서 열처리 또는 용접 등 기계적인 가공 작업에 의하여 재료의 내부에 축적된 응력이며 불균일한 영구변형을 하는 부재에서 발생한다. 이러한 영구변형은 소성변형, 입자의 질화, 탄화, 상변화 등에 의한 금속격자의 국소 수축이나 팽창에 의해 발생한다. 일반적으로 인장 잔류응력은 피로나 응력 부식과 파괴에 대한 민감도를 상승시키므로 일반적으로 구조물 자체에 유해한 영향을 끼치는 반면 압축 잔류응력은 외부로부터 가해지는 응력을 감소시켜 주므로 유익하게 작용할 때가 많다. 또한 공학적인 구조물의 파괴에 가장 중요한 모드인 피로 파괴와 응력부식파괴는 표면에 민감한 현상이므로 표면 잔류응력이 적절하게 평가되어야 한다. 표면 잔류응력을 평가하는 방법 중 파괴하거나 해체하지 않고 현장에서 직접 잔류응력을 측정하고 평가하는 비파괴 평가법은 시간적, 경제적인 절감 효과를 획득할 수 있다. 이러한 비파괴 평가법 중 큰 설비와 안전성의 문제가 없으며 현장에서 직접 측정하기에 적당한 방법이 초음파법이다. 따라서 본 실험에서는 L_{CR} 파가 잔류응력에 민감함을 이용하여 초음파법에 의한 표면 잔류응력 분석을 시도하였다. 먼저 재료의 L_{CR} 파의 음향임피던스(acoustoelastic constants)를 결정하고 이로부터 잔류응력을 비례식으로부터 구할 수 있다.⁽²⁵⁻²⁶⁾ Fig. 3.3에 L_{CR} 파를 이용한 잔류응력 측정 개략도를 나타내었고 식(3-8)은 L_{CR} 파의 속도 관계식을, 식(3-9)은 동일 재료에 응력이 가해진 상태에서의 잔류응력 관계식⁽²⁵⁻²⁶⁾을 나타내었다. 식(3-9)로부터 용접에 의한 모재부와 용착부 간의 잔류응력차를 본 실험에 의하여 도출하고 식(3-11)에 나타내었다. 그러나 본 실험으로 도출된 식(3-11)은 본 실험에 사용된 소재 STS316L 용접부에 대해서는 비교적 정확하게 일치하지만 여타의 다른 소재에 대한 적용 가능성은 명확한 규명을 위해 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

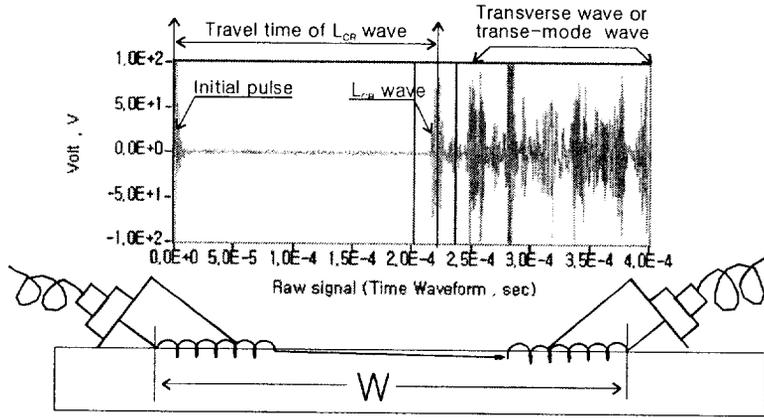


Fig. 3.3 Basic principle of LCR wave measurement

$$V_{LCR} = \frac{W}{T} \tag{3-8}$$

$$\Delta \sigma_r = \frac{\Delta T_{LCR}}{T_{0LCR}} \frac{E}{L}, \text{ (in the same materials) }^{(25-26)} \tag{3-9}$$

$L = \frac{\Delta V}{V}$ 를 대입하고 (3-9)를 travel time T에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$\Delta \sigma_r = - \frac{T_{1LCR}}{T_{0LCR}} E, \text{ (in the same materials) } \tag{3-10}$$

식(3-10)은 동일 재료에 대한 잔류응력차 $\Delta \sigma_r$ 의 관계식이므로 이종재료에 대한 음탄성변화를 반영하기 위해 $Z = \rho V$ 를 식(3-10)에 대입하여 정리하고 이종 재료간의 종탄성계수의 변화를 반영하면 다음과 같다.

$$T = \rho \frac{W}{Z}$$

$$\Delta \sigma_r = - \frac{T_{2LCR}}{T_{1LCR}} \frac{\Delta E^2}{E_1} = - \frac{\rho_2 Z_1}{\rho_1 Z_2} \frac{\Delta E^2}{E_1} = - \frac{\rho_2 \rho_1 V_{1LCR}}{\rho_1 \rho_2 V_{2LCR}} \frac{\Delta E^2}{E_1}$$

$$\therefore \Delta \sigma_r = - \frac{T_{2LCR}}{T_{1LCR}} \frac{\Delta E^2}{2E_1} = - \frac{V_{1LCR}}{V_{2LCR}} \frac{\Delta E^2}{E_1}, \text{ (in the different materials) } \tag{3-11}$$

따라서 식(3-11)을 이용하면 이종재료간의 밀도차에 상관없이 잔류응력차를 간

단히 구할 수 있다. 그러나 용착부의 경우 용접중심으로부터의 거리에 따라 잔류응력이 변하며 그 변화 범위는 용접조건 및 재료 특성에 따라 다르다. 그러나 오스테나이트계 스테인리스강 용접부의 통상적인 열원으로부터의 거리에 따른 용접잔류응력 변화량은 Fig. 2.5에 나타난 바와 같으며 최고 300MPa~ -250MPa 로 용착부와 열영향부의 경계부근에는 최대 인장잔류응력이, 모재부에는 압축잔류응력이 존재한다⁽¹⁾. 따라서 용접잔류응력 $\Delta\sigma_r$, 분포는 대략 0MPa~600MPa로 추정할 수 있다.

$V_{L_{CR}}$: LCR과 속도 [m/s],

T : travel time [sec]

W : 표면과 진행거리(82mm로 고정) [mm]

$\Delta\sigma_r$: LCR과의 속도 변화량에 따른 잔류응력 변화량 [MPa]

$\Delta T_{L_{CR}}$: 가해진 응력에 의한 travel time 변화량 [sec]

$T_{0L_{CR}}$: 응력을 받기 전 초기의 travel time [sec]

E : 종탄성계수 [kgf/mm², MPa],

Z : 음향임피던스 [kg/(m²sec)]

L : 음향탄성계수($\Delta V/V_0$ unit [무단위])

ΔE : 가해진 응력에 의한 E 변화량 [kgf/mm², MPa]

ΔZ : 가해진 응력에 의한 Z 변화량[kg/(m² · sec)]

3.2 음향방출(Acoustic Emission, AE) 법

음향방출 신호는 고체 내의 전위의 이동이나 미소 균열의 생성과 성장 등이 대표적인 발생원으로 알려져 있다. 또한 음향방출 신호의 형태는 재료의 특성에 따라서 크게 달라질 수 있으며 초음파와 함께 최근 가동 중 시설의 비파괴 검사법으로 대두되고 있다. AE의 응용분야는 고압용기, 배관 등의 온라인 모니터링 뿐만 아니라 용접, 응력 부식균열 발생 및 재료특성평가에 널리 이용되고 있다. ⁽¹⁵⁻¹⁹⁾

3.2.1 음향방출의 특징 및 응용분야

(1) 장점

동적 비파괴 검사법이다.

결함탐지 감도가 매우 높다

대상체의 구조나 결함의 크기, 방향 등에 구애받지 않는다.

다른 비파괴 검사법과는 달리 접근이 제한된 부위의 진단이 가능하다.

온-라인 실시간 검사가 가능하다.

재료의 미세 거동 및 재료시험과 병행이 가능하다.

(2) 단점

검사체에 응력이 작용하는 동안에만 적용이 가능하다(정적 불연속에서는 AE신호가 발생하지 않는다.)

신호대 잡음비 (SNR) 개선이 다소 곤란하다.

주변잡음(noise)의 효과적인 제어가 필요하다.

시험자의 경험과 판단이 분석결과를 좌우하므로 광범위한 전문적 지식이 요구된다.

(3) AE의 응용분야

재료과학적인 연구-재료의 기계적 특성 검사 및 규명

예방안전검사(Proof-Test)-최대하중 또는 파괴압력예측

가동중 검사(In-service inspection, ISI)

사용전 검사(Pre-service inspection, PSI)

실시간 감시(On-line Monitoring)
 생산공정 감시-공구파손, 마모 등
 누설탐지 및 위치표정
 지질학적 응용-지진 진원지 예측 등

3.2.2 음향방출의 정의 및 발생기구(source mechanism)

음향방출(acoustic emission)은 재료에 가해진 응력이나 충격 등에 외력에 의해 재료내부에서 국부적으로 형성된 변형에너지는 1) slip형성, 격자 이동 등의 소성변형에너지 2) 소량의 열에너지 3) 균열진전에 따른 파면형성에너지 등으로 해소되고 그 잉여 에너지가 탄성파의 형태로 방출되는 현상으로 정의된다. 이때 방출된 탄성파를 음향방출신호(AE signal), 음향방출신호를 검출하는 수단 및 해석법을 음향방출법(AE method)이라 한다. 피검체로부터 방출된 AE신호는 피검체 표면에서 압전 센서를 이용하여 전기적 신호로 변환한 후 처리하게 되며 음향방출 신호의 형태는 재료의 특성에 따라서 크게 달라질 수 있다. 최근 초음파와 함께 가동 중 시설의 비파괴 검사법으로 대두되고 있다.

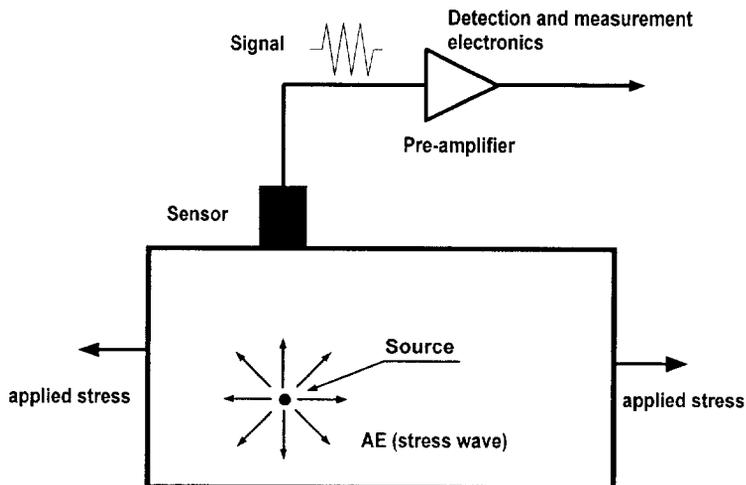


Fig. 3.4 Basic principle of Acoustic Emission

(1) 거시적관점에서의 AE 발생기구

재료의 소성변형

파괴 및 균열진전 (연성/전성파괴, 취성파괴, 크리프 등) ,

복합재료(기지재균열, 섬유파단(breakage) 및 분리(debond), 층간분리(delamination), 피로(fatigue) 화학반응(부식, 응력부식균열 SCC/산화/도금 등)

(2) 미시적관점에서의 AE 발생기구

전위이동-쌍정(twinning), 슬립(slip)

미세균열-결정입계의 이동/ 개재물과 모재의 파단 및 분리

상변태-마르텐사이트 변태/ 용해/ 응고/소결(sintering)/경화(curing)

(3) 유사발생원

누설(leakage)

공동현상(cavitation)

입자충격(particle impact)

마찰 및 마모(friction & wear)

3.2.3 음향방출신호의 처리 및 분석법

실제 AE신호의 분석에 있어서 파괴형태에 따라서는 파괴시 발생하는 음향방출 횟수가 너무 많아 전체 파형을 기록하여 분석하기에는 많은 어려움이 따른다. 따라서, 음향방출의 신호처리 및 분석은 매개변수(parameter)들을 추출하여 시험데이터를 분석하는 것이 일반적이며, 다음과 같은 여러 방법을 이용하여 분석한다.⁽¹²⁻¹³⁾

(1) 파형분석법(parameter analysis)

AE신호의 파형이 어떻게 생겼는가 비교하는 방법으로서 rising time (R_T , 상승 시간), duration time (D_T , 유지시간), rising slope (신호의 상승율) 및 frequency spectrum(주파수 분포) 등의 파라미터를 이용하며 이러한 파라미터는 파원의 발생 기구와 밀접한 관계가 있다.

(2) 음향방출 활성도 분석법(activity analysis)

AE신호의 event 수, count 수, 최대진폭(maximum amplitude) 및 energy 등의 변수를 이용하며 음향방출원의 크기 및 개수와 밀접한 관계가 있다.

(3) Pattern 인식법

특별한 손상기구에서의 AE신호의 특징을 선택하여 신호를 분류함으로써 신호 발생원에서의 손상기구를 규명하는데 이용하고 있다.

AE신호의 대표적 파형 및 AE신호의 분석 파라미터를 각각 Fig. 3.5, Fig. 3.6에 나타내었다. AE 신호 분석의 파라미터에는 사상(event), 카운터(count), 에너지(energy), 증폭(voltage 또는 amplitude), 지속(duration), 상승시간(rising time), 쇠퇴시간(decay time) 등이 있다. Table 3.2는 음향방출 신호의 진폭에 영향을 미치는 재료의 특성 또는 현상의 종류를 나타내었다.

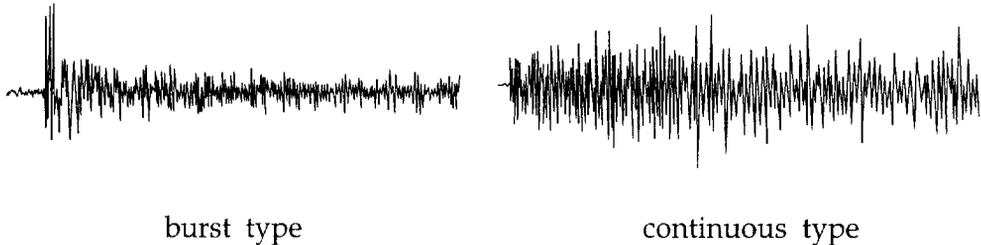


Fig. 3.5 Type of acoustic emission signal

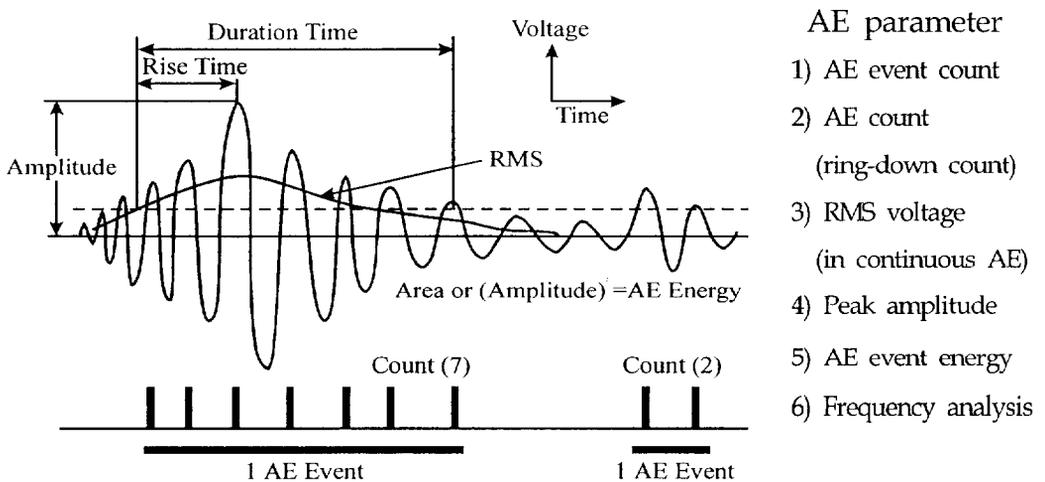


Fig. 3.6 Parameters of acoustic emission signal.

Table 3.2 Factors affecting the relative amplitude of acoustic emission response

Factor increasing acoustic emission response amplitude	Factor decreasing acoustic emission response amplitude
High Strength	Low Strength
High strain rate	Low strain rate
Low temperature	High temperature
Anisotropy	Isotropy
Inhomogeneity	Homogeneity
Thick sections	Thin sections
Brittle failure (cleavage)	Ductile failure (shear)
Material containing discontinuities	Material without discontinuities
Martensitic phase transformation	Diffusion without transformation
Crack propagation	Plastic deformation
Cast materials	Wrought materials
Large grain size	Small grain size
Mechanically induced twinning	Thermally induced twinning

3.3 탄성파의 신호처리 및 해석 알고리즘

3.3.1 Fast Time Fourier analysis(FFT분석)

탄성파 신호는 수학적 표현에 의해 시간에 따른 진폭으로 나타내는 시간-진폭의 함수와 주파수 진폭 변화를 나타내는 주파수-진폭의 함수로 표현 할 수 있다. 이 때 임의의 탄성파 신호로부터 정보를 얻기 위한 여러 가지 수학적 변환이 이용되며 그 중 FFT 분석법은 프랑스의 수학자 Joseph Fourier에 의해 소개된 푸리에 변환(Fourier Transform)을 이용한 분석법이다.

시간함수 $f(t)$ 에 대한 푸리에 변환은 다음 식과 같이 표현된다.

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (3-11)$$

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (3-12)$$

$F(\omega)$ 를 $f(t)$ 의 푸리에 변환이라고 하며, 전체 시간 영역에 대한 신호의 주파수 성분을 표현할 수 있다. 즉 전 시간영역에서 신호를 푸리에 변환에 의해 주파수-진폭의 관계를 나타내는 분석화면을 얻을 수 있고 이로부터 주파수 성분을 분석한다. 그러나 푸리에 변환법은 전 시간 영역에 대한 신호의 주파수-진폭을 표현하므로 분석된 신호의 주파수 성분의 수신 시간대에 대한 정보를

상실하게 되며 각각의 시간 성분에 따른 주파수 성분의 분석이 불가능하다. 따라서 신호가 시간에 따라 주파수 성분이 변하지 않는 정상신호(stationary signal)일 경우에는 문제가 되지 않지만 시간변화에 따라 주파수 성분이 변화하는 비정상신호(non-stationary signal)의 분석에 있어서는 시간경과에 따른 주파수 성분의 변화를 분석할 수 없다는 단점이 있다.

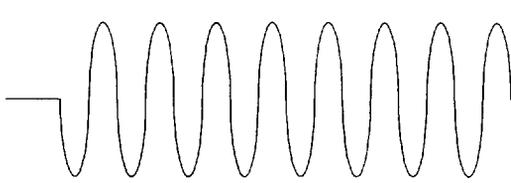


Fig. 3.7(a) stationary signal

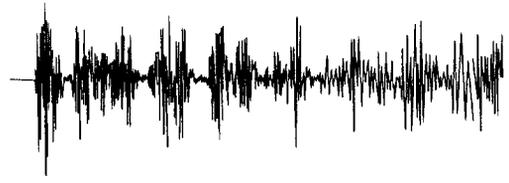


Fig. 3.7(b) non-stationary signal

3.3.2 Time-Frequency Analysis(시간-주파수분석)

지금까지 신호의 주파수 성질을 연구하는 가장 일반적인 방법이었던 푸리에 변환은 비정상신호(non-stationary signal)를 정확히 표현할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 따라서, 이러한 단점을 보완한 새로운 신호 해석법인 시간-주파수 해석법들이 개발되었다. 시간과 주파수의 2차원 평면상에 신호의 수신시간에 따른 주파수 변화를 표현하는 시간-주파수 해석법의 특징은 첫째, 정상신호(stationary signal)뿐만 아니라 비정상신호(non-stationary signal)를 푸리에 변환에 비하여 상세하게 분석할 수 있다. 즉, 시간 변화에 따른 주파수 변화를 시간-주파수 평면상에 정확히 표현할 수 있다는 것이다. 둘째, 일반적으로 노이즈는 시간과 주파수 영역에서 퍼지는 특징이 있으며, 신호는 짧은 시간 영역 또는 좁은 주파수 대역에 집중하는 성질을 가진다. 따라서, 노이즈가 포함된 신호를 분석할 경우 시간-주파수 평면상에서 노이즈와 신호의 구별이 쉽고, 노이즈 제거가 쉽다는 장점이 있다. 이와 같이 시간-주파수 해석법은 반세기 이전부터 개발되기 시작하였으며, 시간 영역을 짧게 나누어 하나의 블록을 만들고 각각의 블록에 대해 푸리에 변환을 하는 Short Time Fourier Transform (STFT)로부터 시작하여, Dennis Gabor에 의해 expansion과 series의 개념을 이용한 Gabor expansion, Eugene P. Wigner의 상관함수를 이용한 Wigner-Vill

distribution(WVD), Kernel 함수를 이용한 Choi-Williams distribution (CWD)과 1980년대 말 이론이 정립된 wavelet transform등 여러 가지 시간-주파수 해석법이 사용되고 있다. 최근에는 하드웨어의 급속한 발달에 따른 빠른 연산처리가 가능하게 됨으로서 실시간적인 분석이 가능하게 되었다. 이러한 시간-주파수 해석법들은 크게 선형계열과 비선형 계열로 구별할 수 있고 비선형 알고리즘(nonlinear algorithm)을 가지는 Wigner-Ville distribution과 Choi-Williams distribution 등은 시간과 주파수 영역에서의 분해능이 아주 높다는 장점을 가지는 반면, 간섭 현상에 의한 간섭항(cross-term)이 발생하는 단점을 가지고 있다. 반면, 선형 알고리즘(linear algorithm)을 가지는 Short Time Fourier Transform과 Gabor expansion 등은 간섭 현상을 일으키지는 않지만, 분해능이 다소 떨어지는 단점을 가지고 있다.

