

강관 적층용접부 잔류응력의 생성기구

Production Mechanism of Residual Stress Generated by Multi-Pass Welding of the Steel Pipe

장 경 호¹⁾ · 양 성 철²⁾ · 강 재 훈³⁾
Chang, Kyong Ho Yang, Sung Chul Kang, Jae Hoon

요 약 : 강관 적층용접부에서 발생하는 잔류응력의 특징과 생성 매커니즘을 밝히기 위해 유한요소법을 이용한 3차원 열탄소성 해석을 수행하였다. 용접에 의해 강관을 접합할 때, 원주방향잔류응력과 두께방향잔류응력은 강관 내·외부에서 모두 접합부에서 인장응력이 발생하고, 길이방향잔류응력은 강관 내부에서 인장응력, 외부에서 압축응력이 발생된다. 또한 강관 적층 용접부의 잔류응력 생성기구를 명확히 하였다. 그 결과, 강관의 용접에 의한 잔류응력은 열응력에 의해 발생 할 뿐만 아니라, 강관의 기하학적 형상변화에 의한 영향도 받는다는 것을 밝혔다. 그리고, 용접조건과 강관의 제원이 달라질 경우에도 잔류응력 생성기구가 변함이 없음을 밝혔다.

ABSTRACT : The characteristics and production mechanism of residual stress generated by multi-pass welding of the steel pipe were elucidated from the results of three-dimensional thermal elastic-plastic FEM analysis. When the steel pipe was jointed by multi-pass welding, the stress components of circumferential direction and radial direction near welded joints on the inner surface and the outer surface of the pipe were tensile. The stress component of axial direction on the inner surface was tensile and on the outer surface was compressive. On the other hands, the production mechanism of residual stress generated by multi-pass welding of the steel pipe was investigated. Residual stress generated by welding of the steel pipe was influenced not only by the thermal history but also by geometrical shape. Then, the generality of the production mechanism of residual stress generated by multi-pass welding was confirmed.

핵심용어 : 강관, 용접 접합부, 잔류응력, 3차원 탄소성 해석, 생성기구

KEYWORDS : Steel Pipe, Welding Joint, Residual Stress, Three-Dimensional Elastic-Plastic Analysis, Production Mechanism

1) 정회원, 중앙대학교 건설환경공학과 조교수
2) 학생회원, 중앙대학교 대학원 토목공학과 석사과정
3) 중앙대학교 건축학과 전임강사

본 논문에 대한 토의를 2001년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

1. 서론

강관은 높은 압력이나 고온을 견디며 물질을 이송하는 통로가 되거나 하중을 지지하는 역할을 수행한다. 이와같은 강관부재는 관경이나 두께에 비해 상대적으로 길이가 긴 구조물이므로 접합은 반드시 필요하게 된다. 또한 강관 부재로 제작되는 압력용기, 해양구조물, 배관구조물, 도시 상하수도 등 대부분 용접제작되고 있는 실정이며 용접시에는 반드시 잔류응력 및 변형이 발생하게 된다. 그리고 원통관의 원주용접시 발생하는 잔류응력의 크기, 분포, 방향 등은 구조물에 악영향을 주는 것으로 알려져 있다.^{(1)~(8)} 또한, 강관 시설의 파괴·파손은 접합부에서 많이 발생된다고 보고되고 있으며^{(2)~(3)}, 강관 접합부의 역학적 특성을 파악하는 것은 대단히 중요하다.

본 연구에서는 적층 용접된 강관의 잔류응력을 추정하였다. 그리고, 용접잔류응력의 크기 및 분포의 특성을 파악하여 잔류응력의 생성기구를 밝혔다. 또한 잔류응력의 생성에 영향을 주는 파라미터를 검토함으로써 잔류응력 생성기구의 일반성을 확인했다.

2. 수치해석 프로그램의 타당성 검토

먼저 3차원 열탄소성 해석 프로그램의 타당성은 기존 연구들을 통하여 검증해 왔으며^{(4)~(6)},

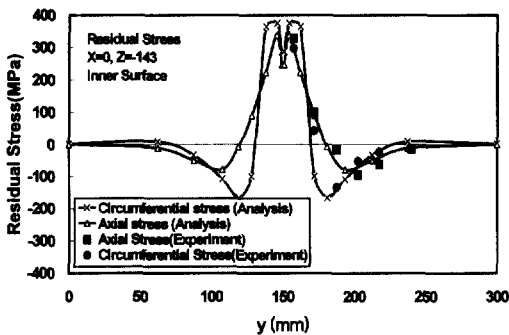


Fig. 1 강관의 잔류응력 (해석과 실험의 비교)

