

아크 점용접 구조물의 정밀 용접 열변형 해석에 관한 연구 (II)

- 변위 모니터링 및 변형 모델 정립 -

장 경 복* · 조 상 명**

*삼성중공업 조선플랜트연구소 용접도장 연구

**부경대학교 재료공학부 생산가공학과

The Analysis of Welding Deformation in Arc-spot Welded Structure (II) - Displacement Monitoring and Deformation Analysis -

Kyoung Bok Jang* and Sang Myoung Cho**

*Welding Research Team, Shipbuilding & Plant R&D Center, Geoje Shipyard,
Samsung Heavy Industries Co. LTD. Geoje 656-710, Korea

**Division of Materials Science & Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

Abstract

Arc-spot welding is generally used in joining of precise parts such as case and core in electric compressor. It is important to control joining deformation in electric compressor because clearance control of micrometer order is needed for excellent airtightness and anti-nose. The countermeasures for this deformation in field have mainly been dependent on the rule of try and error by operator's experience because of productivities. For control this deformation problem without influence on productivities, development of exact simulation model should be needed.

In this study, on the basis of previous study, the analysis model to predict deformation of precise order in arc-spot welded structure with non-uniform stiffness is brought up through feedback and tuning between monitoring data and analysis results. For this, deformation monitoring system was built and boundary condition considering mechanical melting temperature was applied.

* Corresponding author : janggb@pusan.ac.kr

(Received Mach 6, 2003)

Key Words : Arc-spot welding, Precise parts, Tuning and feedback, Deformation monitoring, Mechanical melting temperature

1. 서 론

산업 현장에서는 열변형으로 인해 많은 문제점들이 발생하고 있는데, 후판 부재와 박판 부재가 혼재해 있는 정밀 제품일수록 허용 공차가 작기 때문에 열로 인해 발생하는 제품의 변형 문제가 더 심각하다. 실질적으로 산업 현장에서 열변형이 많은 문제점을 일으키고 있으나 생산성에 중점을 두고 있는 경우 체계적인 대응 방안을 수립하지 못하는 경우가 많다. 그 이유는 열변

형이란 제품의 형상·치수, 재질뿐 아니라 결합 조건이나 구속 조건, 결합 순서 등의 영향을 복합적으로 받는 현상으로 이를 제어하기란 상당히 어렵기 때문이다¹⁻⁴⁾. 만약, 제품에 대해 구체적이면서 정확한 수치 해석 모델이 정립되었다면 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션으로 변형 문제에 대한 다양한 방안을 생산성에 차질을 주지 않고 검토할 수 있을 것이다.

근래에는 이러한 수치 모델을 이용하는 CAE 기법이 일반화되고 있어 유한요소법 등을 이용하여 각종 변형을 예측하는 많은 연구들⁵⁻¹³⁾이 이루어지고 있으나, 그

결과가 실제 현장에서 제대로 적용되기 위해서는 기초적 연구를 바탕으로 실제 현상을 충분히 고려할 수 있는 구체적이면서 정밀한 모델의 정립이 필요하다. 본 연구 대상인 케이스와 코어로 이루어진 가전 제품군의 컴프레서는 특성상 작동부의 틈새가 마이크로미터 수준으로 관리되어야 소음이 적고 기밀성이 우수한 경쟁력 있는 제품이 될 수 있기 때문에 제작 과정에서 발생하는 기계적·열적 불균일 변형의 제어는 필수적이며 이를 위해서는 정밀 열변형 해석 모델의 정립이 반드시 필요하다.

이러한 정밀 열변형 해석 모델의 정립을 위해서 일반적인 해석 모델과는 달리 보다 세밀한 접근이 필요하다¹⁵⁻¹⁶⁾. 예를 들면, 용접법의 특성에 맞는 입열 모델의 정립, 용접부 물성치의 세밀한 고려 및 정밀 변형 모니터링 시스템의 제작 등이 필요하다. 이중 본 제품 용접인 아크 점용접에 대한 입열 모델은 전보에서 충분히 이루어졌다. 즉, 정밀 해석 모델을 정립하여 정확한 결과를 도출하기 위해서는 전체 공정의 체계적인 분석, 정밀한 계측 데이터, 그리고 구체적인 경계조건의 설정이 필요하며 이들 사이의 체계적인 비교 및 검토가 필요하다.

