

2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

라이너 용접부상세 파괴거동 실험

Experimental Tests of Liner Welding Details for Failure Behavior

조남소, 김남식
현대건설기술연구소
경기도 용인시 구성읍 마북리 102-4

정대성
명지대학교
경기도 용인시 남동 산 38-2

전영선
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 연구에서는 원전 격납건물의 방사물질에 대한 방어막을 형성하는 라이너 플레이트의 용접부 상세에 대한 파괴 거동을 실험적으로 평가하였다. 최근의 SNL 실험은 관통부 주변의 라이너 용접 상세에서 극한 내압 이전에 다수의 균열을 보고하고 있으며 기능적인 파괴를 유발할 수 있는 취약부로 평가하고 있다. 따라서 본 연구는 국내의 대표적인 격납 건물의 관통부 주변 라이너 용접상세를 조사하여 하중 방향에 대해 종방향 홈용접, 횡방향 홈용접, 및 필렛 용접을 갖는 세 종류의 실험체를 제작하였다. 각각의 실험체에 대해 인장 파괴 실험을 수행하여 파괴 거동 및 성능을 평가하였고 유한요소해석을 통해 비교·분석하였다.

Abstract

In this study, a failure behavior is experimentally evaluated for welding details of liner plate in containment building, which is a final barrier to prevent the leakage of radioactive material to the environment. Recent SNL's research reported that several cracks occurred at the liner welding details near a opening hole before ultimate internal pressure state, and some of welding details could be evaluated to cause a functional damage. Therefore, the representatives of liner welding details are investigated for a containment of nuclear power plant in Korea, and categorized into three types, which are longitudinal groove, transverse groove, and fillet welding respectively. Experimental failure tests are carried out for each test model, and their behavior and performance are evaluated, and compared with finite element analyses.

1. 서론

원자력 발전소의 격납건물은 지진 등의 원인으로 사고가 발생할 경우 내부 방사능 물질이 외부로 누출되지 않도록 하는 방어벽으로써, 여러 국가에서 격납건물의 건전성 및 구조적 안전성을 확보하기 위한 수많은 노력이 이루어져왔다. 국내의 원자력 발전소 격납건물의 주된 형식은 프리스트레스트 콘크리트 격납건물(Prestressed Concrete Containment Vessel ; PCCV)이며 이러한 PCCV에 대한 기존 연구 사례로는 1970년대 폴란드에서 1:10의 축소 모형실험을 수행한 바 있으며, 캐나다는 1:14의 PCCV 축소모형을, 영국에서는 1989년에 1:10 축소 모형실험을 수행하였다. 최근에는 미국의 Sandia National Laboratories(SNL)에서 현존하는 원자력 발전소의 격납건물을 1:4로 축소 모형화하여 극한 내압 실험을 수행한 바 있다.

일반적으로, PCCV의 설계 개념의 파괴 유도는 텐던, 철근 및 콘크리트 그리고 라이너의 파괴 순서를 갖게 하며 극한 내압 및 방사 물질의 누출은 최종적으로 격납건물 내벽을 두르고 있는 라이너가 차폐하도록 하고 있다. 이러한 설계 개념은 콘크리트보다 연성이 뛰어난 라이너가 구조적인 파괴 시점까지도 충분히 방사 차폐 효과가 있으리라는 이유였으나 최근의 SNL에서의 1:4 축소 모형에 대한 극한 내압 실험 결과를 살펴보면 2.5Pd(0.98MPa)의 내압 상태에서 벽체의 파괴 이전에 라이너에 균열이 발생하였으며 기존의 설계 개념에서 벗어나는 결과를 보였다. SNL에서는 1:4 축소모형의 라이너 균열부에 대한 정밀 분석을 통하여 다수의 균열이 용접부에서 주로 발생하였음을 밝히고 용접부의 불연속성과 용접의 재보수 등을 잠재적인 원인으로 평가하고 있다.

국내의 원전에서도 강재의 라이너를 갖는 격납건물의 설계 방식을 채용하고 있기 때문에 극한 내압 상태에서의 라이너 파괴 거동을 평가할 필요가 있다. SNL에서 제시하고 있는 라이너의 잠재적 파괴 위치를 근거로 국내의 대표적인 원전에 대해 라이너 상세를 조사하였으며, 상대적인 취약부로 알려진 관통부 주변의 라이너 용접 상세에 대해 파괴 거동 실험을 수행하고자 한다. 격납건물의 관통부는 E/H, A/L 및 기타 Sleeve로 구성되며 이들의 용접 상세를 크게 세 종류로 분류하였다. 즉, 하중 방향에 대해 종방향 홈용접, 횡방향 홈용접 및 필렛 용접이 그것이다.

따라서 라이너와 철근 및 콘크리트를 포함한 격납건물 벽체의 부분 모형 파괴 실험에 앞서, 위에서 분류한 세 가지의 용접 상세에 대한 라이너의 소형 시편을 제작하여 이들에 대한 용접 상세별 파괴 실험을 수행하였다. 한편 용접부의 잔류변형이 파괴 거동에 미치는 영향을 평가하기 위해 항복 강도의 95%를 선행 재하하여 잔류변형을 제거하고자 하였다. 각각의 일축 인장 파괴 실험에 따라 강도 및 연성 거동에 대한 실험적 평가와 유한 요소해석을 통한 해석적인 비교·분석을 수행하였다.

2. 격납건물 관통부의 용접 상세 및 실험체

국내에는 총 20기의 원전이 가동 중이거나 계획 및 시공되고 있다. 관통부 용접 상세에 대한 실험 모형의 제작을 위해 이들 격납건물 중 대표적인 라이너 상세를 조사하였으며 영광원자력을 Prototype으로 삼았다. 라이너는 주로 1/4" (약 6mm)의 박판을 사용하고 수직 및 수평으로 보강재가 설치된다. 보강재는 주로 Channel이나 Angle로 구성되고 라이너에 필렛용접 된다. 또한 라이너 플레이트는 콘크리트 벽체와의 결합을 위해 스티드가 붙어 있고 이렇게 조립된 라이너는 판형으로 공장에서 제작되어 각각의 라이너판은 서로 현장 용접되어 시공된다. 영광원자력 라이너 상세는 표 1과 같다.

