

High Temperature Fatigue Tests and Creep Tests of P91 Material Subjected to Induction Pipe Bending Process

2021 한국원자력학회 춘계학술대회
2021. 5. 13.

김종범, 김낙현, 김성균, 박창규
한국원자력연구원

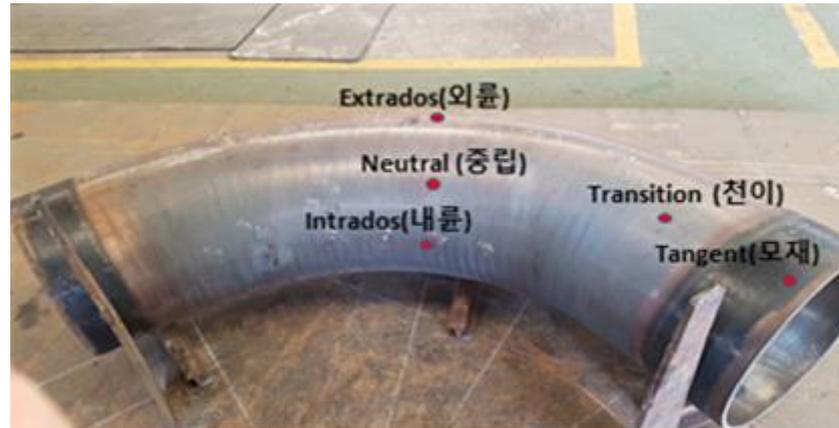
Introduction

□ Test Objectives

- ▶ 유도가열벤딩 제작 P91 이중배관 재료의 고온 저주기 피로시험 물성 및 크립시험 물성 생산
- ▶ 생산된 물성치의 ASME section III, Div.5의 요건 만족 여부를 확인함으로써 유도가열벤딩 제작 기술의 적용성 검증

Chemical composition of the P91 steel (wt.%)

C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	V	Nb	Al	Ni	N
0.1	0.41	0.4	0.001	0.013	8.49	0.94	0.21	0.08	0.01	0.1	0.06

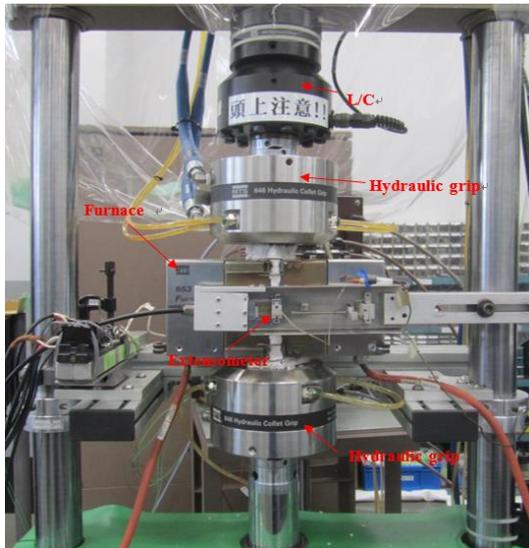


유도가열벤딩 제작 P91 배관 및 재료시험 시편 채취 위치
(모재부 F1, 외륜부 F2, 내륜부 F3, 전이부 F4, 중립부 F5)