본 연구에서는 전보¹⁷⁾에서 이루어진 아크 점용접 구조물의 정밀 열전달 모델을 기반으로 제품의 변형을 구체적으로 예측할 수 있는 정밀 열변형 모델을 정립하고자 하였다. 이를 위해, 용접부 형상 및 물성치에 대한 세밀한 분석, 변형 모니터링 시스템의 구축, 역학적 응용 온도를 고려한 기계적 경계 조건의 설정 등이 이루어졌다.

2. 변형 해석 모델의 범위

본 용접 공정은 케이스 내에 코어를 접합시키기 위해 케이스를 원주 방향으로 3군데에 구멍을 뚫어 아크 점용접하는 공정으로 현장에서는 3점 용접이라 부르기도 한다. 케이스는 박판의 강이고 실린더는 후판의 회주철이기 때문에 본 용접은 박판과 후판, 강과 회주철의 이종 재료의 접합 과정이고 용접법이 일반적인 아크용접과는 다소 차이가 있어 이를 시뮬레이션 할 수 있는 열탄소성 해석 모델을 정립하기는 상당히 까다롭다. 그러나, 3점 중 1, 2번 점의 위치가 본 연구에서의 관심 대상인 코어 작동부 틈새와 가까우므로 용접시의 입열로 인해 작동부 틈새가 비정상적으로 변형하기 때문에 용접 공정이 실린더 작동부 틈새에 미치는 영향을 정성적·정량적으로 파악하기 위해서는 본 용접 공정을 시뮬레이션 할 수 있는 열탄소성 모델의 정립이 반드시 필요하다. 해석모델을 정립함에 있어 유의해야 할 점은

실린더 작동부 틈새 치수가 마이크로미터 수준으로 관리되어야 하기 때문에 일반적인 열탄소성 해석 모델의 접근 방법보다는 훨씬 세밀하면서도 본 제품 및 공정의 특성에 맞는 접근법을 요한다는 것이다.

전보¹⁷⁾에서는 공정 모니터링 시스템을 활용하여 현장에서의 아크 점용접 공정을 모니터링하여 분석하고, 아크 점용접 공정이 실린더 작동부 틈새에 미치는 영향을 다양하게 검토할 수 있도록 용접 공정을 재현할 수 있는 시스템을 구성하였으며, 온도 모니터링 시스템을 이용하여 본 용접 시 케이스 및 코어의 온도 변화를 계측하고 열전달 특성을 파악하여 열전달 모델을 정립하였다. 본보에서는 전보의 연구 결과를 바탕으로 각 재료 물성치에 대한 자료를 확보, 변형 모니터링 시스템 구축을 통한 코어 틈새 변형의 실시간 분석, 정밀한 해석적 접근 등을 통해 변형해석 모델을 정립하였으며, 이를 통해 아크 점용접 시 코어의 작동부 틈새 변형 메카니즘을 알아내고 작동부 틈새 변형에 대한 아크 점용접 공정의 영향을 평가하는데 기여하고자 하였다.

3. 재질 및 형상

본 연구에서 케이스의 재질은 KSD 3501에서 규정하고 있는 일반 열간 압연 연강판(SPH-1)으로서 두께는 3.2mm이며 코어의 재질은 회주철(GC 200)이며 용접에 사용되는 와이어는 YGW 14이다. Table 1은 각 재료의 화학성분을 나타낸다.

4. 작동부 틈새 변형의 모니터링

4.1 변형 모니터링 시스템

아크 점용접 시 코어의 작동부 틈새 변화를 계측 관찰하기 위하여 본 제품에 적합한 변위 모니터링 시스템을 제작하였다. 변위계의 기본 사양은 작동부 틈새±0.5mm(500 μ m)의 변위를 계측할 수 있도록 C1, C2, R2의 세 변위계를 제작하였다. Fig. 1은 제작된 변위계의 외관을 나타낸다.

Fig. 2는 제작한 변위 모니터링 시스템으로서 증폭기

Table 1 Chemical composition used each material

	Material	Chemical composition(wt%)				
		C	Si	Mn	P	S
Case	SPH-1	0.15↓	-	0.6↓	0.05↓	0.05↓
Core	GC 200	3.0 ~3.3	1.8 ~ 2.3	0.6 ~1.0	0.15↓	0.12↓
Wire	YGW 14	0.1	0.45	0.9	0.015	0.009

