

아크 점용접 구조물의 정밀 용접 열변형 해석에 관한 연구 (I)

-온도 모니터링 및 열전달 모델 정립-

이원근* · 장경복** · 강성수** · 조상명***

*부산대학교 정밀기계공학과 대학원

**부산대학교 기계기술연구소

***부경대학교 재료공학부 생산가공학과

The Analysis of Welding Deformation in Arc-spot Welded Structure (I)

- Temperature Monitoring and Heat Transfer Analysis -

Won Kun Lee*, kyoung Bok Jang**, Sung Soo Kang** and Sang Myoung Cho***

*Yoo-Shin Engineering Corporation, Seoul 135-936, Korea

**Research Institute of Mechanical Technology, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

***Dept. of Product & Joining Engineering, Div. of Material Science & Engineering Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

Abstract

Arc-spot welding is generally used in joining of precise parts such as case and core in electronic compressor. It is important to control joining deformation in electronic compressor because clearance control in 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, to solve this deformation problem in arc-spot welded structure with case and core, we intend to make a simulation model that is able to predict deformation in precise order by tuning and feedback between sensing data and simulation results. This paper include development of heat input model for arc-spot welding, temperature monitoring and make a heat transfer model using sensing data in product.

(Received April 3, 2002)

Key Words : Arc-spot welding, Precise parts, Tuning and feedback, Temperature monitoring, Heat transfer model

1. 서 론

저소음·고성능을 요하는 기계에는 마이크로미터 단위의 치수 공차 관리를 요하는 정밀 부품의 조합들로 이루어진 제품들이 상당히 많으며 이러한 제품의 접합에 아크-스팟 용접이 널리 이용되고 있다. 대표적인 예로 케이스와 코어 등으로 이루어진 저소음·고성능 가전 제품 군의 컴프레서를 들 수 있다. 이러한 컴프레서는 특성상 기밀성이 우수하고 소음이 적어야 하기 때문에 작동부의 틈새가 마이크로미터 수준으로 관리되지 않으면 경쟁력 있는 제품을 생산할 수 없다. 이처럼 제

품의 기밀성과 소음에 가장 큰 영향을 미치는 것은 제품의 제작 과정에서 발생하는 기계적·열적 불균일 변형이며, 현장에서는 이와 같이 부품들의 접합 과정에서 발생하는 각종 변형으로 인해 치수 관리에 어려움을 겪는 경우가 많아 결국은 제품의 성능을 저하시키면서까지 치수 공차 여유를 확보하기도 한다. 그 만큼 정밀 제품의 열변형은 부재의 형상·치수, 재질 뿐 아니라 접합 조건이나 구속 조건, 접합순서 등의 제품 제작 전 공정에 걸친 복합적인 인자의 영향을 받기 때문에 이를 제어하기가 어렵기 때문이다. 후판 부재와 박판 부재가 혼재하는 정밀 제품의 경우 이러한 열변형은 두 부재의 강성 차이로 인해 제어하기가 더욱더 곤란하다¹⁻⁵⁾.

현장에서는 이러한 제품의 변형이 문제가 되는 경우 생산에 차질을 주면서까지 이를 고찰하기 어려우며, 작업자의 경험에 의한 시행착오적인 방법으로 대처하고 있어 상당한 비용의 손실을 겪고 있는 실정이다. 그러므로, 이러한 경우 제품의 정밀 열변형을 예측할 수 있는 신뢰성 있는 수치모델이 정립되어진다면 생산성에 차질을 주지 않고 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제품의 변형을 제어할 수 있는 방안들이 제시될 수 있을 것이다.

