

# 슬리브뒤개를 이용한 배관 보수용접시 잔류응력과 온도분포에 관한 연구

## A Study on Residual Stress and Temperature Profile in Pipeline Repair Welding

### Using Sleeve

김영표\*, 김형식\*, 김우식\*, 방인완\*\*, 오규환\*\*

\* 한국가스공사 연구개발원

\*\* 서울대학교 금속공학과

#### 1. 서론

현재 전국에서 건설중인 천연가스 배관망은 그 길이가 급속히 증가하고 있다. 기 건설된 배관망의 유지, 보수, 관리도 안전성 측면에서 매우 중요하다.[1,2] 외부의 작용으로 배관에 미미한 결함이 생길 경우 결함을 보수하는 절차를 확립하고, 보수용접시 필렛용접부 및 맞대기용접부의 미세조직과 기계적특성을 알아보고, 컴퓨터모사를 통해 잔류응력 및 용접시 배관내 온도분포를 예측하는 연구를 수행하였다.

본 연구는 내압이 존재하는 배관의 보수를 위하여 뒤개판을 용접하여 손상부를 보강할 때 용접시 발생하는 열에 의해 배관이 받는 영향을 평가하는 것이다. 즉, 용접중이나 용접후의 배관에 존재하는 잔류응력, 변형률 및 온도분포를 평가하기 위한 것으로써 배관의 내압은 0, 20 및 70kg/cm<sup>2</sup>로 변화시켜 해석하였다. 해석에 사용한 프로그램은 서울대학교 금속공학과 가공연구실에서 자체 개발한 것을 사용하였다.

#### 2. 실험방법

배관 및 뒤개판 재료는 API 5L X65 규격의 고장력강이다.[3] 천연가스 배관용접은 API STD.1104와 ASME Sec. IX을 기본으로 하고 있다. 용접방법은 두가지로서 Weld I에서 초층은 GTAW를 나머지 용접층은 SMAW를 사용하였으며, Weld II는 전 용접층을 SMAW 용접을 실시하였다. 시험편은 API STD 1104에 따라 필렛용접부만 포함한 인장 및 Nick-break 시험편을 4개씩 제작하였고, 필렛용접과 맞대기용접부를 포함한 인장시험편, 필렛용접부와 배관의 심부를 포함한 인장시험편을 1개씩 제작하여 인장시험을 실시하였다. 용접입열에 따른 열영향부의 상변태 및 결정립크기 관찰과 결함 존재여부의 관찰을 위한 매크로시험, 미세조직관찰 및 경도측정은 같은 시험편에서 실시하였다. Nick-break 시험편은 바이스에 고정시킨 다음, 해머를 사용하여 용접부가 파단되도록 하였다.

배관은 외경이 26인치이고 두께가 10.3mm이며, 컴퓨터모사시 아크지름은 10mm로 하였고, 열량이 모재에 흡수되는 열효율은 70%로 하였다. 용접시작후 모재에 1400W의 열량을 가하는데 걸리는 시간은 0.1초이며 열량을 6초까지 유지한 다음 약 10분간 대기, 가스 및 배관모재의 열전달에 의해 냉각된다.

용접부 초기 요소망은 그림 2에 나타내었는데, 용접부 근처는 잔류응력, 변형 및 온도분포의 정확한 평가를 위하여 미세하게 구성하였고, 첫번째층 및 두번째층 용접부밀에 6개의 절점과 4개의 요소를 선택하였다. 3차원 구조물인 배관을 2차원 형상으로 평가하기 위하여 배관'의 길이방향(y축)에 대하여 axisymmetry조건을 주었다. 배관 길이방향의 윗면과 아랫면

