

유한요소해석을 이용한 Arc 용접부의 온도 분포 예측 표준화

용접강도연구위원회

Standardization for Temperature Distribution Prediction of the Arc Weld using FEA

Commission of Design, Analyses and Structural Strength of Welded Structures

1. 서 론

1990년대부터 고 강도강의 사용이 증가함에 따라 선 체 용접부의 피로 파괴 발생 빈도가 증가하고, 최근 한계 상태(limit state) 즉, 최종 종강도(ultimate longitudinal strength) 평가 시 잔류 응력(residual stress) 및 변형(distortion)등의 initial imperfection을 고려한 설계에 대한 요구가 점차 증가하고 있다. 이러한 잔류응력을 고려한 정·동적 설계는 선박 뿐 아니라, 석유 정제 설비 및 대형 보일러 그리고, 해양 구조물 등 모든 용접 구조물의 설계 및 제작 시 반드시 고려하도록 요구되고 있으며, 이러한 경향은 효율 향상을 위한 사용 및 운전 조건의 가혹화, 그리고 환경 문제 등에 기인하여 점점 더 강화될 것으로 보인다.

지난 1996년부터 IIW(International Institute of Welding)의 Commission X "structural performance of welded joints : fracture avoidance"와 Commission XV "design analysis and fabrication of welded structures"는 joint working group(X/XV-RSDP, residual stress and distortion prediction)을 결성하고, phase 1에서 축 대칭 요소를 이용한 girth 용접부의 잔류 응력 예측에 대한 round-robin test를 수행하였으며, 현재 용접 구조물의 조립 시 잔류 응력 및 변형 측정에 관한 2차 round-robin test를 진행 중인 것으로 알려져 있다. 그러나 IIW round-robin test phase 1에서 참여기관간의 온도 분포 해석 결과에서 큰 차이가 발생하였으며, 이로 인해 최종 잔류 응력 예측 결과에도 큰 차이가 발생하였다¹⁻³⁾. P. Dong 등은 IIW의 round-robin phase 1에서 각 참여기관별 잔류응력의 발생 원인으로 부적절한 입열 모델에 기인한 용접부 온도 분포의 차이와 용접부의 소성 거동 및 용융/재용융에 따른 역학적 고려의 부족을 지적한 바 있다[4]. 이는 용접부의 잔류 응력에 대한 수치 해석을

이용하여 정량적으로 예측하기 위해서는 먼저 용접부의 온도 분포에 대한 표준화가 선행되어야 함을 의미한다.

대한용접학회(KWS) 산하 용접강도연구위원회에서는 유한요소해석을 이용한 용접 잔류 응력 평가 시 평가자에 따른 오차를 가급적 줄이고 신뢰성 높은 결과를 얻기 위한 유한요소해석 방법을 정하기 위한 첫 단계로 위원회 산하 각 기관이 참여하는 아크 용접부 온도 분포 예측을 위한 round-robin을 2003년 4월부터 3차례에 걸쳐 수행하였으며, 각 참여 기관별 해석 결과를 토대로 유한요소해석을 이용한 용접부 온도 분포의 예측을 위한 합리적인 해석 방법에 관한 지침을 제정하였다.

2. Round Robin Test

유한요소해석을 이용한 아크 용접의 온도 분포 예측을 위한 지침서를 마련하기 위하여 본 위원회에서는 총 3회에 걸쳐 4가지 해석 모델에 대하여 round-robin test(이하 RR test)를 수행하였으며, 본 고에서는 3차 RR test에서 사용된 평가 모델 중 Fig. 1의 FCA(flux cored arc)-SA(submerged arc) 다층 용접부에 대한 내용만을 다루고자 한다. 이는 Fig. 1의 해석 모델의 경우 Table 1과 같이 본 위원회에서 평가한 용접 process를 모두 포함하고 있으며, 다층 용접에 따른 효과를 검토할 수 있는 참고 자료로도 활용이 가능하기 때문이다.

