

열박음 공정이 케이스의 온도분포 및 변형에 미치는 영향(II)

- 변형 계측 및 변형 해석 모델 정립 -

장경복* · 정진우* · 강성수* · 최규원** · 박찬우** · 조상명**

* 부산대학교 기계기술 연구소

** 부경대학교 생산가공학과

A Study on the Temperature Distribution and Deformation of Case in Shrinkage Fit Process(II) - Deformation Measurement and Deformation Analysis Model -

Gyoung-Bok Jang*, Jin-Woo Jung*, Sung-Soo Kang*, Kyu-Won Choi**,
Chan-Woo Park** and Sang-Myung Cho**

*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

In the previous study, temperature monitoring of case about shrinkage fit process was performed and heat transfer model was developed in detail by feedback and tuning among monitoring result, process investigation, and analysis result. The gap element in contact between case and core was effectively used in analysis model.

In present study, following things are performed to solve deformation of case due to shrinkage fit process on the basis of previous result. Above all, mechanical material properties of case are measured by case specimen for deformation analysis considering weldment of case. Deformation of case before and after shrinkage fit process is measured, too. Three dimensional deformation model is developed by the comparison and inspection between these experimental data and analysis results. Deformation analysis is simulated with the result of heat transfer analysis, in other words, non-coupled analysis is used. Finally, the countermeasure for deformation is brought up through those.

(Received March 7, 2001)

Key Words : Process investigation, Deformation problem, Shrinkage fit process, Three Dimensional analysis model, Non-coupled analysis

1. 서 론

산업 현장에서는 열변형으로 인해 많은 문제점들이 발생하고 있는데, 제품의 두께가 얇은 박판으로 이루어진 정밀 제품일수록 허용 공차가 적기 때문에 열로 인해 발생하는 제품의 변형 문제가 더 심각하다. 이렇듯 열변형으로 산업 현장에서 많은 문제점이 야기되고 있으나 산업 현장에서 생산성에 중점을 두고 있어 체계적인 대응 방안을 수립하지 못하는 경우가 많다. 그 이유는 산업현장에서 생산성에 차질을 주면서까지 고

찰하기가 어려우며, 열변형이란 제품의 형상·치수, 재질뿐 아니라 결합 조건이나 구속 조건, 결합 순서 등의 영향을 복합적으로 받는 현상으로 이를 제어하기란 상당히 어렵기 때문이다^{1,2)}. 후판 부재와 박판 부재로 구성된 본 제품의 경우 이러한 열변형은 두 부재의 강성의 차이로 인해 제어하기가 더욱더 곤란하다^{3,4)}. 만약, 본 제품에 대하여 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 있

어 유한요소법 등을 이용하여 각종 변형을 예측하는 많은 연구들⁵⁻¹³⁾이 이루지고 있으나, 그 결과가 실제 현장에서 제대로 적용되기 위해서는 이러한 기초적 연구를 바탕으로 실제 현장에서의 현상을 충분히 고려할 수 있는 구체적인 경계조건의 설정이 필요하다. 그러므로, 제대로된 수치 모델을 정립하여 정확한 결과를 도출하기 위해서는 전체 공정의 체계적인 분석, 정밀한 예측 데이터, 그리고 구체적인 경계조건의 설정이 필요하며 이들 사이의 체계적인 비교 및 검토가 필요하다.

본 연구 대상인 제품은 직경이 큰 코어가 직경이 작은 케이스 내부에 열박음 되는 것인데, 직경이 큰 코어를 케이스 내부에 억지 끼워 맞추기 위해 케이스를 고주파 가열로 팽창시킨 후 기계적인 힘으로 끼워 맞추는 공정을 거친다. 이렇듯 코어를 끼워 맞추기 위해 케이스를 짧은 시간에 가열하고 냉각시키는 과정으로 인해 케이스는 초기의 진원도 형상에서 상당히 벗어나게 된다. 그리고, 이러한 케이스의 변형은 제품 작동부의 틈새에 영향을 미쳐 결국 제품의 성능을 떨어뜨리게 된다.

