

T형상용접 이음에서 매몰된 라멜라균열이 용접부의 기계적강도에 미치는 영향⁺

고 진 현*

Effects of the Buried Lamellar Tears on the Mechanical Strength in the Welded T Joints

J.H.Koh

Key Words : Buried Lamellar Tearing(매몰된 라멜라균열), Load Carrying Capacity(하중지지능력), Static and Fatigue Strengths(정적 및 피로강도), Ultrasonic Tear Map(초음파점사 균열지도), Terrace and Shear Wall(층과 전단벽), Fatigue Crack Propagation(피로균열전파), Non-metallic Inclusion(비금속 개재물), Decohesion and Delamination

Abstract

The mechanical strengths of buried lamellar tears located near the weld toe in the welded tee joints were evaluated in terms of the loss of load carrying capacity as a function of tear area. In static loading, the load carrying capacity was significantly reduced when tear intercepted over 10% of the cross-sectional area of the welded joints. However, the welded joints containing buried tears still failed at stresses over the yield strength of the base metal in the through-thickness direction in spite of the presence of tears up to 20-25% of the area. Fatigue strength of welded joints containing tears were markedly reduced with increasing tear areas. Lehigh lamellar tearing test used in this study to produce specimens was described in detail.

The load carrying capacity in static loading was influenced by the reduction of supporting area whereas that in fatigue loading was influenced by the stress-concentration effects of lamellar tears and the reduction of supporting area. In bend tests, the pre-existing lamellar tears always grew up toward the weld toe. However, in fatigue loading, cracks grew up and down simultaneously from both the weld toe and the top of lamellar tears because of stress concentration. In fatigue loading, delaminations and decohesions of inclusion/matrix interface generated in multipass welds provided crack propagation paths and enhanced crack propagation because the tips of delaminations and decohesions acted as stress raisers.

⁺ 1988. 4 춘계 학술대회 발표

*정회원 한국에너지연구소

1. 서 론

라멜라균열은 철강의 두께방향에서의 낮은 연성과 용접열수축에 따른 과대한 변형등의 복합적인 영향에 의하여 열영향부에 인접한 모재에 발생한다. 이는 열간압연에 의하여 강의 표면에 평행하게 길게 연신된 MnS, silicate, alumina 및 산화물등의 비금속개재물의 존재에 의하여 모재와 비금속 개재물 사이의 계면이 용접열수축에 따른 변형으로 분리되는 균열로 계단 또는 Zigzag형상을 하고 있음이 그 특색이다. T, 모서리, 십자형등 복잡한 이음에 발생하며, 용접설계, 재료와 용접시공등의 여러인자들의 상호작용에 의하여 발생한다. 라멜라균열의 생성기구 및 인자등에 대하여는 이미 소개 되었다¹⁾.

라멜라균열이 용접이음의 표면에 나타나면 쉽게 탐지되어 보수될 수 있지만 용접이음 내부에 매몰된 균열(buried tear)로 존재한다면 초음파검사(ultrasonic test)를 제외하고는 그 탐지가 곤란하며 용접이음의 건전성을 손상하게 된다. 용접이음에서 라멜라균열의 중요성은 여러차례 조사되어 왔었다. 즉 Granstrom²⁾ 은 라멜라균열이 십자형 이음에서 초음파검사에 의하여 확인 되었지만 하중지지능력은 크게 감소하지 않았다고 보고하고 있으며 The Welding Institute³⁾ 에서는 상당한 크기의 라멜라 균열의 존재에도 불구하고 대부분의 시편은 재료의 모재 항복강도 이상에서 파괴되었다고 보고하였고 또한 라멜라균열이 free surface에서 떨어져 존재하면 굽힘하중 아래서는 용접이음에 거의 손상을 주지 않았다⁴⁾. 그러나 이들

은 용접이음에서 균열의 위치 및 크기를 정확하게 탐지하지 않았기 때문에 균열을 포함하고 있는 용접이음의 건전성의 손실을 정량적으로 조사하지 못했다.

라멜라균열이 용접이음에서 free surface로 부터 떨어져 존재하면 용접이음의 하중지지능력에 큰 손상을 주지않기 때문에, 의문은 라멜라균열이 용접끝(Weld toe)근처에 존재할때 어떻게 용접이음의 건전성이 사용하중에서 손상되는지 조사되어야 될것이다.

이를 위해서는 첫째, 라멜라균열의 용접이음에서의 위치와 크기가 정확하게 탐지되어야하고 둘째, 매몰된 균열이 정적하중(static load) 및 cycling하중에서 어떻게 하중지지능력을 손상하는지를 정량적으로 평가되어야 하겠다. 이를 위하여 본 연구에서는 T 용접이음에서 buried 라멜라균열의 중요성을 두단계로 평가하였다.

첫째, 라멜라균열이 없는 T 용접이음의 인장, 굽힘등의 정적하중과 피로하중에서 평가이며, 둘째는 크기가 다른 buried tear가 weld toe 근처에 존재할때 정적및 피로하중에서의 하중지지능력의 손실의 정량적인 조사이다. 또한 본 연구에서는 비금속개재물이 두께방향에서의 피로균열전파에 미치는 효과를 조사하였다.

2. 실험방법

2.1. 재료

정적하중시험에서는 ASTM 규격 A572 Grade 50와 A588 Grade A의 두종류의 강이 사용되었고

Table 1. Chemical Composition and Mechanical Properties of A572 Grade 50 and A588 Grade A Steels.