표 1 영광원자력 라이너 상세

Member	ASME code	Dimension	Tensile strength [MPa]	Remarks
Liner Plate	SA-516 GRADE 55 (SA-516 GRADE 60)	1/4" (6mm)	380-515 (415-550)	SM400과 동등
Angle	SA-36	LK3×3×1/4	400-550	
Channel	SA-36	CK5×9	"	

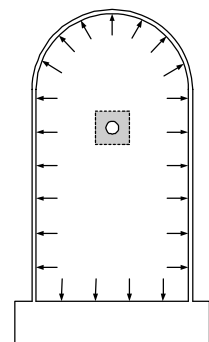
격납건물의 라이너는 프리스트레싱 도입력과 사고 발생 초기 시 좌굴을 지지하기 위해 내부에 수직 및 수평 보강재가 설치되며 내·외부로의 출입구 및 냉각 파이프를 연결하기 위해 많은 관통부를 갖게 된다. 또한 관통부 주변에는 보강재 이외에 여러 형태의 보강이 이루어지기 때문에 매우 복잡하며 용접부가 집중적으로 분포되어 구조적인 취약부로 평가된다. 그림 1 (a)와 (b)는 원전 격납건물에 설치되는 관통부를 나타내며, 내압이 발생할 경우 관통부를 포함한 라이너는 2축 인장상태에 놓이게 된다.



(a) Sleeve



(b) E/H



(c) 내압 상태

그림 1 격납건물의 관통부

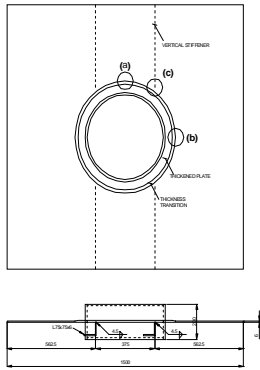
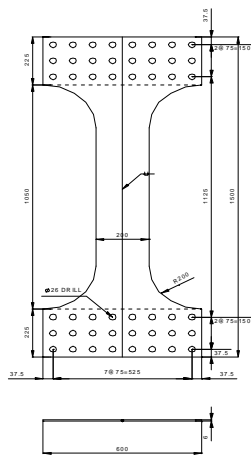
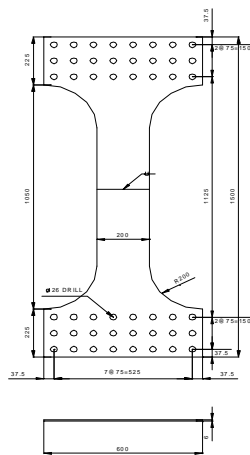


그림 2 관통부 용접 상세

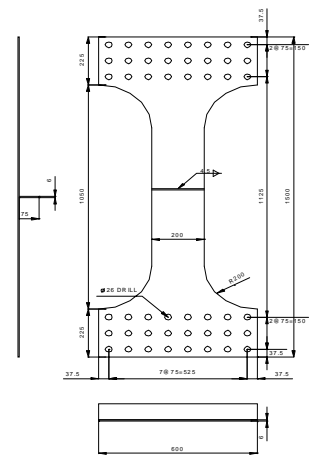
그림 2는 관통부 주변에 포함되는 대표적인 용접 상세를 나타내며, 통상 벽체의 위험단면에서 후프 방향대 자오선 방향으로 2:1의 인장 하중을 받는다. 그림 2에서 (a)는 후프 방향으로 종방향 홈용접, (b)는 횡방향 홈용접, (c)는 보강재에 대한 필렛 용접이며, 자오선 방향보다는 후프방향으로의 하중이 상대적으로 크고 또한 실험의 단순화를 위해 본 연구에서는 그림 3과 같이 후프방향의 하중에 대해 각각의 용접 상세를 갖는 일축 인장 실험체를 제작하였다. 그림 3의 (a), (b), (c)는 그림 2의 (a), (b), (c)와 대응하는 용접 상세이다.



(a) L-groove



(b) T-groove



(c) Fillet

그림 3 용접상세에 따른 실험체

실험체는 전력산업기술기준(MQW 1500)에서 원전에서의 인정용접으로 제시하고 있는 플럭스코어드아크용접(FCAW)에 따라 제작하였다. 실험체의 용접 절차는 용접이 되는 모재를 개선한 후 1차 용접을 하고, 가우징을 실시하여 2차 용접을 수행하였으며 용접선을 마무리하였다. 그 후 각 실험체에 RT(Radiographic Test)검사를 수행하여 실험체의 결함을 확인하였다.

3. 용접 상세별 파괴거동 실험

3.1 일축 인장 파괴 실험

본 연구의 주요 실험 변수는 격납건물 관통부 주변에 포함되는 대표적인 용접상세이다. 한편, 용접부 근방에는 용접열에 의해 잔류 응력 및 변형이 발생되는데 용접선의 바로 인 근 모재는 이로 인해 재료의 특성이 변하게 되고 취성화된다. 구조적인 예측이 가능하게 하기 위해서는 잔류 응력 및 잔류 변형의 제거가 필수적이며 이를 위해 물리적인 제거 방법을 사용하여 잔류 응력 및 변형을 제거하고자 하였다. 따라서 표 2와 같이 용접상세별 실험체를 각각 3개씩 제작하였으며 그 중 한 개의 실험체에 대하여 잔류응력 제거 또는 재분배를 위해 항복강도의 95%에 해당하는 하중을 재하한 후 제하하여 인장 파괴 실험을 수행하였다. 그림 4는 실험체에 설치한 센서위치를 나타낸다.

