

2007년 2월

석사학위 논문

STS-304 용접부 피로수명에 관한 연구

조선대학교 대학원

첨단소재공학과

조 성 훈

STS-304 용접부 피로수명에 관한 연구

A study on the fatigue limit test of welded STS-304

2007년 2월 일

조선대학교 대학원

첨단소재공학과

조 성 훈

STS-304 용접부 피로수명에 관한 연구

지도교수 박 창 선

이 논문을 첨단소재공학 석사학위신청 논문으로 제출함.

2006년 10월 일

조선대학교 대학원

첨단소재공학과

조 성 훈

조성훈의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 추현식

위 원 조선대학교 교수 이길홍

위 원 조선대학교 교수 박창선

2006년 11월 일

조선대학교 대학원

목 차

제1장 서론	1
제2장 이론적 배경	3
제1절 피로시험	3
1. 피로시험 관련이론	3
가. 피로 수명	3
나. 피로수명에 영향을 미치는 인자	3
다. 피로 파괴의 3단계	4
2. 용접부의 피로한도 및 설계	5
가. 피로시험 및 S-N 곡선	5
나. 용접이음의 피로설계	6
제2절 응력집중	8
제3절 용접잔류응력	9
제4절 STS-304 소켓용접부의 특성	10
1. STS-304 재질 특성	10
2. 소켓 용접이음의 특성	12
제3장 실험 방법	14
제1절 실험 개요	14
제2절 실험재료 및 시편	15
1. 실험재료	15
2. 피로시험 시편 제작	15
제3절 피로시험과 S-N 곡선의 작성	18
제4절 용접부 파면검사 및 미세조직 분석	20

1. 파단면 검사	20
2. 미세조직 관찰	20
3. 조직 성분분석 및 경도시험	21
제4장 시험결과 및 고찰	22
제1절 용접부 비파괴검사 결과	22
제2절 피로시험결과	24
제3절 피로파단부위 관찰 및 분석결과	26
1. 파단면 관찰	26
2. 피로파단면 확대 관찰 및 분석결과	30
제4절 용접부의 미세조직 분석결과	35
1. 전자 광학현미경 미세조직 관찰	35
2. 경도 실험 분석 결과	41
3. EDS 성분검사	45
제5장 결론	47
참고 문헌	49

List Of Tables

Table 2-1. Chemical Composition of STS-304 Soket Materials	11
Table 2-2. Mechanical Propreties of STS-304 Soket Meterials	11
Table 3-1. Chemical Composition of Pipe and Socket (wt%)	15
Table 3-2. Physical Test Result of Pipe and Socket	15
Table 3-3. Welding Conditions Applied in This Research	16
Table 3-4. Chemical Composition of Welding Rod (wt%)	16
Table 3-5. Dimension of 4-Point Bending Fatigue Specimen	17
Table 4-1. Fatigue Failure Test Result of STS-304	24
Table 4-2. EDS Test Result	45

List of Figures

Fig. 2-1.	Status Diagram of Fatigue Fracture	4
Fig. 2-2.	S-N Curve	6
Fig. 2-3.	Configuration of Stress Concentration	8
Fig. 2-4.	Austenitic Grain Boundary in STS-304, revealed by Acetic Glyceria	11
Fig. 2-5.	Example of Socket Welded Joint	12
Fig. 2-6.	Configuration of Stress Distribution in Filet Welded Zone	13
Fig. 3-1.	4-Point Bending Fatigue Tester	14
Fig. 3-2.	Configuration of Socket Welded Specimens	16
Fig. 3-3.	Drawing of 4-Point Bending Fatigue Specimen	17
Fig. 3-4.	Load Distribution of 4-Point Bending Fatigue Test	18
Fig. 3-5.	Load Distribution and Moment in 4-Point Bending Fatigue Specimen	19
Fig. 3-6.	Optical Microscope	20
Fig. 3-7.	Scanning Electron Microscope	21
Fig. 4-1.	Radiographs of STS-304 Socket Welded Joint Specimens of (a)500Kg, (b)600Kg, (c)800Kg, (d)1000Kg, (e)1200Kg	25
Fig. 4-2.	S-N Curve of STS-304 Socket Welded Joint	24
Fig. 4-3.	Toe Failure of Socket Welded Pipe Specimens	26
Fig. 4-4.	Root Failure of Socket Welded Pipe Specimens	27
Fig. 4-5.	Fractographs of Specimen Fractured under Fatigue Stress Amplitude of (a)500Kg, (b)600Kg, (c)800Kg, (d)1000Kg, (e) 1200Kg	28
Fig. 4-6.	Fractographs of Specimen Fractured under Fatigue Stress Amplitude of (a) 500Kg (b) 600Kg (c) 800Kg (d) 1000Kg (e) 1200Kg	29

Fig. 4-7.	Fractographs of Specimen Fractured under Fatigue Stress Amplitude of 500Kg : (a) Ductile Fractured Specimen, (b),(c) Fatigue Stress Fractured Specimen	31
Fig. 4-8.	Fractographs of Specimen Fractured under Fatigue Stress Amplitude of 600Kg : (a) Ductile Fractured Specimen, (b),(c) Fatigue Stress Fractured Specimen	32
Fig. 4-9.	Fractographs of Specimen Fractured under Fatigue Stress Amplitude of 800Kg : (a) Ductile Fractured Specimen, (b),(c) Fatigue Stress Fractured Specimen	33
Fig. 4-10.	Fractographs of Specimen Fractured under Fatigue Stress Amplitude of 1000Kg : (a) Ductile Fractured Specimen, (b),(c) Fatigue Stress Fractured Specimen	34
Fig. 4-11.	Optical Micrographs of 600Kg Fracture-Tested Specimen : (a), (b), (c) Heat-Affected Zone (d) Welded Metal Zone	36
Fig. 4-12.	Optical Micrographs of 1000Kg Fracture-Tested Specimen : (a), (b),(c) Heat-Affected Zone (d) Welded Metal Zone	37
Fig. 4-13.	Optical Micrographs of 600Kg Fracture-Tested Specimen : (a), (c) Heat-Affected Zone (b) Welded Metal Zone	38
Fig. 4-14.	SEM Image of Welded Metal : (a),(b) Heat-Affected Zone, (c)Welded Metal Zone	40
Fig. 4-15.	Micro Vickers Hardness of 500Kg Fracture-Tested Specimen	42
Fig. 4-16.	Micro Vickers Hardness of 1000Kg Fracture-Tested Specimen	43
Fig. 4-17.	Micro Vickers Hardness of 600Kg Fracture-Tested Specimen	44
Fig. 4-18.	EDS Peak of Welded Metal : (a), (b)Heat-Affected Zone, (c)Welded Metal Zone	46

ABSTRACT

A study on the fatigue limit test of welded STS-304

By Cho Seong-Hoon

Advisor : Prof. Park Chang-Sun Ph. D.

Department Advanced Materials Engineering

Graduate School of Chosun University

STS-304 is being used widely as piping systems in many industries and the socket welding is well known for very vulnerable to the fatigue although it is being used most because of simple work process. However, there are few cases of the fatigue characteristic evaluation about the socket welding part of small-sized pipes in Korea.

Kori unit 3 was shut downed in Oct. 21, 1985 due to the leakage of the weld area in small bore piping. Since then, we have several experiences of weld area leaking. Similar situations are reported in foreign Nuclear Power Plants. In 1990's, 450 fatigue damages of piping were occurred in USA Nuclear Power Plants. An investigation shows that approximately 80% of total failures are related to socket weld connections in small bore piping. The related technology development is necessary as it is going operating time of domestic plants.

It is carried out the fatigue limit test of welded STS-304 for high cycle fatigue lifetime evaluation. In this research, it is analyzed the fatigue lifetime and characteristics of the socket welding part of 3/4 inch STS-304 pipe through S-N curve drawing, broken side observation, EDS analysis and hardness test.

(1) In the fatigue strength test, it is carried out that the load is imposed,

lowering it by 4% from 70% level of tension strength. Through the test, it is obtained the time to failure according to each shear stress working on specimen. As a result of the test, S-N curve is created that the high cycle fatigue limit is 95MPa and as the load increases, the life to failure decreases rapidly. It is thought that if it is imposed the load over the permissible shear stress of some material, it gets fatigued rapidly.

(2) In the fatigue failure characteristics analysis, the failure occurs toe part of the welding rather than root part of that for the most part. It is thought that it results from the stress concentration. In order to relieve this phenomena, it is important to maintain conclave formation or good surface condition.

(3) When a steel is welded, δ -Ferrite comes into existence at about 1500 °C and it makes worse the fatigue characteristics. It is recommended to compare the fatigue characteristics according to the amount of δ -Ferrite through heat treatment. Before that, it should be guaranteed that all specimens welded have the same quality.

The fatigue failure occurs frequently in bead, the welding material rather than original metal because the toe of bead causes the stress concentration by notch effect and surface defects such as undercut. The vibration in high temperature-pressure pipes is well known for the biggest reason for the high cycle fatigue.

In general, the tension residual stress is piled up around the part of welding and the part gets embrittled that it makes crack grow rapidly to the failure. In order to prevent the fatigue failure of welding material, it is needed to keep the design criteria such as strength, temperature, thickness and corrosion.

제1장 서론

최근 산업사회의 발전과 생활수준의 향상은 더 많은 전력수요가 예상되고 있으나, 원자력 발전소의 신설은 환경단체와 지역주민들의 반발로 어려운 상황에 직면해 있다. 더욱이 원자력 발전소가 국민들에게 생활 기피시설로 인식되면서 신규발전소의 입지난은 날로 심각해지고 있다. 따라서 이제는 새로운 발전소의 신설뿐 만 아니라 기존 발전설비의 수명관리에 대한 대책을 수립하는 것이 원자력 산업계의 중요한 관심사로 대두되고 있다.

일반 산업 플랜트에 비해 발전설비는 배관설비 구성비중이 매우 높으며, 그중에서도 소구경 배관의 비중이 높다. 하지만 일반적으로 배관은 능동형기기인 펌프나 터빈과 같이 회전기기에 비해 고장이 적어 관심이 낮으나, 발전소의 운전기간이 증가함에 따라 배관의 손상사례가 증가하고 있다.

국내에서는 '85. 10. 21. 고리3호기 주증기 배관에 연결된 배기배관 용접부 누설로 발전 정지한 이래 여러 차례의 소구경배관 용접부 누설을 경험하였다. 미국 EPRI에서는 1990년대 미국 원전에서 피로손상을 조사한 결과 전체 손상 450 여 건 중 소구경배관 손상이 80%를 차지한다고 보고 하였으며, 소구경배관의 손상은 대구경배관에 비해서 곧바로 발전정지를 유발 시키지는 않지만 원전의 안정적 운영측면에서 저해 요인으로 작용하고 있다고 분석하였다^{1,2)}.

소구경 배관의 각 연결부분은 주로 용접으로 되어 있으며, 구조의 특성에 따라 Socket-welded joint, Butt-welded joint, Special slip-on joint 등의 용접형태를 가진다. 이들 용접연결부는 용접시 발생하는 용접열로 인하여 국부적인 팽창 및 수축 등의 열 소성변형이 생기고 항복응력에 준하는 인장잔류응력과 기하학적 형상 등에 의하여 발생하는 응력집중현상 등으로 인해 다른 부분에 비해 파괴 및 피로강도가 크게 저하되는 부분이다. 특히 작업의 간편성으로 소구경 배관에 가장 많이 사용되고 있는 소켓용접은 피로응력에 대단히 취약한 것으로 알려져 있다³⁾.

하지만 아직 국내 산업계에서는 소구경 소켓용접부의 피로특성평가를 수행된 사례가 적어 앞으로 이 분야에 대한 연구가 시급한 설정이다. 따라서 원자력 발전소를 비롯하여 일반 산업계에 가장 많이 사용하는 STS-304 스테인레스강 용접부에 대한 피로수명을 연구하는 것은 매우 유용한 실험이라 사료된다.

본 논문에서는 원자력발전소의 발전정지를 유발하는 3/4인치 STS-304 소구경 배관 용접부 손상의 주요인이 되는 고주기피로파괴의 원인을 규명하기 위해 수명평가를 위한 S-N 곡선을 작성하고, 사용되고 있는 용접부와 유사한 조건을 가진 피로시험용 시편을 제작하여 조직을 분석하고, 피로시험을 통하여 결과를 분석함으로써 최적의 배관 용접부의 조건을 규명하고자 한다.

제2장 이론적 배경

제1절 피로시험

1. 피로시험 관련이론

가. 피로 수명(Fatigue Life)

어떠한 반복응력 범위의 하중을 받을 때 파괴시 까지 재료가 견디는 반복 횟수를 피로수명(Fatigue Life)이라고 하며, 반복횟수에 견디는 반복응력의 범위를 피로강도(Fatigue Strength) 혹은 시간강도라고도 한다.

한편, 하중을 무한히 반복하여 가해도 재료가 파괴되지 않을 때 그때의 응력범위를 피로한도(Fatigue Limit) 또는 내구한도(Endurance Limit)라 한다. 피로수명은 저주기 피로(Low Cycle Fatigue)와 고주기 피로(High Cycle Fatigue)로 구분되며, 저주기 피로는 10^4 회 정도의 반복하중 사이클에서 파괴가 일어나는 현상으로 고응력 피로 또는 소성피로라고도 하며, 고주기 피로는 작용응력이 매우 낮아 저주기 피로보다 피로 수명이 긴 경우로 일반적으로 $10^6 \sim 10^7$ Cycle 이상의 반복하중에서 파괴가 발생하는 현상을 말한다.

나. 피로 수명에 영향을 미치는 인자

피로수명에 영향을 미치는 인자 가운데 평균응력과 응력진폭을 들 수 있는데 평균응력 및 응력진폭이 높을수록 피로수명은 짧아진다. 표면 효과도 피로수명에 영향을 미치는데, 많은 구조재의 최대 응력은 표면에 걸리므로 대부분의 피로균열은 표면에서 시작된다. 표면에 응력집중이 일어날 수 있는 Notch나 불연속적인 곳에서 피로균열이 생성되는데 표면에 불연속적인 것을 완만하게 설계하면 피로수명을 연장할 수 있다⁴⁾.

다. 피로 파괴의 3단계

피로진행 과정은 Fig. 2-1 에서 나타낸 것처럼 3단계로 나누어 진행되는 데, 표면, Scratch, 표면 결함, 외양이 급격히 변한 곳 등의 응력이 집중된 구역에서 균열이 생성되는 1단계(Region I)와 반복 응력에 의하여 균열이 점진적으로 성장하는 균열성장 및 전파의 2단계(Region II), 그리고 피로균열이 어느 크기 이상이 되면 재료가 하중을 견디지 못하고 파괴되는 파괴의 3 단계 (Region III)로 나누어 진다.

