#### 2004 춘계학술발표회 논문집 한국원자력학회

# 횡방향으로 용접된 라이너의 파괴거동 분석

# Failure Behavior of Liner Plate with Transverse Weld

 조남소, 김남식
 전영선

 현대건설기술개발원
 한국원자력연구소

 경기도 용인시 구성읍 마북리 102-4
 대전광역시 유성구 덕진동 150

# 요 약

본 연구는 원전 격납건물에서 최후의 방어막을 형성하는 라이너의 파괴거동을 실험적으 로 평가하기 위함이다. 이를 위해 횡방향 홈용접을 갖는 라이너 플레이트에 대한 인장 파 괴 실험을 수행하였고 연성 및 파괴 거동을 조사하였다. 응력-변형률 관계의 분석을 통해 용접 인접부는 가력방향으로의 변형률이 구속되고 결국 공칭부가 먼저 파괴된다는 것을 실험적으로 검증하였다.

### Abstract

This study had been intended to experimentally evaluate the failure behavior of liner, which is a final barrier to prevent the leakage of radioactive material in nuclear power plant. Tensile failure tests for liner plate including groove weld were planned to investigate the ductile behavior and the failure mode. As analyzing stress-strain relationship, it was experimentally verified that liner part just near transverse weld line woud be restrained in longitudinal direction, therefore nominal parts finally tore rather than HAZ.

# 1. 서 론

국내의 대표적인 원자력 발전소 격납건물 형식은 프리스트레스 콘크리트 벽체(PCCV)이 며 내벽에는 박판(6mm)의 강재가 설치되어 있다. 내압에 대해 격납건물의 벽체가 구조적 으로 지지하고 라이너는 방사물질에 대한 밀폐 역할을 하도록 설계한다. 극한 내압이 도 래하여 벽체가 극한 상태에 놓이더라도 연성이 탁월한 라이너는 파괴되지 않고 지속적으 로 방사물질의 방출을 억제하기 위함이다. 그러나, 지난 SNL의 실험에서 벽체의 파괴 이 전에 라이너가 먼저 파괴되었으며 파괴의 위치가 대부분 용접부 주변이었다. 그 대체적인 원인으로 잘못된 용접에 의한 기하학적인 불연속성에 무게를 두고 있으나 용접열에 의한 용접 인근 모재의 재료적인 특성 변화도 하나의 원인이 될 수 있어서 이에 대한 실험적 인 검증이 필요하다. 따라서 본 연구는 원전 격납건물에서 대표적 용접상세를 갖는 라이 너 시편을 제작하여 인장 파괴 실험을 수행하였고, 응력-변형률 관계를 통해 파괴까지의 거동을 살펴보고자 하였다.

2. 라이너 용접상세

원전 격납건물에 설치되는 라이너는 연직 및 수평방향으로 시공 용접 이음을 기본적으 로 갖고 있으며 수직보장재는 자오선 방향으로 필렛용접되어 있다. 또한 그림 1 (a)에서 보이는 바와 같이, 격납건물 벽체에는 장비 반입구(E/H)와 출입구(A/L) 및 냉각라인 (M/S, F/W)을 위한 관통부가 설치되어 이 주변에는 매우 복잡한 형태의 용접 상세가 존 재하게 된다. 이러한 용접상세에서는 상대적으로 강성이 큰 두꺼운 강재의 판(Collar ring)이 사용되어 천이구간을 가지고 라이너 판(6mm)에 연결되므로 내압에 의한 응력은 관통부 주변이 작게 된다. 그러나, 용접부 인접 모재에는 용접 열에 의해 열영향부(HAZ) 가 존재하고 통상 알려진 바와 같이 잔류응력과 잔류변형률을 보유하게 되어 복잡한 응 력 분포를 갖게 된다.



(a) E/H

(b) 내압을 받는 격납건물 (c) 관통부의 용접 상세 그림 1 격납건물의 용접상세 및 내압 상태

그림 1 (b)에서 보는 바와 같이 내압(p)을 받는 원통형 구조의 변형 형상을 살펴보면, 방 사방향으로 동일한 변위를 유발하기 때문에 원주방향으로의 변형률(ᢄh) 역시 같게 된다. 그러나 용접에 의해 구속되어 있는 부위에서는 국부적으로 변형률이 상이하게 거동할 수 있는데, 용접 상세에 따라 영향을 받는다. 따라서, 전체적으로 동일한 변형률 이력을 보이 는 구조에서는 잔류변형률이 존재하거나 변형률이 집중된 부위가 재료의 변형률 한계에 먼저 도달하여 찢어질 수 있으며 이 때를 파괴라고 보는 것이 타당하므로 용접된 부위가 상대적으로 취약할 수 있다.

