

特輯 : 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션

SYSWELD를 이용한 용접 프로세스 제어 기술

이 재 경 · 이 기 훈

Welding Technology for the Process Optimization by the Computer Code SYSWELD

J. K. Lee and K. H. Lee



이재경 / ATEC(주) CAE
사업부 / 1963년생 / 구조,
용접, 열처리 등의 주요 생
산 기반기술에 대한 CAE
CODE의 공급 및 건설형
업무를 담당하고 있음.



이기훈 / ATEC(주) /
1957년생 / CAD/CAM/
CAE 분야의 주요 H/W 및
상용 CODE에 대한 국내
공급 및 건설형 사명을 하
고 있음.

1. Introduction

일반적으로 용접접합부 및 그 주변부는 열에 의한 용융이나 응고 현상을 수반하므로써 모재와 다른 조직이 된다. 따라서 조직 변태를 유발하는 열 팽창부는 모재와 다른 기계적 성질을 가지게 되어 용접후에 잔류 변형 및 잔류 응력의 문제점을 야기시킬 수 있는 원인이 된다. 이 조직 변태 현상을 정확하게 파악하기 위해 종래 실험적으로 조직을 관찰하는 방법이 적용되어 왔는데, 최적의 용접 프로세스를 수립하기 위해서는 실험을 반복적으로 행해야 할 필요가 있으므로 이러한 반복적인 실험을 위해 각종 장비는 물론, 상당한 시간, 비용 및 노력이 요구되고 있다. 따라서 이러한 실험을 대체할 수 있는 중요한 수단으로서 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션 응용 기술이 근년들어 크게 부각되고 있는 추세이다.

최근 모든 산업분야에서 국내외적으로 기술 경쟁이 심화되고 있는 바 전술한 바와 같이 용접분야에서도 컴퓨터 시뮬레이션을 응용한 공정 및 재료 개발의 실용화가 적극 추진되고 있다. 이에 당사

는 1991년 부터 CAD/CAM/CAE Engineering 회사로서 제반 산업 분야에 필요한 상용 Code 공급 및 기술지원 사업을 수행하여 왔으며 특히 1995부터 본사로 부터 분리하여 CAE 전문 Engineering회사로서 주요 소재 산업 분야에 필요한 상용 Code를 취급할 뿐 아니라 박사 5명등 전문인력에 의해 본격적인 엔지니어링 업무를 전개하고 있다. 주요 Code로서는 금번 소개하고자하는 용접 및 열처리 분야에 SYSWELD 를 비롯하여, 구조분야에는 MAGMASOFT, 단조, 박판 성형등의 소성가공 분야에는 Deform, 열유체 분야에는 Fluent, FiDAP, 범용 구조해석용으로 I-DEAS 등이 있다.

SYSWELD는 세계적으로 원자력 발전소 건설분야에서 잘 알려져 있는 FRAMATOME GROUP에서 발전소 건설에 필요한 요소 기술로서 자체적으로 개발되어 실용화되었으며, 자회사인 FRAMASOFT/CSI사를 통하여 상용화된 FEM Code이다. 국내에는 이미 체철, 조선, 중공업분야 등의 산업체와, 대학교 연구기관을 중심으로 적용되고 있으며 현재 자동차를 비롯한 주요 산업체 및 연구 기관에서 크게 관심을 나타내고 있다.

이에 본 지를 통하여 SYSWELD에 의한 강의 용

접시 열, 야금학적 및 역학적인 수치해석의 기본 원리와 Coupling 개념 및 응용 사례를 중심으로 소개하고자 한다.

2. Overview on Theoretical Background

일반적으로 수치해석은 정적 또는 동적 하중을 받는 구조물의 해석에 대하여 적용되어 왔으며, 이를 위해 다수의 컴퓨터 수치해석 Code가 개발되었다. 최근 컴퓨터 하드웨어 및 소프트웨어의 발전에 따라 대형 구조물 해석이 매우 용이해졌으며, 일반적으로 상용 Code들은 비선형 문제를 고려할 수 있다. 그러나 금속 상변태 및 소성 변형이 동시에 유발되는 용접, 열처리, 표면처리 등의 제조 공정에 있어서는 구조물 거동에 미치는 영향이 매우 크지만 이러한 두가지 현상을 동시에 고려하지 못하고 있는 실정이다. 또한 이러한 공정들에 대한 수치 시뮬레이션에서는 모든 열 및 야금학적인 제어변수와 기계적인 제어변수에 대하여 고려하고 있는 반면 이에 대한 실측은 대부분의 경우 용이하지 않으며, 특히 조직에 대하여는 그 변화 과정을 알 수 없다. 그러므로 수치 시뮬레이션에 의해 제조 공정을 충분히 이해하므로써 잔류 변형, 잔류 응력등으로 유발되는 결함과 같이 제조 공정에 부정적인 영향을 미치는 현상을 개선 또는 방지시킬 수 있게 된다.