표 2 용접상세별 파괴 거동 실험체

실험체	용접형태	하중조건	실험체 크기	수 량
L-groove	groove	Longitudinal	1500×200×6	3EA (stretching-release, 1EA)*
T-groove	groove	Transverse	1500×200×6	3EA (stretching-release, 1EA)*
Fillet	fillet	Transverse	1500×200×6	3EA (stretching-release, 1EA)*

* L-groove3, T-groove3, Fillet3은 stretching-release를 수행한 실험체임.

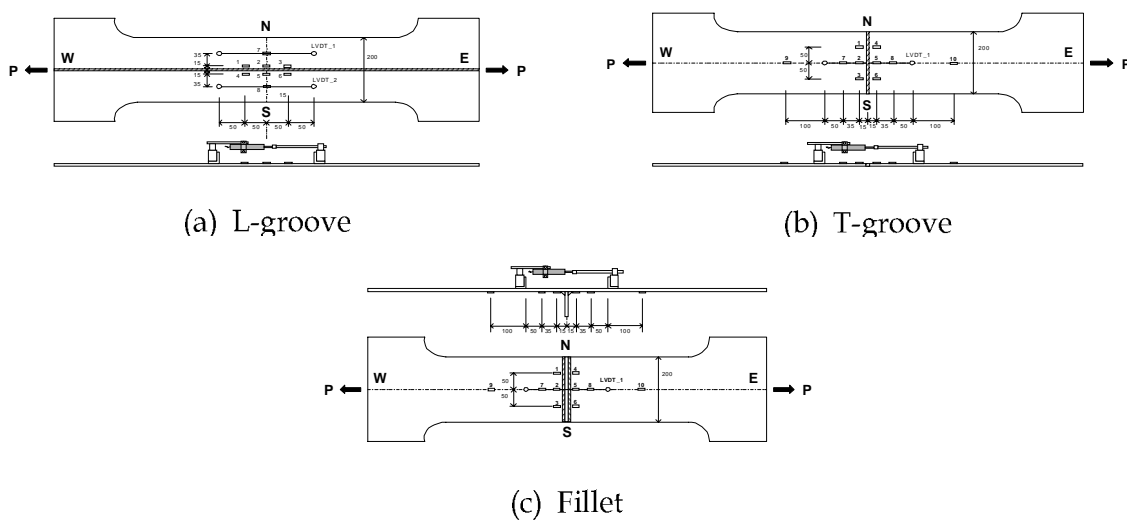


그림 4 게이지 설치 위치

일축 인장 파괴 실험은 그림 5와 같이 양측에 유압잭을 설치하고 로드셀(Load Cell)을 사용하여 수행하였다.

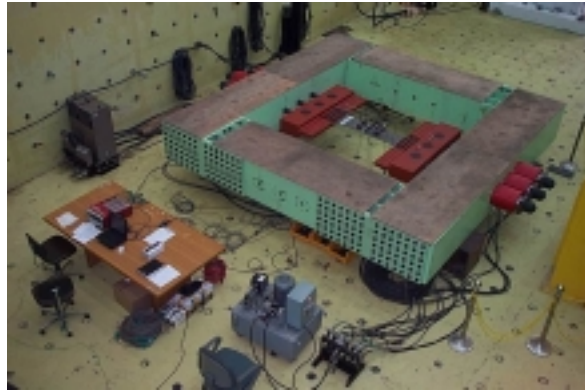


그림 5 일축 인장 파괴 실험

3.2 실험 결과 분석

그림 6~그림 9에 각 용접 상세별 파괴 인장 실험으로부터 측정된 하중-변위 곡선을 나타내었고 그림 10~그림 15에는 응력-변형률 관계를 도시하였다.

우선 stretching-release의 영향에 대해 살펴보면, 종방향 홈용접 실험체에서는 그림 6에 도시한 바와 같이 stretching-release를 시행한 실험체에서 상대적으로 강도가 크게 측정되었으나, 횡방향 홈용접 실험체(그림 7)는 이러한 효과를 찾을 수 없을 만큼 각각이 같은 거동을 보이는 것으로 측정되었으며, 필렛 용접 실험체(그림 8)에서는 stretching-release를 시행하지 않은 실험체(Fillet1)에서 오히려 강도가 크게 평가되었다. 따라서 stretching-release의 효과가 있다고 판단하기 어려우며, 변위 거동의 측면에서도 실험 종료 시까지 서로 구별될 만큼 큰 차이를 보이지 않는다. 이와 동일한 결과는 그림 10~그림 15에 도시한 응력-변형률 관계를 비교하여도 알 수 있다. 이는 용접부 인근의 모재에는 잔류 변형이나 잔류 응력이 존재할 것이나 구조적으로 대규모의 실험체가 아니라면 stretching-release에 의한 잔류 변형 및 잔류 응력의 제거와 재분포는 소형 시편의 경우 그 효과를 기대할 수 없기 때문이라고 사료된다. 그러므로 stretching-release에 의해 각 실험체에 대해 항복강도의 95%를 선행 재하하여 실험한 결과, 세 종류의 실험 모두에서 stretching-release에 의해 특별한 구별을 주는 거동을 찾을 수 없었다고 판단된다.