본 연구에서는 전보에서 제품 제작 전 공정에 대한 체계적인 검토와 온도 모니터링 결과로서 정립되어진 열전달 수치 모델을 바탕으로 제품의 변형을 구체적으로 예측할 수 있는 변형 모델을 정립하고자 하였다. 또한, 케이스가 심용접으로 제작되기 때문에 용접부가 제품의 변형에 영향을 미칠 수 있어 이를 고려할 수 있는 모델을 정립하였다. 그리고, 이렇게 정립된 변형 모델로서 3차원 열탄소성 해석을 수행하여 제품의 변형을 제어할 수 있는 방안을 찾아내었다.

2. 케이스의 기계적 물성치 시험

케이스의 재질은 열간 압연 강판(SPHC)이고,

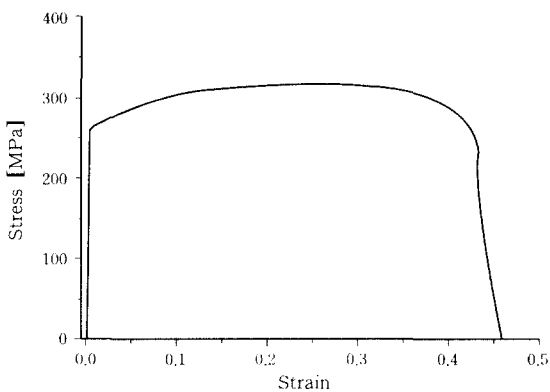


Fig. 1 Result of tensile test for case specimen

Table 1 Test result of case specimen for mechanical properties [average]

Tensile strength(MPa)	311.03
Yield strength(MPa)	283.46
Youngth modulus(MPa)	210747.81
Elongation(%)	35

roll-forming 후 고주파 심용접(High frequency resistance welding)하여 제작된다. 열탄소성 해석을 수행하기 위해서는 모델의 기계적 물성치에 대한 데이터가 필요하므로, KS B 0801 규격에 따라 케이스로 인장 시험편을 제작하여 시험하였다. 인장 시험은 총 6번 수행하였으며, Fig. 1은 인장시험으로 구해진 대표적인 응력·변형률 선도이고, Table 1은 그 결과의 평균치를 나타낸다.

케이스가 roll-forming 후 고주파 심용접(HFRW)으로 제작되기 때문에 용접부는 경화되어 모재 부분과는 다른 기계적 특성을 나타내므로 정확한 변형 해석을 위해서는 용접부를 고려하는 해석이 필요하다. 이를 위해 케이스의 용접부 경도를 측정하여 그 결과로서 용접부의 기계적 성질을 유추하였다.

Fig. 2은 케이스의 용접 심(seam)부 단면과 경도 측정 결과이며, Table 2는 이로서 얻어진 용접부의 기계적 성질이다.

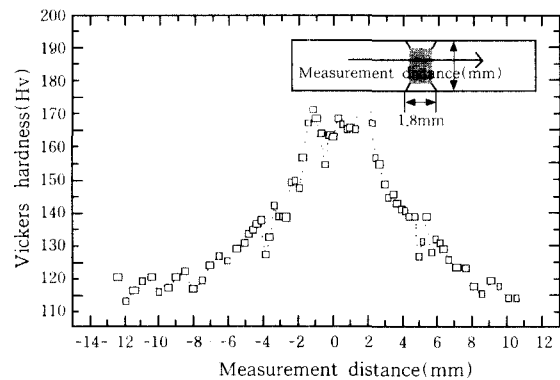


Fig. 2 Cross section and hardness distribution of seam weld part in case

Table 2 Comparison of mechanical properties between base metal and weld zone

Region	B/M	HAZ	W/M
Average	125.5	143	159.9
hardness[Hv]	Ratio	1	1.154
Yield strength[MPa]	283.46	327.11	394.26
Tensile strength[MPa]	311.03	358.9	432.61

3. 케이스 진원도 계측 및 결과

열박음 전·후의 케이스 진원도 변화를 알아보기 위해 3차원 측정기를 이용하여 케이스의 외경을 축 방향으로 10곳에서 측정하였다. 이때 측정기준은 용접 심부(0°)이며 측정간격은 10°로하였다. Fig. 3는 진원도 계측 위치를 나타내며, Fig. 4는 그 결과중 ②, ⑤, ⑧ 위치에서의 열박음 전 케이스 변형을 나타낸다. 우선 열박음 전의 케이스는 용접 심부가 다른 부분에 비해 대부분 많이 튀어나와 있는 형태의 변형을 지니고 있음을 알 수 있다. 이것은 케이스 제작 과정에서 고주파 저항용접 후 진원도를 맞추기 위해 교정(sizing)하는 과정에서 용접부는 경화되어있으므로 소성변형하기 어려워 뺏뺏한 상태로 건디기 때문에 나타나는 변형이다. 결과적으로 열박음 전 케이스의 진원도도