3차 RR test에서는 각 기관에서 온도 분포 해석 시 참여 기관별로 발생할 수 있는 오차를 최소화하기 위해

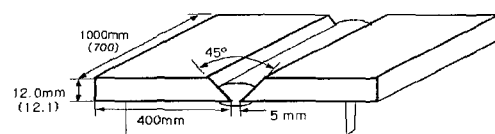


Fig. 1 3차 RR test의 FC-SA 다층 용접부 모델의 형상 주요 치수

Table 1 FC-SA 다층 용접부 모델의 용접 조건

용접 Pass	기법	초기 온도 [°C]	용접 조건		
			전류 [A]	전압 [V]	속도 [mm/min]
1	FCA (Ø1.4)	20	240	27.5	207
2			300	32	300
3	SA (Ø4.8)		350 (700*)	36 (32*)	350 (325*)

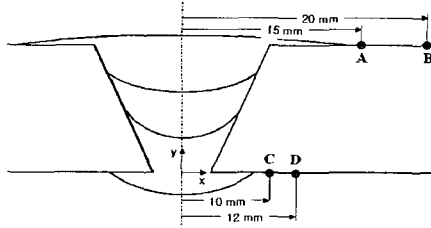


Fig. 2 FC-SA 다층 용접부 모델의 온도 분포 측정 위치

여 Fig. 2에 나타낸 용접부의 각 위치에서 K type 열전대를 이용하여 측정된 온도 분포 결과와 1, 2차 RR test를 통하여 제정된 해석 guide line을 함께 제공하였다.

2.1 해석 Guide Line

1) 요소망

Fig. 1의 해석 모델에 대한 요소망(finite element mesh)은 Fig. 3과 같이 각 용접 pass에 대해 제공된 용접부의 형상 치수를 토대로 각 기관별로 생성하였다. 이때, 용착 금속과 용접부 근방 즉, 열 영향부에서 용접부의 요소 크기는 평균적으로 0.5×0.5mm가 되도록

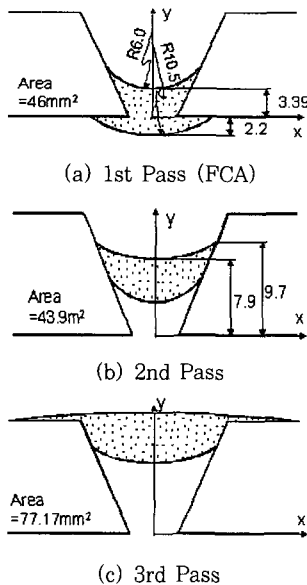


Fig. 3 Model I의 용접부 단면 정보

하였으며, 단계적인 적층을 수행하기 위하여 용착 금속 내의 모든 요소는 생성 후 최초 해석 모델로부터 제거된 후 각 pass에 해당하는 입열이 가해지는 시점에 순차적으로 재 생성되는 기법을 적용하도록 하였다.

2) 용접 열전달 해석 조건

열전달 해석 시 사용된 물리적 상수 및 재료의 열적 특성치의 기준은 Table 2, Fig. 4와 같으며, 대부분의 재료 물성을 참여 기관에서 저 탄소강 또는 연강에 적합한 값을 적용하는 것을 원칙으로 하였다. RR test의 참여 기관별 열적 특성치의 차이는 별도의 조사 결과 미미한 것으로 판별되었다.

3) 수치 계산 조건

용접 개시의 초기 온도는 상온이며, 다층 용접에서 적층에 따른 용접 입열로 인한 해석 모델의 가열 및 냉각에 따른 천이 온도 변화를 정상 상태에 도달하기까지 계산하였다. 여기서 정상 상태는 단위 시간당 온도 변화가 0.005°C/sec보다 작을 때 달성된 것으로 가정하였다.

4) 용접 입열 모델

용접부 단면 2차원 해석 모델에 적용이 가능한 다양한 용접 입열 모델을 참여 기관에서 자율적으로 선택하여

Table 2 열전달 해석 시 사용된 재료 특성 값

모재 및 용접재		Mild Steel
초기 및 층간온도 [°C]		20
물리적 상수	고상 온도 [°C]	1440
	액상 온도 [°C]	1510
	잠열 [J/kg]	264200
열적 특성치	밀도 [kg/m³]	Fig.4 또는 참여 기관 결정
	비열 [J/kg°C]	
	열전도도 [W/m°C]	참여 기관 결정
	대류 열전달 계수 [W/m²°C]	
복사		결정