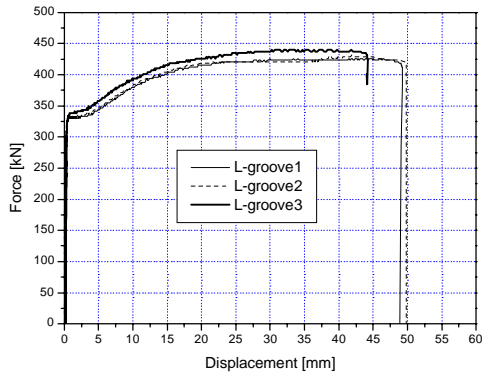


그림 6 하중-변위 곡선(L-groove)

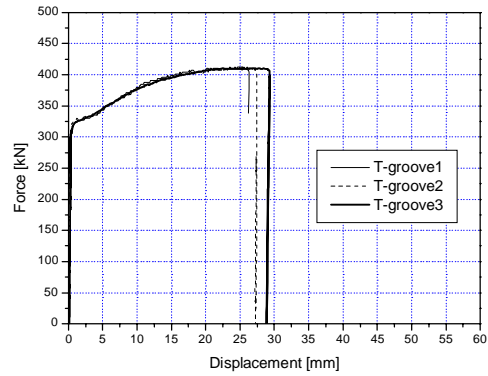


그림 7 하중-변위 곡선(T-groove)

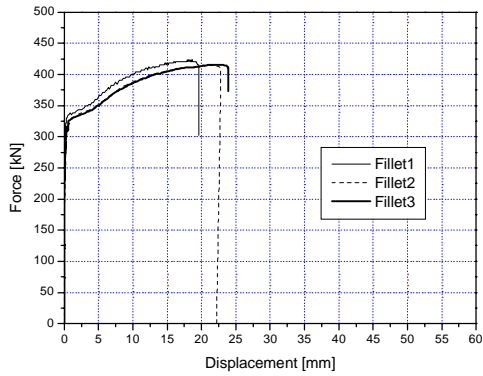


그림 8 하중-변위 곡선(Fillet)

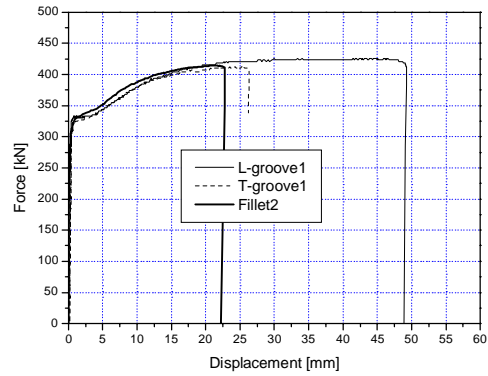


그림 9 용접 상세별 하중-변위 곡선

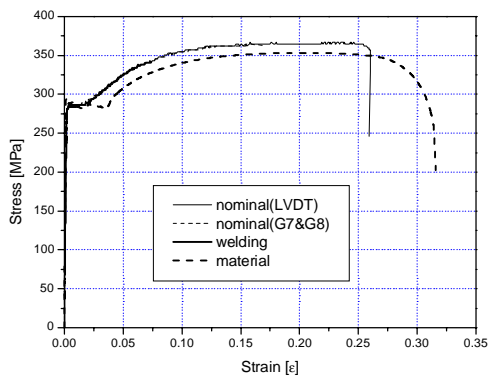


그림 10 응력-변형률 곡선(L-groove1)

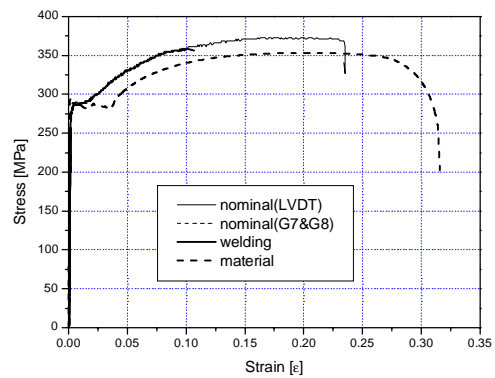


그림 11 응력-변형률 관계(L-groove3)

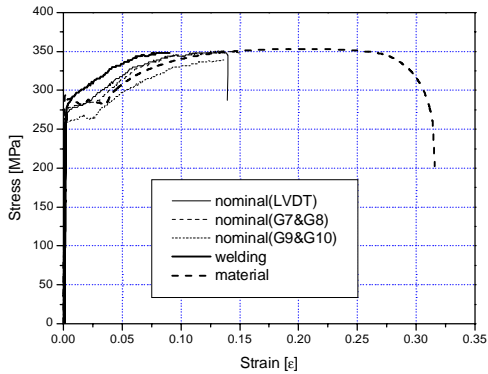


그림 12 응력-변형률 관계(T-groove1)

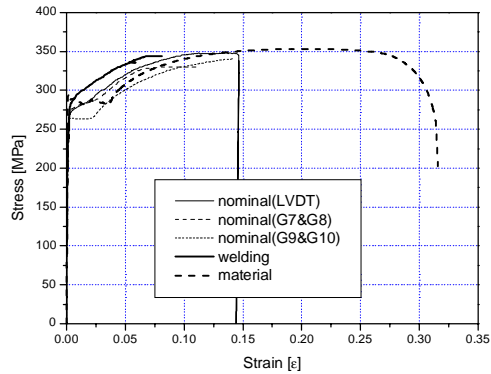


그림 13 응력-변형률 관계(T-groove3)

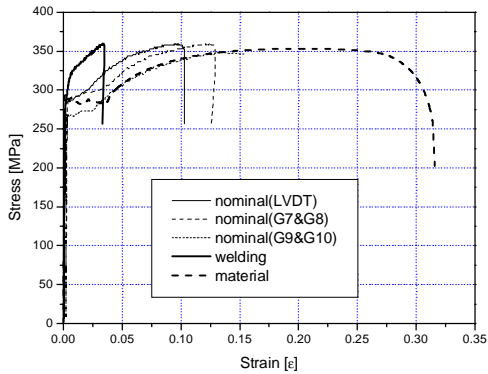


그림 14 응력-변형률 관계(Fillet1)

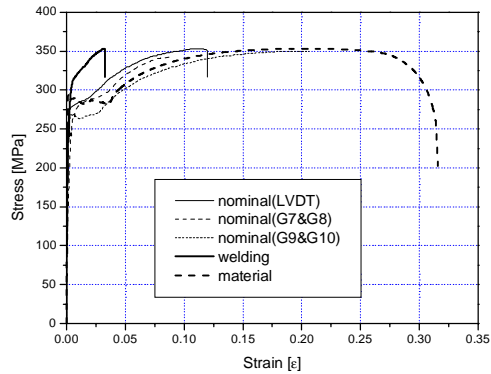


그림 15 응력-변형률 관계(Fillet3)

