

TMCP 강판의 고유변형도 기반 열변형 해석법 개발

하윤석* · 양진혁* · 원석희* · 이명수*

*삼성중공업 산업기술연구소 용접연구

Development of Thermal Distortion Analysis Method Based on Inherent Strain for TMCP Steels

Yunsok Ha*, Jinhyuk Yang*, Seokhee Won* and Myungsu Yi*

*Samsung Heavy Industries CO., LTD., Welding Research Part

*Corresponding author : yunsok.ha@samsung.com

(Received April 4, 2008 ; Revised June 5, 2008 ; Accepted June 9, 2008)

Abstract

As ships become to be larger than ever, the thicker plate and the higher tensile steel plate are used in naval shipyard. Though special chemical composition is needed for high-tensile steels, recent high-tensile steels are made by the TMCP(Thermo-Mechanical control process) skill. The increase of yield stress and tensile stress of TMCP steels is induced from bainite phase which is transformed from austenite, but that increased yield stress can be vanished by another additional thermal cycle like welding and heating. As thermal deformations are deeply related by yield stress of material, the study for prediction of plate deformation by heating should reflect principle of TMCP steels. This study developed an algorithm which can calculate inherent strain. In this algorithm, not only the mechanical principles of thermal deformations, but also the predicting of the portion of initial bainite is considered when calculating inherent strain. The simulations of plate deformation by these values showed good agreements with experimental results of normalizing steels and TMCP steels in welding and heating. Finally we made an inherent strain database of steels used in Class rule.

Key Words : Inherent strain, TMCP, Bainite, Thermal elastic-plastic analysis, Yield stress

1. 서 론

최근의 열변형 이론의 고도화 및 선박과 같은 대형 쉘 구조물을 대상으로 한 해석기술의 진보는 매우 빠르게 진행되고 있다. 이 기술들의 특징은 유한요소 해석 시 쉘요소를 사용하고, 선형 계산을 통한 변형도 단위의 산출물을 하중경계조건으로 사용하는 것이다. Jung은 평균화된 특성 소성변형도를, Ha 등은 기존의 고유 변형도에 상변태 및 소성경화를 반영하여 이러한 계산 들을 수행하였다¹⁻⁴⁾. 이 연구들은 모두 계산결과가 나 름의 하중경계조건으로 탄성해석이 수행되었을 때, 해 석결과가 실제 총변형도로 도출되는 것을 목표로 한다.

탄성해석으로 치환된 상태에서 하중경계조건으로 사용 되는 방법은 전통적인 등가하중법 및 곡면에 자유롭고 응력장 도출이 되는 SDB법이 있고, 변형도를 입력값으 로 갖도록 해주는 유한요소해석 툴을 직접 코딩하여 사 용 하는 경우도 있다⁵⁻⁶⁾.

선박 건조에 있어서 용접 및 열간가공은 필수 공정이 자 열변형의 대표적 발생 사례이다. 그러므로 해석 정 도의 신뢰도가 높아진다는 말은 역설계 및 역변형 등으 로 향후 예상되는 열변형을 사전에 제어할 수 있다는 뜻이 된다. 현재의 열변형 이론이 해석과 실험의 일치 라는 측면에서 더 개선되는 것은 바람직한 일이나, 같 은 재질이라고 알려진 강재에서도 같은 조건의 용접 실험에 의하여 20% 정도의 변형편차가 있을 수 있다는

것을 고려하면, 고도의 역학적 이론개발 이외에 다른 문제점도 생각해 보아야 한다. 대표적인 경우로 철강 재료 자체를 들 수 있는데 이미 Ha 등이 Mill Certificate 내에서 연강의 화학성분과 기계적 성질들(항복강도, 인장강도, 연신율)을 고유변형도 계산의 근거로 삼고는 있으나, 제강법 자체가 반영되고 있지는 않다.

같은 선급강종이라고 알려진 재료 자체가 서로 상이할 수 있는 이유 중 가장 널리 알려진 것은 제강법의 차이이다. 선박의 대형화나 저온상태의 운용조건이 요구하는 높은 강성 및 용접성의 만족을 위해 널리 사용되는 제강법은 TMCP(Thermo-Mechanical control process)이다. TMCP 강재는 일반 Normalize 강재에 비해 열간가공성이 상대적으로 열악하다거나 유사하다는 실험 결과가 보고되어 있으나, 그 이유를 상세히 밝히거나 예측이 가능하다는 연구는 드문 실정이다⁽⁷⁻⁸⁾. 본 연구는 TMCP 강재의 재료적 차이를 언급함과 아울러 그 차이를 역학적으로 수식화하여 제강원리가 TMCP인 강재에 대해서도 고유변형도 계산이 적용되도록 하는 것을 목표로 하였다.