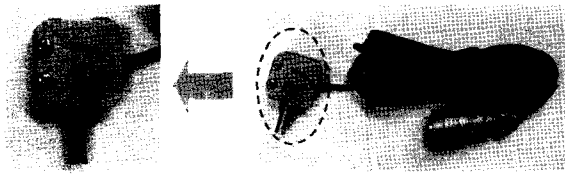
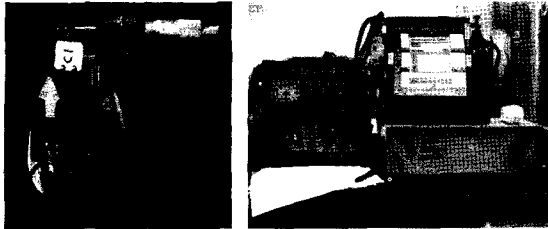


Fig. 1 Appearance of displacement gauge



(a) Micrometer (b) Displacement monitoring system

Fig. 2 Micrometer and displacement monitoring system

(Dynamic Amp)를 사용하여 변위계로부터 출력된 전압을 증폭시켜 모니터링 시스템을 통하여 전압의 변화를 계측하여 변위량을 산출하는 방식이다. 우선, 변위 모니터링시스템의 신뢰성을 확보하기 위해 마이크로미터를 이용하여 100 μ m, 20 μ m, 2 μ m, 1 μ m 단위의 변위 변화를 주어 변위를 모니터링하여 변위계의 계측정도(직진성)을 알아보았다. 이 때 2 μ m까지 변위 변화는 직진성을 나타내었는데, 1 μ m 변위 변화에서는 다소의 오차를 보였다. 이는 변위계 접촉면의 위치가 약간만 벗어나거나 움직이면 출력되는 전압 변화가 일정하지 않다는 것을 의미하며, 변위 계측시 주의를 요하는 부분으로 여겨진다. 그러므로, 직진성이 뚜렷이 나타나는 100 μ m 변화의 변위-출력전압 간의 1차 회귀식을 이용하여 코어의 작동부 틈새 변화를 계측 고찰하였다. 즉, 각 변위계를 작동부 틈새에서 0V가 출력되게 증폭기를 조정하고 틈새 \pm 0.1mm(100 μ m)의 범위에서 20 μ m씩 변위를 변화시키며 캘리브레이션 하였다. 이러한 캘리브레이션은 작동부 틈새 변형을 모니터링하기 전에 항상 실시하여 계측 결과의 정도를 유지하였다.

4.2 변형 모니터링 결과

Fig. 3은 아크 점용접 시 코어 작동부 틈새 변형을 모니터링 하기 위해 변위계를 부착한 위치와 실제 변위계가 부착된 제품의 사진이다. 여기서, S/B는 실린더에서 부베어링(sub-bearing)이 부착되는 면을 뜻하며 M/B는 주베어링(main-bearing)이 부착되는 면을 의미하고 in은 코어 내경 쪽을 out은 코어 외경 쪽을 뜻한다. 변형 모니터링은 재현성 확인을 위해 총 5번 실시하였으며 Fig. 4는 각각 1, 2, 3차의 변형 모니터링

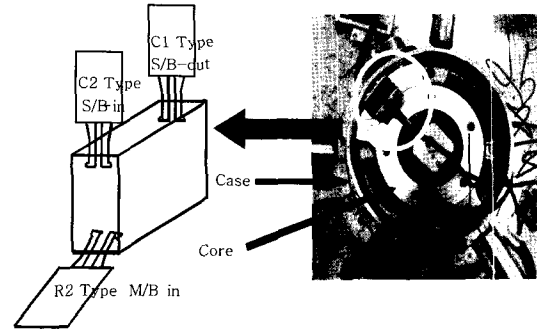
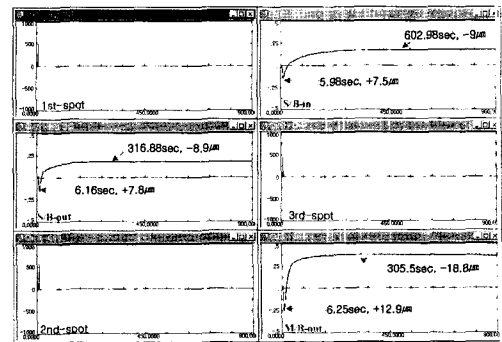
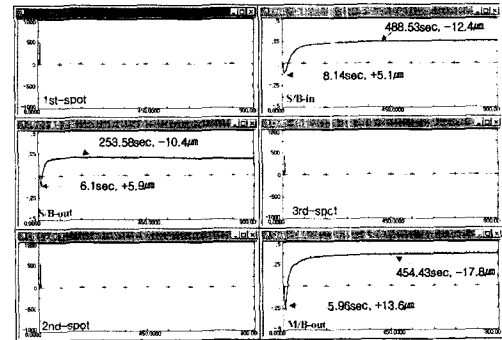