유한요소법 등의 수치적 해석법의 발달로 예전부터 각종 변형을 예측하는 많은 연구가 이루어져 왔으며⁶⁻¹⁰⁾, 현재에 이르러서는 유한요소 상용코드의 보급으로 인해 현장에서도 이러한 CAE 기법이 일반화되었다. 그러나, 정밀한 변형해석에 대한 연구¹¹⁻¹⁶⁾는 1990년대에 접어들어 다소 이루어지고는 있으나 마이크로미터 수준의 정밀 용접 열변형에 대해 유한요소법을 이용한 CAE의 적용에 관한 연구는 이루어지지 않고 있다. 정밀한 열변형 해석을 위해서는 일반적인 해석 기법과는 다른 세밀한 접근법을 요한다. 특히, 용접 열변형의 경우 정확한 해석을 위해서는 입열 모델의 정립이 중요한데 제품 제작에 적용되는 용접법의 특성에 맞는 입열 모델이 적절하게 정립되어 정확한 열전달 해석이 이루어져야만 최종적인 변형해석의 결과가 신뢰성을 지닐 수 있다. 또한, 정확한 해석 모델의 정립을 위해서는 각종 경계 조건의 설정을 위한 많은 계측 데이터들이 요구되므로 각 제품 및 공정의 특성에 맞는 계측 시스템의 구축 또한 필요하다.

이에 본 연구에서는 아크 점 용접 구조물의 정밀 열변형 해석을 위해 우선 아크 점용접 공정에 적합한 입열 모델을 정립하는 방안을 제시하고 그 결과로서 3차원 열전달 모델을 정립하였으며 온도 모니터링을 통하여 그 타당성을 검토하였다.

2. 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)이다. Fig. 1은 케이스와 코어의 아크 점용접시 온도 모니터링을 위해 열전대가 부착된 제품의 형상으로 케이스와 코어는 3군데의 점용접으로 집합되어진다. 여기서, 사용된 장비는 현장의 상황을 실험실에서 재현하기 위해 직접 제작된 것이며, 용접 조건은 전압 25V, 전류 225A, 용접 시간 1.9sec, 그리고 가스는 혼합가스(Ar80%+CO₂20%)이다.

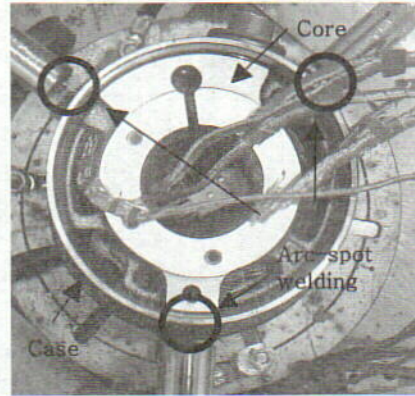


Fig. 1 Joining between case and core by arc-spot welding

3. 입열 모델 정립

용접 공정의 열전달 모델 정립에 있어서 아크로부터의 열입력을 정확히 모델링하는 것은 상당히 중요한 작업이다. 왜냐하면, 이러한 입열 모델은 직접적으로 온도분포와 냉각률, 용융부의 크기, 열영향부의 크기 등에 영향을 미치기 때문이다. 케이스와 코어의 집합에 사용되는 용접법은 아크 점용접으로 집합되어야 할 두 부재 중 한쪽에 구멍을 뚫은 후 그 구멍을 통해 용탕을 채워 집합시키는 것으로 플러그 용접(plug welding)이라고도 한다. 일반적으로 이동 열원의 아크 용접의 경우 아크 효율은 65%~95%정도로 보고되고 있으며 아크 점용접의 경우 열원의 이동이 없고 용융 금속이 충전되어 오기 때문에 아크 입열 효율이 다소 높다는 정도만 알려져 있을 뿐이다. 그리고, 구멍의 크기에 따라 아크 입열 효율이 달라지기 때문에 더욱더 입열 모델을 정립하기가 어렵다. 또한, 용탕이 바닥으로부터 충전되고 모재도 용융되기 때문에 아크 효율이 용접 시간에 따라 변화한다. 즉, 용접 시작 시에는 아크가 구멍으로 보호되기 때문에 효율이 거의 100%에 가까우나 시간이 지남에 따라 아크가 대기 중에 노출되기 때문에 효율은 점점 떨어지며 용탕이 충전되어 표면에 비드를 형성 할 즈음에는 아크로부터 나오는 열은 상당한 손실을 입은 후 모재로 전달되게 된다.

