

研究論文

슬리브덧개를 이용한 배관 보수용접시 온도분포와 잔류응력에 관한 연구

김영표* · 김형식* · 김우식* · 홍성호** · 방인완*** · 오규환***

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

Y. P. Kim*, H. S. Kim*, W. S. Kim*, S. H. Hong**, I. W. Bang*** and K. W. Oh***

Key words : pipeline, repair welding, computer simulation, residual stress, temperature profile, sleeve

Abstract

Korea Gas Corporation has operated high pressure gas transmission line of about 600 kilometers and, therefore, a series of repair welding processes are required in order to cope with external defects such as dent, gouge, cracking usually due to mechanical attacks. Most of gas pipelines repair processes are performed after completely venting remaining gas. However, in some case, though it is very unusual, repairs require without venting gas. For instance, this case is that damaged pipeline is remedied with split sleeve by welding. .

In this paper, in an effort to confirm a safe application of the split sleeve welding, residual stress, strain and temperature distributions are evaluated by computer simulation and experiments.

The results obtained are as follows : 1) Computer modelling is supposed to be reasonable because microstructure changes due to welding is simulated coincidentally as compare to that of real condition. 2) The maximal temperature on inside surface of pipeline is 500℃ for the repair welding process. 3) The amount of residual stress is estimated as the stress corresponding to 0.8% strain. 4) The repair process employed is determined to be technically preferable because of its avoiding cracks and fractures in the course of welding.

* 정회원, 한국가스공사 연구개발원

** 비회원, 한국가스공사 연구개발원

*** 비회원, 서울대학교 금속공학과

1. 서 론

현재 전국에서 건설중인 가스배관망은 그 길이가 급속히 증가하고 있으며, 이미 건설된 배관망의 유지, 보수, 관리도 안전성 측면에서 매우 중요하다. 외부의 작용으로 배관에 결함이 생길 경우 결함을 보수하는 절차를 확립하고, 보수용접시 배관의 온도분포, 잔류응력 및 기계적특성을 예측하는 연구를 미리 수행할 필요가 있다^{1,2)}. 영국의 British Gas에서는 5년간의 연구를 통해 가압상태의 배관에 대한 용접절차에 대한 규격을 완성한 바 있으며, 배관두께가 0.16inch, 내압이 34bar인 조건에서 SMAW로 용접시 배관이 건전하다는 결과가 보고되었다³⁾.

본 연구는 내압이 존재하는 배관의 보수를 위하여 덮개판을 용접하여 손상부를 보강할 때 용접시 발생하는 열에 의해 배관이 받는 영향을 평가하는 것이다. 앞선 논문에서 보수용접시 필릿용접부 및 맞대기용접부의 미세조직과 기계적특성을 알아보았고⁴⁾, 본보에서는 컴퓨터모사를 통해 용접중이나 용접후의 배관에 존재하는 온도분포 및 잔류응력을 예측함으로써 보수용접시 배관의 안전성을 검토하고자 한다. 컴퓨터를 이용한 용접부의 해석은 실제 용접 횟수를 가능한 줄이고 다양한 조건에서 배관에 발생하는 온도분포, 응력 및 변형에 대하여 예측할 수 있다. 이러한 예측된 결과를 실제 용접상태와 상호비교함에 의해 컴퓨터 해석이 어느 정도 일치하는가를 알아볼 수 있다.

2. 컴퓨터 해석 조건

2.1 용접입열 조건

본연구에 사용한 용접조건을 표 1에 요약하였다. 배관모재의 재질, 용접봉 및 용접방법등은 전보⁴⁾에 상술하였다. 용접시 아크지름(d)은 10mm로 하였고 사용열량이 모재에 흡수되는 열효율(η)은 70%로 하였다. 용접시 모재에 유입되는 열량은 시간에 따라 그림 1처럼 변화한다. 용접시작후 모재에 1400W의 열량을 가하는데 걸리는 시간은 0.1초이며, 그 열량을 6초까지 유지한 다음 전원을

차단하고 약 10분간 대기, 가스 및 배관모재의 열 전달에 의해 냉각된다. 이는 한명의 용접사가 직경 660mm(26인치)의 배관을 연속적으로 용접할 때 한 지점을 용접하고 다시 그 지점을 용접할 때까지 걸리는 시간이며 첫번째층의 용접후 용착금속위의 이물질이나 슬래그 제거작업에 걸리는 시간은 무시한 것이다.

Table 1. Welding condition for computer simulation

current (I)	voltage (V)	velocity (V)	heat efficiency (η)	heat (Q)	weld input (H)
100A	20V	10cm/min.	0.7	1400W	8400J/cm

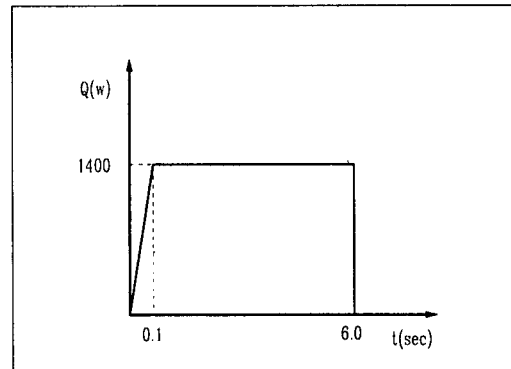


Fig. 1 The variation of arc heat flux with time

2.2 초기 요소망 및 경계조건

컴퓨터모사는 수치해석방법중 유한요소법을 이용하였다. 용접부 요소망은 그림 2와 같이 설정하였는데, 용접부 근처의 요소망은 온도분포, 잔류응력 및 변형의 정확한 평가를 위하여 미세하게 구성하였다. 용착금속의 용접층 구성은 내부 첫번째층의 용접후에 원래 배관과 첫번째층위에 두번째 용접을 하고 첫번째, 두번째층과 덮개판위에 세번째 용접을 하는 방법으로 하였다. 배관은 외경이 660mm(26인치)이고, 두께가 10.3mm이다.