그림 9에 나타난 바와 같이 용접 상세별 하중-변위 곡선을 비교하여 보면, 상대적으로 횡방향 흡용접 실험체나 필렛 용접 실험체에 비해 종방향 흡용접 실험체는 마치 재료 실험 결과를 보듯이 탄성-소성-소성구간이 구별되게 측정되었다. 이는 횡방향 흡용접이나 필렛 용접부를 갖는 실험체는 이 용접부가 구조적인 역할을 수행하는 것으로 사료되는데, 종방향 하중에 대해 횡방향으로 존재하는 용접부가 종방향으로의 변형률 거동에 구속 효과를 주기 때문으로 사료된다. 또한, 실험이 종료되었을 때의 신장량을 비교하면 종방향 흡용접 실험체가 월등히 크게 측정되었는데 이 역시 구속 효과를 기대할 수 없었기 때문에 재료 특성 그대로를 상대적으로 많이 반영하였기 때문이고, 횡방향 및 필렛 용접 실험체의 경우 LVDT가 용접선을 가로질러 설치되었기 때문에 구속 효과로 작게 측정되었다.

한편, 응력-변형률 관계(그림10~그림15)를 살펴보면, 하중-변위 관계보다는 명확한 차

이를 볼 수 있다. 종방향 흡용접 실험체는 공칭 부분에서의 변형률(G7 & G8, LVDT환산 변형률)이나 용접부 근방에서의 변형률이 거의 동일한 결과를 주며 종방향 하중에 대한 종방향 용접부의 영향은 미소한 것으로 판단된다. 다만 재료 실험 결과와 비교할 때 소성 구간이 다소 짧게 측정되었다. 실험 측정은 측정 장치의 한계에 도달되어 종료되었기 때문에 최종 파괴 시점에서의 연신율의 비교는 다소 무리가 있겠으나 대체적인 거동은 재료 특성을 쫓아간다고 파악된다.

횡방향 흡용접과 필렛 용접 실험체는 항복 직후에 상당한 거동 차이를 나타낸다. 이들 실험체는 소성 구간 없이 바로 소성 경화 단계로 진전하며 필렛 용접 실험체가 횡방향 흡용접 실험체 보다 소성 구간 진전 시 기울기가 급하다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 횡방향 용접부 및 횡방향 보강재(필렛 용접 실험체의 경우)가 존재하여 종방향으로의 변형률이 구속되기 때문이며 필렛 용접 실험체의 경우는 추가의 보강재가 있어 더 강력하게 구속하기 때문이다. 실험 종료 시까지의 변형률을 보면 종방향 흡용접→횡방향 흡용접→필렛 용접 실험체 순으로 작아짐을 알 수 있다.

이를 바꾸어 말하면 항복이후 같은 하중의 상태에서의 변형률은 종방향 흡용접 실험체에서 많이 발생하나 같은 변위를 유발하는 상태에서는 필렛 용접 실험체가 하중이 집중적으로 받을 수 있다는 것을 의미한다. 표 3은 임의의 변형률 상태에서 재료 실험에 대한 용접부에서의 응력 집중도를 나타낸다.

한편, 원전 격납건물의 라이너는 상대적으로 콘크리트 벽체에 비해 강성이 작기 때문에 벽체의 변형에 의존적일 수밖에 없으며 일정한 내압 작용 시 같은 변형률 거동을 나타낸다. 따라서 위의 결과로 예측할 때, 종방향 용접부보다는 횡방향이나 필렛 용접부에서 더 많은 응력이 집중되어 파괴가 먼저 발생할 수 있다고 판단된다.

표 3 용접부에서의 응력 집중도 [MPa, %]

변형률 상태	재료실험	L-groove	T-groove	Fillet
1%	285.8	0.99 (284.0)	1.03 (294.5)	1.14 (327.2)
2%	285.5	1.01 (288.8)	1.06 (303.8)	1.20 (343.6)
5%	307.8	1.05 (324.3)	1.09 (334.2)	-

한편, 표 4에서 정리한 각 용접 상세별 실험의 항복 및 극한 강도의 측정값은 서로 큰 차이를 보이지 않는다. 즉, 용접 상세에 따라 변위나 변형률 거동에 차이가 있을지 모르지만 전체적인 하중의 크기나 강도에는 영향을 주지 않는다.

표 4 실험체의 항복 및 극한 강도

용접상세별 실험체	실험체 번호	단면적 (mm ²)	항복하중 [kN]	항복강도 [MPa]	극한하중 [kN]	극한강도 [MPa]
L-groove	1	197×5.9	332.9	286.4	426.4	366.9
	2	199.5×5.9	330.1	280.5	429.2	364.6
	3	200×5.9	338.4	286.8	440.2	373.0
T-groove	1	199.5×5.9	323.7	275.0	398.0	338.1
	2	199.5×5.9	327.4	278.1	412.7	350.6
	3	199.5×5.9	324.6	275.8	409.9	348.2
Fillet	1	199.5×5.9	334.0	280.5	415.4	352.9
	2	199.5×5.9	328.3	278.9	414.5	352.1
	3	199.5×5.9	327.9	285.1	420.9	357.6

4. 유한요소해석

L-groove 실험체를 제외한 T-groove와 Fillet 두 실험체에 대하여 범용구조해석 프로그램인 ABAQUS(ver5.7)을 사용하며 유한요소해석을 수행하였다. 해석은 두 단계로 나누어 수행하였으며 첫 단계에서는 용접을 고려한 열전도 및 열응력 해석을 통한 용접에 의한 잔류응력을 평가하였고 다음 단계에서는 용접에 의한 잔류응력(residual stress)과 등가소성변형(equivalent plastic strain)을 초기값으로 하여 실험과 동일한 하중상태에서 탄소성대변형 해석을 수행하였다. 일반적으로, 용접에 의한 잔류응력해석은 방대한 해석시간과 저장용량을 필요로 하므로 두께가 얇은 박판의 경우에는 두께방향으로의 열전도를 무시한 2차원 해석을 수행하고 두께가 두꺼운 후판의 경우에는 각 단면은 같은 온도변화를 갖는다는 가정 하에 용접선상에 수직인 단면을 취하여 2차원 해석을 수행한다.^[7] 본 해석에서는 3차원 Solid 요소를 사용하여 모델링 하였다.