또한 본 연구에서도 타당성을 재검토하기 위하여 기존의 실험⁽⁷⁾ 결과와 비교해 보았다. 기존의 실험은 300mm(관경)×300mm(길이)×7mm(두께)의 강관을 1Pass용접하였을 때의 결과이다. 실험 결과와 비교하기 위하여, 똑같은 용접조건을 상정하여 열탄소성해석을 수행하여 그결과를 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다. Fig. 1과 Table 1의 결과는 용접 접합부에서 발생한 잔류응력치를 실험과 해석치로 구분지어 그림과 표로 나타낸 것이다. 내부에서 원주방향 잔류응력은 실험치와 해석 결과 모두 인장응력이 용접부에서 발생하였고, 길이방향 잔류응력 또한 내부 접합부에서 인장 잔류응력이 발생하였다.

수치해석 결과가 실험에 의한 잔류응력의 크기와 분포경향이 거의 일치함을 알 수 있다.

3. 해석조건

3.1 해석모델과 용접조건

본 연구에 사용된 모델재료는 토목 구조용 강으로 많이 사용하고 있는 SM490 강을 사용하였으며, 400mm(길이)×219.1mm(외경)×12.7mm(두께)의 강관을 반모델로 하여 해석하였다. SM490의 항복응력은 320MPa, 인장강도는 490MPa이며 강재의 물리정수 및 기계적 성질은 Fig. 3, Fig. 4에 나타내었다. 해석모델의 치수 및 형상은 실제 구조용 강을 모델로 하였으며 치수는 Fig. 2와 같다.

Table 1 강관의 잔류응력 (해석과 실험의 비교)

길이 (mm)		157.5	172.5	187.5	202.5	217.5	240
실험치 (MPa)	원주방향	297.4	42.4	-133.3	-52.0	-23.2	-13.3
	길이방향	328.3	99.9	-15.9	-95.3	-62.6	-14.4
해석치 (MPa)	원주방향	364.3	9.8	-151.9	-67.7	-29.8	2.7
	길이방향	338.5	90.4	-28.3	-74.3	-48.6	-12.8

