

열박음 공정이 케이스의 온도분포 및 변형에 미치는 영향(I)

- 온도 계측 및 열전달 해석 모델 정립 -

장경복* · 조상명** · 강성수*

* 부산대학교 기계기술 연구소

** 부경대학교 생산가공학과

A Study on the Temperature Distribution and Deformation of Case in Shrinkage Fit Process(I) - Temperature Monitoring and Heat Transfer Analysis Model -

Gyoung-Bok Jang*, Sang-Myung Cho** and Sung-Soo Kang*

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

* Course of Production & Joining Engineering, Div. of Materials Science & Engineering Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

Abstract

There have been many problems due to deformation in industry field. Especially, it is severe in parts with small size and thin thickness and in products that must have excellent airtightness and anti-noise. The countermeasures for this deformation in field have mainly been dependent on the rule of trial and error by operator's experience because of productivities. Systematic study about this product with deformation problem is also insufficient. The reason is that deformation is complex problem with shape, size, material of product, joining method, and conditions, etc..

It is efficient to apply CAE technique without influence on productivity to this problem. There is, however, much difference between the result analyzed by CAE and appearances in working field because of the insufficiency of communication between simulator and worker and of sensing data for boundary condition in analysis. In this study, to solve this deformation problem, we intend to make a simulation model that is adapted from working conditions by tuning and feedback between sensing data and simulation results. This paper include temperature monitoring and make a heat transfer model using sensing data in product as previous step for deformation analysis. The heat transfer analysis of shrinkage fit process is considerably difficult due to contact heat transfer between case and core. To solve this contact problem, gap element is used in present study.

(Received March 7, 2001)

Key Words : Deformation problem, Shrinkage fit process, Tuning and feedback, Temperature monitoring, Heat transfer model, Gap element

1. 서 론

케이스, 코어 등으로 이루어진 제품의 경우 특성상 기밀성이 우수하고 소음이 적어야하는 경우가 많은데, 이 경우 작동부의 틈새가 적을수록 유리하다. 이러한

기밀성과 소음에 가장 큰 영향을 미치는 것은 제품의 제작과정에서 발생하는 변형이다. 제품의 변형은 체결 변형과 용접변형으로 크게 나눌 수 있는데, 양자는 제품의 공정상 연결되어있기 때문에 즉, 체결 변형이 용접 변형의 초기 조건으로 작용하기 때문에 체계적인 고찰이 필요하다. 산업현장에서는 이러한 제품의 변형

이 문제가 되는 경우 현장에서는 생산에 차질을 주면서까지 이를 고찰하기 어려우며, 일반적으로 제품의 변형에 영향을 주는 각종 인자의 파악조차 제대로 이뤄지지 않은 상황에서 작업자의 경험에 의한 시행착오적인 방법으로 대처하고 있어 상당한 비용의 손실을 겪고 있는 실정이다.

그 이유는 변형이란 부재의 형상·치수, 재질뿐 아니라 용접 조건이나 구속 조건, 용접 순서 등의 영향을 받는 복합적인 현상으로 이를 제어하기란 상당히 어렵기 때문이다¹²⁾. 그러나, CAE 기법이 일반화되면서 생산성에 차질을 주지 않고 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 어느 정도 이러한 문제를 고찰할 수 있게 되었으며, 유한요소법 등의 수치적 테크닉을 이용하여 각종 변형을 예측하는 많은 연구가 이루어져 왔다³⁻¹⁰⁾. 그러나, 이러한 연구 결과를 실제 현장에 바로 적용하는 데에는 다소의 문제점이 있다. 그 이유는 동일한 제품의 동일한 문제에 대해서도 각 현장마다 생산 환경이 다르기 때문에 그 현장에 적합한 수치모델이 전부 다르기 때문이다. 그리고, 현장에서는 이러한 CAE 기법의 적용 필요성 연구소로 의뢰를 함으로써 이루어지는데, 이 경우 시뮬레이션 해석자는 현장에서 넘겨준 해석에 필요한 간단한 데이터만을 가지고 시뮬레이션을 수행함으로써 그 결과가 실제 현장에서의 결과와 상당한 차이를 나타내게 되는 경우가 대부분이다. 그 이유는 CAE 기법을 이용하여 어떠한 공정을 시뮬레이션할 경우 정성적 뿐만 아니라 정량적으로도 정확한 결과를 얻기 위해서는 기본적으로 그 공정상의 흐름을 제대로 파악하여 정확한 경계조건을 잡아주는 것이 가장 중요하기 때문이다. 이를 위해서는 각 공정상의 지식을 보유한 자가 현장에서의 공정을 정확히 파악하여 시뮬레이션을 수행하여야 하며, 경계조건에 필요한 공정상의 각종 계측 데이터가 필요하다.