3.3.3 Short Time Fourier analysis (STFT분석)

Short Time Fourier Transform(STFT)은 푸리에 변환(FFT)이 시간 변화에 대한 주파수 표현을 하지 못하는 단점을 보완하여, 전체 시간영역을 짧은 시간 단위로 신호를 분리하고 푸리에 변환하는 시간-주파수분석(time-frequency analysis)의 한 방법이다. 즉, 시간과 주파수 영역에서 동시에 존재하는 창 함수(window function)를 이용하여 각 시간에서의 주파수를 구하는 방법으로 식(3-13)과 같이 표현된다.

$$STFT(t, \omega) = \int s(\tau) \gamma_{t, \omega}^*(\tau) d\tau = \int s(\tau) \gamma^*(\tau - t) e^{-j\omega\tau} d\tau \dots\dots\dots (3-13)$$

$$SP(t, \omega) = |STFT(t, \omega)|^2 \dots\dots\dots (3-14)$$

식(3-13)은 일반적인 내적(inner product)을 이용한 표현으로서, signal $s(t)$ 와 elementary function $\gamma(\tau - t)e^{j\omega\tau}$ 사이의 상관성을 나타내며, 이로부터 자기 상관, 상호상관, 등에 의한 위상식으로부터 위상속도 군속도 등을 분석할 수 있다. 식(3-14)는 STFT spectrogram으로서 시간-주파수 평면상에 주파수 성분의 에너지 분포를 나타내는 것으로서 STFT의 자승으로 표현된다. 창 함수 $\gamma(t)$ 는 Fig. 3.8에서와 같이 시간 함수 $s(t)$ 에 대해서 전시간에 걸쳐 이동하

면서 각 시간에 대한 푸리에 변환을 행하여 시간-주파수 평면상에 표현하는 방법이다. 그러나, 창 함수의 크기에 따라 시간 또는 주파수 분해능이 달라지게 되므로, 시간 영역의 분해능을 높이기 위해서는 주파수 분해능이 떨어지게 되고, 주파수 분해능을 높이기 위해서는 시간 영역의 분해능이 떨어지는 창 효과(window effect)가 발생하는 단점이 있다. Fig. 3.9(a)는 비정상신호의 Short Time Fourier Transform 분석 결과를 나타내며, Fig. 3.9의 (b) 및 (c)는 Short Time Fourier Transform의 창 효과를 나타내고 있다^(22, 24~26). Fig. 3.10은 STFT분석의 3차원 분석결과를 나타낸다.

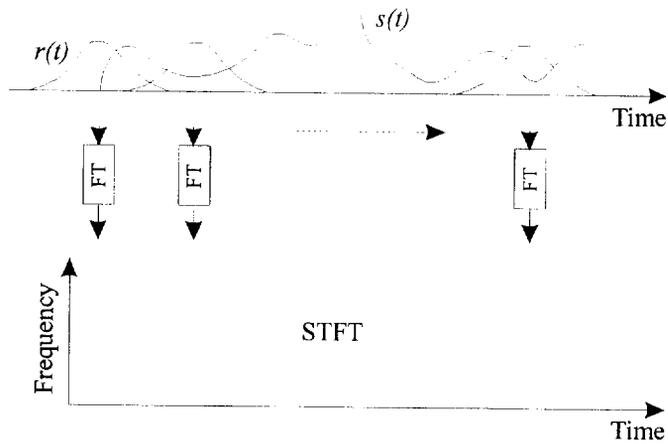
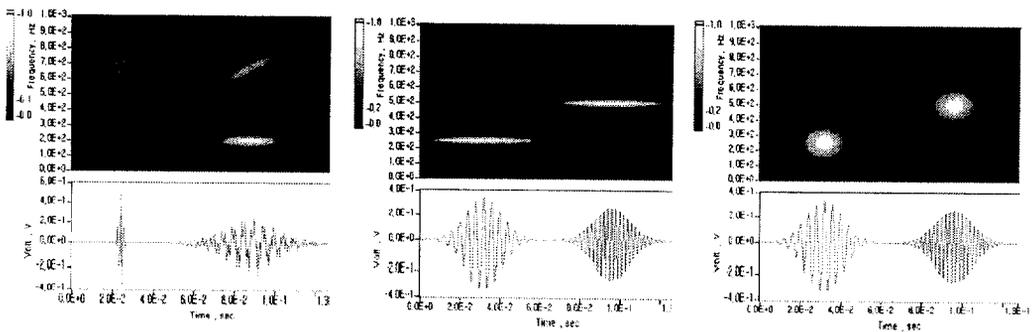


Fig. 3.8 Short Time Fourier Transform



(a) Short Time Fourier Transform in 2D (b) High resolution in time domain (c) High resolution in frequency domain

Fig. 3.9 Short Time Fourier Transform in 2D representation and Window effect

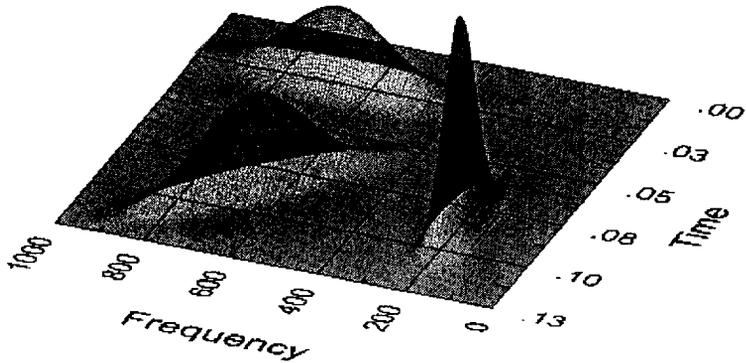


Fig. 3.10 Short Time Fourier Transform in 3D representation

3.3.4 시간-주파수 영역에서 신호처리를 통한 탄성과 파라미터의 해석 알고리즘

시간-주파수 영역에서 신호처리 기술을 이용한 다양한 탄성과 파라미터(속도, 감쇠계수, 균속도, 위상속도등)를 계측하기 위한 해석 알고리즘 중 자주 사용되는 방법으로 다음의 방법이 있으며 아래의 방법 모두는 매질과 매질의 계면에서 반사된 펄스를 수신하는 방법에 기초한 펄스 반사법에 의한 해석 알고리즘에 속한다.

- 1) Pulse Overlap Method (펄스 겹침법)
- 2) Cross-Correlation Method (상호상관법)
- 3) Fourier 변환법 (위상기울기법, Fourier 스펙트럼법)
- 4) Hilbert 변환법
- 5) Wavelet 변환법

Pulse Overlap Method(펄스겹침법), Cross-Correlation Method(상호상관법), Fourier 변환법에 의한 위상 기울기법, Hilbert변환법에 의해 연속된 두 에코 사이의 시간지연(τ)값을 계측함으로써 초음파의 속도를 결정할 수 있다. 또한 Fourier 변환을 이용한 스펙트럼법과 Wavelet 변환법에 의해 광대역 탐촉자에 수신된 탄성파로부터 각각의 주파수에 따른 위상속도, 균속도, 감쇠계수를 측정할 수 있다. 이들 계측치로부터 재료내부에 존재하는 산란체로 인한 속도와 감쇠계수의 분산성을 관찰할 수 있다.

4. 시험편 및 실험방법

4.1 시험편

본 연구에 사용한 재료는 오스테나이트계 스테인리스강인 STS 316L로 인성, 연성, 내식성 등 우수한 기계적 성질을 가지므로 극저온에서 고온에 이르기까지 광범위한 온도 범위와 다양한 사용조건에서 폭넓게 사용되고 있다. 특히 원자력 배관, 화학플랜트 등의 에너지 환경설비용 구조재료에 많이 사용되고 있다. 용접부의 특성을 평가하기 위한 시험편은 U-그루부가 가공된 모재에 스테인리스강용 용접봉을 사용하여 GMAW 용접 후 공냉하였다. 재료의 화학 조성, 기계적 성질 및 용접조건을 Table 4.1, Table 4.2 및 Table 4.3에 나타내었다. 피로균열 전파거동 및 균열 진전 중에 발생하는 음향방출특성을 평가하기 위한 ASTM E-399-78에 따른 CT시험편의 형상 및 치수를 Fig. 4.1에, 시험편의 채취 방향 및 위치를 Fig. 4.2에 나타내었다. 초음파의 종파속도, 감쇠계수, 주파수분석, 표면파에 의한 잔류응력 평가에 사용된 시험편의 형상을 Fig. 4.3에 나타내었다. 열화평가를 위한 시험편은 Fig. 4.3과 동일하게 제작한 후 각각 15mm×70mm로 절단하여 Table 4.4의 조건에 의하여 열처리를 하였다.

Table 4.1 Chemical compositions of test material

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0.020	0.61	0.67	0.023	0.002	17.31	12.00	2.14

Table 4.2 Mechanical properties of STS 316L

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	HRB
267.0	585.3	60.1	309.8

Table 4.3 Welding condition of STS 316L (GMAW)

Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (mm/min)	Heat input (KJ/cm)
270	17	280	9.107

Table 4.4 Heat treatment condition

Treatment condition	Before degradation	Degradation temperature (°C)									Air cooling
		475°C			700°C			1000°C			
Specimen No.	CT4	CT1	CT2	CT3	CT5	CT6	CT7	CT8	CT10	CT9	
Degradation time (hr)	0	24	48	72	24	48	72	4	8	24	

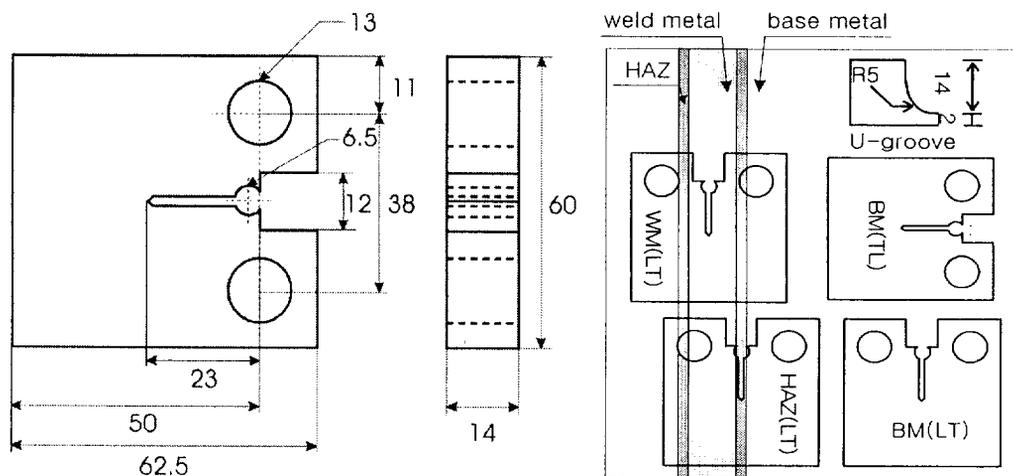


Fig. 4.1 Dimensions of CT specimen [mm] Fig. 4.2 Specimen location in plate

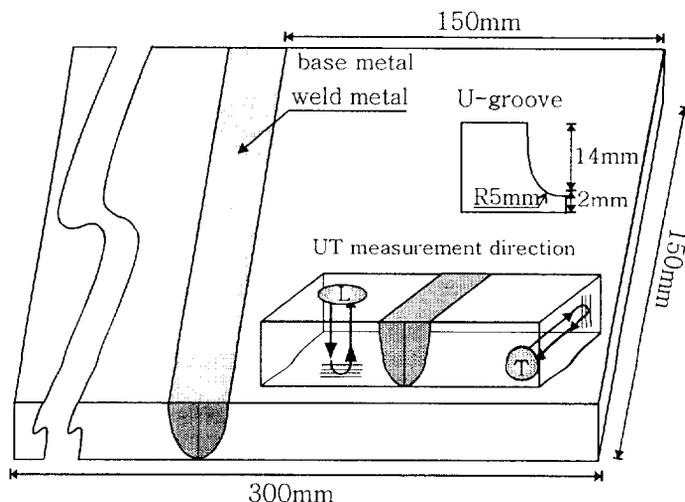


Fig. 4.3 Dimension of UT-specimen

4.2 실험방법

4.2.1 미세 조직 관찰 및 경도시험

모재부(BM), 열영향부(HAZ) 및 용착부(WM)의 경도값은 전해에칭법으로 표면을 에칭시켜 육안으로도 모재부와 용착부의 경계선의 구분이 가능한 상태로 준비한 후 광학현미경으로 조직을 관찰하고 비커스 경도시험기를 사용하여 경도를 계측하였다.

4.2.2 피로시험 및 음향방출 시험

피로균열진전 특성을 평가하기 위한 피로시험은 최대 용량 10톤의 만능피로시험기(Model : EHF-ED10, Shimadzu)를 사용하여 실온·대기중에서 정현파로 하중반복수 10Hz, 응력비 $R=0.1$ 에서 실시하였다. 모든 시험편은 하중 $P_{max}=14kN$ 에서 예비균열을 2mm 삽입한 후, 본 실험에서 $P_{max}=14.5kN$ 의 일정하중으로 실시하였으며 균열길이는 clip gage를 이용하여 측정하였다. 피로 시험 중에 발생하는 음향방출신호의 검출을 위해 PAC사의 1200A와 광대역 센서(주파수 범위 ; 100~1000kHz)를 사용하였다. 또한 노이즈를 줄이기 위하여 1차 적으로 analog filtering을 하고 CRT 화면상의 육안 검출이 가능하도록 40dB 전치증폭기를 거쳐 신호를 검출하였다. 피로시험동안 각 균열 진전량 5mm마다 event 수 3000개까지 계측하고 계측된 각각의 탄성파는 Gage社의 CS215 고속 A/D 변환기를 이용하여 디지털화시켰다. 디지털화된 탄성파는 다시 주파수-스펙트럼 분석 프로그램(FFT분석)으로 진신호와 노이즈를 일차 분별한 후, 진신호만을 선별하여 STFT법 및 Garbor 변환에 의해 분석하였다. 음향방출 분석 시스템의 개략도를 Fig. 4.4에 나타내었다.

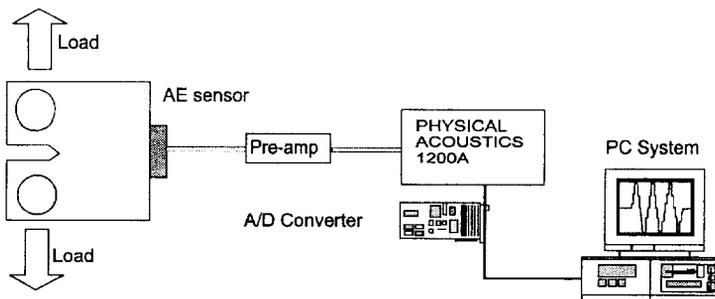


Fig. 4.4 Measurement system of acoustic emission

4.2.3 초음파 시험

초음파 신호의 검출과 분석은 Panametrics사의 USD-15 초음파 탐상기와 $\phi 0.25"$, 중심주파수 5MHz인 수직용 협대역 및 광대역 탐촉자를 사용하였다. 모재부, HAZ 및 용착부의 다중 저면 에코를 검출하여 펄스반사법에 의해 속도 및 감쇠계수를 계측(pulse overlap method 중 peak crossing method 사용)하고, 시간-주파수분석법(STFT)에 의하여 중심주파수를 분석하였다. 또한 표면파의 속도는 탐촉자간거리(W)를 82mm로 한 2탐촉자법으로, 모재부 및 용착부로 초음파를 진행시켜 송수신에 소요된 시간을 계측한 후 식(3-8)에 의하여 구하였다. 또한 각 data는 오차를 줄이기 위하여 각각 20회를 실시하여 대표값으로 구하였다. Fig. 4.5에 펄스반사법에 의한 초음파 탐상 및 STFT분석을 위한 초음파 계측 시스템을 나타내었다.

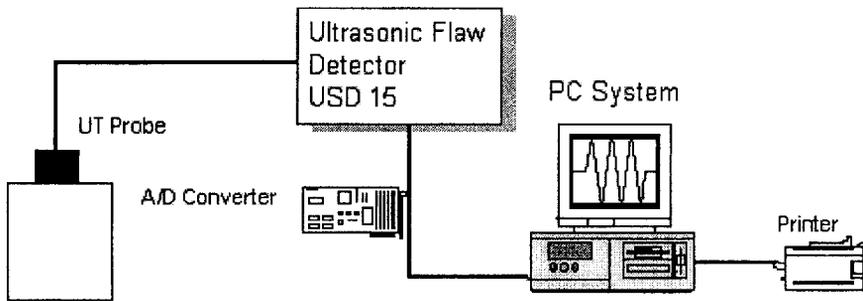


Fig. 4.5 Measurement system of ultrasonic examination

4.2.4 탄성파의 시간-주파수 분석

Fig. 4.6은 본 실험에 사용된 시간-주파수 해석 프로그램으로서 좌측 상단의 창은 raw signal의 수신 시각에 대한 주파수분포 분석 결과를 나타내며, 우측 상단은 FFT 분석결과를 나타낸다. 그리고, 하단의 큰 창은 수신된 신호의 파형을 나타낸다. 우측 하단은 시간-주파수 분석에 사용된 신호처리를 위한 함수변환방법을 나타낸다. 본 연구에서는 시간-주파수(STFT)분석법에 의하여 초음파 및 음향 방출 신호를 처리하고 분석하였다.

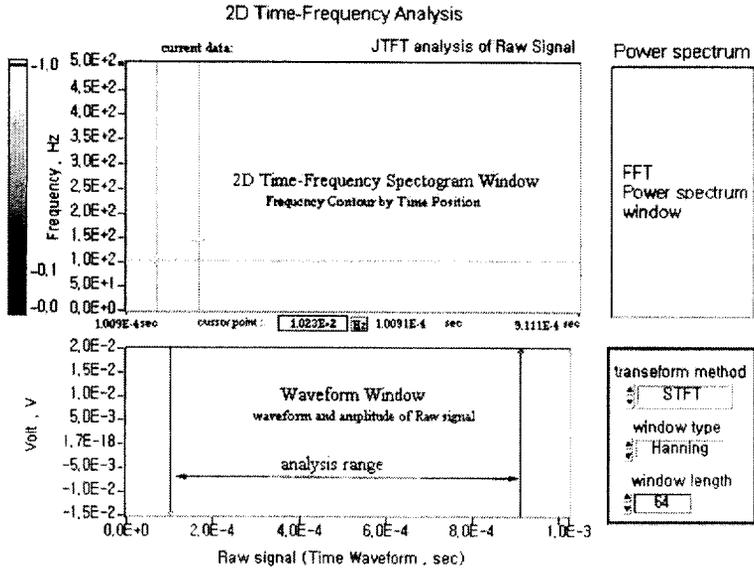


Fig. 4.6 Windows of waveform and time-frequency analysis program

5. 시험결과 및 관찰 (I)

5.1 미세조직 관찰

모재부(BM), 접합부 및 용착부(WM)의 광학현미경 조직사진을 Fig. 5.1에 나타내었다. Fig. 5.1(a)는 316L 스테인리스강의 모재부로 압연방향에 따라 조직이 연신되어 약간의 이방성을 가지며 소량의 ferrite band가 형성되어 있는 것으로 나타났다. Fig. 5.1(b)는 접합부로서 용착부와 HAZ의 조직을 함께 나타내고 있다. HAZ는 조직이 용접열에 의해 모재부보다 조대해지고 약간의 이방성을 갖는 것으로 나타났다. 용착부는 Fig. 2.2로부터 A-F계의 2상조직으로 먼저 오스테나이트가 형성되고 오스테나이트 간의 계면에 페라이트가 형성되어 있다. Fig. 2.3의 Delong diagram에 따르면 용착부는 오스테나이트 기지에 수%의 페라이트 (약 8FN by Delong diagram, 5%~6.7wt% by Schaffler diagram)를 가진 2상 조직이 형성되어야 하지만, CO₂ gas 분위기에서 GMAW 용접을 하였으므로 실제로는 더 많은 페라이트가 존재하는 것으로 판단된다. 또한 모재부와 HAZ의 경계에 초정 페라이트(WM의 일부)가 조대하게 형성되어 있는 것으로 나타났다. Fig. 5.1(c)는 용착부의 조직사진으로, 침상(acicular) 페라이트와 래시(lathy) 페라이트, 그리고 버미쿨러(vermicular) 페라이트 등이 관찰되었으며^(1,4,19), 이러한 페라이트 상은 용접열의 흐름을 따라 형성된 이방성 분포를 가지는 것으로 나타났다. 또한 용접pass의 겹침 부분에는 용착부내에 HAZ가 형성되어 있으며, 이러한 용착부 내의 HAZ는 주위보다 페라이트의 조직이 조대해지고 페라이트의 형성 방향이 일정하지 않아 조직분포의 불균일이 심한 것으로 나타났다.