금속 상변태를 수반하는 제조 공정에 대한 수치 시뮬레이션에는 열전달, 금속 상변태 및 기계적인 제 현상간의 상호 관계에 대한 정밀한 이론적 접근이 요구된다고 하겠다. 금속 상변태는 온도 및 온도 변화율에 대한 의존성이 매우 강하고, 한편 이와는 반대로 잠열 효과(Latent Heat Effects)로 인해 온도 분포가 변화 된다. 프로세스 과정에서 상변태는 응력 발생의 주요 요인으로 작용하게 되는데 이는 고전적인 열변형 뿐 아니라 변태시 체적 변화를 수반하게 되기 때문이고, 또한 재료 거동이 특히 변태시에 변태 소성(Transformation Plasticity)이 유발되면서 조직을 구성하는 상(Phase)에 크게 의존하기 때문이다.

이미 연구자들에 의해 FEM Code내에서 열 및 기계적 거동에 미치는 야금학적 영향을 고려해야

한다는 필요성이 제기되어 왔으며, SYSWELD는 이러한 Needs에 적합하도록 개발되었으며, FRAMATOME사에서 용접 시뮬레이션 분야의 15년 이상 축적된 경험 및 노하우가 집적되어 있다.

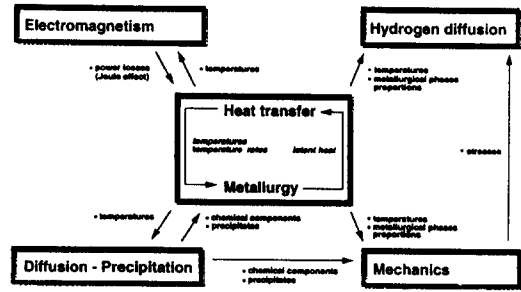


Fig. 1 SYSWELD s Architecture; coupling between all phenomena

그림 1에 SYSWELD의 기본 구조를 나타내었다. 그림 1에서 Electromagnetism 모듈은 Spot Welding 및 Induction Quenching 등에 필요하며, Hydrogen Diffusion 모듈은 용접 프로세스에서의 수소취성을 고려하고자 하는 경우 적용된다.

열해석(Thermal Analysis)은 상변태 현상이 온도 및 온도 변화율에 크게 의존하기 때문에 매우 중요하며, 또한 상변태는 잠열효과 및 상(Phase) 의존적인 열 물성치에 의해 온도 분포에 영향을 미친다.

역학적 해석(Mechanical Analysis)은 잔류 응력 및 변형량을 예측하게 되는데, 상변태는 이러한 해석에 중요한 영향을 미치는데 그 이유는 다음과 같다. 첫째, 금속 상변태에는 고전적인 개념의 열 변형외에 체적 변화가 수반되는데, 그림 2에 나타난 바와 같이 강의 경우 가열시 Pearlite-Ferrite 조직에서 Austenite로의 변태가 일어나면서 체적 감소가 일어나게 된다. 냉각시에는 Austenite로부터 Pearlite-Ferrite, Bainite 또는 Martensite로의 변태가 냉각속도에 의존하면서 일어나게 되며, 이로 인해 체적 팽창이 일어나게 된다. 둘째, 재료 거동은 상(Phase)에 크게 의존하고, 변태시 특별한 거동 즉, 변태 소성 효과(Transformation Plastic Effect)가 유발된다. 그림 3에 의하면, 제어된

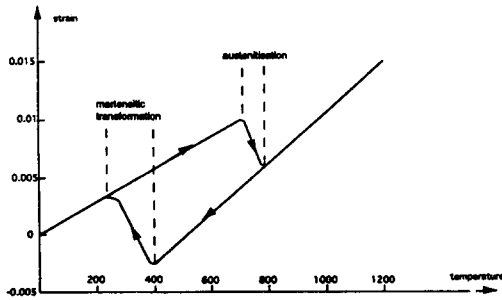


Fig. 2 Dilatometry experiment

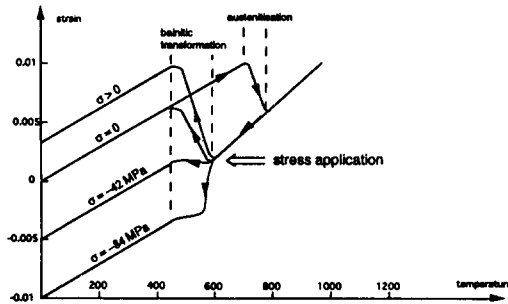


Fig. 3 Constrained dilatometry experiment

Dilatometry 실험 결과로부터, 냉각시 변태가 일어나게 될 때, 매우 작은 응력에 의해 잔류 변형 즉 Transformation Plastic Strain이 유발된다는 것을 알 수 있다.