다시 말해, 이러한 제품의 변형 문제를 해결하기 위해서는 우선 공정상의 지식을 바탕으로 각 공정을 철저히 분석하여 제품의 변형에 영향을 주는 인자를 찾아낼 수 있는 능력과 이의 영향을 공정시뮬레이션을 통하여 검토할 수 있는 능력이 복합적으로 요구되는데, 여기에 정밀한 계측 테크닉이 보완되어야 한다. 그리고, 이러한 시뮬레이션 해석 결과가 정확성을 지니기 위해서는 각 공정상의 계측 결과 사이의 피드백(feedback) 및 조절(tuning)^{11,12)}이 반드시 필요하다.

이에 본 연구에서는 이러한 제품의 변형을 제어하기 위해 우선 열박음 공정이 케이스의 변형에 미치는 영향을 현장 계측과 3차원 열전달 및 탄소성 해석을 수행하여 조사함으로써 제품의 변형을 제어할 수 있는

방안을 찾고자 하였다. 열박음이란 케이스 보다 직경이 큰 코어를 케이스 내부에 끼워 맞추기 위해 케이스를 고주파 가열하여 팽창시킨 후 코어를 기계적인 힘으로 끼워맞추는 것으로 이러한 공정에 대한 열전달 해석에서의 가장 까다로운 점은 열박음 후 케이스 내면과 코어 외면 사이의 열전달 조건 처리 문제이다. 본 연구에서는 이를 갭요소(gap element)로서 해결하였으며, 우선 변형 해석에 앞서 공정에 따른 제품의 온도 변화를 계측하고 이를 이용하여 제품의 생산 현장에 가장 적합한 3차원 열전달 수치 모델을 정립하고자 하였다.

2. 재질 및 형상

본 연구의 대상인 케이스의 재질은 KSD 3501에서 규정하고 있는 일반 열간 압연 연강판(SPH-1)으로서 두께는 3.2mm이다. 케이스 및 코어의 형상은 Fig. 1과 같으며, 케이스는 고주파 가열에 의해 확관된 후 내부 코어가 열박음 되고 1, 2, 3차의 3번의 강제 냉각을 거침으로써 열박음 공정이 마무리된다. Fig. 2는 이러한 일련의 공정을 그림으로 나타낸 것이다.

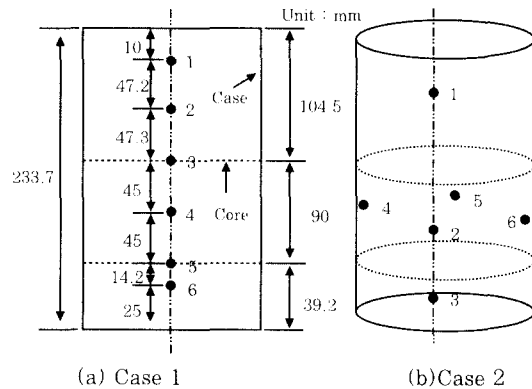


Fig. 1 Shape-dimension of case and position of thermo couple

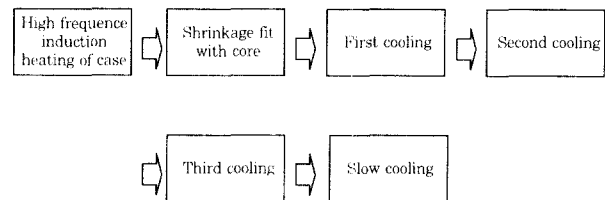


Fig. 2 Diagram of shrinkage fit process

3. 온도계측 및 결과

열박음 공정으로 인해 발생하는 케이스의 열변형은 기본적으로 케이스의 열이력에 의한 것이므로, 고주파 가열에 의한 케이스의 확관, 열박음(shrinkage fit),

1차~3차 강제 공랭(forced cooling by air), 서냉에 이르기까지의 케이스의 온도 이력을 온도 모니터링 시스템을 이용하여 측정하였다. 계측에 사용된 열전대는 KS C 1602에서 규정하는 K Type 이다. 정확한 온도 계측을 위해 우선 열전대를 응고점 600K의 Pb를 이용하여 캘리브레이션 하였다. Fig. 3은 캘리브레이션 결과를 나타내고, Table 1에 이렇게 하여 구한 각 온도 채널의 보정 계수를 나타내었다.