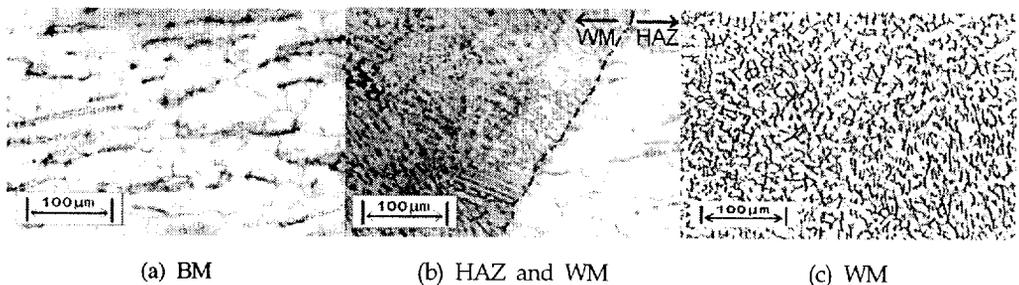


Fig. 5.1 Optical micrographs of each part

5.2 경도 측정

각 부분의 비커스 경도를 Fig. 5.2에 나타내었다. 용착부와 HAZ의 경도는 모재부에 비하여 낮게 나타났다. 이는 용착부와 HAZ의 경도가 모재부에 비하여 높게 나타나는 통상적인 조직과 달리, 담금질 경화성이 없는 오스테나이트계 스테인리스강의 경우 마르텐사이트 변태가 없기 때문에 연화되어 경도가 낮아진 것으로 판단된다.⁽¹⁹⁾

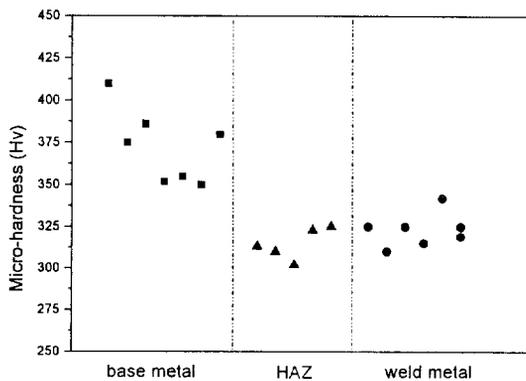


Fig. 5.2 Vickers hardness distributions of STS 316L weldments

5.3 피로균열 진전 거동 특성

5.3.1 피로균열의 발생과 진전

Fig. 5.3 및 Fig. 5.4에 전형적인 피로균열의 발생과정 및 피로균열의 진전 과정에 따른 피로파괴 단계를 나타내었다. 균열진전 제 I 단계는 피로응력에 의한 슬립대가 형성·활성화되어 표면에 요철과 돌출이 형성되는 단계이며, 제 II_a단계는 요철부의 응력집중에 의해 전단응력 지배하에 결정립의 1~2배 정도 크기의 미세 균열이 발생하는 과정이다. 이들 제 I 및 II_a단계에서는 결정 조직학적 인자와 역학적 인자가 지배인자로 작용하여 슬립면 균열과 벽개면 균열이 혼재하며 1) 표면조도, 결정입도, 결정입계 면적 및 이방성유무 등의 결정학적 조건, 2) 재료의 항복응력과 경도, 3) 재료의 압축 잔류 응력의 여부,

4) 부하되는 전단응력 등에 의존한다. 즉 결정입도가 작고 결정입계 표면적이 많을수록, 재료의 항복응력, 경도 및 압축잔류응력이 클수록, 부하되는 피로응력이 작을수록 균열의 진전수명은 길어진다. 균열진전 제Ⅱ_b단계는 역학적 인자만이 지배인자로 작용하므로 재료의 파괴인성과 부하되는 피로응력 cycle의 $\Delta\sigma (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$ 에 의존하며 Paris 법칙 $da/dN = C(\Delta K)^m$ 로부터 응력확대 계수 변동폭 ΔK 의 지수 함수적으로 균열이 진전하는 안정파괴 영역에 속한다. 따라서 제Ⅱ_b단계에서는 재료내에 압축 잔류응력이 존재하면 부하되는 인장응력을 흡수하여 잉여분의 인장응력만이 재료에 가해지므로 압축잔류응력이 클수록, 부하되는 $\Delta\sigma$ 가 작을수록 피로수명은 길어진다. 또한 균열이 응력축에 대해 거의 수직방향으로 안정되게 성장하며 스트라이에이션이라고 하는 피로파괴 특유의 줄무늬 모양의 파면이 형성된다. 스트라이에이션의 간격은 피로 1cycle 당 균열진전 길이로 그 간격으로부터 균열진전속도를 추측할 수 있다. 균열진전 제Ⅱ_c단계는 스트라이에이션 형성과정을 지나 균열진전이 가속되고 재료가 불안정 파괴에 이르는 영역으로 덩플, 벽개 및 입계균열 등의 파면양상을 나타내며 특히 고강도·저연성 재료에서 현저히 나타난다.

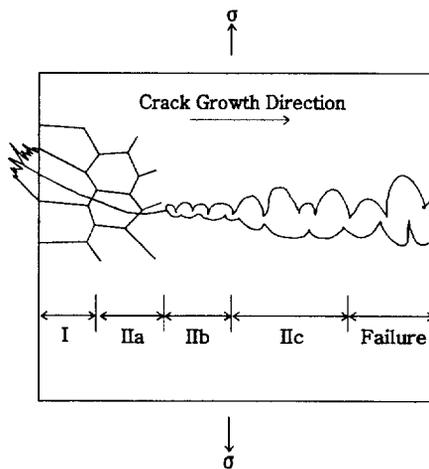


Fig. 5.3 Typical crack growth and propagation process

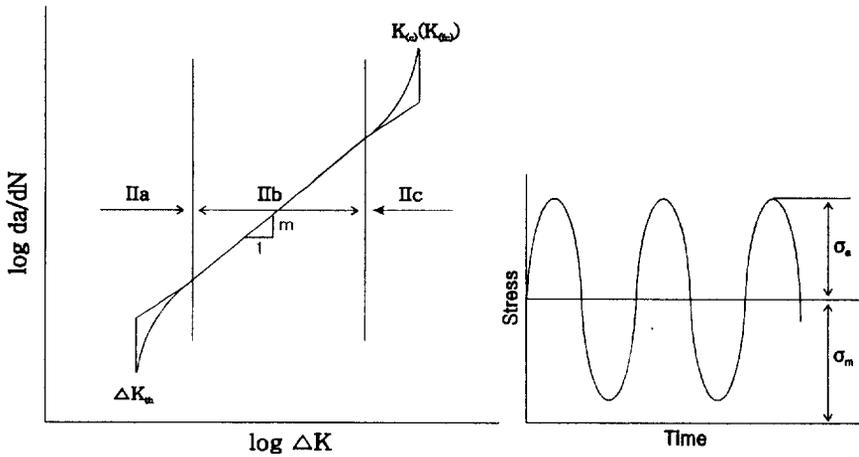


Fig. 5.4 Relationship of fatigue crack growth rate and stress intensity factor

5.3.2 STS 316L 용접부의 피로균열 진전 거동 특성

Fig. 5.7은 316L 스테인리스강의 각 부의 피로균열 성장거동을 나타내었다. 각부의 피로수명은 WM(LT)이 가장 짧고, BM(TL), BM(LT)에 이어서 HAZ을 따라 피로균열이 진전하는 HAZ(LT)의 피로수명이 가장 길게 나타났다. 이는 동일한 피로 응력이 가해질 경우 Fig. 5.2의 경도분포에서 고찰한 바와 같이 HAZ나 용착부의 경도가 모재부에 비하여 낮은 것에 기인하며^(4,19), 용착부의 경우 오스테나이트-페라이트의 2상조직 형성, 미세한 slag 개재 등에 따른 조직 불균일 및 용접공정에 의한 bead부의 인장 잔류응력의 잔존에 의해 피로균열의 진전이 더욱 가속되어 피로수명이 짧아진 것으로 판단된다. 또한 HAZ의 경우 모재부와 유사한 오스테나이트 조직이지만 용접열에 의해 이방성이 상당부분 제거됨으로써 피로수명이 이상적으로 길어진 것으로 판단된다. 또한, 모재부에서는 TL(압연)방향과 피로균열의 진전방향이 평행인 BM(TL)이 압연방향과 수직인 BM(LT)보다 피로수명이 짧은 것으로 나타났다. 이는 Fig. 5.1(a)에서 살펴본 바와 같이 모재부의 결정립 조직이 TL방향에 대해 길게 연신되어 있으므로 BM(TL)의 경우 결정립 조직의 경계면을 따라 균열이 용이하게 진전할 수 있는 반면 BM(LT)의 경우 피로균열이 결정립을 뚫고 진전하여야 하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 5.8은 각부의 균열진전속도 da/dN 과 응력확대계수 변동폭 ΔK 의 관계를 나타내었다. 재료상수인 m 은 WM(LT)이 가장 크고 HAZ(LT), BM의 순이

며, BM 중에서는 BM(TL)의 m 이 BM(LT) 보다 크게 나타났다. 또한, ΔK 의 영역에 따른 피로균열 진전속도를 분석한 결과 저 ΔK 영역에서는 HAZ(LT)의 균열진전속도가 가장 느리고 WM(LT), BM(LT), BM(TL)의 순으로 나타났으며 고 ΔK 영역에서는 BM(LT)의 균열진전속도가 가장 느리고, BM(TL), HAZ(LT), WM(LT)의 순으로 나타났다. 이는 결정립 분포에 기인한 것으로 동일 피로 응력이 가해질 경우 제 I, II_a 영역에서는 조직의 미세한 결정이 저항인자로 작용하여 BM보다 균열의 진전이 지연되지만 제 II_b 영역에서는 파괴인성치만이 지배인자로 작용하여 미세 결정립에 의한 효과를 기대할 수 없기 때문인 것으로 판단된다.

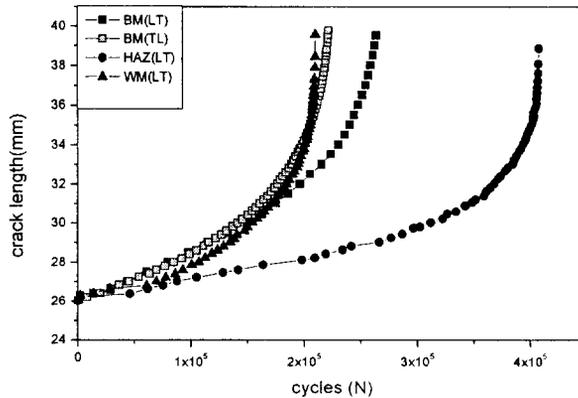


Fig. 5.7 a-N curves of STS 316L weldments

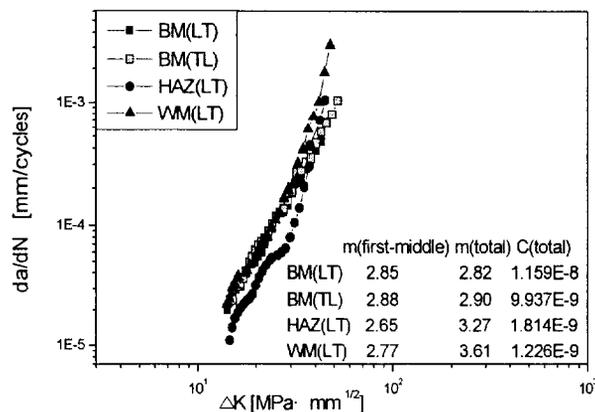


Fig. 5.8 Fatigue crack growth rate versus stress intensity factor of STS 316L weldments

5.3.3 STS 316L 용접부의 피로파면 관찰

Fig. 5.9 (a)~(l)는 피로균열길이 25mm, 30mm, 33mm, 37mm에서 피로파면의 전자주사현미경 사진을 나타낸다. 각 시험편에서 균열진전 중반에서는 피로파괴 파면의 특징인 스트라이에이션(striation)을, 후반에서는 입내 연성 파괴 파면의 특징인 딴플(dimple)을 관찰할 수 있었다. 특히 모재부보다는 HAZ, 용착부에서 더 미세한 dimple이 관찰되었는데 이는 경도가 모재부보다 낮기 때문으로 판단된다. 또한 BM(LT), HAZ(LT), WM(LT)는 원형의 등축 딴플(equiaxed dimple)이 나타났으나 이에 비해 BM(TL)의 경우 비정규적인 형상의 딴플이 관찰되었으며 용착부에서는 개재물 분리 및 균열의 지그재그 진전이 관찰되었다. Fig. 5.9의 (m)은 개재물 분리를 나타내었고, Fig. 5.9의 (n)은 균열이 조대한 개재물을 관통하지 못하고 개재물의 계면을 따라 진행되는 양상을 나타낸다. 본 실험에서는 이러한 개재물과 균열의 지그재그 진전이 균열진전 피로수명에 영향을 끼쳤을 것으로 판단된다.

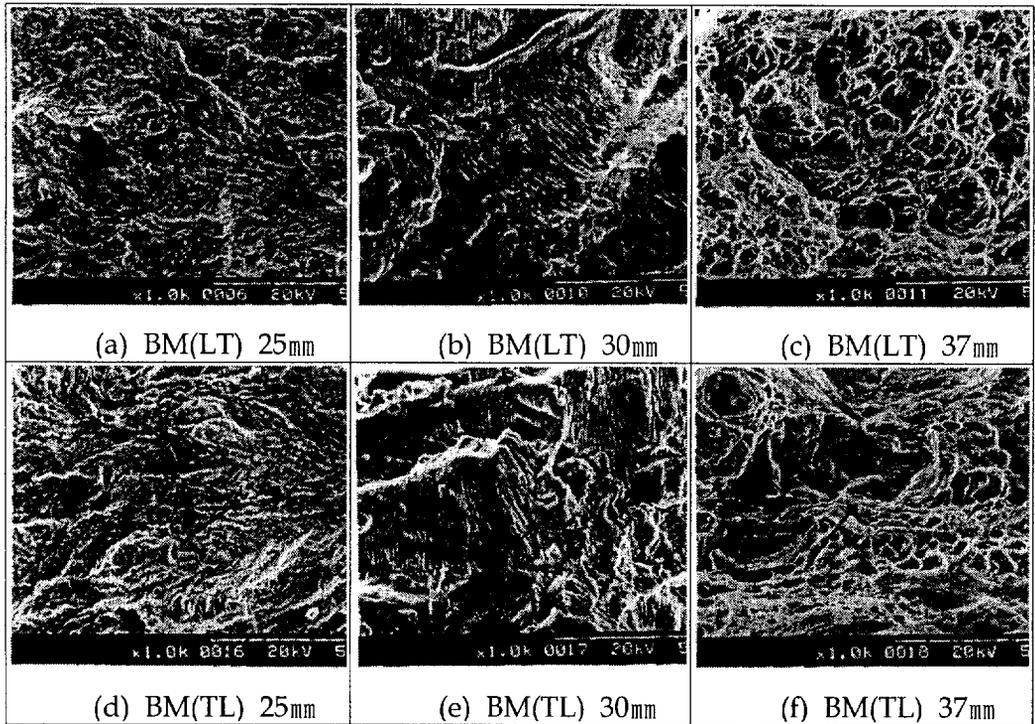


Fig. 5.9 Fractographs of each specimen

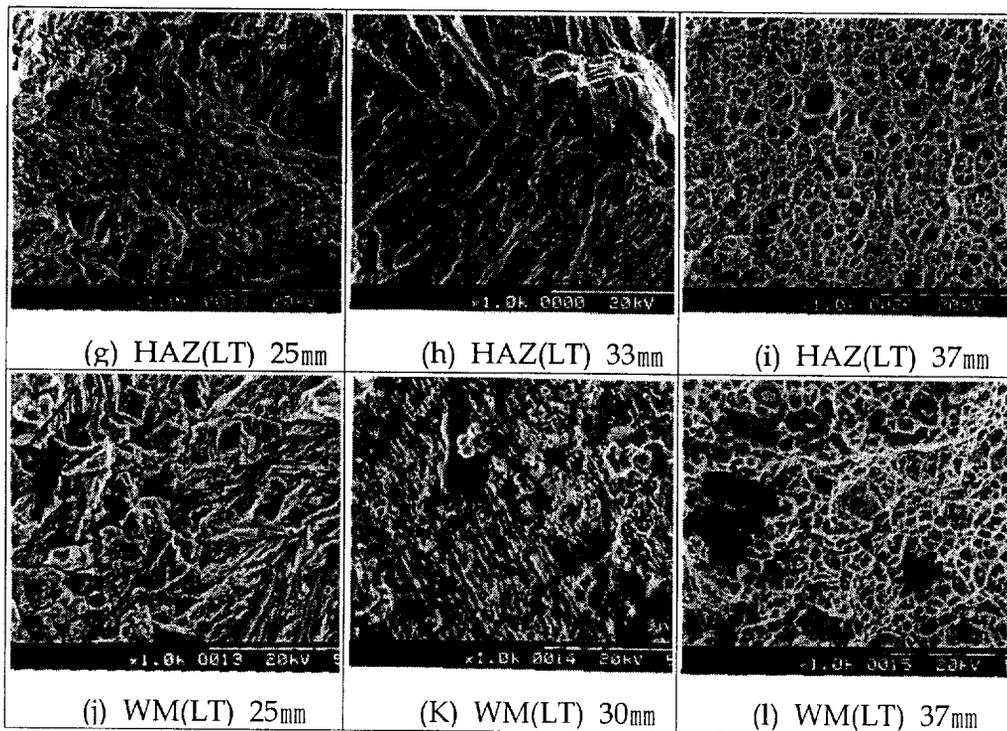


Fig. 5.9 Continued

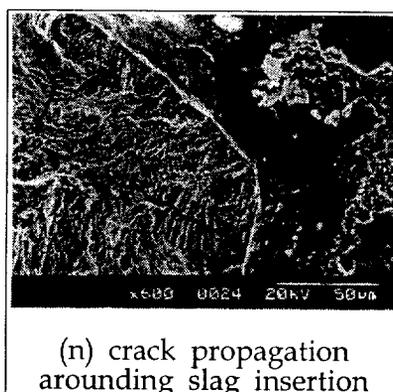
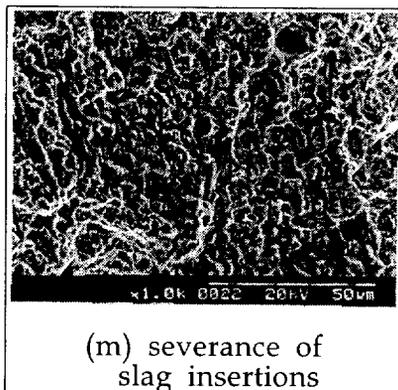


Fig. 5.9 Continued

6. 시험 결과 및 고찰(II) : 비파괴(탄성파)시험

연구배경에서 밝힌 바와 같이 300계열의 오스테나이트 스테인리스강은 열화물 분위기에서 피팅, 입계부식 및 응력부식에 취약한 문제점을 나타내고 있으며^(1~3), 이들의 용접 구조물은 조성 및 조직의 불균일과 반복 응력 및 부식 환경 하에서 경년열화의 가속으로 심각한 문제가 되고 있다. 원자력 관계시설의 경우 시설의 취급물질 특성상 가동 중에는 검사원의 출입이 제한되어 있고, 가동중의 갑작스런 파단으로 대형인명사고를 유발할 가능성이 크므로 사고 발생 방지를 위한 가동중 원자력관계시설의 원거리 실시간 감시시스템의 개발과 균열 발생 및 경년열화에 따른 잔여 수명 예측 시스템의 개발이 절실히 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 비파괴적인 방법에 의하여 가동중 원자력 관계시설 용접부의 경년열화에 따른 잔여수명을 예측하고 피로균열의 발생 및 균열진전거동을 감시하기 위한 원거리-실시간 감시시스템개발의 기초적 자료를 마련하고자 한다. 그 일환으로 원거리에서 시설의 가동중단이나 해체없이도 열화도나 피로균열발생 및 균열진전거동연구가 가능한 초음파 탐상법 및 음향방출법을 도입하여 316L 스테인리스강 용접부의 피로 균열거동 및 열화에 따른 각 탄성파 특성 및 파라미터를 연구하고, 파괴역학적 파라미터와의 상관관계의 정량화를 시도하였다. 또한 이를 통해 가동 중 시설의 비파괴적인 방법에 의한 정량적인 열화도 평가 및 피로잔여수명 예측을 위한 기초적 data를 마련하고자 한다.