3. Thermal and Metallurgical Analysis

지배 방정식은 다음과 같은 고전적인 열 전도 방정식으로 표현된다.

$$\frac{dH}{dt} - \text{div}(\lambda \nabla T) - q = 0$$

여기서, H : 온도 T에서의 Entalpy, λ : 열전도도, q : Volumeric Heat Source

2개 이상의 상(Phase)이 존재하는 경우, H와 λ 는 다음과 같은 간단한 혼합칙(Mixture Law)에 따

라 구할 수 있다.

$$H = \sum_{\text{phases}} p_i H_i$$

$$\lambda = \sum_{\text{phases}} p_i \lambda_i$$

$$\sum_{\text{phases}} p_i = 1$$

여기서, H_i 와 λ_i 는 상(Phase) i의 분율이 p_i 일 때 온도 T에서의 엔탈피 및 열전도도이다.

그러므로 열전도 방정식은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\left(\sum_{\text{phases}} p_i (\rho C)_i \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div} \left(\left(\sum_{\text{phases}} p_i \lambda_i \right) \text{grad } T \right) - q + \sum_{\text{phases}} \dot{p}_i H_i = 0$$

여기서, $(\rho C)_i = \frac{\partial H_i}{\partial T}$ 는 상(Phase) i의 비열이다.

마지막 항은 SYSWELD에서는 Volumeric Heat Source로 고려되는 잠열 효과를 나타낸다. 잠열 효과 처리를 위해 전통적인 등가비열법대신 이와 같은 방법이 적용된 것은 변태 온도 범위가 고정되어 있는 것이 아니라 온도 변화율에 의존하기 때문이다.

상변태에 대한 컴퓨터 모델링은 완전히 현상학적 접근 방법에 의해 2상(Phase)에 대하여 다음과 같은 기초 방정식으로 표현된다.

$$\dot{p} = \frac{p_{eq}(T) - p}{\tau(T, T)}$$

이는 변태시 가열 및 냉각 두 과정에 모두 적용된다. 예를 들면, 강의 경우 가열시 Ferrite-Pearlite에서 Austenite로의 변태가 일어나게 된다. 따라서 p는 Austenite분율, $p_{eq}(T)$ 는 Fe-C Diagram에서의 평형 Austenite분율, 는 변태 지체 효과(Retardation Effect)를 유발시키는 시간 의존적인 값이 된다. 일반적으로 대부분의 경우 냉각속도에 따라 다음과 같은 몇가지 종류의 변태가 일어

나게 된다.

- 냉각속도가 매우 느린 경우
Austenite → Ferrite-Pearlite
- 냉각속도가 중간정도인 경우
Austenite → Bainite
- 냉각속도가 빠른 경우
Austenite → Martensite

이 경우, 여러 가지 변태가 동시에 일어나게 되며 방정식은 2개 이상의 상(Phase)에 대하여 확장되어야 하는데, 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{p}_i = \sum_{j \neq i}^{phases} (K_{ij}(T, \dot{T}) P_j - L_{ij}(T, \dot{T}) p_j)$$

여기서, K_{ij} , L_{ij} 계수는 연속 냉각 변태(Continuous Cooling Transformation, CCT) 곡선(그림 4 참조) 또는 Dilatometric Diagram으로 부터 얻을 수 있다.

이 식의 적용을 위해 다음과 같은 이론적 배경에 대한 이해가 필요하다.

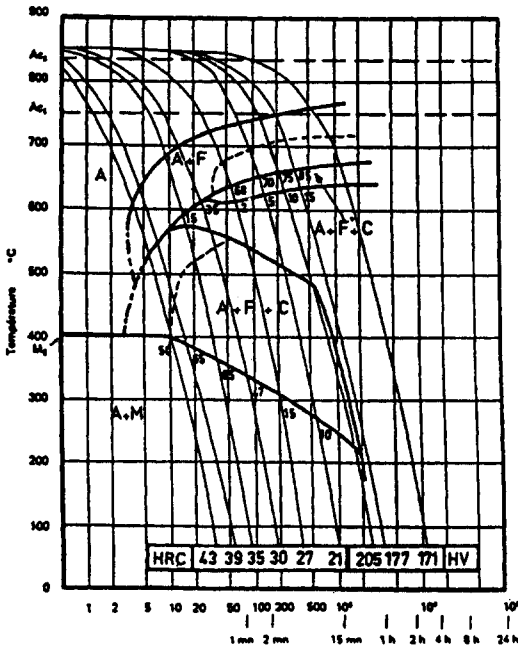


Fig. 4 CCT Diagram

[1] 일정 온도에서 확산 현상을 포함한 금속 상 변태(Austenite → Ferrite-Pearlite, Austenite → Bainite)의 시간에 대한 변화는 Johnson-Mehl Law를 따른다. 앞에서 설명한 모델은 이 식을 만족하지 못한다. 따라서 이 법칙을 적용할 수 있도록 기초 방정식을 일반화할 수 있으나, 기본적으로 상변태가 등온 변태가 아니므로 반드시 필요로 하는 하지 않는다.

[2] Martensite 변태는 온도에만 의존하고 Martensite분율은 일반적으로 Koistinen and Marburger Law에서 주어진다. K_M , L_M 을 온도 변화율에 비례하도록 하므로서 그러한 효과를 도입할 수 있다.

