

열박음 공정이 케이스의 변형 및 잔류응력에 미치는 영향에 관한 연구

A Study on the Effect of Shrinkage Fit Process on the Deformation and Residual Stress of Case-(I)Temperature monitoring and heat transfer analysis-

장경복*, 정진우*, 강성수*, 최규원**, 박찬우**, 조상명**

* 부산대학교 기계기술 연구소 미시소성 연구실

** 부경대학교 대학원 생산가공학과

1. 서론

실린더와 코어 등으로 이루어진 제품의 경우 특성상 기밀성이 우수하고 소음이 적어야 하는 경우가 많은데, 이 경우 작동부의 틈새가 적을수록 유리하다. 이러한 기밀성과 소음에 가장 큰 영향을 미치는 것은 제품의 제작 과정에서 발생하는 변형이다. 제품의 변형은 체결 변형과 용접 변형으로 크게 나눌 수 있는데, 양자는 제품의 공정상 연결되어 있기 때문에 즉, 체결 변형이 용접 변형의 초기 조건으로 작용하기 때문에 체계적인 고찰이 필요하다. 산업 현장에서는 이러한 제품의 변형이 문제가 되는 경우 현장에서는 생산에 차질을 주면서까지 이를 고찰하기는 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 때문이다. 그러나, CAE 기법이 일반화되면서 생산성에 차질을 주지 않고 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 어느 정도 이러한 문제를 고찰할 수 있게 되었다.

이러한 시뮬레이션은 현장에서 연구소로 의뢰를 함으로서 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 중요하다. 이를 위해서는 각 공정상의 지식을 보유한 자가 현장에서 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 공정 시뮬레이션을 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)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 조사하였다. 즉, 계측에 의한 데이터와 시뮬레이션에 의한 데이터와의 Feedback 및 Tuning을 통하여 정확한 온도분포 및 변형을 예측할 수 있는 3차원 수치모델을 정립하여 예측하여 제품의 변형을 제어할 수 있는 방안을 마련하고자 하였다.

2. 재질 및 형상

본 연구의 대상인 케이스의 재질은 KSD3501에서 규정하고 있는 일반 열간 압연 연강판(SPH-1)으로서 두께는 3.2mm이다. 케이스의 형상은 Fig.1과 같으며, 케이스는 고주파 가열에 의해 확관된 후 내부 코어가 열박음 되어지고 3번의 강제 냉각을 거침으로서 열박음 공정이 마무리되어진다. Fig.2는 이러한 일련의 공정을 그림으로 나타낸 것이다.

3. 온도 계측

열박음 공정으로 인해 발생하는 케이스와 열변형은 기본적으로 케이스의 열이력에 의한 것이므로, 고주파 가열에 의한 케이스의 확관, 열박음(Shrinkage fit), 1차~3차 강제 공랭(Air Cooling), 서냉에 이르기까지의 케이스의 온도 이력을 온도 모니터링 시스템을 이용하여 측정하였다. 케이스 외표면에

축방향으로 6군데에 열전대를 부착하여 측정하였는데, 열전대 부착위치는 Fig.1에 케이스의 형상과 함께 나타나있다. 이렇게 하여 계측한 온도 이력의 결과를 Fig.3에 나타내었다. 고주파 가열로 인한 온도의 상승과 1~3차에 걸친 공랭에 의한 냉각이 잘 나타나고 있음을 알 수 있다.

이러한 온도 이력을 시뮬레이션 할 때 가장 중요한 경계조건이 바뀌는 것을 기준으로 대략 10개의 구간으로 구분하여 Table 1에 각 구간에서의 각 온도 채널의 온도와 같이 나타내었다. 각 구간마다 열전달의 경계 조건이 변화하므로, 각 구간마다 시뮬레이션을 반복적으로 수행하여 계측 결과와 가장 유사한 경계조건을 찾고자 하였다.