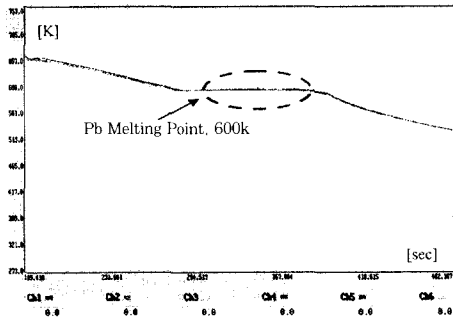


Fig. 3 Calibration result of thermocouple using Pb

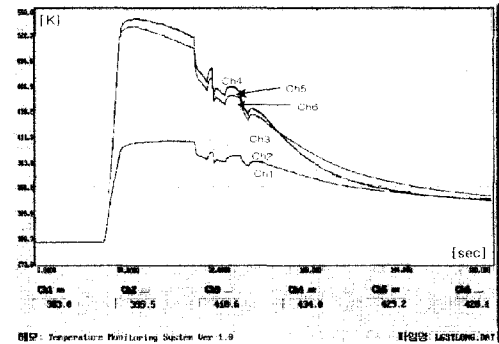
Table 1 Calibration constant of each channel

Channel	Monitoring Temperature[°C]	Calibration Constant
1	332.45	0.984
2	333.65	0.98
3	333.61	0.98
4	333.54	0.98
5	331.83	0.985
6	327.42	0.998

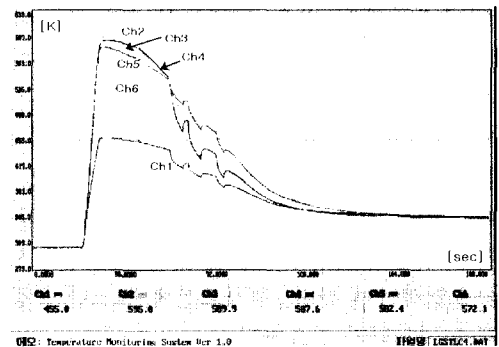
열전대는 열박음 공정시 케이스의 축방향 온도 변화를 보기 위해 Fig. 1(a)Case1과 같이 케이스 외표면에 축방향으로 6군데와 축방향 및 원주 방향의 온도 변화를 동시에 관찰하기 위해 Fig. 1(b)Case2와 같이 축방향으로 3개 및 원주방향으로 3개를 동시에 부착하여 온도를 모니터링하였다. Fig. 4는 이렇게 계측되어진 온도 이력을 나타낸다. 고주파 가열로 인한 온도의 상승과 1~3차에 걸친 공랭에 의한 냉각이 잘 나타나고 있음을 알 수 있다. Fig. 4(a)를 보면 코어와 접촉하는 3, 4, 5번 위치의 온도가 가장 높게 나타나고 있으며 그 중 코어의 중앙 부분(4번)의 온도가 가장 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. Fig. 4(b)는 축방향으로 동일한 위치인 코어의 중심 부분에서 원주방향으로(2,4,5,6번)의 온도가 동일하지 않음을 보여주는데, 이는 고주파 가열 시 고주파 코일이 케이스 내로 삽입 될 때 틈새가 일정하지 않고 한 쪽으로 치우쳐서

가열되기 때문이라고 생각된다. 이러한 현상은 열박음 후 케이스의 진원도에 영향을 미칠 수 있으므로 현장에서 적절한 관리가 필요할 것으로 여겨진다.