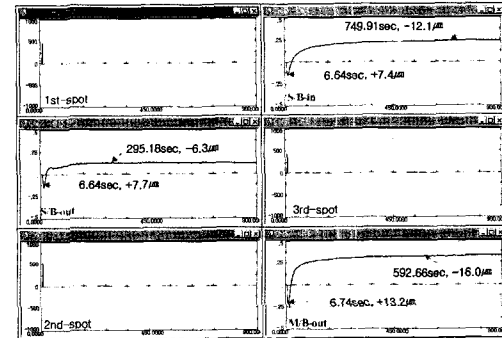
Fig. 3 Position of displacement gauge in working part of cylinder



(a) 1st



(b) 2nd



(c) 3rd

Fig. 4 Results of displacement monitoring

결과를 나타낸다. 그리고, Table 2~4는 이 결과를 상세히 고찰하기 위하여 분석·정리한 것이다. 여기서, 아크-모니터링 결과 1번 용접 점의 아크스타트가 최초로 되기 때문에 이를 기준(0sec)으로하여 각 변위 변화

Table 2 Detail result of displacement monitoring during arc-spot welding(1st)

Weld spot	Arc start time [sec]	Position of displacement monitoring	Start time for initial displacement [sec]	Max. of working gap		Min. of working gap		Final displacement [μm]
				sec	μm	sec	μm	
1	0	S/B-out	0.11	6.16	+7.8	316.88	-8.9	-8.8
2	0.05	S/B-in	0.10	5.98	+7.5	602.98	-9.0	-8.8
3	0.12	M/B-in	0.12	6.25	+12.9	305.50	-18.8	-18.1

Table 3 Detail result of displacement monitoring during arc-spot welding(2nd)

Weld spot	Arc start time [sec]	Position of displacement monitoring	Start time for initial displacement [sec]	Max. of working gap		Min. of working gap		Final displacement [μm]
				sec	μm	sec	μm	
1	0	S/B-out	0.30	6.10	+5.9	235.58	-10.4	-9.0
2	0.03	S/B-in	0.38	8.14	+5.1	488.53	-12.4	-12.5
3	0.05	M/B-in	0.10	5.96	+13.6	454.43	-17.8	-16.2

Table 4 Detail result of displacement monitoring during arc-spot welding(3rd)

Weld spot	Arc start time [sec]	Position of displacement monitoring	Start time for initial displacement [sec]	Max. of working gap		Min. of working gap		Final displacement [μm]
				sec	μm	sec	μm	
1	0	S/B-out	0.24	6.64	+7.7	295.18	-6.3	-5.9
2	0.03	S/B-in	0.15	6.64	+7.4	749.91	-12.1	-11.7
3	0.09	M/B-in	0.13	6.74	+13.2	592.66	-16.0	-16.2

시간을 표시하였다. 초기변위 시작시간은 틱새가 +1 μm 늘어 난 시점을 변위 시작시간으로 하였고, 틱새 최대·최소 증가는 틱새가 최대·최소로 증가하거나 감소한 때의 시간과 그 변위량이다. 계측 종료 시 변위는 계측시간 900초 후의 최종 단계의 변위량이다.

계측에서 나타난 결과로는 아크 점용접 시 입열부터 용접 직후 4~6초 정도까지는 작동부 틱새가 벌어지다가 그 후부터는 좁아지기 시작하여 최종적으로는 초기의 틱새 보다 좁아진 형태로 남게된다. 그리고, 좁아지는 정도가 항상 M/B 쪽이 S/B 쪽 보다 크다는 것을 알 수 있다.

현장에서는 작동부 틱새 계측을 제품 제작 후 작동부 틱새 윗 부분의 하부케이스를 절단하여 작동부 틱새 대응하여 제작된 블록게이지로서 최종적인 틱새 변형을 계측하고 있다. 그 결과 최종적인 틱새 변형의 양상은 본 연구의 모니터링 결과와 동일하게 나타나고 있었다. 그러나, 현장에서는 아크 점용접 시 입열로 인해 코어가 팽창하게 되어 작동부 틱새는 줄어들며 냉각 시에는 코어가 수축으로 그 팽창이 회복되지만 최종적으로 초기 상태까지 완전히 회복하지 못하여 작동부 틱새가 초기 보다 줄어드는 변형을 나타낸다고 고찰하고 있었다. 이는 변형-모니터링 결과와 완전히 상반되는 고찰이다.

