

교량용 후판 다층용접시 잔류응력과 변형에 미치는 루트간격의 영향

장경복* · 김하근* · 강성수**

Effects of Root Gap on Residual Stresses and Deformation in the Multi-Pass Weld of Thick Plates for Steel Bridge

G.B. Jang*, H.K. Kim* and S.S. Kang**

Key Words: Welding Residual Stress(용접 잔류응력), Welding Deformation(용접변형), Multi-pass Welding(다층용접), F.E.M(유한요소법), Root Gap(루트간격), Heat Input Model(열입력 모델)

Abstract

The effects of root gap on welding residual stress and deformation are dealt with the multi-pass weldment with three kinds(0, 6, 30mm) of root gap by F.E.M common code, and then compared with experiment data. In this analysis, an 100% ramp heat input model was used to avoid numerical convergence problem due to an instantaneous increase in temperature near the fusion zone, and the effect of a moving arc in a two dimensional plane was also included. During the analysis, a small time increment was applied in a period with instantaneous temperature fluctuation while a large time increment was used in the rest period. The residual stress is distributed as symmetric types and maximum value is also equivalent when the weldment with 0mm and 6mm root gap is welded. In the case of 30mm root gap welding, the distribution of the residual stress extends over a wide range as asymmetric types due to the built-up weld, and most of the residual stress is biased in the side of a built-up weld part. In case of 0mm gap welding and 6mm gap welding, a little angular distortion occurs, but the level of deformation is small. When the weldment with 30mm root gap is welded, the angular deformation of the asymmetric types, however, occurs larger than the other specimens. The experimental and the analytic results show good coincidence and indicate that the welding residual stress and deformation distribution of 30mm root gap specimen may be asymmetric and the amplitude is larger than those of root gap specimen under standard.

1. 서 론

구조물의 용접시 용접변형의 발생으로 인해 맞대기 용접이음부에 있어서 규격이상의 루트 간격(root

gap)이 발생하여 제작상의 문제점이 되는 경우가 많다. 특히, 후판 피용접재가 사용되는 교량의 경우 다층 용접이 행하여지며 용접부가 다양한 형태로 연결되기 때문에 이러한 용접변형의 발생으로 인해 제작상 치수 공차를 유발하는 경우가 대부분이다. 이와같이 제작상

※ 1998년 10월 7일 접수

* 정회원, 부산대학교 대학원

** 정회원, 부산대학교 기계기술 연구소

• 장경복 : janggb@hyowon.cc.pusan.ac.kr

규격이상의 루트간격이 발생하는 경우 현장에서는 규격이상의 부분을 육성(buit-up) 용접하고 난 뒤 나머지 부분을 용접하는 형태를 취하고 있다. 예를 들면, 두께 15mm 판재를 맞대기 용접을 할 때 규격의 루트간격은 6mm 이하인데 실제 교량 제작시 루트간격이 최대 30mm까지 발생하게 되어 24mm를 육성용접을 하고 난 후 6mm를 본 용접하고 있는 실정이다.¹⁾ 그런데, 이와 같이 규격을 벗어나는 부분을 육성 용접시 규격내의 루트간격으로 용접을 시행할 때와는 용접 잔류응력 및 용접변형의 거동이 다르게 나타나 다른 부재에 미치는 영향이 달라짐에도 불구하고 이러한 사실에 대해서는 기초적인 데이터의 축적도 이루어지지 않은 실정이다. 또한, 규격내에 포함되는 루트간격에 대한 용접 잔류응력 및 용접변형에 대해서도 체계적인 검토가 이루어지지 않고 있으며 이러한 규격을 벗어나는 루트간격이 교량 제작에 미치는 영향에 대해서도 검증이 이루어지고 있지 않은 상태이다. 그 이유는 대형의 용접구조물에는 대부분 두꺼운 후판이 사용되어 다층용접이 이루어지기 때문에 이러한 용접 잔류응력 및 용접변형을 정량화하기가 어렵기 때문이다. 그러나, 근래에는 국내에서도 유한요소법을 이용하여 용접부재에 발생하는 용접 잔류응력 및 용접변형을 정량화하는 연구^{2~4)}가 많이 이루어지고 있다. 그러나, 대부분 단층용접을 대상으로 하는 것으로서 실제 현장에서 사용되는 다층용접에 대한 연구는 드문 실정이다.

본 연구에서는 후판의 맞대기 다층용접에서 루트간격(0, 6, 30mm)이 용접 잔류응력 및 용접변형에 미치는 영향을 상용 유한요소 소프트웨어(MARC)를 이용하여 실험결과와 비교 및 분석을 통해 이를 정량화함으로써 용접 구조물의 설계를 위한 기초 자료를 제공하기 위함이다.

2. 유한요소 해석

구조물의 용접부에는 용접아크에 의해 높은 열이 발생되며 이로 인하여 불균일한 온도분포와 열응력이 발생하고 용접 후에는 비선형 소성변형으로 인한 잔류응력이 존재하게 되는데, 판 두께가 증가하면 다층용접이 이루어져 복잡한 열사이클에 의해 소성변형의 축적과 이완이 반복되어 복잡한 소성변형 및 잔류응력을 갖게 된다. 그러므로 본 연구에서는 용접중에 열전도 해석과 응력해석이 동시에 수행되는 커플링 해석(thermo-mechanical coupling analysis)^{5,6)}을 수행하였다.