[3] 다른 변수들은 변태 속도론 측면에서 영향을 미친다. 잘 알려진 바와 같이 기계적 응력(Mechanical Stresses)이 변태에 영향을 미치지만 실험적인 데이터가 없으므로 이 현상은 무시하고 있다. 또한 변태 속도는 Austenitization 조건에 의존하는 데, 이 효과는 Austenite 결정립 크기를 계산하고, K_{ij} , L_{ij} 계수가 이 변수에 의존하도록 하므로서 고려할 수 있다.

Tempering 효과는 Austenite 변태점 온도 이하의 고온으로 유지하게 되면 Martensite 또는 Bainite에서 나타나게 되는 바, 야금학적인 관점에서 Martensite 또는 Bainite조직은 보다 더 Ferrite조직과 유사하게 된다. 역학적 관점에서는 이러한 현상이 항복 강도의 감소를 유발하게 되기 때문에 고려해야 한다. Tempering은 실제로 상변태는 아니지만 Austenite, Ferrite, Bainite 및 Martensite 변태와 동일한 모델로 설명된다.

4. Mechanical Analysis

금속 상변태시 결정 구조의 변화로 인해 체적 변화가 수반되는데 이는 응력 생성에 중요한 영향을 미치게 된다. 이러한 변형량을 포함하여 총 열변형량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon^{th}(T) = \sum_{phases} p_i \epsilon_i^{th}(T)$$

여기서 $\epsilon^h(T)$ 는 금속 상(Phase) i 의 열 변형을 나타낸다.

모든 $\epsilon^h(T)$ 곡선은 기울기가 다를뿐 아니라 그림 2에 나타난 바와 같이 기준점에서의 세로 좌표가 다르다. 그러므로 $\epsilon^h(T)$ 는 각 상(Phase)의 열변형과 부피변화를 모두 반영하고 있다. 엄밀하게 보면 $\epsilon^h(T)$ 는 "thermo-metallurgical strain"으로 표현해야 한다. 위에서 주어진 $\epsilon^h(T)$ 의 표현은 거시적으로 등방성(Isotropy)이라고 가정할 경우 이론적으로 정확하다는 것은 입증된 바이다.

여기서, 재료 거동의 이해를 위해서는 다음과 같은 상변태의 영향을 고려해야 한다.

[1] 냉각중에 상변태가 일어나게 되면 그림 3에 나타난 바와 같이 비정상(Anomalous) 소성 거동이 실험적으로 관찰된다.

[2] 각 상(Phase)의 항복강도는 20°C에서 Austenite에 대하여 200-300 MPa, Martensite에 대하여 1500 MPa에 이른다.

첫 번째 현상은 변태 소성(Transformation Plasticity)이라고 하며, 다음과 같은 두가지 물리적 기구에 기인한다.

Greenwood Johnson Mechanism

두 상간의 부피차이는 미시적인 내부 응력을 발생시키게 되고 이는 상대적으로 약한 상에서 소성이 유발되기에 충분하다. 외부의 거시적인 응력이 작용하게 되면 하중 방향으로 소성 변형이 일어나게 된다.

Magee Mechanism

외부 응력이 작용하게 되면 Martensite의 판상구조는 그 방향성이 특정 방향을 가지며 이로 인해 재료의 외형에 영향을 미친다.

소성 변형율은 응력 변화율, 온도 변화율 및 상 변태 속도 3가지에 모두 비례하면서 그 합으로 표현된다고 이론적으로 알려져 있다.

$$\dot{\epsilon} = \alpha(\dots)\dot{\alpha}\beta(\dots)T + \gamma(\dots)\dot{p}$$

윗 식의 첫째, 둘째 항은 고전적인 소성 변형율($\dot{\epsilon}^p$)을 나타내고, 마지막 항은 변태 소성율을 의미한다($\dot{\epsilon}^t$).

최근 해석적인 방법과 수치해석적인 두 가지 접근에 의한 이론적인 연구 결과, $\dot{\epsilon}^p$ 과 $\dot{\epsilon}^t$ 의 일반적 수식을 얻을 수 있게 되었다. 이 모델을 설명하기 위해 아래 첨자가 1로 표시되는 제 1 상은 가장 약한 상으로서 Austenite를 나타내고, 아래 첨자가 2인 제 2 상은 가장 강한 상으로서 α 상의 혼합체인 Pearlite-Ferrite, Bainite, Martensite를 나타낸다고 할 때, 이상적인 소성 거동에 대하여 모델의 구성 방정식은 다음과 같이 설명할 수 있다.

σ_u 를 1, 2 두상의 혼합체가 가지는 Ultimate Stress (Von Mises stress의 최대치)로 하면, 이는 수치 해석적인 방법에 의해 다음과 같이 식을 유도할 수 있다.

$$\sigma_u = (1 - f(p_2))\sigma_1^y + f(p_2)\sigma_2^y$$

여기서 σ_i^y 는 i 상의 항복강도이다.