4.1 열전도 및 잔류응력 해석

용접 아크에 의해 발생하는 고온에 의해 강재 내부에는 표면으로부터의 깊이에 따라 불균일한 온도분포가 형성되고 용접 후에는 내부구속에 의해 팽창과 수축이 자유롭지 못함으로 인해 비탄성 소성변형에 의해 잔류응력이 발생한다. 이러한 용접에 의한 잔류응력은 구조물의 변형과 파괴강도에 심각한 영향을 미칠 수 있다고 알려져 있다. 일반적으로, 강재의 두께가 두꺼운 경우 두께 및 길이방향으로 열 발산 속도가 다르기 때문에 용접선 주위에서는 용접선을 따라 항복응력에 가까운 잔류응력이 발생한다. 원전 격납건물의 라이너와 같은 박판의 경우에는 두께가 얇아 두께 방향으로의 열 발산 속도가 동일하여 두께 방향 보다는 면내방향의 잔류응력이 크게 발생하게 되며 고온의 아크 열원에 의해 용접부 인근에서는 항복을 넘는 소성 변형을 발생할 것으로 보인다. 따라서 본 해석에서는 열응력 및 탄-소성해석을 통하여 실제 실험 결과와 비교하였다.

열전도 해석시 용접조건을 고려한 입열량(heat flux)을 그림 16과 같이 Ramp heat input함수의 크기로 용접 패스의 진행속도를 고려하여 시간에 따른 이동열원으로 고려하였다. 실험체 제작과 동일한 용접방법 및 용접속도를 고려하여 입열량을 결정하였으며 1 패스로 열원을 가하였다. 또한, 초기조건으로 용접시 온도는 실온(20°C)으로 입력하였다. 용접열원의 세기는 단위길이당의 입열량으로 계산되며 용접물에 전달되는 입열량 Q는 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[7]

$$Q = \eta EI/v \quad (J/mm)$$

여기서, η 는 아크효율(FCAW, GMAW: $\eta=0.75\sim0.93$), E 는 아크전압(Volts), I 는 아크전류(Amperes) 그리고 v 는 용접속도(mm/s)이다.

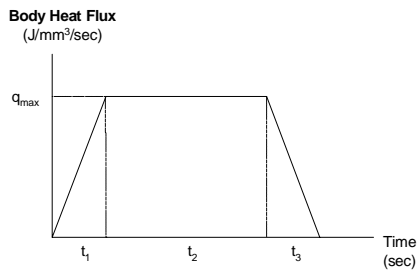


표 5 용접조건 및 입열량

해석 모델	Welding conditions				Heat Input Energy (J/mm)	Body Flux (J/mm ³)
	η	E (Volts)	I (Amp.)	v (mm/sec)		
T-groove	0.75	25	150	6	1107	52.083
Fillet	0.75	25	150	6	1107	250.00

그림 16 Ramp heat input 함수

그림 16에서 용접열원의 지속시간 t_2 는 용접봉에 의한 입열의 영향면을 5mm로 가정하고 용접 진행방향의 요소길이(10mm)를 고려하여 2.0초로 하였고 Ramp time은 0.5% ($t_1/t_2 \times 100\%$)를 적용하였다. 용접조건 및 유한요소 해석시 입열량은 표 5와 같다.

잔류응력 해석은 열전도 해석으로부터 구한 시간에 따른 열원의 크기를 하중으로 사용하여 해석하였으며 열전도 및 잔류응력 해석에 사용된 강재의 열특성 및 역학적 특성은 그림 17 및 그림 18의 SM400의 특성값을 사용하였다.

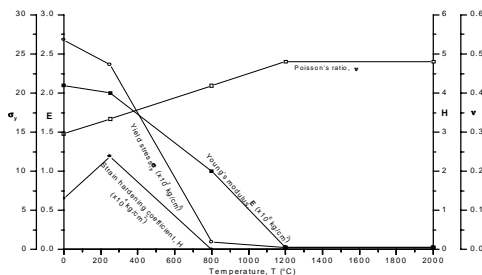


그림 17 Mechanical properties(SM400)

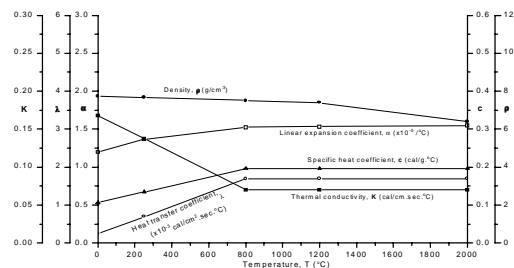


그림 18 Physical properties(SM400)

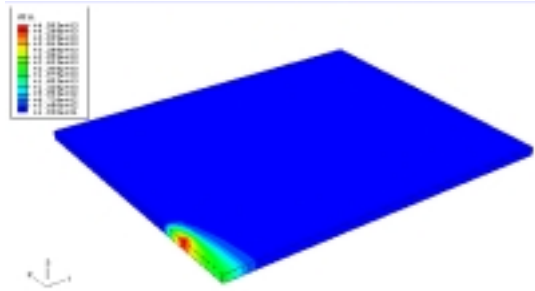


그림 19 온도분포(T-groove, t=10sec)

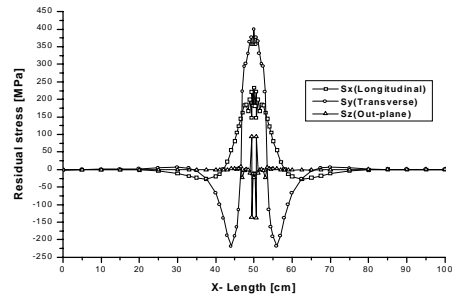


그림 20 잔류응력 분포(T-groove)

열전도 및 열응력 해석 결과(그림 19~그림 20), 용접부에는 상당한 크기의 용접열이 발생하며 용접선을 따라 항복강도에 이르는 큰 인장응력이 발생함을 알 수 있다. 또한, 용접부 인근 모재(용접선에서 50mm 위치; G7&G8)의 위치에서 하중 재하방향으로 50MPa 이 넘는 잔류 인장응력이 발생함을 알 수 있다.