2.1 해석영역 및 요소형성

용접문제 해석의 특징은 용융부나 열영향부 등을 모델링하기 위하여 매우 작은 시간증분을 필요로 하기 때문에 막대한 해석시간과 저장용량을 필요로 한다는 것이다. 단층용접일 경우에는 이동열원을 고려하기 위한 3차원 해석이 가능하나 다층용접일 때는 3차원 해석이 불가능하므로 문제를 단순화 하는 것이 중요하다. 그러므로, 본 연구에서는 교량용 후판의 다층 용접시에 발생하는 용접 잔류응력 및 변형을 예측하기 위하여 각 단면은 같은 온도변화를 갖는다는 가정 하에 용접선상에 단위길이를 지니는 수직인 단면을 취하여 2차원 해석을 수행하였다. 다층용접의 경우 잔류 응력의 예측을 위해 평면응력으로 해석할 경우에는 두께방향으로 과도한 응력이 발생하게 되어 실제 현상과 오차가 큰 결과를 나타내므로 두께방향의 변형을 고려하기 위하여 평면 변형률(plain strain) 가정을 이용하였다.²⁾ Fig.1은 해석의 대상인 용접시편의 크기와 용접선상에 수직인 단면의 해석 모델을 나타낸다.

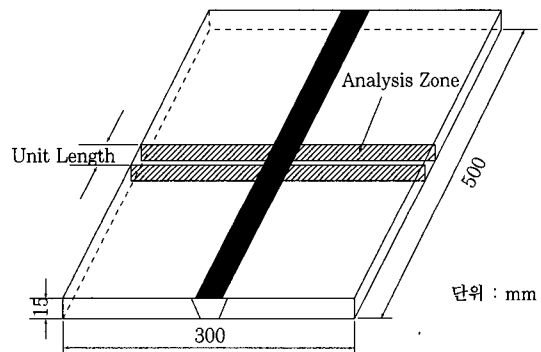


Fig.1 Dimension of weld specimen and analysis zone

요소분할(mesh generation)은 국부적인 입열에 의해 온도구배가 심한 용접부 주변에는 보다 미세하게 분할 하였으며 용융부와 열영향부에서 멀어질수록 해석시간을 단축하기 위해 요소의 크기를 증가시켰다. Fig. 2는 각 용접시편에 대한 이러한 요소의 형상, 구속조건과 해석 결과를 도출해낸 절점의 번호를 나타낸다. 해석영역에 대한 요소망은 일반적으로 2차원 해석시 사용되는 4개의 절점을 가진 사각형요소(4-node quadrilateral element)를 이용하여 구성하였다. 그리고, 변형 해석의 정확성을 높이기 위해 초층 용접시에는 나머지 층부위의 요소는 없는 것과 같이 작용하는, 즉 비활성화된 요소(deactivated element)로 선정 하였고 두번째 층 용접시에는 먼저 용접된 초층부 위와 두번째 층의 요소는 활성화 되고 나머지

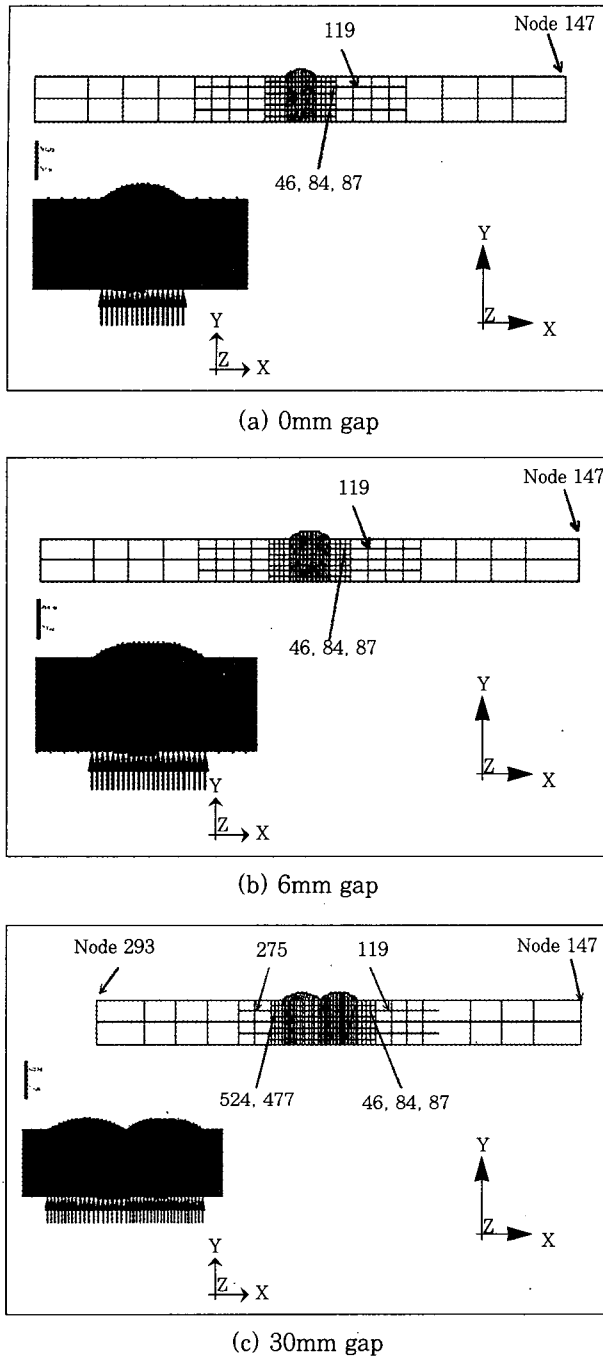


Fig. 2 Mesh generation, node numbers and constraint conditions

Distance from surface of the weld : 4 (mm)
 Distance from fusion line of the node 46, 84, 87, 119, 147 : 2, 5, 8, 24, 140(mm)
 Distance from fusion line of the node 477, 524, 275, 293 : 2, 8, 20, 118(mm)

층 부위의 요소는 비활성화된 요소가 되는 형태의 해석 기법을 사용하였다. 특히, 루트간격이 30mm인 경우 좌측 강판에 24mm만큼 더하여 육성 용접할 때 우측 강판과 연결되는 요소를 비활성화시킨 후 6mm의 본 용접이 이루어질 때 활성화 시켜 해석을

수행하였다.