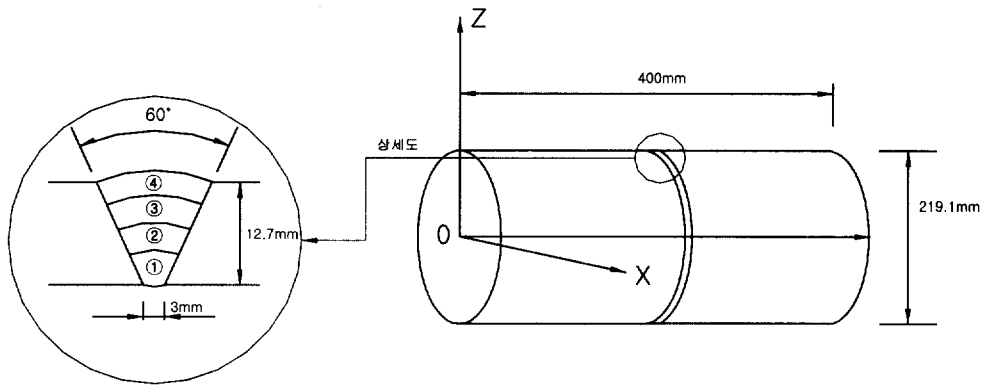


Fig. 2 해석모델

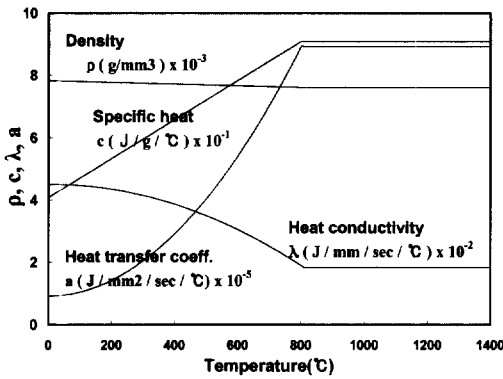


Fig. 3 강재의 물리정수

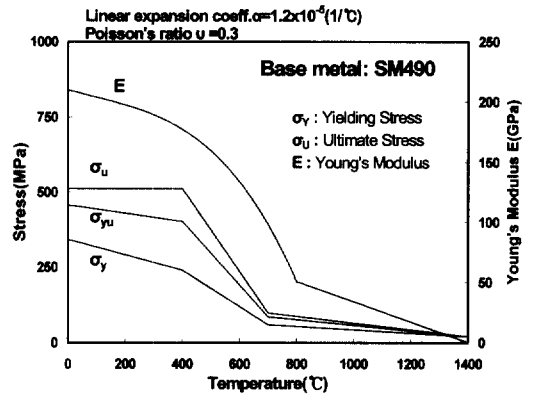


Fig. 4 강재의 기계적 성질

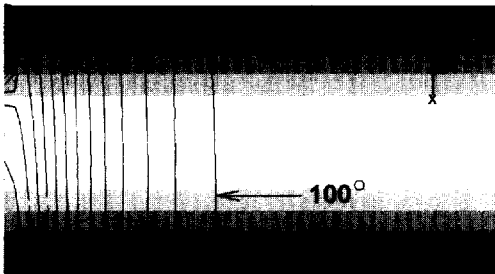


Fig. 5 용접완료시의 온도분포(4Pass, t=432sec)

용접조건은 전압 30V, 전류 240A, 속도 6mm/sec, 열효율은 0.85이며 4Pass의 적층용접을 하는 것으로 하였다. 그리고, 강관과 판의 1Pass용접의 잔류응력과 강관에 원주방향하중을 가했을 때의 응력을 비교 검토함으로써 잔류응력 생성기구를 밝혔다.

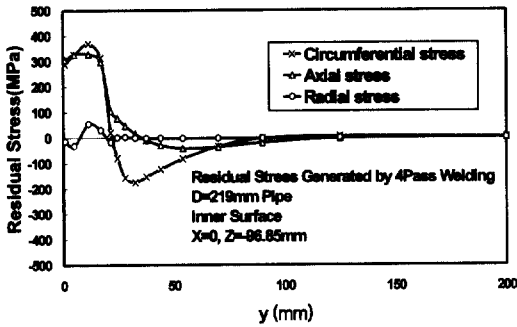
3.2 온도분포

3차원 비정상 열전도 해석을 수행하여 온도이력을 구하였으며, 그 결과의 한 예(t=432sec)를 Fig. 5에 나타내었다.

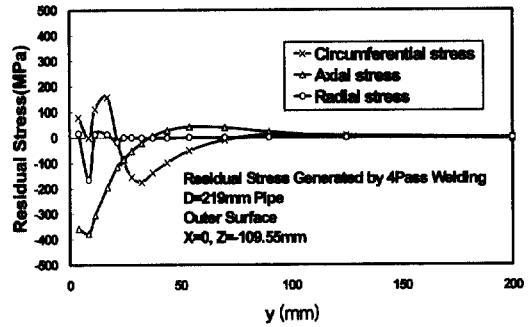
4. 적층용접부 잔류응력과 잔류응력 생성기구

4.1 적층 용접부 잔류응력

온도이력을 바탕으로 3차원 열탄소성 해석을 수행하여 잔류응력을 얻었다. Fig. 6의 결과는 4Pass 적층용접 종료 후 하부 내·외측의 잔류응



(a) 강관 내측의 잔류응력 (4Pass, D=219mm)



(b) 강관 외측의 잔류응력 (4Pass, D=219mm)

Fig. 6 잔류응력

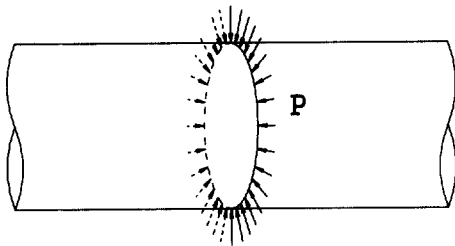


Fig. 7 원주방향 하중재하

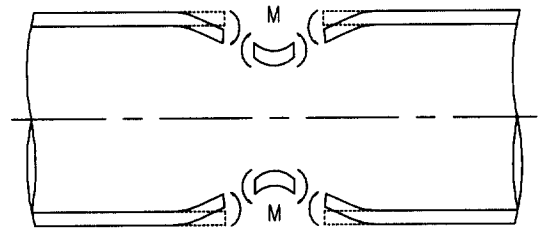


Fig. 8 강관 용접부 기하학적 형상

력이다. 결과에서 원주방향잔류응력은 접합부에서 내측과 외측이 각각 370MPa과 160MPa의 인장잔류응력이 발생함을 알았다. 반면 길이방향잔류응력은 내측에서는 320MPa의 인장잔류응력이 발생되었고, 외측에서는 370MPa의 압축 잔류응력이 발생되었다.