4.2 탄소성 대변형 해석

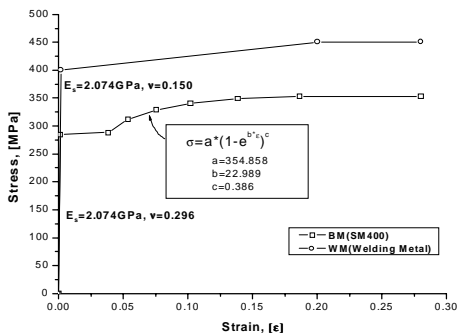


그림 21 탄-소성해석 재료모델

탄소성 대변형 해석은 Riks method를 이용한 변위제어로 해석하였으며 본 해석에서 사용한 용접물(WM, Weld Metal) 및 모재(BM, Base Metal)에 대한 응력-변형률 관계곡선은 그림 21과 같다.

해석 결과, 각 모델별 변형 전·후 형상은 그림 22와 같다. 두 경우 모두 실제 실험 결과와 동일한 양상을 보이고 있으며 최종적인 파괴는 넥킹(necking)이 일어나는 하중재하 위치와 용접부 중앙에서 발생함을 확인할 수 있다.

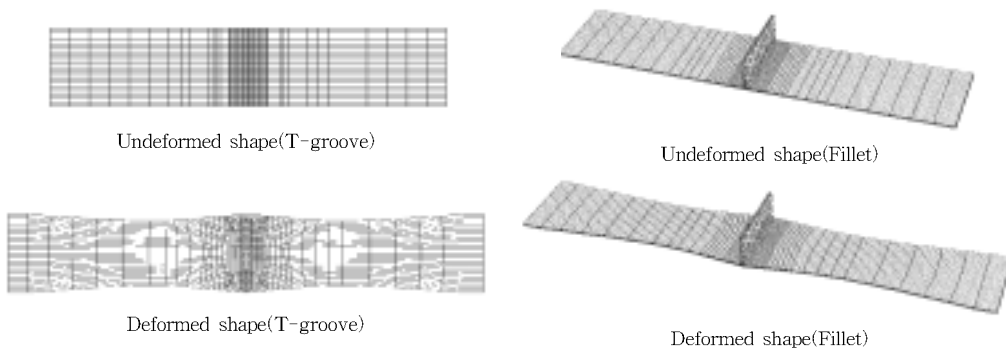
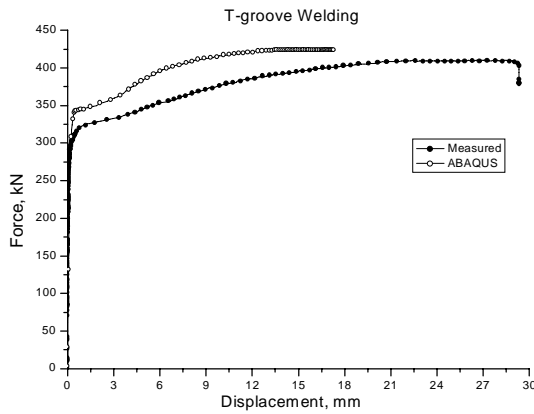
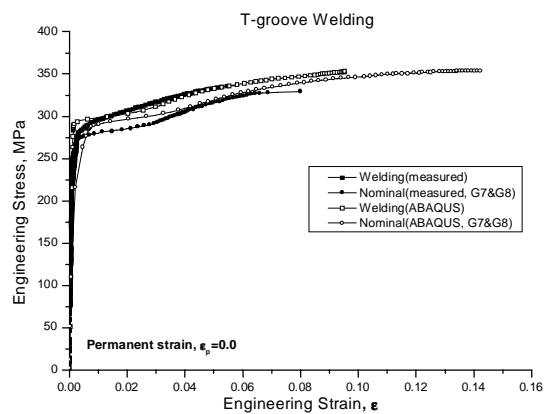


그림 22 탄-소성 해석 결과, 처짐형상(T-groove & Fillet)

다음의 그림 23~그림 24는 부재 중앙에서 하중 재하방향을 따라 측정된 변위 및 변형률에 대한 하중-변위 관계곡선과 응력-변형률 관계곡선을 탄-소성 해석 결과와 비교하였다.

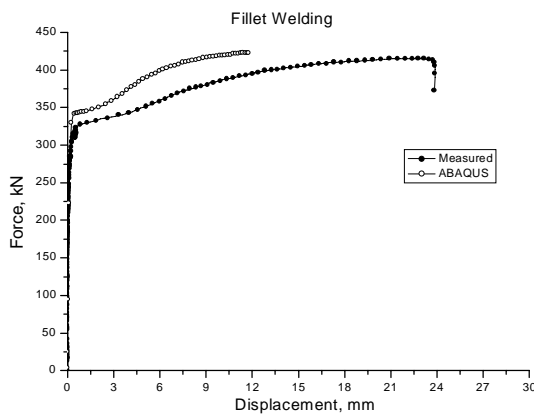


(a) 하중-변위 관계곡선

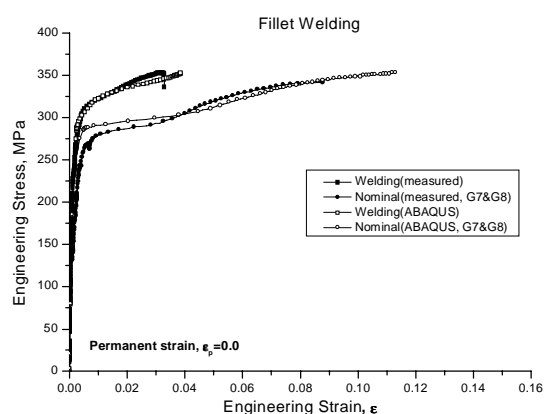


(b) 응력-변형률 관계곡선

그림 23 실험치와 탄-소성 해석 결과비교(T-groove)