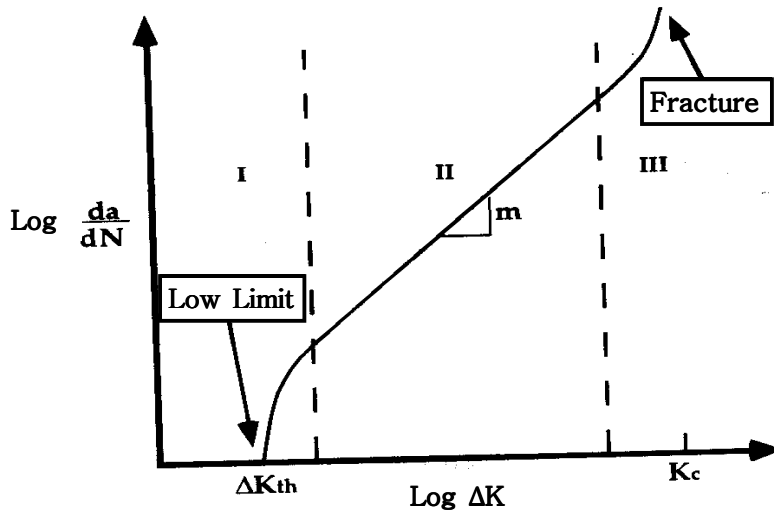


Fig. 2-1 Status diagram of fatigue fracture

초기의 균열은 변형에 의하여 큰 영향을 받아서 전단응력이 최대인 방향으로 성장한다. 그 이후, 균열 성장 속도가 급격히 빨라지며 가해진 응력에 수직한 방향으로 성장하여 Crack opening mode를 지나 조개무늬나 줄무늬 모양의 파면을 형성하며 전파하게 된다.

균열이 성장하는 속도는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$dc/dN = A(\Delta K)^m \quad (\Delta K: \text{Stress intensity factor range})$$

$$KC = Y\sigma \sqrt{\pi a}$$

위의 식에서 Crack의 성장속도는 Crack이 성장함에 따라 빨라지고

Crack의 길이가 같을 때에는 가해진 응력이 높으면 성장속도가 빠르다는 사실을 알 수 있다.

2. 용접부의 피로한도 및 설계

가. 피로시험 및 S-N 곡선

용접 구조물의 파괴는 보통의 인장시험과 같이 정적하중이 너무 걸려 소성변형이 생겨서 파괴하는 예는 비교적 적고, 오히려 취성파괴나 또는 반복하중에 의한 피로파괴가 많다. 피로시험에서는 3가지의 반복하중, 즉 양쪽 진동하중(Reversed load), 한쪽 진동하중(Pulsating load), 반복하중(Repeated load)의 어느 것이나 시험한다.

재료에 가해진 피로 하중과 파괴시 까지의 응력 반복 횟수를 한눈에 알기 쉽게 도시하여 응력진폭(Stress Amplitude)과 파손 될 때까지의 반복 응력의 수(Number of cycle)와의 관계를 그린 그래프를 S-N 곡선이라 한다. Fig. 2-2 에는 전형적인 S-N 곡선을 나타냈으며, Fig. 2-2(a)와 같이 용접이음의 피로곡선에서는 평탄한 부분이 나타나는 경우가 많고, Fig. 2-2(b)와 같이 Log S-Log N으로 나타내면 직선관계가 얻어지는 경우가 많다. 이 경우에는 적당한 반복수(예를 들면, 2×10^6 , 6×10^6) 등에 대한 응력을 구하고, 그것을 그 횟수에 대한 피로강도(Fatigue Strength)라 한다.

Fig. 2-2(b)의 경우에 있는 반복수 N에 대한 피로강도 s 는 기지의 횟수 N에 대한 피로강도 S를 알고 있으면 다음 식과 같이 된다.

$$s = S \left(\frac{n}{N} \right)^k$$

여기서, k는 이음형식, 하중방향, 재질 등에 의해 결정되는 정수이며, 용접이음의 경우에는 $k \approx 0.18$ (0.05~0.35) 정도의 값이다.

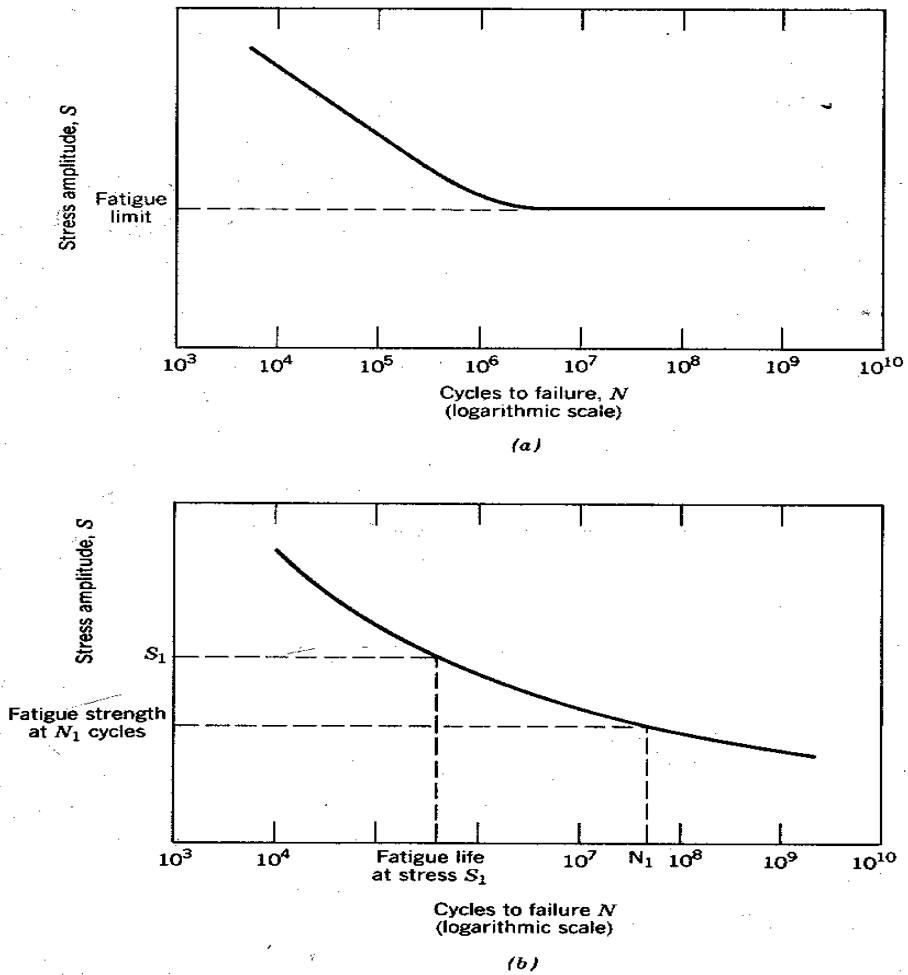


Fig. 2-2. S-N curve

나. 용접이음의 피로설계

피로설계는 피로허용응력을 사용하는 방법과 피로균열 전파수명을 고려하는 방법이 있다. 전자는 각종 부재와 이음에 대하여서는 피로한도나 200만 번 피로강도 등을 결정하고 그것에 안전율을 고려하여 피로허용응력을

정하고, 변동하는 응력 범위의 최대값을 취하는 방법으로서 일본 강구조협회 피로설계 지침⁵⁾에서는 중요도계수(1.05~1.20) 응력비계수(1~0.83) 및 신뢰도 계수 $[(0.80\sim 1.50)\times(1.00\sim 1.40)\times(1.00\sim 1.10)=0.80\sim 2.31]$ 의 연승적(약 0.70~2.77)을 안전율로 하며 이것으로 피로강도(이음의 종류와 형상, 마무리의 유무에 따라 다르다)를 비율로 하고, 더욱이 하중 반복 예기수를 고려하여 허용응력범위를 결정하도록 정하고 있다.

이것에 대하여 피로균열이 발생하는 다음 구조 부재를 전파하여 부재가 파단하기까지 일반적으로 장시간이 걸리는 것을 이용하는 설계방법도 있다. 미국의 ASME 보일러 및 압력용기 규격 Sec. XI, Div.1 (1977)⁶⁾에서는 원자력 플랜트 구조물에 관하여 정상적인 검사주기 사이에 있어서 피로균열이 전파하여 그 길이가 취성과파 발생의 한계 길이의 달하기까지는 사용을 허용하는 것으로 되어 있다. 이것은 최근의 원자력 발전용 압력용기의 벽두께와 중량이 종래의 피로 설계법에서는 극단적으로 너무 커지게 되기 때문에 대책을 생긴 것이며, 파괴역학의 발달과 피로현상의 연구결과이다⁷⁾.

제2절 응력 집중(Stress Concentration)

응력이 국부적으로 집중되는 곳에는 피로 파괴가 발생하기 쉽다. 예를 들면 단면적의 변화가 없는 곳에서의 응력변화는 균일하나 예리하게 도려진 밑부분에는 평활한 부분에 비해 국부적으로 매우 큰 응력이 생긴다. 그 최고 응력(σ_{max})과 평활한 부분의 응력(σ_n) 과의 비, 또는 그 밑면 최소단면적에 대한 평균 응력과의 비를 응력집중계수라 하며, 특히 σ_{max}/σ_n 를 형상계수라고도 하며 Fig. 2-3 에 나타냈다.

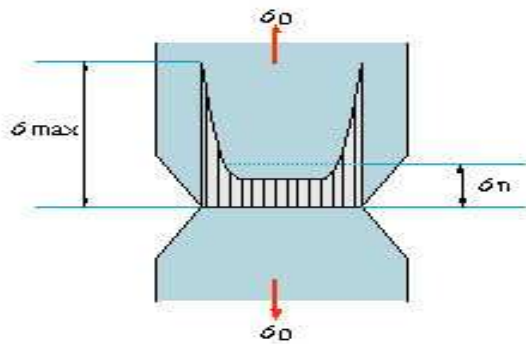


Fig. 2-3 Configuration of stress concentration

한편 철강내에 개재하는 고형체의 비금속성 불순물(즉, 철이나 망간, 규소 및 인등의 합금원소의 산화물, 유화물, 규산염 등)도 응력집중의 원인이 되며, 일반적으로 그 모양이 큰 것은 피로한계를 저하시킨다. 재료가 역학적 작용을 받았을 때 발생하는 역학적 응답과 충칭재료의 기계적 성질은 일반적으로 구성 원자간의 결합(주로 공유결합과 이온결합을 중심으로 한 화학결합)이 반영되어 강하나 충격에 약한 특징을 갖고 있다. 이 결과 재료 중에 존재하는 작은 결합에 응력이 집중되어 이곳으로부터 파괴가 일어나게 된다.

구조재료에 결합이 발생하면 항복강도 이하의 응력에서만 사용해도 끊임없이 파괴가 일어나고 있다. 이러한 파괴는 주로 노치, 구멍, 균열, 기하학적인 결합 등의 작용으로 어떤 특정부위에서 응력이 크게 증가했을 때 일어난다.

제3절 용접 잔류응력(Welding Residual Stress)

용접과정에서 열에 의해 재료는 팽창, 수축을 하게 된다. 용착금속이 냉각되면서 저온상태의 체적으로 수축하려고 하지만, 인접되어 있는 모재로부터 제한을 받기 때문에 자유롭지 못하게 된다. 이 때문에 용접부에 응력이 존재하게 되는데 이를 용접잔류응력이라 하고 일반적으로 용접응력이라 한다.

이 응력은 거의 재료의 항복응력에 가까운 값을 가지기도 한다. 용접응력은 구조물의 취성, 파괴강도, 피로, 좌굴, 진동, 부식 등에 영향을 주는 중요한 요인이 되며 크게 비구속용접에 의해 생성되는 용접잔류응력과 용접 시 국부적으로 집중적인 열이 가해져서 구조 부재가 급속한 열팽창과 수축으로 열변형이 주위에 의해 구속됨에 따라 용접이 종료된 후에도 부재에 응력이 잔류하는 용접잔류응력이 있다.

용접부에서 구속되는 경우는 크게 두 가지로 나뉘어 질 수 있는데, 양 끝단이 구속된 부재의 중심을 용접할 때, 용접에 의한 수축 및 팽창이 고정되어 있는 양끝단부에 의해서 구속되는 경우(외적 구속에 의한 잔류응력)와 용접열이 불균일하게 분포함에 따라서 재료 각 부분에 걸쳐서 팽창 및 수축 정도가 달라서 발생하는 경우(내적 구속에 의한 잔류응력)로 구분된다. 이 중 외적 구속에 의한 잔류응력은 용접시 구속을 적게 해줌으로써 완화될 수 있지만, 내적 구속에 의한 잔류응력은 용접을 행할 때 구속을 적게 해도 필연적으로 발생하므로 내부응력(Internal Stress)이라 불리기도 하고 협의의 용접잔류응력이라 칭해진다.

이러한 용접잔류응력은 고주기(High Cycle) 영역에서 피로 수명에 중요한 영향을 끼칠 수 있다. 잔류응력은 특정한 교차응력(Alternating Stress)에서 최대 허용주기를 감소시키는 평균응력(Mean Stress)으로 작용한다. 이것은 저주기 피로에서 보다 소성 작용이 평균 응력을 경감시키는 작용을 하는 고주기 피로에서 더욱 중요하다.

제4절. STS-304 소켓용접부의 특성

1. STS-304 재질 특성

스테인레스강은 통상적으로 금속 내부조직에 따라 오스테나이트(Austenite)계와 페라이트(Ferrite)계 및 마르텐사이트(Martensite)계 스테인레스강으로 구분한다.

STS-304 합금은 상온뿐만 아니라 고온에서도 가장 널리 사용되고 있는 오스테나이트계 스테인레스강으로 본질적으로는 16~25% Cr 및 7~20% Ni을 함유하는 Fe-Cr-Ni 합금이다. 이 합금을 오스테나이트 스테인레스강이라고 한 이유는 모든 일반적인 열처리 온도에서 이 합금의 조직이 오스테나이트로 되어 있기 때문이다. 오스테나이트 스테인레스강은 주로 높은 함량의 Ni에 의한 오스테나이트 안정화 효과 때문에 고온 어닐링한 다음, 상온에서도 오스테나이트 조직(FCC)으로 남는다. 오스테나이트 스테인레스강은 Cr 탄화물이 고용될 수 있을 정도의 높은 온도, 그러나 필요 이상의 결정립 성장을 방지할 수 있을 정도의 낮은 온도에서 어닐링 하여야 한다. 대부분의 스테인레스강은 1050~1120℃ 범위에서 어닐링 한다. 고온어닐링을 한 다음에는 탄화물의 석출을 방지하기 위하여 빨리 냉각해야 한다.

STS-304 스테인레스강은 Ni이 함유되어 있기 때문에 Cr계 보다 한층 뛰어난 내식성, 내열성, 저온강도를 가지고 있으며 기계적 성질도 양호하다. 가공성은 크고 열처리로써는 경화가 되지 않으며 자성은 없다.

STS-304 시편에 대해 광학현미경으로 미세조직을 Fig. 2-4 에 나타냈으며, 오스테나이트 조직 내에 Twin 조직이 형성된 전형적인 오스테나이트 조직을 형성하고 있으며, 공랭한 STS-304강에는 결정립계에서 석출물을 볼 수 없다.