4.2 잔류응력의 생성기구

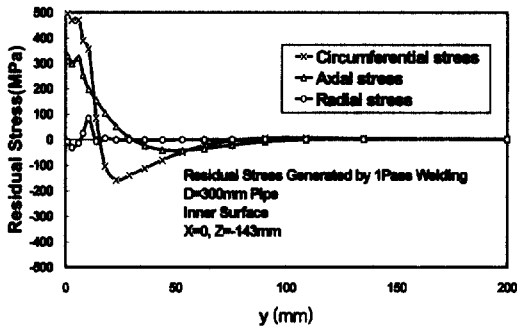
앞절의 적층용접부 잔류응력의 생성기구를 밝히기 위하여 본 연구에서는 다음 3가지 경우에 대하여 연구를 수행하여 비교하였다. 첫째, 강관을 1Pass로 용접했을때의 잔류응력. 둘째, 같은 제원의 강관에 Fig. 7과 같이 원주방향 하중을 재하했을 때의 잔류응력. 셋째, 판에 맞대기 용접했을때의 잔류응력을 비교하였다.

400mm (길이) × 219.1mm (외경) × 7mm (두께)의 SM490의 강관을 1Pass 용접했을 때

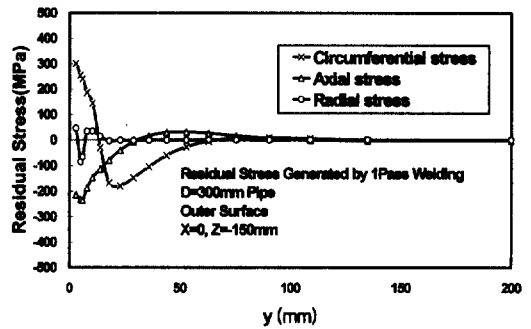
의 잔류응력을 Fig. 9(a), (b)에 나타내었다. 적층 용접과 마찬가지로 원주방향잔류응력은 접합부에서 내측과 외측이 모두 490MPa과 300MPa의 인장잔류응력이 발생하였다. 또한, 길이방향잔류응력은 내측에서는 330MPa의 인장잔류응력이 발생되었고, 외측에서는 230MPa의 압축잔류응력이 발생되었다.

또, 같은 제원의 강관에 Fig. 6과 같이 원주방향 하중만 재하하였을 때의 응력분포를 Fig. 9(c), (d)에 나타내었다. 길이방향 응력분포는 내부에서는 230MPa의 인장응력이 발생하고 외부에서는 135MPa의 압축응력이 발생하였다. 원주방향응력은 내부와 외부에서 모두 압축응력이 나타나지만, 외부에서 더 큰 압축응력 값을 보이고 있다.

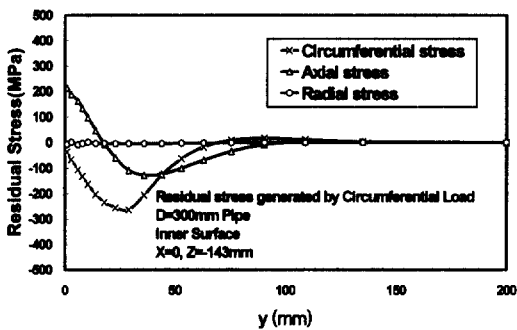
또한 같은 용접조건으로 판을 맞대기 용접하였을 때의 잔류응력분포를 Fig. 9(e), (f)에 나타내었다. 용접선 방향응력은 내부, 외부 모두 520MPa



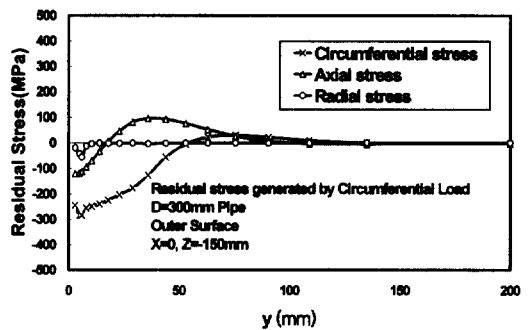
(a) 강관 내측의 용접 잔류응력 (1Pass)