케이스의 두께가 3.2mm이므로 고주파 가열시 케이스의 내·외부의 온도차가 있는지를 알아보기 위해 Fig. 1(a)Case1의 3, 4, 5의 위치에서 케이스의 내(2,4,6번)·외(1,3,5번)면에 열전대를 부착하여 고주파 가열 공정만을 온도 계측하였으며 Fig. 5는 그 결과를 나타낸다. 5°C내외의 온도 차이를 보이고 있어 두께 방향으로 온도가 차이가 크지 않음을 알 수 있다. 그러므로, 향후 변형 고찰시 케이스의 내·외경의 변화는 동일하다고 가정하는 것은 타당할 것으로 여겨진다.



(a)Axial direction



(b)Axial and circumferential direction

Fig. 4 Result of temperature monitoring in case

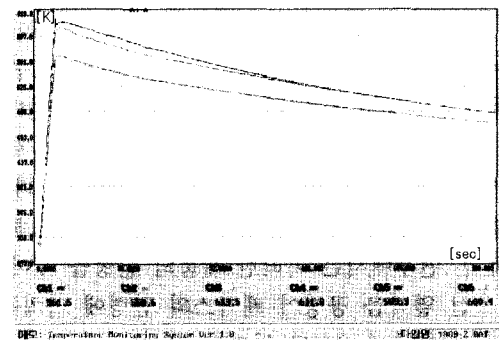


Fig. 5 Result of temperature monitoring inside and outside of case

Table 2 Temperature of each channel during process in axial direction

Remark	Time(sec)	Measuring temperature in each channel ℃					
		①	②	③	④	⑤	⑥
After high frequency heating	33.58	124.97	129.16	211.39	254.02	249.01	237.12
Pick up case	42.96	132.25	142.10	212.27	261.56	252.65	232.23
After shrinkge fit	45.93	131.95	143.08	210.31	259.11	249.60	228.06
Before 1st air cooling	62.47	131.66	145.63	197.96	241.18	232.07	188.75
After 1st air cooling	67.41	113.55	126.42	164.64	195.12	188.04	180.54
Before 2nd air cooling	69.38	121.13	134.55	176.20	209.33	200.64	191.72
After 2nd air cooling	74.57	110.31	123.87	156.31	181.10	172.18	169.76
Before 3rd air cooling	80.49	116.41	129.95	161.21	185.32	178.78	173.55
After 3rd air cooling	83.70	105.68	117.50	142.49	159.84	154.25	152.79
After 180 sec.	180.0	70.06	71.05	69.78	68.80	74.37	77.47

Table 3 Temperature of each channel during process in axial and circumferential direction

Remark	Time(sec)	Measuring temperature in each channel ℃					
		①	②	③	④	⑤	⑥
After high frequency heating	26.17	180.17	316.14	311.05	309.39	305.94	299.10
Pick up case	36.04	179.09	311.05	299.29	309.97	297.47	281.81
After shrinkge fit	41.37	176.14	303.21	289.10	302.13	290.08	272.15
Before 1st air cooling	53.38	164.03	276.26	262.64	262.15	261.71	236.33
After 1st air cooling	58.77	140.71	219.52	212.17	193.26	228.72	200.30
Before 2nd air cooling	60.74	146.52	232.65	220.11	204.13	231.57	204.99
After 2nd air cooling	65.65	126.74	197.86	188.06	150.63	193.06	158.68
Before 3rd air cooling	71.85	127.33	194.43	180.03	155.82	187.94	158.08
After 3rd air cooling	74.81	112.08	169.15	157.58	125.05	161.84	126.75
After 180 sec.	180.0	72.42	70.36	74.48	69.78	71.31	71.06

상기와 같은 온도 이력을 시뮬레이션 할 때 가장 중요한 경계조건이 바뀌는 것을 기준으로 대략 10개의 구간으로 구분하여 Table 2과 3에 각 구간에서의 각 열전달의 온도를 나타내었다. 각 구간마다 열전달의 경계 조건이 변화하므로, 각 구간마다 시뮬레이션을 반복적으로 수행하여 계측 결과와 가장 유사한 경계조건을 찾고자 하였다.

4. 유한요소 해석 모델 정립 및 결과

4.1 모델의 정립

정확한 해석의 수행을 위해 케이스와 코어를 모두 3차원 모델링하였고, 사용한 요소는 8절점 블록 요소(iso-parametric eight-node solid element)이다.