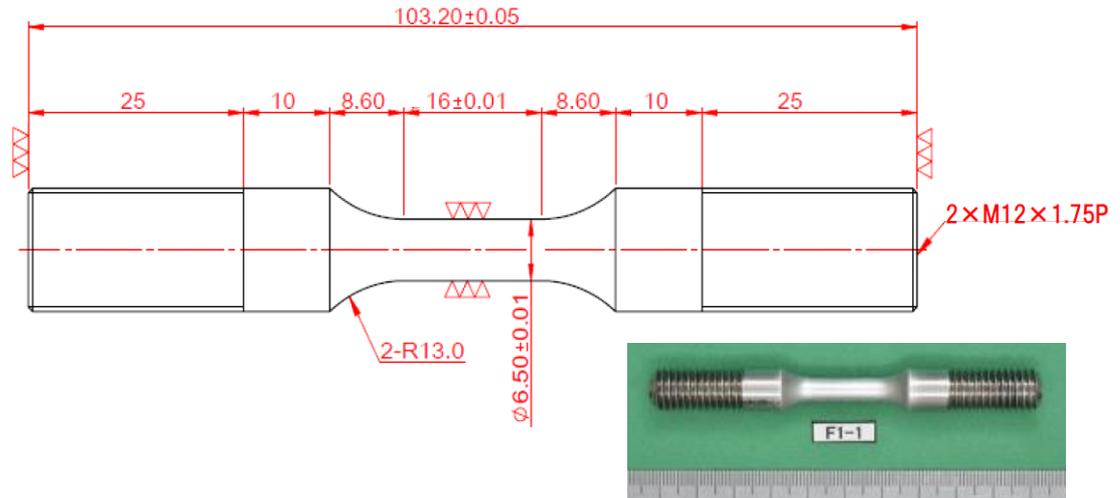
Test facility, Measurement, and Test procedure (1/2)

High Temperature Low Cycle Fatigue Tests

- MTS Electro-hydraulic Servo Fatigue Test Machine (100kN)
- Data acquisition system
- Gage length 12mm Extensometer(MTS) 사용
- Test Specimen : 봉상시험편 (길이 103mm)
 - ASTM E606 준수
 - 5개 위치에서 각 2개씩 시편 채취 제작 (총10개)
- Loadings :
 - 1% 변형률범위 삼각파 하중(하중비 -1), 변형률속도 0.004/s
 - 550°C (온도조절 $\pm 5^{\circ}\text{C}$)



고온피로시험기

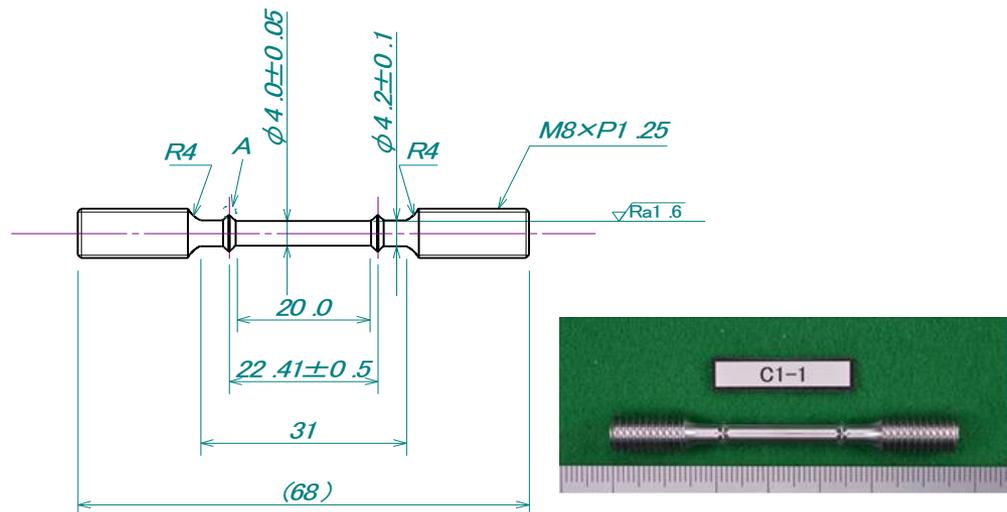


피로시험 시편

Test facility, Measurement, and Test procedure (2/2)

Creep Tests

- 원통 전기로 적용, 레버 타입 정적하중 적용 크립시험기 (30kN)
- Data acquisition system
- 신율계(크립변형률 측정) : 스트로크 20mm, 분해능 $1\mu\text{m}$
- Test Specimen : 봉상시험편 (길이 63mm)
 - ASTM E139 준수
 - 3개 위치에서 각 2개씩 시험편 채취 제작 (총6개)
- Loadings :
 - 220MPa (2.765kN)
 - 550°C (온도조절 $\pm 2^\circ\text{C}$)