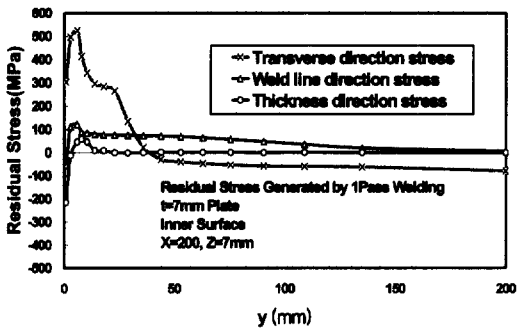
(b) 강관 외측의 용접 잔류응력 (1Pass)



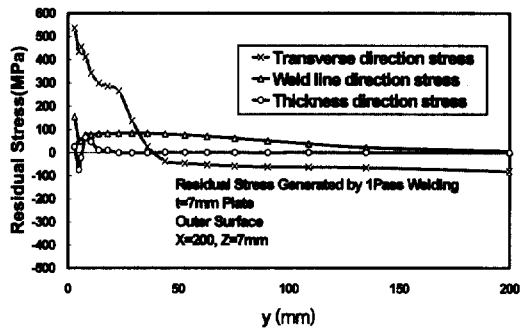
(c) 원주방향 하중재하시 강관 내측의 응력



(d) 원주방향 하중재하시 강관 외측의 응력



(e) 강판 내측의 용접 잔류응력 (1Pass)



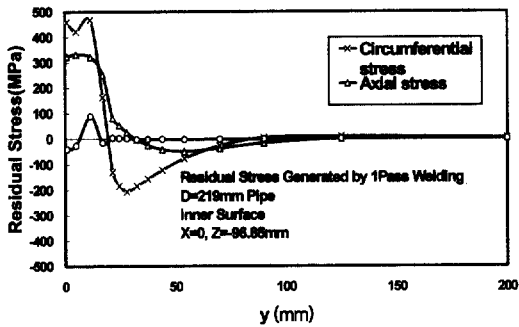
(f) 강판 외측의 용접 잔류응력 (1Pass)

Fig. 9 강관 용접부 잔류응력 생성 매커니즘

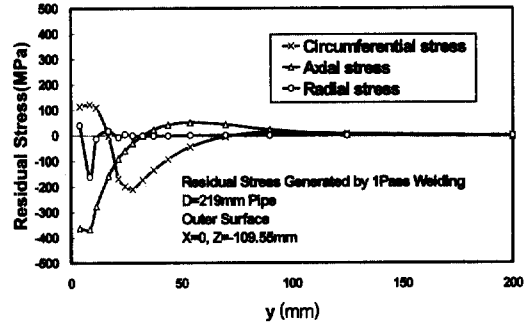
정도의 인장잔류응력이 발생하고, 용접선 직각방향 응력은 내부와 외부의 응력 모두 130MPa 정도의 인장응력이 발생하고 있다.

판의 잔류응력과 관의 잔류응력을 비교하여 차이점을 요약하면 다음 3가지로 요약 할 수 있다.

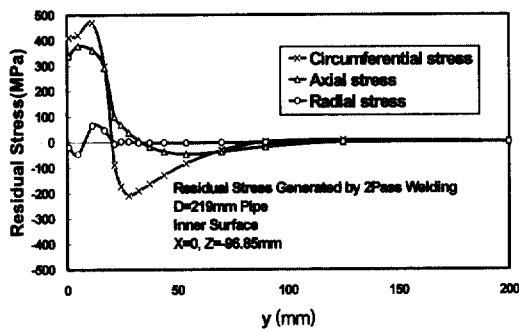
첫째, 판의 잔류응력은 내 외면이 같으나, 관의 응력분포는 내 외면이 다르다는 점, 둘째, 용접선 직각방향 응력(길이방향응력)은 판보다 비교적 크게 나타난다는 점, 셋째, 판은 내부로 오목한 굽힘변형의 면외변형이 발생한다는 점이다. 이러한



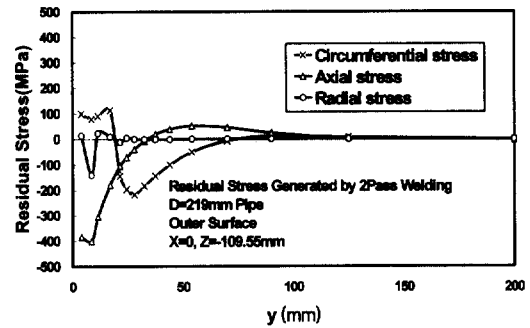
(a) 강관 내측의 잔류응력 (1Pass, D=219.1mm)