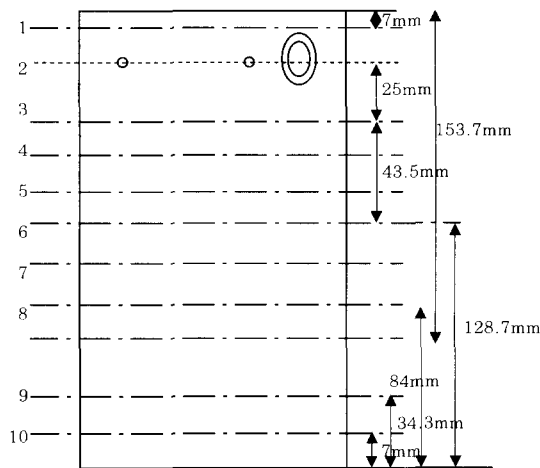


Fig. 3 Measurement position of case deformation

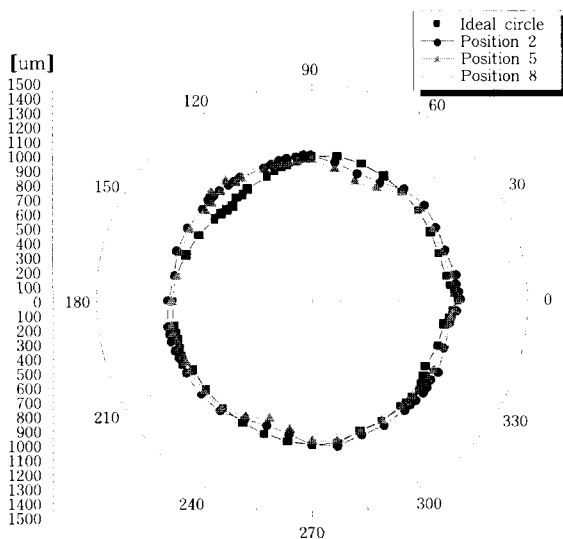


Fig. 4 Result of deformation measurement for case before shrinkage fit process

공정상 관리가 필요할 것으로 판단된다.

열박음 후의 케이스의 변형 형태(Fig. 9참조)는 크게 두 가지의 뚜렷한 현상을 나타내고 있다. 즉, 코어와 케이스의 비접촉부에서 케이스의 수축변형이 심하고 접촉부에서는 상대적으로 적은 수축이 발생하여 초기 형상 보다 다소 튀어 나오는 변형 형태를 나타내는 것과 초기에 많이 튀어나와 있던 경화된 영역인 용접 심부가 주위의 수축 변형으로 인해 더 많이 튀어나오는 형태의 변형을 나타내었다. 그러므로, 용접 심부에 대한 적절한 처리가 필요한 것으로 판단된다. 그리고, 이러한 변형 양상은 다양한 시편에서 계측한 결과 코어가 열박음 되는 위치에 따라 상당히 다르게 나타남을 확인할 수 있었다. 즉, 현장에서 코어가 항상 일정한 위치에 열박음 되는 것이 아니라 작업자나 라인 상태에 따라서 그 위치가 달라져 이것이 열박음 후 케이스의 변형에 상당히 큰 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었다. 그러므로, 케이스의 변형을 줄이기 위해서는 코어가 열박음 되는 위치에 대해서도 적절한 관리가 필요할 것으로 여겨진다.