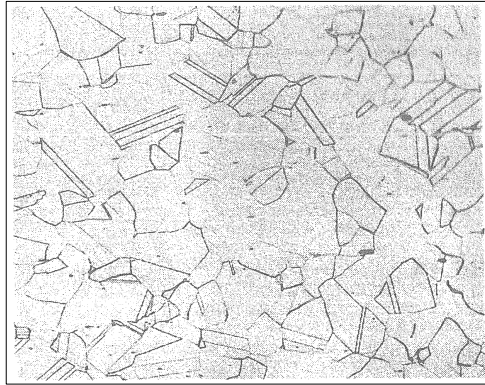


Fig. 2-4 Austenitic grain boundary in STS-304, revealed by acetic glyceric acid

Table 2-1 및 Table 2-2에는 대표적인 오스테나이트 스테인레스강인 STS-304 강의 화학조성 및 기계적 특성을 나타낸 것으로 STS-304 배관 및 소켓의 화학조성 및 기계적 특성은 대체적으로 STS-316L와 비슷하지만, 내식성은 다소 떨어지며 기계적 성질이 우수하고 가격이 저렴하여 일반산업계 배관에 가장 많이 사용하고 있다. 그러나 최근에는 스테인레스강의 품질과 가공성의 요구가 높아짐에 따라 STS-304의 결점을 보완한 슈퍼 스테인레스강 등 새로운 Type의 스테인레스강이 개발되어 실용화되고 있다.

Table 2-1 Chemical composition of STS-304 socket materials

	C	Mn	S	Si	Ni	Cr	Mo	P	Cu	V
Composition (%)	0.08 (max)	2.00 (max)	0.030 (max)	1.00 (max)	8.00~11.0	18.0~20.0	-	0.045 (max)	-	-

Table 2-2 Mechanical properties of STS-304 socket materials

	Yield Strength (N/m ²)	Tensile Strength (N/m ²)	Elongation Rate (%)
STS-304	205	515	60

2. 소켓 용접이음의 특성

배관이음방법으로 대부분 플랜지 이음, 나사이음, 용접이음 등을 사용하고 있으며, 저압배관에는 나사이음과 플랜지 이음 방법을 사용하고, 고압배관에는 용접이음 방법을 채택하고 있다. 용접 이음 방식은 플랜지나 나사이음 방식에 비해 누설 발생 가능성이 적으나 조립이 어렵고 배관 설치 후 보수가 곤란하며 용접 품질에 영향을 많이 받는다. 또한 배관용접이음은 소켓 용접이음과 버트(맞대기)용접 이음방식으로 크게 나누어지는데, 대구경배관(2인치 초과 배관)에는 맞대기 용접을 수행하며, 소구경배관(2인치 이하)에는 Fig. 2-5와 같이 소켓용접을 사용하고 있다.

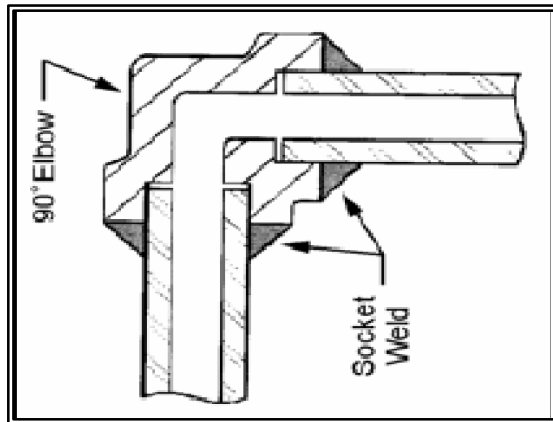


Fig. 2-5 Example of socket welded joint

소켓용접은 맞대기 용접에 비해 조립이 쉬운 장점이 있는 반면, 필릿용접시 용접부 결함이 발생하기 쉽고, 용접시 잔류응력 및 진동과 같은 반복하중 작용시 피로파괴가 나타나기 쉽다.

이러한 소켓용접은 형상이 불연속이며 불용착부가 있기 때문에 응력분포는 복잡하게 되므로 광탄성을 이용하여 실험적으로 조사되고 있다. 소켓 필릿용접은 탄성인장응력이 가하여졌을 때 주응력선 방향 Fig. 2-6에 나타난 바와 같이 상당히 복잡한 분포를 가진다. Fig. 2-6의 a점(Root) 및 b점(Toe)의 응

력집중이 대단히 크고, Root 부에서 6~7, Toe 부에서 약 4.7이다⁷⁾.

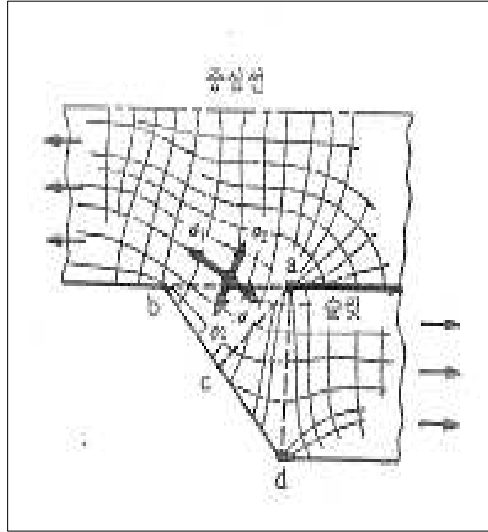


Fig. 2-6 Configuration of stress distribution in fillet welded zone

이상의 응력집중은 탄성범위 내의 것이지만 응력집중이 큰 곳에 국부적으로 소성변형(영구 변형)이 일어나면 응력집중은 상당히 평탄하고 고르게 된다. 계속하여 이것을 인장하면 Toe 에서는 표면의 각도가 점점 둔해지고 응력집중이 감소하지만, Root 에는 완화되지 않고 크게 소성변형을 받으므로 실제로 파단이 Root 부에서 일어나기 쉬워진다.

제3장 실험 방법

제1절 실험 개요

일반산업계의 소구경 배관에 가장 많이 사용되는 STS-304 배관을 선정하여 ASME Code 및 용접조건에 의거하여 GTA 용접을 하여 소켓용접부 피로시험편을 5개 제작하였다. 이렇게 제작된 시험편은 방사선 투과시험으로 시편의 용접결함을 확인하였다. 피로시험의 조건결정은 현장에서 보고 되고 있는 손상원인을 분석결과 완전 양진 정현파 굽힘 피로하중에 의한 손상이므로 실험실적으로 가능한 4-Point Bending Fatigue Test 을 Fig. 3-1 과 같이 용접시편을 설치하여 실시하였다.

부과하중 500~1200 Kgf/cm² 조건하에서 시편이 파괴될 때까지 피로시험을 행하였고, 피로한도는 10⁶ 사이클로 정하였으며, 이러한 실험결과를 데이터 작성 후 S-N 커브를 제작하였다. 피로실험 후에는 시편의 파괴특성을 조사하기 위해 전자 광학 현미경검사, SEM-EDS 및 Micro Vickers 경도시험 등을 수행 하였다.



Fig. 3-1 4-point bending fatigue tester

제2절. 실험재료 및 시편

1. 실험 재료

본 실험에 사용한 5개의 용접시편은 Fe-Cr-Ni을 주성분으로 하는 STS-304 강으로, 용접시편에 대한 화학적 성분 및 기계적 성질 분석결과는 Table 3-1 및 Table 3-2 과 같다.

Table 3-1. Chemical composition of pipe and socket (wt%)

Composition	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
Result	0.047	0.431	1.412	0.0302	0.168	8.130	18.100	0.258	0.507

Table 3-2. Physical test result of pipe and socket

Item	Yield Strength (N/m ²)	Tensile Strength (N/m ²)	Elongation Rate (%)	Hardness (H _{MV})
Result	375	630	60	170

2. 피로시험 시편 제작

고주기 피로시험을 위한 피로시험편은 3/4인치 배관과 동일하게 ASME Code NB-4427⁸⁾에 준하여 실제 현장에서 사용하는 것과 동일하게 제작하였으며 소켓 연결부는 45° 필릿 용접을 하였다

용접부 피로시험편을 제작할 때 Socket과 Pipe의 간격을 띄우지 않으면 용접시 균열이 루트부에 발생하기 때문에 일정간격(Root Gap)을 두어 Pipe를 Socket에 삽입 후 GTA 용접을 실시하였다. 이때 사용한 용접 조건은 Table 3-3 과 같다.

Table 3-3. Welding conditions applied in this research

Process	Welding Rod	Current	Ampere (A)	Voltage (V)	Speed (mm/min)
GTAW	ER308	DC	130~160	10~13	40~75

본 시편에 제작에 사용한 용접봉은 ER-308으로서 화학성분은 Table 3-4. 와 같으며 Cr 함유량은 19.5~22.0 으로 내균열성이 우수하다.

Table 3-4. Chemical composition of welding rod (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.08	0.30~0.65	1.0~2.5	0.03	0.03	9.0~11.0	19.5~22.0	-

소켓용접부는 용접형상은 Fig. 3-2 와 같이 표준 규격시험편에 대해서 나타내었다. 용접시험편은 3패스 용접을 하고 방사선 투과 시험을 수행하였다.

방사선 투과시험은 ASME SEC V 에 따라 실시했으며, 판정기준은 ASME SEC III. 에 따랐다. 사용된 방사선원은 Ir-192 를 사용했으며 선량의 강도는 40ci, 투과거리는 423.5mm 로 수행했다.

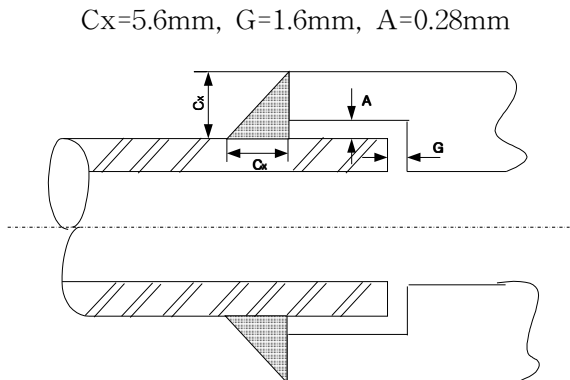


Fig. 3-2. Configuration of socket welded specimens

STS-304 재질로 용접한 후 최종 제작한 용접피로시험 시편의 치수 및 형상은 Table 3-5 과 Fig. 3-3 과 같다. 이렇게 ASME NB-4427 규격⁸⁾에 의거해 제작된 표준규격 용접시험편 5개에 대해 고주기 피로특성을 수행하였다.

Table 3-5. Dimension of 4-point bending fatigue specimen

Sign	D ₁	D ₂	d ₁	d ₂	t	J	F	C	B		D		L	L ₁
									max	min	max	min		
Dimension (mm)	30.0	26.7	16.0	18.9	3.9	12.5	24.0	4.90	27.6	27.2	21.7	20.2	300	40

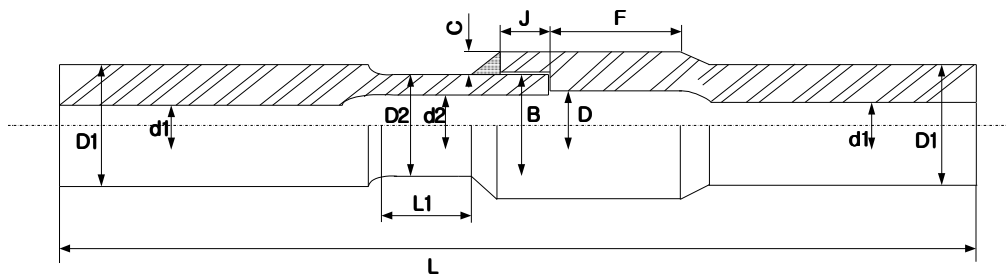


Fig. 3-3 Drawing of 4-point bending fatigue specimen

제3절 피로시험과 S-N 곡선의 작성

본 실험에서 사용한 4-point bending fatigue 치구가 장착된 INSTRON 피로시험기의 모습은 Fig. 3-4 과 같다. 피로시험기 모델은 INSTRON 8502 로서 용량은 25ton, 유압 작동식 이다.

4-point bending fatigue 방법은 Fig. 3-4 과 같이 파이프 양 끝단을 고정시킨 후 고정점으로부터 80mm 간격을 두고 가운데 두 지점에 압축, 인장 응력을 번갈아 반복적으로 가하게 된다.

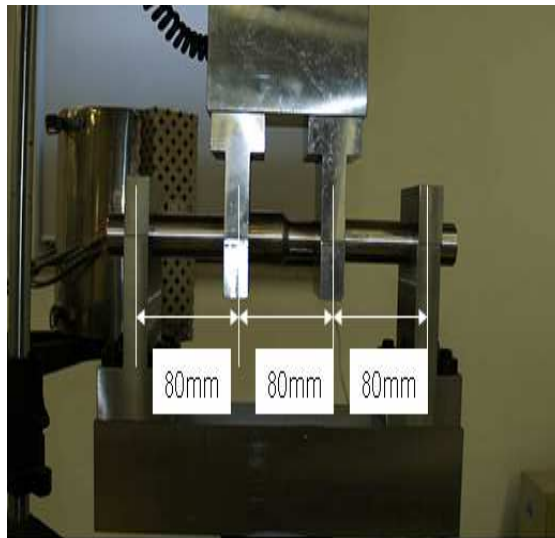


Fig. 3-4. Load distribution of 4-point bending fatigue test

피로시험기 사용 조건으로 5개의 용접시험편에 대해 응력비는 -1, 사용 주파수 10.2Hz, Sine 파형으로 각 시험편에 적용하중은 500Kgf/cm², 600Kgf/cm², 800Kgf/cm², 1000Kgf/cm², 1200Kgf/cm² 로 시험편이 파괴시 까지 4-point bending fatigue 시험을 실시하였다. 여기서 얻은 데이터를 바탕으로 S-N 곡선을 작성할 수 있었다.

이때 시험편에 가해지는 응력은 시험편에 가해지는 굽힘 모멘트와 시험편의 단면형상에 따른 관성 모멘트에 의존하며 본 실험에서는 아래의 식(3-1)에 의

해 계산하였다.

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (3-1)$$

여기서, σ = 용접부에 가해지는 응력

$$c = D1/2,$$

$$I = (\pi/64)(D1/4 - d1/4)$$

$M = Pa/2$ 이며, 본 실험에서는 Fig. 3-5 와 같이 구해진다.

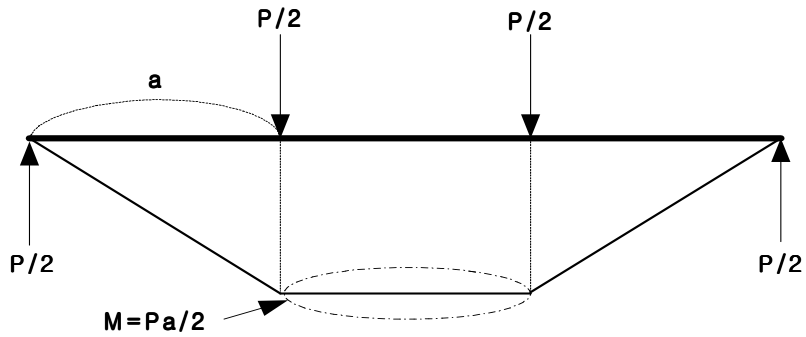


Fig. 3-5. Load distribution and moment in 4-point bending fatigue specimen.

제4절 용접부 파단면검사 및 미세조직 분석

1. 파단면 검사

4-point bending fatigue 시험 후 파단면에 대한 파단 경로 및 원인을 분석하기 위하여 육안 관찰 후 파면면을 광학 현미경을 이용하여 관찰하였다. 본 실험에 사용한 금속광학 현미경 사양은 Fig. 3-6 에서와 같이 라이프사(독일)Type 020-504.030 모델을 이용하였다.