이에 본 연구에서는 열전도 특성이 좋아 아크 열원의 입열 영향을 순간적인 온도 계측을 통해 직접 관찰할 수 있는 동판(99.9%순동, 직경 161mm, 두께 16.1mm)을 이용하여 실제 케이스의 구멍과 동일한 크기(직경 -6.5mm, 깊이-3.5mm)를 뚫어 실제 공정과 동일한 수직 용접 자세와 용접 조건으로 용접하고 구멍 주위의 아크 열원과 가까운 위치에서의 온도를 모니터링하여 시간에 따른 아크 입열 효율의 변화를 계산하였다. Fig. 2는 동판에 열전대를 부착하여 수직자세로 용접하

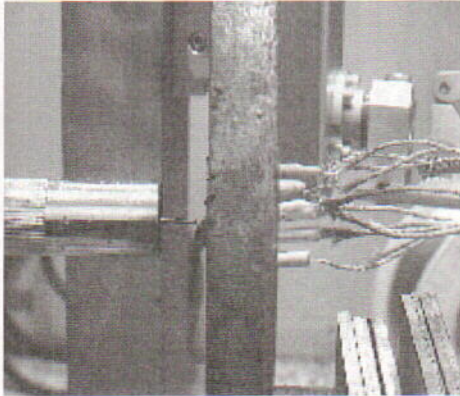


Fig. 2 Arc spot welding in copper plate with thermocouple

는 모습이며, Fig. 3은 동판의 치수와 입열효율 측정을 위한 열전대 부착위치를 나타낸 것이다. 열전대는 용접부 반대편에 구멍을 뚫어 B-CuP 브레이징 삽입재를 이용하여 부착하였으며, 실 용접 시 아크력에 의한 노이즈를 최소화하기 위해 세라믹 판을 이용하였다.

Fig. 4은 6군데 열전대 위치에서의 온도 모니터링 결과를 나타낸다. Fig. 4에서 용접 후 동판의 전체적인 온도의 상승(ΔT)은 6.14K 임을 알 수 있다. 그런데, 입열 효율은 용접조건으로 계산되어지는 입열량과 실제 동판에 투입된 입열량의 비로서 계산될 수 있으므로, 용접조건에서 구해지는 입열량(Q)은 $10782J(227A \times 25V \times 1.9sec)$ 이고 온도 모니터링 결과에서 구해지는 실제 동판의 전체 평균 온도 상승(ΔT) 6.14K로 실질적으로 동판에 투입된 열량은 동판의 질량(m)이 3.82kg, 비열(C_v)이 $390kJ/kg \cdot K$ 이므로 $Q = C_v \times m \times \Delta T$ 에서 9147J이다. 그러므로, 본 아크 점용접의 평균적인 입열 효율은 $85\% \left(\frac{9247}{10782} \times 100 \right)$ 정도가 된다. 이는 일반적으로 보고되고 있는 아크스폿 용접의 평균 입열

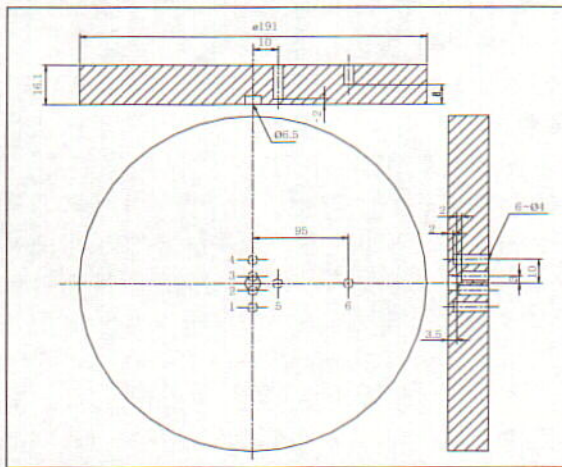


Fig. 3 Dimension of copper plate and position of thermocouple

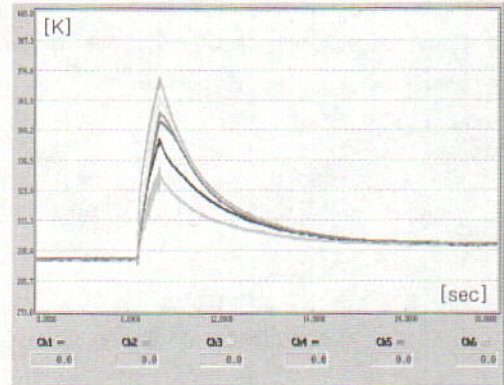


Fig. 4 Results of temperature monitoring for copper plate

효율과 유사하다.

