후판 다층 용접부의 잔류응력 해석에 관한 연구

(Modeling of Residual Stress in Thick Section Weldments)

이 성근 (대우조선공업(주))

심 용래 (Ohio 주립대, U.S.A)

1. 서 론

각종 구조물의 주요 부위(Primary Structures)에 흔히 적용되는 후판 다층 용접부에는 복잡한 형상의 3차원 잔류응력장이 형성되게 되며, 이러한 응력 분포는 구조물의 피로 및 취성파괴, Lamellar Tearing 발생 등에 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다. 이에따라 용접 구조물에 대한 종합적인 안정성 평가를 위해서는 내재된 잔류응력의 정확한 예측이 무엇보다도 중요한 선결 과제가 될 수 있다.

일반적으로 용접부 해석을 위해서는 비선형 열 탄소성(Thermo-elastic-plastic) 모델을 사용해야 하고, 또한 순간적인 온도변화에 따른 물리적 거동을 반복적으로 계산 해야 하기 때문에 과도한 Computer 처리시간 및 Memory 용량을 필요로 한다. 따라서 그동안 대부분의 연구가 Bead-on-plate 나 혹은 Fillet 용접부와 같은 비교적 단순한 용접구조에 대한 해석에 한정되어 왔고, 후판 다층 용접부에 대한 해석기법 개발은 매우 제한적으로 수행되어 왔다.

본 연구에서는 50mm 두께까지의 평판다층 용접부에 대한 열적 거동 및 응력해석을 위하여 보다 경제적이고, 효율적인 유한 요소 Modeling 기법을 제시하였고, 이 모델의 유효성을 평가하기 위하여 동일 시편에 대한 용접부 온도분포와 잔류응력 측정 실험을 실시한 후 이론적 결과와 비교해 보았다.

2. 해석 모델

우선 준정상상태(Quasi-Stationary)의 열적거동 및 용접부 양 끝단(Transient Zone)을 제외한 구간에서의 일정한 응력분포를 가정하여 2차원 모델을 설정하고, 용접선에 대해 대칭되는 응력분포를 가정하여 한쪽면 만을 Modeling 하였다. 이러한 가정

들에 대한 실효성을 평가해 보기 위하여 여러 변수들에 대한 Parametric Study와 실험이 실시되었다.

이상과 같이 준비된 2차원 모델을 대상으로 ABAQUS FEM Package를 사용하여 용접부 온도분포를 구하고, 이 결과로 부터 후속적으로 열응력 및 잔류 응력 계산을 실시하였다. 대부분의 물리적, 기계적 물성치는 온도의 함수로 주어졌으며, 이 외에 입열량, 층간 유지시간 및 구속조건 등과 같은 외부적 조건들은 실험 중에 사용 되었던 Data와 일치하도록 하였다.

<u>용접부 Heat Input Model</u> : 아크 에너지로 주어지는 용접부 열원에 대한 적절한 Modeling 기법을 찾고자, 열원분포 및 Cycle, Heat Flux의 종류 등과 같은 변수들에 대해 Sensitivity Check를 수행하였다. 이차원 모델에서의 이동 열원의 영향을 고려해 주고 또한 Model Convergence를 개선시키기 위하여 Heat Flux가 용접시간에 따라 변하는 특정한 Ramp Heat Input Function (Fig.1)을 제안하였다. 다층용접 해석시 과도하게 소요되는 계산시간을 줄이기 위하여, 다수의 개별적인 용접 Pass에 의한 입열을 한개의 대입열 Pass로 조합하는 Lumped Model 기법을 도입하고, 여러가지 유형 중 Fig.2 와 같은 조합방법이 가장 적절함을 확인하였다.

<u>잔류응력 해석 모델</u> : 이차원 모델의 두께방향에 해당하는 용접선 길이 방향의 Strain이 존재할 수 있도록 Generalized Plane Strain 모델을 이용하여 응력계산을 실시하였고, 기존의 후판 용접부에 주로 사용되어 온 Plane Strain 모델과 실험결과 와의 비교를 통하여 그 유효성을 평가 해 보았다.

3. 실험결과 및 고찰

50mm 두께의 ASTM A36 연강을 사용하여 다층 평판 용접부에 대한 온도분포 및 잔류응력 측정 실험을 실시하였다. Table 1과 같이 Double-V 개선을 적용하였으며, 자동 GMAW Process에 의해 총 38 Pass의 용접이 실시되었다. 온도측정은 ANSI Type-K Thermocouple을 사용하였고, 잔류응력 측정을 위해서는 Blind Hole Drilling 방법이 사용되었다.

Fig.3은 실험 및 해석모델에 의해 얻어진 다층용접부의 잔류응력 분포를 보여주고 있다. 용접부 및 열영향부에서 항복응력을 다소 상회하는 인장 응력을 보이고 있

으며, 그 다음 구간에서는 압축응력을 나타내고 있는데, 이는 전형적인 용접잔류응력 분포와 잘 일치하는 것임을 알 수 있다.