6.1 펄스반사법에 의한 용접부의 종파속도 및 감쇠계수 분석

초음파의 속도는 식(3-1)~식(3-3)으로부터 1) 파의 종류, 주파수, 파장 등의 탄성과 특성, 2) E(종탄성계수), ρ (밀도), ν (프와송비), 가공경화, 소성변형, 부하 등에 의한 잔류응력 등의 재료특성, 3) 부식, 고온 피로 응력 등의 환경특성에 의해 결정된다. 또한 감쇠계수는 1) 파의 종류, 주파수, 파장 등의 탄성과 특성, 2) 식(3-4)~(3-7)로부터 결정립분포, 석출물이나 개재물 등의 조직 불균일 및 잔류응력 3) 부식, 균열 등의 결함이나 표면조도에도 크다란 영향을 받는다.

모재부, HAZ 및 용착부의 초음파 특성에 따른 물성을 평가하기 위하여 L방향(압연면상에서 두께방향 쪽)과 T방향(두께면상에서 압연방향에 수직한 방향 쪽)에서의 종파속도(V_L), 감쇠계수(α) 및 L방향 중심주파수(f)분포를 측정하고, 그 결과를 Fig. 6.1에 나타내었다. 여기서 $V(L)$, $\alpha(L)$, $f(L)$ 은 각각 L방향으로 측정한 종파속도, 감쇠계수 및 중심주파수이고, $V(T)$, $\alpha(T)$ 는 T방향으로 측정한 종파속도 및 감쇠계수를 나타낸다. 초음파의 종파 속도 $V(L)$, $V(T)$ 는 모재부가 가장 높고 HAZ, 용착부의 순으로 나타났으며, $f(L)$ 분포는 종파속도와 유사한 거동을 보이는 것으로 나타났다. 이는 속도 평가식(3-2)로부터 모재부와 HAZ, 용착부의 E(종탄성계수)가 각각 17,000kgf/mm², 16,500kgf/mm², 16,000kgf/mm²으로 모재부가 HAZ나 용착부에 비해 높으며, 식(3-1) 및 식(3-2)와 6.2, 6.3, 6.4항에서 고찰 할 $f(L)$ 분포, 석출물 및 용착부의 오스테나이트-페라이트 2상조직 형성과 잔류응력 등의 영향으로 판단된다. 즉 초음파는 매질의 진동을 통하여 전파하므로, HAZ나 WM은 오스테나이트-페라이트의 2상조직이 형성됨에 따라 실제로 초음파가 통과하게 되는 결정입계 면적이 모재부보다 넓으며 그 계면에 용접열에 의한 석출물, 페라이트의 형성, 용접 잔류응력 등의 존재가 매질의 규칙적 진동을 방해하여 흡수, 산란, 회절 등에 의한 초음파의 감쇠를 일으켜 초음파의 신속한 전파를 방해하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 감쇠계수 $\alpha(L)$, $\alpha(T)$ 는 용착부가 가장 높고 HAZ, 모재부의 순으로 나타났다. 이는 위에서 살펴본 바와 같이 초음파의 전파가 방해받으면서 음파에너지가 매질 내에서 흡수·감쇠 되는데, 그 흡수·감쇠량에 의해 감쇠계수가 결정된다. 즉 식(3-4)~식(3-8)로부터 결정립분포, 결정입계 면적, 입계에 존재하는 석

출물, 미소결함 및 잔류응력 등 음파의 흡수 요인이 많으므로 용착부의 감쇠 계수가 가장 높은 것으로 판단된다. 또한 모재부와 HAZ의 종파속도 및 감쇠 계수는 L방향 및 T방향에서 각각 다른 분포를 보이는 것으로 나타났다. 즉 용착부의 종파속도는 $V(L)$ 이 $V(T)$ 보다 높고 감쇠계수는 역으로 $\alpha(L)$ 이 $\alpha(T)$ 에 비해 낮은 것으로 나타나 모재부에 비해 HAZ, 용착부로 갈수록 L방향 및 T 방향에 대한 속도 및 감쇠계수간의 격차가 줄어들어 가는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이는 위에서 고찰한 바와 같이 모재부의 경우 압연방향으로 길게 연속되어 있는 결정조직에 기인한 것으로 판단된다. 즉, T방향으로 통과하는 초음파 빔의 경우에 L방향으로 통과하는 초음파 빔에 비해 통과해야 할 결정립 직경(결정립 두께)이 크고 결정입계의 면적이 더 넓으므로 결정립과 결정입계를 통과하는 동안 더 많은 방해요인이 작용하여 상대적으로 투과력이 큰 저주파수대의 초음파 빔이 많이 투과·수신되므로 식(3-1)~식(3-8)로부터 $V(T)$ 및 $\alpha(T)$ 는 $V(L)$ 및 $\alpha(L)$ 에 비해 속도값은 저하되고 감쇠계수는 증가하는 것으로 판단된다.

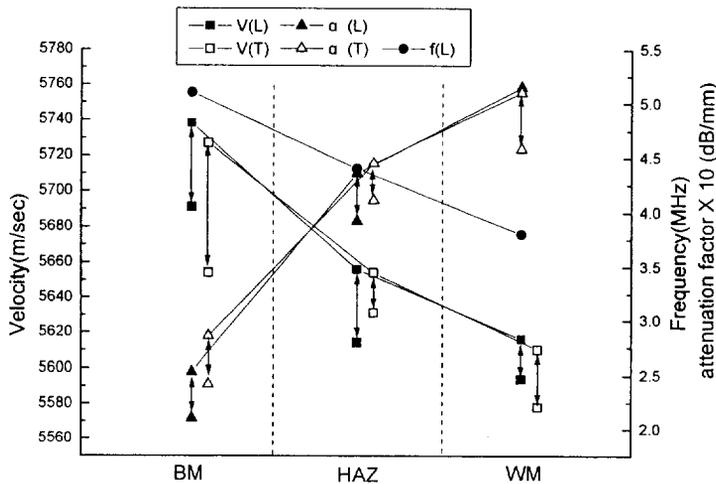


Fig. 6.1 Velocity and attenuation factor of BM, HAZ, WM before degradation (CT4)

이와 같이 초음파 파라미터인 초음파 속도, 감쇠계수 및 중심주파수 거동으로부터 결정립 조직분포나 석출물, 개재물, 이방성, 잔류응력 등의 유무 및 그 정도를 평가할 수 있으며 이로부터 재료 물성의 평가가 가능한 것으로 판단된다. 따라서 가동중 시설에 사용된 재료의 이러한 초음파적 특성 평가에 대한 기초 자료로부터 실시간 원거리 감시 시스템에 의해 가동중 시설의 실시간적인 물성 평가 및 열화 정도의 평가가 가능한 것으로 판단된다.

6.2 펄스반사법에 의한 저면에코의 STFT분석

초음파는 매질의 특성에 따라 고유의 속도 값을 가지며, 일정분포의 동일 음압 및 주파수를 매질 내로 진행시키더라도 다중 반사되어 수신되는 저면에코의 속도, 감쇠계수 및 주파수 성분은 매질의 특성, 즉 결정조직, 미소결합, 잔류 응력 등의 분포상태나 부식, 석출 등의 재질의 열화정도 등에 의존한다. 즉 초음파가 투과하여 수신된 부위의 매질에 대한 정보를 담고 있다. 따라서 초음파 탐상 시스템과 실시간 시간-주파수 분석 프로그램을 이용하여 피검체의 다중 저면 반사파의 주파수의 분포상태 및 각 주파수성분의 진폭스펙트럼(음압 또는 초음파 빔량)을 분석함으로써 피검체의 결정립조직, 잔류응력, 미소결합 등의 분포 상태 및 부식, 석출 등에 의한 열화도를 실시간적으로 평가할 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구에서는 time-frequency analysis의 한 방법으로써 raw 시그널의 시간영역을 짧게 나누어 하나의 블록을 만들고 각 블록을 푸리에 변환함으로써 수신신호를 시간함수에 대한 주파수, 진폭에너지, 스펙트럼 등의 정보로 분석하는 Short Time Fourier Transform(STFT)을 사용하였다.

Fig. 6.2에 CT4(before degradation)의 모재부(BM), HAZ, 용착부(WM)의 L 방향으로 계측한 다중저면반사파(B_1 , B_2 , B_3)를 펄스반사법으로 검출하고 수신된 신호를 STFT 분석에 의한 결과로 나타내었다. Fig. 6.2의 상단부는 모재부, HAZ, 용착부의 다중저면반사파(B_1 , B_2 , B_3)를 STFT분석한 시간-주파수 contour와 raw 시그널의 파형을 나타내며, Fig. 6.2의 하단부는 STFT법으로 분석한 시간-주파수 분포 분석 결과를 도시하였다.

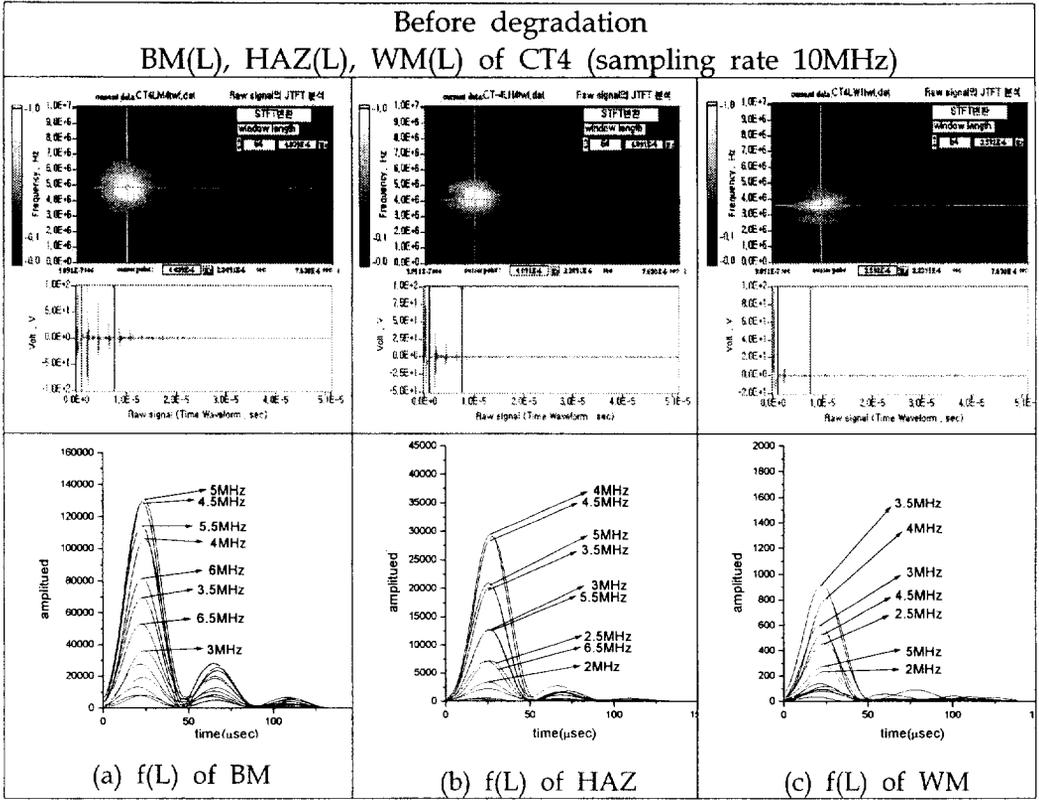


Fig. 6.2 Time-frequency and amplitude analysis of multi-reflected back echo by SIFT

Fig. 6.2의 상단부는 STFT분석에 의한 시간-주파수 contour 및 raw signal 파형을 나타낸다. 모재부는 HAZ부나 용착부에 비해 raw signal의 진폭이 크고 감쇠가 작으며, 정규적인 깨끗한 원형의 시간-주파수 contour를 가짐을 알 수 있다. 이는 모재부의 저면반사파가 각 주파수 성분의 수신 시간대가 일정하고 분산이 적은 균일 분포를 가짐을 의미하며, HAZ나 용착부의 저면반사파는 입사 시각에 따른 주파수 성분의 분산이 모재부에 비해 크고 특정 시간대의 특정 주파수 성분의 비정상적 감쇠가 있었음을 의미한다. 하단부는 STFT법에 의한 $f(L)$ 분석 결과를 나타낸다. 모재부, HAZ, 용착부의 $f(L)$ 분포는 각각 5~4.5MHz, 4~4.5MHz, 3.5~4MHz로 나타났다. 일반적으로 초음파의 투과력은 초음파의 λ (파장)이 길수록, 매질의 조직분포가 균일하며 결정립이 미세할수록 커진다. 따라서 HAZ, 용착부의 $f(L)$ 성분의 저하는 STS 316L 용접부의 조직분포학적·기계응력학적 특성에 기인하는 것으로 판단된다. 모재부의 $f(L)$ 분

포가 5~4.5MHz인 것은 탐촉자의 송신 중심 주파수 성분이 5MHz인 것에 기인하며, HAZ, 용착부의 f(L)성분의 저하 (특히 5MHz성분의 감쇠) 및 입사시각에 따른 주파수 성분의 분산은 오스테나이트-페라이트의 2상조직 형성과 이에 따른 결정입계(또는 interface) 면적 증가, 계면의 석출물 및 미세한 개재물 등의 조직 분포 불균일과 용접 잔류응력 등의 영향으로 판단되며 6.1절의 속도 및 감쇠계수에 의한 고찰에서와 같은 맥락에서 고찰 할 수 있다.

6.3 초음파법에 의한 열화 평가

6.1절 및 6.2절에서 모재부에 비하여 HAZ, 용착부의 속도 및 중심 주파수는 저하되고, 감쇠계수는 증가하는 경향을 확인 할 수 있었다. 또한 속도와 중심 주파수 변화는 유사한 거동을 보이거나, 감쇠계수는 반대의 거동을 나타내었다. 이와 같이 초음파 파라미터인 초음파 속도, 감쇠계수 및 중심 주파수로부터 결정립 조직분포, 석출물 등의 개재물의 영향, 조직 이방성, 잔류응력의 유무 및 그 정도 등의 재료 물성을 평가할 수 있다.⁽²³⁻²⁸⁾ 따라서 초음파적 파라미터의 변화를 기존의 재료시험 물성치 및 파괴역학적 파라미터와의 비교 분석을 통해 정량적인 상관관계를 구하고, 이로부터 실시간 원거리 감시 시스템에 의한 가동 중 시설의 실 시간적인 물성 평가 및 경년 열화에 따른 잔여수명 평가가 가능할 것으로 판단된다. 그러나 이러한 가동 중 시설은 대형 용접 구조물이 대부분이며 용접부의 특성상 이종재료 간의 접합으로 제3의 조직·물성을 갖는 재료(HAZ, WM)가 생성되므로 용접공정, 재질특성, 용접시공자의 기능, 용접조건, 용접시의 환경 조건, 가동 중 용접구조물의 부하 응력, 부식 환경 등 용접부의 조직·물성 결정에 영향을 끼치는 여러 요소의 복합적 고찰이 필요하다. 이와 같이 가동 중 시설의 실 시간적 감시 시스템의 개발에는 광대한 기초 data 분석이 선행되어야 하나 우리 나라의 비파괴적 재료평가 기술은 아직 미미한 상태이다. 따라서 본 절에서는 그러한 기초 data의 마련을 위한 초음파 파라미터의 분석에 역점을 두었으며, 이를 통한 재료 시험치 및 파괴 역학적 파라미터와의 상관성 분석에 이어 열화 평가의 가능성을 검토하였다.

6.3.1 열화처리에 의한 조직 변화

Fig. 6.3은 저탄소 오스테나이트계 스테인리스강의 Fe-Cr-Ni 상태도를, Fig. 6.4는 오스테나이트계 스테인리스 강 Fe-Cr-Ni 상태도를 나타내며 Fig. 6.5는 탄화물 석출 곡선을 나타낸다.

열화처리에 있어서 모재부는 Fig. 6.3의 저탄소 오스테나이트계 스테인리스강의 상태도를 따르며 용착부의 경우 GMAW 용접시 보호가스 CO₂의 혼입으로 상당히 높은 ferrite contents(wt%)를 가지므로 Fig. 6.4의 오스테나이트계 스테인리스강의 상태도를 따른다. 또한 Fig. 6.5의 탄화물 석출 곡선에 따른 탄화물의 석출이 있는 것으로 나타났다.

Table 4.4의 열화처리 조건에 따라 원자력배관의 가동중 온도 환경과 비슷한 475°C(CT1~CT3), 석출이 시작되는 700°C(CT5~CT7), 오스테나이트 및 페라이트의 재결정이 일어나는 1000°C(CT8~CT10) 열화처리 시험편의 조직사진을 Fig. 6.6에 나타내었으며, 모재부 및 용착부의 석출물을 Fig. 6.7에 나타내었다.

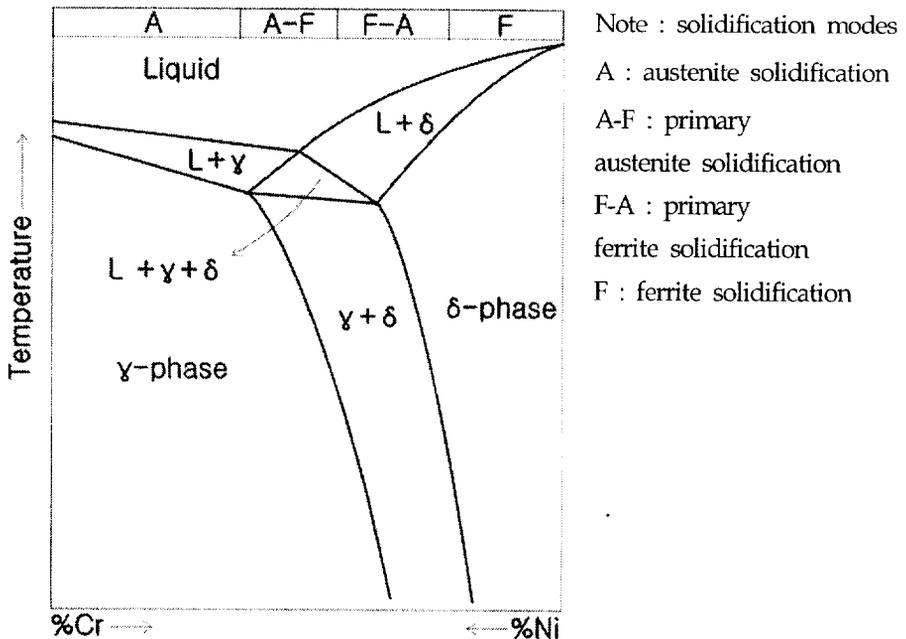


Fig. 6.3 Schematic pseudobinary phase diagram of low carbon austenitic stainless steels containing approximately 70% Fe

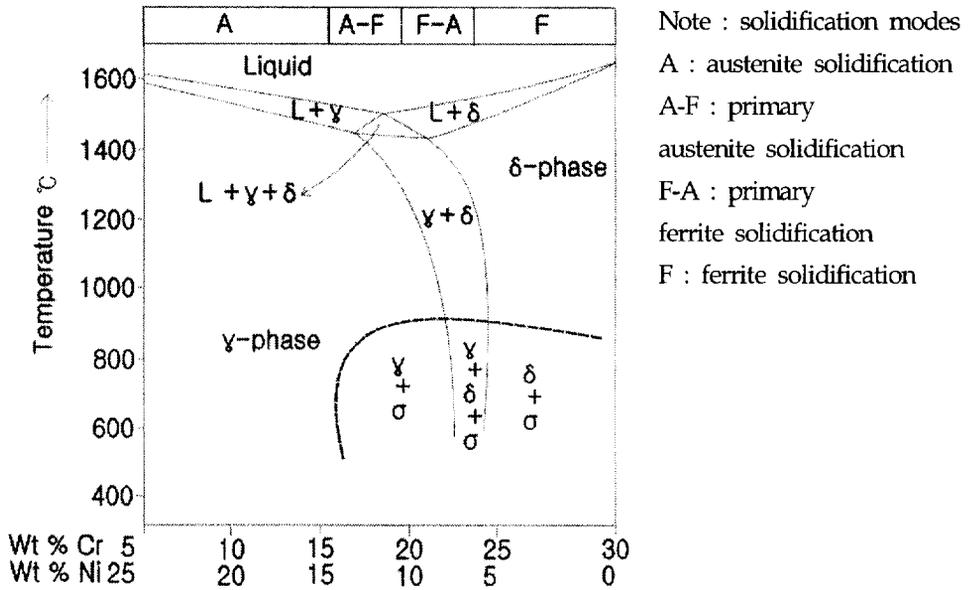


Fig. 6.4 Schematic pseudobinary phase diagram of austenitic stainless steels containing approximately 70% Fe

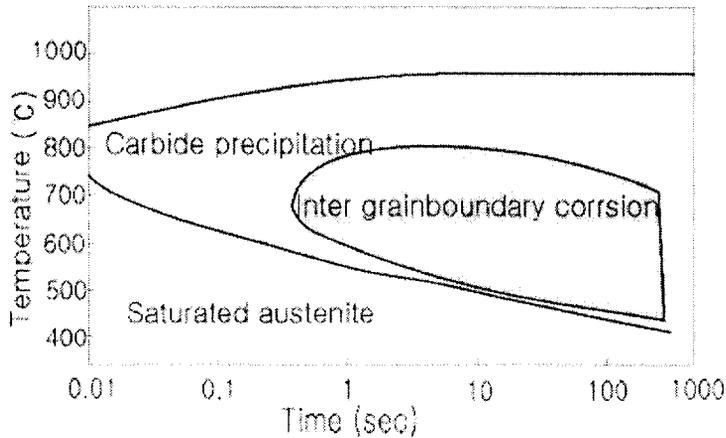


Fig. 6.5 Effect of time-temperature in the carbide precipitation and inter-grainboundary corrosion