(a)Chemical composition(wt %)

A572	C	Mn	P	S	Si	Cr	V	Cu	Ni	Al	Mo
Grade 50	0.18	1.32	0.011	0.025	0.28	0.13	0.06	0.13	0.10	0.034	0.004
A588 Grade A	0.18	1.19	0.011	0.034	0.22	0.60	0.08	0.28	0.29	0.058	

(b)Mechanical properties

	Longitudinal MPa (ksi)				Through thickness MPa (ksi)			
	Y.S.	T.S.	Elongation(%)	R.A.(%)	Y.S.	T.S.	Elongation(%)	R.A.(%)
A572 Grade 50	410(59)	620(89)	28.5	50	377(58)	522(76)	-	6.6
A588 Grade A	330(48)	530(77)	28		-	-	5	-

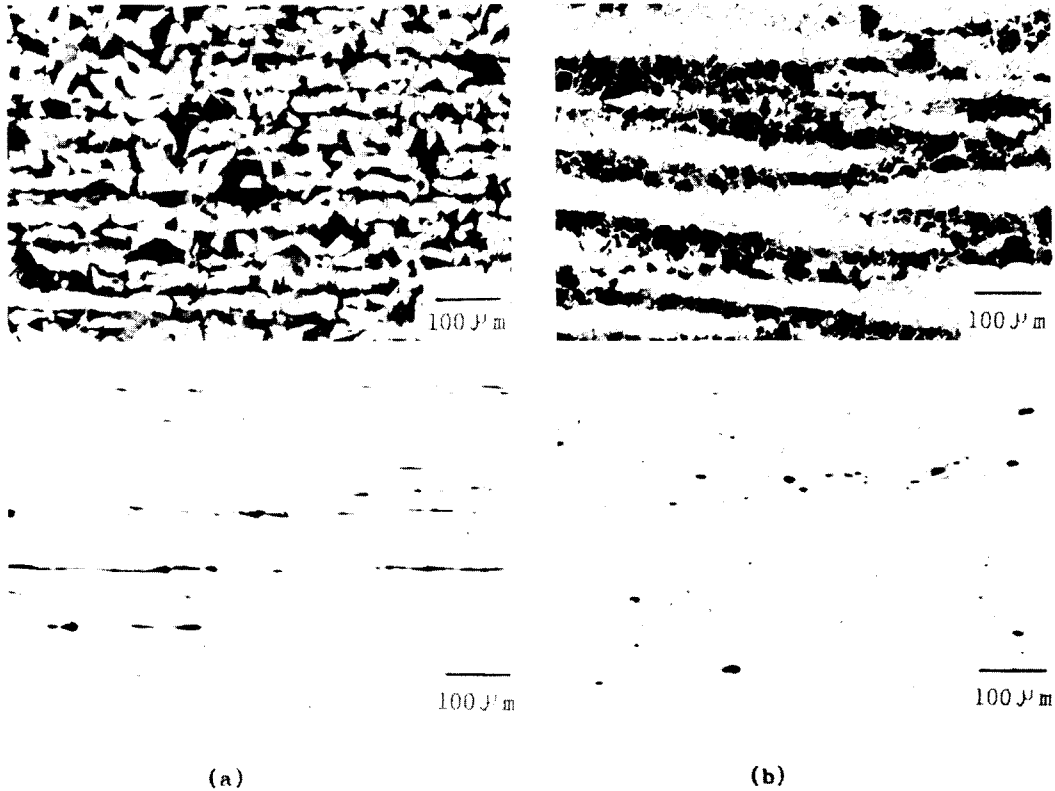


Fig 1. Microstructure and distribution of nonmetallic inclusions in the through-thickness direction of (a) A572 Grade 50 and (b) A588 Grade A steels.

피로하중시험에는 A572 Grade 50강이 사용되었다.

표 1은 두종류 강의 화학조성 및 기계적 성질이며 그림1은 미세조직과 비금속개재물의 형상 및 분포이다. A572 강 및 A588 강은 전형적인 펄라이트-페라이트 미세조직을 갖고 있고 A572강에 있어서 비금속개재물은 압연방향에 평행하게 길게 연신된 Type II MnS로서 라멜라균열발생에 민감할 것으로 사료되어 선택되었고 이와 대조적으로 A588강에 있어서 비금속개재물의 형상은 둥글다.

2.2. Lehigh 라멜라균열시험에 의한 T 형상 용접이음제작

Lehigh 라멜라균열시험 fixture는 그림 2와 같다. 이것은 여러 다른 크기의 라멜라균열을 정량적으로 생성할 수 있는 장점이 있다⁵⁾.

시편치수는 가로 75mm × 세로 250mm × 두께(t)이며 시편은 용접후 변형을 억제하기 위한

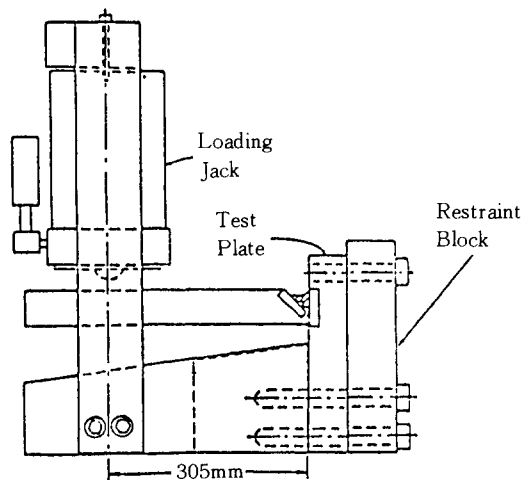


Fig 2. Lehigh Lamellar Tearing Fixture.