Fig. 3-6 Optical microscope

2. 미세조직 관찰

4-point bending fatigue 시험 후 미세조직 관찰은 글리세리기어(염산30ml + 질산10ml + 글리세린1ml)를 이용하여 부식을 시켜 모재, 열영향부 그리고 용접금속으로 구분하여 금속광학현미경이용하여 관찰하였다.

본시험에 사용한 시편은 용접부위를 중심으로 채취하여 용접 미세조직을 관찰하였다. 관찰에 사용한 전자주사현미경은 Fig. 3-7 와 같이 JEOL LTD (일본) JSM-5800모델 사용하였다. 시험편은 피로 시험후 파단면을 절단하여 파단면 전체를 관찰하였다.



Fig. 3-7 Scanning electron microscope

3. 조직 성분분석 및 경도시험

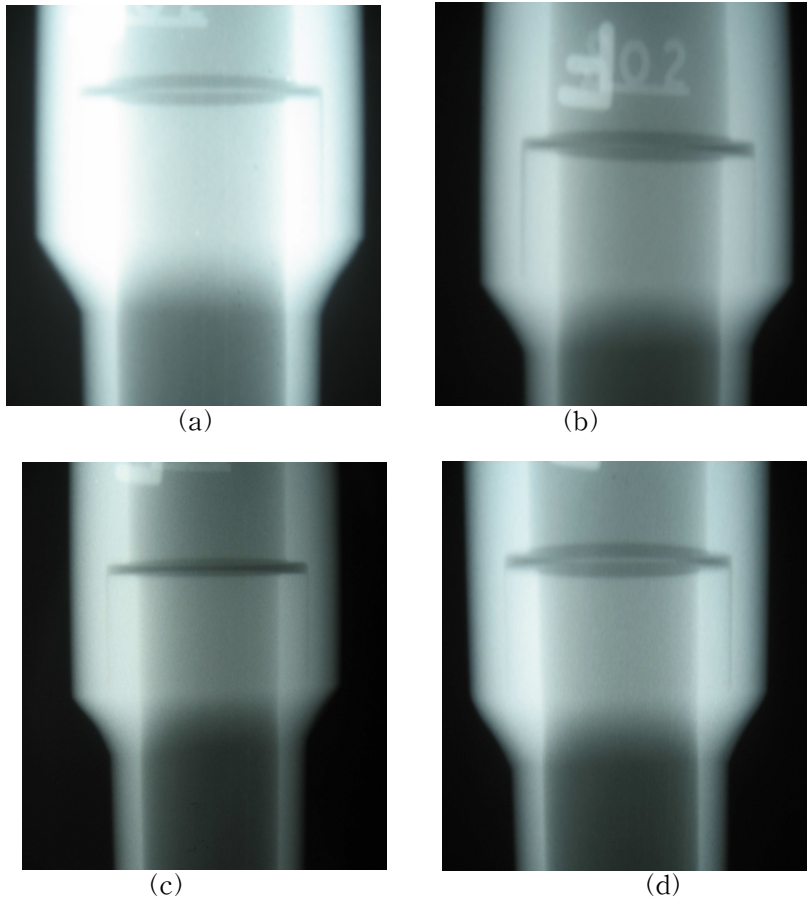
용접시편의 파단면에 대한 성분 함유량을 측정하기 위해 EDS(Energy Dispersive Spectroscopy) 분석기로 표면 성분검사를 수행 하였으며, SEM-EDS 분석기 사양은 JEOL LTD(일본) JSM-5800모델을 사용하였다.

용접부의 경도변화 특성을 분석하기 위해 용접시편의 Micro Vickers 경도 측정을 실시하여 관찰하였다. 본 실험에 사용한 경도계 모델은 Mitutoyo(일본) HV-112 이고 시험편은 용접부 미세조직 분석 후 시험편을 이용하여 경도를 측정하였다.

제4장 시험결과 및 고찰

제1절 용접부 비파괴검사 결과

용접부 시험편의 건전성을 확인하기 위해 용접 완료 후 방사선 투과검사(RT)를 실시한 결과를 Fig. 4-1에 나타내었다. 그림 Fig. 4-1 에서 각 시험편의 RT 사진 관독 결과 소켓용접시 열팽창에 대비한 소켓부와 파이프부 경계부분의 간격(Root Gap)은 검정색의 공간으로 나타나고 있으며, 소켓 필릿 용접부에 기공이나 개재물 등 특별한 결함은 발견되지 않았다.





(e)

Fig. 4-1 Radiographs of STS-304 socket welded joint specimens of
(a)500Kg, (b)600Kg, (c)800Kg, (d)1000Kg, (e)1200Kg

제2절 피로시험 결과

소켓용접부 시험편에 대해 일정하중 500Kg(80MPa), 600Kg(97MPa), 800Kg(129MPa), 1000Kg(161MPa) 및 1200Kg(193MPa) 하에서 파단까지 고주기 피로 시험한 결과를 Table 4-1 에 나타내었다.

Table 4-1. Fatigue failure test result of STS-304

Load(MPa)	Life to Failure(N_f)	비고
1200Kg(193MPa)	7,524	
1000Kg(161MPa)	34,918	
800Kg(129MPa)	177,441	
600Kg(98MPa)	426,702	
500Kg(80MPa)	2,273,256	

Table 4-1 의 값을 가지고 S-N 곡선으로 변환한 결과를 Fig. 4-3 에 나타냈으며, 피로 하중이 증가함에 따라 피로수명이 감소하는 전형적인 피로 곡선이 그려졌다. S-N 곡선을 관찰해보면 STS-304재질의 3/4 인치 소켓용접부의 피로수명은 약 94 MPa로 측정되었다.

한편 600Kg일 때의 피로수명이 예측된 구간에서 약간 벗어남을 볼 수 있는데, 피로시험결과 다른 시험편들의 파단 부위가 용접부 Toe부임에 비해 600Kg일 때의 파단부위는 Root부로 달랐다. 용접의 결함이 존재하는 경우를 제외하고는 상대적으로 높은 응력에서는 Toe부에서, 낮은 응력에서는 Root부에서 피로균열이 시작되어 파단 되는데, 500Kg일 때 Toe부에서 피로균열이 시작되었음을 본다면 600Kg 시험편의 결과는 용접 불량이나 잔류응력에 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 4-2 의 S-N 곡선에는 국내에서 STS-316L에 대한 시험결과⁹⁾ 와 본실험의 비교한 결과를 같이 나타내었다. Fig. 4-2에서 살펴보면 같은 오스테나이트

계 강인 STS-304 와 STS-316L 의 피로시험결과는 그 경향에 있어서 유사하게 나타났으며, 결함이 존재한 실험 결과와 비교하여도 타당한 결과를 얻은 것으로 판단된다.

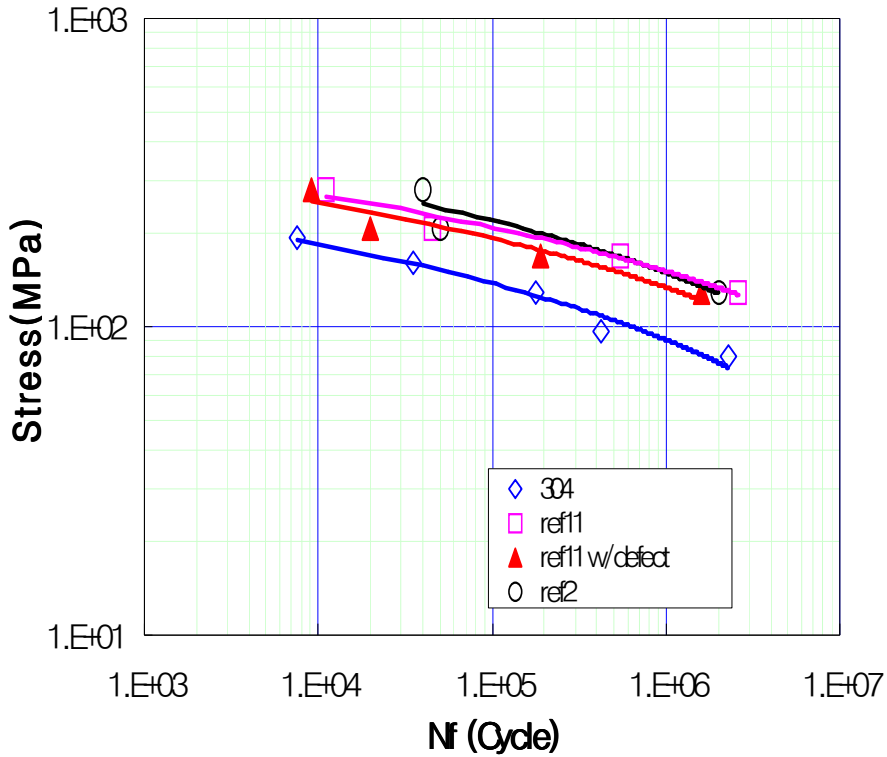


Fig. 4-2. S-N curve of STS-304 socket welded joint

제3절 피로파단부위 관찰 및 분석 결과

1. 파단면 관찰

응력에 따른 4-Point Bending Fatigue 후 수직 파단면을 Fig. 4-3 과 Fig. 4-4 에 나타냈었다. Fig. 4-3 는 500kg, 800kg, 1000kg, 1200kg 하중하에서 발생한 Toe 부의 균열 사진이며, Fig. 4-4 는 600kg에서 발생한 Root 부의 균열 사진이다.

용접부위를 축 방향으로 관찰해보면, 피로파단이 용접 시작점 양쪽에서 기점이 되어 피로가 진행된 것을 알 수 있다. 시험에서 응력비가 -1인 Sine 파형으로 압축, 인장의 피로하중이 번갈아가며 반복적으로 가해지므로 피로파단의 시작점이 압축, 인장 응력이 가해져서 단면 수축과 팽창이 최대가 되는 일직선상에 대체로 놓여있음을 확인할 수 있다.

대부분의 피로파단이 용접으로 인한 두 모재의 연결부위에서 접합으로 인해 모재의 굽기가 얇아지는 쪽 끝부분, 즉 Toe부에서 시작된 것에 비해, 600Kg 에서 실험한 파단 시험편의 경우는 접합으로 인한 모재의 굽기가 굽어지는 쪽 용접의 끝부분, 즉 Root부에서 파단이 시작됨을 볼 수 있다.



Fig. 4-3. Toe failure of socket welded pipe specimens



Fig. 4-4. Root failure of socket welded pipe specimens

소켓용접부의 파단 부위가 다른 것은 여러 가지 영향이 있다. 우선 Toe부의 응력집중은 피로 균열을 발생시킨다. 용접부의 형상특성 즉 불연속면에는 응력집중이 발생함으로 이부위에서 파괴가 먼저 일어나기 쉽다. 실제 용접부 유한요소 해석 결과에 의하면 45° 로 필릿 용접된 3/4인치 소켓용접부에서는 Toe부의 경우 응력집중계수가 7.2로 나타났으며, 최대 응력이 공칭응력의 2.5 배, Root부에서는 공칭응력의 1.6배 더 큰 응력집중이 나타는 것으로 해석 되었다⁹⁾. 이는 본 실험에서 나타난 것처럼 대부분의 결함이 Toe에서 발생한 것과 일치한다.

한편 용접시 발생하는 각종 결함의 영향 외에 용접 잔류응력의 영향이 있다. 일반적으로 피로시험은 용접시 발생하는 잔류응력에 따라 평균응력 효과가 발생한다. 용접잔류응력에 관해 Toe부에 압축잔류응력이 존재하고 Root부에는 인장잔류응력이 존재하는데 Root부보다 Toe부 쪽에 보다 높은 응력집중이 작용한다고 알려져 있다. 따라서 Root부보다 상대적으로 높은 응력집중이 작용하는 Toe부에서 피로수명에 영향을 미치는 압축잔류응력의 이완량이 많아지고 응력집중도 크기 때문에 모든 조건에서 Root부가 아닌 Toe부에서 파단이 일어날 가능성이 크다.

하지만 낮은 응력에서는 잔류응력 이완량이 줄어들고 평균응력 효과가 크게 나타나기 때문에 Toe부에서는 압축잔류응력으로 인한 수명상승효과가 크게 나타나고 Root부에서는 인장잔류응력으로 인한 수명감소 효과가 크게 나타나기 때문에 서로 다른 파단 모드를 나타내는 것으로 알려져 있다⁹⁾.

응력에 따른 4-Point Bending Fatigue 후 수평 파단면을 Fig. 4-5와 Fig.

4-6에 나타내었다. Fig. 4-5(a)에서 500Kg 하중에서의 피로 단면은 거칠기가 적고 매끄러운 반면, Fig. 4-5(b),(c),(d),(e) 에서 하중이 증가함에 따라 파단면의 거칠기도 증가함을 관찰 할 수 있었다. 즉, 피로하중이 증가 할 수 록 파단면의 형태 및 거칠기가 증가하며, 하중 500kg 의 고주기 피로파단에서는 파단면이 매우 깨끗함을 알 수 있다.