3차원 구조물인 배관을 2차원 형상으로 평가하기 위하여 배관의 길이방향(y축)에 대하여

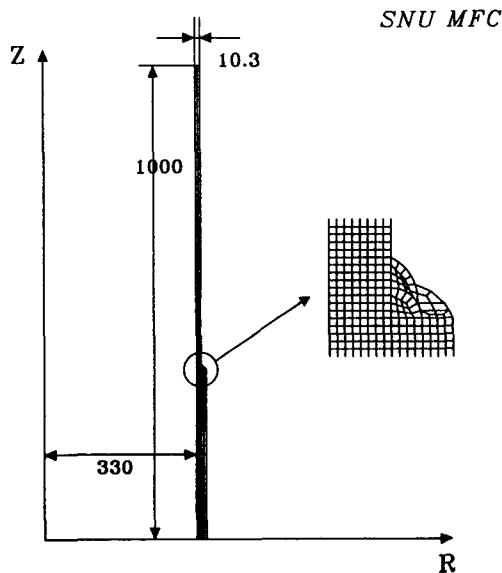


Fig. 2 The initial mesh and boundary condition

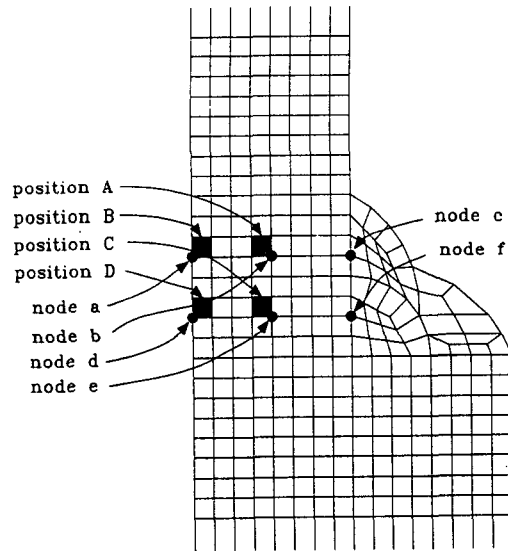


Fig. 3 The network of node and element

axisymmetry조건을 주었고, 보수용접부는 y축을 기준으로 360mm 지점에 위치하게 하였으며 배관의 두께방향(x축)에 대하여 대칭 경계조건을 주었다. 즉, 압력배관 덮개관의 필릿용접부는 x축을 기준으로 대칭적으로 위치하며 2m의 배관에 대하여 해석을 실시하였다. 배관의 길이방향의 윗면과 아랫면은 y방향으로 구속하였으며 배관의 안쪽면은 압력 경계조건을 주었다.

용접입열후 열의 흐름은 배관모재를 통한 열전달과 대기 및 배관내의 가스에 의한 열전달로 구분할 수 있다. 대기 및 가스의 열전달계수(h)는 100 w/m²℃이고 배관, 덮개관, 대기 및 가스의 온도는 상온(25℃)으로 초기값을 설정하였다. 그림 3은 그림 2의 용접부 근처를 확대한 것이다. 보수용접시 원래 배관의 온도분포, 잔류응력 및 변형량이 중요한 인자이므로 그림 3과 같이 첫번째층 및 두번째층 용접부 밑에 6개의 절점과 4개의 요소를 선택하였는데, 각각의 절점과 요소는 배관 외부표면, 배관 두께의 중심부와 배관 내부표면에 위치한다.

컴퓨터모사에서 배관의 내압은 0, 20 및 70kg/cm²로 변화시켜 해석하였다. 70kg/cm²의 압력은 주배관의 가스 공급압력이며, 실제 보수용접시는

가스의 연속적인 공급과 용접의 안전성을 위하여 내압을 강하하는 것이 바람직하므로 20kg/cm² 압력을 선택하였다. 압력이 0 kg/cm²인 조건은 대기압하에서의 용접과 압력이 걸려있는 경우의 용접을 비교하기 위하여 사용하였다. 해석은 서울대학교 금속공학과 가공연구실에서 자체 개발한 프로그램을 사용하였다.

2.3 온도변화에 따른 배관과 용착금속의 물성치

용접부 해석에서 사용한 재료의 물성치는 Smithells Metals Reference Book의 자료를 인용하였고, 이를 표 2에 정리하였다.