구속판(restraint block)을 시험 fixture와 볼트로 연결하였고 가로 75mm × 두께 50mm × 길이 350mm의 cantilever 빔을 시편에 수직으로

fixture에 위치 하였다. 이때 cantilever 빔의 시편과 맞닿는 쪽에 깊이 25mm, 45° 경사의 single V-groove를 두었다. 시편과 cantilever 빔 사이에 용접패스가 용착될 부분은 용접이 시작되는 부분과 끝나는 부분에 run-on 및 run-off tab을 부착하였다.

두패스의 용접이 single V-groove 에 용착된 후 hydraulic loading jack을 이용하여 cantilever 빔에 하중을 가하였다. 이때 하중은 load jack에 부착된 스트레인 게이지에 의하여 strip chart recorder에 기록 되었다. 세번째 용접 패스가 용착된 후 라멜라균열이 발생될 때까지 하중을 가하였다. 여기서 매층용접이 용착된 후 용접층 높이를 측정하여 응력수준(stress level)의 하중은 경험에 의하여 얻어진 다음의 식을 이용하여 계산하였다.

P: 하중

$$= \frac{\text{응력} \times \text{용접면적} \times \text{빔밀면부터 용접중심사이의 거리}}{\text{Cantilever 빔의 길이}}$$

그리고 라멜라 균열의 민감성을 평가하기 위하여 용접이음을 적당한 응력수준 범위내에서 시험하여 조기파괴(premature failure)가 발생하지 않는 응력수준 보다 약간 높은 응력을 임계구속도(critical level of restraint)로 정하였다. A572 강과 A588강의 임계구속도는 각각 340과 380 MPa였다. 여러다른 크기의 균열은 load vs. displacement 곡선이 최고점(plateau)에 도달하였다가 균열발생 및 성장에 의하여 하중이 감소되는 순간에 가했던 하중을 제거함으로 생성시킬 수 있었다. 라멜라균열의 생성을 monitoring 하기 위하여 시편으로 부터 150mm 거리의 cantilever 빔에 음향방출 탐침자(acoustic emission transducer)를 고온용 couplant를 이용하여 위치하였고 라멜라균열생성은 확성기를 통하여 소리로 전환시켜 라멜라균열 발생을 알수 있었다.

용접은 GMA 방법을 사용하였으며 용접조건은 다음과 같았다.

- 전류 : 300A
- 전압 : 30V
- 용접속도 : 30 cm/min,
- 보호가스 : 98%Ar + 2%O₂
- 용접와이어 : E705-3, 1.1mmφ
- interpass 온도 : 50°C

라멜라균열발생이 초음파검사에 의하여 확인된

후 매몰된 균열을 용접끝 근처에 위치 시키기 위하여 그림 3과 같이 cut & reweld technique⁵⁾ 을 사용하였다. 상기한 바와 같이 3용접패스의

용착에 이어 라멜라균열을 생성한후 cantilever 빔 쪽으로 3mm 거리의 지점에 용접금속을 수직으로 절단하였고, 용착금속이 시편의 길이 방향으로 50mm 되게 buttering을 하였다. 이것은 시편 내부에 생성된 매몰된 균열이 용접시 재용용 되는 것을 방지하기 위함이었다. 그림 3에서와 같이 한 쪽에 double vee groove의 cantilever 빔의 표면과 시편의 용접금속끝이 일치하도록 25mm 위로 올려 재위치한후 각각 9 용접패스를 double vee groove에 증착하여 T 이음을 완성하였다.

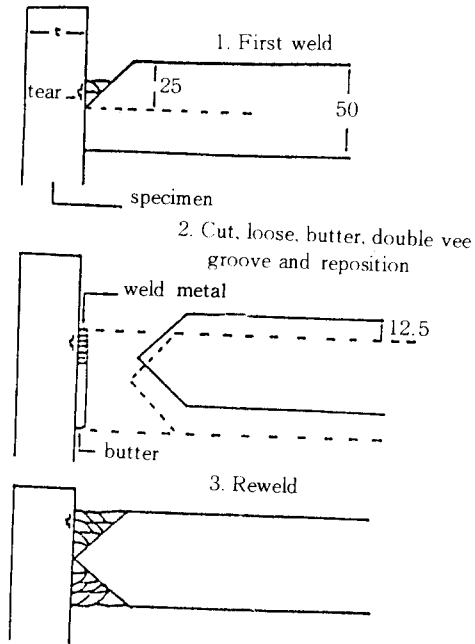


Fig 3. Test specimen produced by the cut and reweld to move lamellar tear to near weld toe of T joint.

2.3. 라멜라균열의 비파괴검사

매몰된 라멜라균열의 크기와 면적은 초음파검사에 의하여 측정되었다. 초음파검사는 탐침자의 각도를 변화하여 종파(longitudinal wave)와 횡파(shear wave)를 이용하여 접촉 및 수침법으로 라멜라균열을 탐지하여 균열지도(tear map)을 작성하였다⁶⁾. 초음파검사는 ANSI/AWS D1, 1-84 지침서에 따라 수행되었다.