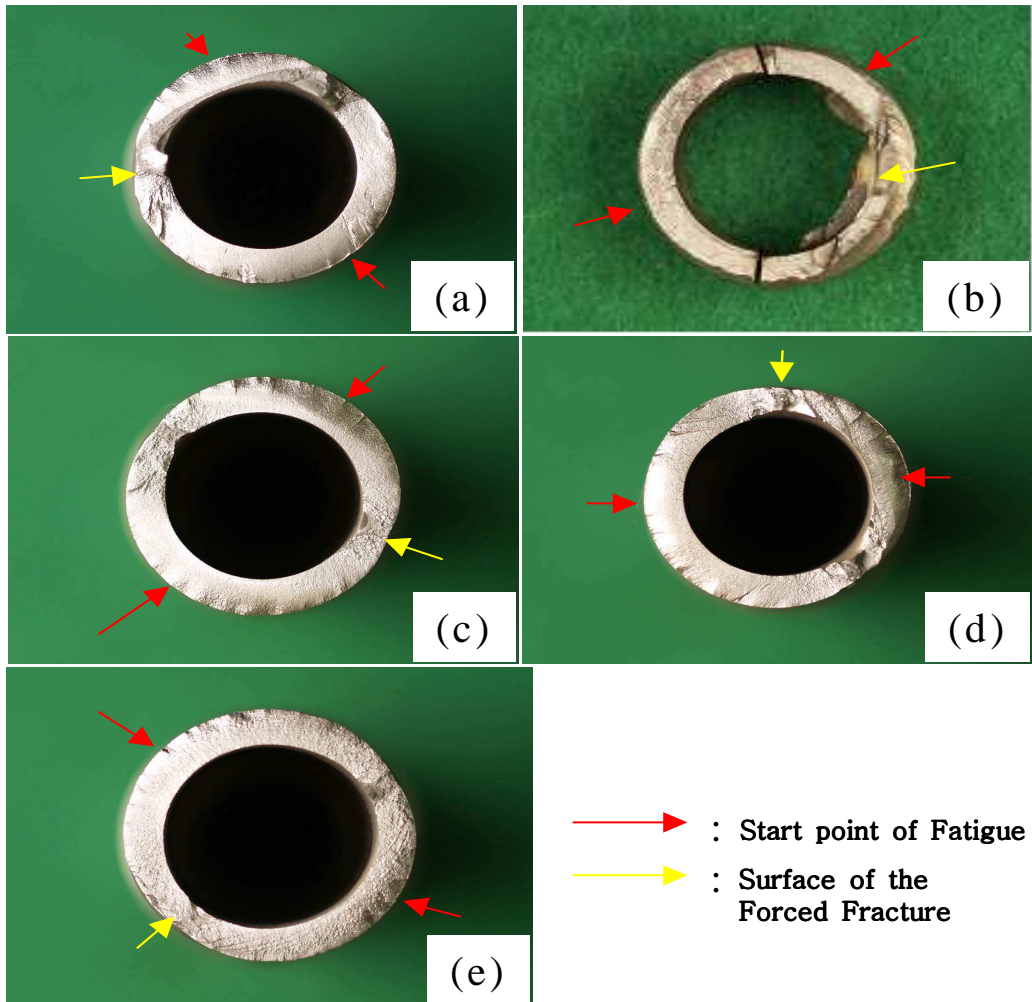


Fig. 4-5 Fractographs of specimen fractured under fatigue stress amplitude of (a) 500Kg (b) 600Kg (c) 800Kg (d) 1000Kg (e) 1200Kg

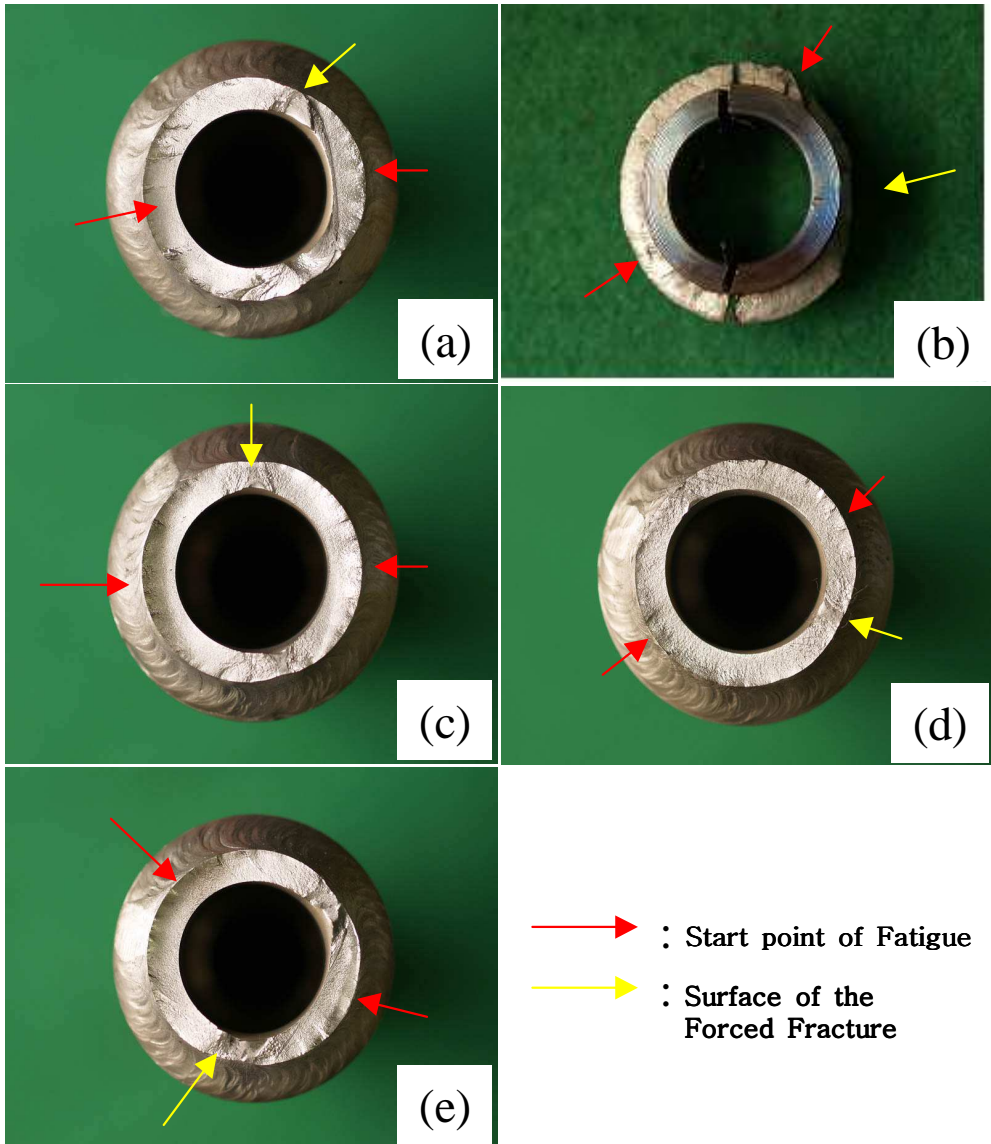


Fig. 4-6 Fractographs of specimen fractured under fatigue stress amplitude of (a) 500Kg (b) 600Kg (c) 800Kg (d) 1000Kg (e) 1200Kg

2. 피로파단면 확대 관찰 및 분석결과

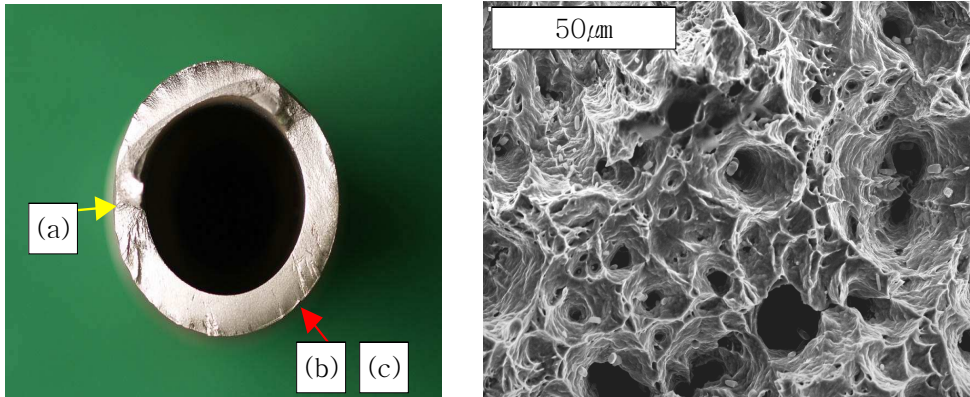
앞장에서 거시적으로 파단면을 관찰한 시험편에 대해 전자 광학현미경을 이용하여 파단면을 확대 관찰한 결과는 Fig. 4-7에서 Fig. 4-10 과 같다.

Fig. 4-7에서 그림 (a)의 경우 강제파단 되어 변형이 발생, 연성 파괴의 형태(Dimple)를 보이고 있고, 그림(b),(c)의 경우 피로균열 전파시 발생한 전형적인 연성피로 파면의 특징인 피로 줄무늬(Striation)가 나타나고 있음을 알 수 있다.

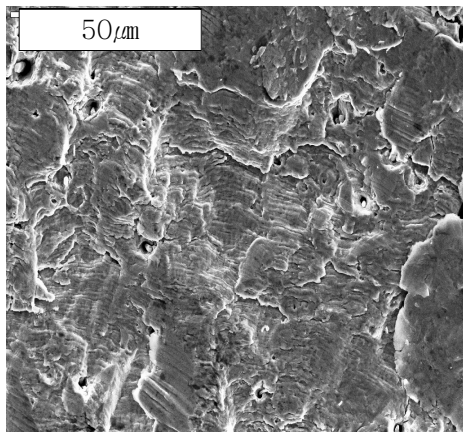
한편 하중별 파단면을 살펴보면 500Kg 하중에서의 피로 줄무늬는 조밀한 반면 하중이 1000Kg에는 피로 줄무늬 간격이 넓어짐을 관찰할 수 있었다. 즉, 하중이 적어질수록 파단면의 형태는 조밀한 피로 줄무늬(Striation)를 형성 하였다. 피로 줄무늬는 피로 균열이 성장되어 나갈 때 응력 사이클에 대응하여 만들어지는 모양으로 균열성장 속도가 10~50mm/cycle 이상에서 나타난다¹²⁾.

또한, 모든 응력조건에서 피로 파면은 전체적으로 균열의 파단면의 형상에 따라 결정립계를 가로질러 균열이 진전하는 입내(Trans-granular)파괴양상을 관찰할 수 있다. 한편 Fig 4-8(b)에서는 피로줄무늬 슬립선 및 Stretch Zone이 관찰되었으며, Stretch Zone 의 크기는 약 10 μ m 로 나타났으며, 이는 균열의 선단 내 미끄럼 분리에 의해 생긴 잔물결 모양이 대상으로 형성 되는데 저인성에는 그 간격이 좁게 나타나는 것으로 알려져 있다¹³⁾.

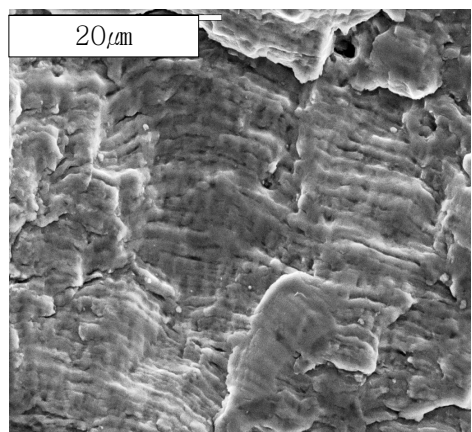
Fig. 4-9 과 Fig 4-10(c) 에서 저주기 피로에서 나타나는 분리된 피로선이 관찰되었으며, Fig. 4-9 과 Fig 4-10의(a)에서는 Dimple을 관찰하였다. 이러한 Dimple은 작용응력에 따라 모양이 다른데 그림의 Dimple은 상하 벤딩하중에 의한 강제 연성파괴 형태에서 나타나는 등축 Dimple 모양을 보여 주고 있다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4-7 Fractographs of specimen fractured under fatigue stress amplitude of 500Kg : (a) ductile fractured specimen (b),(c) fatigue stress fractured specimen

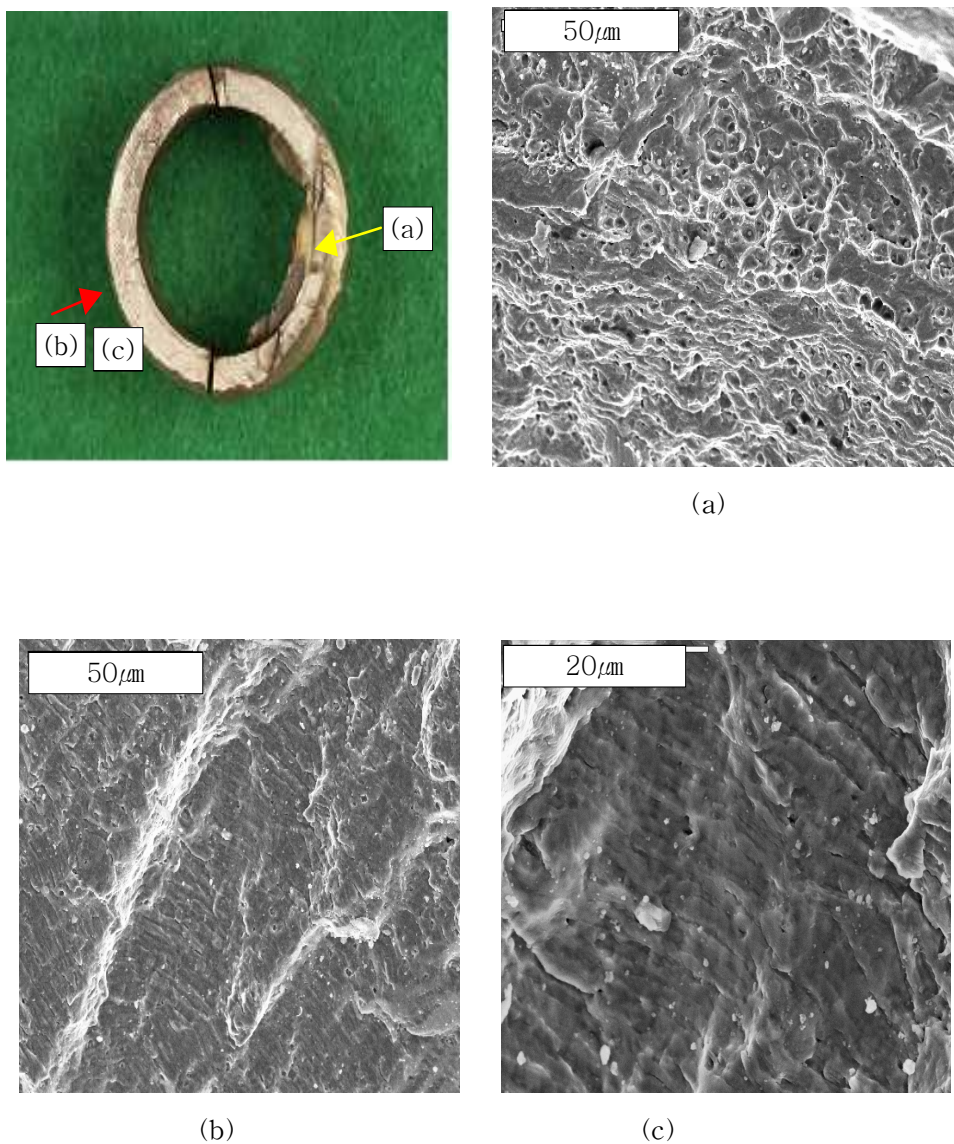
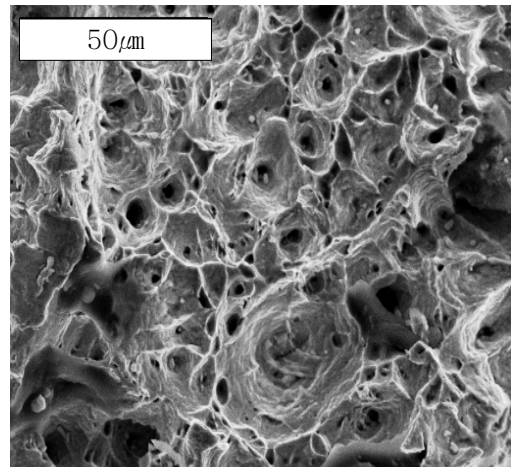
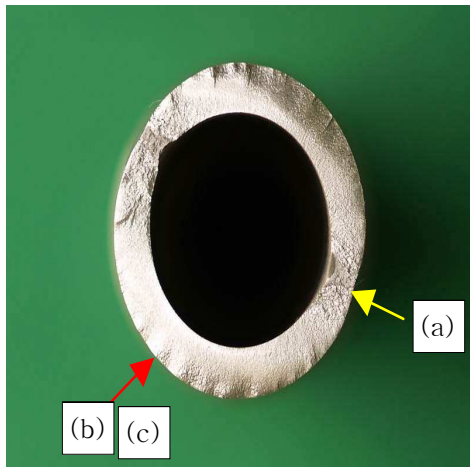
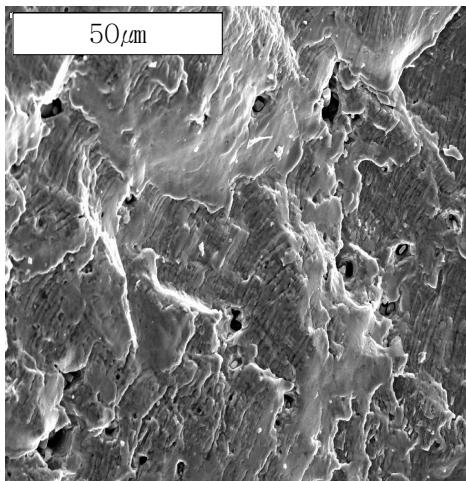