(a) 하중-변위 관계곡선



(b) 응력-변형률 관계곡선

그림 24 실험치와 탄-소성 해석 결과비교(Fillet)

그림 23과 그림 24의 하중-변위 관계곡선에서는 해석과 측정에 곡선이 항복시점 이후 상당한 차이를 보인다. 이는 용접물의 정확한 재료 특성을 가정하여 해석을 수행하였기 때문이며 또한 용접물의 포와송비가 모재의 1/2정도로 입력되어서 용접부가 상대적으로 모재에 비해 횡방향 강성이 높으며 따라서 좀더 많은 구속 역할을 담당하였기 때문이라고 판단된다. 한편, 응력-변형률 관계곡선은 용접에 의한 잔류응력 및 잔류변형 크기를 제외한 외부 하중에 의한 Engineering strain - Engineering stress로 변환한 결과이다. 용접

부와 용접 인근(용접선으로부터 50mm 위치; nominal(G7&G8))에서 신장률 및 응력 크기가 실험결과와 아주 잘 일치하고 있다. 여기서 응력-변형률 관계는 용접물의 재료 특성이 직접적으로 반영되지 아니한 모재의 결과이기 때문에 하중-변위 관계곡선보다는 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있었다.

용접상세가 복잡한 관통부를 포함하는 모델에 대해 용접을 고려한 탄-소성해석은 상당한 해석 시간을 필요로 하며 많은 어려움이 있다. 그러나 용접부 모형에 대한 유한요소해석 결과가 상당한 신뢰성을 갖을 수 있을 것으로 판단되기 때문에 관통부 모형에 대한 용접부의 영향을 평가하기 위해서는 본 해석에서와 같이 용접부 상세에 대한 용접을 고려하여 열응력 및 탄소성 해석을 수행하고 그 결과로부터 용접부의 영향을 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

- ① 용접부의 잔류 응력 및 잔류 변형의 제거와 재분포를 위해 stretching-release를 시행하여 인장파괴실험을 수행하였으나 그 효과는 거의 없는 것으로 나타났는데 이는 소형의 시편 실험이기 때문으로 판단된다.
- ② 종방향 흡용접 실험체의 하중-변위 곡선은 재료 특성이 상대적으로 많이 반영되어 탄성-소성-소성경화의 과정을 따라가지만 횡방향이나 필렛 용접 실험체의 경우는 항복 이후 소성구간없이 바로 소성경화되어 파괴되었다.
- ③ 횡방향 및 필렛 용접 실험체는 횡방향으로 상대적으로 강성이 큰 용접선이 존재하여 종방향으로의 구속역할을 수행하는 것으로 보이며 항복이후의 변형률 거동에 큰 영향을 미친다. 항복이후 실험 종료까지의 변형률의 거동을 보면 종방향 흡용접→횡방향 흡용접→필렛 용접 실험체 순서로 작다.
- ④ 한편, 원전 격납건물의 라이너는 콘크리트 벽체의 변형에 의존적이기 때문에 동일한 변형률이 발생되었을 때, 라이너의 종방향 흡용접보다는 횡방향이나 필렛 용접이 더 많은 응력이 집중될 것으로 예측되며 따라서 이 부분이 상대적인 취약부로 평가될 수 있다.
- ⑤ 범용 해석프로그램을 이용한 용접 상세별 해석결과, 가정한 용접물의 재료 특성이 정확히 반영되지 않아서 하중-변위 관계곡선은 실험과 다소 상이한 결과를 주었으나 응력-변형률 관계 곡선은 재료의 물성이 실험결과에 직접적인 영향을 주지 않기 때문에 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있었다.
- ⑥ 관통부를 포함한 라이너 모델의 해석을 위해 용접물의 정확한 재료특성을 반영하여 용접을 고려한 열응력 및 탄-소성해석을 수행한다면 상당히 신뢰성이 있는 결과를 얻을 수 있다고 판단된다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 연구비를 지원한 관계당국에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 현대건설기술연구소 프리스트레스 콘크리트 격납건물 부재실험, KAERI/CM-602/2002, 한국원자력연구소, 2003.
- [2] 대한전기협회(2000) 전력산업기술기준.
- [3] Sandia National Laboratories "Pretest Analysis of a 1:4-Scale Prestressed Concrete Containment Vessel Model", NUREG/CR-6685, Nuclear Regulatory Commission, Washington, 2000.
- [4] Satoru Shibata, Michel F. Hessheimer, Tomoyuki Kitani, Makoto Kondo, and James F. Costello "Investigation on liner tears of a 1:4-scale prestressed concrete containment vessel model subjected to internal overpressure".
- [5] M. F. Hessheimer, E. W. Klamerus, G. S. Rightley, R. A. Dameron, S. Shibata, S. Mitsugi, and J. F. Costello "Preliminary Results of a 1:4-scale prestressed concrete containment vessel model test".
- [6] M. F. Hessheimer, D. W. Pace, E. W. Klamerus, T. Matsumoto, and J. F. Costello "Instrumentation and testing of a prestressed concrete containment vessel model" SMiRT-14, Lyon.
- [7] Yong Lae Shim and Sung Geun Lee, Modeling of Welding Heat Input for Residual Stress Analysis , Journal of KWS, Vol. 11, No. 3, September 1993.