4. 변형 해석 모델 정립

4.1 해석영역 및 요소형성

모든 방향에 대해 팽창 및 수축이 자유로운 균일한 구조물에서 균일한 온도 변화가 발생한다면 열응력 및 열변형은 발생하지 않으나 구조물의 팽창·수축에 대한 구속이나 불 균일한 온도 분포가 발생하면 열응력 및 열변형이 발생한다. 본 모델의 경우 케이스의 확관을 위해 고주파가열 코일이 삽입되는 부분이 케이스와

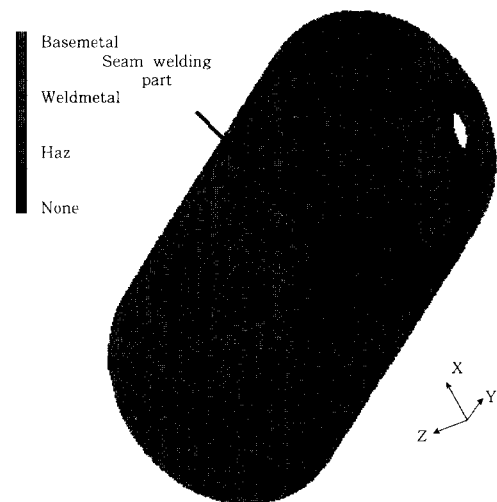


Fig. 5 Mesh generation considering seam welding of case

코어와의 접촉부 영역에 제한되므로 케이스에는 불균일한 온도 변화가 발생하며, 코어가 열박음되고 나면 코어와 케이스가 접촉하는 부분은 코어에 의해 케이스의 수축변형이 제한되므로 상당히 불균일한 열변형이 발생되리라는 것을 예상할 수 있다. 이렇듯 역학적으로 예상되는 열박음에 의한 케이스의 열변형 메커니즘을 면밀히 검토하고 또한 그 변형량을 정확히 예측하기 위해서는 상세한 변형 모델을 정립할 필요가 있다.

정밀한 변형 해석 모델이 정립되면 열박음 전·후의 케이스 변형에 영향을 미치는 인자의 파악이 가능하고 궁극적으로 케이스 변형을 줄일수 있는 공정상의 관리 기준을 정할 수 있다.

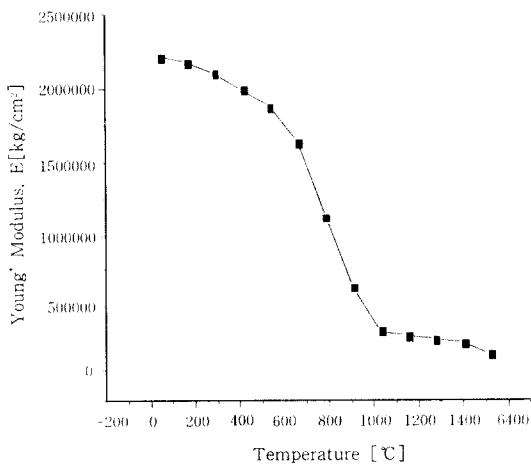
변형 해석 모델이 세밀하게 정립되기 위해서는 우선 정밀한 열전달 해석 모델이 정립되어 모델의 시간에 대한 온도 이력을 정확히 해석해낼 수 있어야 한다. 이는 전보에서 충분히 검토되었다. 그러므로, 본 연구에서는 기 정립된 열전달 해석 모델을 통하여 구하여진 모델의 온도 이력을 변형 모델에서 열적 하중(thermal

load)으로 받아들여 비커플링 해석(non-coupled analysis)하여 정밀 변형 해석을 수행하였다.

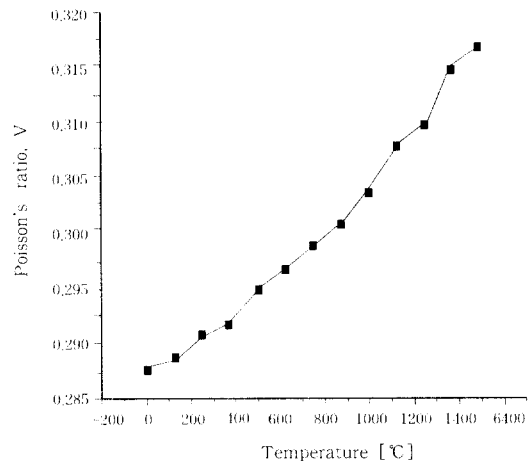
Fig. 5는 케이스의 용접 심(seam) 부를 고려하는 모델의 요소형상을 나타낸다. 그림에서 나타나듯이 케이스의 용접 심부를 Fig. 2의 측정 결과를 바탕으로 용접금속 및 열영향부로 나누어서 실제 측정된 영역만큼 기계적 물성치를 달리 대입함으로써 모델에서 고려해주었다. 그리고, 정밀 변형 해석을 위해 기계적 성질은 온도의 함수로서 고려하였는데, Fig. 6은 모델의 요소를 형성함에 있어 기본적으로 변형 계측이러한 기계적 성질을 나타낸다. 위치에 절점이 존재하도록 구성하였으며, 계측 위치 외의 절점에는 그 주변의 변형 데이터를 기준으로 보간법을 이용하여 변형량을 계산하여 초기 변형으로 고려하였다