4.유한요소 해석 결과 및 고찰

정확한 해석의 수행을 위해 3차원 모델을 정립하였고, 사용되어진 요소는 8절점 블록 요소 (Iso-parametric eight-node brick element)이다. 총 요소 및 절점의 수는 2173, 4534이다. 시뮬레이션은 온도 계측 데이터가 존재하므로 Table 1에서의 ②번 즉 고주파 가열 직후를 초기조건으로 하여 수행하였다. 만약, 이러한 온도 계측 데이터가 없다면 고주파 가열 공정도 시뮬레이션을 해야하나 본 연구에서는 계측 데이터가 지원되기 때문에 이를 생략할 수 있으며, 이러한 부분이 공정 시뮬레이션에서 계측 데이터의 중요성을 나타내는 것이다. Fig.4는 요소의 형상과 초기조건 그리고 Table 1에서 ②고주파 가열 직후~③코어와의 열박음을 위해 지그가 케이스를 들어올리는 지점 사이의 경계조건을 나타낸 것이다. 요소 형성시 온도 채널이 부착된 위치에 절점이 형성되도록 모델링하였으며, 초기 조건은 6개의 온도 채널에서 측정된 온도값을 기준으로 각 채널 사이는 선형적인 온도 구배를 지니는 것으로 가정하여 각 절점에 온도값을 부여하였고 원주 방향으로는 동일한 온도를 지니는 것으로 가정하였다. 여기서, 3차원 열전달 해석을 위해 필요한 케이스의 열적물성치 열전도도와 비열은 온도의 함수로 대입하였다. Fig.5는 Table 1에서 ②~③구간 사이의 각 온도 채널에 해당하는 절점의 온도 프로파일과 케이스의 최종 온도 분포 형상이다. 그리고, Table 2는 ③시점에서의 계측 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하여 나타낸 것이다.

해석 시간은 총 9.36초인데, 현장에서 이 구간 공정 관찰 결과(Fig.2참조) 고주파 코일이 케이스의 안쪽에 들어가서 가열되고 전원이 오프된 후 대략 1초 정도 머무른 후에 케이스 밖으로 빠져 나오므로 이 동안은 케이스의 내면에는 대류 열전달이 없는 것으로 경계조건을 잡아주었다. 그리고, 케이스를 받치고 있는 지그가 케이스의 Top-Cap쪽 외면을 20mm 정도 감싸고 있으므로 이 구간도 열전달이 없는 것으로 가정하였다. 시뮬레이션의 Control Procedure는 Auto-Stepping을 이용하였으며, 여기서 initial fraction은 0.5초, 증분당 최대 온도 허용 범위는 20℃로 하였다. 이러한 경계조건 선택은 공정상의 지식과 세밀한 관찰 그리고 계측 데이터가 제공되지 않으면 어려우며, 이러한 부분이 시뮬레이션과 계측 결과와의 Feedback과 Tuning이 필요한 이유이다. 기본적인 조건 외에 각종 경계조건을 바꿔 가며 대략 20번 정도의 해석을 수행하였으며, 그 결과 이 공정 구간에서 가장 적합한 열전달 수치 모델을 정립할 수 있었다.

5.결론

생산성에 차질을 주지 않고 변형과 같은 제품의 불량률 조절하기 위해서는 CAE 기법의 적용은 필수적이며, 이 경우 시뮬레이션과 공정상의 지식 그리고 계측에 대한 전문 지식이 복합적으로 요구되며, 각 데이터간의 Feedback 및 Tuning을 통해 각 현장에 적합한 시뮬레이션 모델을 정립하는 것이 가장 중요하다. 본 연구에서는 이러한 개념을 토대로 케이스와 열박음 공정에 적합한 시뮬레이션 모델을 정립할 수 있었다.

6.참고문헌

- 1] P. Tekriwal and J. Mazumder : "Finite Element Analysis of Three-Dimensional Transient Heat Transfer in GMA Welding". Welding Research Supplement 151-s.
- 2] 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 Research Supplement 245-s, September 1991.