그 이유는 현장에서의 계측 방법이 최종적인 작동부 틱새 변형만을 계측하기 때문이다. 정밀 열변형을 제어하기 위해서는 우선 제품의 변형 메카니즘을 정확히 이해해야 하는데 현재 현장에서는 이러한 이해가 완전히 이루어지지 않은 상태에서 제품의 변형에 대처하고 있었다는 것을 알 수 있다.

이로서 정밀 제품의 열변형 메카니즘을 제대로 이해하기 위해서는 본 연구에서와 같이 각 제품의 특성에 맞는 변형-모니터링 시스템과 변형 해석 모델이 정립되어야 한다는 것을 알 수 있다.

5. 변형 해석 모델

변형 해석이 정밀하게 수행되기 위해서는 우선 정밀한 열전달 해석이 이루어져야 하는데 이는 전보에서 충분히 검토되었다. 본 장에서는 기 정립된 열전달 해석 모델을 통하여 구한 모델의 온도 이력을 변형 모델에서 열적 하중(thermal load)로 받아들여 비커플링 해석(non-coupled analysis)을 수행하였다. 열탄소성 해석으로 용접 변형 해석을 수행함에 있어 소성가공에서의 열탄소성 해석과는 달리 각별한 주의를 요하는 부분은 바로 용접부의 물성치를 어떻게 처리하느냐 하는 것

이다. 특히, 본 모델과 같이 이중 재료, 강인 케이스와 주철인 코어가 용접되는 경우 용접부에는 강과 주철이 혼합된 조직이 형성되기 때문에 용접부의 기계적 물성치를 고려하기가 더욱더 어렵다.

열적 물성치의 경우는 각 재료별로 크게 차이가 나지 않기 때문에 큰 문제가 되지 않으나 변형에 직접적인 영향을 미치는 항복 강도와 같은 기계적 물성치는 재료별로 크게 차이가 나기 때문에 정밀한 열변형 해석을 위해서는 용접부의 물성치 특히 기계적 물성치는 반드시 고려되어야 한다.

본 연구에서는 아크 점 용접부의 기계적 물성치를 추정하기 위해 용접부의 요소 형상을 기준으로 Fig. 5와 같이 아크 점 용접부 단면을 절단하여 총 8군데의 경도값을 측정하였다. 비커스 경도기를 이용하였으며 측정하중 9.8N, 측정 간격은 0.5mm씩 이다.

Fig. 6, 7은 경도 측정 결과를 나타내며, 그 결과로서 각 영역의 용접부 기계적 물성치를 추정하였다. 즉, 항복 강도와 인장 강도는 경도값에 비례하기 때문에 측정 영역에서 모재의 경도 값을 1로 환산하여 경도 값의 비로서 각 영역의 용접부 기계적 물성치를 추정하였다. 여기서, 중요한 것은 경도 측정 영역의 기준이 해석 모델에서 용접부의 요소 형상이 된다는 것이다. 즉, 계측 모듈과 해석 모듈 사이의 Feedback과 Tuning의 결과이다.