σ_{eq} 를 Von Mises Stress으로 나타내면,

$$\sigma_{eq} < \sigma_u \text{ 일 때}$$

$$\dot{\epsilon}^p = \dot{\epsilon}^p + \dot{\epsilon}^t$$

$$\dot{\epsilon}^p = \frac{3(1 - p_2)g(p_2)}{2\sigma_1^y} \frac{g(p_2)}{E} S \dot{\sigma}_{eq} + \frac{3(\alpha_1 - \alpha_2)}{\sigma_1^y} p_2 \text{Log} P_2 S T$$

$$\dot{\epsilon}^t = -\frac{3\Delta \epsilon_{1 \rightarrow 2}^h}{\sigma_1^y} Sh \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_u} \right) \text{Log} P_2 - \dot{P}_2$$

여기서,

E : Young Modulus, d_i : i 상의 열팽창 계수

$$\Delta \epsilon_{1 \rightarrow 2}^h = \frac{1}{3} \frac{(\Delta v)_{1 \rightarrow 2}}{v} : \text{상 1로 부터 상 2로의 체적 팽창, } S : \text{Stress Deviator}$$

$g(p_2)$: 이론 및 수치적 접근으로 부터 구한 함수

$$h\left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_u}\right) = 1 \quad \text{if } \frac{\sigma_{eq}}{\sigma_u} \leq \frac{1}{2}$$

$$h\left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_y}\right) = 1 + 3.5\left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_u} - \frac{1}{2}\right) \quad \text{if } \frac{\sigma_{eq}}{\sigma_u} \geq \frac{1}{2}$$

$$\sigma_{eq} = \sigma_u \quad \text{이면 } \dot{\epsilon}^p = \epsilon^{sp} \dot{\epsilon}ip = \lambda S$$

이 모델에 의하면 소성은 매우 낮은 응력이 작용하는 경우에도 진행하게 되고, ϵ^{sp} 는 역학적인 변수와 작용되는 응력 두 가지에 의해 나타낼 수 있다. 이 모델은 Strain Hardening 과 회복 (Recovery) 효과를 고려하기 위해 일반화되었다.

5. Technical Characteristics

지금까지 SYSWELD 가 용접 프로세스에 적용되기 위해 열, 야금학적 및 역학적인 해석에 필요한 주요 Mechanism에 대하여 설명하였으며, 본 장에서는 주요 이론적 배경에 대하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

Thermo-Metallurgy

1. Enthalpy Modelling
2. Transient State Conduction
3. Transport Phenomena (확산 및 대류)
4. Radiation (Grey Body의 Multi-Reflection, Shape Factor Computation)
5. Metallurgical Phase Transformation (Kinetic Models)
6. Phase 및 온도의존성을 갖는 열물성치
7. Latent Phase Change Heat Values
8. Contact Elements (Thermics)
9. Regulation Macro-Elements
10. Mobile Source Modelling

Mechanics

1. Thermo-elasto-plasticity
2. Creep Laws
3. Elasto-visco-plastic models
4. Geometrical and Contact Non-Linearities

5. Large Displacements and Strains
6. 상변태시 열변형 및 체적변화를 포함하는 Thermo-Metallurgical Strains
7. 상변태시 Plastic Behavior : Transformation Plasticity, Eventual Recovery of Hardness during Transformation
8. Solution in a Reference Frame Linked to the Mobile Source

Diffusion

1. Generalization of Fick's Second Law
2. Non-uniform Solubility Model
3. Trapping Phenomena (가역 및 비가역)
4. Precipitation Phenomena

Electromagnetism

1. Axisymmetrical and 2D Magnetodynamics (Vector Potential, Magnetic Field) with Non-linear (B(H)) Saturation Curves
2. 2D, Axisymmetrical 및 3D Electrokinetics

Electrothermics

1. Induction Magnetodynamics과 Thermal Solution들의 Weak Coupling (Alternance)
2. Spot Welding Thermal, Metallurgical 및 Electrokinetic Equation들의 Strong Coupling (Simultaneity)

6. Examples

본 사례는 Butt Welding에 대한 3차원 시뮬레이션을 수행한 해석 결과의 예이다. 그림 5에 나타난 바와 같이 Bead가 두 개의 판사이에 Groove-joint에서 Deposit되는 프로세스로서, 본 해석에서는 대칭 문제로 고려하였다.

Bead의 이동을 고려하기 위해 "Moving

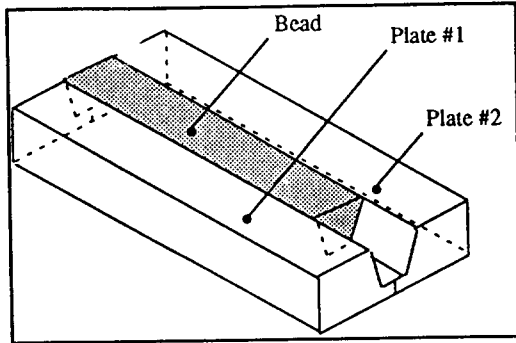


Fig. 5 Real structure of the components

Reference Frame" Option을 사용하였다. 시뮬레이션의 주요 목적은 전체 계의 변형과 구조물의 단면에 대하여 종방향의 용접 방향에서의 응력분포를 평가하고자 하는 것으로서, 이 경우 용접 방향에 수직한 단면의 2차원 해석을 행하게 되면 2차원 가정으로 인한 Clamping 조건 때문에 종방향의 응력이 과대 평가된다. Generalized Plane Strains 가정을 하게 되더라도 이러한 현상은 여전히 나타나게 된다.