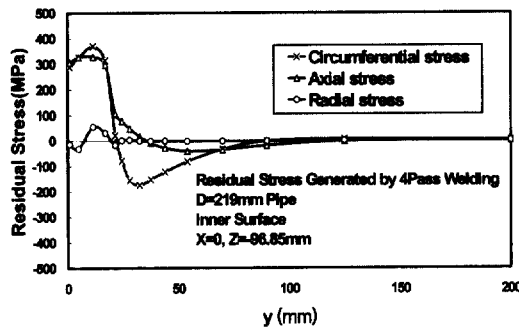
(b) 강관 외측의 잔류응력 (1Pass, D=219.1mm)



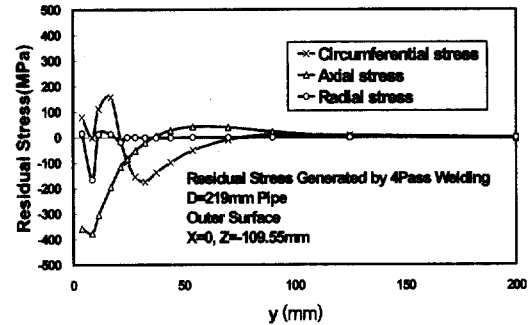
(c) 강관 내측의 잔류응력 (2Pass, D=219.1mm)



(d) 강관 외측의 잔류응력 (2Pass, D=219.1mm)



(e) 강관 내측의 잔류응력 (4Pass, D=219.1mm)



(f) 강관 외측의 잔류응력 (4Pass, D=219.1mm)

Fig. 10 강관의 용접 잔류응력 (1Pass, 2Pass, 4Pass인 경우)

응력분포의 차이점은 강관의 잔류응력 생성 매커니즘은 판의 잔류응력 생성 매커니즘과 다르다는 것을 시사해 준다.

이처럼 판의 잔류응력이 판의 잔류응력과 다르게 발생하는 이유는 판의 잔류응력 생성기구는 판

처럼 단순히 열응력에 의하여 생성되는 것이 아니라 용접시 판에 발생하는 기하학적 형상도 그 영향을 주기 때문이다. 용접에 의해 발생하는 기하학적 형상은 Fig. 8에 나타내었다.

강관의 길이방향 잔류응력은 원주방향 하중을

주었을 때처럼 내부로 오목한 굽힘변형을 받게 되므로 그림과 같은 모멘트가 발생하게 되어 내부에서는 인장응력, 외부에서는 압축응력이 발생한다.

강관의 원주방향 잔류응력은 판에서 처럼 열응력에 지배적인 영향을 받게 되어 내부와 외부에서 인장 잔류응력이 발생하지만, 그 위에 굽힘변형의 영향도 받게 되어 내부에서의 잔류응력이 외부에서보다 더 크게 발생하게 된다.

이와같이 강관의 용접에 의한 잔류응력은 열응력에 의해 발생할 뿐만 아니라, 기하학적 형상에 의한 영향도 받는다는 것을 알 수 있다.

5. 강관의 잔류응력 생성기구의 타당성 검토

5.1 Pass 수의 영향

앞절과 같은 잔류응력생성기구에 대한 고찰이 다른 모델일 경우에도 타당한가에 대해 검증하기 위해 다음과 같이 검토를 실시하였다. 즉, 같은 두께의 강관을 똑같은 용접조건으로 하고, Pass 수를 달리하였을 때에 대하여 검토하였다. Fig. 10는 모델과 같은 강관을 1Pass, 2Pass, 4Pass로 용접하였을때의 잔류응력 분포이다.

그 결과는 잔류응력의 생성기구와 마찬가지로 원주방향잔류응력 및 길이방향잔류응력은 적층용접의 거동과 같이 원주방향잔류응력은 접합부에서 내측과 외측이 모두 인장잔류응력이 발생하였다. 반면 길이방향잔류응력은 내측에서는 인장잔류응력이 발생되었고, 외측에서는 압축 잔류응력이 발생되었다.

이와같은 결과로 부터, Pass 수가 변하여도 잔류응력 생성기구는 변함이 없음을 밝혀졌다.

5.2 t/D의 영향

또한, 강관의 직경 및 두께의 변화에도 생성기구가 일반성을 갖는가에 대해 검토하였다. 즉 제원 파라미터인 t/D의 영향을 고려하기 위하여 토목구조강관에 많이 쓰이는 크기의 관경을 100mm, 219mm, 300mm로 변화하여 잔류응력을 검토하였다.