2.2 해석에 필요한 경계조건

온도분포 해석시 필요한 경계조건으로 먼저 초기에 주어지는 모든 절점에서의 온도를 대기의 온도와 동일하게 20℃로 하였고, 용접부는 가열 및 급냉의 복잡한 열 이력을 겪게 되므로 이를 해석하기 위해서는 온도에 따른 재료의 물성변화를 고려하여 재료의 기계적 성질인 열팽창 계수와 탄성계수 및 항복응력, 그리고 재료의 열적성질인 비열을 온도에 따른 함수로서 입력하였다. 또한, 열전도과정을 위해 열전달 계수를 온도에 따른 함수로서 입력하였다. 열손실은 주로 대류와 복사에 의해 지배되는 것으로 간주하였으며 열대류 계수를 온도에 따른 함수로서 입력하였고 열전달 해석시 고상과 액상의 상변화에 의한 잠열(latent heat)에 대한 효과⁷⁾도 고려하였다. 그리고, 열전달과 응력 해석시 재료는 등방성이며, 재료의 항복거동은 폰미세스(von-mises)의 항복조건을 적용하였다.

기계적 해석시 필요한 경계조건은 루트간격이 없는 경우와 6mm 루트간격인 경우는 좌우 대칭성을 고려하여 하판 중앙부분의 절점은 완전히 구속하였고, 실제 용접시 피용접재를 강판 또는 세라믹판 위에다 올려놓고 용접하기 때문에 접촉되는 부분의 절점은 두께 방향으로의 변위를 구속하였다. 그리고, 루트간격이 없는 경우는 3 패스(pass) 용접후 백가우징(backgouging)한 다음 마지막 용접이 이루어지기 때문에 마지막 패스 용접시에는 상판 중앙부의 절점을 구속하였다. 마지막으로, 24 mm 육성후 6mm 용접의 경우는 하판에서 육성부와 용접부의 중앙부분 절점을 완전히 구속하고 하판에서 강판과 접촉되는 부분은 역시 두께 방향으로의 변위를 구속하였다.

2.3 입열 모델(Heat Input Model)

아크로부터의 열입력을 정확히 모델링하는 것은 상당히 중요한 작업이다. 왜냐하면, 이러한 열입력 모델은 직접적으로 온도분포와 냉각율, 용융부의 크기, 열영향부의 크기 등에 영향을 미쳐 결과적으로 용접부 조직과 강도에 까지 영향을 미치기 때문이다. 용접 잔류응력과 용접변형 해석을 위해 많이 사용되는 입열 모델에는 크게 램프(ramp) 열입력 모델과 럼프패스 모델(lumped pass model)의 두가지가 있다. 램프 열입력 모델은 용융부 부근의 급열에 의한 순간적인 온도상승으로 인해 그 영역에서의 수치적인 해의 수렴이 어려워 지는 문제를 피하기 위해, 또한 2차원 평면

해석에서 3차원 해석과 같이 이동하는 열원의 효과를 나타내기 위해 개발된 모델이다.

그리고, 램프패스 모델은 후판의 다층용접 해석에 있어서 계산의 시간 및 비용을 감소 시키기 위해 개발된 모델이다. 이러한 램프패스 모델은 용접 잔류응력의 예측에는 유용하나 용접변형의 예측에는 다소 문제가 있다. 왜냐하면, 용접부의 중심축에 대하여 대칭일 경우에는 용접변형 해석 결과에 정확성이 있으나 비대칭일 경우에는 그 정확성이 떨어지기 때문이다.⁸⁻¹⁰⁾ 즉, 더블 V형(X형) 개선과 같이 모델이 대칭인 경우에는 관계없으나 본 연구에서와 같이 각층의 용접이 진행되면서 비드가 누적될 때 용접부의 중심축에 대하여 대칭이 아닌 싱글 V형개선인 경우에는 그 정확성이 떨어진다. 특히, 본 연구의 30mm 루트간격 시편과 같이 패스수가 많은 경우에는 그 정도가 심하다고 할 수 있다.

그러므로, 본 연구에서는 램프 열입력 모델을 사용하되 계산 비용 및 시간을 줄이기 위해 다음과 같은 열입력 모델을 사용하였다. 우선 국부적인 고입열과 급냉으로 인해 온도구배가 크게 형성되는 시간영역은 유한요소 해석에서 시간 증분(time increment)을 작게 주어 해석의 정확성을 높였고, 급격한 온도구배를 벗어난 시간영역 부터는 시간 증분을 크게하여 계산시간을 절약하는 형태의 입열 모델을 사용하였다. 그리고, 해석상의 수렴성을 좋게하기 위해 램프비를 100%로 하였는데, 이로 인해 발생하는 실제의 총 용접시간(냉각시간을 포함)과 해석상의 총 용접시간의 차이를 구하여 해석결과에서 이를 고려하여 고찰할 수 있도록 하였다. Fig.3은 이러한 램프비가 100%인 입열의 모델을 나타낸다.

즉, 다층용접의 경우 층간온도가 유지되므로 실제의 총 용접시간은 각층의 용접시간에다 규정상 각층의 층간 온도까지 냉각되기를 기다리는 시간을 더해줘야 한다. 그런데, 해석상의 수렴성을 증가시키기 위해 램

프비를 증가시키면 용접시간이 길어지는 형태이므로 이러한 실제의 총 용접시간보다 해석상의 총 용접시간은 증가하게 된다. 그러므로, 해석결과를 고찰할 때 이러한 시간의 차이를 고려하여야 한다.

Table 1은 각 시편에 대해 용접이 시작되어 상온까지 냉각될 때까지의 이러한 실제 총 용접시간과 해석상의 시간을 비교하여 나타낸 것이다. 0mm와 6mm 루트간격 시편의 경우 램프비가 100% 즉 입열시간이 실제 입열시간의 2배가 됨으로 인해 해석상의 전체적인 용접시간이 실 용접시간의 2배 정도가 됨을 알 수 있고, 30mm 간격의 경우는 좌·우 비대칭이며 용접패스의 수가 많아 해석시간이 앞의 두 경우 보다 조금 더 소요됨을 알 수 있다.