은 y방향으로 구속하였으며 배관의 인쪽면은 압력 경계조건을 주었다. 용착금속의 물성치는 Smithells Metals Reference Book의 자료를 인용하였다. 자연대류에 의한 열전달을 고려하기 위하여 액상에서의 열전도도는 그 온도에서 열전도도의 7배의 값을 사용하였으며, 응고과정에서의 잠열은  $1.93 \times 10^9 \text{ J/m}^3$ 으로 엔탈피법을 사용하여 온도장을 해석하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

보수용접을 실시한 필렛용접부의 최대인장강도는 배관모재의 최대인장강도에 대한 최소규정치인 530MPa 이하이었다. 배관 맞대기용접부의 인장시험결과 모재부에서 파단이 발생하고, 인장강도는 530MPa 이상이었다. 이는 배관손상부가 외부 하중으로 완전히 파괴된 이후에 다른 하중이 미치게 되는 경우에 필렛용접부 주위가 먼저 파단됨을 의미한다.

부분별로는 필렛용접부만 포함한 부분의 인장강도가 가장 크게 나타나며 필렛용접과 맞대기용접이 만나는 부분의 인장강도가 가장 작게 나타났다. 이는 필렛용접과 맞대기용접이 만나는 부분에서 열영향의 작용이 크게 나타남을 의미한다. 따라서 맞대기용접의 시작과 끝 부분에서 과냉이 발생하여 결함이 생성되지 않도록 주의하여야 하며, 서로 다른 용접부가 교차하는 부분에 대하여 비파괴검사를 주의 깊게 실시하여야 한다.

인장시험시 파단은 주로 응력집중이 큰 초층부나 배관표면의 용접끝점에서 발생하였다. 필렛용접한 인장시험편이 배관위 용접끝점에서 배관내부로 파단되고, 파단은 인장응력 방향에 대하여  $45^\circ$  방향으로 기울어져 있었는데 이는 전단응력이 크게 작용하였음을 의미한다.

건전한 필렛용접부의 파단은 초층에서 시작하여 필렛내를  $60\text{--}70^\circ$  의 각도로 가로질러 파단되며, 경우에 따라 필렛용접부 전체가 용융선근처에서 박리될 수 있다. 본 연구의 필렛용접부는 용착금속부 주위의 열영향부에서 파단이 발생하는 것으로 보아 건전한 용접임을 알 수 있다. 그러나 맞대기용접을 포함하는 필렛용접부의 인장시험편에서는 거의 박리에 가까운 파단이 발생하였다. 배관의 길이방향으로 부가되는 하중에 대하여 맞대기용접부와 배관이 용접된 부분은 취약하며 배관의 원주방향으로 작용하는 하중에 대해서는 맞대기용접부가 하중을 지탱하는 것으로 판단된다.

각각 요소망의 시간에 따른 온도변화로부터  $1490^\circ\text{C}$ 와  $727^\circ\text{C}$ 의 등온선을 알아보았다.  $1490^\circ\text{C}$ 는 배관의 액상선온도로 용접입열로 인하여 생성되는 배관의 용융선이며,  $727^\circ\text{C}$ 는 공식점 온도로 용접입열에 의해 배관의 미세조직이 변화하는 최소온도로서 용접에 의해 생성되는 배관모재의 열영향부이다. 표3에 실제 시험편과 컴퓨터모사결과를 함께 나타내었다.

그림 2는 첫번째층 용접시작후 배관 내부표면(절점 d), 배관두께중심부(절점 e)와 배관외부표면(절점 f)에서 시간에 따른 온도변화이다. 절점 f는 용접입열로 인하여 6초후에 최고 온도에 도달하여 약  $1600^\circ\text{C}$ 가 되며, 이러한 열이 절점 e와 d에 전달된다. 절점 f가 최고 온도에 도달한 후, 약 2초후에 절점 e는  $600^\circ\text{C}$ 정도의 최고 온도에 도달하고, 절점 d는 다시 약 2초후에  $470^\circ\text{C}$ 로 온도가 증가한다.