그러나, 이 효율은 평균적인 효율이고 실질적으로는 아크스폿 용접 시간 동안 입열 효율은 변화한다. 이를 확인하기 위해 Fig. 5에 온도 모니터링 결과를 용접 시간 동안만 확대하여 나타내었는데 온도 기울기가 용접 시간 동안 크게 3번 변화하고 있음을 알 수 있다. 여기서, 각 구간에 해당하는 시간과 기울기로서 시간에 따른 입열 효율을 계산하였다.

첫번째 기울기를 나타내는 아크 스타트 후 0.24초까지는 와이어 송급 속도로서 계산해 보면 아크가 깊이 3.5mm위치에서 스타트하여 0.95mm까지 충전되어 오는데 까지 걸리는 시간을 나타내며, 이 시간 동안에는 아크가 구멍 안에서 보호되기 때문에 아크 효율이 거의 100%에 달한다. 그러나, 용접 급속이 점점 충전되어 짐에 따라 아크가 대기 중으로 노출되기 때문에 모재로 전달되는 열은 점점 줄어들고 아크 입열 효율은 감소한다. 이러한 구간을 나타내는 것이 0.24초에서 0.95초까지이다. 이렇게 용접 급속이 3.5mm까지 채워지고 표면의 비드를 형성할 동안에는 아크가 대기에 직접적으로 노출되기 때문에 아크 입열효율은 더욱 떨어

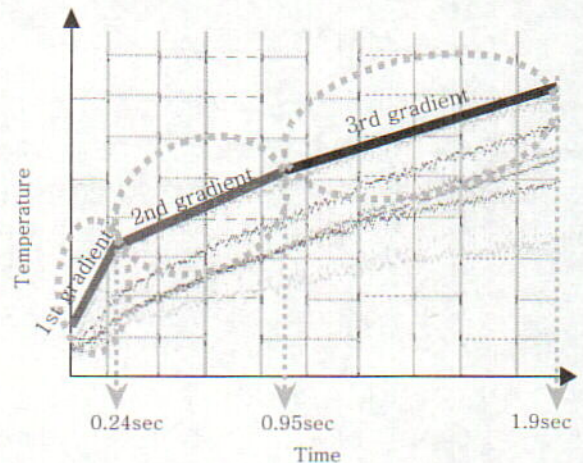


Fig. 5 Gradient variation during welding time

어지게 된다. 결국, 아크 입열 효율은 용접시간의 함수로서 점차적으로 감소된다는 것을 알 수 있는데, 이 시간 구간을 크게 3구간(0~0.24sec, 0.24~0.95sec, 0.95~1.89)으로 나누고 첫번째 구간의 기울기를 1로 보고, 나머지 구간의 기울기 비를 구하였다. 이 때의 비는 1, 0.88, 0.74가 되고, 아크 입열 효율의 변화는 100%, 88%, 74%가 된다. 이를 기준으로 평균적인 입열 효율은

$$82.52\% \left(= \frac{100 \times 0.24 + 88 \times 0.71 + 74 \times 0.95}{1.9} \right)$$

로 용접조건에 의한 입열량과 실제 동판에 투여된 입열량의 비로서 계산되어진 85%와 거의 유사함을 알 수 있어 본 계산 결과의 타당성을 확인할 수 있다. Fig. 6은 이렇게 계산되어진 아크 입열 효율 계산 모식도를 나타낸다.