총 요소 및 절점의 수는 6850, 10336개 이다. Fig. 6은 이러한 요소의 형상 및 열전달 부착위치에서의 절점 번호를 나타낸다. 코어의 경우는 열박음 직후부터 해석에서 고려될 수 있도록 그 전 공정에서는 비활성화된 요소(deactivated element)로 설정하여 실 공정과 동일하게 고려하였다. 시뮬레이션은 온도 계측 데이터가 존재하므로 Table 2에서의 2)번 즉 고주파 가열 직후를 초기조건으로 하여 수행하였다. 요소 형성시 온도 채널이 부착된 위치에 절점이 형성되도록 모델링하였으며, 케이스의 경우는 두께방향으로 3개의 요소를 형성하여 두께방향으로의 열전달을 고려하였다. 그리고, 코어의 경우 케이스와 접촉되는 면에서 열전달이 일어나므로 이 영역은 세밀한 요소로 형성하였다. 초기 조건은 6개의 온도 채널에서 측정된 온도

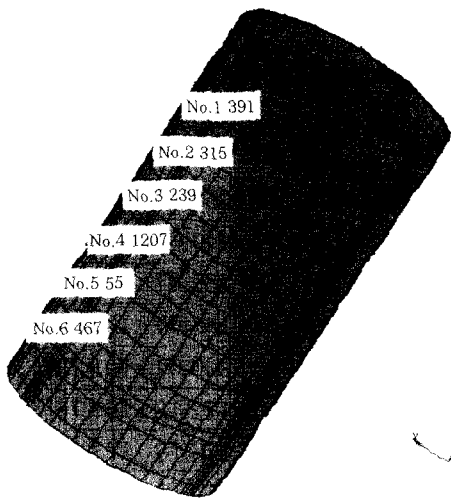


Fig. 6 Mesh generation and node number in position of thermocouple

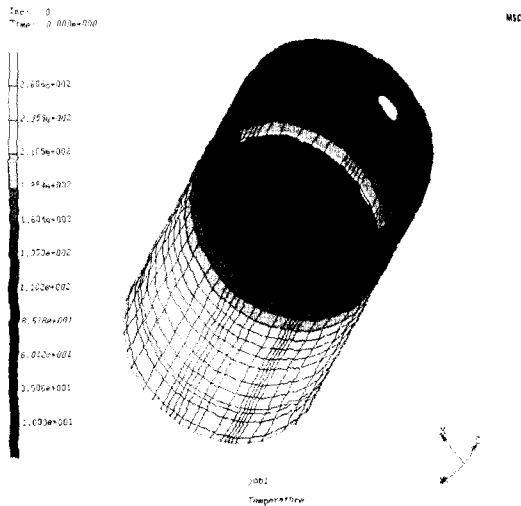


Fig. 7 Initial Condition

값을 기준으로 각 채널 사이는 선형적인 온도 구배를 지니는 것으로 가정하여 채널 사이의 길이와 절점의 수를 고려하여 각 절점에 온도값을 부여하였고 케이스 두께방향으로는 Fig. 5의 결과를 기준으로 각 5℃내외의 온도차이를 부여하였다. Fig. 7은 이러한 초기조건을 나타낸다.

열박음 공정의 시뮬레이션에서 까다로운 부분은 열박음 직후 케이스와 코어 사이의 접촉면 처리 문제이다. 즉, 열박음 직후부터 케이스와 코어 사이의 계면은 실질적으로 점 접촉하므로 접촉저항(thermal contact resistance)이 존재하므로 실질적으로 큰 열전달이 일어나지 못한다. 그 이유는 이러한 접촉저항은 주로 표면 거칠기에 기인하며 접촉점들은 대부분 공기로 채워진 갭들과 함께 산재해 있기 때문이다. 그

러나, 접촉저항은 결합압력이 증가하여 접촉면적이 증가하면 급격히 줄어든다. 그러므로, 열박음 직후에는 케이스에서 코어로의 열전달이 적으나 케이스가 식으면서 점점 수축함에 따라 결합압력이 증가함으로써 열전달은 증가한다. 이러한 현상을 모델링하기 위해 본 연구에서는 케이스와 코어가 접촉하는 부분에 열박음 직후부터 상온으로 냉각될 때까지 열전도도가 점차적으로 증가하는 갭요소(gap element)를 형성하였다. Fig. 8은 갭요소의 형성 영역과 시간에 따른 열전도도의 변화를 나타낸다.