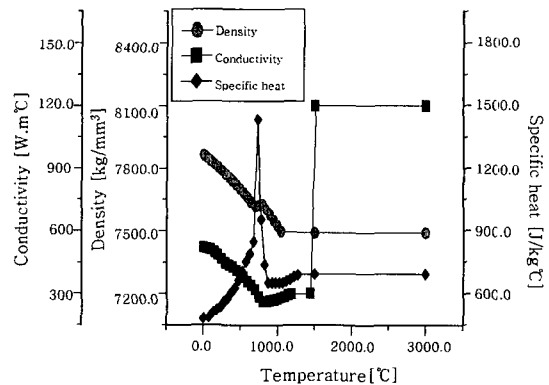


Fig. 4 온도에 따른 연강의 열적 물성치의 거동

사용하도록 제안하였으며, 시간에 따른 열속의 amplitude 변화가 일정 속도를 갖는 이동 용접 열원을 합리적으로 반영하도록 하였다. 각 참여 기관에서 사용한 입열 모델은 다음과 같다.

- ① 균일 분포 체적 열속 (Uniform Body Heat Flux, UBHF)
- ② 균일 분포 표면 열속 (Uniform Surface Heat Flux, USHF)
- ③ 균일 분포 체적 + 표면 열 플럭스 (Combined Uniform Heat Flux, CUHF)
- ④ 가우시안 열 플럭스 모델 (Gaussian distribution of Heat Flux, GHF)

5) 아크 효율

용접 열전달 해석에서 아크 효율(arc efficiency)은 천이 온도 분포의 차이를 유발하는 주 변수중 하나이다. 1, 2차 RR test 결과 준 정상 상태 조건(quasi-steady state condition)과 2차원 해석 모델을 이용한 용접부의 온도 분포 해석 시 용접부의 용융지 형상과 각 위치에서 최고 온도 분포 및 천이 온도 구간 예측시 가정하여 적용한 아크 효율 값이 참여 기관에 따라 상당히 큰 차가 있었으며, 기존의 3차원 해석 및 계측을 통하여 제안된 아크 효율의 타당성에 대한 의문이 제기 되었다. 이는 IIW에서 수행한 용접 잔류 응력 해석을 위한 RR test의 1 단계에서 제기된 문제와 동일하다⁴⁾. 따라서, 3차 RR test에서는 각 용접 기법별 아크 효율의 범위를 Table 3과 같이 제안하였다.

6) 용융지 내의 Stirring 효과

액상의 용착 금속의 유동으로 인한 convection 효과를 고려하고 용융지의 최고 온도가 용착 금속의 기화(vaporization) 온도를 초과하는 것을 방지하기 위하여 재료의 용점 이상의 온도에서 열전달 계수를 가상으로 높여주는 수치 해석상의 기법이 사용된다. 각 참여 기관에서는 용융지 내의 최고 온도가 3000℃를 초과하지 않는 제약 조건을 만족하도록 용점(1510℃)이상의 온도에서의 열전달 계수 값을 임의로 조정하여 사용하도록 하였다.

2.2 참여 기관별 해석 조건

전 절에 기술한 3차 RR test를 위한 해석 guide

Table 3 RR test를 위한 용접 process별 아크 효율

용접 기법	아크 효율
FCA	0.65 - 0.75
SA	0.8 - 0.85

line을 토대로 각 참여 기관에서 사용한 해석 조건은 Table 4, Fig. 5와 같다. Table 4와 같이 참여 기관 "A"와 "B"는 균일 분포 체적 열속(UBHF)과 균일 분포 체적 및 표면 열속(CUHF)을 사용하였으며, 참여 기관 "C"는 균일 분포 체적 열속과 가우시안 분포의 표면 열속(GHF)의 혼합 열속을 함께 적용하였다. 그리고 용접부에서의 열 손실은 모든 참여 기관에서 온도 의존성을 고려한 자연 대류에 의한 열 손실이 발생하는 것으로 가정하였다.

각 기관에서 생성한 요소망은 전술한 제약 조건을 모두 충족하고 있었으며 Fig. 6과 같이 용접부의 두께 방향의 각 위치에서 groove line과 fusion line을 따른 입열 영역에 따라 크게 2가지로 구분되었다.