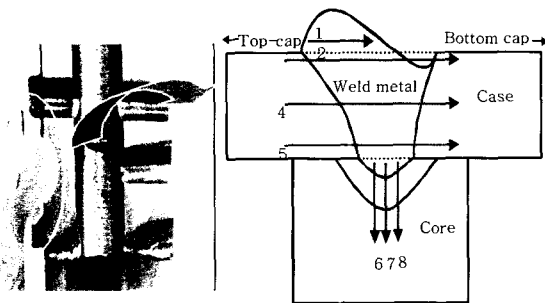


Fig. 5 Cross section of arc-spot weldment for hardness test

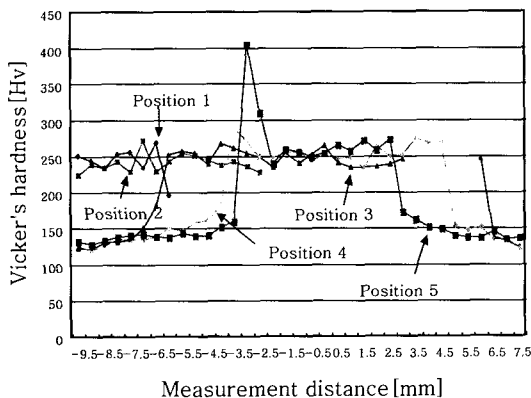


Fig. 6 Hardness distribution in position ①~⑤

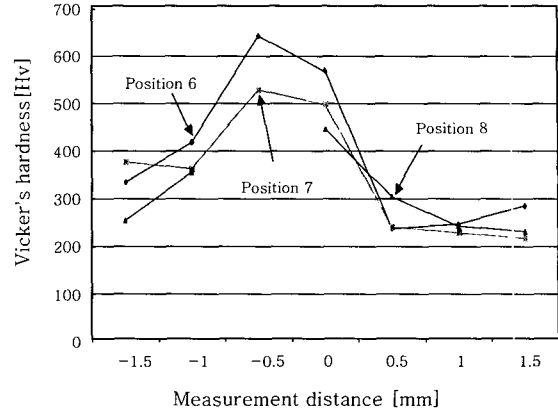


Fig. 7 Hardness distribution in position ⑥~⑧

5.1 경계조건의 설정

용접 변형 해석에 있어서 중요한 또 한가지는 구속 조건의 선정이다. 본 제품의 경우 케이스와 코어를 아크 점 용접하기 전 코어를 고정시키기 위해 케이스의 구멍 부분에 특정한 부품을 끼워 넣어 케이스와 코어를 고정시킨다. 그러므로, 최종 구속 조건은 구멍 부분의 구속과 용접부에서 발생하는 구속의 크기에 의해 결정된다고 볼 수 있다.

이러한 조건을 구현하기 위해 일반적으로 취할 수 있는 경계조건은 용접 비드 요소의 모든 절점을 구속하지 않고 자유로운 상태로 두고, 케이스의 hole 부분은 용접 입열 동안만 구속하고 입열 직후부터는 구속하지 않는 것이다. 그러나, 실질적으로 입열이 끝났다고 해서 용접부가 냉각되면서 바로 강성을 지니는 것은 아니다. 즉, 용접부는 냉각 시 역학적 용융온도(항복강도가 제로가 되는 온도)에 도달하면서부터 강성을 지니게 된다고 볼 수 있다. 그러므로, 케이스 hole 부분의 구속을 용접 입열 동안뿐만 아니라 용접부 온도가 역학적 용융온도(750℃)에 도달할 때까지 구속하고 그 후부터 구속되지 않는 것이 보다 합리적일 것으로 여겨진다.

또, 한가지 고려해야 할 부분은 케이스와 실린더 사이의 접촉이다. 실제 도면상에서 케이스 내경과 실린더 외경 사이의 치수 공차가 1/10mm 수준이기 때문에 아크 점 용접 시 케이스와 실린더 사이의 접촉이 분명 실린더 작동부 틈새 변형에 영향을 미칠 수 있다. 또한, 케이스는 앞 공정인 열박음으로 인해 이미 상당히 불규칙한 변형을 지니고 있으므로 이의 영향은 더욱더 복잡할 것이다.

본 모델에서도 열박음 후 케이스 변형 및 케이스 내면과 코어 외면사이의 접촉 조건을 고려하여 변형 해석을 수행하였다. 그러나, 이러한 접촉 조건의 해석 시 문제가 되는 것은 계산 시간이 상당히 길어진다는 것이

다. 그러므로, 해석의 정도에 영향을 미치지 않는다면 접촉 조건은 가능하면 피하는 것이 유리하다. 본 연구에서도 케이스 구멍에 끼운 부품을 실제 모델링하여 각각 케이스, 실린더와의 접촉 조건을 부여하여 해석을 수행해본 결과 구멍을 직접 구속시켜주는 것과 거의 동일한 해석 결과를 나타내었으므로 이 부분은 접촉 조건으로 고려하지 않고, 상술한 구속조건으로 고려하였다.

5.2 해석 결과 및 고찰

Fig. 8은 용접 입열 동안만 구멍을 구속하고 입열 직후부터는 구속하지 않은 모델 ①의 코어 작동부 틸새의 최종적인 변형 형상 및 변형량을 나타낸 것이다. 최종적인 작동부 틸새 변형이 S/B측과 M/B측 모두 줄어든 형태이고 그 정도가 M/B 측이 더 심하므로 변형-모니터링 결과와 동일하다. Fig. 9는 용접 직후부터 냉각 시까지의 작동부 틸새 변형을 시간에 대해 정리한 것이다. 용접이 시작되면서 작동부 틸새가 벌어지다가 용접 직후 몇 초 후부터 줄어들기 시작해 최종적으로는 줄어든 형태의 변형을 나타내고 있어 역시 변형-모니터