Table 1. Comparison between analytic and real welding time

Root Gap	Analytic Time (sec)	Real Time (sec)	R.T/A.T(%)
0 mm	17120	8560	50%
6 mm	18830	9415	50%
30 mm	60160	24064	40%

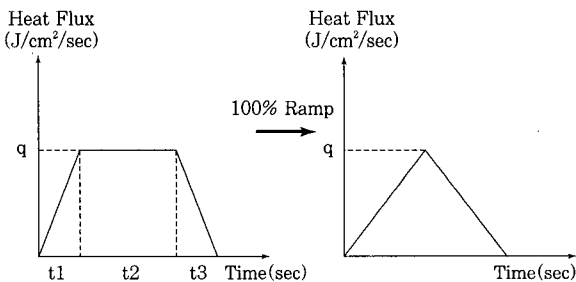
해석상의 입열량은 2차원 해석이므로 표면 입열(surface flux)을 적용하여 다음과 같이 계산 하였다.

$$Q = \eta EI / bL \tag{2}$$

여기서, η 는 아크 효율로서 0.8, E는 아크 전압(volts), I는 아크 전류(amperes), b는 용접 비드의 폭이고(cm), L은 입열 영역의 용접방향으로의 길이로서 2차원 해석에서는 단위 길이이다. Table 2, 3, 4는 각 시편의 각 패스에 대한 용접조건 및 식(2)에 의해 계산한 입열량을 나타낸 것이다.

3. 실험방법

용접 시편은 300×500×15mm(2W×L×h)의 치수로 V형 groove를 60°의 각도로 형성하여 규격상의 루트간격 0 및 6mm와 제작 과정상 발생하는 30mm인 경우에 대해 맞대기 다층용접으로 제작하였다. 용접은 구속이 없는 상태에서 실시되었으며, 용접 동안의 열사이클을 측정하기 위해 좌·우 대칭형인 0mm, 6mm 및 30mm 루트간격의 시편에 Fig.2의 절점 84번(용융라인으로부터 5mm 떨어진 위치)의 위치에 열전대(thermocouple)를 설치하여 각각 첫패스시의 용접 열사이클을 측정하였다. 그리고, 잔류응력은 용접



t1 : initial ramp time
 t2 : maximum ramp time
 t3 : decayed ramp time
 t1 + t2 : actual heat scanning time during welding
 ramp time percentage = 100t1 / (t2 + t3)

Fig.3 Shape of ramp heat input function

Table 2. Welding condition and heat flux of 0mm root gap specimen.

Pass No.	Ampere	Volt	Inter Temp' (°C)	$\eta EI(J)$	Total width of deposited bead elements(cm)	Surface flux (J/cm ² .sec)
1	220	26	Amb.	4576	1.14	4014
2	230	27	94	4968	1.8	2760
3	210	27	66	4536	2	2268
	Backgouging					
4	190	26	45	3952	1.2	3293

Table 3. Welding condition and heat flux of 6mm root gap specimen.

Pass No.	Ampere	Volt	Inter Temp' (°C)	$\eta EI(J)$	Total width of deposited bead elements(cm)	Surface flux (J/cm ² .sec)
1	210	26	Amb.	4368	1.25	3494
2	230	27	114	4968	1.9	2614
3	230	29	111	5336	2.3	2320
4	210	30	42	5040	2.6	1938

후 3개의 로젯형의 스트레인 게이지(strain-gage of rosette-type)를 설치하여 ASTM E837의 홀 드릴링 스트레인 게이지(hole drilling strain gage)방법을 이용하여 측정하였다. 마지막으로 각 시편의 두께방향의 용접변형은 다이얼 게이지를 이용하여 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 열사이클 분석

Fig.4는 열전달 해석에 의한 각 시편의 용접시 표면으로부터 4mm 떨어진 위치에서 용융 라인으로부터 폭 방향으로 떨어져 있는 각 지점에서 열사이클을 나타낸 것이다. Fig.4(a)와 (b)는 루트 간격이 없는 시편과 6mm루트간격의 경우이고 Fig.4(c)와 (d)는 30mm 루트간격 시편의 육성부쪽과 본용접쪽의 열사이클이다. 각각의 열사이클에서 가장 높은 피크온도를 나타내는 부분은 표면에서 두께 방향으로 4mm 떨어진 지점에서 용접패스가 이루어질 때의 용융부에 가장 가까운 지점이기 때문이다. 그리고, Fig.5는 각 시편의 열전대 설치 위치(각시편의 절점번호 84번)에서 0mm 및 6mm 루트간격 시편의 경우 첫 패스시의 온도 사이클을 30mm 루트간격 시편의 경우 육성용접이 끝난 후 본 용접의 첫패스시의 온도 사이클을 측정 한 결과와 해석상의 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 해석상의 온도 사이클이 실험치 보다 다소 오른쪽으로 치우쳐 있으며 피크온도가 다소 높음을 알 수 있다. 이는 해석상의 입열 모델에서 Fig.2와 같은 100% 램프

를 적용하였기 때문에 실제 용접보다 용접시간이 길어 지는 형태가 되기 때문이다. 그러나, 전체적인 온도 사이클의 형상은 유사함을 알 수 있다.

갭이 없는 경우는 평형온도(용접부의 다양한 위치의 온도 차이가 냉각과정에서 0가 되는 온도)가 0mm 루트간격이 47°C정도이고, 6mm 루트간격의 경우는 48°C 정도이다. 이 두 경우는 용접 패스의 수는 동일하며 단위길이당 입열량은 6mm 루트간격의 경우가 다소 많으나 입열이 되는 시간이 0mm 루트간격이 길어 전체적인 입열량은 두 시편의 경우가 거의 동일하므로 평형온도는 큰 차이가 나지 않고 있음을 알 수 있다. 그러나 Fig. 4(a)와 (b)에서 제시하는 바와 같이 0mm 와 6mm 루트간격에서 열사이클의 비교에서 알 수 있듯이 평형온도에 도달하는데 6mm의 경우가 다소의 시간이 더 지체됨을 알 수 있다. 결과적으로 이러한 온도분포의 결과로서 잔류하는 최고응력의 값도 두 시편의 경우 유사할 것이라는 것을 예측할 수 있다.