그림 3은 내압이  $20\text{ kg/cm}^2$ 일때, 용접을 완료한 후(1950초) 용접부 근처의 잔류 유효소성 변형률의 분포로서, 배관 내부표면의 소성변형률은 1.6%(Line C)미만으로 약 0.8%의 소성변형률이 나타나며, 용융선 주위에는 약 4%(Line F)의 소성변형률을 나타내었다. 용접부를 중심으로 배관과 덮개판은 배관 내부방향을 향하여 변형이 일어나고 있다. 이는 내압이 증가

함에 따라 압력이 배관의 변형에 대하여 반대응력으로 작용하며, 압력이 증가함에 따라 잔류 유효소성변형률이 감소한다는 사실과 일치한다.

#### 4. 결론

- 1) 컴퓨터 모사에 의한 미세조직(용융선, 고상선) 예측결과가 용접시험편의 미세조직을 관찰한 결과와 일치하였다. 또한 온도분포를 예측한 결과 배관 내면의 온도는 최고 순간온도가 500℃ 정도 이었다.
- 2) 컴퓨터모사 결과 20kg/cm<sup>2</sup>의 내압에서 용접시 배관 내부표면에 약간의 소성변형(0.8%정도)을 일으키는 잔류응력이 발생하였다.
- 3) 컴퓨터모사 결과 대기압과 70kg/cm<sup>2</sup>에서 보수용접한 필렛용접부의 각 요소에 대한 응력은 비슷하게 나타났다. 실제 용접시험편에서 용접부 주위에 잔류응력으로 인한 균열이 발생하지 않은 것으로 보아, 가압상태에서 용접할 경우 내압에 의한 균열이나 파단이 발생하지 않을 것으로 판단된다.

#### 5. 참고문헌

- 1) M.J.De Hertogh, Metal Construction and British Welding Journal, Mar., (1972) p83
- 2) Alan K.Denney, Pipe line & Industry, Dec., (1995) p45
- 3) API STD. 1104

Table 1. Comparison of Computer Simulation Results and true Welding (unit : mm)

	용융깊이 (배관두께방향)	열영향부 크기 (배관두께방향)	열영향부 크기 (덮개판 길이방향)
해석값	0.8	3.2	4.0
Weld I	0.8	2.0	3.1
Weld II	1.3	1.6	3.4

Table 2. Results of Tensile Tests

용접방법	종 류	최대인장강도 (MPa)	평균 (MPa)	파단부위
Weld I	필렛용접	474	467	배관표면-내부 배관표면-내부 초층-덮개판 배관표면-내부
		467		
		458		
468				
	필렛+맞대기용접	408	408	초층-덮개판
	필렛+Seam 용접	429	429	배관표면-내부
Weld II	필렛용접	478	471	초층-덮개판 초층-덮개판 초층-덮개판 배관표면-내부
		469		
		460		
		475		
		필렛+맞대기용접	445	445
	필렛+Seam 용접	450	450	배관표면-내부