용착금속과 배관모재의 물성치는 동일한 것으로 가정하였다. 배관의 열팽창계수는 25℃가 기준 온도이며, 용착금속의 열팽창계수는 1600℃가 기준 온도이다. 용융상태의 용착금속에 응력이 걸리는 것을 방지하기 위하여 액상에는 열팽창계수의 값을 0으로 하였다. 용융지에서 자연대류에 의한 열전달을 고려하기 위하여 액상에서의 열전도도는 그 온도에서 열전도도의 7배의 값을 사용하였으며, 응고과정에서의 잠열은 1.93x10⁹J/m³으로 엔탈피법을 사용하여 온도장을 해석하였다. 일반적

Table 2. Mechanical properties of pipeline with various temperature

Temp. (°C)	Elastic modulus (GPa)	Yield stress (MPa)	Plastic modulus (MPa)	Poisson's ratio	Thermal expansion coefficient (10 ⁻⁵ /°C)	Specific heat (J/Kg-K)	Thermal Conductivity (W/m-K)
20	207	448	312	0.36	1.20 (1.36)	450	46.1
200	200	380	301	0.36	1.20 (1.36)	560	42.0
400	180	300	271	0.36	1.38 (1.36)	590	39.8
600	88	180	133	0.36	1.49 (1.29)	741	34.3
800	30	130	45.2	0.36	1.26 (1.53)	741	26.4
1000	20	60	30.1	0.36	1.31 (1.52)	820	27.2
1200	5	10	7.5	0.36	1.31 (1.31)	800	28.4
1300	1	5	1.5	0.36		800	30.0
1450	0.2	0.5	0.301	0.36	0(0)	800	100
1600	0.2	0.5	0.301	0.49	0(0)	800	200
2000	0.2	0.5	0.301	0.49	0(0)	800	200

(a : reference temperature = 25 °C, b : reference temperature = 1600 °C)

으로 여러 방향의 응력을 받고 있는 구조물은 유효 응력이 항복응력을 초과하는 경우에 항복이 일어나며, 본 논문에서는 Von Mises 항복조건에 따라 소성변형이 일어나는 것으로 하여 계산을 수행하였다.

3. 보수용접부 해석 결과

3.1 용접부 주위의 온도분포

용착금속은 용접입열에 의해 초기에 약 1600°C의 온도를 유지하며 용융상태로 배관과 덮개판에 접합된다.

그림 4는 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°C가 되며, 이러한 열이 절점 e와 d에 전달된다. 절점 f가 최고 온도에 도달한 후, 약 2초후에 절점 e는 600°C정도의 최고 온도에 도달하고, 절점 d는 다시 약 2초후에 470°C로 온도가 증가한다.

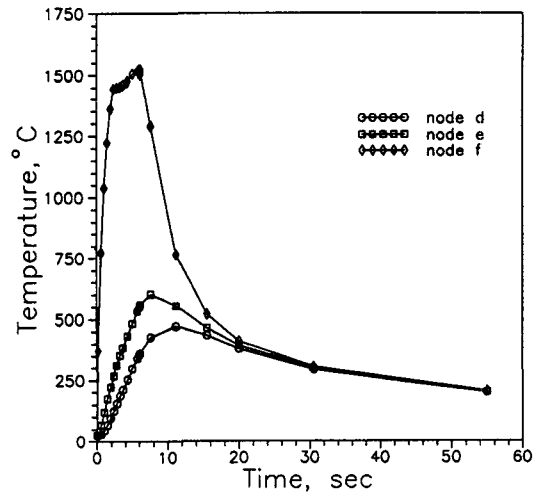


Fig. 4 Temperature variation of node d, e, and f with time after first layer welding

그림 5는 첫번째층 완료후 600초까지 냉각후 두번째 용접을 할 때로서 그림 4와 비슷한 경향을 나타내고 있다. 600초후 배관은 상온에 가깝게 냉각되었으며, 절점 a와 b의 최고온도는 첫번째층 용접부 밑의 온도보다 약간 높게 나타났다. 즉, 배관

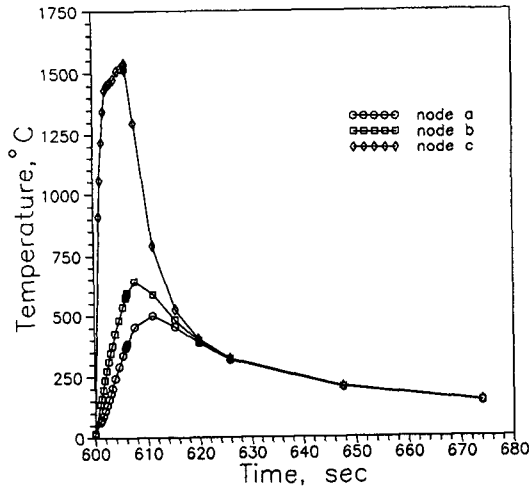
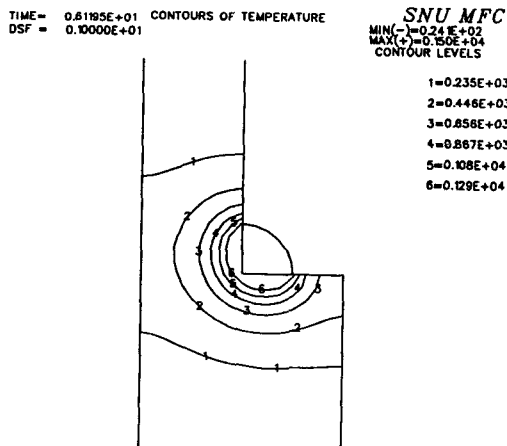


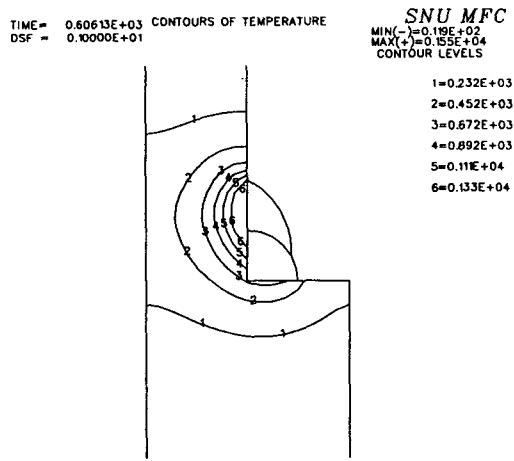
Fig. 5 Temperature variation of node a, b and c with time after second layer welding

표면의 열원이 1600°C인 경우에 열전달에 의해 배관 두께 중심부는 630°C이고 배관 내부표면은 500°C 정도이었다. 가스배관 내부는 천연가스만이 존재하는 영역으로 배관건전성만 유지된다면 배관 내면 온도가 500°C이더라도 발화되지는 않는다.