이렇게 동판을 이용하여 계산되어진 아크스팟 용접의 입열 효율을 이용하여 실 모델의 아크 점 용접 공정에 맞는 입열 모델을 정립하고자 Fig. 7과 같이 실린더를 절단하여 케이스와 한 곳에서만 아크 점용접하고 이 때 케이스 및 코어에 열전대를 부착하여 용접 시간 동안

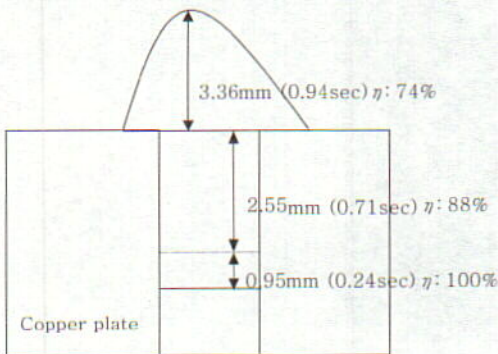


Fig. 6 Outline of heat input model in arc-spot welding

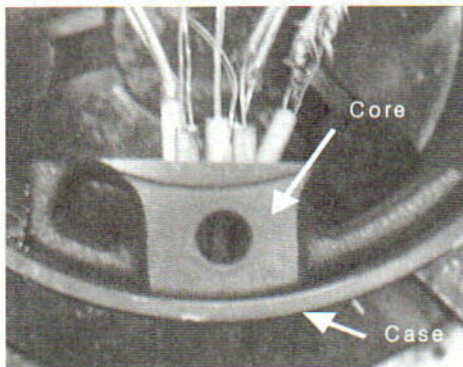


Fig. 7 Real equipment for test

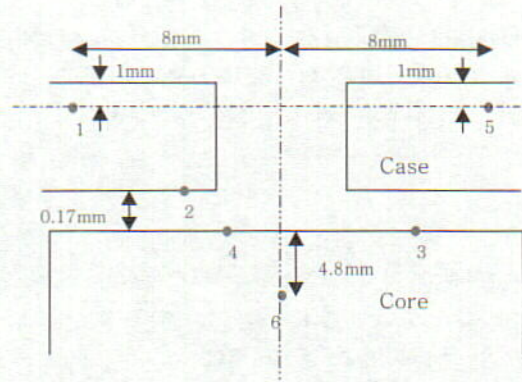


Fig. 8 Position of thermocouple

케이스와 코어 쪽으로 전달되는 열을 계산하여 용접 시간 동안의 입열 효율의 변화를 계산하였다. Fig.8은 열전대 부착 위치를 나타낸다.

Fig. 9는 열전대 부착 위치에서의 온도 모니터링 결과로서 케이스와 실린더로 전달되는 열을 계산하기 위해 용접 시간 동안만 확대하여 나타낸 온도 프로파일이다. 입열 모델을 위해 용접 시간을 크게 5 구간으로 분류하였는데, Fig.9에서 Q_{core} 는 아크가 코어에서 스타트하여 케이스와 코어와의 틈새를 채우는 시간으로 실린더로만 급격한 입열이 이루어지는 구간이고, Q_{case1} , Q_{case2} , Q_{case3} 는 본 모델의 유한요소 모델이 케이스 두께 방향으로 3개의 요소를 지니고 있으므로 케이스 두께를 3등분하였을 때 용접 금속이 각각을 채워 올라오는 구간이고, Q_{bead} 는 케이스 표면의 비드를 채우는 구간을 나타낸다. Fig. 10은 Fig. 6의 아크 점용접 입열 효율 계산 결과와 본 실험의 결과를 중첩하여 최종적으로 계산된 용접 시간에 따른 입열량 변화를 나타낸 것이다.

4. 열전달 모델 정립 및 해석 결과

아크 점용접 공정의 열전달 해석을 위한 유한요소 모델을 형성함에 있어, Fig. 11과 같이 비드 외관과 단면을 관찰하여 용접 비드 요소를 형성하였다. Fig. 12