크립시험 시험편



크립시험기

Test Results (1/5)

Low Cycle Fatigue Tests 결과

- ◆ 외륜, 내륜, 천이, 중립부의 평균 피로수명이 모재부 평균보다 19%, 15%, 13%, 27% 낮음
- ◆ 엘보우 유도가열벤딩으로 두께가 얇아지는 외륜부의 피로수명이 낮아지는 것은 예상했지만, 중립부의 피로수명이 가장 낮아지는 것은 특징적임
- ◆ 일반적인 피로시험결과의 스케터링을 고려하면 큰 의미 부여하기 어려움

Specimen ID	Specimen Location	Test Temp. (°C)	Gage length (mm)	*1 $N_f/2$ (hysteresis loop obtained closest to $N_f/2$) or N_{stop}							Cycles to failure N_f (cyc.)
				Number of cycle N (cyc.)	Maximum Stress (MPa)	Minimum Stress (MPa)	Total Strain $\Delta \epsilon_t$ (%)	Elastic Strain $\Delta \epsilon_e$ (%)	Plastic Strain $\Delta \epsilon_p$ (%)	Total Stress (MPa)	
모재	F1-1	550	12	1,000	383	-396	0.99	0.51	0.48	779	2,079
	F1-2	550	12	900	380	-391	1.00	0.49	0.51	771	1,812
외륜	F2-1	550	12	800	297	-303	1.00	0.36	0.64	600	1,523
	F2-2	550	12	800	292	-304	1.01	0.35	0.66	596	1,609
내륜	F3-1	550	12	900	339	-352	1.00	0.42	0.58	691	1,803
	F3-2	550	12	800	346	-357	1.00	0.44	0.56	703	1,513
천이	F4-1	550	12	800	381	-394	1.00	0.47	0.53	775	1,642
	F4-2	550	12	900	356	-372	1.00	0.45	0.55	728	1,750
중립	F5-1	550	12	700	310	-324	0.99	0.39	0.60	634	1,358
	F5-2	550	12	700	309	-317	1.00	0.38	0.62	626	1,478

평균

1945

1566

1658

1696

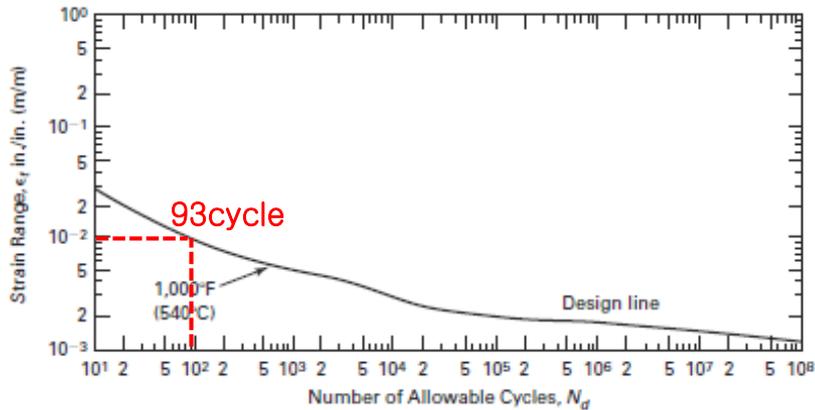
1418

Test Results (2/5)