Table 4 참여 기관별 해석 조건

참여기관	A	B	C	D	
K_{eff}^1 [W/m ² ·C]	120-235	120-235	145	1200	
입열모델	UBHF				
	CUHF		UBHF +GHF		
아크 효율	1	0.65	0.68	0.65	0.7
	2	0.75	0.73	0.65	0.7
	3	0.85	0.80	0.85	0.6

*1 K_{eff} : 용융 온도 이상에서 열 전달 계수

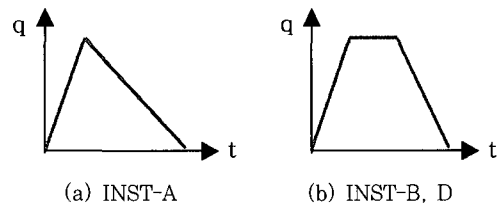
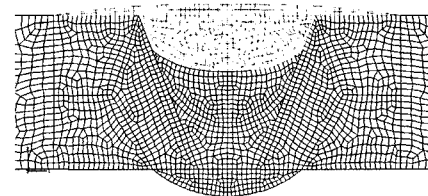
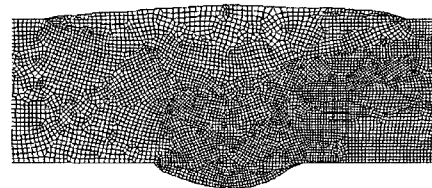


Fig. 5 참여 기관별 열속 amplitude (q: 열속, t: 가열시간)



(a) INST-A, C, D



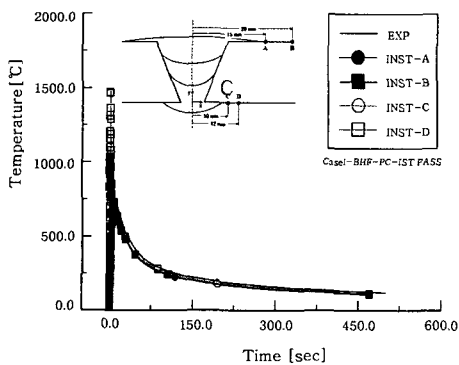
(b) INST-B

Fig. 6 참여 기관별 요소망

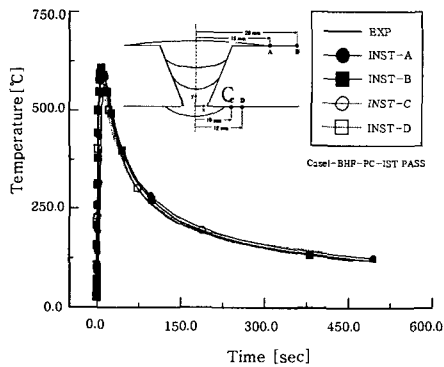
2.3 RR Test 결과

2.3.1 천이 온도 및 최고 온도 분포

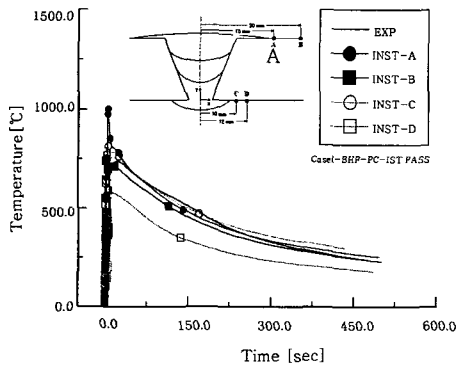
Fig. 7은 각 용접 pass에서 Fig. 2에 도시한 관찰 위치 "C"와 "D" 에서 천이 온도 거동에 대한 참여 기관별 해석 및 실험 결과를 함께 도시한 것이다. 이때, 각 참여 기관에서 사용한 입열 모델은 모두 균일 분포 체적 열원, UBHF이다. Fig. 7의 (a)와 (b) 같이 FCA 용접 즉, 1, 2 pass의 용접 시 용접부의 각 위치에서 가열 및 냉각 과정중 온도 천이 거동에 대한 각 기관의 해석 결과는 실험 결과와 매우 잘 일치하고 있다. 그리고, Fig. 7의 (c)에 도시한 SA 용접부의 경우 아크 효