2.4. 하중지지능력(load carrying capacity) 평가

초음파 검사에 의하여 작성된 균열지도에 근거를 두어 다음과 같은 T형상의 용접이음 시편을 준비하여 다음의 시험을 수행하였다.

2.4.1. 인장시험

시편치수는 두께 25mm×폭 25mm×길이 450mm였고, 인장시험기는 543KN(120,000lbs)용량의 만능시험기를 사용하여 수행하였다.

2.4.2. 굽힘시험

시편치수는 두께 50mm×폭 25mm×길이 300mm이었으며 굽힘시험용 치구에 설치한 후 용접끝이 인장을 받게끔 인장시험기의 crosshead에 tup을 부착하여 시편으로부터 20cm 거리의 cantilever 빔에 압축하중을 가하였다.

2.4.3. 피로시험

시편치수는 두께 50mm×폭 25mm×길이 480mm였고 constant deflection amplitude의 피로시험기를 이용하여 weld toe가 인장을 받게끔 cantilever 빔을 시편으로부터 460mm 거리에 굽힘하중을 가하였으며 $R=0(R=\frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}})$ 였고 cycling 주기는 3.3Hz였다. 그리고 장비는 초기하중의 10%가 감소 되었을때 자동적으로 cycling을 중단되게 set-up 하였다. 용접표면에 절삭유를 발라 균열이 전파되기 시작한후 cycling 하중에 의하여 열리고 닫힐때 기름기포(oil bubble)를 형성하는 것을 이용하여 피로균열의 개시 및 성장을 조사하였다.

2.4.4. Metallography 및 fractography

A572 및 A588 두 종류의 강을 절단, 연마한후 2% nital 용액에 부식하여 미세조직을 조사하였고 시편을 부식하지 않고 비금속 개재물의 형상 및 분포를 광학현미경에 의하여 조사하였다. 라멜라균열에 의하여 파괴된 부분의 파단면의 특성을 주사전자 현미경에 의하여 조사하였다.

2.4.5. Fiber stress

굽힘 및 피로시험에서 fiber stress는 다음의 빔 굽힘 공식을 이용하여 계산 하였다.

$$\sigma = \frac{Mc}{I}$$

여기서,

σ : fiber stress

M : applied bending moment

I : moment of inertia

c : distance from neutral axis to stressed point.

3. 결과 및 고찰

그림 4a는 본 시험에서 발생된 전형적인 계단형상의 라멜라균열이고 그림 4b는 T형상용접이음에서 매몰된 라멜라균열이 용접끝 근처에 존재하고 있는 것을 보이고 있다.

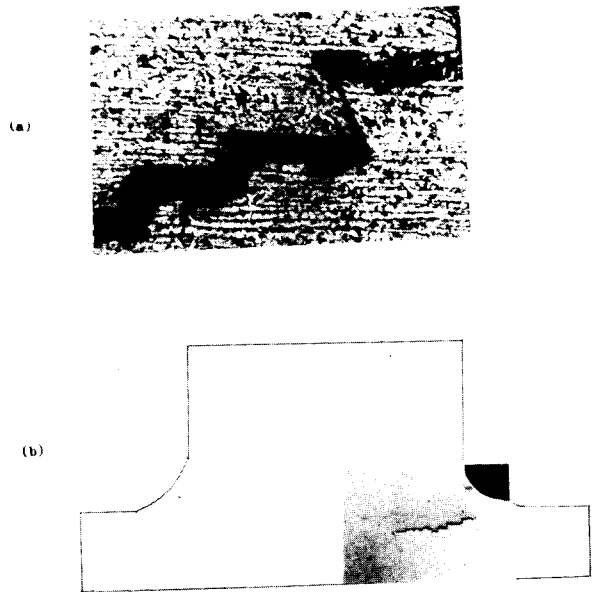


Fig 4. (a) Step-like appearance of lamellar tearing (40X).

(b) A welded T joint containing buried lamellar tear (3.5X).

라멜라균열은 여러다른 면에서 압연방향에 평행하게 길게 연신된 비금속개재물과 모재사이에서 용접열수축에 의하여 분리된 부분인 층(terrace)과 이들 층들이 전파되면서 층사이의 모재가 압연방향에 수직으로 파괴되면서 연결되는 부분인 전단벽(shear wall)이다. 라멜라균열 발생에 민감한 재료는 두께방향의 연성이 낮으며 이러한 특성을 가진 강의 파단면은 그림 5a와 같이 나무껍질모양(woody appearance)을 나타냄이 그 특색이다. 그림 5a의 파단면은 라멜라 균열의 발생에 의하