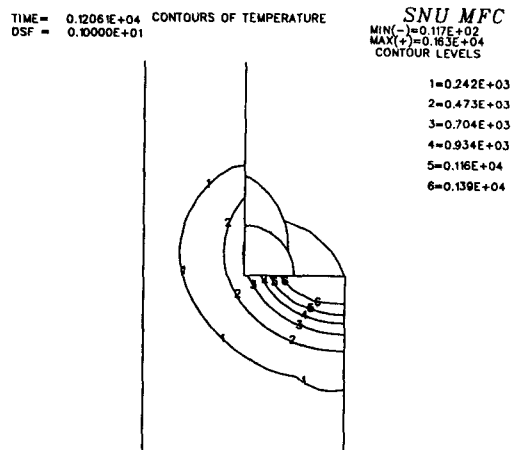
시간에 따른 배관모재의 온도변화에서 배관은 각 층의 용접시작후 6~10초가 경과했을때 최고온도에 도달함을 알 수 있다. 그림 6(a), (b)와 (c)는 각각의 용접층을 용접하고 6초후에 배관의 온



(a) at first layer welding



(b) at second layer welding



(c) at third layer welding

Fig. 6 Temperature profile of weldment after each layer welding

도분포를 등온선으로 나타낸 것이다. 그림 6(a)와 (b)에서 첫번째와 두번째층의 용접후 배관에 나타나는 온도분포는 열원이 비슷한 위치에 있기 때문에 비슷한 양상을 보인다. 그러나 그림 6(c)에서 세번째층의 용접은 덮개판의 온도를 크게 증가시키나 원래 배관의 온도증가에 미치는 효과는 크지 않음을 알 수 있다.

시간에 따른 온도변화로부터 각각 요소망의 온

도가 최고로 올라가는 시간을 결정하여 그림 7과 그림 8에 1490℃와 727℃의 등온선을 나타내었다. 1490℃는 배관의 액상선온도로 그림 7은 용접입열로 인하여 생성되는 배관의 용융선이다. 727℃는 공식점 온도이며 용접입열에 의해 배관의 미세조직이 변화하는 최소온도로서, 그림 8은 용접에 의해 생성되는 배관모재의 열영향부이다.

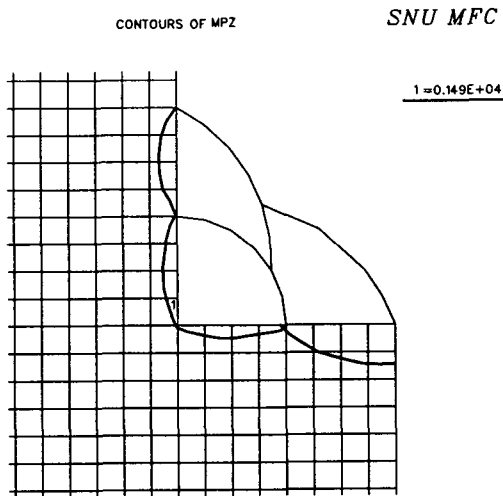


Fig. 7 Boundary of liquid line(1490℃) with welding heat input

그림 7에서 첫번째와 두번째 용접층에 의해 배관은 0.8mm 정도가 용융되고 세번째 용접층에 의해 덮개판은 2.0mm 정도가 용융되었으며, 그림 8에서 열영향부의 크기는 배관모재에서 3.2mm 정도의 깊이이며 덮개판에서는 4.0mm 정도임을 알 수 있다. 배관모재에 대한 용입깊이는 앞서 수행한 연구의 거시적인 용접조직 관찰결과와 잘 일치하였다⁴⁾. 첫번째 용접층의 열영향부 크기가 원래 배관모재부쪽에서 실제 용접상태보다 크게 나타났는데, 이는 실제 용접에서 원래 배관과 덮개판이 떨어져 있기 때문이다. 또한, 열영향부 크기에 대한 해석값이 다소 크게 나타나는 것은 배관모재의 미세조직이 727℃보다 약간 높은 온도에서 변화했기 때문으로 판단된다. 실제 용접의 용융깊이와 열영향부 크기를 해석값과 함께 표 3에 나타내었다.