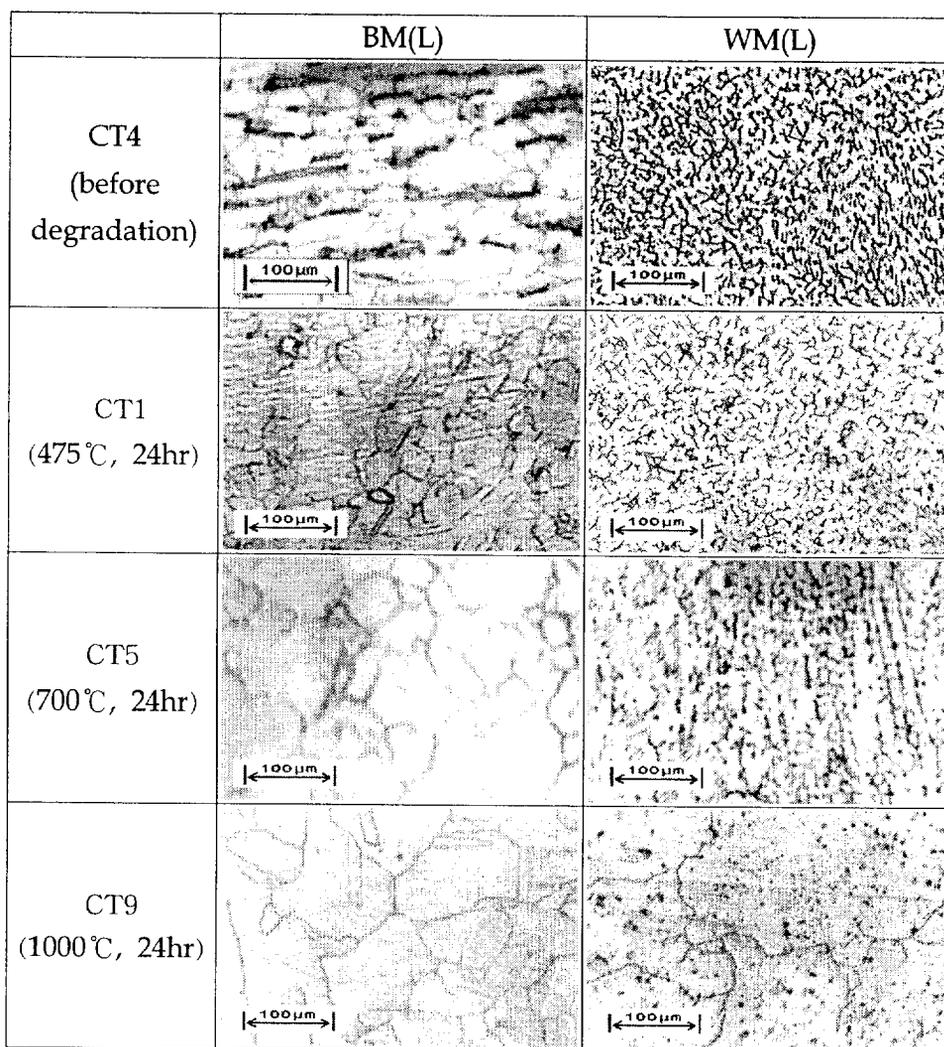


Fig. 6.6 Optical micrographs of BM and WM according to degradation

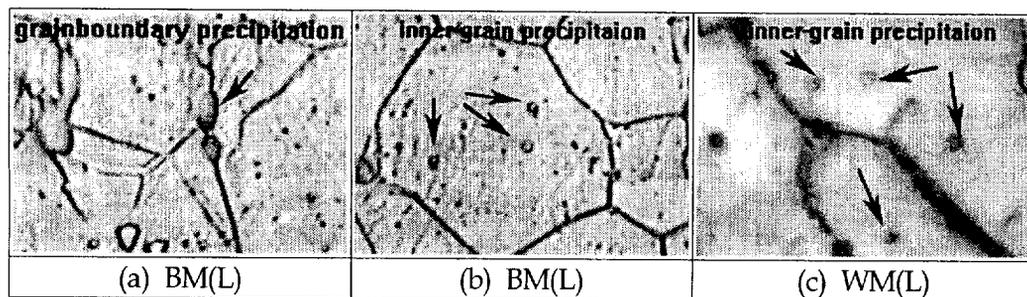


Fig. 6.7 Optical micrographs of precipitation in CT5 specimen

Fig. 6.6에서 열화처리에 따른 모재부 조직을 관찰한 결과 열화처리 전에 비하여 열화온도 및 열화시간 증가에 따라서 모재부의 이방성은 감소하였으나, 결정립이 조대해지고 ferrite band 영역이 줄어들어 가는 것으로 나타났다. 이는 고온환경 하에서의 결정립 성장과 Fig. 6.10과 Fig. 6.11의 모재부의 EPMA 분석 결과로부터 열화처리 온도가 증가할수록 페라이트 안정화 원소인 Cr, Mo 및 Si 함량이 감소한 것에 기인하는 것으로 판단된다. 또한 용착부는 오스테나이트-페라이트의 2상조직으로 열화처리 전에 비해 용접열의 흐름을 따라 형성된 페라이트상의 이방성분포에는 변화가 없었으나, 페라이트 함량의 변화가 관찰되었다. 점분석법에 의하여 각 시험편의 용착부 페라이트 함량을 분석한 결과 475℃에서 열화처리 한 CT1, CT2, CT3 및 700℃에서 24hr동안 열화처리한 CT5는 열처리 전에 비해 용착부의 페라이트 함량이 증가하였고, 700℃에서 48hr 및 72hr 열화처리 시험편인 CT6, CT7에서는 용착부의 페라이트 함량이 저하되었다. 또한 재결정이 일어나는 1000℃ 열화처리 시험편인 CT8, CT10 및 CT9는 용착부의 페라이트가 분해되어 현저하게 페라이트 함량이 저하되고, 조대한 오스테나이트의 재결정이 일어난 것으로 나타났다. 이는 Fig. 6.10과 Fig. 6.11의 용착부의 EPMA 분석결과로부터 용착부에서 페라이트에 고용되어 있던 페라이트 안정화 원소인 Cr, Mo, Si와 오스테나이트 안정화 원소인 Ni 등이 고온 열화처리에 의하여 오스테나이트 기지로 확산됨으로써, 상대적으로 오스테나이트에 이들 원소가 증가한 것에 기인하는 것으로 판단된다. 또한 용착부의 페라이트내에서 C함량이 열화처리 전에 비해 증가한 것으로 나타났다. 이는 일정온도까지는 C고용도가 저하되나 1000℃이상의 고온에서는 오히려 C고용도가 증가하는 것에 기인하며 이로 인해 부식 환경 하에 노출될 경우 용착부 내에서도 불안정한 페라이트가 우선적으로 부식되므로 입계부식의 요인이 되는 것으로 판단된다.

또한 700℃ 및 1000℃에서 열화처리한 시험편에서는 석출물이 관찰되었으며 Fig. 6.12의 CT9 용착부의 석출물을 EPMA 분석한 결과 용착부에 비하여 Cr, Mo, Mn, Si 등의 함량이 상당히 높게 나타났으며, 이러한 석출물에 의해 석출물 주변의 조성 불균일 및 Cr, Mo 등의 함량저하로 인해 내식성이 저하되는 요인이 되는 것으로 판단된다.

Fig. 6.8(a), (b)에 열화처리 온도 및 시간 증가에 따른 BM(L)(압연면상에서 계측) 및 BM(T)(두께면상에서 계측)의 결정립 직경 분포 및 분산도(standard deviation, SD)를 나타내었고, Fig. 6.9에 용착부의 페라이트 함량 및 SD를 나타내었다. 그리고 Fig. 6.10 및 Fig. 6.11에 열화처리 전·후의 BM(L) 및 WM(L)의 오스테나이트 및 페라이트의 EPMA 분석 결과를 나타내었고, Fig. 6.12에 석출물의 EPMA 분석결과를 나타내었다.

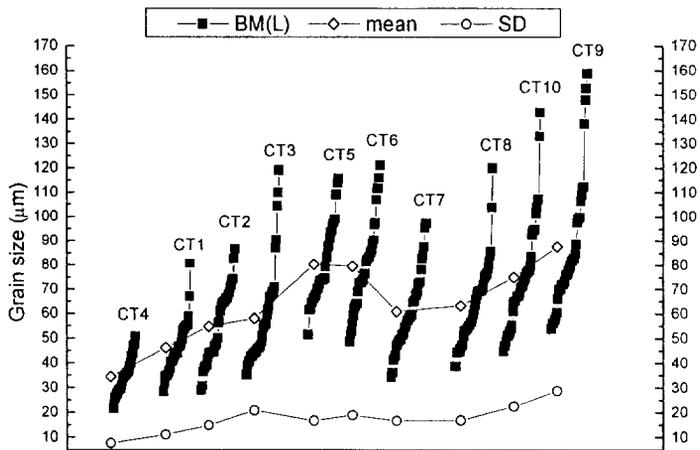


Fig. 6.8(a) Grain size distributions of BM(L) according to degradation

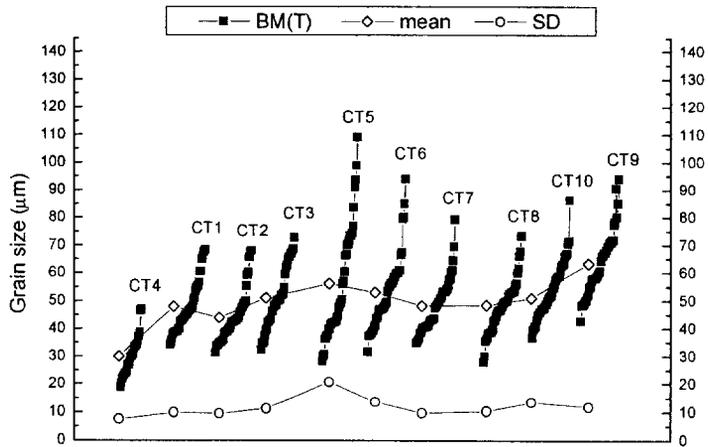


Fig. 6.8(b) Grain size distributions of BM(T) according to degradation

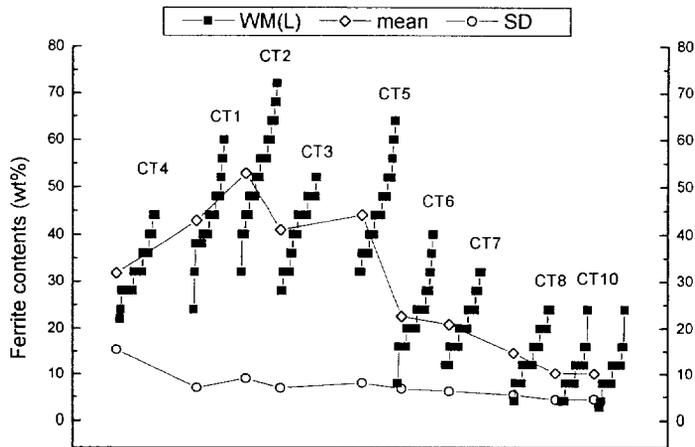


Fig. 6.9 Ferrite contents of WM(L) according to degradation

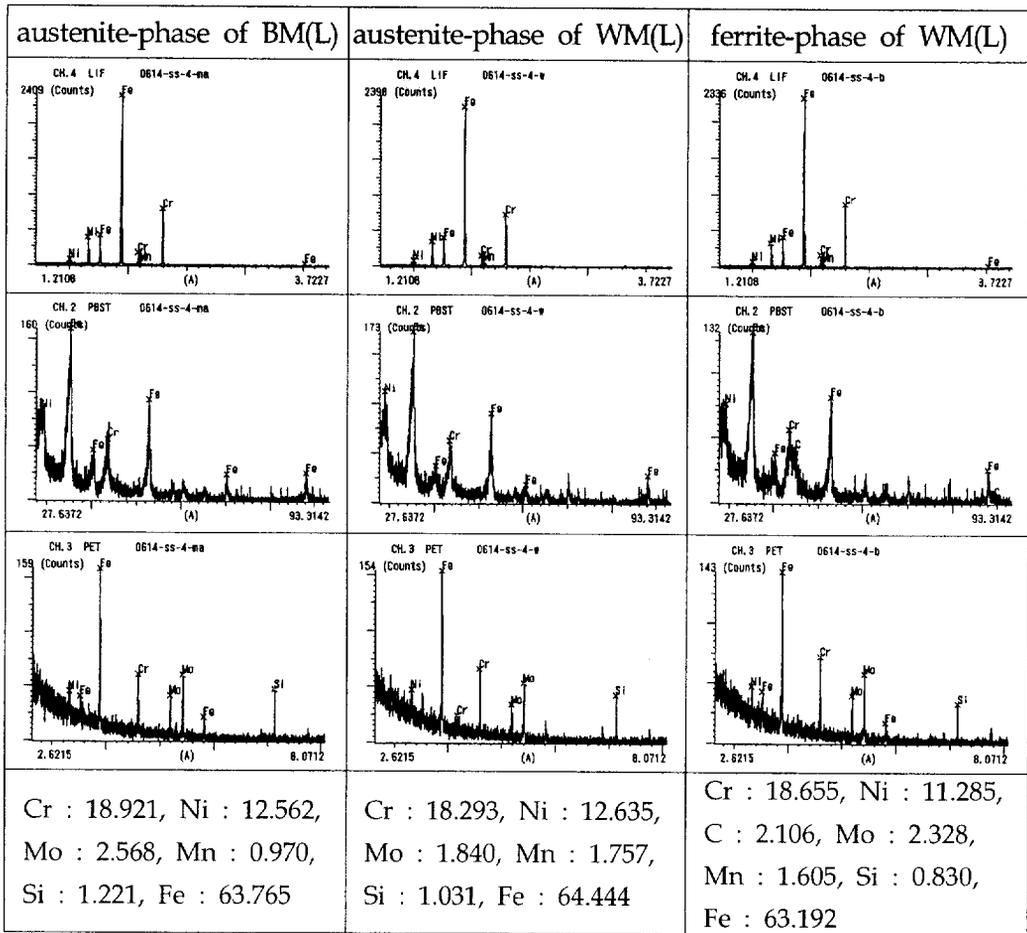


Fig. 6.10 EPMA of CT4 specimen before degradation (unit : [wt%])

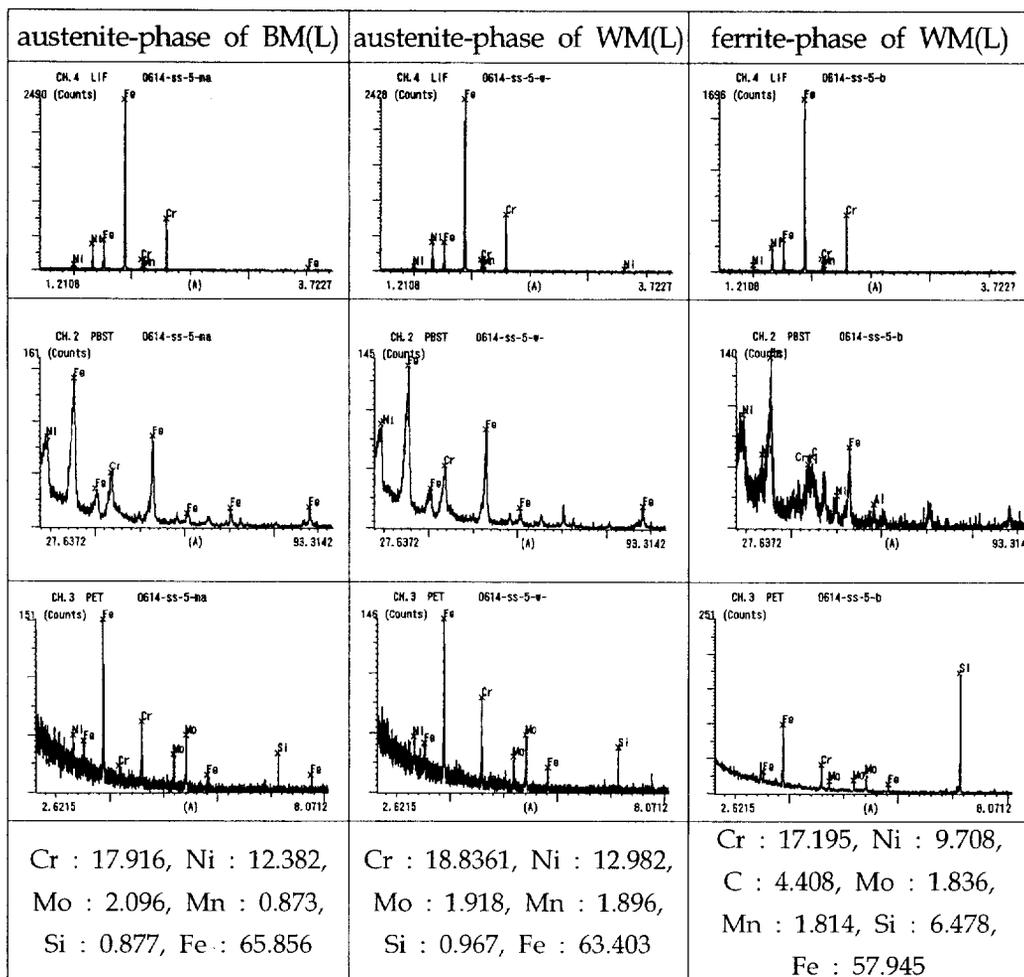


Fig. 6.11 EPMA of CT5 specimen after degradation (700°C, 24hr) (unit : [wt%])

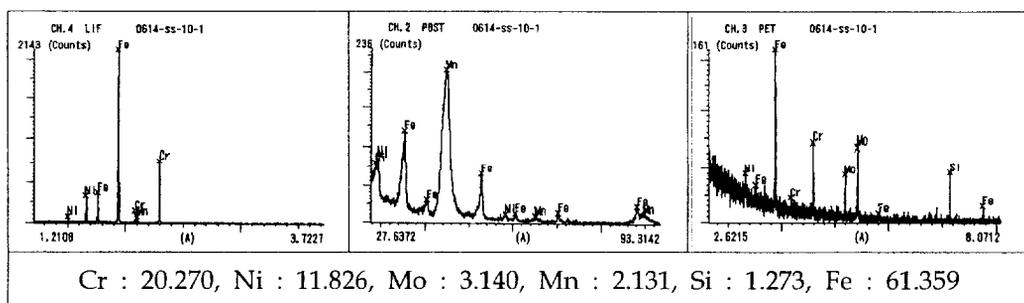
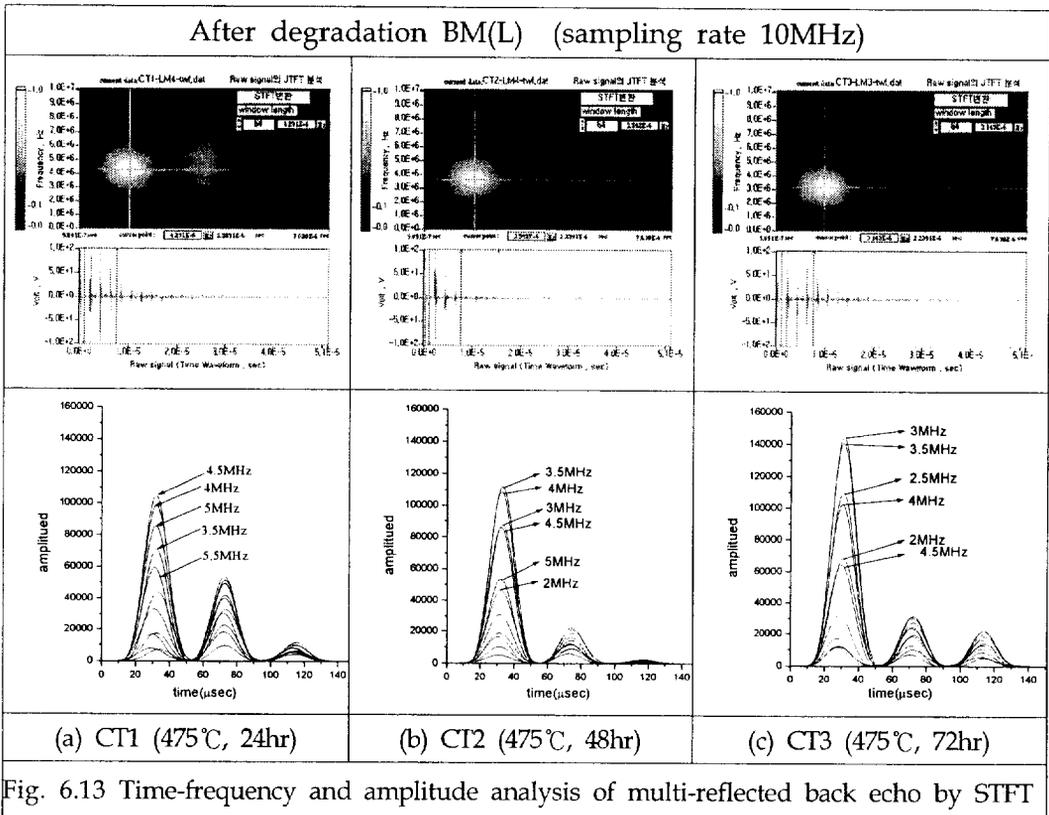


Fig. 6.12 EPMA of precipitation of CT9 WM after degradation (1000°C, 24hr) (unit : [wt%])

6.3.2 초음파 파라미터 분석에 의한 열화 평가

본 장에서는 6.1, 6.2의 고찰 결과 및 6.3.1의 열화처리에 의한 조직의 변화 관찰 결과로부터 열화처리에 따른 초음파 파라미터를 분석하고 조직학적 파라미터와의 상관관계를 도출하였다.