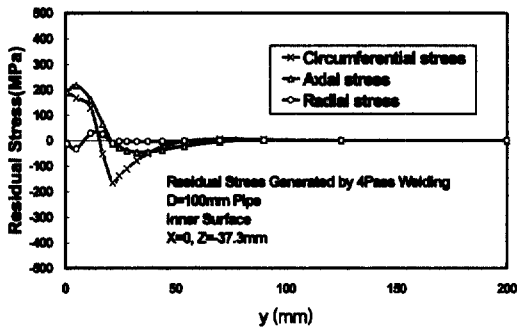
여기서는 t(두께)를 7mm로 고정하고 D(외경)를 100mm ($t/D = 0.0700$), 219mm ($t/D = 0.0319$), 300mm ($t/D = 0.0233$)로 변화시켜 가면서 해석을 수행하였다. 이때 용접조건 및 강관의 재원은 Table 2에 보인다.

Fig. 11(a) ~ (f)는 원통관의 t/D가 용접잔류응력 분포에 미치는 영향을 검토한 결과이다.

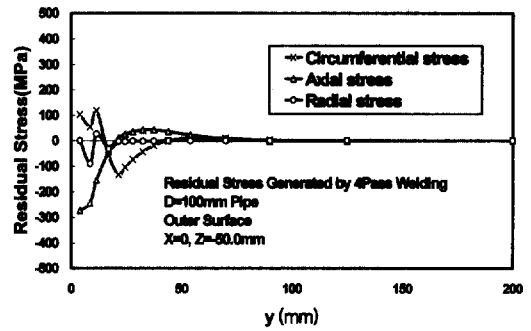
Fig. 11(a) ~ (f)에서와 같이 t/D값이 작아질수록 원주방향잔류응력은 내부에서는 각각 190, 370, 450MPa로 커지며, 외부에서는 70, 150, 180MPa로 커지고 있다. 길이방향잔류응력 또한 내부에서는 210, 320, 335MPa로 커지고, 외부에서도 270, 370, 370MPa로 커지고 있는 것을 알 수 있다. 이와같이 잔류응력이 발생하는 이유는 D값이 커질수록 관의 둘레의 길이도 커지고, 용접후 수축변형의 크기도 따라서 커지므로 잔류응력의 크기도 커지기 때문이다. 그러나 잔류응력의 분포 및 형상에는 변함이 없다. 이와같이, t/D값에 따라 잔류응력의 크기의 절대치는 차이가 있으나 잔류응력의 생성기구는 변함이 없음을 알 수

Table 2 t/D 및 용접조건

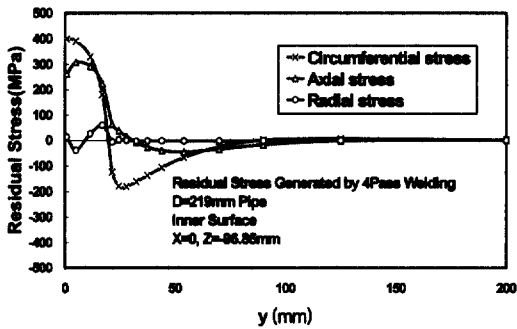
관경(mm)	강종	두께(mm)	t/D	전압(V)	전류(A)	용접속도(mm/sec)	Pass	입열량(J/mm)
100	SM490	12.7	0.0700	30	240	6	4	1200
219	SM490	12.7	0.0319	30	240	6	4	1200
300	SM490	12.7	0.0233	30	240	6	4	1200



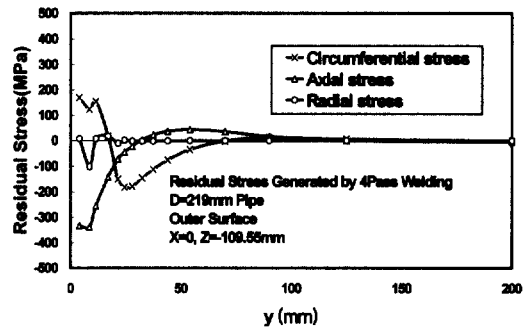
(a) 강관 내측의 잔류응력 (D=100mm, 4Pass)



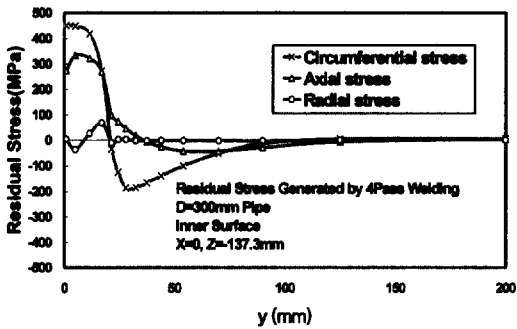
(b) 강관 외측의 잔류응력 (D=100mm, 4Pass)