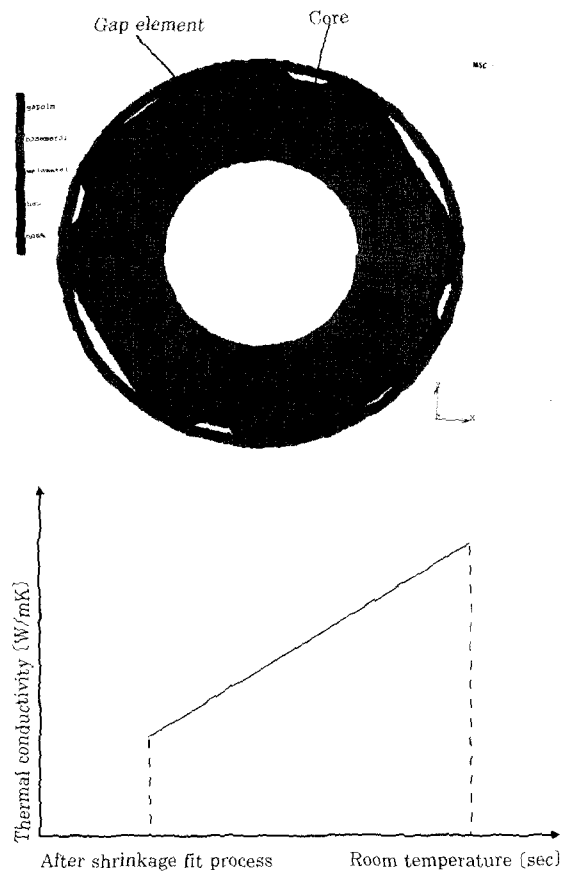


Fig. 8 Region of gap element and transition of thermal conductivity

3차원 열전달 해석을 위해 필요한 케이스 및 코어의 열적 물성치인 열전도도와 비열은 온도의 함수로 고려하였으며, 시뮬레이션의 control procedure는 auto-stepping을 이용하였다. 여기서 initial fraction은 0.5초, 증분당 최대 온도 허용 범위는 20℃로 하였다. 해석 구간은 케이스가 고주파 가열 된 직후부터 3차 강제 냉각 후 서냉에 이르기까지의 총 11구간이다. 각 해석 구간마다 경계조건은 바뀌며 이는 현장에서의 철저한 관찰로서 고려하였다.

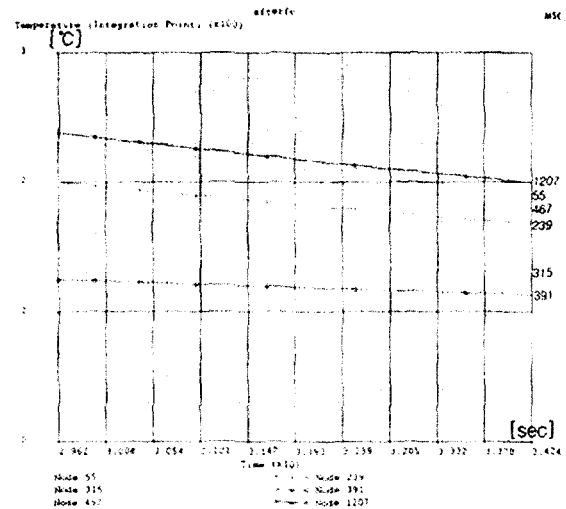
4.2 해석 결과

상기와 같이 정립된 수치모델을 이용하여 경계조건이 변하는 즉 Table 2에 나타난 각 공정 구간 별로 반복 해석을 수행하고 그 결과를 계측 결과에 비교하여 그 구간에서의 가장 적합한 경계조건을 설정하였다. 각 공정 구간에서의 해석과 계측 결과의 온도 차이는 5℃ 이내가 되도록 경계조건을 설정하였는데 이는 세밀한 현장 관찰로서 이루어졌다. 예를 들면, Table 2에서 2)~4)구간의 공정을 현장에서 관찰한 결과 (Fig. 2 참조) 고주파 코일이 케이스의 안쪽에 들어가서 가열되고 전원이 오프된 후 대략 1초 정도 머무른 후에 케이스 밖으로 빠져 나오므로 이 동안은 케이스의 내면에는 대류 열전달은 없고 복사만 있는 것으로 경계조건을 잡아주었다. 그리고, 케이스를 받치고 있는 지그가 케이스의 Top-cap 쪽 외면을 20mm 정도 감싸고 있으므로 이 구간도 대류 열전달이 없는 것으로 가정하였다. 또한, 3)시점에서 지그가 케이스를 들어 올리므로 지그와 케이스의 접촉부에는 대류 열전달이 없는 것으로 경계조건을 잡아 주었다.