계산 과정은 다음과 같은 4단계의 연속적인 과정으로 구분되어 수행된다.

- (1) 준안정 상태로 취급되는 열-야금학적 수치 해석
- (2) 준안정 상태의 역학적 수치해석
- (3) 구조물의 냉각에 대한 비정상 상태의 열-야금학적 수치해석
- (4) 구조물의 냉각에 대한 비정상 상태의 역학적 수치해석

두 가지의 역학적 해석시 야금학적 영향이 체적 변화에 의해 고려되는데, 이는 금속 상변태, 각개의 금속상의 거동 법칙 및 변태 소성 효과에 기인하는 것이다. 이 두 역학적 해석은 탄소성 가정과 Kinematic Hardening 하에서 수행된다.

본 해석에서 사용된 모재와 Bead의 화학적 조성은 다음 표와 같다.

그림 6에 Mesh Diagram을 나타내었으며, 해석 결과의 예를 그림 7-12에 나타내었다. 그림 7에 Deposition 이 종료된 후의 온도분포를 나타내었으

모재의 화학적 조성

C	Mn	Si	S	P	Al
0.18	1.39	0.37	0.011	0.022	0.52

Filler Metal의 화학적 조성

C	Mn	Si	S	Cu	P	Al
0.073	1.57	0.39	0.009	0.1	0.015	0.009

며, 그림 8은 용접 선을 따라 선정된 Line에 대한 온도 분포 결과이다. 그림 9에는 용접선을 따라 판재의 초기 조직으로 부터 Bainite 및 Austenite로의 변태 결과를 각 상의 비율로 나타내었다. Postprocessing시 3차원적으로 해석결과를 나타낼

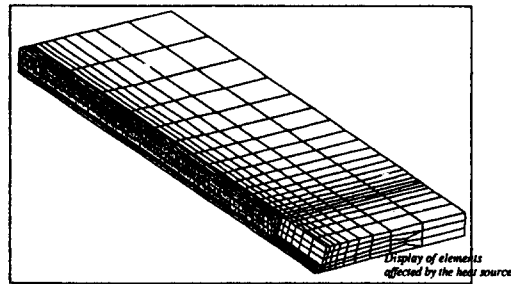


Fig. 6 Mesh diagram

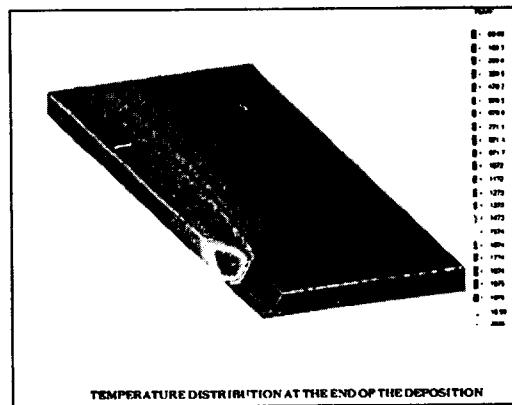


Fig. 7 Computed result at the deposition stage: Temperature distribution at the end of the deposition