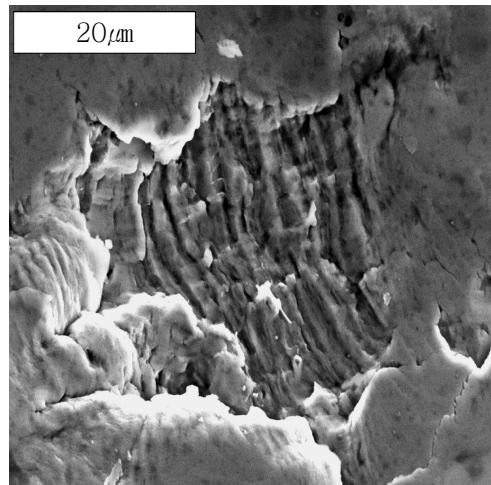
Fig. 4-8 Fractographs of specimen fractured under fatigue stress amplitude of 600Kg : (a) ductile fractured specimen (b),(c) fatigue stress fractured specimen



(a)



(b)



(c)

Fig. 4-9 Fractographs of specimen fractured under fatigue stress amplitude of 800Kg : (a) ductile fractured specimen (b),(c) fatigue stress fractured specimen

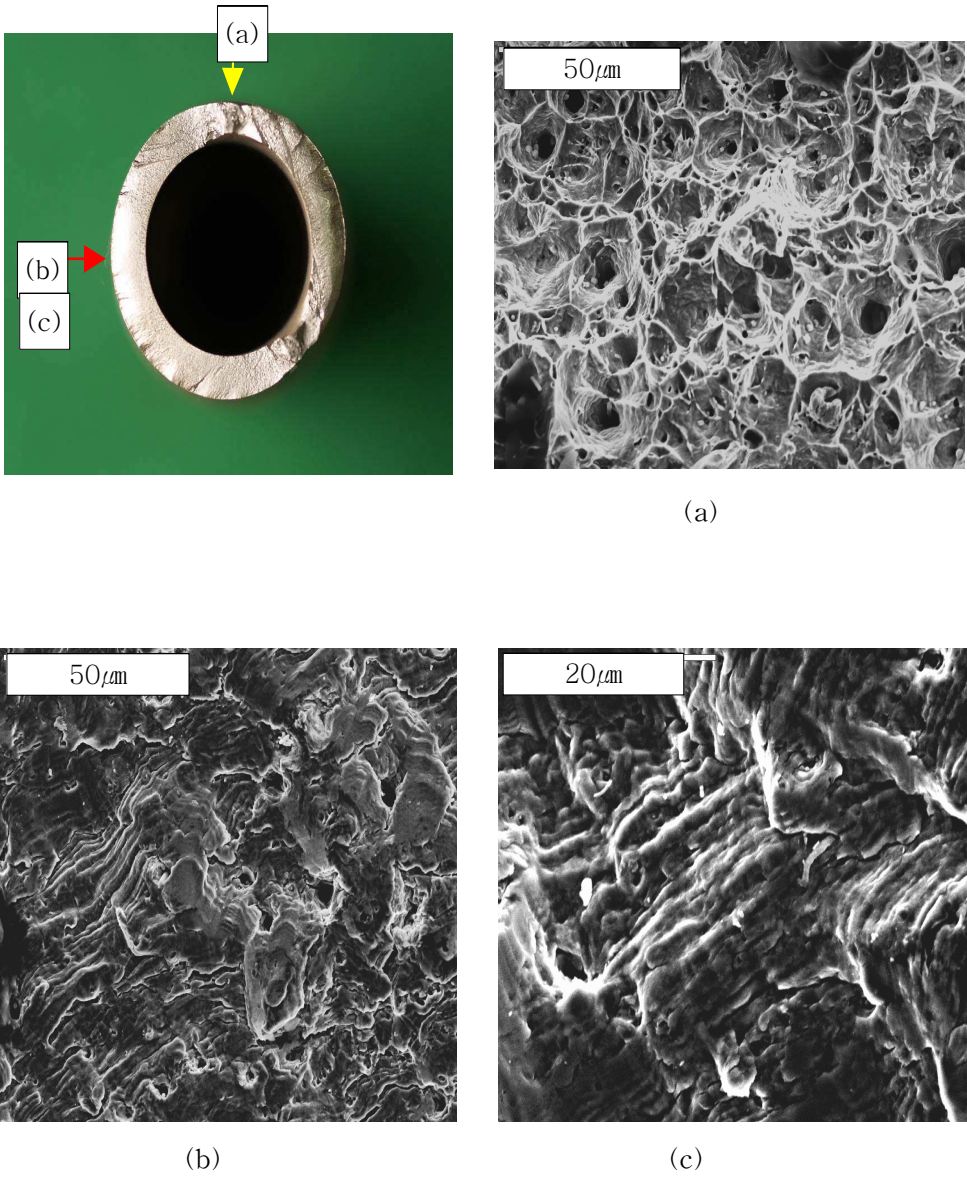


Fig. 4-10 Fractographs of specimen fractured under fatigue stress amplitude of 1000Kg : (a) ductile fractured specimen, (b),(c) fatigue stress fractured specimen

제4절 용접부의 미세조직 분석 결과

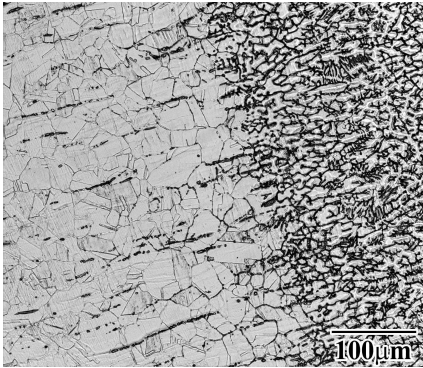
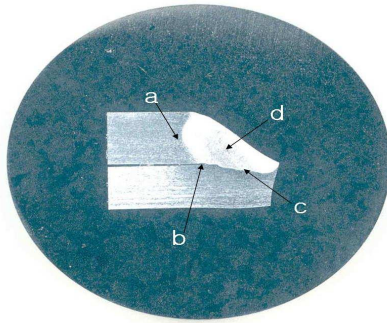
1. 전자 광학현미경 미세조직 관찰

STS-304시편을 각 파단 부위별로 에칭 후, 모재와 용접부에 대해 광학현미경 미세조직은 Fig. 4-11에서 Fig. 4-13 까지 나타내었다. 모재의 경우 오스테나이트 조직 내에 Twin 조직이 형성된 전형적인 미세조직을 형성하고 있으며, 모재의 결정립의 크기는 50~100 μm 로 나타남을 확인할 수 있다. Fig. 4-11~Fig. 4-13의 사진에서 모재의 결정립계에서의 석출물을 볼 수 있으나 이는 1000 $^{\circ}\text{C}$ 부근에서 어닐링하고 공랭한 STS-304강 에서 나타나는 현상이다.

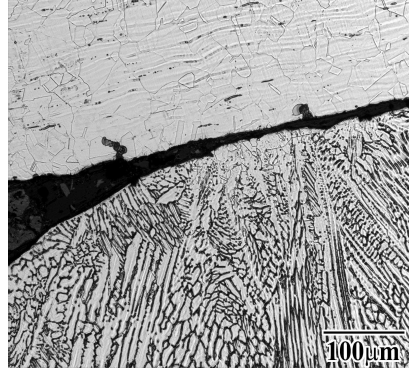
Fig. 4-11 (a)에서 열영향부에 금속 결정입계에 탄화물이 관찰되었으며 열영향부로 갈수록 결정립 크기가 커지는 것을 확인할 수 있고, 특히 열 영향부에서는 모재에 없었던 δ -Ferrite가 혼재해 있는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 δ -Ferrite는 금속을 용접할 때 1500 $^{\circ}\text{C}$ 부근에서 δ -Ferrite가 생성되는데 이것이 금속의 연성을 감소시키고 피로특성을 약화시키는 것으로 알려져 있다¹²⁾.

열 영향부에서 관찰된 δ -Ferrite는 초정 δ -Ferrite로 응고가 시작되어 계속 진행함에 따라 Ni이 많고 Cr이 적은 오스테나이트가 정출되며 응고가 계속되면 Cr이 많은 오스테나이트가 계속 생성되어 Ferrite는 변태되어 없어지고 상온에서 단상의 오스테나이트로 존재하게 된다. 용접부에는 오스테나이트 단상에서부터 응고 시 나타나는 Dendrite 형태의 δ -Ferrite와 오스테나이트로 이루어진 2상으로 되어 있다. 용접이 이루어져 용융 응고된 부분에서는 용융액의 응고과정에서 용융액 내에 먼저 결정핵이 생기고, 핵이 성장하여 큰 결정이 되는데, 여기에 또 가지가 생겨서 Dendrite라고 하는 나뭇가지 모양의 결정성장을 현미경으로 명확히 관찰할 수 있었다.

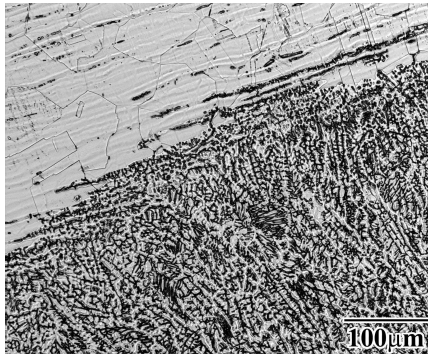
한편 Fig. 4-11(d)에서 살펴보면 용접부의 중심으로 갈수록 가지 모양의 Dendrite가 Shell 형태의 Dendrite로 변화하는 것도 관찰 되었다.



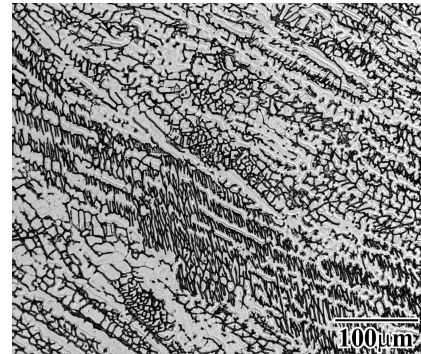
(a)



(b)

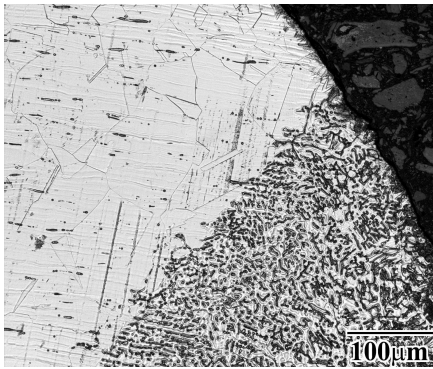
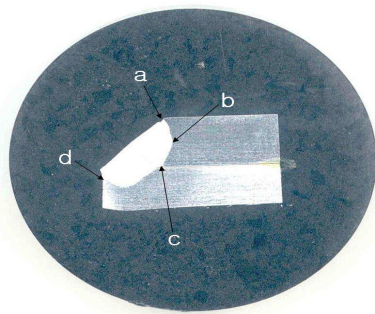


(c)

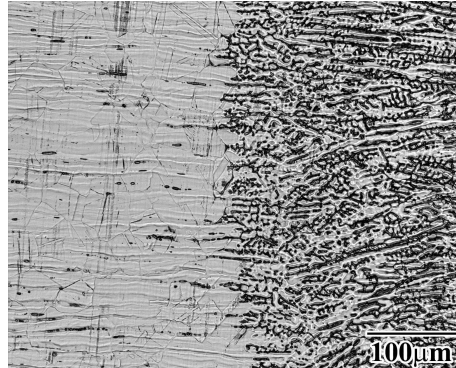


(d)

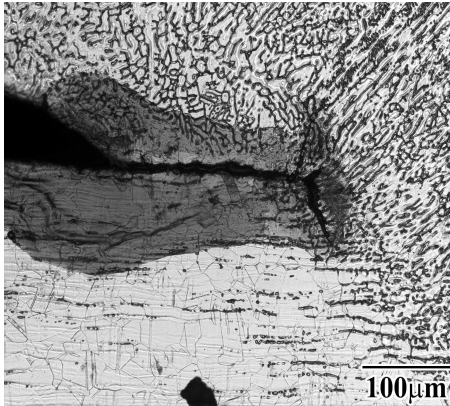
Fig. 4-11. Optical micrographs of 600Kg fracture-tested specimen : (a), (b), (c) heat-affected zone, (d) welded metal zone



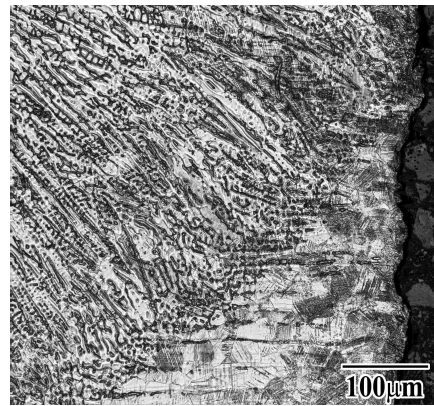
(a)



(b)

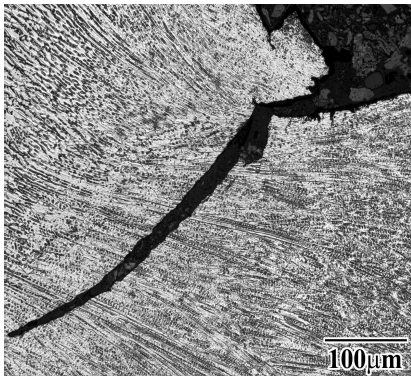
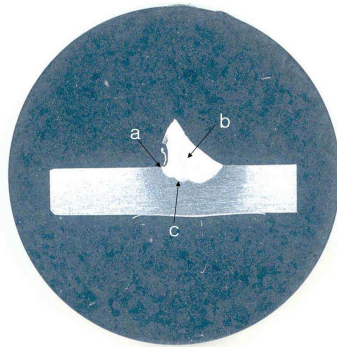


(c)

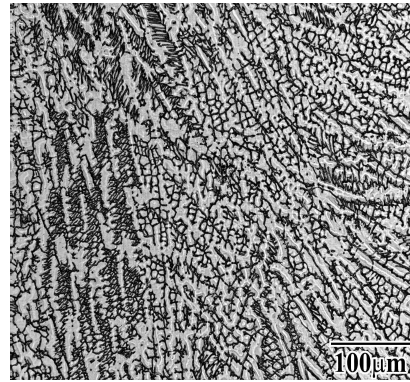


(d)

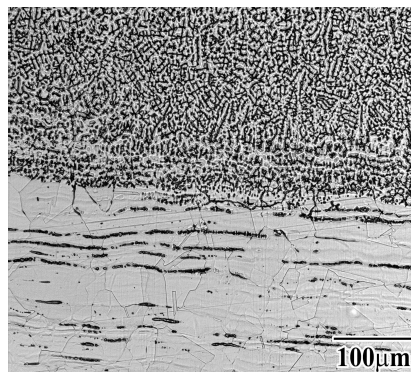
Fig. 4-12. Optical micrographs of 1000Kg fracture-tested specimen : (a), (b), (c) heat-affected zone (d) welded metal zone



(a)



(b)



(c)

Fig. 4-13. Optical micrographs of 600Kg fracture-tested specimen : (a), (c) heat-affected zone (b) welded metal zone

파면조직에 대한 SEM 분석 결과를 Fig. 4-14에 나타내었다. Fig. 4-14에서 모재부(B) 에는 Cr 탄화물이 석출되지 않은 Full Annealing 된 오스테나이트계 스테인레스강의 조직이 관찰 되었으며, 결정립 크기는 대략 $50\mu\text{m}$ 이었다.