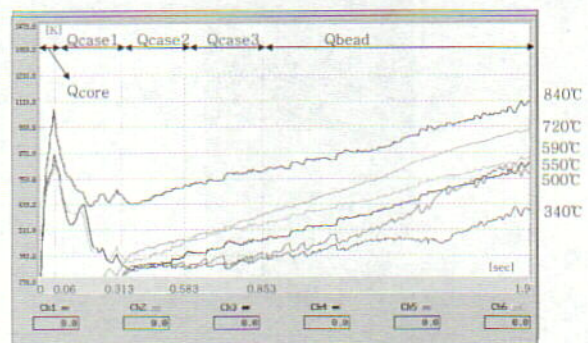


Fig. 9 Result of temperature monitoring

는 전체적인 모델의 요소 형상 및 해석 결과의 검증을 위하여 코어에 부착한 열전대 위치에서의 절점 번호를 나타낸다. 전체 요소수와 절점수는 각각 14084, 10336 개이다.

경계조건에서의 열손실은 자연대류와 복사를 함께 고려하였다. 일반적으로 용접 공정 열전달 해석시 자연대류만 고려하고 복사 열손실은 무시하는 것이 일반적이다. 그러나, 복사 열손실은 모델의 표면 온도의 4승에 비례하기 때문에 짧은 시간이지만 고온 영역에서는 실질적으로 복사 열손실이 자연대류 열손실 보다 클 수

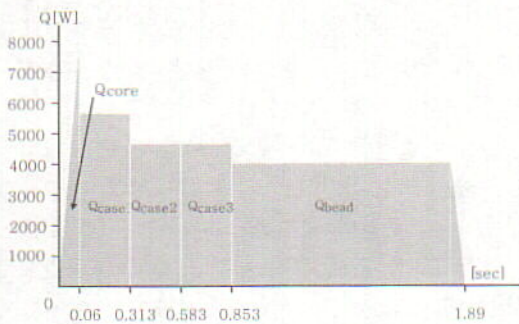


Fig. 10 Heat input model with weld time in real model

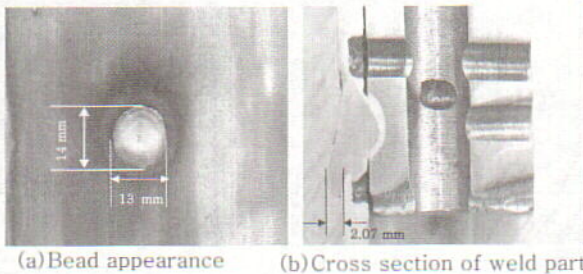


Fig. 11 Bead appearance and cross section of weld part

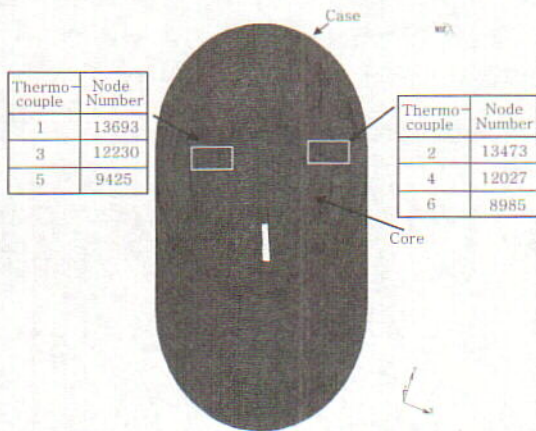
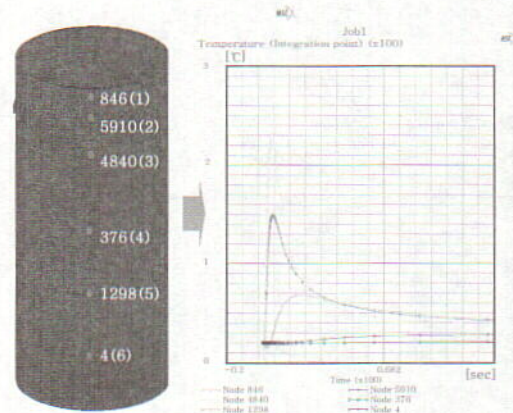