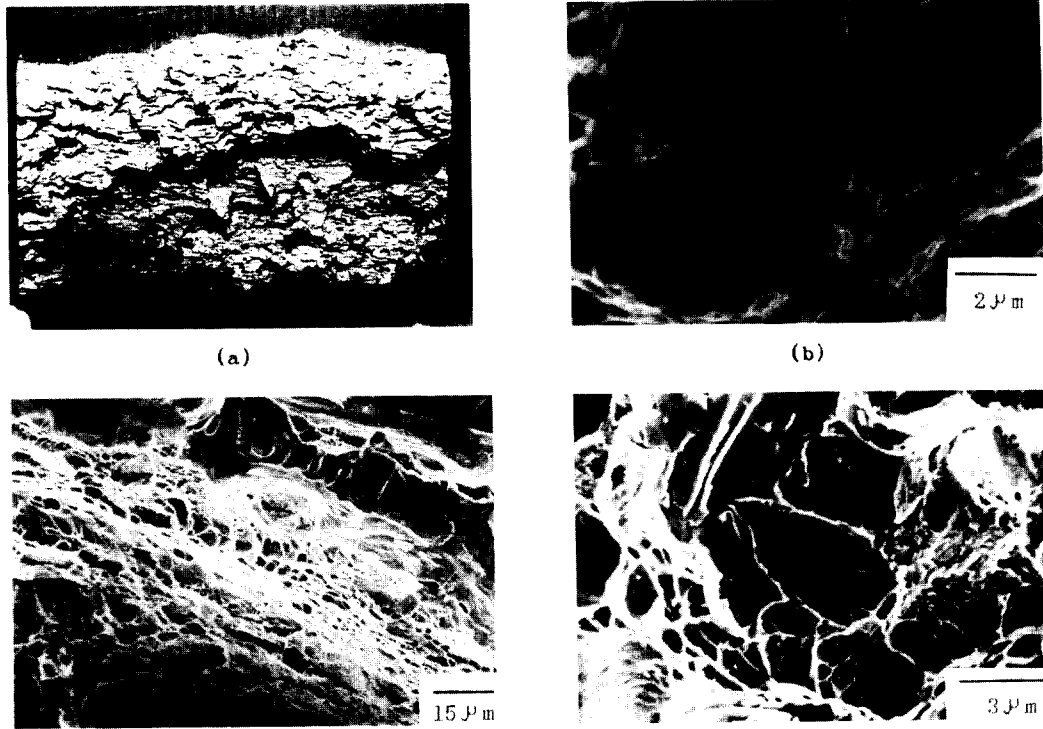


Fig 5. Fractography of lamellar tearing.
 (a)woody appearance (15X).
 (b)ductile fracture from terrace.

(c)shear wall.
 (d)cleavage fracture from shear wall.

여 파단된 부분의 파면이다. 그림 5b는 라멜라균열에 의하여 층부분의 파단된 파면으로 Sulfur 등의 비금속개재물의 존재에 의하여 모재와 비금속개재물의 사이에서 파괴가 시작되어 형성된 미세기공들이 응력수준의 증가로 성장하면서 인접한 미세기공과 연결되는 microvoid coalescence의 연성(ductile)있는 파면을 보이고 있으나 실제로 라멜라 균열에 민감한 재료의 두께방향에서의 연성은 표 1에서와 같이 아주 낮다. 그림 5c는 전단벽부분의 파단면이다. 전단벽은 모재의 특성에 따라 국부적으로 ductile한 microvoid coalescence와 취약한 cleavage파면을 보여 주고 있음이 관찰되었다(그림 5d). 다른 면상에 형성된 층들이 용접열수축에 의하여 발생된 과대한 변형이 강의 두께방향으로 부과되면 층사이의 모재의 취약한 부분에서 파괴가 발생하고 파면은 폭포에서 물이 떨어지는듯한 파면을 보인다. (그림 5c)

그림 6은 T 용접이음에서의 두께방향의 인장 및 굽힘시험등의 정적하중시험의 결과를 하중지지

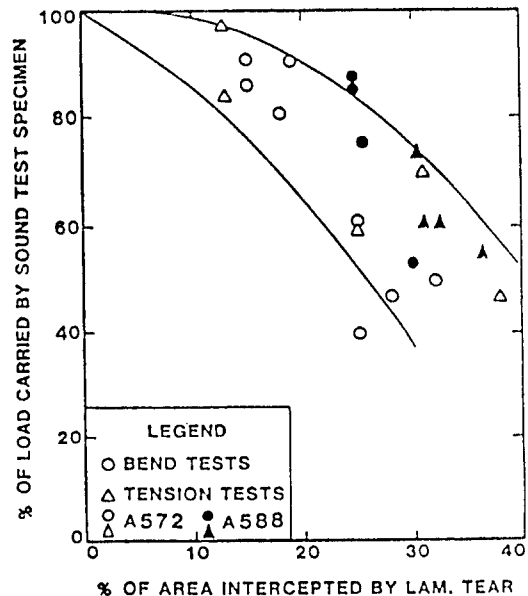


Fig 6. Effect of extent of lamellar tearing on static strength of welded tee-joints.