Fig.4(c)와 (d)에 나타난 30mm 루트간격 시편의 경우 육성 용접 후, 본 용접이 들어가기 직전의 온도가 62°C 정도를 나타내고 있으며 이때의 오른쪽 강판에는 열이 전달되지 않은 상태 즉, 요소가 비활성화 되어 있는 상태이기 때문에 온도는 주위온도를 유지하고 있다. 그리고, 본 용접이 실시된 후 도달한 평형온도는 40°C정도이다. 30mm 루트간격의 경우는 용접 패스의 수가 가장 많아 용접시간이 길고 입열량도 가장 많으나 육성용접시에는 우측 강판이 없이 좌측 강판에만 열이 전달되며 본용접시에는 우측 강판으로 열이 급격히 전달되는 비대칭 형태의 열전달이 발생한다. Fig.

Table 4. Welding condition and heat of 30mm root gap specimen.

Pass No.	Ampere	Volt	Inter. Temp	$\eta EI(J)$	Total width of deposited bead elements(cm)	Surface flux (J/cm ² .sec)
1	180	26	Amb.	3744	1.476	2536
2	180	27	123	3888	0.94	4136
3	200	27	72	4320	1.258	3434
4	200	27	89	4320	1.14	3789
5	200	27	120	4320	1.35	3200
6	200	27	128	4320	1.05	4114
7	200	26	133	4160	2.4	1733
8	200	26	87	4160	2.6	1600
	Grinding					
9	180	26	68	3744	1.04	3600
10	210	28	162	4704	0.733	6417
11	220	28	135	4928	0.733	6723
12	220	28	75	4704	0.95	5187
13	210	28	63	4704	0.95	4951
14	210	28	110	4704	1.17	4020
15	210	28	120	4704	1.17	4020
16	210	28	60	4704	1.2	3920
17	210	28	103	4704	1.2	3920

4(c)와 (d)에서 보듯이 상당량의 입열에 의해 평형온도에 도달하는데 규격내의 두 시편의 경우보다 많은 시간이 지체된 결과 다소 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다. 평형온도가 낮다는 것은 용접 후의 냉각속도가 빠르다는 것을 의미한다. 이와같이, 냉각속도가 빨라지면 잔류하는 응력의 최고치가 높아지게 되는데 이는 잔류응력의 해석에서 확인할 수 있었다.

4.2 잔류응력 분석

Fig.6은 용접후 상온까지 냉각후 각 시편에 잔류하는 폰미세스 상당응력을 나타낸 것이다. 전체적으로 실험에 의한 측정치와 해석 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 0mm 및 6mm 루트간격 시편의 경우 잔류하는 상당응력의 최대값은 307MPa 정도로 동일하며 시편의 중앙부에 집중되어 좌우 대칭형태로 나타나고 있음을 알 수 있다. 그런데, 6mm 루트간격 시편의 경우 루트간격이 없는 시편보다 용착부가 크기 때문에 최대 잔류응력이 존재하는 영역이 다소 넓게 나타나고 있고 백가우징 공정이 없기 때문에 용융부에서 떨어진 영역의 잔류응력이 루트간격이 없는 시편보다 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 30mm 루트간격 시편의 경우는 육성 용접시에 좌측의 강판에만 열이 전달되기 때문에 본 용접이 행하여질 때 이미 좌측 강

판에는 육성 용접으로 인해 입열이 되어 있는 상태로 잔류응력이 존재하고 있으며, 이로 인해 본 용접이 수행될 시 좌·우측으로 동일한 열량이 전달되는 것이 아니라 온도가 상온상태로서 낮은 우측 강판으로 많은 열이 전달되기 때문에 최종 용접후에는 Fig.6(b)와 같이 잔류응력이 좌우대칭이 아니라 육성 용접부쪽으로 높은 잔류응력이 치우쳐서 나타나고 있다. 그리고, 최종 평형온도가 규격내의 루트간격 시편보다 다소 낮아 잔류하는 최고 잔류응력의 값이 규격내 시편보다 다소 높게 나타나고 있으며 높은 잔류응력이 육성 용접부 쪽으로 치우쳐 있어 동적강도면에서 상당히 불리할 것으로 판단된다.

4.3 용접변형 분석

Fig.7은 용접 후 냉각이 완료된 상태에서 각 시편의 두께 방향(y방향) 변형을 나타낸 것으로 실험치와 해석치가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig.7(a)는 규격내의 두 시편의 용접변형을 나타낸 것인데 좌우대칭 형태로 나타나고 있다. 루트간격이 없는 시편의 경우 백가우징 후 마지막 패스가 하표면측에 이루어짐으로 인해 각변형에 있어서 약간의 처짐이 발생하고 있으나 그 양은 아주 미소함을 알 수 있다. 6mm루트간격 시편의 경우는 이러한 백가우징 공정이 다층용접