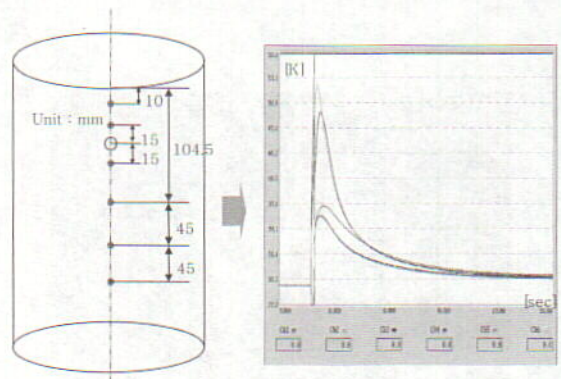
Fig. 12 Mesh generation and position of thermocouple in core

있기 때문에 본 연구와 같이 정밀한 해석 수행 시에는 이를 무시할 수가 없다. 모델의 초기 조건은 모든 절점의 온도를 20°C로 부여하였으며, 3차원 열전달 해석을 위해 필요한 케이스와 코어의 열적 물성치인 열전도도와 비열은 온도의 함수로서 고려하였다. 해석 시 증분당 최대 온도 허용 범위는 20°C로 하였고 용접부 비드 요소에 대해서는 각 입열 시간에 맞추어 활성화 및 비활성화 요소로 지정하여 해석의 정확성을 높였다.

Fig. 13은 이렇게 정립되어진 열전달 모델로서 해석한 결과 케이스 측방향으로 열전대를 부착한 위치에서의 절점 온도 프로파일 및 실제 온도 모니터링 결과를 나타낸 것이다. 해석결과와 온도 모니터링 결과가 4, 5, 6 번을 제외하곤 각 채널에 상당하는 절점의 피크 온도, 전체 절점의 평균온도 및 도달 시간 등에서 상당히 유사한 결과를 나타내고 있음을 확인 할 수 있다. 4, 5, 6번의 경우는 피크 온도가 90°C 정도로 높게 모니터링 되었는데 이는 열전대 부착이 잘못 된 것이 원인이었다. 그래서, 온도 모니터링을 재 실시하고 표면 온도계로 4번 지점을 확인한 결과 피크 온도가 28°C



(a)Result of heat transfer analysis



(b)Result of temperature monitoring

Fig. 13 Result of heat transfer analysis and temperature monitoring in case

정도로 해석 결과와 유사한 결과를 나타내었다.

Fig. 14는 해석결과로서 코어 부분의 열전대 부착위치(Fig. 12참조)에서의 절점의 온도 프로파일 및 실제 온도 모니터링 결과를 나타낸다. 해석 및 온도 모니터링 결과 모두 각 채널의 평균 온도 상승은 17℃정도이며 도달 시간은 250초 정도로 나타나고 있다.

이와 같이 열전달 모델의 해석 결과가 온도 모니터링 결과와 유사하게 나타나고 있어 아크 점용접 공정에 대해 정립되어진 열전달 모델의 타당성을 확인 할 수 있다. 그러므로, 본 모델의 해석 결과로서 아크 점용접 후 모델의 온도 분포를 고찰하였는데 Fig. 15는 용접 후 27.15초에서의 모델의 전체적인 온도 분포를 나타낸 것이다. 향후 이렇게 정립된 열전달 모델을 이용한 해석 결과를 바탕으로 변형 해석을 수행하고 코어의 변형을 모니터링 할 수 있는 시스템을 구축하여 최종적으로 변형을 정확히 예측할 수 있는 시뮬레이션 모델을 정립하고 이를 이용하여 아크 점용접에 의한 모델의 변형을 제어할 수 있는 방안을 찾고자 한다.

5. 결 론

아크 점용접 구조물의 정밀 열변형 해석을 위해 아크 점용접 공정에 적합한 입열 모델을 정립하는 방안을 제시하였고 그 결과로서 3차원 열전달 모델을 정립하였으며 온도 모니터링을 통하여 그 타당성을 검토하였다. 그 주된 결과는 다음과 같다.