(a) 1st Pass



(b) 2nd Pass

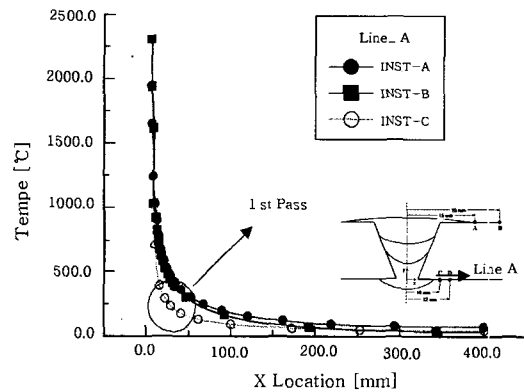


(c) 3rd Pass

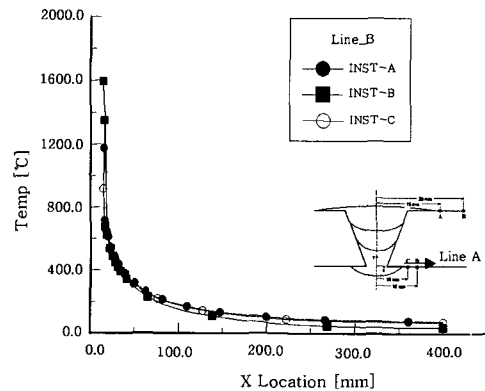
Fig. 7 FC-SA 다층 용접부의 용접 pass와 각 측정 위치에서 온도 천이 거동 (UBHF)

율로 0.6을 적용한 참여기관-D(INST-D)를 제외하고는 각 측정 위치에서 참여 기관별 천이 온도 거동에 대한 해석 및 실험 결과가 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이는 3차 RR test의 해석 guide line에서 제시된 FCA(0.65~0.75)와 SA (0.8~0.85)의 용접 아크 효율이 2차원 모델을 이용한 유한요소해석에 타당함을 의미한다. 그러나 FCA의 용접 즉, 1, 2 pass 용접 시 거의 전 냉각 과정을 거치는 동안 해석 및 실험에 의한 용접부의 천이 온도 거동 특성이 거의 일치하는 반면에 SA 용접이 적용된 경우 천이 온도 거동에 오차가 발생하고 있음을 알 수 있다. 이는 주변 대기와의 열 전달에 의한 열 손실을 용접 process에 따라 달리 결정해야함을 의미한다.

Fig. 8은 용접부의 상·하부면을 따른 최고 온도 분포를 도시한 것이다. Fig. 8과 같이 참여기관-C의 하부면(Line_A) 결과를 제외하면 참여기관간의 해석 결과가 거의 일치한다. 그리고 참여기관-C에서 각 용접 pass에서 최고 온도를 평가하였다는 점을 고려하면 각 기관별 해석 결과간의 오차는 거의 무시할 수 있는 것으로 판단된다.

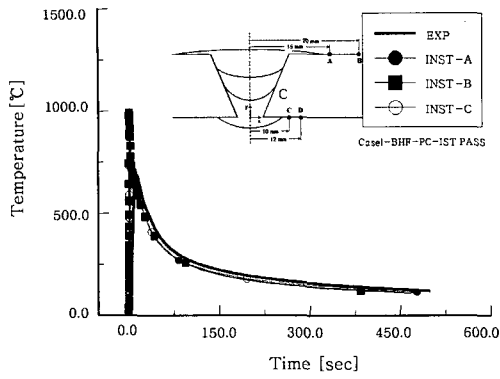


(a) 하부 (Line_A)

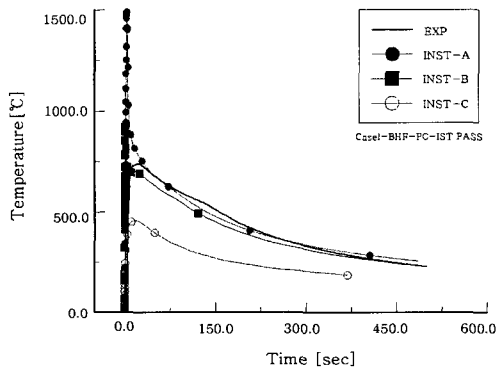


(b) 상부 (Line_B)