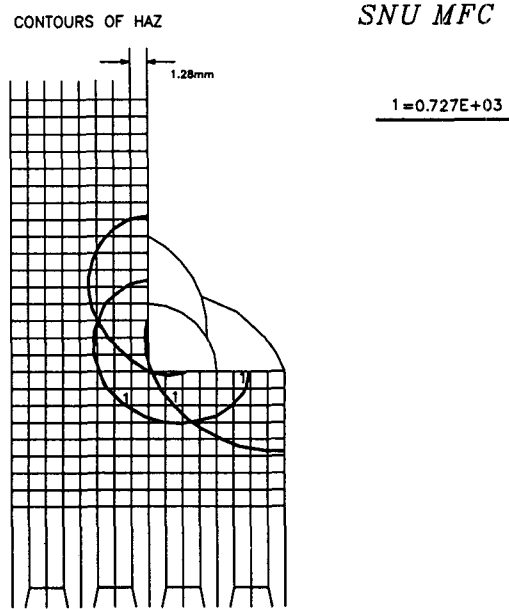


Fig. 8 Boundary of heat affected zone (727℃) with welding heat input

Table 3. Comparison of computer simulation results and true welding (unit : mm)

	melting depth (pipe thickness direction)	HAZ depth (pipe thickness direction)	HAZ depth (sleeve length direction)
analysis data	0.8	3.2	4.0
Weld I	0.8	2.0	3.1
Weld II	1.3	1.6	3.4

3.2. 보수용접에 따른 배관모재의 잔류응력 및 변형률

보수용접한 배관에 존재하는 잔류응력은 용접입열에 의한 열응력과 내압에 의한 응력을 함께 고려하여 계산하였으며, 자중에 대한 효과는 무시하였다. 용접부에서 원래 배관에 가장 큰 영향을 주는 첫번째와 두번째 용접층에 대한 영향을 평가하기 위하여 요소 A, B, C와 D의 위치에서 변화량을 관찰하였다.

그림 9는 첫번째 용접층의 용접시작후 각 요소

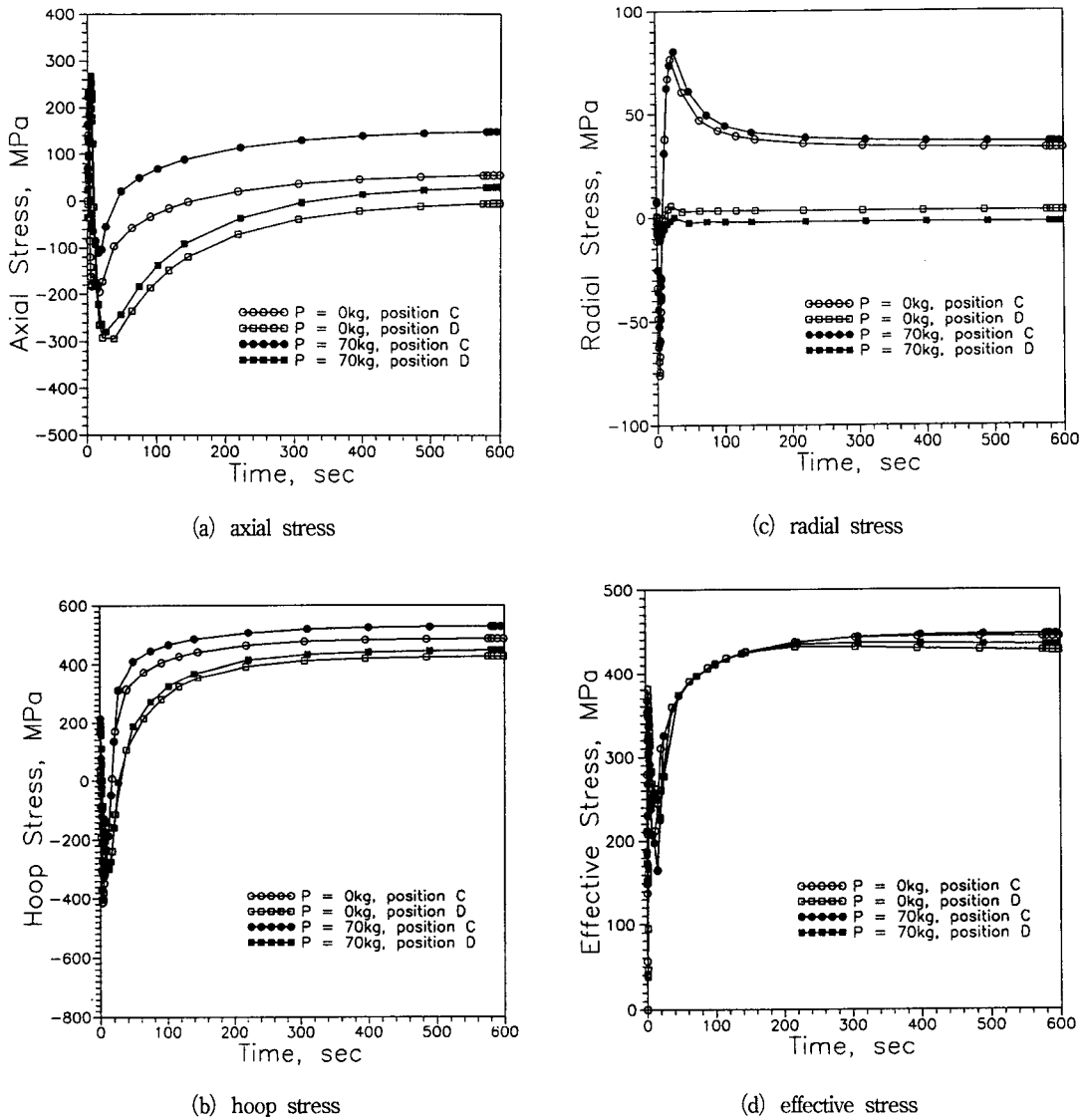


Fig. 9 Residual stress variation with time at first layer welding

에서 시간에 따른 용접응력의 변화로서 (a), (b), (c)는 각 방향에 대한 용접응력의 변화이며, (d)는 이들을 복합한 유효응력이다.