4.2 해석 결과 및 계측 결과와의 비교

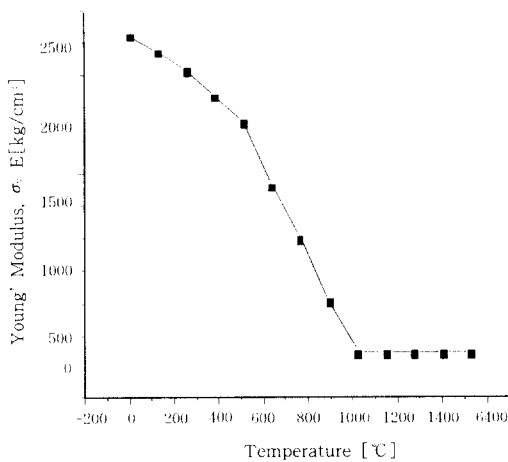
본 연구의 대상인 케이스의 열박음 공정에 의한 케



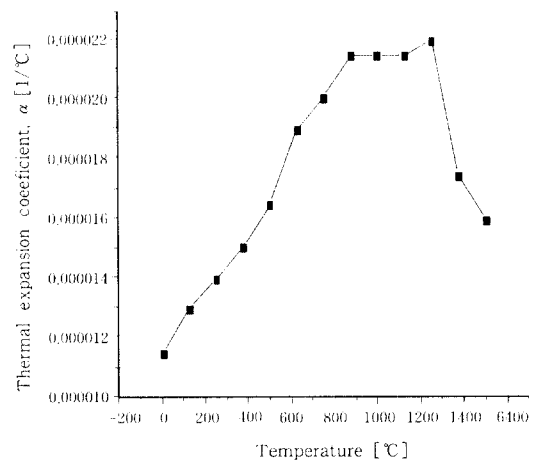
(a) Young's modulus



(c) Poisson ratio



(b) Yield stress



(d) Thermal expansion coefficient

Fig. 6 Mechanical properties with temperature

이상의 변형을 예측하는 해석을 수행할 때, 일반적으로 간단하게 해석할 수 있는 방안이 케이스의 초기 형상을 고려하지 않는 즉 케이스의 열박음 전 상태를 진원으로 보고 해석하는 것과 케이스의 용접 심(seam) 부를 고려하지 않는 해석을 수행하는 것이다. 그래서, 본 연구에서는 이렇듯 단순화된 변형 해석을 우선 수행하여 보았는데, 그 결과 전체적으로 진원에서 수축

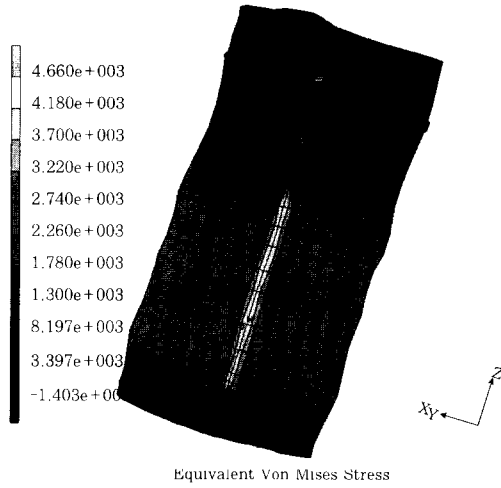
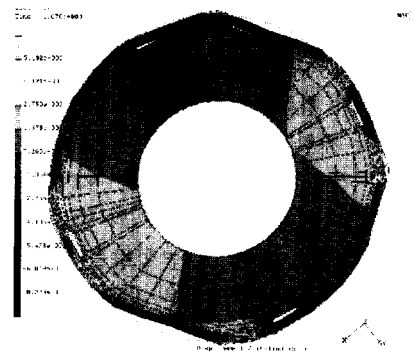
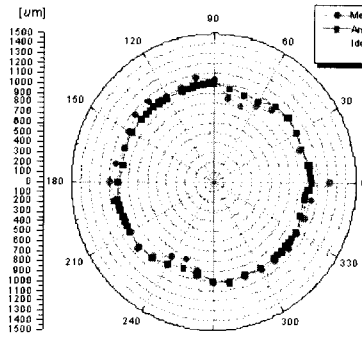