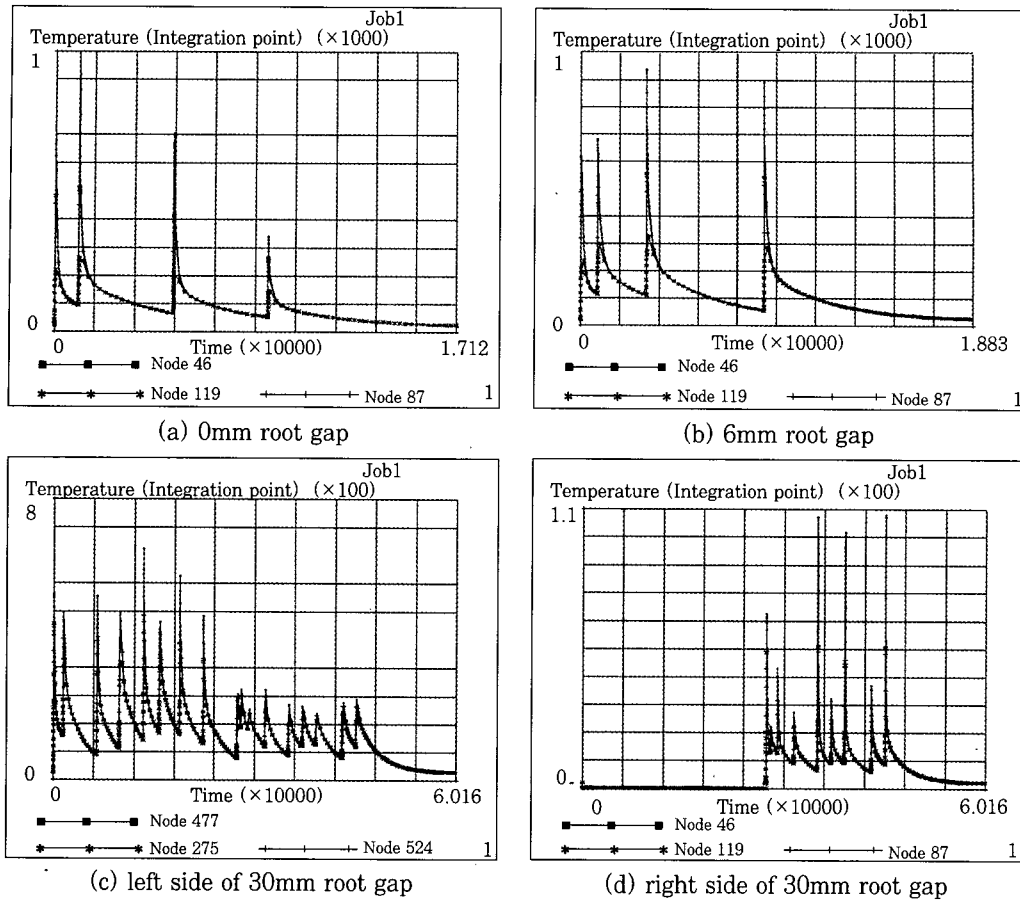


Fig.4 Thermal cycles at various locations of each weld specimen by analysis.

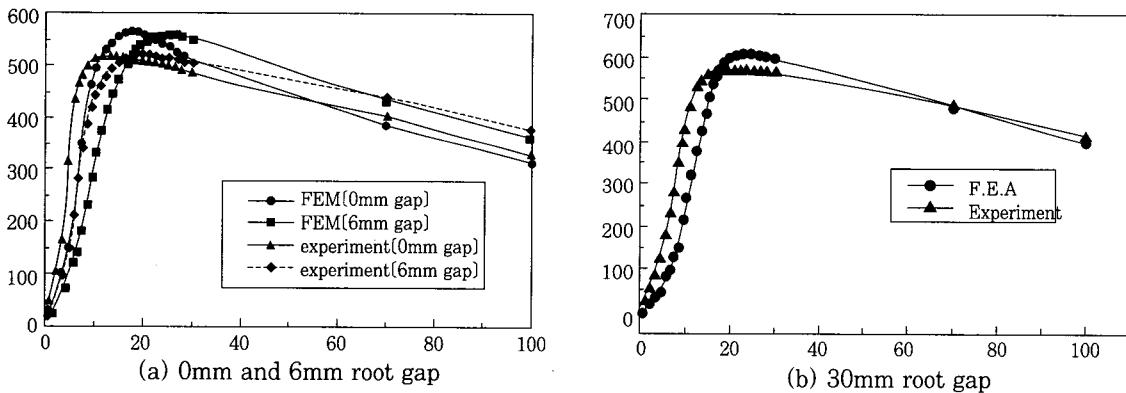
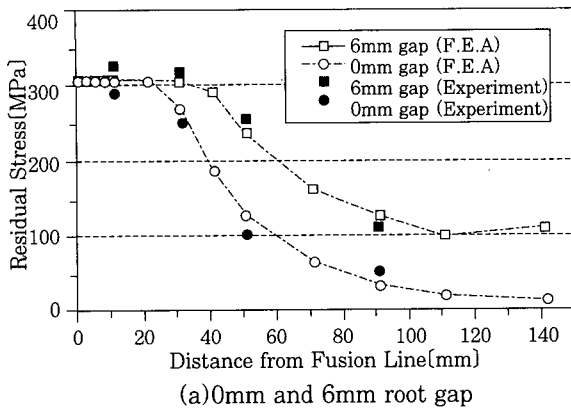


Fig.5 Thermal cycles at 84 node of each weld specimen by analysis and experiment.

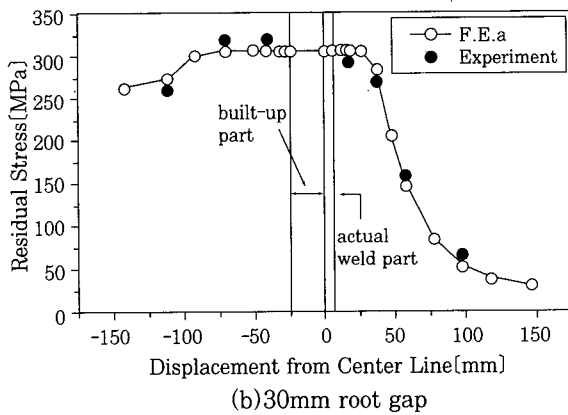
이 이루어져 맞대기 용접에서 나타나는 일반적인 형태의 각 변형이 발생하고는 있으나 그 양은 1mm이하로 작게 나타나고 있다. Fig.7(b)는 30mm루트간격 시편의 경우인데 가장 큰 특징은 용접변형의 형태가 규격내의 시편과는 달리 시편의 좌·우측의 변형거동이 완전히 상반되게 나타난다는 것이다. 즉, 시편의 좌측인 육성 용접부 쪽은 육성 용접시 좌측 강판으로만 열이 전달되어 육성용접 후 본 용접이 들어가기 전에 이미 상당량의 각변형이 발생한 상태이다. 본 용접이 이루어질 때, 좌측부(육성용접부)는 온도가 상온보다 높