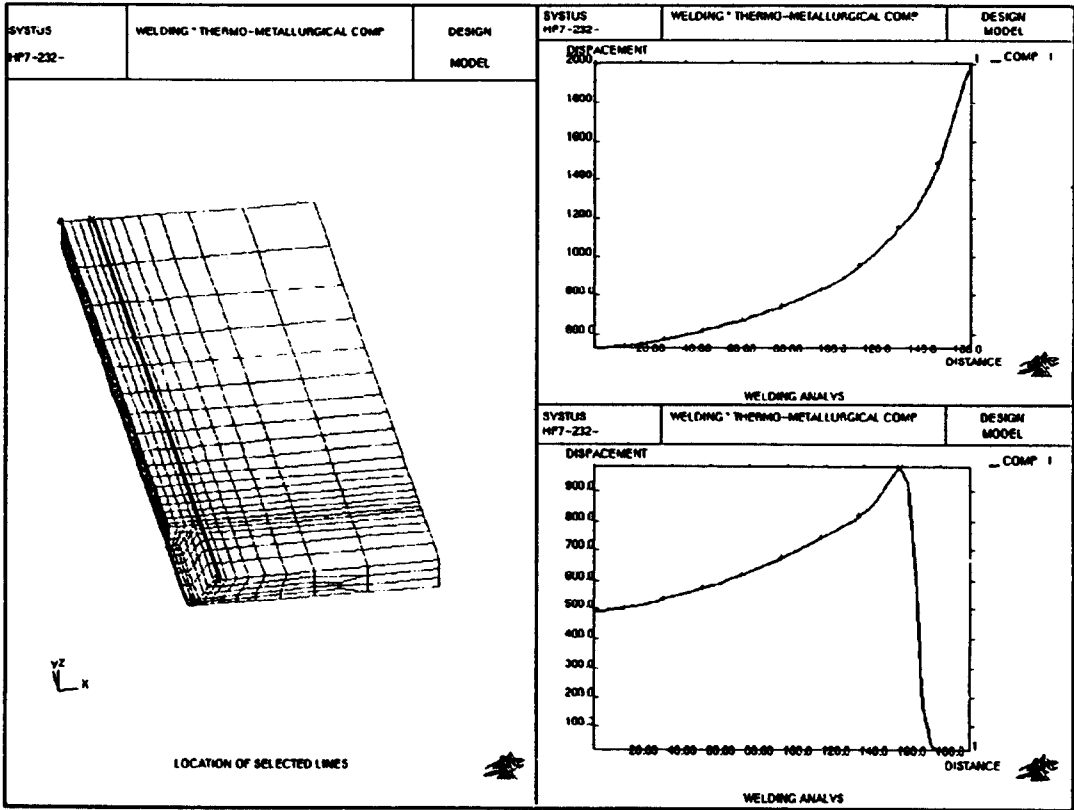


Fig. 8 Temperature along a selected lines

수 있으나 여기서는 편의상 주로 Plot 또는 Wire Frame 형태로 결과를 나타내었다. 그림 10에서 선정된 Node에 대하여 Z 방향으로의 변위를 나타내었다. 판재 전체의 변형상태를 예측한 결과로서 그림 11에 나타내었으며, 그림 12에는 용접후 σ_{xx} 잔류 응력 분포를 나타내었다.

7. Conclusion

용접 구조물에 대한 프로세스 제어를 위하여 매우 효과적인 수단이 될 수 있는 SYSWELD 소프트웨어의 이론적인 개념 및 응용 기술에 대하여 소개하였다. 전술한 바와 같이 SYSWELD는 일반적으로 알려져 있는 범용 열 및 구조해석 상용 Code와는 달리 야금학적 이론이 접목되므로써 이전에는

고려하기 곤란했던 제어 인자들에 대하여 보다 정확한 정보를 얻을 수 있기 때문에 용접 프로세스 분야에 매우 적합한 시뮬레이션 Code라고 판단된다.

이와 같이 수치해석 기술을 응용하므로써 연구기관에서는 제반 현상들에 대하여 실험적인 접근 방법보다 보다 효과적으로 이해할 수 있게 되어 궁극적으로 이론적 발전 및 실용화를 이룰 수 있으며, 또한 산업체에서는 현업에서 발생하는 결함의 제어 및 구조물이나 프로세스의 최적 설계 방안을 수립하는 일이 가능하기 때문에, 현재 용접 분야에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 응용 기술에 대하여 관심이 집중되고 있다. 이에 당사는 SYSWELD를 비롯하여 공학 분야의 유용한 상용 Code에 대한 공급 및 기술 지원 뿐만 아니라 엔지니어링 능력을 갖추고 이와 같은 추세에 부응하고자 노력중에 있는