그림 9(a)의 축방향응력은 배관 길이방향의 응력으로 초기에 배관내압에 의해 작용하던 응력이 용접을 실시하여 배관의 온도가 증가하면, 초기의 탄성영역에서는 인장응력이 작용하다가 소성변형이 일어난 다음 압축응력이 작용하여 응력이 감소

한다. 용접입열이 차단된 후 냉각과정에서 배관이 수축하려는데 저항하는 인장응력이 걸리게 되어 용접응력이 증가하게 된다. 대체적으로 내압이 증가하고, 용접부에 가까운 배관두께의 중심부(요소 C)에서 더 큰 응력이 발생하였다. 내압이 70kg/cm²인 경우 배관두께 중심부의 축방향 잔류응력은 150MPa로 배관의 항복강도보다 작게 나타났다.

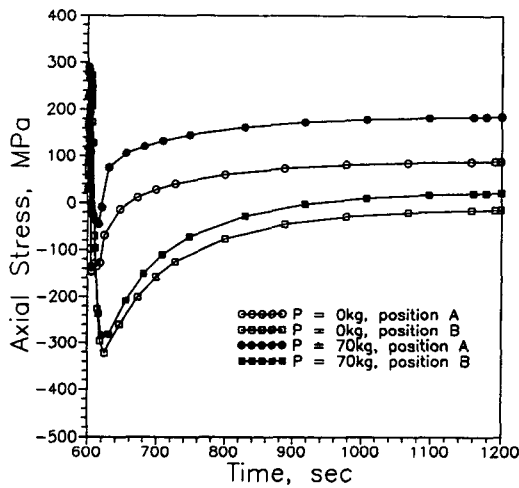
그림 9(b)에서 원주방향응력은 용접입열후 시간

에 따른 응력변화의 경향이 그림 9(a)의 축방향응력과 비슷하게 나타났다. 그러나 축방향응력은 용접후의 잔류응력이 용접전의 초기응력값보다 감소하는 경향을 가지고 있으나, 원주방향응력은 용접후 잔류응력이 증가하고 있었다. 원주방향응력은 내압이 70kg/cm²인 경우에 배관두께의 중심부에 약 500MPa의 잔류응력이 발생하였는데 이는 항복응력 이상이다.

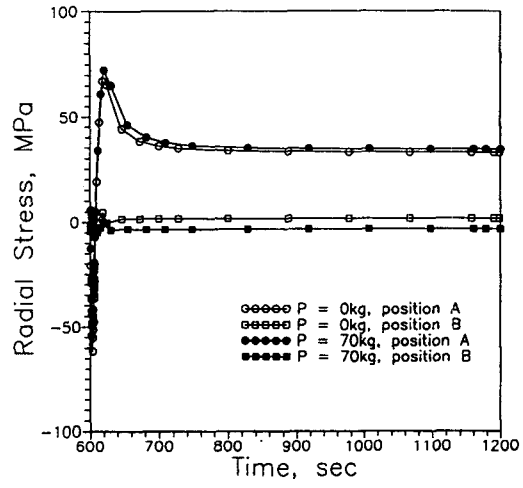
그림 9(c)는 반지름방향응력으로 용접시작전 각

요소에는 응력이 거의 존재하지 않았으나, 용접이 끝난 후에는 배관두께의 중심부인 요소 C에 응력이 크게 나타났다. 배관 내부표면인 요소 D에는 잔류응력이 거의 존재하지 않았으며, 각 요소에 작용하는 잔류응력의 절대값은 크지 않았다.

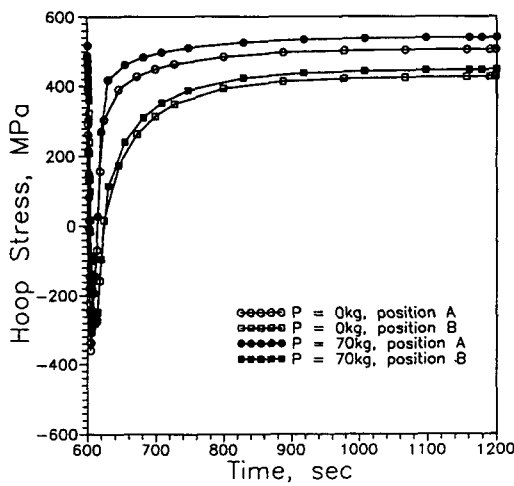
그림 9(d)는 유효응력으로 변화하는 경향은 원주방향응력과 유사하다. 즉, 원주방향응력이 유효응력에 지배적인 역할을 하는 것으로 나타났다. 내압이 70kg/cm²인 배관의 첫번째층 용접후 요소