전체 38 Pass를 14 Pass, 10 Pass로 축소한 Lumped Model의 경우 모든 Pass를 개별적으로 처리한 모델의 결과와 잘 일치할 뿐 아니라, 실험결과와도 유사한 응력분포를 보이고 있다. 이는 개별 Pass에 의한 응력 중첩현상이 Lumped Model에 의해 유사하게 재현되고 있음을 보여주고 있으며, 아울러 대부분의 잔류응력이 약 600 C 이하에서 생성되기 때문에 Lumped Model에서 나타나는 넓은 고온 영역이 최종적인 잔류응력 분포에는 영향을 미치지 않는다는 점도 보여주고 있다.

4. 결 론

다층 평판 용접부 응력해석을 위하여 개발된 2차원 모델에 대해 Ramp Heat Input, Lumped Pass 및 Generalized Plane Strain 등의 Modeling 기법들을 사용함으로써, 정확도 향상 뿐만 아니라 상당 수준의 계산시간 단축 효과를 얻을 수 있었다.

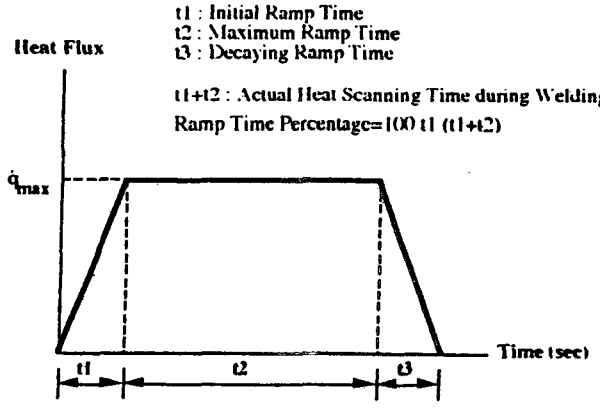
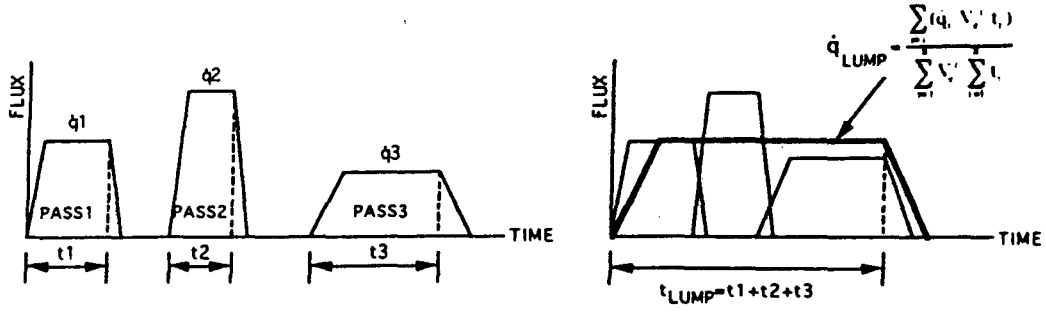


Fig.1 Shape of the ramp heat input function

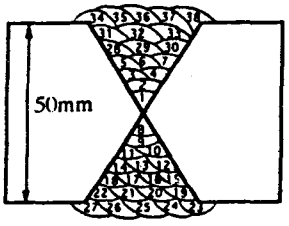


(a) Ramp functions of welding passes before lumping

(b) Ramp function after lumping

Fig.2 Ramp functions of heat input before and after lumping

Table 1 Configuration of weldment and welding parameters

PASS SEQUENCE	PASS NO.	WELDING PARAMETERS Current(A)	Voltage(V)	Speed(cm/s)
	1-4	250	26.5	20
	5-7	250	26.5	33
	8-9	230	26.5	25
	10-14	240	26.5	33
	19-22	230	26.5	37
	15-18	220	27.0	33
	23-27	230	26.5	30
	28-30	230	26.5	30
	31-38	240	26.5	33

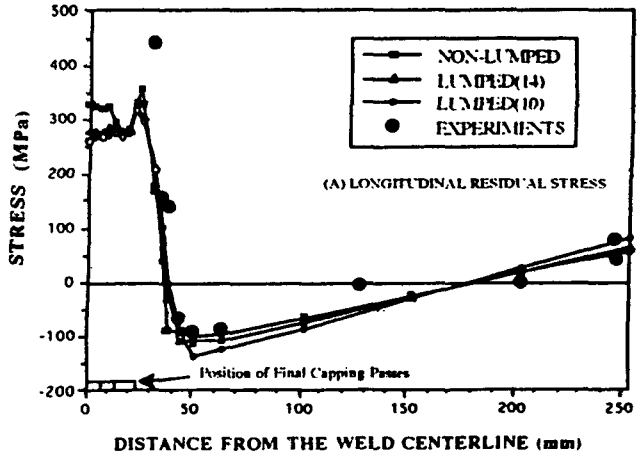


Fig.3 Residual stress distribution at the top surface of a 50mm thick butt welded plate