Fig. 7 Result of analysis considering initial shape and weldment of case

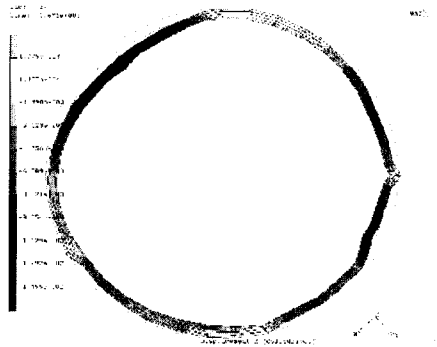


(a) Deformation shape($\times 50$)

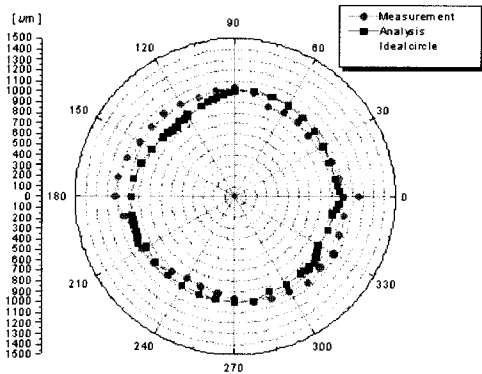


(b) Deformation quantity

Fig. 9 Deformation shape and quantity in the measurement of position⁵⁾

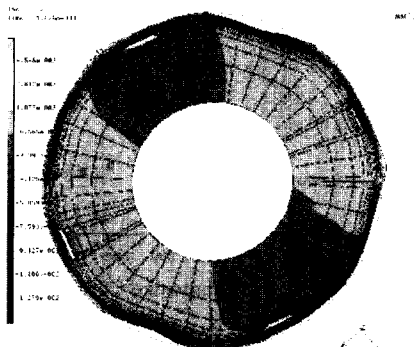


(a) Deformation shape($\times 50$)

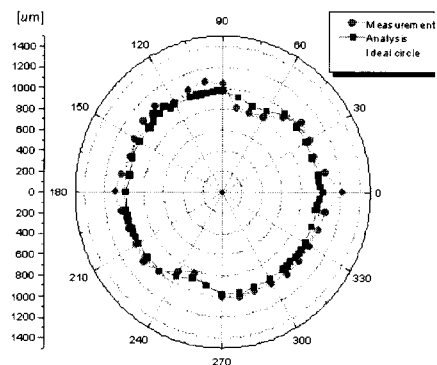


(b) Deformation quantity

Fig. 8 Deformation shape and quantity in the measurement of position²⁾



(a) Deformation shape($\times 50$)