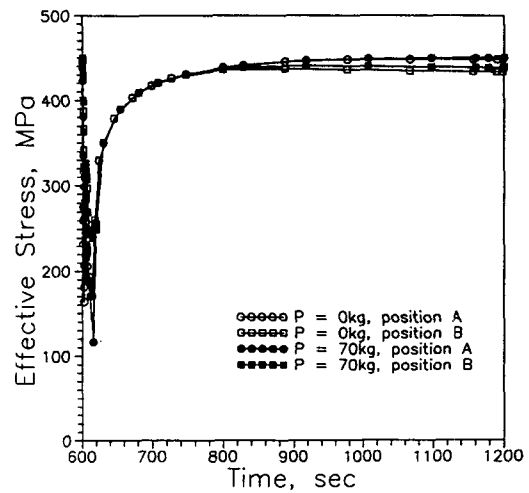
(a) axial stress



(c) radial stress



(b) hoop stress



(d) effective stress

Fig. 10 Residual stress variation with time at second layer welding

C와 D는 약 460MPa와 440MPa의 유효잔류응력을 나타냈다. 즉, 용접층에 가까운 부분에 더 큰 잔류응력이 존재하였으며, 용접층 아래부분의 잔류응력은 항복응력을 초과하여 소성변형이 발생할 것이라 예상할 수 있다. 실제 용접시험편에서도 필릿 용접부 근처에서 균열은 생성되지 않았지만 변형이 발생한 것을 관찰할 수 있었다⁴⁾.

또한, 내압이 배관 보수용접시 유효잔류응력에 미치는 효과는 크지 않았다. 이는 내부압력이 존재하는 배관을 용접하더라도 용접입열로 인해 가열된 배관이 내압에 의해 밖으로 크게 소성변형되거나 파단되지는 않음을 의미한다. 즉, 내압이 존재하는 배관의 보수용접에서도 용접시 용접부위 파단은 발생하지 않을 것으로 판단된다.

그림 10에 두번째층 용접시작후 요소 A와 B에 발생하는 용접응력의 변화를 나타내었다. 각 응력에 대한 초기값은 두번째층 용접시작전에 존재하는 잔류응력이다. 각 요소에 대한 응력변화는 첫번째층 용접후 용접응력이 변화하는 경향과 유사하며, 두번째층 용접후 잔류유효응력도 비슷하게 나타났다.

압축응력에서 인장응력 혹은 인장응력에서 압축응력으로 변화되는 시간은 용접입열의 전달이 빠른 배관 두께중심부에서 빠르게 나타났다. 이러한 용접입열에 의한 열전달의 시간적인 효과를 제외하고 내부압력의 증가에 따른 응력의 증가효과는 용접입열의 초기나 냉각종료 후에도 각 요소에서 크게 나타나지 않았다.

그림 11은 내압이 20kg/cm²인 배관의 세번째층 용접이 완료된 후 완전히 냉각된 상태에서 용접부 근처에 존재하는 유효잔류응력을 나타낸 것이다. 용접에 의해 발생한 잔류응력은 용착금속부 근처에서 상당히 높은 값을 나타내며 거리에 따라 감소하고 있다. 용융이 발생한 부분의 잔류응력 값은 의미가 없으며, 등응력선 6 내부는 425 MPa이상인데 항복응력을 초과하는 잔류응력은 존재할 수 없다. 용접부밀에 존재하는 용접응력은 배관에 소성변형을 일으키거나 내부균열의 전파를 촉진시킬 수 있다. 그러나 열영향부는 용접입열에 따라 미세조직이 변화하여 이에 따른 상변태가 용접응력을 완화시키는 역할을 하는 것으로 판단된다.

표 4는 각 압력에서 시간에 따른 요소 B와 D에서 잔류 유효소성변형률의 변화이다.

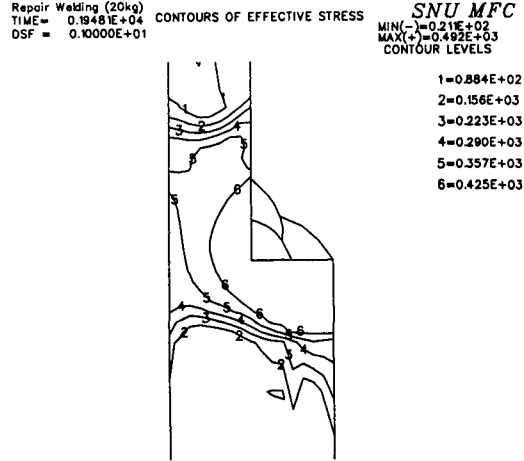


Fig. 11 Effective residual stress after welding at internal pressure 20Kg/cm²

Table 4. Residual effective plastic strain of element B, D with internal pressure and time (unit : %)

internal pressure	0kg/cm ²		20kg/cm ²		70kg/cm ²	
	welding layer element B	welding layer element D	welding layer element B	welding layer element D	welding layer element B	welding layer element D
first layer	0.32	0.58	0.29	0.53	0.20	0.46
second layer	0.73	0.84	0.72	0.82	0.45	0.78
third layer	0.76	0.87	0.75	0.86	0.51	0.82

요소 B와 D는 배관 내부표면에 가스와의 접촉하는 위치로, 가스의 기밀에 중요한 역할을 하는 부분이다. 전반적으로 배관의 내압이 증가함에 따라 요소 B와 D에 존재하는 잔류 유효소성변형률은 감소하는 것으로 나타났다. 이는 내압이 압축응력으로 작용하여 용접시 배관의 소성변형을 억제하기 때문이다. 첫번째 용접층밀에 위치한 요소 D의 잔류 유효소성변형률이 두번째 용접층밀에 위치한 요소 B보다는 조금 크게 나타났다. 세번째층 용접은 다른 용접층에 비해 원래 배관의 잔류 유효소성변형에 미치는 영향이 작았다.