은 상태이므로 본용접시에 열은 우측으로 치우쳐 퍼져 나가기 때문에 비대칭형태의 열전달이 이루어진다. 이로 인해 Fig. 8의 우측강판의 가장자리(절점147)에서 보여지는 바와 같이 우측강판에 입열이 이루어 질 당시에 상당히 큰 변위가 발생하여 루트갭이 0mm나 6mm에 비해 변형정도가 심하며, 우측강판에 후속 용접이 이루어지고 나서도 상당한 처짐(음의 각변형)이 발생하게 되는 것이다.

이러한 용접변형의 이력을 확인하기 위해 Fig.8에 전 용접시간에 대한 각 시편의 상표면 끝단(절점번호



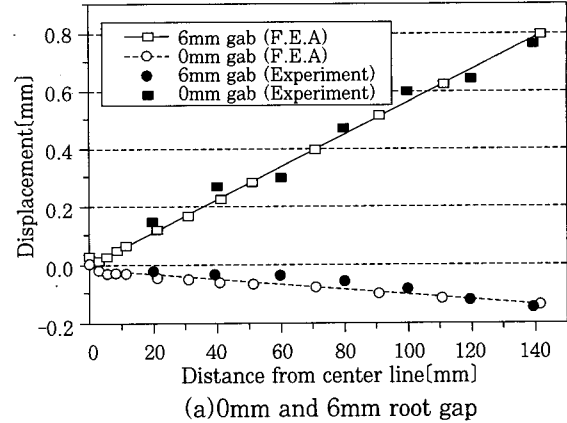
(a) 0mm and 6mm root gap



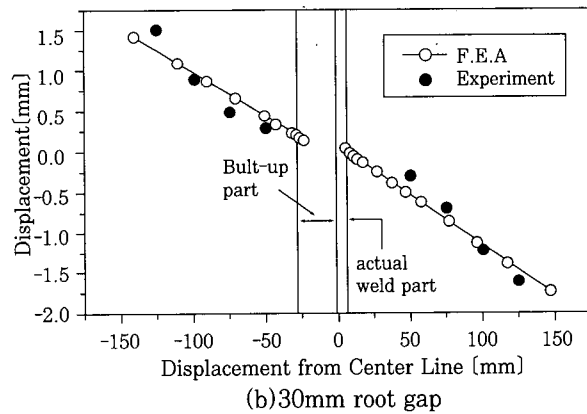
(b) 30mm root gap

Fig.6 Residual stress distribution obtained by analysis and experiment.

147)에서의 두께방향(y방향) 및 폭방향(x방향)의 변위 해석결과를 나타내었다. 여기서 수평축은 시간이며, 수직축은 두께 방향 및 폭 방향 변위(cm)를 나타낸다. Fig.8(a)의 루트간격이 없는 경우 폭방향 변위에서는 각 패스마다 팽창과 수축을 반복하다 백가우징 후 마지막 패스의 입열량이 적어 팽창량이 다소 적게 나타나 최종적으로 거의 0에 근접하고 있다. 두께 방향 변위에서는 백가우징 후 마지막 패스의 입열이 하표면에 이루어짐으로 인해 순간적으로 들림이 발생하였다가 냉각되면서 처짐을 나타내어 각변형이 0에 근접하고 있으나 약간의 음의 방향 변위를 나타내고 있다. 이러한 사실로서 마지막 입열의 양이 용접의 각변형 측면에서는 다소 적음을 알 수 있다. Fig.8(b)의 6mm 루트간격을 보면 마지막 패스에서 두께방향 변위가 크게 나타남을 확인할 수 있는데 이로서 마지막 패스의 입열량이 다소 크다는 사실을 확인할 수 있다. Fig.8(c)의 30mm 루트간격 시편의 경우는 용접변형의 거동이 좌·우 비대칭 형태이기 때문에 상표면의 좌·우 끝단(절점번호 293,147)에서의 용접변형을 함께 나타내었다. 두께방향 변위를 보면 좌측 강판(절점번호 293)의 경우는 육성용접시에 발생한 변형이 본 용접시에도 크게 변화가 없이 최종 상태까지 유지



(a) 0mm and 6mm root gap



(b) 30mm root gap

Fig.7 Displacement through thickness direction by analysis and experiment.

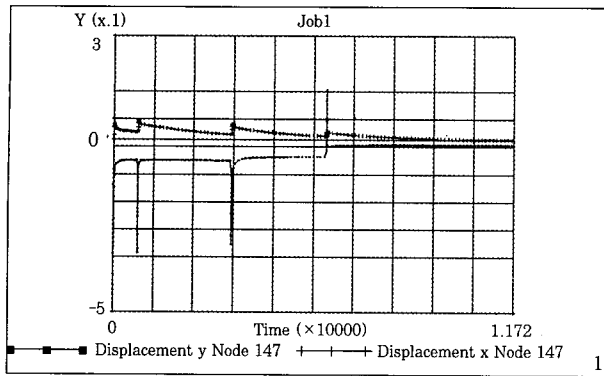
되고 있으며 우측 강판(절점번호147)의 경우는 육성 용접 동안에는 변형이 0으로 유지되다가 본 용접이 시작되면서 급격한 변형을 나타내고 있는데 특히 본 용접의 첫패스에서 상당히 큰 변형이 발생하고 있고 위에서 설명한 좌·우 비대칭 형태의 열전달로 인해 최종적으로 처지는 형태의 각변형이 나타나고 있다.