Fig. 8 FC-SA 다층 용접부의 상·하 표면에서 최고 온도 분포 (UBHF)



(a) 1st Pass



(b) 3rd Pass

Fig. 9 FC-SA 다층 용접부의 용접 pass와 각 측정 위치에서 온도 천이 거동 (INST-A, B : CUHF, INST-C : UBHF+GHF)

Fig. 9는 체적과 표면 열속이 혼합된 형태의 입열 모델을 이용한 각 참여기관의 해석 및 실험 결과를 상호 비교하여 도시한 것이다. Fig. 9와 같이 참여기관-C (INST-C)의 해석 결과를 제외한 타 참여 기관의 해석 결과는 실험 결과와 매우 잘 일치하고 있다. 그리고 참여기관-C의 경우 혼합 열속 중 50%를 차지하는 가우시안 분포의 열속 모델링 과정 중 50%만이 용접부에 작용하여 발생한 오차인 점을 감안하면 기관별 편차는 매우 미미한 수준임을 알 수 있다.

2.3.2 용융지 예측

Fig. 10은 균일분포 체적 열원(UBHF)을 이용한 각 참여 기관의 3차 RR test에서의 용접부 온도 분포 해석 결과로부터 구한 용융선(fusion line)과 용접부 macro 단면에서 계측된 용융선을 상호 비교하여 도시한 것이다. 그림의 결과와 같이 용융선의 경우 전 절에서 기술한 용접부의 천이 온도 거동과는 달리 참여 기관별 편차가 클 뿐 아니라 실험 및 해석 결과간의 차이도 다소 크게 발생하였다. 각 참여 기관에서 추정된 용융선의 차이는 Table 4와 같이 용접 아크의 효율의 차

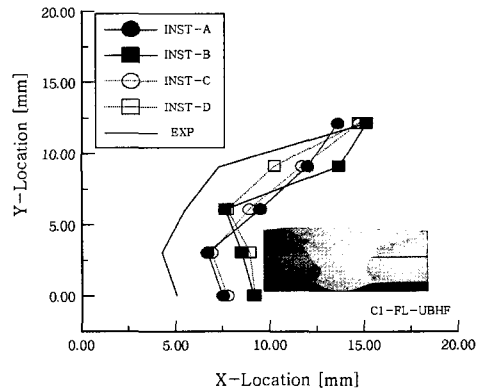


Fig. 10 FC-SA 다층 용접부의 fusion line에 대한 해석 및 실험 비교 결과 (UBHF)

이와 용접 입열이 가해진 영역 즉, Fig. 6의 요소망의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 그러나 해석 및 예측된 용융선의 차이는 용접부 해석과 관계된 매우 다양한 인자들의 상호 작용에 기인한 것이므로 이의 원인을 규명하기 위해서는 stirring effect의 적용 영역 및 크기 등 다른 여러 개별 인자들에 의한 상호 작용을 함께 검토해야 할 것으로 판단된다.

3. 용접부의 냉각속도와 용융지

3.1 평가 모델 및 방법

용접부의 냉각 시 온도 분포 예측 및 용융지 형상을 보다 정량적으로 예측하기 위한 지침을 마련하고자 RR test에서 사용된 해석 모델 중 Fig. 11에 도시한 일면 SA 용접부에 대한 해석 결과를 상세히 검토하였다. 시험편에 대한 용접 조건은 Table 5와 같으며, 해석 시 사용된 입열 모델은 균일 분포 체적 열원(UBHF)이다.