그림 12는 내압이 20kg/cm²일때, 용접을 완료한 후(1950초) 용접부 근처의 잔류 유효소성변형률의 분포로서, 배관 내부표면의 소성변형률은 1.6% (Line 3)미만으로 약 0.8%의 소성변형률을 보이며, 용융선 주위에는 약 4% (Line 6)의 소성변형률

을 나타내었다. 용접부를 중심으로 배관과 덮개판은 배관 내부방향을 향하여 변형이 일어나고 있다. 이는 내압이 증가함에 따라 압력이 배관의 변형에 대하여 반대응력으로 작용하며, 압력이 증가함에 따라 잔류 유효소성변형률이 감소한다는 사실과 일치한다.

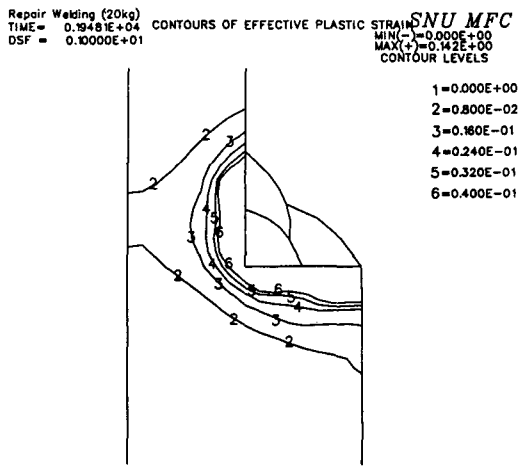


Fig. 12 Effective residual plastic strain after welding at internal pressure 20Kg/cm²

그림 13은 내압이 20kg/cm²일때 용접을 완료한 후(1950초) 배관에 발생한 소성변형의 범위이다. 용접부를 중심으로 0.001% (Line 1)의 소성변형이 발생하는 폭은 약 30mm 정도이었다. 따라서 잔류 유효소성변형률의 관점에서 필릿용접부는 최소 60mm이상의 간격을 유지하여야 한다. 항복응력이 448MPa인 배관재료에 대하여 유효응력의 관점에서 보면 배관모재는 용접입열시 항복응력 이상의 유효응력값을 나타내며 용접완료후 항복응력에 가까운 잔류유효응력이 존재한다. 이는 배관이 용접시 소성변형되었고 용접후 존재하는 잔류유효응력이 내부균열의 전파를 촉진시킬 수 있음을 의미한다. 또한, 배관재료는 고장력강으로 연신률이 30% 이상인 연성재료이기 때문에 변형률의 관점에서 재료의 파괴거동을 판단하면, 잔류 유효소성변형에 의해 배관이 파단되지 않고 소성변형만이 일어났음을 알 수 있다. 압력이 0kg/cm²인 경우도 비슷한 잔류유효응력을 가지며 잔류 유효소성변형은

크게 나타났지만, 대기압하에서 실제 용접한 시험편에서 용접부 주위의 균열이나 파단등은 관찰되지 않았고 소성변형만이 일어났다. 즉, 용접입열에 의해 발생하는 용접응력에 의해 배관이 파단되지 않는음을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 컴퓨터모사에서 온도분포, 유효응력 및 유효소성변형분포가 압력이 없을때와 비슷한 내압이 존재하는 배관의 용접시에도 용접부에서 큰 소성변형이나 파단은 일어나지 않을 것으로 판단된다.

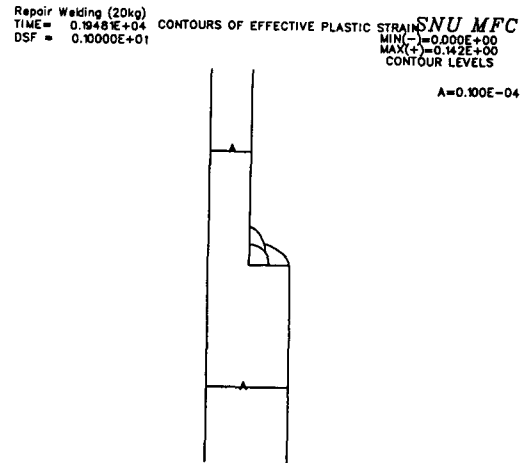


Fig. 13 Plastic deformed range after welding at internal pressure 20Kg/cm²

4. 결 론

- 1) 컴퓨터 모사에 의한 미세조직(용융선, 고상선) 예측결과가 용접시험편의 미세조직을 관찰한 결과와 일치하였다.
- 2) 보수용접시 온도분포를 예측한 결과 배관 내면의 온도는 최고 순간온도가 500℃ 정도 이었다.
- 3) 잔류응력 및 변형해석 결과 20kg/cm²의 내압에서 용접시 배관 내부표면에 약간의 소성변형(0.8%정도)을 일으키는 잔류응력이 발생하였다.
- 4) 컴퓨터모사 결과 배관 보수용접시 내압이 유효잔류응력에 미치는 효과는 크지 않았다. 이는 내압이 존재하는 배관의 보수용접시 용접입열로 인해 가열된 배관이 내압에 의해 밖으로 크게 소성 변형되거나 파단되지 않는음을 의미한다.

5. 참고문헌

1. S. Brown, H. Song, ASME J. Eng. for Industry, Nov. (1992), p441
2. C. L. Tsai, Welding Journal, Jan. (1991) p47
3. Alan K. Denney et al, Pipe Line & Gas Industry, Dec. (1995) p45
4. 김영표, 김형식, 김우식, 홍성호, 대한용접학회지, 제14권 5호, 1996년 10월