Fig. 6.13에 475°C, 700°C 및 1000°C에서 열화처리 한 BM(L)의 다중 저면 반사파로부터 STFT 실시간 분석에 의한 초음파 파형 및 중심주파수 계측 결과를 나타내었다. WM(L) 역시 동일 방법으로 계측하였으며 STFT 분석화면의 도시는 생략한다.



After degradation BM(L) (sampling rate 10MHz)

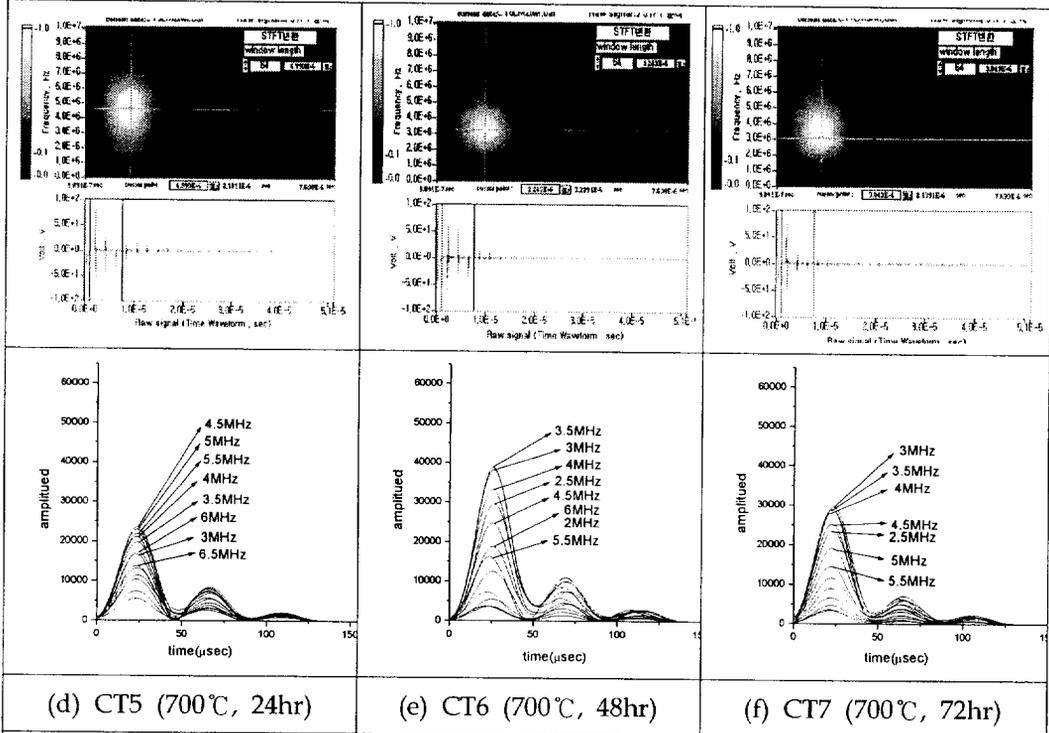


Fig. 6.13 Continued

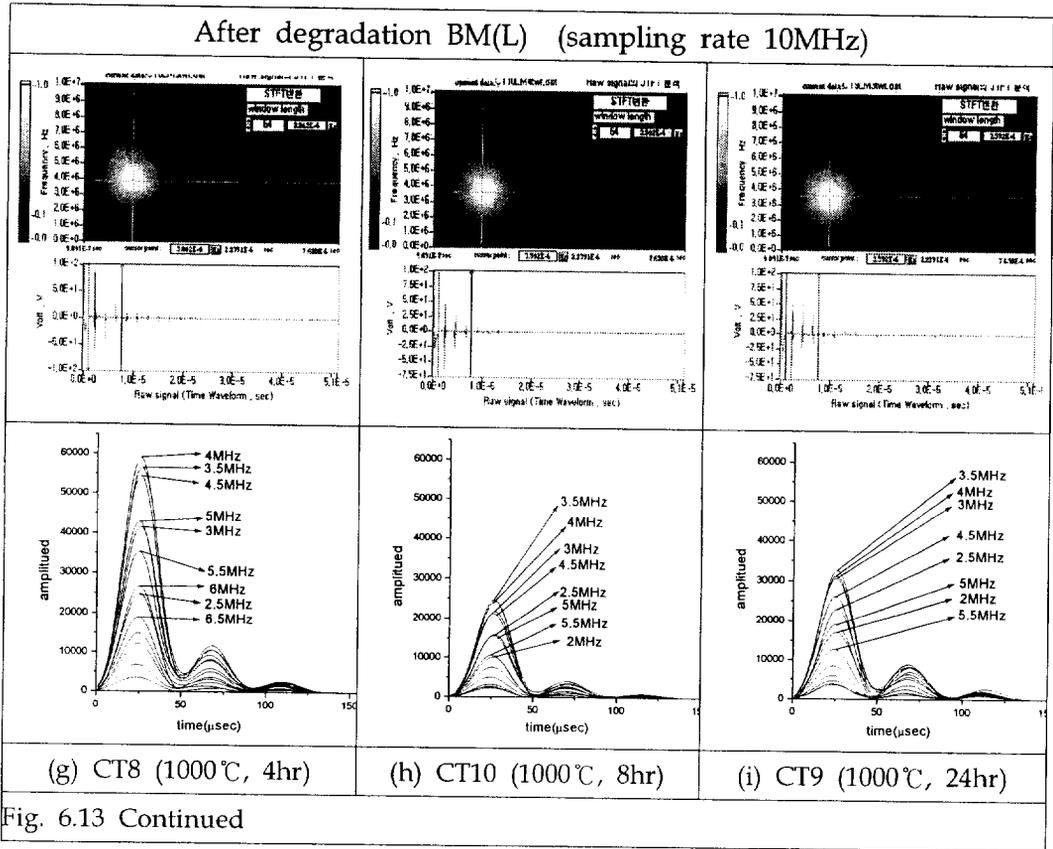


Fig. 6.14에 열화처리에 따른 BM의 BM(L)과 BM(T)의 grain size 평균값과 분산 변화 곡선을 나타내었고, Fig. 6.15에 열화처리에 따른 BM(L)의 종파속도 $V(L)$, 감쇠계수 $\alpha(L)$ 및 중심주파수 $f(L)$ 변화 분석 결과를 나타내었다.

Fig. 6.14와 Fig. 6.15로부터 고찰한 결과, grain size가 커질수록 속도 및 중심주파수는 저하되며, 감쇠계수는 증가하는 것으로 나타났다. 특히 BM(L)의 grain size 보다는 실제로 초음파가 통과하는 총 빔경로에 해당되는 BM(T)의 grain size(결정립두께)에 더욱 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한 열화처리에 따라 BM에 존재하던 ferrite band의 분해에 의한 감소가 가속화 될수록 $V(L)$ 및 $f(L)$ 는 증가하고 $\alpha(L)$ 는 감소하는 것으로 나타났으며 이러한 경향은 $f(L)$ 의 분포에서 더욱 두드러지게 나타났다.

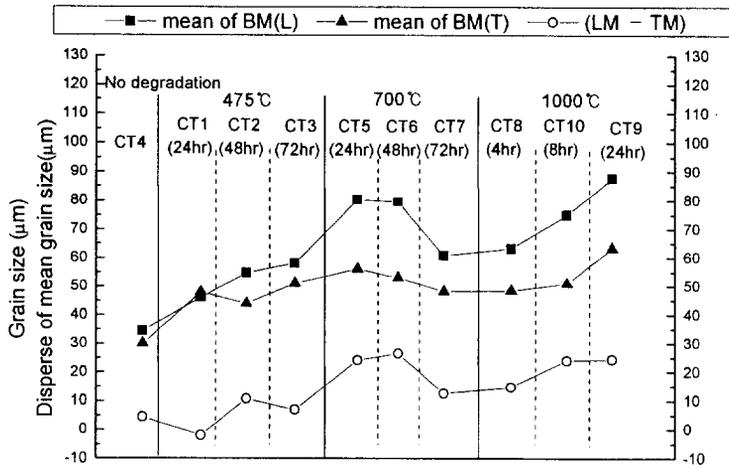


Fig. 6.14 Grain size and SD dispersion of BM(L) and BM(T) at each degradation

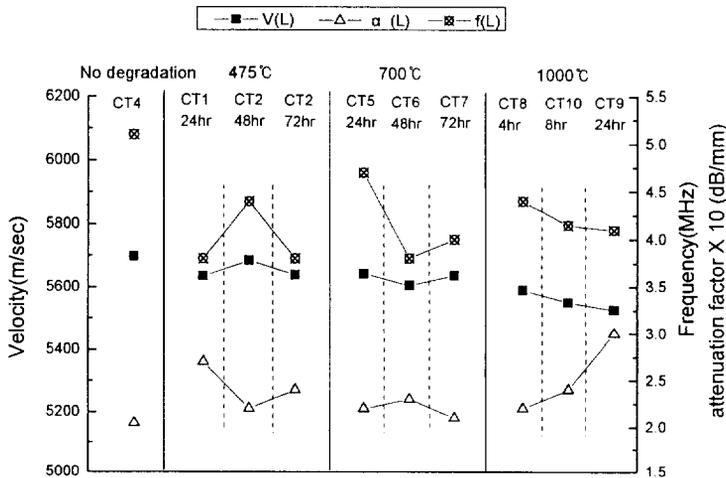


Fig. 6.15 Velocity, attenuation factor and frequency of BM(L) according to degradation

475°C 열화처리 시험편인 CT1, CT2, CT3는 CT4에 비해 BM(L) 및 BM(T)의 grain size가 증가함에 따라 종파속도 및 중심주파수가 저하하지만 감쇠계수는 증가하였고 그 변화는 중심주파수에서 더욱 두드러지게 나타났다. 700°C에서 열화처리한 CT5, CT6, CT7 및 1000°C에서 열화처리한 CT8, CT10, CT9에서도 동일한 경향이 나타났다. CT5(700°C, 0 24hr)는 BM(L) 및 BM(T)에서의 grain

size가 더욱 커졌음에도 불구하고 중심주파수가 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 Fig. 6.7의 석출곡선에 따른 Fig. 6.6의 미세한 석출물의 석출 개시에 영향을 받은 것으로 고려되나 명확한 원인은 좀더 깊은 연구가 필요한 것으로 판단된다.

용착부(WM)에 있어서는 초음파의 감쇠가 너무 커 펄스반사법에 의한 종파 속도 및 감쇠계수의 계측이 불가능하였다. 그러나 모재부의 고찰 결과로부터 조직변화에 대한 민감도는 종파속도와 감쇠계수보다는 중심주파수가 더욱 큰 것으로 나타났으므로, 중심주파수 분석을 중심으로 열화처리에 따른 조직변화와의 상관관계를 고찰하였다.

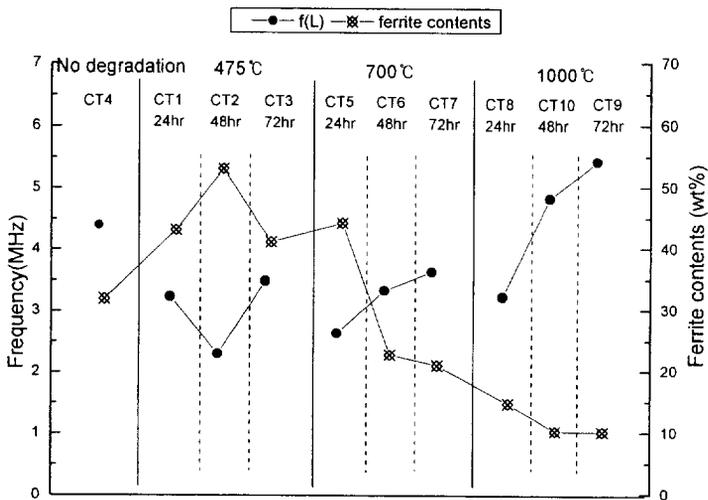


Fig. 6.16 Frequency and ferrite contents of WM(L) according to degradation

Fig. 6.16에 열화처리에 따른 WM(L)의 페라이트 함량과 f(L)의 변화곡선을 나타내었다. 6.3.1의 고찰 결과와 Fig. 6.15로부터 페라이트 함량이 감소함에 따라 f(L)가 높아지는 것으로 나타났다. 특히 오스테나이트의 재결정이 일어나는 1000°C에서 열화처리한 시험편에 있어서는 오스테나이트 결정립이 BM(L)보다 크게 성장하였음에도 불구하고 페라이트 함량의 상당한 감소로 인해 중심주파수가 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 오스테나이트 기지에 페라이트가 형성된 2상조직에 있어서 페라이트 및 오스테나이트-페라이트 계면이 초음파의 진행을 방해하는 조직 불균일 요인으로 작용한 것으로 판단된다.

Fig. 6.17에 BM(L) 및 BM(T)의 grain size에 대한 V_L 과의 상관관계를 나타내었고, Fig. 6.18에 BM(T)의 grain size에 대한 $V(L)$, $\alpha(L)$, $f(L)$ 와의 상관관계를 나타내었다. 또한 Fig. 6.19에 WM(L)의 페라이트 함량에 대한 $f(L)$ 와의 상관관계를 도시하고 각각을 일차 함수적인 관계로 나타내었다. 열화처리에 따른 모재부의 조직 변화 및 초음파 파라미터와의 상관관계를 분석한 결과 grain size가 클수록, ferrite band가 많을수록 종파속도 및 중심주파수는 저하되는 것으로 나타났으며 감쇠계수는 이와 상반되는 거동을 보이는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 초음파가 실제로 통과하는 grain size에 해당되는 T(두께면상)방향의 grain size에 더욱 크게 영향을 받는 것으로 판단된다. 또한 이러한 조직 변화에 따른 파라미터의 민감도는 종파속도나 감쇠계수 보다는 중심주파수가 더 큰 것으로 나타났다. WM(L)의 조직 변화 및 초음파 파라미터와의 상관관계를 분석한 결과 오스테나이트-페라이트의 2상조직에서 페라이트가 초음파 진행을 방해하는 요인으로 작용하며 페라이트 함량이 클수록, 페라이트의 분포 이방성이 클수록 중심주파수는 저하되는 것으로 나타났다. 또한 중심 주파수의 변화는 석출물에도 크게 영향을 받는 것으로 판단된다.

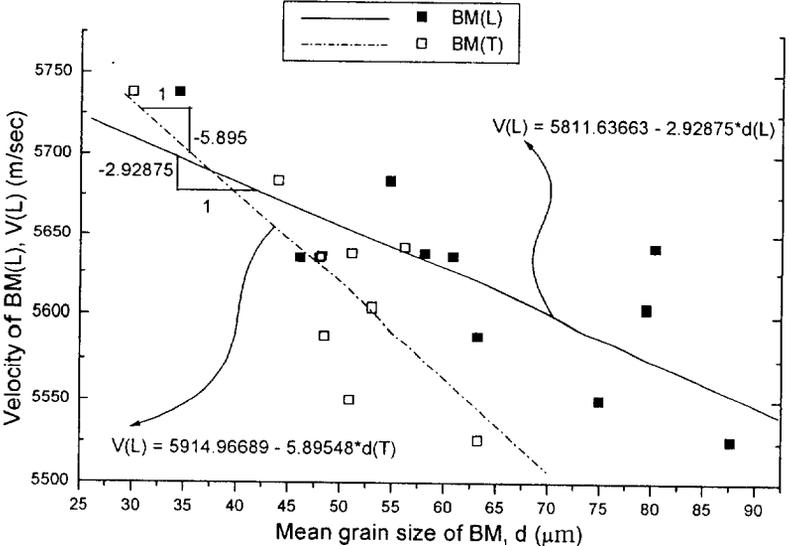


Fig. 6. 17 Relationship of BM grain size and $V(L)$

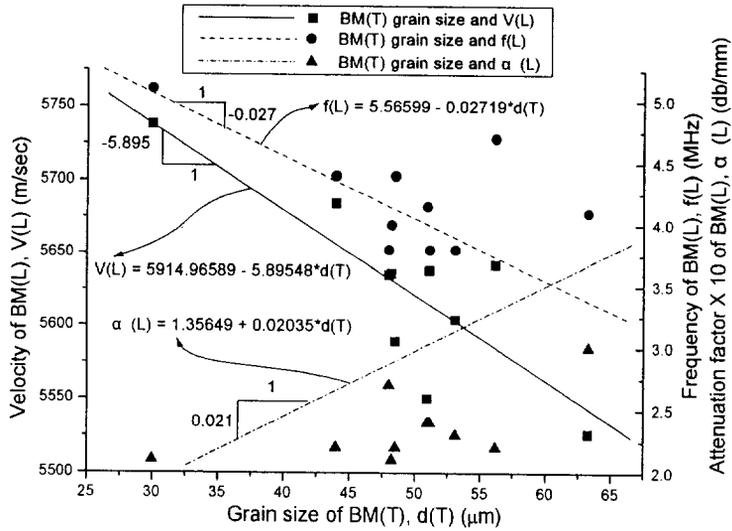


Fig. 6.18 Relationships of BM(T) grain size and V(L), α(L), f(L)

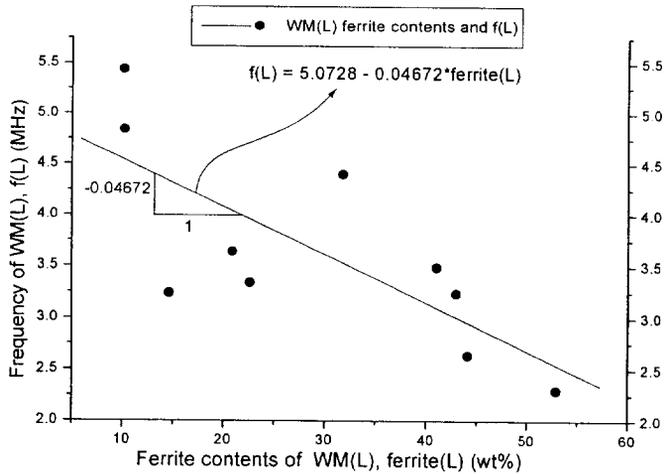


Fig. 6.19 Relationship of WM(L) ferrite contents and f(L)

이상의 실험 결과로부터 재료의 경년열화나 용접공정 등에 의한 결정립의 이방성, 2상조직, 석출물 등의 조직 분포의 불균일과 초음파 파라미터의 상관 관계를 정량화 할 수 있음을 확인하였다. 이로부터 가동중 시설의 경년열화 평가에도 응용이 가능하며 특히 중심주파수 분포의 조직변화에 대한 민감도가 종파속도나 감쇠계수에 비해 크므로 그 응용의 가능성이 더욱 클 것으로 판단된다.

6.4 L_{CR}파(표면파)법에 의한 잔류응력의 분석

초음파의 속도는 파의 종류, 매질특성 등에 의해 결정되며 L_{CR} 파는 잔류응력에 민감함을 이용하여 L_{CR}의 속도 및 주파수 분석을 통해 잔류응력을 측정하고자 하였다.

Fig. 6.20에 모재부 및 용착부로 진행시킨 L_{CR}파의 travel time(μ s), 속도 및 STFT분석에 의한 중심 주파수 분포를 나타내었다. 모재부의 L_{CR}파 속도 및 주파수는 대표값으로 약 3721m/s, 4.5MHz대에 분포하였으며, WM의 L_{CR}파 속도 및 주파수는 대표값으로 3561m/s, 2.5MHz대의 분포를 보였다. L_{CR}파 속도는 식(3-8)에 의하여, 모재부와 용착부의 잔류응력차는 식(3-11)로부터 도출하였다. 관계식으로부터 잔류응력차 $\Delta\sigma \approx 649.73\text{MPa} \sim 580.5\text{MPa}$ 로 나타났다.

본 실험에 의해 식(3-11)의 성립을 검증하였으며, 이러한 검증을 통해 모재부보다 용착부의 잔류응력이 더 높은 것을 확인할 수 있었다. 또한 Fig. 20으로부터 L_{CR}파 속도가 잔류응력에 민감함을 확인 할 수 있으며⁽²⁵⁻²⁶⁾, L_{CR}파의 f(L)분포는 속도와 그 거동을 같이 하였고, 잔류응력에 대한 민감도가 속도에 비하여 큰 것으로 나타났다.