이와같이 다층용접에 있어서 유한요소 해석을 통하여 시간에 대한 각패스 용접변형의 이력을 알아냄으로서 최종적으로 용접변형을 줄이기 위한 각 패스의 용접조건 등을 설정하는데에 이용할 수 있을것으로 판단된다.

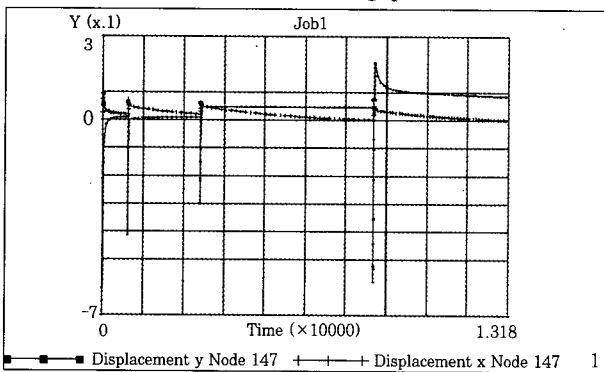
5. 결 론

용접부 루트간격이 용접잔류응력 및 용접변형에 미치는 영향을 조사하기 위해 유한요소법을 이용하여 다층 용접 공정을 해석함으로써 얻어진 결과와 실험적인 측정에 의한 데이터와의 비교를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

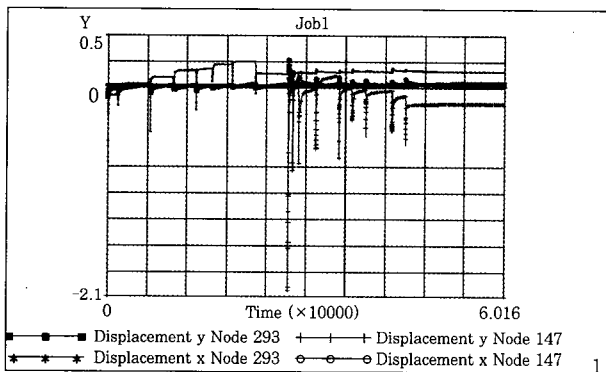
1. 열사이클 및 용접 잔류응력 분석 결과 규격내의 루트간격 시편은 용접 후의 평형온도가 거의 동일하여 잔류하는 최고응력의 값이 비슷하였으며 좌·우 대칭 형태의 분포를 나타내었으나, 규격에서 벗어나는



(a) 0mm root gap



(b) 6mm root gap



(c) 30mm root gap

Fig.8 Variation of displacement with time for each weld specimen

30mm 루트간격 시편의 경우는 잔류응력의 최대값은 다소 낮았으나 육성용접 공정으로 인해 잔류응력의 분포가 좌·우 비대칭 형태로 나타나며 육성 용접부 쪽으로 높은 잔류응력이 치우쳐서 존재함으로 인해 동적 강도에 있어 상당히 불리함을 알 수 있었다.

2. 용접변형 분석 결과 루트간격이 없는 시편은 백가우징 후 마지막 패스용접이 강판의 하 표면 측에서 이루어짐으로 인해 두께 방향 변형에 있어서 약간의 처짐이 발생하였고, 6mm 루트간격의 경우는 이러한 백가우징 공정이 없으므로 들림이 발생하였으나 변형의 크기가 크지 않아 규격내 루트간격 시편의 용접변형은 큰 문제가 되지 않는 수준이나, 30mm루트간격의 경

우는 육성 용접부쪽은 들림이 발생하고 반대편은 처짐이 발생하는 좌·우 비대칭 형태의 각변형을 나타내었으며 그 크기도 규격내 시편보다 크게 발생하였다.

3. 루트간격이 다른 후판의 다층용접의 유한요소 해석을 통하여 열사이클에 의한 온도분포 획득, 잔류응력의 분포범위 파악 및 용접변형의 시간에 대한 이력을 알아냄으로서 각 패스의 적절한 용접조건을 설정할 수 있을 것으로 판단되며, 이를 통해 다층용접 구조물의 제작시 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

1. 삼성중공업 용접시공서(WPS).
2. 심용래, "유한요소법을 이용한 용접부의 잔류응력, 변형 및 파괴 해석", 대한용접학회지, 1997, 제15권, 제1호, p.15-25.
3. 서승일, 장창두, "용접 구조물의 변형 예측에 관한 연구", 대한용접학회지, 1997, 제15권, 제5호, p.64-73.
4. 양영수, 이세환, 위창욱, 조수형, "필렛 용접부의 각변형량 예측에 관한 연구", 대한용접학회지, 1997, 제15권, 제4호, p.63-69.
5. H.D. Hibbitt, P.V. Marcal, "A numerical thermo-mechanical model for the welding", Computer and Structures, 3(11), 1973, 1145-1147.
6. E. Friedman, "Thermomechanical analysis of the welding process using finite element method", Journal Press. Vessel Tech. ASME, series J, 1975, p.206-243.
7. K.W. Mahin, W. Winter, T.M. Holden, "Prediction and Measurement of Residual Elastic Strain Distribution in Gas Tungsten Arc Welds.", AWS, September, 1991, pp.245s-260s.
8. 심용래, 이성근, "용접 잔류응력 해석을 위한 Heat Input Model 개발", 대한용접학회지, 제11권, 3호, 1993, pp.110-123.
9. Y. SHIM, Z. FENG, "Determination of Residual Stress in Thick-section Weldments", Welding journal, 1992, 9, pp.305-312.
10. J. A. Free, Peter Goff, R. F. D., "Predicting Residual Stress in Multipass Weldments with the Finite Element Method", Computer & Structures, 32(2), 1989, pp.365-378.