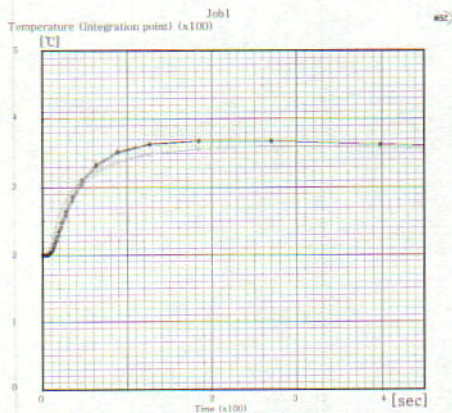
1) 열전도 특성이 좋아 아크 열원의 입열 영향을 순간적인 온도 계측을 통해 직접 관찰할 수 있는 동판을 이용하여 일정 크기의 구멍을 뚫고 아크 점용접을 수행하면서 구멍 주위의 아크 열원과 가까운 지점에서의 온도를 모니터링하여 그 결과로서 시간에 따른 아크 입열 효율의 변화를 계산할 수 있었다. 그 결과 아크 입열 효율은 용접 시간 동안 크게 3번 변화(100%→88%→74%)하였는데 이를 각 구간의 시간을 고려하여 평균 내어보면 82.52%로서 용접조건으로 계산되어진 입열량과 실제 동판에 투입된 입열량의 비로서 계산되어진 평균 입열 효율(85%)과 유사한 결과를 나타내어 계산 모델의 타당성을 확인할 수 있었다.

2) 실 모델의 아크 점용접 시 케이스와 코어로 전달되는 입열량을 온도 모니터링을 통하여 계산하고 (1)의 결과와 조합하여 본 모델의 용접공정에 적합한 입열 모델을 정립할 수 있었다.

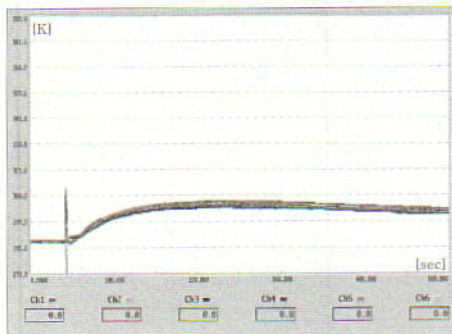
3) (1),(2)를 통해 본 모델의 아크 점용접 공정에 적합한 열전달 모델을 정립할 수 있었으며 해석 결과를 케이스 및 코어의 온도 모니터링 결과와 비교하여 모델의 타당성을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. Mitsuhiro Natsume, "Weld Distortion and Control on Steel Bridges and Steel Structures" JWS, Vol. 52-8(1983), 648-658
2. Shigetomo Matsui, "Control of Weld Distortion in Thin-skin Welded Structures", JWS, 52-5(1983), 58-66(in Japanese)
3. Akira Sakaguchi, Takahiro Tanaka, "Estimate and Counter-plan for Welding Deformation-Thin Plates Steel Structure", JWS, 60-6(1991), 14-19(in Japanese)
4. Takeyuki Watanabe, "Weld Distortion and its Prevention of Rolling Stock", JWS, Vol. 52-8 (1983), 667-673(in Japanese)
5. 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)
6. B. Anderson and L. Karlsson, "Thermal Stresses Large Butt-Welded Plates". J. Thermal Stresses, 4(1981), 491-500



(a)Result of heat transfer analysis



(b)Result of temperature monitoring

Fig. 14 Result of heat transfer analysis and temperature monitoring in core

7. 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
8. Y. Ueda and K. Nakacho, "Simplifying Methods and Deformation due to Multi-pass Welding", *Trans. Japan Weld. Res.*, **11**(1981), 95-103(in Japanese)
9. J. H. Argyris., L. E. Szimmat and K. J. William, "Computations Aspects of Welding Stress Analysis", *Comp. Methods Appl. Mech. Eng.* **33**(1982), 635-666
10. T. E. Eagar and N. S. Tsai, "Temperature Field Produced by Traveling Distributed Heat Sources", *Welding Journal*, **62-12**(1983), 346-355
11. 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)
12. 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)
13. N. R. Mandal and C. V. N. Sundar, "Analysis of Welding Shrinkage", *Welding Research Supplement*, June(1997)
14. 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)
15. 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)
16. 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)