Fig. 6.21에 모재부, HAZ, 용착부에 대한 L_{CR}파의 STFT분석 결과를 도시하였다. 모재부는 중심주파수 성분인 4.5MHz성분 이외에도 6MHz~7MHz대의 고주파수 성분이 다량 존재하지만 용착부는 고주파수 성분이 거의 없음을 알 수 있다. 모재부의 고주파수 성분이 감소한 원인으로는 6.1절 및 6.2절에서 고찰한 바와 같다.

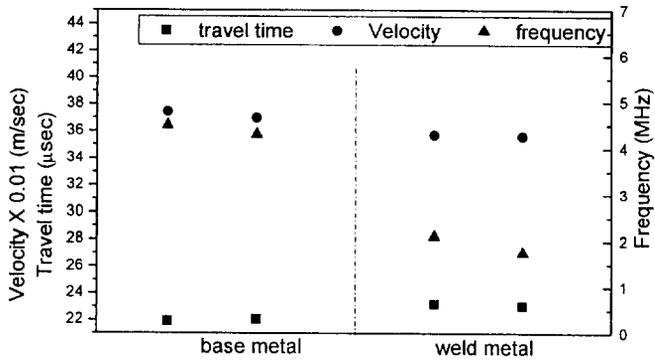


Fig. 6.20 Travel time, velocity and frequency analysis of L_{CR} wave (sampling rate 10MHz)

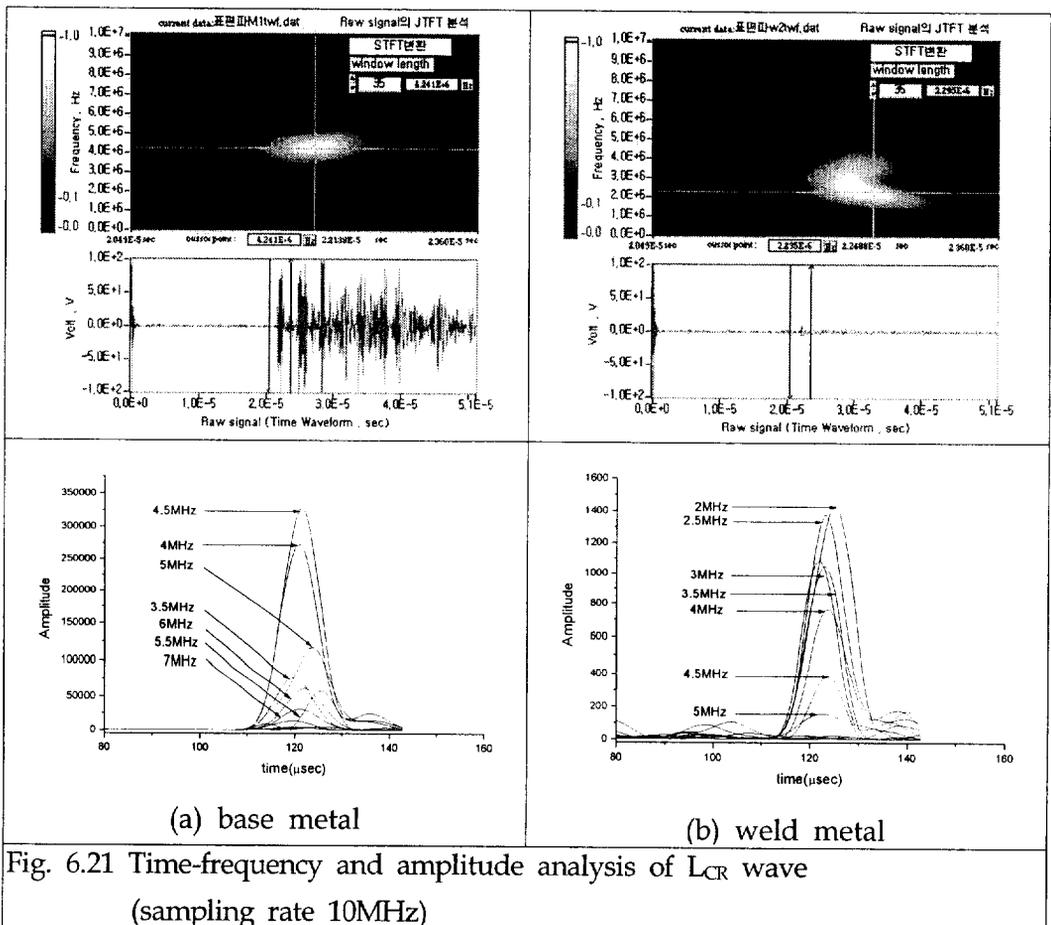


Fig. 6.21 Time-frequency and amplitude analysis of L_{CR} wave (sampling rate 10MHz)

6.5 Paris법칙의 재료상수와 초음파 파라미터와의 상관관계

Fig. 6.22에 STS 316L 용접부에서 얻어진 Paris법칙의 재료상수 m 과 $\text{Log}C$ 와의 상관관계를 나타내었고, Fig. 6.23에 STS 316L 용접부의 초음파 파라미터 $\alpha(L)$ 와 $V(L)$, $f(L)$ 와의 상관관계를 나타내었다. 또한 Fig. 6.24에 Paris법칙의 재료상수 m 과 $\alpha(L)$ 와의 상관관계를, Fig. 6.25에 Paris법칙의 재료상수 C 와 $V(L)$, $f(L)$ 와의 상관관계를 나타내었다.

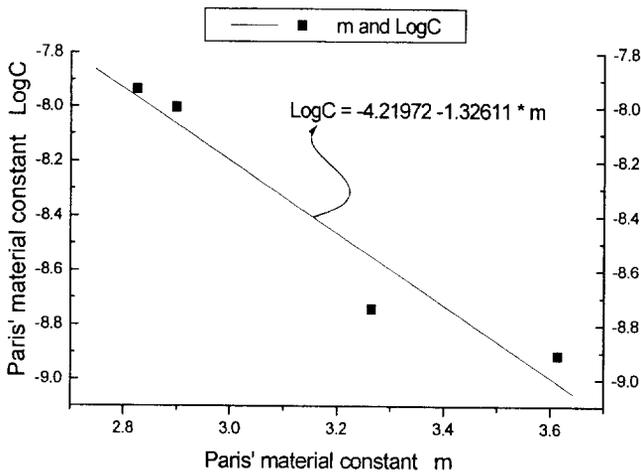


Fig. 6.22 Relationship of m and $\text{Log}C$

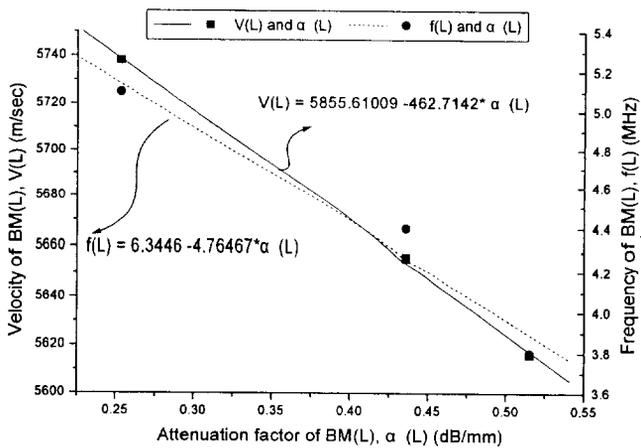


Fig. 6.23 Relationships of $\alpha(L)$ and $V(L)$, $f(L)$

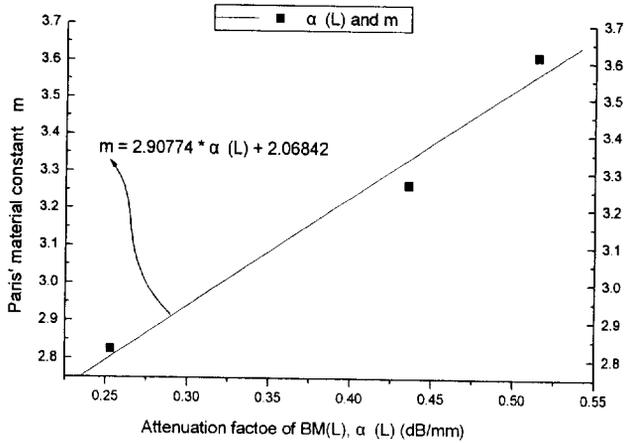


Fig. 6.24 Relationship of $\alpha(L)$ and m

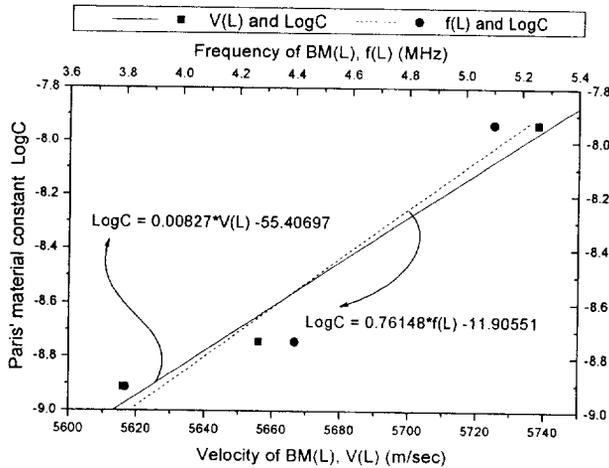


Fig. 6.25 Relationships of LogC and $V(L)$, $f(L)$

피로시험상수와 초음파 파라미터와의 상관관계를 분석한 결과 $\alpha(L)$ 는 Paris 법칙의 재료상수 m과 유사한 거동을, $V(L)$ 및 $f(L)$ 는 Paris법칙의 재료상수 C와 유사한 거동을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 Fig. 6.24 및 Fig. 6.25에 의해 $\alpha(L)$ 은 m를 반영하는 인자로서, $V(L)$ 및 $f(L)$ 는 C(또는 LogC)을 반영하는 인자로서 초음파 파라미터에 의한 피로수명 및 피로균열 전진속도의 정량적 평가가 가능한 것으로 판단된다.

6.6 피로균열진전 거동에 따른 음향방출

음향방출법은 최근 가동 중 시설의 균열의 발생 및 진전을 검출하고 분석하는 비파괴 검사에 한 방법으로 초음파 법과 마찬가지로 원거리에서 실시간적인 검사가 가능하며 균열발생 시 초기 검출이 가능하므로 원자력 관계시설의 안전관리 차원에서도 유용할 것으로 판단된다. 그러나 음향방출법에 의한 분석결과는 검출 장비 및 분석 시스템, 재료특성에 따라 다르게 나타나므로 구조물에 사용된 재료특성 및 검출 장비 등에 대한 철저한 분석이 필요하며 가동중 시설에서 발생하는 잡음처리, AE신호의 진행 거리 차에 대한 AE 파라메타 보상을 위한 source location 기술 개선 및 검출된 신호의 해석에 필요한 막대한 전문적 지식 및 기술이 필요하다는 점과 대용량 data의 신속하고 정확한 해석을 위해 고기능 컴퓨터가 필요하다는 점 등, 아직 극복해야 할 문제점이 산재해 있다. 본 실험에서도 피로시험의 시험시간이 길다는 특성상 대량의 AE신호 발생으로 인해 전체 신호를 저장·처리할 수 없었고 따라서 누적 카운터에 의한 분석이 불가능하였다.

본 연구에서는 원자력 배관에 많이 사용되고 있는 STS 316L 용접부의 피로 균열발생 및 진전거동에 따른 음향방출 특성을 분석하여 원거리 실시간 검사 시스템 개발을 위한 기초 data를 마련하고자 한다.

STS 316L 용접부의 AE신호(음향방출신호)에는, 주로 높은 진폭을 가지며 균열의 진행시에 방출되는 돌발형과 낮은 진폭을 가지며 slip의 이동, 소성변형, 파면마찰 등의 경우에 방출되는 연속형으로 나눌 수 있다. 본 실험에서는 파형 분석법, pattern 인식법 및 음향방출 활성화 분석법에 의해 피로시험 중에 검출된 AE 신호를 분석한 결과, 크게 Type I, Type II 및 Type III의 세가지 진신호 및 잡음신호로 분류 할 수 있었다. 이러한 신호는 전 피로시험중에 일정주기로 반복되는 것으로 나타났다. 따라서 이 세가지 Type의 신호를 피로하중의 부하 및 제하의 피로 1cycle 당 검출되는 AE신호로 판단하였다.⁽²²⁾

피로하중의 부하 및 제하의 피로 1cycle 당 검출되는 AE신호를 분석한 결

과, 균열진전에 의한 돌발형 신호(Type I), 균열단합과 그에 따른 파면마찰시의 fretting에 의한 부식 생성물 및 산화물의 분쇄 시 발생하는 신호(Type II), 균열 열림 및 그에 따른 파면마찰에 의한 신호(Type III), 잡음신호의 대표적인 4가지 형태로 분류 할 수 있었다. 또한 Type I 및 Type II 신호는 다시 Type Ia, Ib, Ic, IIa, IIb로 세분할 수 있었고 전 피로균열 진전과정에서 이러한 Type I, Type II, Type III신호 및 잡음신호가 주기적으로 반복되는 것으로 나타났다. 또한 잡음신호를 검출하기 위해, 균열의 거의 진전이 없는 것으로 고려되는 예비균열 삽입의 초기단계에 AE신호를 검출하고 분석한 결과 전기적 잡음, 시험편과 고정편의 마찰에 의한 것으로 피로시험의 응력비 (R=0.1로 일정) 및 하중반복수(10Hz)에 의존하며 1MHz의 저주파수에 amplitude(V, 또는 에너지 스펙트럼) 역시 일정하였다. 따라서 본 논문에서도 잡음신호는 무시하고 진신호만을 분석하였다. Table. 6.1에 316L 스테인리스강 용접부의 피로 균열 진전 거동에 따른 AE신호의 분류표를 Fig. 6.26에 Table. 6.1에 의한 AE신호의 분류 기준에 대한 그림을 나타내었다.

Table. 6.1 Classification of AE signals

Type	특 징
Type Ia	단순돌발형, 200-350KHz, amplitude(v)가 낮고 주파수의 감쇠가 심하며 분포가 단순
Type Ib	돌발형, 200-500KHz, amplitude(v)가 높고 주파수의 감쇠가 심하며 분포가 단순
Type Ic	돌발형, 200-900KHz, amplitude(v)가 높고 주파수의 감쇠가 심하며 분포가 단순
Type IIa	돌발변형, 200-500KHz, amplitude(v)가 낮고 주파수의 감쇠가 심하며 분포가 복잡
Type IIb	돌발변형, 200-800KHz, amplitude(v)가 낮고 주파수 감쇠가 심하며 분포가 복잡
Type III	연속형, 100-350KHz, amplitude(v)가 일정하며 주파수 분포가 단순

응력비 R = 0.1 , 하중반복수 10Hz, sampling rate 2MHz

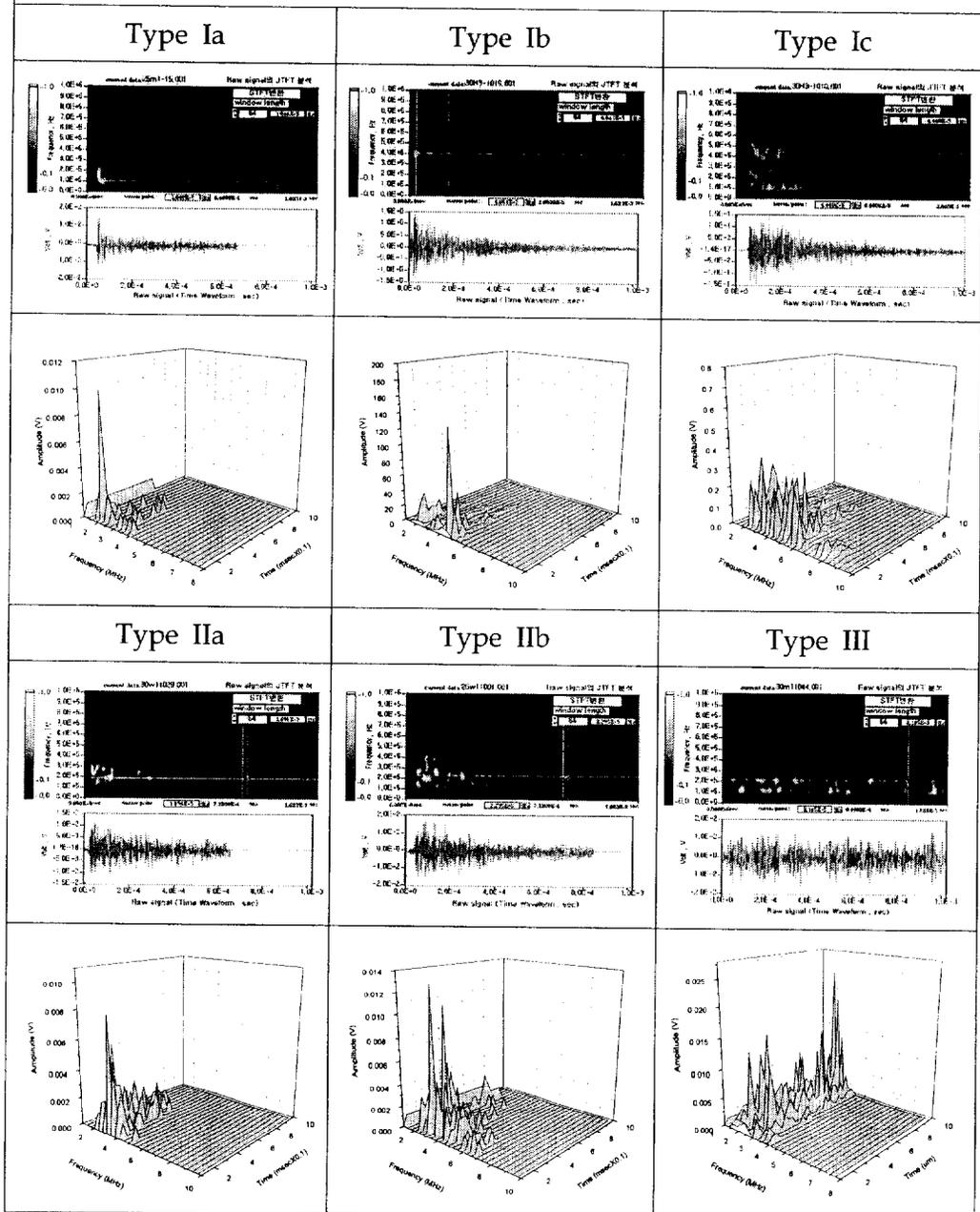


Fig. 6.26 Classification of AE signals by waveform and STFT(3D)

응력비 R = 0.1 , 하중반복수 10Hz, sampling rate 2MHz

BM(LT)

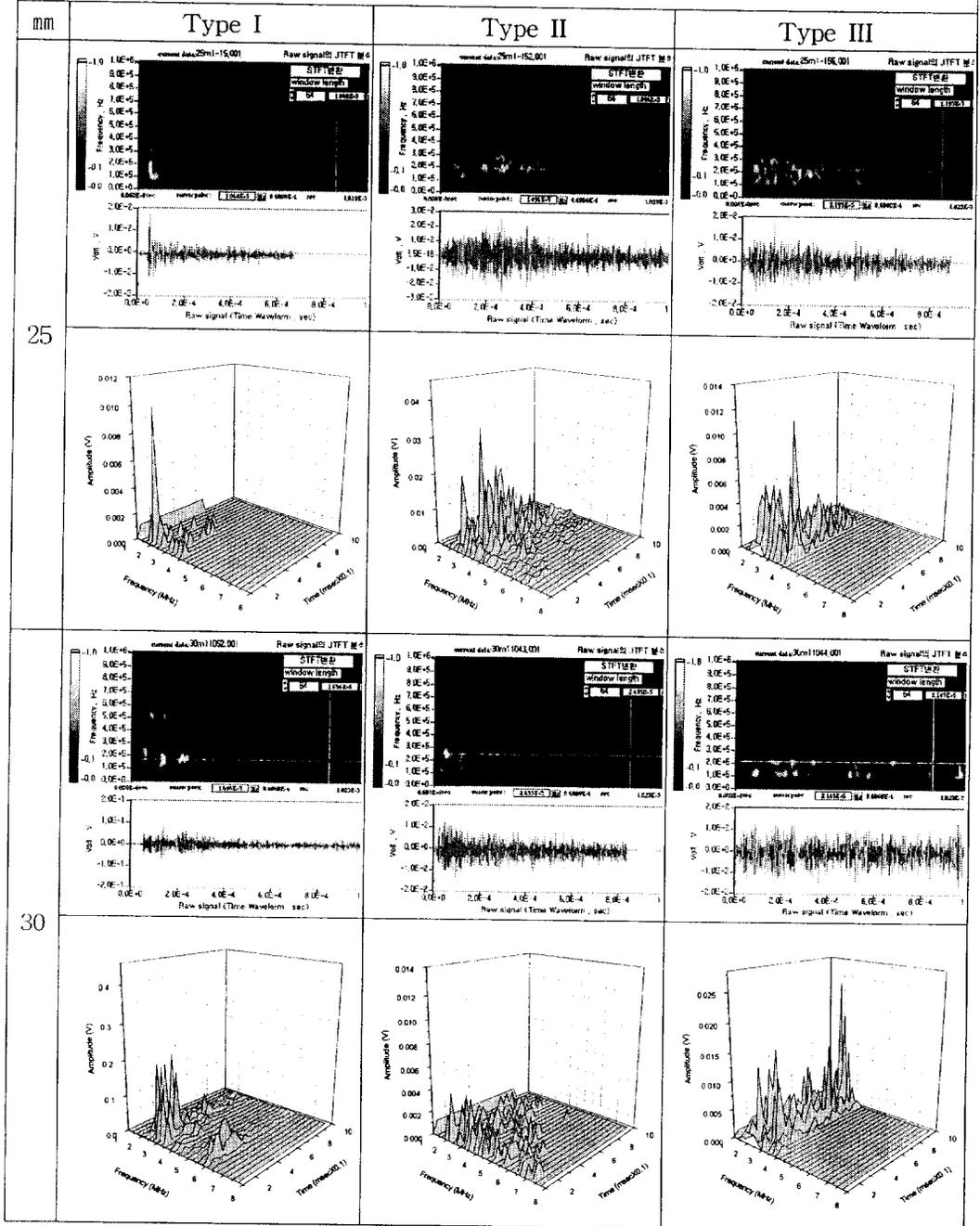


Fig. 6.27 AE wave form and time-frequency analysis on each crack length of BM(LT)