Low Cycle Fatigue Tests 결과

◆ ASME 코드의 피로수명 요건 만족 여부

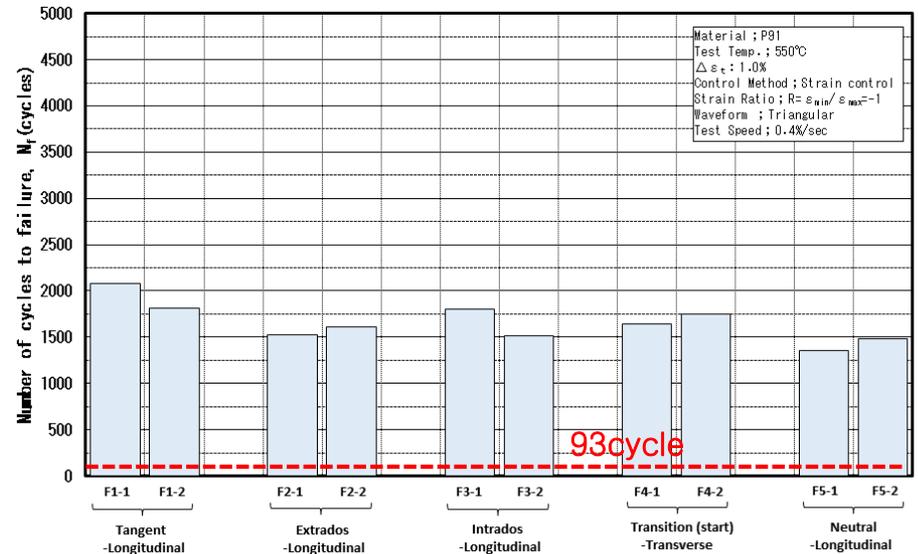
- P91강에 대한 설계피로곡선은 540°C에 대해서만 제공됨 (보수적 관점에서 이용 가능)
- 변형률범위 1%에 대한 요구 피로수명은 93사이클임
- 시험결과들은 모두 큰 여유도로 코드 요건을 만족함



P91강 설계피로곡선(ASME)



피로시험후 시편



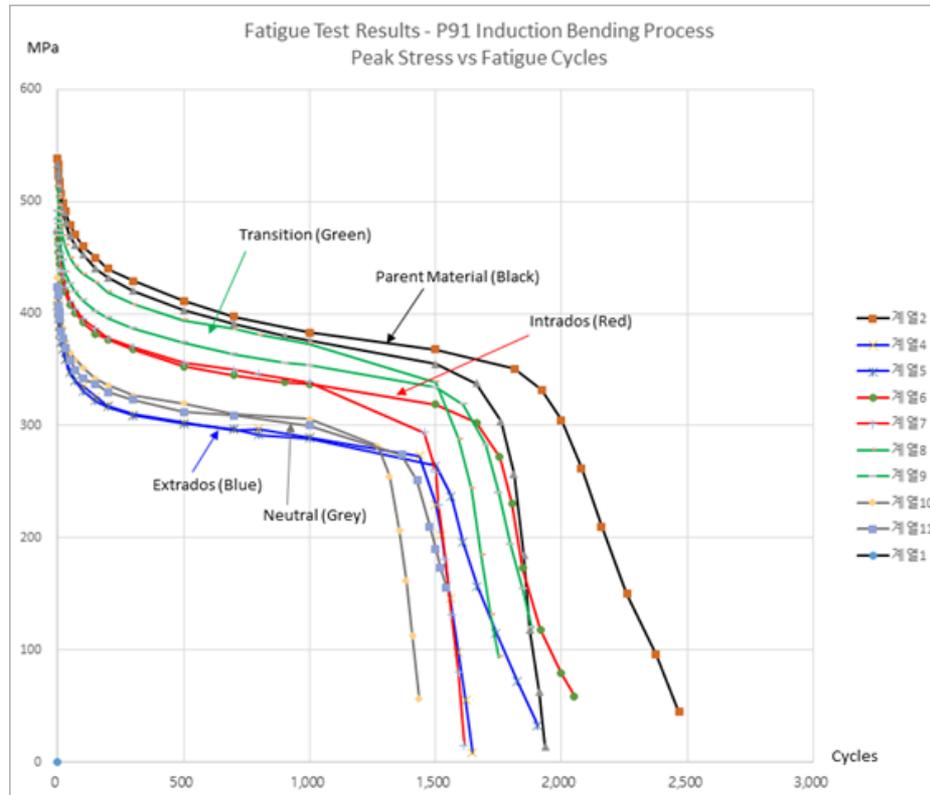
고온저주기 피로수명 비교

Test Results (3/5)