그림 1 (c)는 대표적 취약부라 평가되는 관통부 주변의 용접 상세를 나타낸다. 후프 방 향으로의 하중이 지배적인 점을 감안하면 용접 상세는 응력의 방향에 대해 크게 3가지로 분류할 수 있다. (a)는 응력에 평행한 홈용접, (b)는 응력에 수직한 홈용접, (c)는 보강재를 위한 필렛 용접이다.

이에 대한 지난 실험적인 평가에서, 각 경우 모두에 대해 용접부에서의 파괴는 발생하지 않았다. 그 이유로 횡방향 홈용접 및 횡방향 필렛 용접을 갖는 실험체는 횡방향의 용접선 과 보강재가 가력방향으로의 변형률을 구속하기 때문에 상대적으로 공칭 단면에서 파괴 되었다고 보고되었다.

따라서 본 연구에서는 이 연구결과에 연속성을 갖고 응력의 방향에 수직한 홈용접을 갖 는 라이너 실험체를 재제작하여 인장 파괴 실험을 수행하고 응력-변형률 거동을 분석하 고자 하는 것이며, 여기서 가력방향으로의 길이가 파괴의 위치에 영향을 주는지를 살펴보 고자 하였다.

#### 2. 실험체 및 실험 장치

실험체는 그림 2에 보이는 바와 같이, 강종 SWS400, 단면 200mm×6mm이고 원전 인정 용접법 중의 하나인 FCAW(Flux Cored Arc Welding)에 의해 응력의 수직방향으로 용접 된 라이너 용접 모형 실험체를 제작하였으며 실험 수행 전에 RT(Radiographic Testing)를 실시하여 용접의 결함 유무를 확인하였다. 평행부 거리(L)가 400mm인 경우(L400)와 600mm인 경우(L600), 두 종류로 총 6개의 실험체를 제작하여 실험체의 폭에 대한 평행 부 거리의 비에 따라 파괴의 위치가 변화하는지를 실험적으로 검증하기 위함이다.



그림 2 라이너 용접 모형 실험체 그림 3 가력 빙

그림 3 가력 방법 및 측정 위치

그림 3은 실험 수행을 위한 재하 방법 및 센서의 위치를 나타낸다. 라이너의 예상 항복 시점의 95%까지는 유압가력기(Actuator)를 통해 하중 제어 방식으로 가력하였고 이후부 터는 변위 제어 방식으로 전환하여 진행하였다. 용접 인접부 모재와 공칭부 모재 및 용착 금속의 변형률을 측정하기 위해 일축 스트레인게이지 14개와 삼축 게이지 3개, 총 23개의 스트레인게이지를 사용하였다.

4. 실험 결과

그림 4는 L400 실험체의 파괴 모습을 인접해서 촬영한 사진이고 그림 5는 파괴된 L600 실험체의 전경을 보인다. 파괴의 위치는 평행부의 거리에 관계없이 모두 완화구간의 시작 점과 용접선사이의 정중앙부 모재에서 발생하였다. 이는 통상 잔류변형률이 존재하리라 고 예상되는 용접 인접부 모재보다는 공칭부 모재에서 더 많은 변형률 증가를 경험하였 다고 예측할 수 있다. 또한 강성측면에서 상대적으로 모재보다 강도가 높은 용접부가 가 력 횡방향으로 존재하여 종방향으로의 변형을 구속하므로 공칭부 모재보다 용접 인접부 모재에서 변형률이 작게 발생하였다고도 생각할 수 있다.



그림 4 L400의 파괴 모습



그림 5 L600의 파괴 모습

그림 6과 그림 7은 각각 L400과 L600에서 측정한 가력 종방향 변형률 데이터를 공칭부 (Normal)와 용접 인접부(Weld)로 나눠 평균 변형률을 구하고, 하중을 단면에 대한 응력 으로 환산하여 그린 종방향 응력-변형률 곡선이다. 측정을 통한 대략적인 파괴의 시점은 각 실험체에서 0.2를 넘었지만, 그림은 측정데이터에서 신뢰성이 있다고 판단되는 변형률 수준까지만을 나타내었는데, 이때까지의 용접 인접부의 변형률에 대한 공칭부의 변형률 거동비를 계산하면, L400은 2.9, L600은 3.1로 비슷하여 공칭부의 변형률이 용접 인접부에 비해 3배 정도의 변형률을 나타내고 있다.