Fig. 4-14(a)에서 용접부에는 Fig. 4-13 에의 현미경 사진에서 나타난 것과 동일하게 오스테나이트 단상에서부터 응고시 나타나는 δ -Ferrite와 오스테나이트로 이루어진 2상으로 되어있으며, 이러한 Ferrite는 Dendrite조직으로 관찰되었다.

Fig. 4-14(b)에서는 용접 열영향부에서는 입계부근에서 탄화물 석출이 관찰 되었으며, 결정립의 크기는 모재와 같이 $50\mu\text{m}$ 정도 크기로 피로시험에 의한 결정립 크기의 변형은 관찰되지 않았다.

Fig. 4-14(c)에서 용접부에서는 입계부근에서 탄화물이 석출이 미세하게 관찰 되었으며, 결정립의 크기는 모재와 같이 $50\mu\text{m}$ 정도 크기로 피로시험에 의한 결정립 크기의 변형은 관찰되지 않았다.

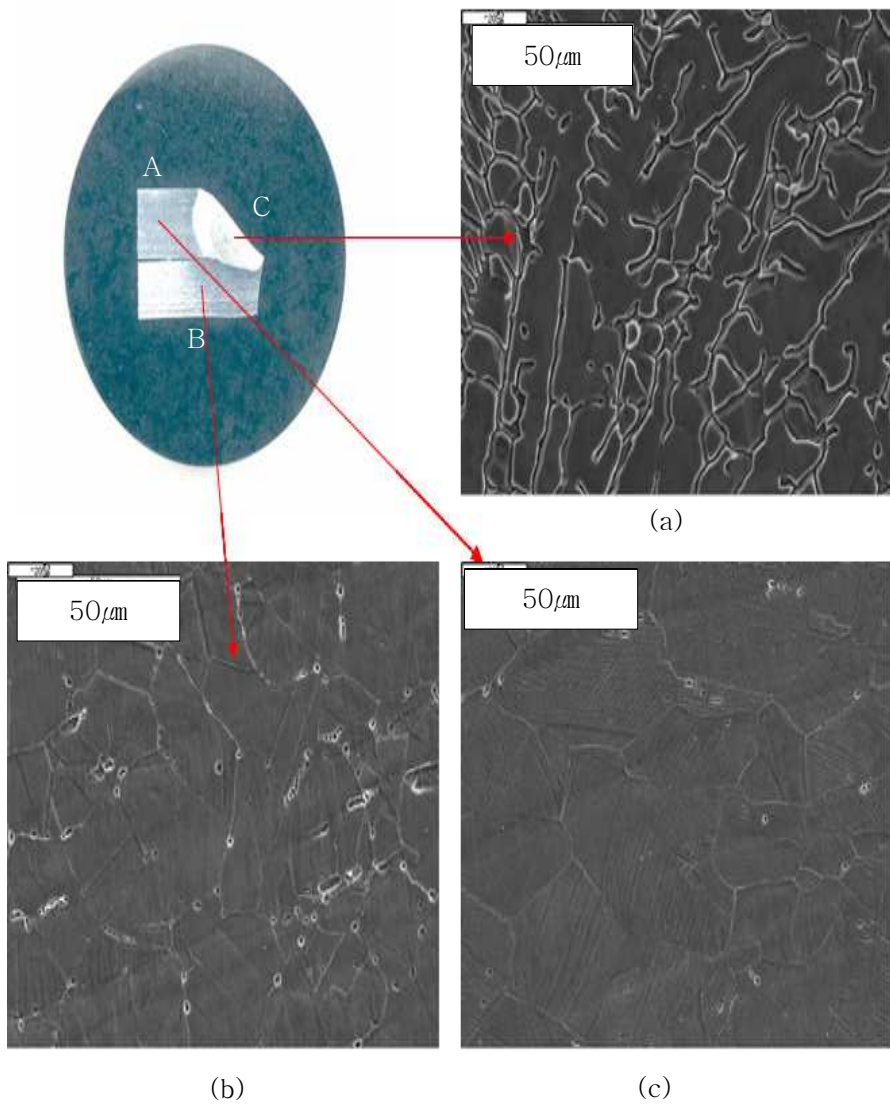


Fig. 4-14. SEM image of welded metal : (a),(b) heat-affected zone (c) welded metal zone

2. 경도 실험 분석 결과

용접부와 열영향부 및 모재에 걸친 경도변화를 알아보기 위하여 양호한 용입 형상을 나타낸 시편을 선정하였다. 경도 측정은 Micro Vickers 경도계를 사용하였으며, 경도측정시 하중을 100g, 부하시간 10초로 하여 용접비드를 중심으로 횡단면을 따라 경도를 5회 반복 측정하여 평균값을 산출하였다. 또한, 각 부분의 경도를 5회 반복 측정하여 평균값을 산출하였다.

파괴시험시편을 Micro Vickers 경도계로 용접부위별 경도를 측정한 결과, 피로에 따른 경도값의 차이는 보이지 있지 않았으나 용접 열영향부의 경도는 비교적 높게 나타났다.

Fig. 4-15 에서 용접금속의 경도는 H_{MV} 152 으로 원모재의 경도 H_{MV} 170 보다 다소 감소하였으며, 열영향부에서의 경도는 H_{MV} 191까지 증가하는 경향을 보였다. Fig. 4-16 에서도 Fig. 4-15 의 실험에서도 이와 유사한 경도값을 얻을 수 있으며, 용융부에서 모재 방향으로 갈수록 경도가 지속적으로 증가하는 경향을 보였다.

Fig 4-17 에서 열영향부인 파단면의 경도는 H_{MV} 191로 용융부의 경도값 H_{MV} 158 보다 높게 나타났다.

강의 열 영향부에서는 용접시 높은 용접열에 의해 기계적 성질이 변화하며, 특히 열영향부의 경도가 가장 높은 것으로 알려져 있으며 이는 본 실험을 통해서도 확인 할 수 있었다. 따라서 이러한 열영향부의 경도 증가로 피로 강도의 감소를 가져오며, 이로 인해 Toe부의 열영향부의 피로 파단이 쉽게 발생하는 것으로 분석 된다. 즉 피로 파단은 용접부의 응력집중이 Toe부에서 발생하고 또한 경도가 상대적으로 높아 피로강도 낮은 Toe 부 끝단 파이프 열영향부에서 파단이 먼저 발생하는 것으로 판단된다.

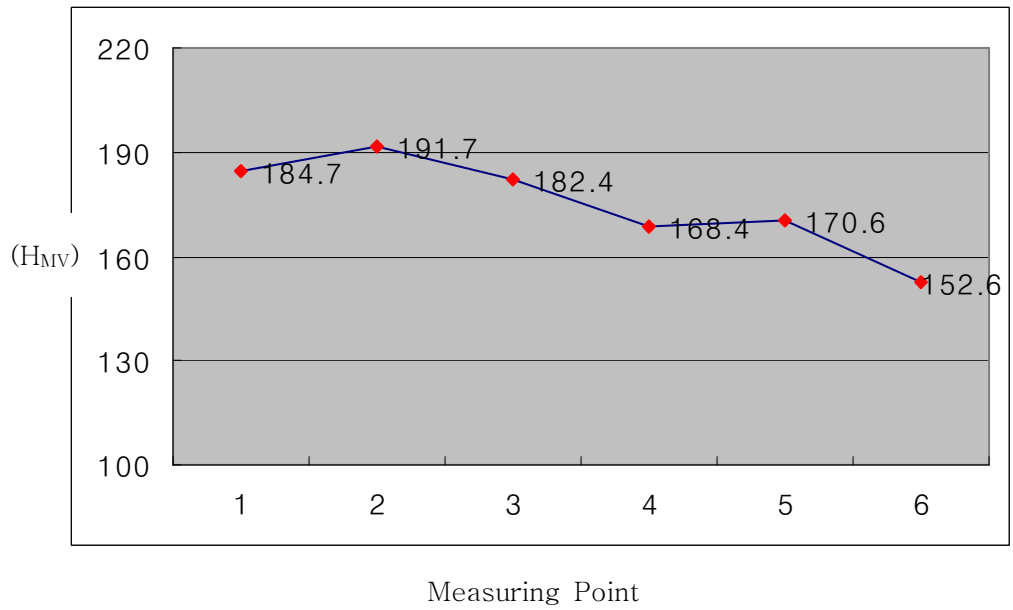
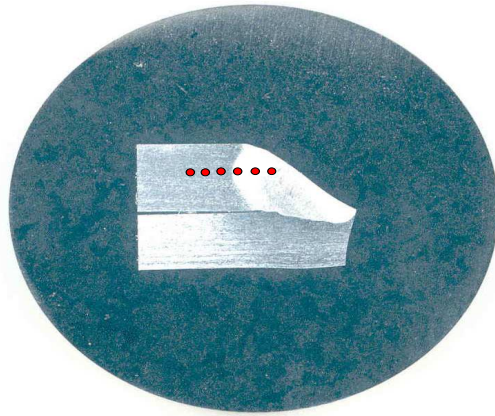


Fig. 4-15. Micro Vickers hardness of 500Kg fracture-tested specimen

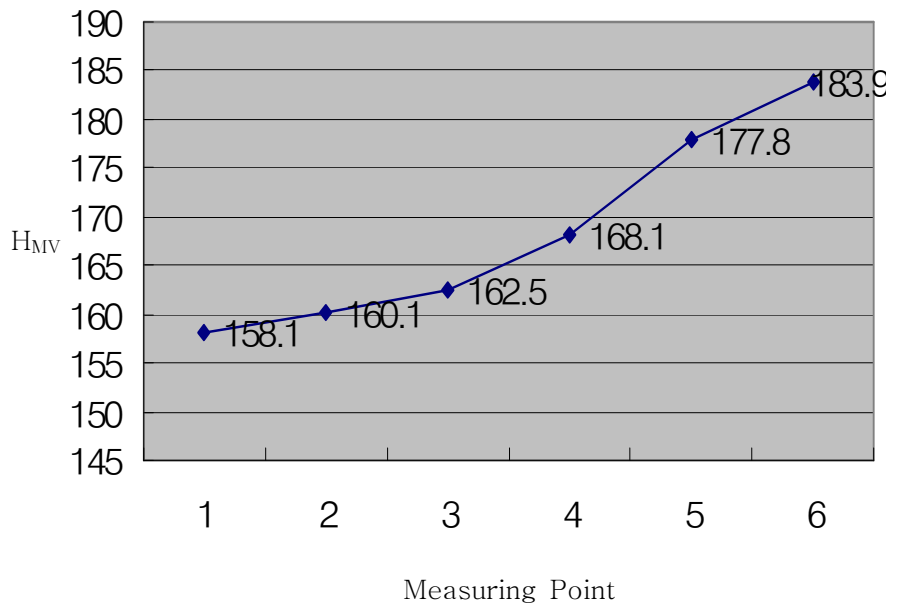
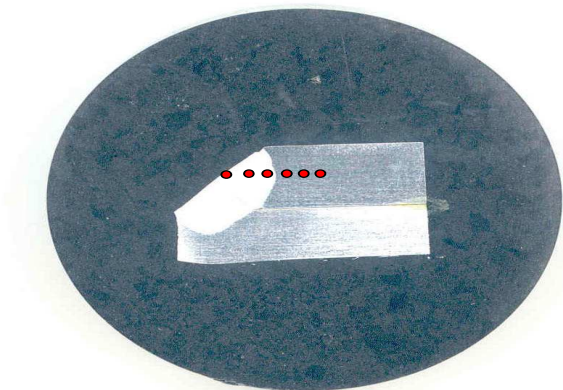
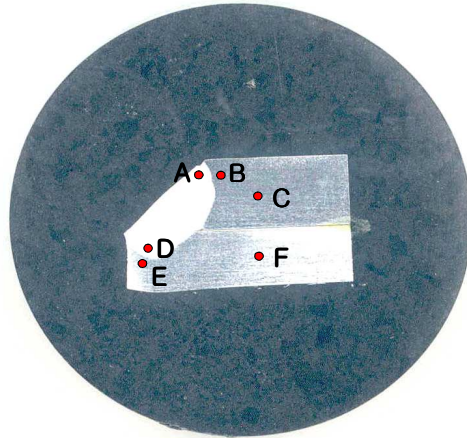


Fig. 4-16 Micro Vickers hardness of 1000Kg fracture-tested specimen



A :158
B :167
C :197
D :181
E :191
F :196

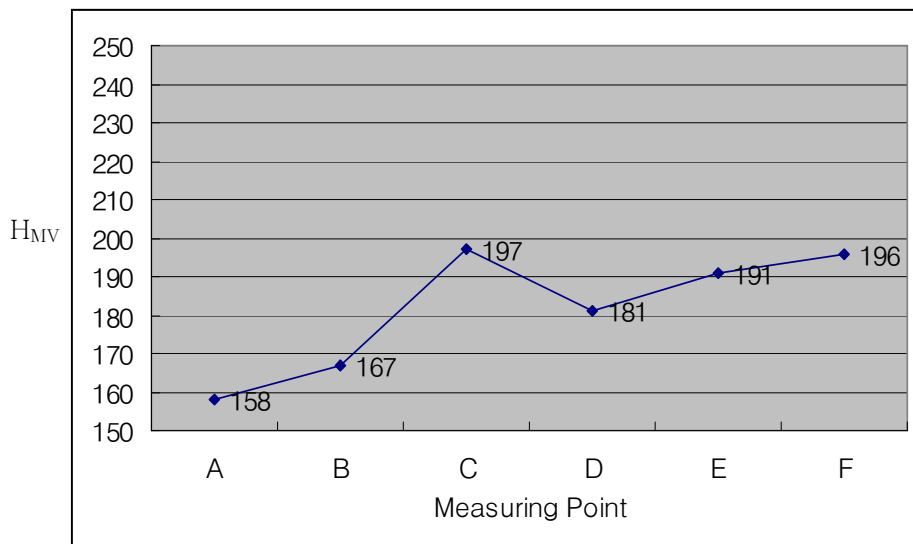


Fig. 4-17. Micro Vickers hardness of 600Kg fracture-tested specimen

3. EDS 성분검사

용접시편의 성분검사를 위한 EDS(Energy Dispersive Spectroscopy) 측정결과는 Table 4-2 및 Fig. 4-18 와 같다.