Low Cycle Fatigue Tests 결과

◆ 하중 사이클에 따른 최대인장응력 변화 관찰

- P91강이 고온에서 반복하중을 받을 때 사이클 진행에 따른 주기완화 현상 발생 확인
- 초기 200사이클에서 큰 폭의 완화발생, 이후 지속적으로 대수감소(logarithmic decay) 완화발생
- 주기완화는 두께가 얇아지는 외륜부에서 가장 크게 발생함 (모재가 가장 작게 발생)
- 설계시 P91강의 초기 물성치만 고려하면 보수적이지 못하고, 반드시 주기완화 영향을 반영해야 함

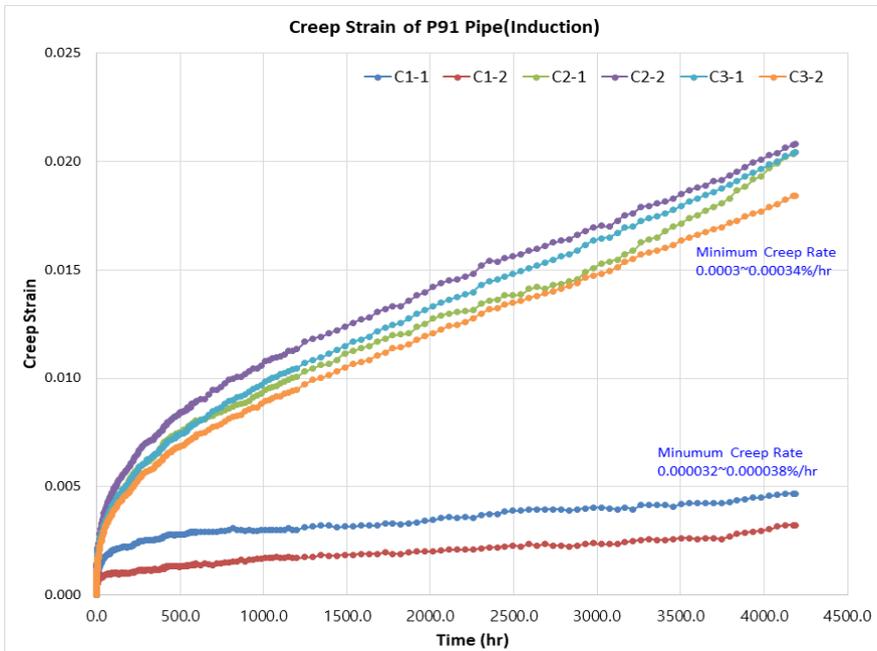


사이클에 따른 최대인장강도 변화

Test Results (4/5)

Creep Tests 결과

- ◆ 모재(C1), 외륜(C2), 중립부(C3) 각 2개씩, 총 6개 시편에 대한 크립시험 수행 (4,190시간)
- ◆ 4,190시간에 대한 크립변형률 데이터 확보
 - 초기 500시간 동안 일차크립 거동 (크립변형률속도 감소)
 - 이후 이차크립 거동 (크립변형률속도 일정)
 - * 최소크립변형률속도 : 모재(C1)=0.000035%/hr, 외륜(C2)/중립(C3)=0.00032%/hr
 - * 4,190시간후 크립변형률 : 모재(C1)=0.32~0.47%, 외륜(C2)=2.04~2.08%, 중립(C3)=1.84~2.04%
 - 4,190시간 동안 크립파단은 발생하지 않음 (Tertiary creep 미발생)
 - 모재의 크립변형률과 외륜/중립부의 크립변형률 차이가 큼 : 시험과정 재점검 결과 이상 없었고, 크립시험의 속성상 결과의 스캐터링이 상당히 크다는 것을 확인함 (더 많은 시편 시험이 필요함)