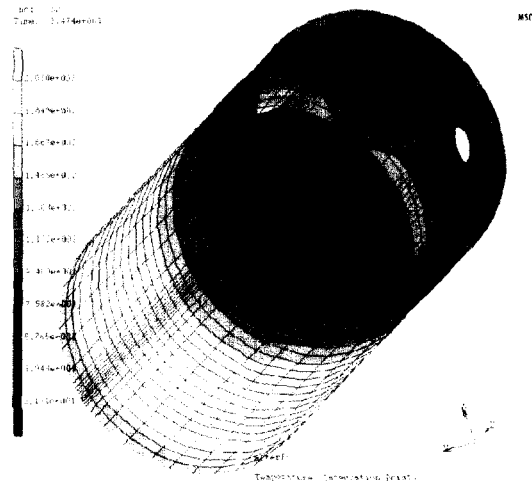
본 수치모델에서 경계조건 설정이 어려운 부분은 열박음 직후 케이스와 코어와의 접촉 부분과 열박음 후 이어지는 3번의 강제 냉각 구간이다. 여기서 케이스와 코어의 접촉 문제는 상기에서 설명한 껍요소로서 해결하였다. 강제 냉각의 경우는 대류 열전달 계수가 자연 대류의 경우 보다 수십에서 수백 배에 달하기 때문에 어느 정도 수준으로 그리고 케이스의 어느 영역에까지 설정해주는냐가 중요하다. 그리고, 현장에서는 1차 강제 냉각의 경우는 1군데에서만 에어 노즐을 이용하여 냉각시키고 2, 3차는 6군데에서 냉각을 시키기 때문에 열전달 경계조건이 서로 다르다. 이러한 단계에서 필요한 것이 바로 각 공정 단계에 대한 세밀한 관찰, 공정 지식 및 정확한 계측 데이터와 해석 모델사이의 Feed Back 및 Tuning이다. 본 연구에서는 이러한 공정상의 변화 부분을 세밀히 관찰하여 실질적인 경계조건을 설정해주었다.

Fig. 9는 1차 강제 냉각 구간 동안 각 온도 채널에서의 온도 변화와 1차 강제 냉각 직후 케이스의 온도 분포를 나타내는데 강제 냉각에 의한 불균일한 온도 분포가 잘 나타나 있다. 그리고, Table 2의 계측 결과와 비교해 볼 때 상당히 유사한 결과를 보여주고 있다.

Fig. 10은 이러한 방법으로 해석한 결과를 바탕으로 각 채널에 해당하는 절점의 온도 사이클을 전체적으로 나타낸 것인데 1차 강제 냉각 후의 2, 3차 강제 냉각 등도 제대로 시뮬레이션 되었음을 알 수 있고 Fig. 4(a)의 축방향 계측 결과와 상당히 좋은 일치성을 보여주고



(a) Temperature variation



(b) Temperature distribution

Fig. 9 Temperature variation during first air cooling and temperature distribution after first cooling

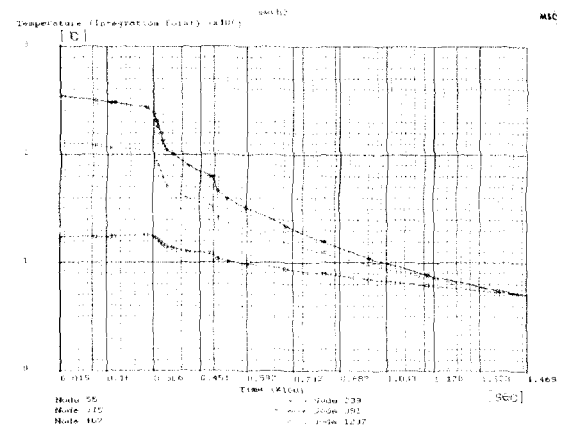


Fig. 10 Temperature variation by simulation during total process

있으며 축 방향 열전대가 부착된 위치에서의 각 절점의 온도가 고주파 가열 직후부터 대략 146초 후 전체적으로 70℃ 내외의 같은 온도에 도달함을 알 수 있다.