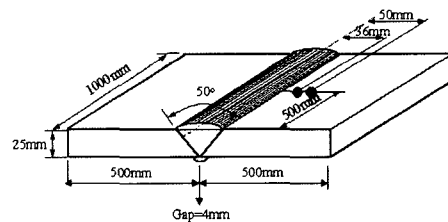
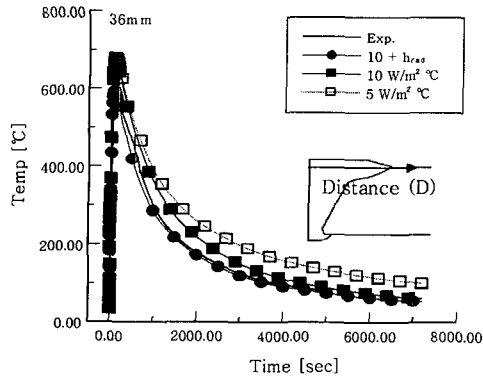


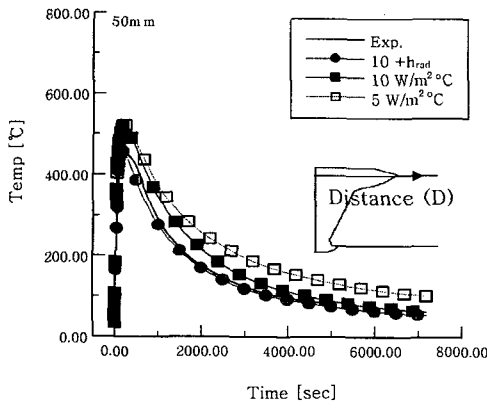
Fig. 11 일면 SA 용접부 해석 모델

Table 5 일면 SA 용접부의 용접 조건

용접기법	초기 온도 [°C]	용접 조건		
		전류 [A]	전압 [V]	속도 [mm/min]
SA With IRN Powder	35	1120	37	155



(a) D = 36mm



(b) D = 50mm

Fig. 12 열 전달 계수 값에 따른 일면 SA 용접부의 각 위치에서 천이 온도 거동

3.2 해석 결과 및 고찰

Fig. 12는 일면 SA 용접부에 대한 2차원 온도 분포 해석 시 적용된 열전달 계수의 변화에 따른 용접부 상부 표면에서의 온도 천이에 대한 해석 및 계측 결과를 비교하여 도시한 것이다. 여기서 대류에 의한 열 손실은 참여기관에서 사용한 대류 열전달 계수의 평균치이다. Fig. 13과 같이 용접부의 냉각 속도는 열전달 계수 값이 증가함에 따라 증가하며, 복사에 의한 열 손실(h_{rad})이 고려된 경우 실험 결과와 매우 유사한 거동을 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 용착 금속의 형성 초기에 용융지에서 발생하는 열 손실의 대부분은 모재로의 열전도에 의해 좌우되는 반면에 용접부가 어느 일정 온도로 냉각 된 후부터는 전도뿐만 아니라 주변 대기와의 자연 대류와 복사에 의한 열 손실도 온도 변화에 실제적인 영향을 준다는 것을 의미한다.

Fig. 13은 용접부에서 용점(1510°C)을 초과하는 온도 구간에서 용융지 유동 효과 (stirring effect)를 고려하기 위하여 열전도계수를 가상으로 100배정도 증가시킨 k_{eff} 를 입열 영역에만 적용한 경우(WM)와 입열 영역과 모재에 함께 적용한 경우(WM & BM)의 해석

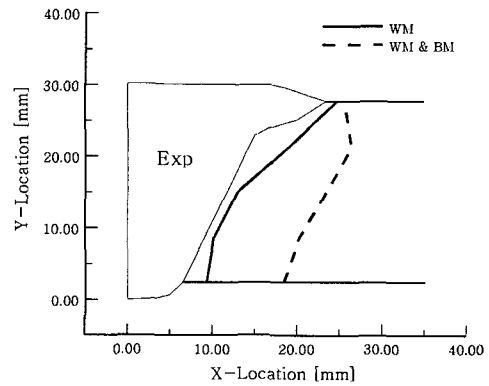


Fig. 13 일면 SA 용접부에서 stirring effect 적용 영역에 따른 용융지 형상 비교 결과 (UBHF)

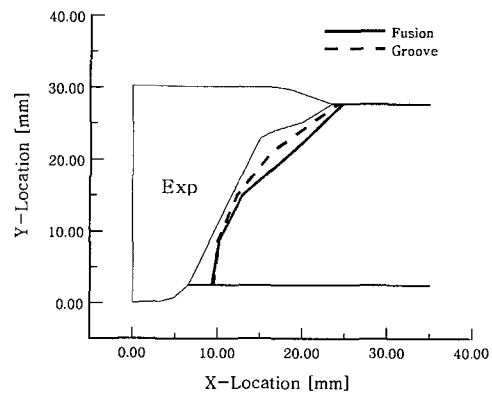


Fig. 14 일면 SA 용접부에서 가열 영역의 크기에 따른 용융지 형상 비교 결과 (UBHF)