공칭부는 항복이후 변형률경화과정에서 응력이 다소 낮기는 하지만 대체로 재료의 응력 -변형률 곡선(Material)을 따라간다. 그러나, 용접 인접부는 초기에 재료의 탄성계수와 같 은 기울기로 증가하지만 재료의 항복점에 도달할수록 비선형의 거동을 나타내고 소성흐 름없이 바로 변형률경화과정을 겪는다. 변형률경화시의 형상을 보면 재료나 용접 인접부 의 응력-변형률 곡선이 유사하다는 것을 알 수 있는데, 용접 인접부의 응력-변형률 곡선 을 일정한 변형률(AE<sub>w</sub>=0.01)만큼 평행이동하면 재료의 변형률경화시의 응력-변형률 곡 선 구간과 거의 일치한다. 평행이동한 변형률 모두를 용접에 의한 잔류변형률이라 가정하 여 변형률의 비를 다시 계산하면 각각 2.5와 2.6이다. 따라서, 용접 인접부는 파괴까지의 절대적인 변형률 여유가 공칭부보다 작을 수 있으나, 상대적으로 변형률 증가율이 공칭부 에 비해 작기 때문에 공칭부가 먼저 소요의 변형률 한계에 도달하여 파괴되었다고 판단 된다.



그림 8 횡방향 응력-변형률 관계(L400)

그림 9 횡방향 응력-변형률 관계 (L600)

그림 8과 그림 9는 각각 L400과 L600에서 측정한 횡방향 변형률 데이터를 공칭부 (L-Normal)와 용착금속부(L-Weld)로 나눠 평균 변형률을 구하고, 하중을 단면에 대한 응 력으로 환산하여 그린 횡방향의 응력-변형률 곡선이다. 여기서도 종방향과 같은 변형률 수준까지만을 나타내었다. 용착금속부에 대한 공칭부의 변형률비는 L400과 L600에서 각 각 1.2, 1.7로 역시 공칭부가 많은 변형률을 발생하였다.

용접부의 종방향 구속도는 표 2에 제시한 바와 같이, 횡방향 변형률에 대한 종방향의 변 형률비가 가장 잘 표현한다고 할 수 있다. L400과 L600의 공칭부의 변형률비는 각각 7.5, 3.8인데 비해 용접 인접부는 3.2, 2.1을 나타내고 있어 용접 인접부의 종방향 구속도가 2 배 이상임을 확인할 수 있다.

실험체	공칭부		용접부		변형률비			
	ε <sub>n,l</sub> <sup>(1)</sup>	ε <sub>n,t</sub> <sup>(2)</sup>	$\epsilon_{w,l}^{(3)}$	€ <sub>w,t</sub> <sup>(4)</sup>	$E_{n,l}/E_{w,l}$	$E_{n,t}/E_{w,t}$	$\mathbb{E}_{n,l}/\mathbb{E}_{n,t}$	$\epsilon_{w,l}/\epsilon_{w,t}$
L400	0.18562	0.02476	0.06339	0.01996	2.9	1.2	7.5	3.2
L600	0.16062	0.04223	0.05185	0.02467	3.1	1.7	3.8	2.1

표 1 고려시점에서의 변형률 및 변형률비

(1) 𝔅<sub>n,l</sub> : 공칭부에서 종방향 변형률
 (2) 𝔅<sub>n,t</sub> : 공칭부에서 횡방향 변형률
 (3) 𝔅<sub>w,l</sub> : 용접 인접부에서 종방향 변형률
 (4) 𝔅<sub>w,t</sub> : 용착금속에서 횡방향 변형률

4. 결 론

- 파괴는 횡방향 용접선과 평행부의 완화구간 시점의 중앙에서 발생하였으며 평행부의 길이에 따라 파괴의 위치는 변하지 않았다.
- ② 용접 인접부에서 횡방향 수축 변형률에 대한 종방향의 변형률 비는 공칭부의 2배 이 상이었으므로 용접선이 인근 모재의 종방향 변형률을 구속하는 것으로 판단된다.
- ③ 용접 열영향부는 파괴까지의 절대 변형률이 작더라도 종방향 변형률 증분이 공칭부의
   0.4배에 해당하기 때문에 파괴가 먼저 발생하지 않았다.

#### 감사의 글

이 연구는 과학기술부 원자력연구개발사업의 연구비지원으로 수행되었으며 이에 감사드 립니다.

## 참고문헌

- [1] R. A. Dameron, "Pretest Analysis of a 1:4-Scale Prestressed Concrete Containment Vessel Model", NUREG/CR-6685, Nuclear Regulatory Commission
- [2] 조남소, 김남식, 전영선, 정대성, "라이너 용접부 파괴 거동 실험", 한국원자력학회 학 술논문집, 2003
- [3] 김남식외, "프리스트레스 콘크리트 격납건물 부재실험", 연구보고서 KAERI/CM-602/ 2002, 한국원자력연구소