Specimen No.	Specimen size (mm)		Temperature (°C)	Stress (MPa)	Creep time (hr)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)
	Diameter	GaugeLength					
C1-1	4.01	20.56	550	220	4191	0.5	0.2
C1-2	4.01	20.54	550	220	4191	0.4	0.2
C2-1	4.01	20.54	550	220	4191	2.1	2.5
C2-2	4.01	20.54	550	220	4191	2.1	2.2
C3-1	4.01	20.54	550	220	4191	2.1	1.7
C3-2	4.02	20.56	550	220	4191	1.8	1.7

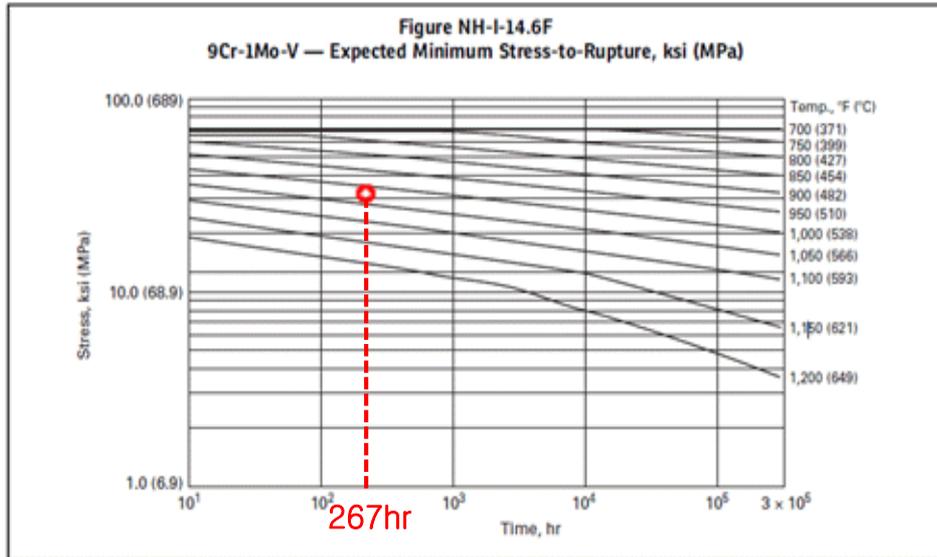
크립시험결과

Test Results (5/5)

Creep Tests 결과

◆ ASME 코드 요건 만족 여부

- P91강의 최소 크립파단응력 곡선 : 220MPa, 550°C를 적용 → 내삽 → 267시간
- 시험결과는 4,190시간 동안 크립 파단이 발생하지 않았으므로 ASME 요건을 충분히 만족함을 확인



P91강 최소 크립파단응력 선도(ASME)



크립시험후 시편

Summary

- P91 배관 유도가열벤딩 제작 기술 적용성을 검증하기 위하여 제작된 배관에서 시편을 채취하여 고온 저주기피로시험(총10개)과 크립시험(총6개)을 수행함
- 모재-외륜-내륜-천이-중립부 5개 위치, 각2개씩의 시편에 대한 피로시험결과, 평균피로수명은 각각 1945, 1566, 1658, 1696, 1418 사이클을 얻음
- 외륜-내륜-천이-중립부의 피로수명이 모재보다 19, 15, 13, 27% 낮은 것으로 나타남
- 피로시험결과 ASME 피로수명 코드요건인 93사이클을 여유있게 만족함
- 반복하중에 대한 P91강의 주기연화 현상을 확인하고 설계반영의 중요성을 확인함
- 모재-외륜-중립부 3개 위치, 각2개씩의 시편에 대한 4,190시간 동안의 크립시험결과, 초기 500시간 동안 일차크립 거동을 보이다가 그후 이차크립 거동을 얻음
- 크립시험결과 ASME 크립파단시간 코드요건인 267시간을 큰 여유도로 만족함
- 본 연구의 고온피로시험과 크립시험 결과, 배관의 물성치가 ASME 요건들을 큰 여유도로 만족함을 확인하였고, P91 배관에 유도가열벤딩 제작기술의 적용성이 검증됨