Table 2. Results of tension and bend tests on welded tee joints

Specimen	UT	Area of Tear x-section		Max Load KN(kips)	Max Stress MPa(ksi)	Failure Deflection
A.A572 Grade 50 Steel						
Tension Test						
LTU15-1	240mm ²	240mm ²	31%*	177(39)	270(39)	10mm
LTU15-2	240	195	30	213(47)	325(47)	-
LTU16	160	150	23	180(40.5)	280(40.5)	7
LTU17	84	-	13	306(67.5)	465(67.5)	11
LTU18	84	105	16	259(57)	395(57)	9
LTU19-1 no tears introduced				309(68)	470(68)	9
Bend Test						
LTU7-1	320	-	25%#	30(6,6)	270(39)	11
LTU7-2	320	-	25	19.5(4,3)	180(26)	16
LTU8-1	195	-	15	44.5(9,8)	410(59)	17
LTU8-2	195	-	15	42(9,3)	380(55)	11
LTU11-1	400	400	31	24.5(5,4)	220(32)	-
LTU11-2	355	335	26	24(5,3)	215(31)	18
LTU20-1	225	230	18	39.5(8,7)	360(52)	6
LTU20-2	245	260	20	45(9,9)	415(60)	7
LTU21-1 no tears introduced				50(11)	455(66)	20
LTU21-2 no tears introduced				48(10,6)	440(65)	15
B. A588 Grade A Steel						
Tension Tests						
LTU22-1	245mm ²		38%	150(33)	228(33)	8mm
LTU22-1	213		33	204(45)	310(45)	11
LTU24-1	225		35	163(36)	248(36)	10
LTU24-2	232		36	162(35,8)	247(35,8)	10
LTU27-1 no tears introduced				10	393(57)	14
Bend Test						
LTU25-1	331		25%	38.6(8.5)	352(51)	19
LTU25-2	280		21	45.9(10.1)	418(60.6)	24
LTU26-1 no tears introduced				53,6(11,8)	488(70,8)	25
LTU26-2 no tears introduced				52,3(11,5)	476(69)	25
LTU28-2	357		27%	29(6,4)	265(38,4)	16
LTU31-1	280		21	46,8(10,3)	426(61,8)	20

* All tension tests had cross-sections of 645mm²(1"×1")

All bend tests had cross-sections of 1275mm²(1"×2")

능력 감소와 균열 면적과의 관계이고 표 2는 두강이 라멜라 균열을 포함하고 있을때와 라멜라 균열이 없을 경우 인장 및 굽힘하중에서의 시험결과이다.

표 2에서 균열면적은 초음파 검사결과 작성된 균열지도를 토대로 결정되었고 또 시편이 허락한다면 시편의 양측면을 연마한 후 금속조직학적 방법으로 균열크기를 측정하여 계산하였으며 이는 초음파 검사결과와 비교하기 위함이었다. 그리고 라멜라 균열의 면적을 시편의 단면적으로 나누어

백분율(%)로 표시하였다. 그림 6에서는 하중지지 능력은 tear가 없는 용접이음의 정적강도를 기준하여 %로 나타냈다. 다소 결과의 산란도는 크지만 두종류의 강에서 하중지지능력은 균열면적이 증가함에 따라 현저히 감소했다. 이는 라멜라 균열의 존재에 비례하여 시편의 지지면적이 감소하며 균열 끝의 응력집중 때문이다.

하중지지능력은 균열면적이 지지면적의 10% 이상일 때 현저하게 감소하고 있다. 균열면적이 약 20% 정도일때는 균열이 없는 시편의 약 80% 정

도의 하중지지능력, 약 30% 정도일때는 균열이 없는 시편의 약 60% 정도의 하중지지능력을 보였다. 그러나 비록 균열면적이 약 20% 정도라도 A572강의 경우 두께방향의 항복강도 이상에서 파괴가 발생하였다.

이는 용접에 의하여 일반적으로 열영향부와 용접금속은 강화되기 때문에 용접끝 근처에 균열이 존재하더라도 용접이음을 파괴하기 위해서는 이 강화된 영역을 전파하여야 하기 때문이다. 인장 및 굽힘하중하에서는 라멜라균열이 용접이음에 존재할때 균열끝(tear tip)에서 용접 끝으로 성장하였다. 이는 정적하중하에서 용접끝이 형상특성 때문에 큰응력을 받기 때문이다.

그림 7의 S-N 곡선은 여러크기의 매몰된 균열의 피로시험 결과이다. A572강이 피로시험에 사용되었다. A588강은 라멜라균열 발생에 저항이 컸기 때문에 균열발생이 어려웠다. 이는 동근형상의 비금속개재물을 포함하고 있었기 때문이었다. A572강은 다소 균열발생이 민감하였지만 다양한 크기의 균열을 생성하기가 어려웠기 때문에 본 실험에서는 충분한 수의 시편을 준비하지 못하였다. 실험결과 산란도가 있지만, 정적강도에서와 같이 피로강도에서도 균열면적이 증가함에 따라 현저히 감소했다. 그림 8은 균열이 존재하지 않는 시편을 기준으로 균열면적에 따른 하중지지능력 손실을 피로하중하에서 조사된 것이며 정적하중하에서의 결과와 비교하기 위하여 도시하였다.

여기서 피로강도는 피로하중의 반복주기가 10^6 에 해당되는 수치이다. 시편의 단면적이 균열존재에 의하여 감소됨에 따라 하중지지능력은 손상되

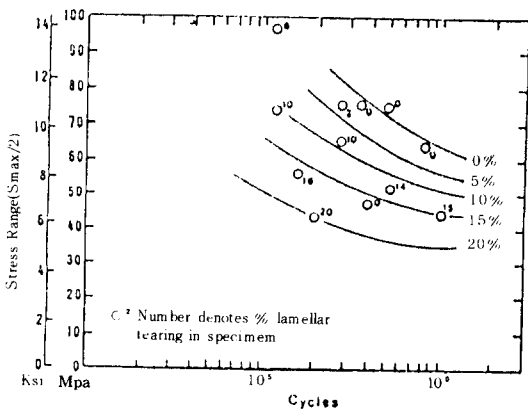


Fig 7. Results of 0 to tension fatigue tests.