및 실험 결과를 도시한 것이다. 이때 사용된 입열 영역은 용융지의 형상과 같은 것으로 가정하였다. Fig. 13과 같이 유동 효과를 위한 k_{eff} 가 적용된 영역에 따라 용융지의 형상에는 최대 100%이상의 큰 차이를 보이며, 가열 영역이내에만 유동 효과를 고려한 경우(WM)의 해석 결과는 계측된 용융선과 최대 약 5mm 오차 범위 이내에서 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그리고 이러한 오차는 Fig. 14와 같이 가열 영역을 용접 groove내로 제한한 경우 약 3mm 이내로 감소함을 알 수 있다.

4. 결 론

아크 용접부의 온도 분포 예측을 위한 2 차원 유한 요소 해석 방법에 관한 지침을 마련하기 위하여 3 차에 걸친 RR test를 수행하고 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 3차 RR test에서 규정한 해석 guide line에 따른 각 참여 기관별 해석 결과간의 편차는 매우 미미하였으며, 모든 참여 기관의 해석 결과는 실험 결과와 매우 잘 일치하였다.

2) 용접 입열 모델에 따른 용접부의 온도 편차는 매우 미미하다. 그러나 용접 조건에 따라 용접부로 유입되는 입열량에 따른 온도 편차는 매우 크다.

3) 준 정상 상태의 2 차원 유한요소해석을 이용한 용접부의 온도 분포 예측시 FCA와 SA용접 아크 효율의 적정 범위는 각각 0.65~0.75, 0.8~0.85이다.

4) 용접부의 천이 온도 분포 평가 시 용접 입열량이 상대적으로 작은 FCA의 경우 자연 대류에 의한 열 손실만을 고려하여도 비교적 정확한 예측이 가능하지만, 용접 입열량이 상대적으로 큰 SA 용접부의 온도 구배를 예측하기 위해서는 복사에 의한 열 손실을 함께 고려해야한다.

5) 용접부 용융지의 형상 및 크기를 보다 정량적으로 예측하기 위해서는 용융지 유동효과를 고려하기 위해 가상으로 높은 열전도 계수의 적용 구간을 열속이 주어지는 가열 영역이내로 제한해야하며 균일 분포 체적 열원을 이용한 경우 가열 영역은 용접부의 비드와 개선면 내로 제한해야 한다.

후 기

본 건은 대한용접학회 산하 용접강도연구위원회(이하

위원회로 칭함)에서 주관하고 대우조선해양(주), 삼성중공업(주), 조선대학교, 한국원자력연구소, 한국전력기술(주), 현대중공업(주) (이상 가나다 순)의 연구 지원 및 3차의 round robin을 통한 공동 연구 활동의 결과를 바탕으로 정해졌으며, 현대중공업(주)의 신상범 회원, 조선대학교 박정용 회원이 종합하여 공동 집필하였다. 본 건을 위해 참여해 주신 기관의 지원에 감사드립니다. 또한 지면 관계로 본 지침에 상세히 나타내지 못한 모든 실험 및 해석결과와 공동연구 결과는 추후 위원회가 정하는 방법에 따라 별도 배포될 예정이다.

참 고 문 헌

1. Gordon, R., IIW X/XV JWG RSDP round-robin Phase 1 : Revised Protocol, Nov., 1999
2. Dong, P. and Janosch, J.-J., "Residual Stress Compendium Compilation : Draft Protocol and Call for Participation", IIW Doc. IIW-X-XII-XV-RSDP -43-02, January, 2002
3. Gordon, R. and Koppenhoefer, K., "Progress Update on IIW round-robin on Residual Stress and Distortion Prediction", IIW Doc. IIW-X/XV-RSDP -49-99.6
4. Dong, P. and Hong, J. K., "Analysis of IIW X/XV RSDP Phase I round-robin Residual Stress Results