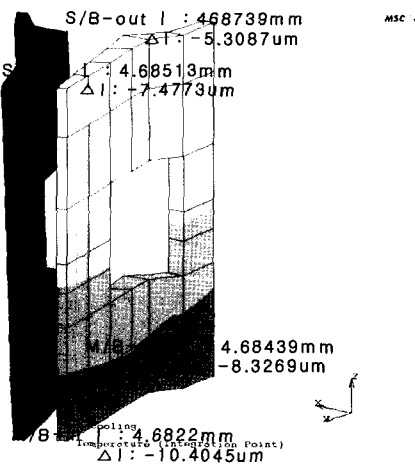


Fig. 8 Final deformation shape and quantity of working part in core for model ①

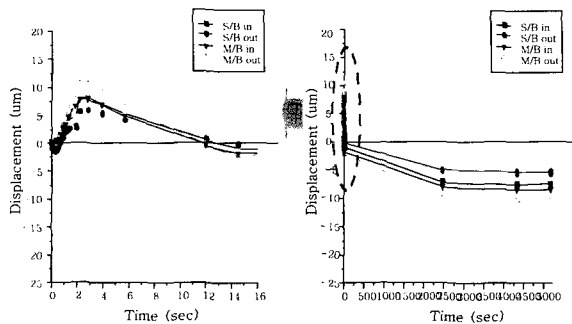


Fig. 9 Deformation profile of working part in core for model ①

링 결과와 동일하다. 그러나, 최종 변형량이 모니터링 결과 보다 다소 작게 나타나고 있다.

Fig. 10은 입열 직후 용접부 온도가 역학적 용융온도(750°C)에 도달할 때까지 케이스 hole 부분을 구속하고 그 후부터 구속하지 않은 모델 ②의 변형 형상 및 변형량을 나타낸 것이며, Fig. 11은 시간에 대한 작동부 틸새 변형의 프로파일 나타낸 것이다. 최종적인 작동부 틸새 변형 양상이 변형-모니터링 결과와 동일하며, 변형량이 모델 ①의 결과보다 계측 결과에 더 근접함을 알 수 있다. 그러므로, 역학적 용융 온도를 고려한 경계조건 설정(모델②)이 보다 정확한 변형 해석 모델 정립을 위해 필요함을 알 수 있다.

6. 결 론

케이스와 코어를 접합하는 공정인 아크 점용접 공정이 코어 작동부 틸새 변형에 미치는 영향을 파악하기 위해 전보 해석결과를 바탕으로 현장 공정 모니터링을 통한 세밀한 공정분석, 공정 재현 시스템의 설계를 통해 정밀 열변형 모델을 정립하였으며 다음과 같은 결론

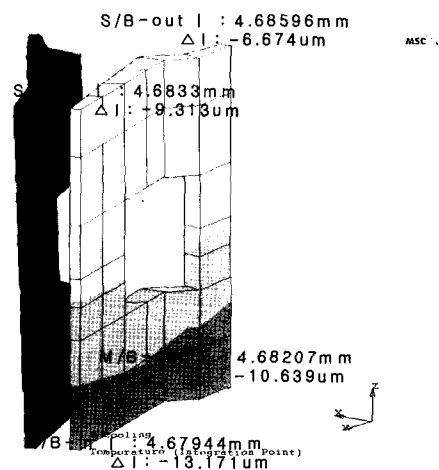


Fig. 10 Final deformation shape and quantity of working part in core for model ②

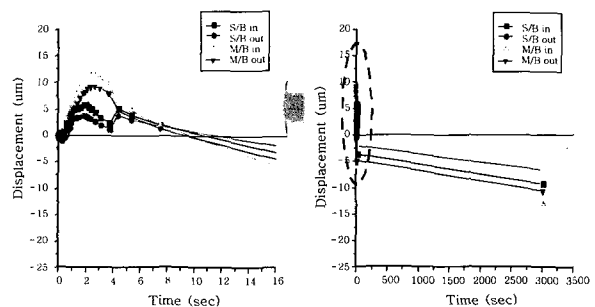


Fig. 11 Deformation profile of working part in core for model ②

을 얻었다.

1) 코어 작동부 틸새의 변형을 마이크로미터 수준까지 계측할 수 있도록 변위계를 제작하고 이를 이용하여 시간에 대한 작동부 틸새 변형을 모니터링 할 수 있는 변형-모니터링 시스템을 제작하여 아크 점용접 시 작동부 틸새 변형을 모니터링 한 결과, 용접 시작 후부터 용접 종료 후 대략 4~6초 정도까지는 작동부 틸새가 벌어졌다가 그 후부터는 틸새가 줄어들어 최종적으로는 초기 틸새 보다 줄어드는 변형을 나타내었다. 이 때 M/B 쪽의 틸새가 S/B 쪽 보다 더 많이 줄어들었다.