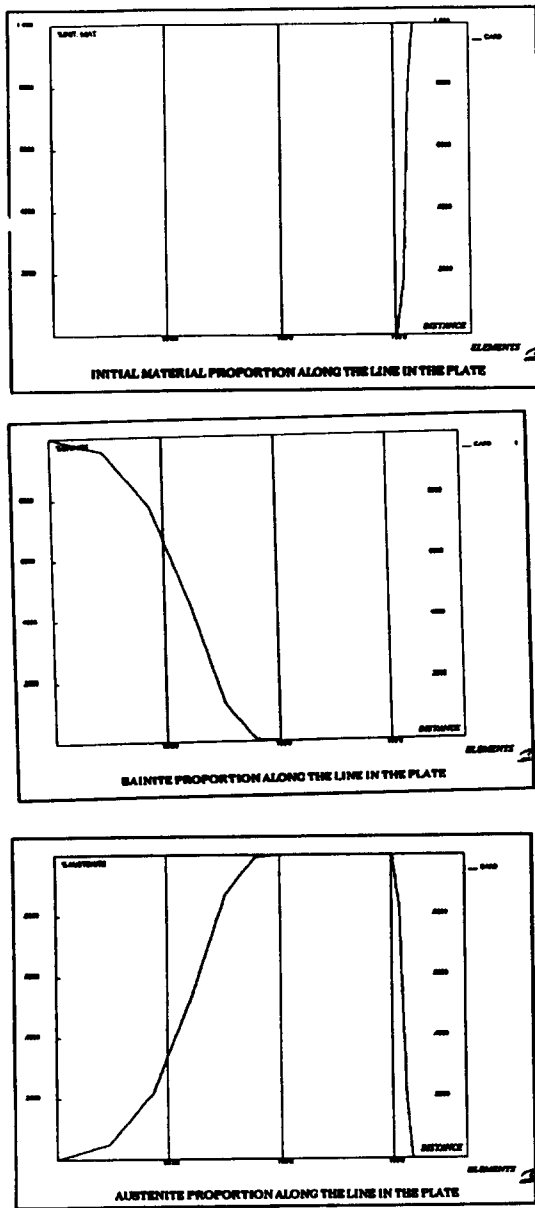


Fig. 9 Proportion of metallurgical phases along a line

바, 용접 시뮬레이션 응용 기술에 대한 현황을 소개하고자 하였으므로 참고가 되기를 바란다.

8. References

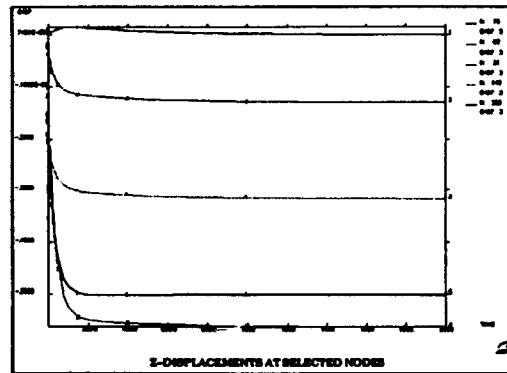
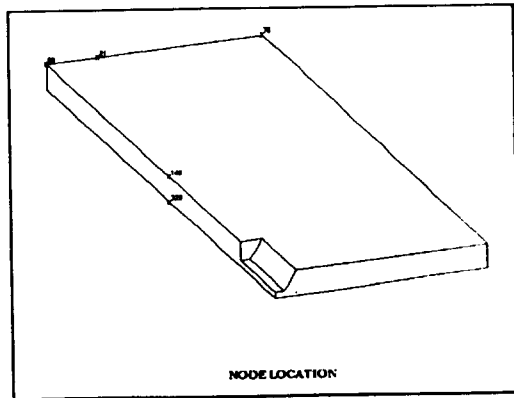


Fig. 10 Computed values of the displacements at nodes

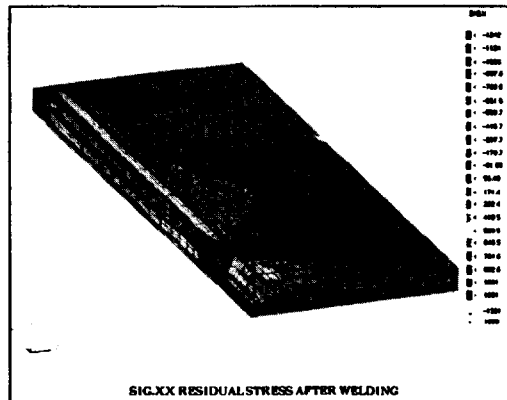


Fig. 12 Mechanical result at the cooling stage

1. J.M. Bergheau, J.B. Leblond, Coupling between Heat Flow, Metallurgy and Stress-Strain Computation in Steels; the Approach

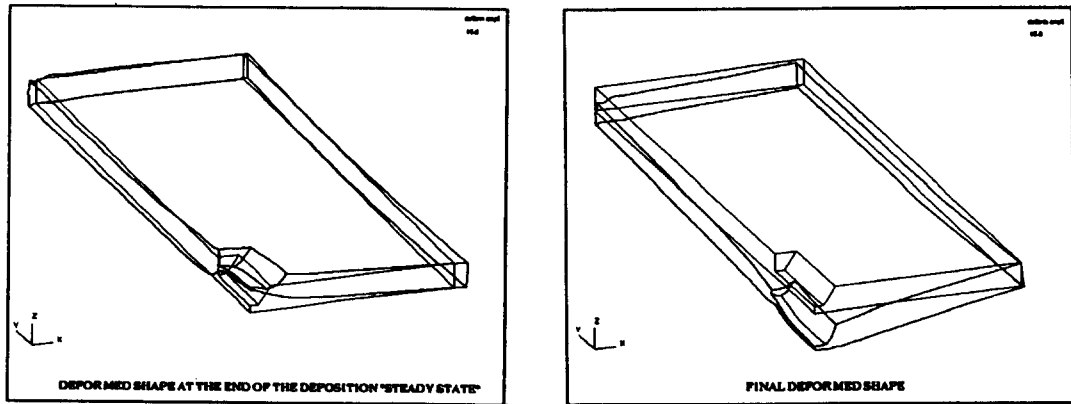


Fig. 11 Deformed Shape after the computation in the moving reference frame (steady-state)

Developed in the Computer Code SYSWELD for Welding or Quenching 5th Engineering Foundation Conference on Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes, 17-21 SEP 1990

2. 3D Welding Simulation Example, FRAMASOFT/CSI 1995
3. Technical Presentations on SYSWELD, FRAMASOFT/CSI 1996