2. TMCP 강재의 개요

TMCP 강재는 강의 상변태에 의해 특수 원소의 함량이 normalize 강재에 비해 적은 상태로도 높은 항복강도를 만들어 낸다⁽⁹⁾. 즉, 제강 시 강의 냉각속도를 조금 빠르게 컨트롤하여 자신의 최종 상에 베이나이트(약 500MPa 이상의 항복강도)가 포함되도록 만든다. 일반 강재는 대부분 페라이트-펄라이트 조합의 상으로 나타나며 선급규정강도는 235~395 MPa 수준이다.

하지만 용접의 경우 녹는 점 이상, 열간가공의 경우도 1000°C 이상의 열을 받아 다시 모상인 오스테나이트로 돌아가게 되면, 그 부위가 냉각되는 동안 제강되던 환경과 동일하게 베이나이트 분율이 있으리라고 기대할 수가 없게 된다. 이러한 원인으로 인해 용접의 경우는 일반적으로 공냉이므로 베이나이트 분율은 작아질 것이고, 수냉을 동반하는 선상가열과 같은 열간가공은 오히려 그 분율이 커지게 되므로 결국 용접부 혹은 열간가공부의 경우 TMCP 강재의 고유성질을 유지하지 못하는 문제가 있을 수 있다.

3. 고유변형도 이론의 개요

고유변형도란 구조물에 작용된 하중을 제거하여도 회복되지 않는 변형도를 일컫는 것으로 만일 재료가 열간가공 후 항복상태라는 것이 알려져 있다면 식(1)과 같이 정의한다. 총변형도에서 탄성변형도를 제함에 있어

서 열이력을 받기 이전의 상태를 응력-변형도 관계에서 0점으로 잡는다면 Fig. 1과 같이 이 관계를 효율적으로 작도할 수 있다. 이 경우 우리가 흔히 열변형부는 인장응력 및 압축변형도 상태라고 일컫는데, 그 부분을 확인할 수 있다.

$$\epsilon^* = \epsilon^{th} + \epsilon^{pl} + \epsilon^{ph} = \epsilon^{total} - \epsilon^{el} \quad (1)$$

ϵ^{th} : Thermal strain

ϵ^{pl} : Plastic strain

ϵ^{ph} : Phase transformation strain

ϵ^{el} : Elastic strain

$$\epsilon^* = \frac{-\sigma_Y + H \cdot \int \alpha^{mod} dT \left(\frac{k_1}{k_2} + 1 \right)}{E_1 + H \cdot \left(\frac{k_1}{k_2} + 1 \right)} \quad (2)$$

$$\int \alpha^{mod} dT = \epsilon^{thermal} + \epsilon^{phase}$$

$$H = \frac{E \cdot E_t}{E - E_t}$$

$$E_t \approx \frac{\sigma_T - \sigma_Y}{E \cdot L}$$

k_1 : Stiffness of restrained zone

k_2 : Stiffness of heated zone

E_1 : Elastic modulus of restrained zone

식(1)을 실제적으로 계산하기 위하여, 일반적으로 bar-spring model로부터 고유변형도를 구하되, bar의 기하학적인 부분들을 강성(k_2)으로 조합해두면, 이는 다시 disk-spring model에서부터 2차원 문제로 쉽게 확장된다. 쉘구조물에서 재료 하드닝이 반영된 최종 고유변형도⁽⁴⁾ 식의 형태를 식(2)에 보였다. 이 식은 두