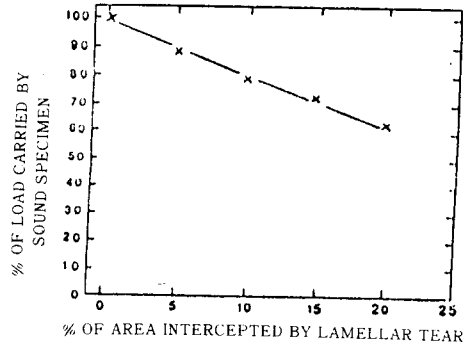


Fig 8. Loss of fatigue strength as a function of tear area.

고 있음을 알수있다. 피로하중하에서의 하중지지능력의 손실은 그림 6에서 보여주는 바와같이 정적하중하에서의 하중지지능력의 손실이 더 심한것을 알수있다.

이것은 균열존재에 따른 지지면적감소뿐 아니라 균열끝의 notch효과로 인한 응력집중 때문이었다. 그리고 라멜라균열이 용접부의 기계적성질에 미치는 영향은 더욱 정량적으로 조사되어야 할 것으로 사료된다.

그림 9는 T형상용접이음에서 매몰된 라멜라균열이 존재하지 않을때와 존재할때 균열전파 mode이다. 인장 및 굽힘등 정적하중하에서는 매몰된 균열끝에서 용접끝을 향하여 전파되었는데 피로하중하에서는 용접이음에서의 균열의 위치에 따라 3종류의 균열성장을 보였다. 그림 9-a에서 보는 바와같이 라멜라균열이 없는 용접이음의 경우 피로하중하에서 용접끝이 가장 큰 인장응력을 받기 때문에 crack이 용접끝에서 발생하여 응력이 점점 작아지는 방향으로 전파되었다. 라멜라균열이 용접이음 내부에 매몰된 균열로 존재할 때 그림 9-b와 같이 균열끝에서 용접끝을 향하여 성장하였으며 그림 9-c와 같이 용접끝과 균열끝에서 동시 성장전파 되는등 두가지 다른 균열전파 mode를 보였다. 이는 용접끝과 균열끝은 피로하중하에서 인장응력을 받았으며 두곳 모두 이조건하에서 응력집중장소로 역할을 하였기 때문이다. 이때 피로 균열성장은 용접 열영향부나 모재에 존재하는 비금속개재물이 용접열수축에 의하여 모재와 사이에서 분리되어 피로균열전파의 징검다리역할을 하였기 때문일 것이다.

비금속개재물 및 상변태에 의해 생성되는 석출

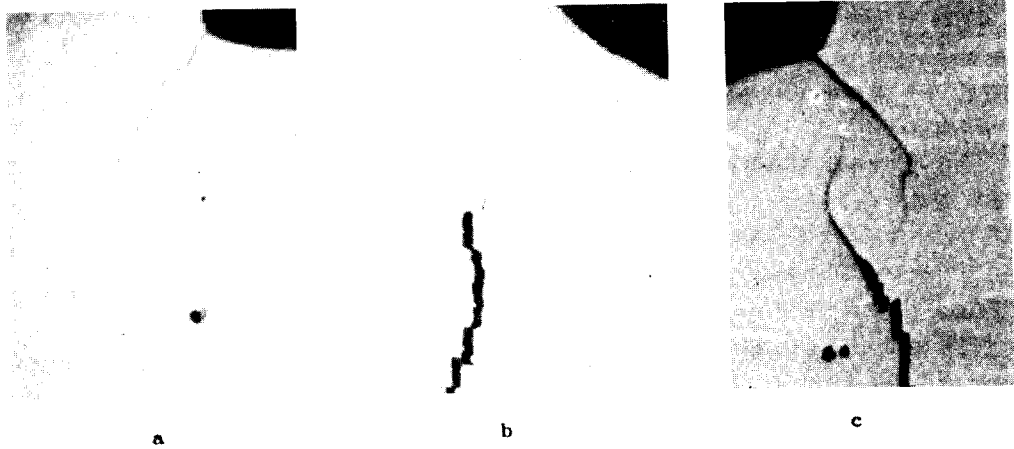


Fig 9. Effect of tear position on direction of growth of fatigue crack. 10X
 a. growth from weld toe. c. simul taneous growth from both locations.
 b. growth from top of tear.

물등의 개재물이 피로균열전파에 미치는 영향에 대하여는 압연강 및 알루미늄 합금에서의 가로 및 세로방향에서는 상충된 이견이 대두되고 있다. 하나는 개재물이 주응력(principal stress)방향과 평행하게 존재하면 피로균열전파에 대한 저항이 발생하여 피로균열 전파를 둔화 또는 균열이 전파중 개재물과 만나면 개재물이 균열끝의 예리함을 둔화시켜 균열가지(crack branch)를 발생시켜 균열 arrestor역할을 한다는 것이고 다른 학설은 개재물은 주 균열의 끝에 발생하는 소성영역(plastic zone)에 작은 균열을 형성하기 피로균열 성장속도를 가속한다는 것이다. 그러나 압연강의 두께방향에서는 그림 1(a)에서와 같이 개재물이 압연방향에 평행하게 연신된다.