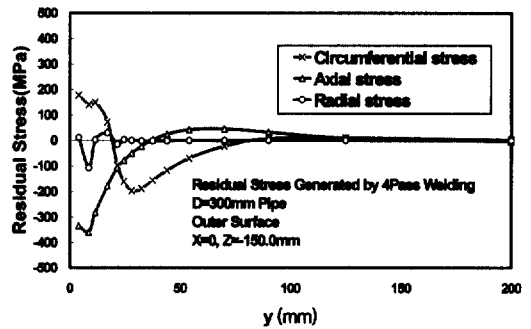
(c) 강관 내측의 잔류응력 (D=219mm, 4Pass)



(d) 강관 외측의 잔류응력 (D=219mm, 4Pass)



(e) 강관 내측의 잔류응력 (D=300mm, 4Pass)



(f) 강관 외측의 잔류응력 (D=300mm, 4Pass)

Fig. 11 강관의 용접 잔류응력 (t/D의 영향)

있다.

6. 결론

본 연구에서는 파이프 적층 용접시 발생하는 잔류응력의 생성기구를 명확히 하였다. 그리고, 생

성기구의 타당성을 검토하기 위해서 Pass수가 다른 적층용접에 대해 검토하였다. 또한 강관의 두께 및 직경의 치수(t/D)가 다른 경우에 대해서도 생성기구의 타당성을 검토하였다.

- (1) 원주방향 잔류응력은 내측과 외측이 각각 370MPa과 160MPa의 인장잔류응력이 발

생했다. 즉, 용접에 의해 열응력이 발생하여 내측과 외측에서 모두 인장응력이 발생하게 되고, 기하학적 형상의 변화에 의하여 내측에서가 외측에서보다 더 큰 인장응력이 발생하게 된다.

- (2) 길이방향 잔류응력은 내측에서는 320MPa의 인장잔류응력이 발생하고, 외측에서 370MPa의 압축잔류응력이 발생한다. 즉, 길이방향 잔류응력은 기하학적 형상변화에 지배를 받기 때문에, 내부로 오목한 굽힘변형이 발생하여 내측에서는 인장잔류응력이 외측에서는 압축잔류응력이 발생한다.
- (3) 두께방향 잔류응력은 내측과 외측 모두 인장응력이 발생하나, 그 절대치는 매우 작다.
- (4) 강관의 용접에 의한 잔류응력은 열응력에 의해 발생할 뿐만 아니라, 기하학적 형상변화에 의해서도 발생된다.
- (5) 위와 같은 적층용접시 발생하는 잔류응력의 생성기구의 일반성은 용접조건과 강관의 크기가 달라질 경우에도 변함이 없음을 밝혔다.

감사의 글

이 연구는 2000학년도 중앙대학교 학술 연구비 지원에 의한 것입니다. 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. 장경호 : 적층용접에서 발생하는 변형 및 잔류응력의 특징, 한국강구조학회 학술발표회 논문집, 1999년 6월, pp.194-198
2. 장경호, 양성철 : 매설 강관 접합부의 응력 거동, 대한토목학회 학술발표회 논문집, 2000년 10월), pp.293-296
3. 장경호, 양성철 : 강관용접부의 잔류응력의 특징, 대한용접학회 학술발표회 논문집, 2000년 4월, pp.239-242
4. 장경호, 이상형 : 3차원 유한요소해석에 의한 용접응력과 변형의 해석 및 정도, 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 13권 2집, 2000년 10월, pp.11-17
5. 장경호, 이상형 : 공용중 보수용접에 의한 용접부의 응력 및 변형의 거동, 한국 강구조학회 논문집, 12권 3호, 2000년 6월, pp.276-279
6. Y.C.Kim, K.H.Chang and Horikawa : Transaction of JWRI, Vol 27, No.2 December, (1998), pp.107-113
7. 엄동석, 유기열 : 원통관의 원주용접시 발생하는 잔류응력에 관한 실험적 연구, 대한용접학회지 제15권 2호, 1997년 4월, pp. 81-88
8. 장경호, 양성철, 박정웅, 신영의: 파이프 적층용접부 잔류응력의 거동, 대한용접학회 학술발표회 논문집, 2000년 10월, pp.114-117

(접수일자 : 2001년 5월 3일)