2) 3점-용접 공정의 해석 시 정확한 구속 조건을 찾기 위해 다양한 조건으로 해석한 결과 케이스 구멍의 구속은 용접부가 냉각 시 역학적 용융 온도(750°C)에 도달할 때까지 구속하는 것이 효과적임을 알 수 있었다.

3) 아크 점용접 공정에 적합한 입열 모델 개발을 통해 정립된 열전달 모델을 기준으로 변형-모니터링, 용접부 기계적 물성치 추정, 합리적인 구속 조건 등과 같은 계측 결과와 시뮬레이션 결과와의 Feedback 및 Tuning으로 아크 점용접 구조물의 코어 작동부 틸새 변형을 정성적 뿐만 아니라 정량적으로도 정밀한 수준까지 예측할 수 있는 열탄소성 변형 모델을 정립할 수 있었다.

참 고 문 헌

- Mitsuhiro Natsume, "Weld Distortion and Control on Steel Bridges and Steel Structures" JWS, Vol. 52-8(1983), 648-658
- Shigetomo Matsui, "Control of Weld Distortion in Thin-skin Welded Structures", JWS, 52-5(1983), 58-66(in Japanese)
- Akira Sakaguchi, Takahiro Tanaka, "Estimate and Counter-plan for Welding Deformation-Thin Plates Steel Structure", JWS, 60-6(1991), 14-19(in Japanese)
- Takeyuki Watanabe, "Weld Distortion and its Prevention of Rolling Stock", JWS, Vol. 52-8 (1983), 667-673(in Japanese)
- M. S. Han, J. M. Han, J. Y. Lee, "A study on the bending strength of a built-up beam fabricated by the CO₂ arc spot welding method" Journal of KWS, 15-4(1997), 369-379(in Korean)
- B. Anderson and L. Karlsson, "Thermal Stresses Large Butt-Welded Plates". J. Thermal Stresses, 4(1981), 491-500
- J. H. Argyris., L. E. Vaz and K. J. William, "Integrated Finite Element Analysis of Coupled Thermo-visco-plastic problems", Journal Thermal Stresses, 4(1981), 121-153
- Y. Ueda and K. Nakacho, "Simplifying Methods and Deformation due to Multi-pass Welding", Trans. Japan Weld. Res., 11(1981), 95-103(in Japanese)
- J. H. Argyris., L. E. Szimmat and K. J. William, "Computations Aspects of Welding Stress Analysis", Comp. Methods Appl. Mech. Eng. 33(:982), 635-666
- T. E. Eagar and N. S. Tsai, "Temperature Field Produced by Traveling Distributed Heat Sources", Welding Journal, 62-12(1983), 346-355
- J. K. Hwang, G. B. Jang, K. S. Kim, "Prediction of Nugget Shape by Finite Element Modeling in Arc-spot Welding", Journal of KWS, 17-2, (1999), 84-90(in Korean)
- J. Wang, Y. Ueda, H. Murakawa, M. G. Yuan, and H. Q. Yang, "Improvement in Numerical Accuracy and Stability of 3-D FEM Analysis in Welding", Welding Research Supplement, April(1996)
- N. R. Mandal and C. V. N. Sundar, "Analysis of Welding Shrinkage", Welding Research Supplement, June(1997)
- Y. Ueda, H. Murakawa, "Simulation of Welding Deformation of Accurate Ship Assembling(1st Report) In-Plane Deformation of Butt Welded Plate", Japan Ship Building Society, 171, 395-404(in Japanese)
- Y. Ueda, H. Murakawa, "Simulation of Welding Deformation of Accurate Ship Assembling(2nd Report) Influence of Initial Imperfection to Butt welded Plate", Japan Ship Building Society, 559-567(in Japanese)
- Y. Ueda, H. Murakawa, "Simulation of Welding Deformation of Accurate Ship Assembling(3rd Report) Out-of-plate Deformation of Butt Welded Plate", Japan Ship Building Society, 341-350(in Japanese)
- K.B. Jang, S.S.Kang, S.M. Cho, "The Analysis of Welding Deformation in Arc-spot Welded Structure (I)-Temperature Monitoring and Heat Transfer Analysis", Journal of KWS, 20-4, (2000), 138-144(in Korean)