그림 10에서 라멜라균열이 포함되지 않았던 시편을 피로하중을 가하였을때 T 형상 용접이음의 용접끝에서 발생된 피로균열은 주응력에 수직방향으로 성장한다. 이때 개재물이나 stringer개재물이 피로 균열과 연결이 되면 개재물을 따라 균열가지를 조장함이 없이 전파 하였다. 본 실험에서는 비금속개재물의 피로균열전파속도에 미치는 영향을 조사하지는 않았지만 금속학적 조사에 의하여 비금속개재물이 피로균열전파를 조장한다는 것을 알수 있었다. 특히 비금속개재물이나 stringer 개재물등이 다층용접에서 응고수축에 의하여 두께 방향으로 부과된 변형에 의하여 모재와 분리되는 decohesion 상태나 delamination등이 이미 존재

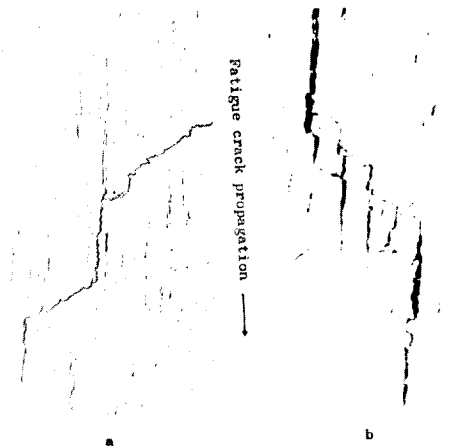


Fig 10. Fatigue crack propagation, 40X
 a. by connecting non-metallic inclusion stringers of the tear-free specimen.
 b. by connecting small tears and delaminations.

하던 라멜라 균열끝에서 진행되고 있는 피로균열 전파에 징검다리 역할을 하고 있음을 그림 10(b)에서 알수 있었다.

용접에 의하여 국부적인 변형은 2%까지 부과된다고 보고되고 있다.¹¹⁾ 이는 개재물에서 기공형성(void farmation)의 발생에 필요되는 변형(strain)량인 0.8%보다 훨씬 높다.¹²⁾ 이것으로 외부적인 하중없이 복잡한 용접이음에서는 용접자체에 의하여 발생될수 있는 변형 때문에 발생하는 decohesion등 기공형성이 피로균열전파를 조장할

수 있다고 사료된다.

4. 결 론

본 실험에서는 T형상용접이음에서 라멜라균열이 용접끝 근처에 존재할때 하중지지능력에 미치는 영향을 평가하였고 또한 비금속개재물의 피로균열 성장에 미치는 영향을 조사하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

가. 정적하중하에서 균열면적이 지지면적의 10% 이상일때 용접이음의 하중지지능력은 현저히 감소되었지만 균열면적이 약 20%까지 두께방향의 항복강도 이상에서 파괴되었다.

나. 피로하중하에서 라멜라균열을 포함하고 있는 용접이음의 피로강도는 라멜라균열의 면적이 증가함에 따라 급격히 감소하였다. 피로하중하에서 하중지지능력의 손실은 정적하중하에서 보다 더 심하였다. 이는 라멜라균열 존재에 의하여 지지면적의 감소뿐 아니라 균열끝의 응력집중효과 때문이었다.

다. 굽힘하중에서는 라멜라균열이 용접끝을 향하여 전파하였지만, 피로하중에서는 균열의 위치에 따라 균열끝에서 용접끝 방향, 용접끝에서 이음중심으로, 그리고 용접끝과 균열끝에서 동시성장 하였다. 이는 매몰된 균열의 위치에 따라 균열끝의 응력집중정도의 차이 때문이다.

다중패스용접에 의하여 비금속개재물과 모재사이의 계면에 발생된 decohesion과 delamination등의 응력조장역할 때문에 crack propagation path 및 균열전파를 조장했다.

참고문헌

1. 고진현, 라멜라 균열의 발생기구와 방지책, 대한 용접학회지, 제 5권 제 4호, 1987년 12월.
2. A., Granstrom, The strength of large structural elements as influenced by lamellar,

IIW Doc.15-420-78.

3. T. G. Davey, The significance of lamellar tearing, progress report for group-sponsored project 5513, The Welding Institute, May 1977.
4. J. E. Jubb, Lamellar tearing, WRC bulletin No. 168, Dec. 1971
5. E. J. Kaufmann and R. D. Stout, The toughness and fatigue strength of welded joints with buried lamellar tears, Welding Journal, Nov. 1983, PP. 301S-306S.
6. J. H. Koh and R. D. Stout, Detectability and significance of buried tears in welded T-joints, Welding Journal, Vol. 66, No 1, Jan. 1987. PP. 11S-18S.
7. W. H. Hartt, J. E. Fluet and T. E. Henke, Air fatigue of notched 1018 steel in the endurance limit range, Met. Trans. A, Vol. 7A, Sept. 1976.
8. A. J. McEvily, Effect of Constituent particles on the notch sensitivity and fatigue crack propagation characteristics of Al-Zn-Mg Alloys, NASA, TD328, April 1962.
9. P. J. E. Forsyth, The physical basis for metal fatigue, Am Elsevier, 1969, P. 143.
10. S. M. El-Soundani and R. M. Pellous, Influence of inclusion content on fatigue crack propagation in Aluminum alloys. Met. trans. 1973, Vol. 4 PP. 519-531.
11. J. C. M. Farrar and R. E. Dolby, Lamellar tearing in welded steel fabrication, The Welding Institute, cambridge, March 1975.
12. W. Roberts, B. Lehiten and K. E. Easterling, An In situ SEM study of void development around plasctic deformation, Acta. Meta, 1976, Vol. 24, PP. 754-758.