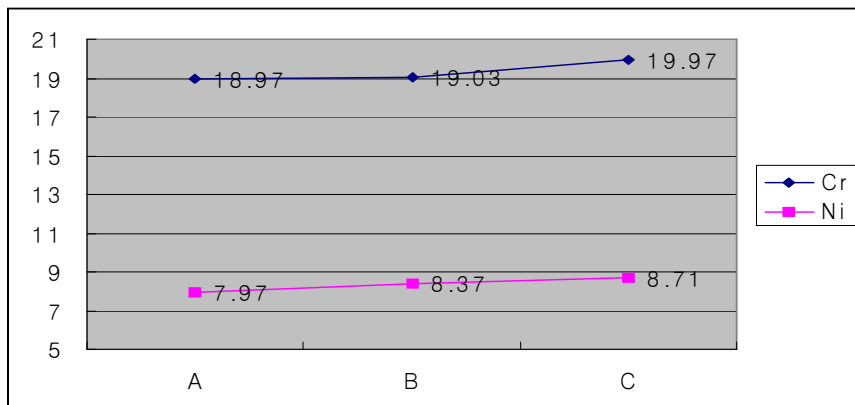
Table 4-2 에서 용접모재와 열영향부 및 용접부간 화학적 조성차이는 큰 차이가 없었으나, 용접부로 갈수록 Ni 및 Cr 조성이 약간 높은 것으로서 나타났으며 Mn과 Fe 의 조성은 이와 반대로 감소하는 경향을 보였다.

용접부에서 Cr 함량이 높은 것은 용접봉에 함유된 Cr 성분이 모재보다 높기 때문인 것으로 판단된다.

EDS 성분 분석과 경도 결과치를 볼 때 따라서 용접부의 경도 증가는 용접봉에 첨가된 높은 Cr 함량에 의한 영향보다는 δ -Ferrite의 영향이 높은 것으로 판단된다.

Table 4-2. EDS Test Result

Element	Composition(wt%)		
	A	B	C
Si	0.33	0.39	0.39
Cr	18.97	19.03	19.97
Mn	2.09	2.04	1.89
Fe	70.64	70.18	69.05
Ni	7.97	8.37	8.71



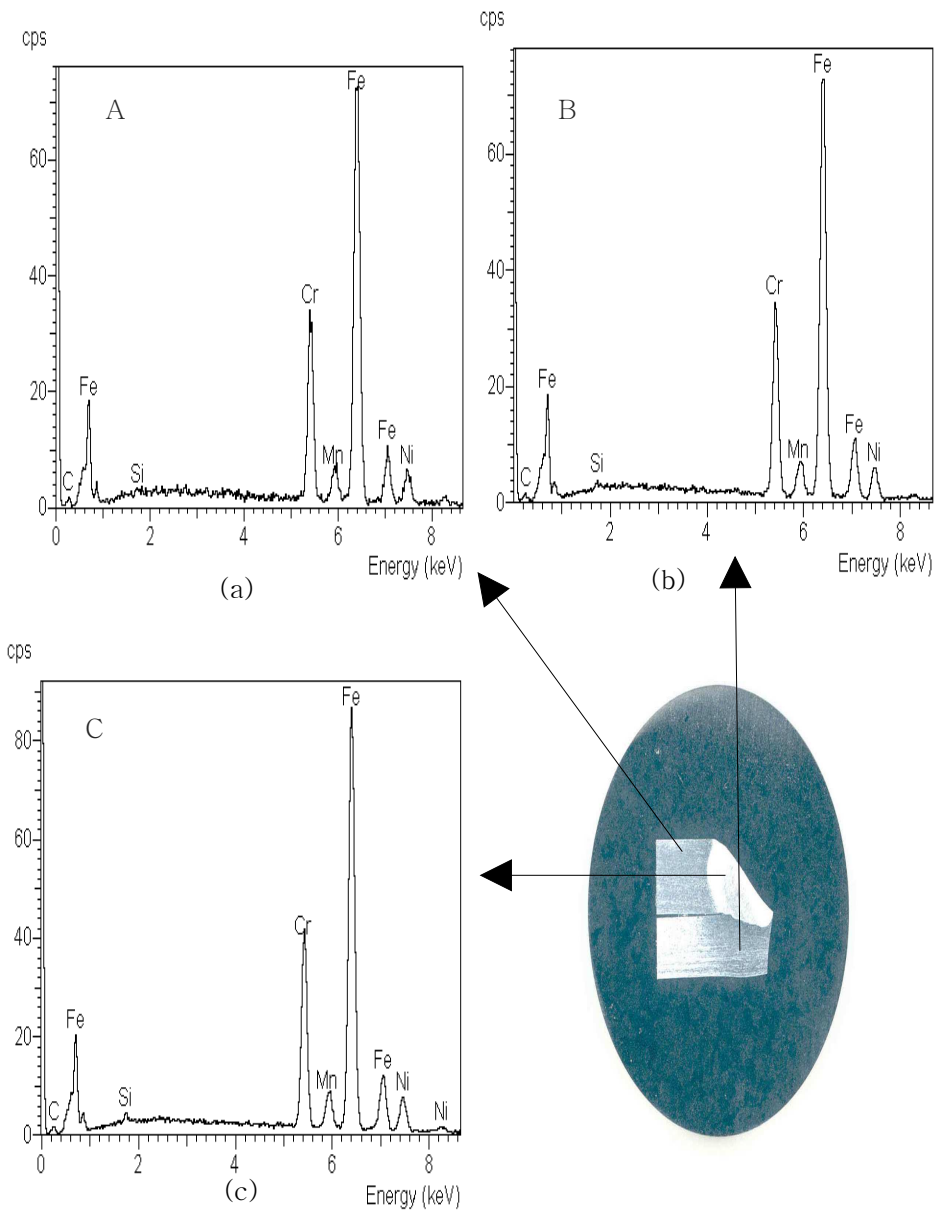


Fig. 4-18. EDS peak of welded metal : (a), (b) heat-affected zone (c) welded metal zone

제5장 결 론

발전소 등 일반 플랜트에서 가장 많이 사용하는 STS-304 의 소구경 배관을 선정해 소켓용접부의 고주기 피로한도 및 파괴 특성을 연구하기 위해 3/4 인치 소켓 용접부를 동일하게 제작하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 피로강도실험에서는 인장강도의 70%하중에서 시작하여 4%씩 낮추어가면서 실험한 결과 재료의 내구한도는 95MPa가 나왔으며 하중이 크면 클수록 시편을 파괴시키는 회전수가 급격히 작아지는 것을 볼 수 있었다.

또한, 피로실험을 통해 우리는 시편에 작용하는 전단응력 즉, 면적당 받는 하중의 크기에 따라 시편이 파괴되는데 걸리는 시간이 어떻게 달라지는가하는 것을 알게 되었다. 데이터 값을 보면 하중이 크면 클수록 시편을 파괴시키는 회전수가 급격하게 작아지는 것을 볼 수 있었다. 그것은 재료의 파괴를 견딜 수 있는 허용 전단응력이 존재하기 때문에 그 이상 힘을 받으면 급격하게 피로가 이뤄진다고 생각된다.

2) 파단특성을 조사한 결과 루트부보다 주로 토우에서 파괴가 이루어 졌으며 이는 용접부 형상에 의한 응력집중현상으로 파악 되었다. 따라서 이러한 현상을 완화하기 위해서는 용접부의 Conclave 형상 유지나 표면상태를 잘 관리해야 하며 필요한 경우에는 용접 후 Grinding을 실시하여 용접 Bead를 평평하게 가공해 주어야 한다.

3) STS-304와 같은 오스트나이트계 스테인레스강을 용접할 때 1500℃ 부근에서 δ -Ferrite 가 생성되는데 이것이 금속의 피로특성을 나빠지게 한다. δ -Ferrite는 열처리로 줄일 수 있는데 열처리를 통하여 δ -Ferrite 양에 따른 피로특성을 비교해 보는 것도 좋을 듯하다.

용접물에서는 모재에 비해 자주 피로파괴 현상이 발생한다. 그 이유는 용접 금속(Bead)의 토우(Toe)가 Notch 효과에 의한 응력집중을 야기할 뿐만 아니라,

Undercut과 같은 표면 결함이 발생하기 쉽고 기타 혼입된 비금속개재물이 응력 집중을 일으켜 피로균열 발생점으로 작용하게 되기 때문이다. 또한 고온 고압배관에서 자주 발생하는 진동은 고주기 피로의 가장 큰 원인이기도 하다. 따라서 소구경 배관의 피로한도를 증가시키기 위해서는 우선 배관 진동측면 설치단계에서 진동방지를 위한 방진기 설치 등 사전 예방조치가 필요하며, 운전 중에는 배관 진동을 측정하여 고진동 부위는 주기적인 비파괴 검사를 수행하는 것도 좋은 방법일 것이다. 또한 용접시 용접결합이 발생하지 않도록 용접품질관리가 요구되며, 응력집중의 완화를 위한 용접 후 표면의 연마 등 불연속면이 생기지 않도록 관리해야 하며, 열처리를 통한 잔류응력제거도 수명연장에 도움이 될 것이다.

아울러 사용자 측에서도 설계 강도를 무시한 과부하를 인가하거나 부식 환경 혹은 고온에서 사용하여 피로파괴를 촉진시키는 경우도 있으므로 사용자도 설계 조건을 인식하여 그 한계를 넘지 않도록 해야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. EPRI, "Vibration Fatigue of Small Bore Socket-Welded Pipe Joints" 1997. 23
2. EPRI, "Vibration Fatigue Testing of Socket Welds" PWRMRP-07. 23
3. EPRI, "EPRI Fatigue Management Handbook" EPRI TR-10453-V1.30
4. "Pipe Cracking Experience in Light Water Reactors" NUREG-0679
5. 강구조물의 피로설계지침 동해설, 김세영 역, 과학기술(2000) 138p
6. ASME 보일러 및 압력용기 규격 Sec. XI, Div.1 (1977)
7. 용접공학, 박성두 양학회 우수논문 장건의 편저, 운창출판사(1998)
8. ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III, V, VIII(1994)
9. 한전기공연구소, "원전 소구경 배관 진동측정기술 및 초음파 측정장치 개발"(2005)
10. 금속재료의 균열과 파괴, 김정근 박해웅 역, 도서출판 골드(2003).42
11. 부산대학교 기계기술연구소 "소구경배관 용접부위 진동 피로에 대한 비파괴 검사 기준설정 기술개발" (2001)
12. 재료 파괴공학, 우홍식, 이갑래 한지원 편저, 보성출판사(1993) 154
13. 파괴역학, 이억섭 김정규 역, 한국경제신문(2000) 309
14. S. Troiler-Mckinstry and R. E. Newnham, MRS Bulletin, (1993).
15. Y. Yamamoto, Furukawa Review, (March, 1986)
16. W. J. Buehler, J. V. Gilfrich and K. C. Weiley, J. Appl. Phys., (1963) 1469.
17. L. Delaey, E. V. Krishnan and H. Tas, J. Mat. Sci., 9 (1974) 1521.
18. E. Hornbongen and G. Wassermann, Z Metallk., 47 (1956) 427.
19. N. Nakanish, Y. Murakami, Y. Kaxhi, T. Mori and S. Miura, Phy. Lett., 37A (1971) 61.
20. S. Miyazaki, K. Otusuka, H. Sakamoto and K. Shimizu Trans. Jap. Inst. Metal, 4 (1981) 224.
21. R. Elst, J. V. Humbeeck and L. Delaey, Master. Sci. & Eng., 4 (1988) 644.

22. J. W. Kim, D. W. Roh, E. S. Lee and Y. G. Kim, Metall. Trans., 21A (1990) 741.
23. M. Miki, Y. Ogino and Y. Hiramatsu, J. Jap. Inst. Met., 51 (1987) 815.
24. S. Miyazaki and K. Otusuka, ISIJ International, 29 (1989) 353.
25. K. P. Dunne and N. F. Kennone, Metals Forum, 4(3), (1981) 176.
26. 파괴역학실험법, 배성인 한민구 역 (1995년)
27. 파괴역학(기초와 응용), T.L앤더스. 이억섭 김정규역 한경BP(2000).
28. M. D. Ratiu "Suitability for Steady State Vibration of Piping Fillet Weld"(2000)
29. 정밀 용접공학, 박종우, 일진사(1998)
32. K. Iida " A Review of Fatigue Failures in LWR Plants in Japan"
33. M.Higuchi et al., "Fatigue Strength of Socket Welded Pipe joints" ASME PVP Vol.313-1 1995
34. D. E. Olson "Avoiding Tap Line Vibration Failures"
35. R. D. Blevins "Formulas for Natural Frequency and Mode Shapes"
36. J. Van Humbeeck, Master. Sci. and Eng., A273-275 (1999)
37. W. Huang, Materials and Design, 23 (2002)

감사의 글

이 논문이 있기까지 바쁘신 와중에도 세심하게 지도해 주신 박창선 지도 교수님께 먼저 깊은 감사드립니다.

그리고 논문심사에 지도 편달을 아끼지 않으신 추현식 교수님과 이길홍 교수님에게 감사드리며, 대학원 생활동안 많은 조언을 주신 금속재료공학과 곽사호 교수님, 백승남 교수님, 강조원 교수님, 고재만 교수님, 장우양 교수님에게도 감사드립니다.

하나밖에 없는 영원한 대학원 동기생이며 대학원 생활 내내 든든한 친구가 되어 주었던 박정수씨에게도 감사드립니다.

직장 생활의 바쁜 와중에도 논문 실험과 작성에 적극적으로 도움을 주신 한전기공 김승래 박사님, 전치홍 박사님, 한국기계연구원에 유위도 박사님, 그리고 무진기연에 조성은 사장님과 김정희 부장님에게도 감사드립니다. 지금은 다른 곳에서 근무하지만 늦은 시간까지 성심성의껏 논문 참고자료를 구해주고 정리해 준 전력연구원의 황도현씨에게도 감사드립니다.

여러모로 부족한 점이 많은 나에게 대학원 진학에 길을 열어주시고 후원을 아끼지 않으신 충남대학교 천병선 교수님, 박병주 실장님, 박기만 부장님에게도 이 지면을 통해서 다시 한번 감사드립니다.

마지막으로 나에게 영원한 인생의 동반자이며 후원자인 아내 정연하, 그리고 저를 낳아 주시고 길러 주신 부모님에게도 감사드립니다.

저작물 이용 허락서

학 과	첨단소재공학과	학 번	20057297	과 정	석사
성 명	한글: 조성훈 한문: 趙 成 勳 영문 : Cho Seong-hoon				
주 소	전남 영광군 홍농읍 상하리 422 한수원 사택 26-205호				
연락처	E-MAIL : seonghoon@khnp.co.kr				
논문 제목	한글 : STS-304 용접부의 피로수명에 관한 연구				
	영문 : A study on the fatigue limit test of welded STS-304				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의() 반대()

2007년 2월 일

저작자: 조성훈 (서명 또는 인)

조선대학교 총장 귀하