(b) Deformation quantity

Fig 10 Deformation shape and quantity in the measurement of position⁸⁾

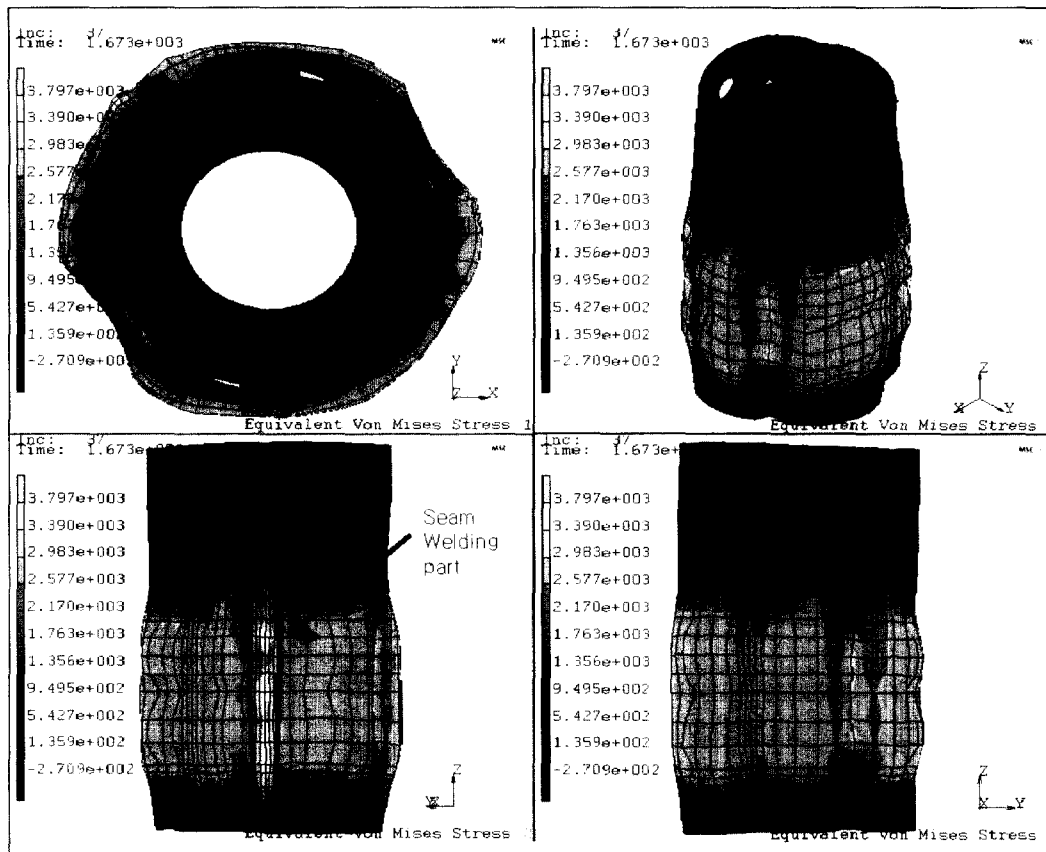


Fig. 11 Distribution of Von-mises equivalent stress in final deformation shape

되는 변형 양상을 보이고 있어 실제 수축된 부분과 팽창된 부분이 공존하는 계측 결과와는 상당한 차이를 보이고 있으며, 용접 심부에서도 계측 결과에서는 튀어나오는 현상이 보이고 있지만 해석 결과에서는 이러한 양상이 전혀 나타나지 않았다. 즉, 모델의 초기조건 중요성 및 모델에 용접부가 존재할 경우에는 정밀 변형해석을 위해 이를 반드시 고려하는 해석을 수행하여야 한다는 사실을 확인할 수 있었다.

Fig.7은 Fig.4에서 계측된 케이스의 초기형상과 용접 심부를 고려한 해석을 수행한 결과 모델의 전체적인 변형 양상을 50배 확대하여 나타낸 것이다. 계측 결과에서 확인되었듯이 케이스와 코어와의 비 접촉부에서는 상당한 수축 변형이 발생하고 있고 접촉부에서는 다소 튀어나오는 변형 양상이 잘 나타나고 있어 변형 모델의 타당성을 어느 정도 확인할 수 있다.

모델의 전체적인 변형 모드가 계측 결과와 유사하게 나타났으므로 구체적으로 각 변형 계측 위치에서의 변형 양상 및 변형량을 확인해보기 위해 Fig.8, 9, 10에 Fig.4의 계측 결과와 동일한 위치에서의 변형 모드와 변형량을 계측 결과와 함께 나타내었다. 변형량도 $10\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$ 수준까지 잘 맞고있어 정립

되어진 변형 모델이 정성적 뿐만이 아니라 정량적으로도 상당히 타당함을 확인할 수 있다.

Fig.11은 최종 변형 모드에서의 잔류응력을 보여주고 있다. 경화 영역인 용접부에서 가장 큰 응력이 집중되고 있으며, 케이스의 수축이 코어에 의해 구속되는 케이스 내면에서도 상당한 응력이 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 그러므로, 열박음 후 케이스의 변형은 케이스의 초기 형상과 케이스의 수축을 코어가 어느 시점에서부터 구속하느냐에 의해 결정된다고 볼 수 있다. 즉, 케이스의 변형을 줄이기 위해서는 현재 제품상 관리되는 케이스와 코어와의 치수 공차, 그리고 케이스의 가열 온도 사이의 적절한 조합이 가장 중요하다는 것을 알 수 있다. 그리고, 변형 계측시 공정관찰에서 나타났듯이 코어가 케이스에 열박음되는 위치는 케이스의 변형 모드에 상당한 영향을 준다.