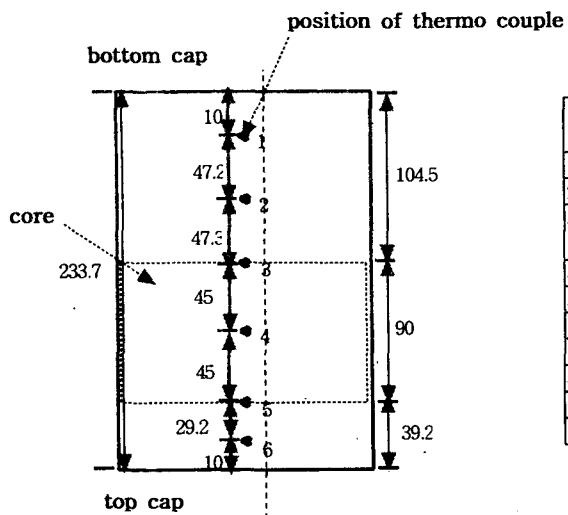


Table.1 Temperature of each channel in process

비고	Time[sec]	각 채널에서의 측정 온도[℃]					
		①	②	③	④	⑤	⑥
1]고주파가열시작	3.7	24.76	22.95	22.87	22.71	24.14	25.69
2]고주파가열직후	8.642	103.68	105.08	162.61	198.77	189.65	123.31
3]JIG가케이스를 들어올림	18	111.35	117.33	171.5	199.95	192.51	161.73
4]열박음직후	21	117.16	123.7	138.4	201.03	193.1	182.89
5]1차공랭직전	29.63	100.72	108.61	135.37	154.48	151.44	160.03
6]1차공랭직후	31.522	92.46	99.79	121.45	138.31	136.86	147.66
7]2차공랭직전	33.08	98.36	105.67	125.47	141.15	142.18	154.14
8]2차공랭직후	37.289	78.29	85.09	95.09	102.14	104.65	119.71
9]3차냉각직전	41.8	82.42	89.8	95.68	97.44	107.01	125.7
10]3차냉각직후	44.2	74.75	82.15	85.68	85.09	95.19	111.43