5. 결 론

제품의 열변형을 제어하기 위해서는 세밀한 공정 분석, 현장 계측과 시뮬레이션 사이의 Feedback 및 Tuning이 필수적이며, 본 연구에서는 열박음 공정에 의한 케이스의 변형을 제어하기 위해 우선각 공정에 대한 온도 계측 및 열전달 수치모델 정립을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 케이스의 축 및 원주방향 온도 계측 결과 축방향으로 동일한 위치에서의 원주방향의 온도가 일정하지 않게 나타났는데 이로서 고주파 가열시 코일이 케이스 내로 삽입될 때 한쪽으로 치우쳐 틈새가 일정하지 않음을 예측할 수 있었다. 그러므로, 열박음 후 케이스의 불균일한 변형을 줄이기 위해서는 고주파 가열 공정에서 케이스와 코일의 틈새에 대한 관리가 필요하다.

2) 고주파 가열시 케이스의 내·외면의 온도 차이를 계측한 결과 그 차이가 미소하였으므로 케이스의 내·외경의 변화는 동일하며 변형 계측은 외경만 측정해도 무방할 것으로 여겨진다.

3) 열박음 직후 케이스와 코어와의 계면 사이에 존재하는 접촉저항을 시간의 증가에 따라 열전도도가 증가하는 형태를 지니는 핵심요소로서 모델링하고 3번의 강제 냉각을 포함하는 기타 공정 또한 현장의 세밀한 공정 분석과 시뮬레이션 결과 사이의 체계적인 고찰로서 열전달 수치 모델을 정립할 수 있었다.

4) 이렇게 정립되어진 수치 모델의 해석 결과 특징적인 각 공정의 변화 및 열박음 후 케이스의 평균 온도가 계측 결과와 유사하게 나타나 정립되어진 수치 모델의 타당성을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. K. Satoh, T. Terasaki : Effect of Weld Conditions on Welding Deformation, Welded Structure Materials, JWS, 45-1(1976), 302-308
2. Shigetomo Matsui : Control of Weld Distortion in Thin-skin Welded Structures, JWS, 52-5(1983), 58-66
3. Akira Sakaguchi, Takahiro Tanaka : Estimate and Counterplan for Welding Deformation-Thin Plates Steel Structure, JWS, 60-6(1991), 14-19
4. P. Tekriwal and J. Mazumder : Finite Element Analysis of Three-Dimensional Transient Heat Transfer in GMA Welding, Welding Journal(1988), 150s-156s
5. 서승일, 장창두 : 용접 구조물의 변형 예측에 관한 연구, 대한용접학회지, 15-5(1997), 64-73
6. S.B.Brown and H.song : Implications of Three-Dimensional Numerical Simulations of Welding of Large Structures, Welding Journal, Research Supplement, 71-2(1992), 55s-62s
7. Ueda, Y., and Nakacho, K. : Simplifying methods and deformation due to multi-pass welding, Trans. Japan Weld. Res. 11(1982), 95-103
8. Chakravarti, A. P., Malik, L. M., and Goldak, J. A. : Prediction of distortion and residual stress in panel welds, Symposium on Computer Modeling of Fabrication (1986)
9. Andersson, B., and Karlsson, L. : Thermal stresses in large butt-welded plates, Thermal Stresses,(4)(1981) : 491-500
10. V.J., Papazoglou : Analytical techniques for determining temperatures, thermal strains, and residual stresses during welding, Ph.D. Thesis, MIT., Cambridge, Mass(1981)
11. E. Friedman : Thermomechanical analysis of the welding process using finite element method, Journal Press, Vessel Tech. ASME, series J(1975), 206-243
12. Koichi Masubuchi : Research Activities Examine Residual Stresses and Distortion in Welded Structures, Welding Journal, Dec(1991), 41-47
13. K.W.Mahin, W.Winters, T.M.Hosbonds and S.R.Macewen : Prediction and Measurement of Residual Elastic Strain Distributions in Gas Tungsten Arc Welds, Welding Journal(1991), 245s-259s