이렇듯 케이스의 변형에 영향을 주는 다양한 인자들에 대하여 정립되어진 변형 모델로서 검토함으로써 현재의 케이스 고주파 가열 온도가 다소 높으며, 코어의 열박음 시기가 다소 빠르다는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

열박음 공정 후 케이스의 변형을 최소화하기 위해 전보에서 정립되어진 열전달 모델을 이용하여 변형해석 모델을 정립하고, 케이스의 변형을 실험 측정하여 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 열박음 전 케이스의 초기 형상을 측정한 결과 경화영역인 용접 심(seam) 부가 많이 튀어나와 있는 변형 모드를 나타내어 열박음 전 케이스의 초기 진원도도 관리가 필요할 것으로 판단된다.

2) 열박음 후 케이스는 코어와의 비 접촉부에서는 수축변형이 상당히 심하고 경화영역인 용접 심부는 주위의 수축 변형으로 인해 더 많이 튀어나오는 형태의 변형을 나타내었으므로 용접 심부에 대한 적절한 처리가 필요한 것으로 여겨진다. 또한, 코어가 케이스에 열박음되는 위치의 편차가 심하므로 이에 대한 관리도 필요함을 알 수 있었다.

3) 열박음 후 케이스와 코어와의 접촉부를 갭요소(gap element)로서 고려하여 정립되어진 변형 모델은 전체적인 변형 모드 뿐 아니라 변형량에서도 측정 결과와 상당히 유사한 결과를 나타내었다.

4) 이렇게 정립된 변형 모델을 이용함으로써 적절한 케이스의 고주파 가열 온도 및 코어 열박음 시기 등을 결정할 수 있었으며 실험 공정에 적용하여 케이스의 변형을 적절히 제어할 수 있었다. 그러므로, 정밀 열변형을 예측할 수 있는 변형모델의 정립을 위해서는 세밀한 공정 분석, 측정 능력, 시뮬레이션 기법 등을 통한 체계적인 검토가 필요함을 알 수 있다.

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 Counter-plan for Welding Deformation-Thin Plates Steel Structure, JWS, 60-6(1991), 14-19.
4. Nobuyoshi Shibata : Prevention and Estimation of Welding Deformation-Thick Plate Steel Structure, JWS, 60-6(1991), 20-25.
5. Ueda, Y., and Nakacho, K. : "Simplifying methods and deformation due to multi-pass welding, Trans. Japan Weld. Res. 11(1982):95-103.
6. 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)
7. E. Friedman : Thermomechanical analysis of the welding process using finite element method, Journal Press. Vessel Tech. ASME, series J, (1975), 206-243.
8. Koichi Masubuchi : Research Activities Examine Residual Stresses and Distortion in Welded Structures, Welding Journal, Dec., (1991), 41-47.
9. 서승일, 장창두 : 용접 구조물의 변형 예측에 관한 연구, 대한 용접학회지, 15-5 (1997), 64-73.
10. D.J. Smith, J.A. Goldak : Influence of postweld Heat Treatment on the Variation of Residual Stresses in 50mm Thick Welded Ferritic Steel Plates, International Journal of Pressure Vessels and piping, 51 (1992), 241-256.
11. R.I. Karlsson, B.L. Josefson : Three-Dimensional Finite Analysis of Temperatures and Stresses in a Single-pass Butt-Welded pipe, Trans. ASME Journal, Reserch Supplement, 71-2 (1992), 55s-62s.
12. S.B. Brown, H. song : Implications of Three-Dimensional Numerical Simulations of Welding of Large Structures, Welding Journal, Research Supplement, 71-2 (1992), 55s-62s.
13. J. Goldak, J. Zhou, V. Breiguine and F. Montoya : Thermal Stress Analysis of Welds (From Melting Point to Room Temperature), Proc. of International Symposium on Theoretical Prediction in Welding (1996, JWRI), 225-230. Strain Gage Method.