Fig.1 Shape of case and position of thermo couple

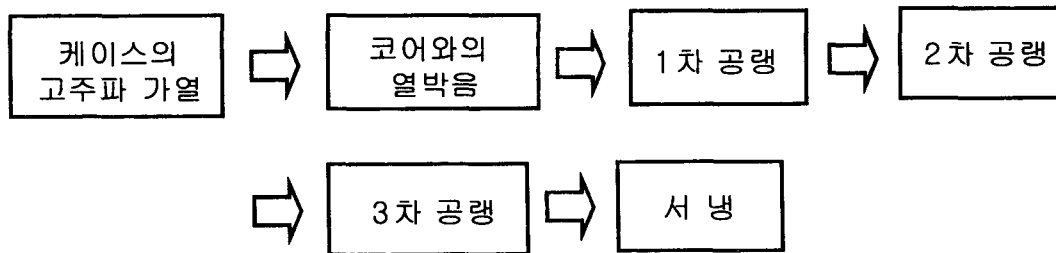


Fig.2 Diagram of Shrinkage fit process

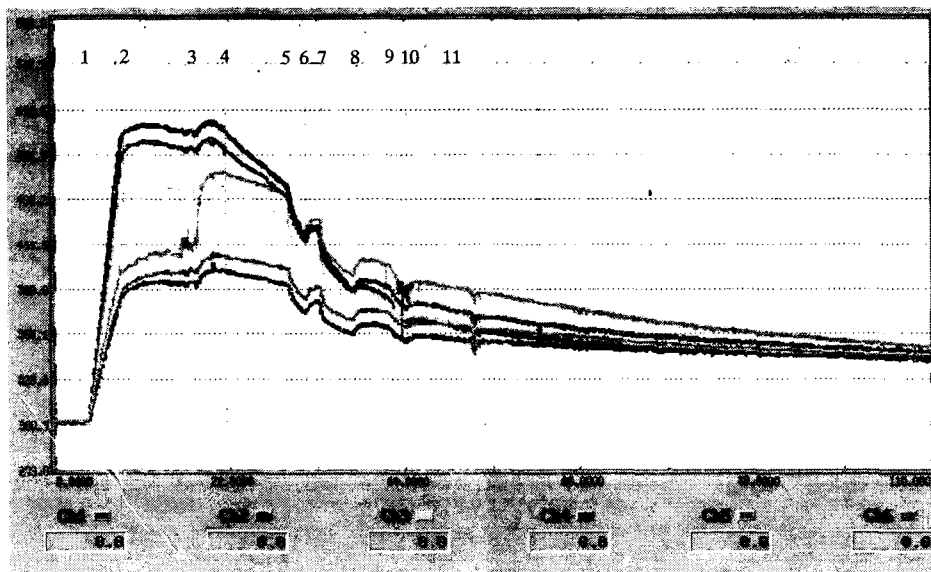


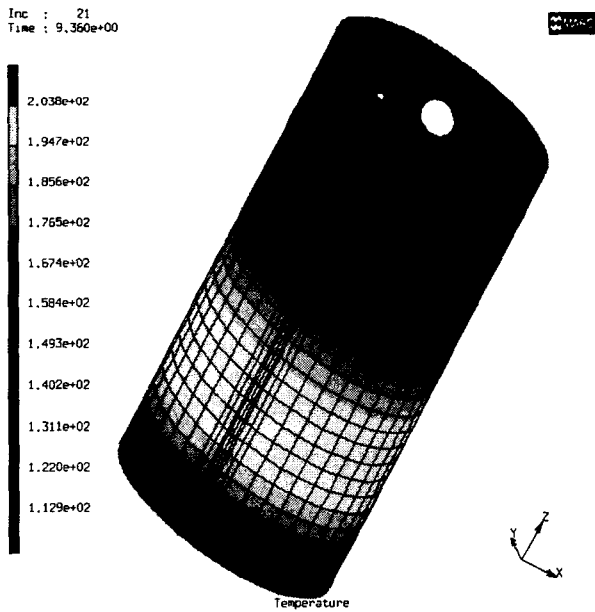
Fig.3 Result of temperature monitoring



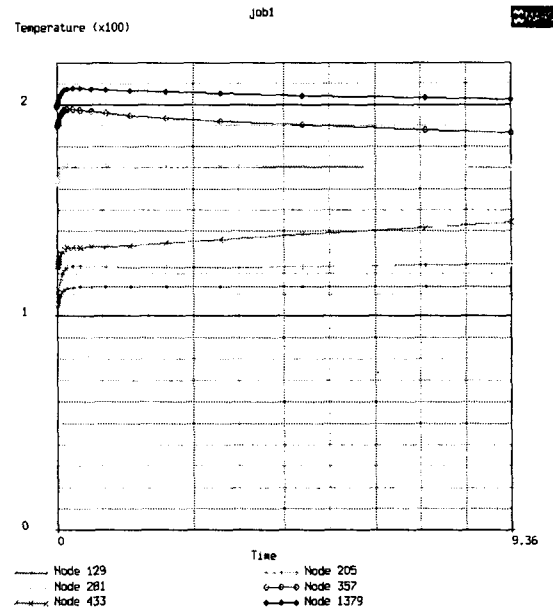
Fig.4 Mesh Generation

Table 2 Comparison between the result of analysis and measurement[°C]

Position of T.C	Node No.	Simulation	Measurement	Deviation
1	129	113.5	111.35	2.15
2	205	124.5	117.33	7.17
3	281	170	171.5	5.14
4	1379	203	199.95	3.05
5	357	188	192.51	-4.51
6	433	143.5	161.73	-18.23



(a)Temperature distribution



(b)Temperature profile

Fig.5 Temperature distribution and profile of case