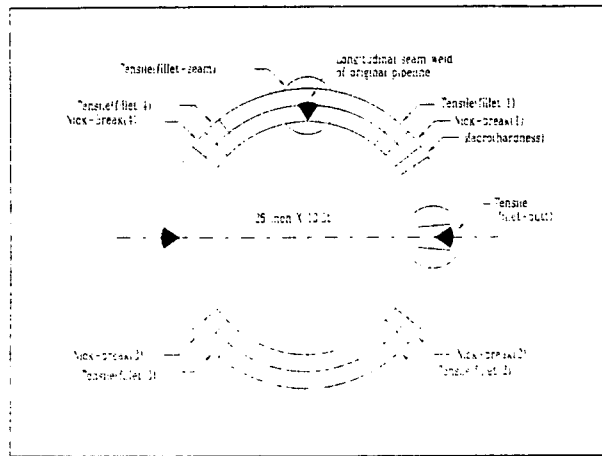


Fig. 1. Specimen position

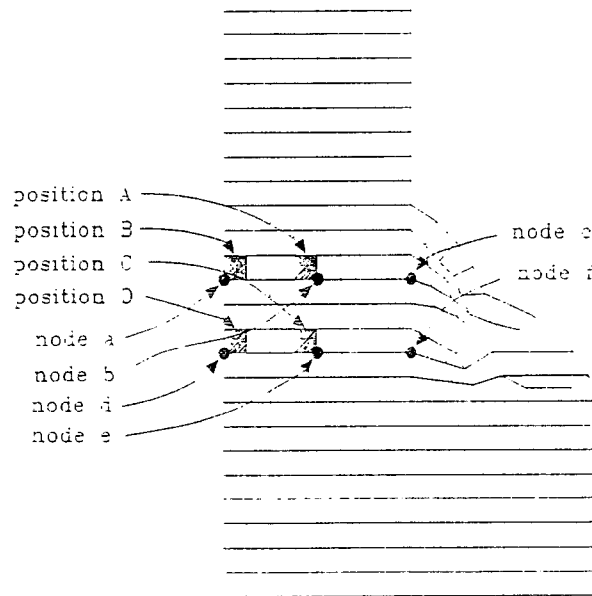


Fig. 2. Node and element for analysis

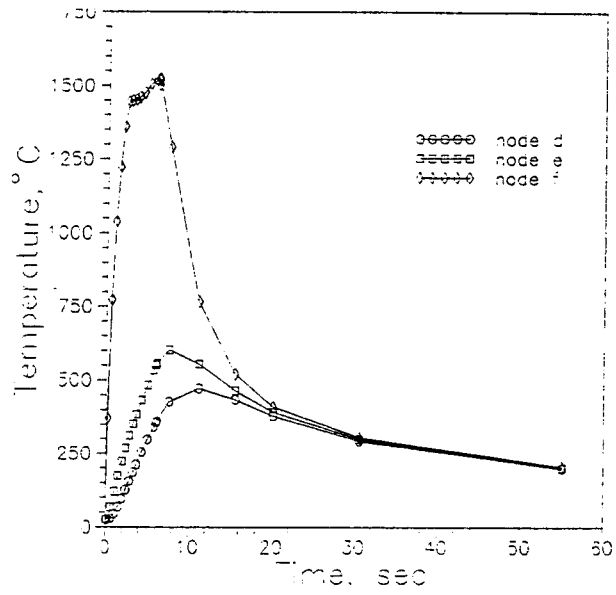


Fig. 3. Temperature variation with time after first layer welding

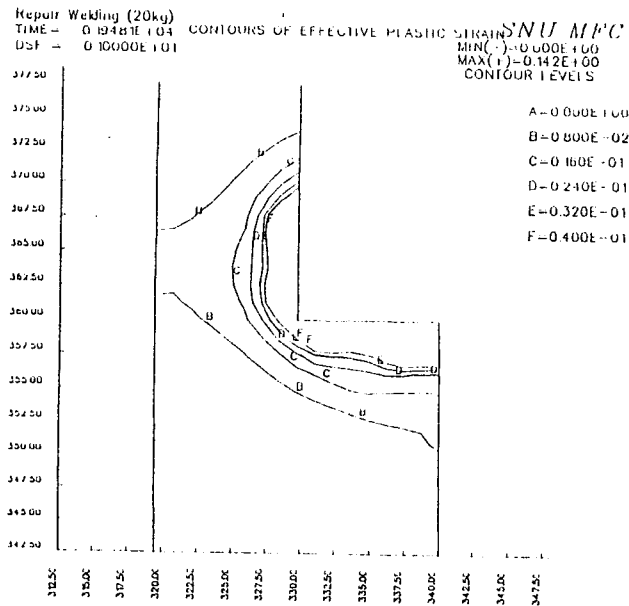


Fig. 4. Effect residual plastic strain after welding at internal pressure 20Kg/cm<sup>2</sup>