응력비 R = 0.1 , 하중반복수 10Hz, sampling rate 2MHz

BM(LT)

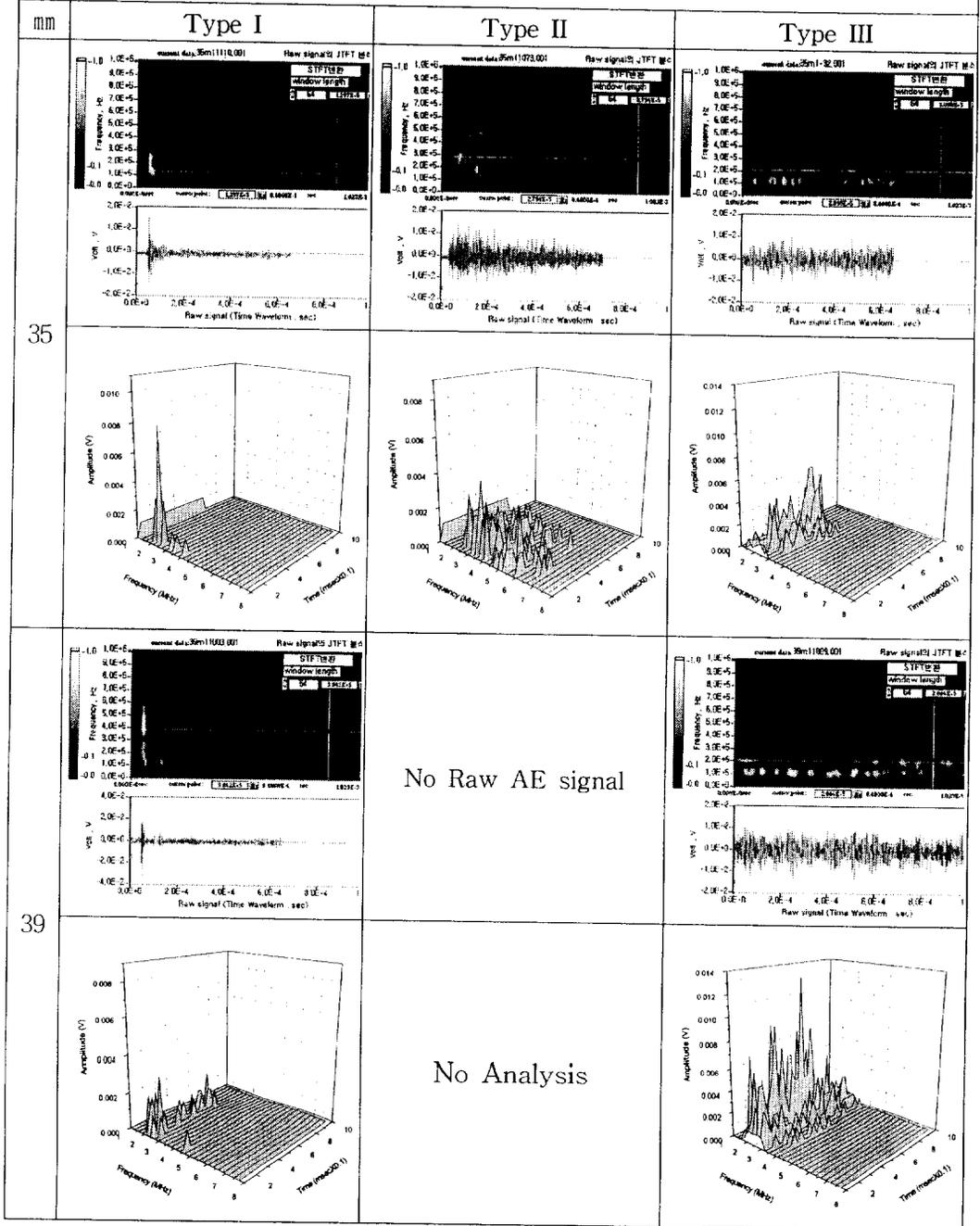


Fig. 6.27 Continued

Fig. 6.27은 피로균열 진전 거동에 따른 AE 특성 평가를 위해 BM(LT)의 피로 균열길이 25mm, 30mm, 35mm, 38mm에서의 각 AE신호를 분석한 결과이다. 균열 진전 속도가 빨라짐에 따라 Type I 신호가 2~3개 씩 겹쳐서 수신되는 겹친 돌발신호 및 돌발신호와 연속신호가 겹쳐서 수신되는 돌발-연속형의 복합형신호의 event 수가 증가하였다. 전체적으로 피로 균열이 진전됨에 따라 각 Type의 event수가 증가하였으나 stage IIc에 해당되는 고 ΔK 영역에서는 Type II의 event수가 거의 없었으며 Type I 및 Type III의 event수만이 증가하였다. 이는 저·중 ΔK 의 안정 피로파괴 영역에서는 피로 cycle 과정에서 제하 - 균열단힘 - 균열진전 - 부하 - 균열열림 - 균열진전의 반복과정을 거쳐 균열이 성장하고 AE신호 역시 이에 따라 주기적으로 반복되지만 피로파괴 stage IIc의 고 ΔK 영역에서는 피로 균열의 진전이 매우 빠르며 제하 - 균열진전 - 부하 - 균열열림 - 균열진전의 반복과정으로 균열 단힘이 거의 일어나지 않기 때문인 것으로 판단된다. 각각의 피로균열길이 25mm, 30mm, 35mm, 39mm에서 Type I의 중심주파수대는 각각 1~2MHz, 1~2.5MHz, 1~3MHz, 3~5MHz, amplitude(에너지 스펙트럼, V)는 각각 20mV, 30mV, 60mV로 균열진전 속도가 빨라짐에 따라 수신되는 AE신호의 중심주파수 분포 및 amplitude가 증가하였으며 rising time은 100 μs , 10 μs , 1 μs 로 감소하는 것으로 나타났다. 또한 Type II는 균열 단힘에 의한 파면마찰 및 fretting에 의한 부식생성물 및 산화물의 분쇄에 의한 신호가 겹쳐있으므로 각각의 피로균열길이에서의 주파수성분의 분포대가 1~4MHz, 1~5MHz, 1~6MHz로 넓게 분포하며 Type I과 같이 균열진전속도가 빨라짐에 따라 주파수 성분의 분포대가 높아지는 경향을 나타내었다. 그러나 Type III의 경우 균열진전 속도가 빨라짐에 따라 각 균열 길이에서의 event 수는 증가하였고 중심주파수 성분은 1~3MHz, 1~2.5MHz, 1~2MHz의 순으로 낮아지는 경향이 있었으며, amplitude의 변화는 관찰되지 않았다. 이는 위에서 고찰한 바와 같이 Type III의 경우 균열 열림시의 파면마찰에 의한 AE신호이므로 균열진전의 후반으로 갈수록 제하-균열진전-부하-균열열림-균열진전의 반복과정으로 균열 단힘이 거의 일어나지 않고 균열이 거의 열린 상태에서 진전하므로 파면마찰은 일어나지만 마찰이 그다지 강하지 않기 때문인 것으로 판단된다.

BM(TL), WM(LT) 및 HAZ(LT)의 피로균열진전에 따른 AE거동에 있어서 BM(LT)와 파형 및 amplitude 분포는 BM(LT)에 비하여 다소 복잡해지고 변형된 파형이 많았다. 특히 WM(LT)의 경우 개재물 분리, 균열의 지그재그 진전 등에 의해 파형 및 amplitude의 분포는 더욱 복잡해 졌으나 피로균열의 진전

에 따른 전체적인 거동은 BM(LT)와 유사하였으므로 분석결과의 도시는 생략한다.

본 실험의 고찰 결과로써 이러한 신호의 수신 개시점으로부터 피로균열의 발생시기를 검출할 수 있으며, Type I 및 Type II 신호의 중심 주파수와 amplitude의 증가 및 Type I 신호의 rising Time의 감소로부터 피로 균열 진전 속도가 증가하고 있음을 예측할 수 있는 것으로 판단된다. 이러한 고찰 결과로부터 가동 중 시설의 피로 균열발생 및 감시 시스템으로서의 AE(음향방출)의 유효성은 확인할 수 있었으나, 고기능 대용량 컴퓨터 시스템이 필요하며 denosing(잡음처리), source location(위치표정) 등의 AE 신호처리 기술상 극복해야 할 과제가 많은 것으로 판단된다.

7. 결론

STS 316L 용접부의 모재부, HAZ 및 용착부의 초음파특성 및 열화 특성을 분석하고 각부의 피로균열 전파특성에 따른 음향방출 특성을 평가한 결과, 다음의 결론을 얻었다.

(1) 모재부, HAZ 및 용착부의 경도는 모재부의 경도가 HAZ나 용착부에 비해 높게 나타났다.

(2) 균열이 HAZ를 따라서 진전하는 HAZ(LT)이 가장 긴 피로수명을 보였으며, BM(LT), BM(TL)에 이어서 WM(LT)가 가장 낮은 피로수명을 나타내었다. 또한 ΔK 에 대한 균열진전속도 da/dN 은 전반부에는 HAZ(LT)가 가장 느리고 WM(LT), BM(LT), BM(TL)의 순으로 나타났으나, 후반부에는 BM(LT)가 가장 느리고 BM(TL), H(L-T)에 W(L-T)의 순으로 나타났다.

(3) 종파속도 및 중심주파수는 모재부가 가장 높고 HAZ, 용착부의 순으로 나타났다으며 감쇠계수는 용착부가 가장 높고 HAZ, 모재부의 순으로 나타났다. 종파속도와 중심주파수 분포는 유사한 거동을 보이거나 감쇠계수는 종파속도와 상반되는 거동을 보였다.

(4) 열화처리에 따른 조직변화에 있어서 결정입도 및 이방성이 클수록 모재부의 종파속도 및 중심주파수 분포는 감소하는 것으로 나타났으며, 감쇠계수는 이와 상반되는 거동을 보였다. 또한 용착부의 페라이트 함량 및 페라이트의 분포 이방성이 증가할수록 중심주파수 분포가 저하되는 것으로 나타났다.

(5) L_{CR} 과에 의한 동종 재료간의 잔류 응력 관계식으로부터 이종 재료간의 잔류응력 관계식을 도출하였으며, 관계식의 정량화 및 명확한 규명을 위해 좀 더 깊은 연구가 필요한 것으로 판단된다.

(6) 종파속도 및 중심주파수는 Paris 재료상수 C 와 유사한 거동을 보이며 감쇠 계수는 Paris 재료상수 m 과 유사한 거동을 보이는 것으로 나타났다.

(7) AE신호의 패턴인식법과 파라미터에 의한 AE신호 활성화도 평가법의 복합적인 분석으로부터 가동 중 시설의 피로수명을 예측할 수 있는 것으로 판단되나 denosing 처리, source location 기술 개선, 대용량 data의 실시간적인 고속처리를 위한 고성능 분석 시스템의 요구 등 아직 해결해야할 문제점이 많은 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) 대한 용접학회, "용접 집합 편람" 명현문화사 pp. 153~165, 1998.
- (2) 오세규, 정순억, "최신용접공학" 진성각, pp. 140, pp. 206, 1998.
- (3) 양훈영, "개정판 신금속재료과학" 문운당 pp. 279~286, 1999.
- (4) Posco "오스테나이트계 스테인리스 용접 Data Book", pp. 94~111, 2001.
- (5) 小川和博 外5, ステンレス鋼溶接熱影響部の耐孔食性と靱性に 及ぼすW の影響, 日本溶接學會論文集, Vol.13 No. 4 pp. 590~596, 1995.
- (6) J. A. Brooks, A. W. Thompson and J. C. Williams, Welding Research Supplement, 63, 71-S, 1980.
- (7) 西本和俊, "ステンレス鋼の溶接", 溶接學會誌, Vol. 66, No. 3, pp. 156~173, 1997.
- (8) 渡辺健彦 外2, オーステナイトステンレス鋼溶接熱影響部の結晶粒成長舉動と溶接金屬との關係", 溶接學會論文集, Vol. 13, No. 2, pp. 262~269. 1995.
- (9) 이택순, 양현태, "SUS304강 용접부의 잔류응력이 피로균열진전속도에 미치는 영향", 대한용접학회지, Vol. 15, No. 4, pp. 413~419, 1997.
- (10) 정기송, 강인찬, "용접한 AISI 304 스테인리스강의 피로균열 성장거동", 대한금속학회지, Vol. 27, No. 6, pp. 503~512, 1989.
- (11) 배성인 한민국 역, "파괴역학실험법", 원창출판사, pp. 82~84, pp. 157~167, 1993.
- (12) 탄성파이용기술연구회, 탄성파이용기술 입문 시리즈 제 1권 "음향방출", pp. 1~45
- (13) 한국비파괴검사학회, "음향방출시험 (I)" pp. 6~13,
- (14) 정희돈 외2, "용접부검사법으로서의 Acoustic Emission", 대한용접학회지, Vol. 11, No. 2, pp. 1~12, 1993.
- (15) 新妻弘明 外2, "周波數解析にもとづくAE發生パターンの分類と微示破壊過程", 日本非破壊検査學會, Vol. 30, No. 11, pp. 903~910, 1980.
- (16) 岸輝雄 外2, "AE原波形解析手法の確立と破壊の動的舉動解明への適用", 日本非破壊検査學會, Vol. 30, No. 11, pp. 911~917, 1980.
- (17) KiWoo Nam, "Acoustic Emission from Surface Fatigue Cracks in SS41 Steel", Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., Vol.22, No.12, PP. 1103-1109, 1999.

- (18) 윤동진, 정중채, 박휘립, 김기복, 이승석, " study on the fatigue crack Behavior by the stress Intensity Factor and AE Parameters, 비파괴검사학회 Vol.20 /No.5, 2000.
- (19) 이상기, 도재운, 남기우, 강창룡, 안 석환, " 316L stainless steel의 피로균열진전거동과 음향방출신호의 주파수특성", 한국동력기계공학회지, Vol.4, No.2, 2000.
- (20) 이견찬, "시간-주파수 해석법에 의한 음향방출 및 초음파 신호의 비파괴적 특성평가에 관한 연구", 부경대학교 졸업논문, pp. 40~49, 1999.
- (21) 이충현, 김경애, " 초음파 탐상검사", 세진사, pp. 183~189, 1999.
- (22) 이견찬, 오정환, 남기우, 이주석 "열화된 SUS316강의 시간-주파수 해석에 의한 비파괴평가", 비파괴검사학회지, Vol.19, No.4, 1999.
- (23) 남영현, " Evaluation of Fracture Appearance Transition Temperature to pressure Vessel by Ultrasonics, 비파괴검사학회지, Vol.20, No.5, 2000.
- (24) 장영수, 김진호, 정현조, 남영현, " 시간 및 주파수 영역에서의 신호처리 기술에 의한 초음파 속도와 감쇠의 측정" 비파괴검사학회지, Vol.19, No.2, 1999.
- (25) 박익근, 이철구, "음탄성에 의한 비파괴적 잔류응력 측정", 대한용접학회지, Vol. 17, No. 2 pp. 26~27, 1999.
- (26) 김정환 "LCR초음파기법에 의한 잔류응력 평가에 관한 연구", 부경대학교 졸업논문, pp. 62, 2001.
- (27) P.Palanichamy, A Joseph, T. Jayakumar and Baldev Raj, "Ultrasonic velocity measurements for estimation of grain size in austenitic stainless steel" , NDT&E international Vol. 28. No. 3, pp. 179~185, 1995.
- (28) P.Palanichamy, A Joseph, T. Jayakumar and Baldev Raj, "Ultrasonic determination of grain size variations around weldments", NDT International Vol. 23 Number 4, 1990.
- (29) Ki-Woo Nam, Kun-Chan Lee, Jeong-Hwan Oh "Application of Joint Time Frequency Analysis Methods of Nondestructive Evaluation", AMD-Vol.234/NDE-Vol.17, ASME The International Mechanical Engineering Congress, 67-74, 1999.

Nomenclature(기호설명)

V : 초음파속도	f : 주파수	E : 종탄성계수	ρ : 밀도
ν : 포와송비	V_L : 종파속도	λ : 파장	α : 종파감쇠계수
ρ_m : 모재부 밀도	ρ_w : 용접부 밀도	Δda : 확산손실분	
C : 비례상수	Z : 음향임피던스		
BM : 모재	HAZ : 용접열영향부	WM : 용착금속부	
(LT) : 압연면-너비 방향			(TL) : 압연면-길이 방향
$HAZ(LT)$: HAZ의 (LT)방향 균열진행 시험편	$WM(LT)$: WM의 (LT)방향 균열진행 시험편		
$BM(TL)$: BM의 (TL)방향 균열진행 시험편	$BM(LT)$: BM의 (LT)방향 균열진행 시험편		
(L)방향 : 압연면 상에서 두께방향으로 측정	(T)방향 : 두께면 상에서 너비방향으로 측정		
$V(L)$: L방향 종파속도	$\alpha(L)$: L방향 종파감쇠계수	$f(L)$: L방향 종파중심주파수	
$V(T)$: T방향 종파속도	$\alpha(T)$: T방향 종파감쇠계수	$2T$: 빔의 총 진행거리	
T : 표면파 진행시간	V_{LCR} : LCR파 속도	W : 표면파 진행거리(82mm로 고정)	
E_m : 모재부 종탄성계수	ΔE : 종탄성계수 변화량	E_w : 용접부 종탄성계수	
V_{mLCR} : 모재부의 LCR파 속도	V_{wLCR} : 용접부의 LCR파 속도		
$\Delta \sigma_r$: LCR파의 속도 변화량에 따른 잔류응력 변화량			
ΔT_{LCR} : 가해진 응력에 의한 travel time 변화량			
T_{0LCR} : 응력을 받기 전 초기의 travel time			
ΔE : 가해진 응력에 의한 종탄성계수 변화량			
ΔZ : 음향임피던스($\rho \cdot V$) 변화량			
T_{mLCR} : 응력을 받기 전 초기의 모재부 LCR파 travel time			
ΔZ : 가해진 응력에 의한 음향임피던스 변화량			
T_{wLCR} : 용접에 의한 잔류응력이 가해질때의 용접부 LCR파 travel time			

감사의 글

어렵게 시작한 석사과정을 되돌아보면 어느새 이렇게 멀리까지 왔나하고 놀라게 되지만 힘들었던 만큼 저에게도 많은 발전이 있었던 뜻깊은 날들이었다고 생각합니다. 항상 몰심 양면으로 보살펴주시고 부족한 저에게 격려의 말씀과 채찍질을 아끼지 않으셨던 지도 교수 남기우 교수님께 진심으로 머리 숙여 감사드립니다. 또한 논문이 완성되기까지 지도 편달을 아끼지 않으신 김선진 교수님, 김영수 교수님, 정호신 교수님, 안석환 교수님께도 감사드립니다.

일본유학 중에 동생처럼 보살펴 주셨던 박인덕 선배를 비롯하여 시험편을 제작해주신 부산 기능대학교 도재운 교수님, 항상 힘이 되어준 실험실의 종순 선배, 현수, 진환, 정환, 광래, 추이리, 민중에게도 감사를 드리며, 어려울 때 옆에서 많이 도와준 착하고 이쁜 후배 승연이에게도 깊은 감사의 말을 전합니다. 미경 언니, 건찬, 상기, 현정을 비롯한 일본 유학 중인 선·후배님들과 항상 실험실에 활력을 불어넣어 주었던 미경이와 자문이에게도 감사의 말을 전합니다.

지금의 제가 있도록 해주신 어머니와 따뜻한 정으로 보살펴 주신 언니들과 오빠에게 감사를 드리며 실험이 잘되지 않아 포기하고 싶을 때 항상 따뜻한 위로와 함께 커피를 안겨 주었던 내 가장 친한 친구 영아에게도 감사의 말을 전합니다.

마지막으로 석사과정을 무사히 마칠 수 있도록 도와주신 주위의 여러분들께 감사드리며 인간적인 신뢰와 사제의 정을 느낄 수 있게 해주신 남기우 교수님께 다시 한번 깊은 감사의 말씀을 올립니다.