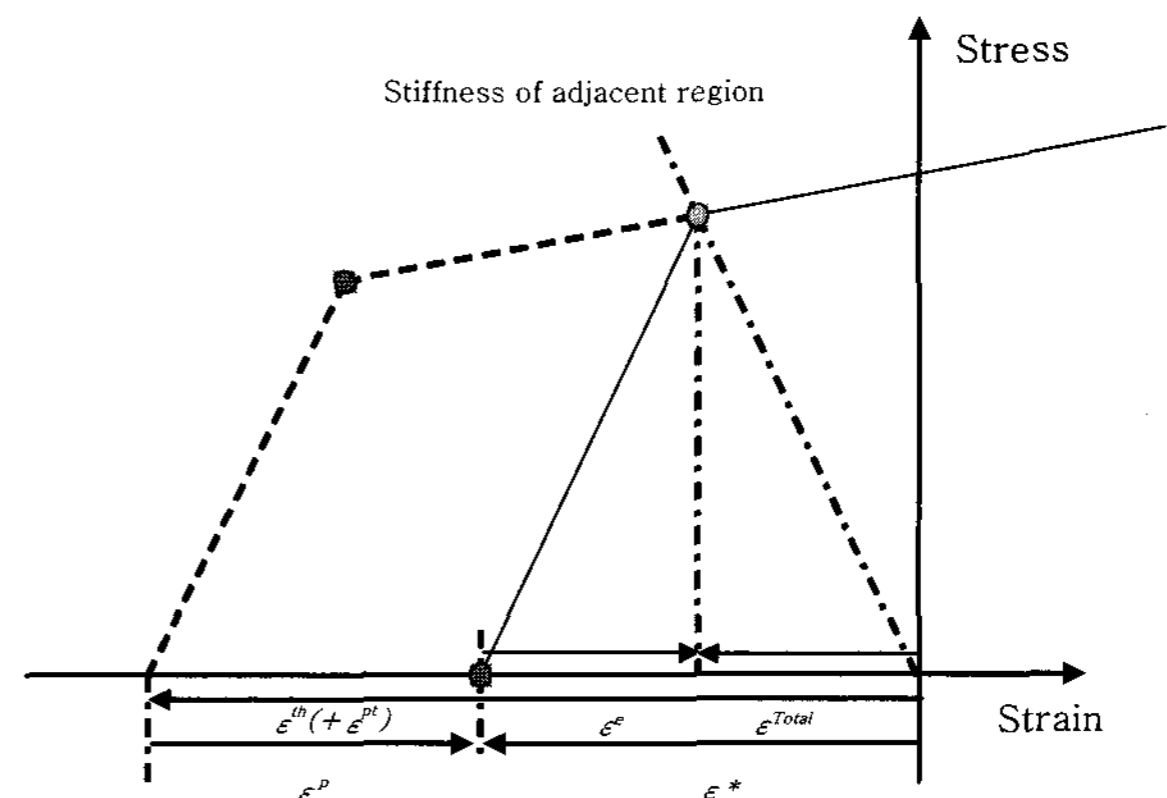


Fig. 1 Stress-strain relation after thermal cycle

가지 바탕에서 상변태를 반영할 수 있도록 되어 있다. 우선, 소성계수에 곱해져 있는 적분항 내의 열팽창계수를 상변태 변형도를 같이 적분하여 상변태에 따른 부피 팽창을 고려할 수 있게 되어 있다. 이는 실험으로 찾기도 하지만, 지금은 CCTD로부터 예측되는 상분율에 따라 미리 계산할 수 있게 되었다¹⁰⁾. 다른 한가지는 식(2) 내에서 주변부 물성치를 가리키는 항과 열변형부 물성치를 가리키는 항을 나누어서, 후자의 경우는 역시 예측되는 상분율 만큼 가중치화 하여 물성치를 사용하는 것이다. 예를 들어 특정 조건에서 잔류 오스테나이트의 높은 열팽창계수와 생성 마르텐사이트의 높은 항복응력 등이 반영될 수 있을 것이다. 선체 곡면을 얻기 위해 수행되는 선상가열과 같은 경우 물로 냉각되므로 비교적 다양한 상이 열영향부 내에 존재 가능하기에, 곡가공 변형 예측 및 실험은 이 식의 유용성을 판단하는 척도가 되기에 매우 좋다.

4. 최종 상분율 계산 알고리즘

만일 강재의 초기 베이나이트 비율(X_B^0) 및 열간가공부의 냉각속도(CS; Fig. 2)를 알고 있다고 가정하자. 냉각속도와 변태분율의 추산식으로 알려져 있는 결과들 중 신뢰도가 높은 것들은 마르텐사이트 50%, 100% 변태 보장속도, 베이나이트와 마르텐사이트 분율의 합에 대한 50%, 100% 변태보장속도, 마르텐사이트를 얻을 수 있는 최소 냉각속도(CCV; The critical cooling velocity), 베이나이트 생성 억제 냉각속도(LRC; The limited rate of cooling) 등이 있다¹¹⁾. 본 연구에서는 이들 내에서 지수적 보간(Fig. 2)을 통해 열영향부 도심의 열전달 해석 결과로부터 최종 상들의 분율을 대략적으로 해석하였다.

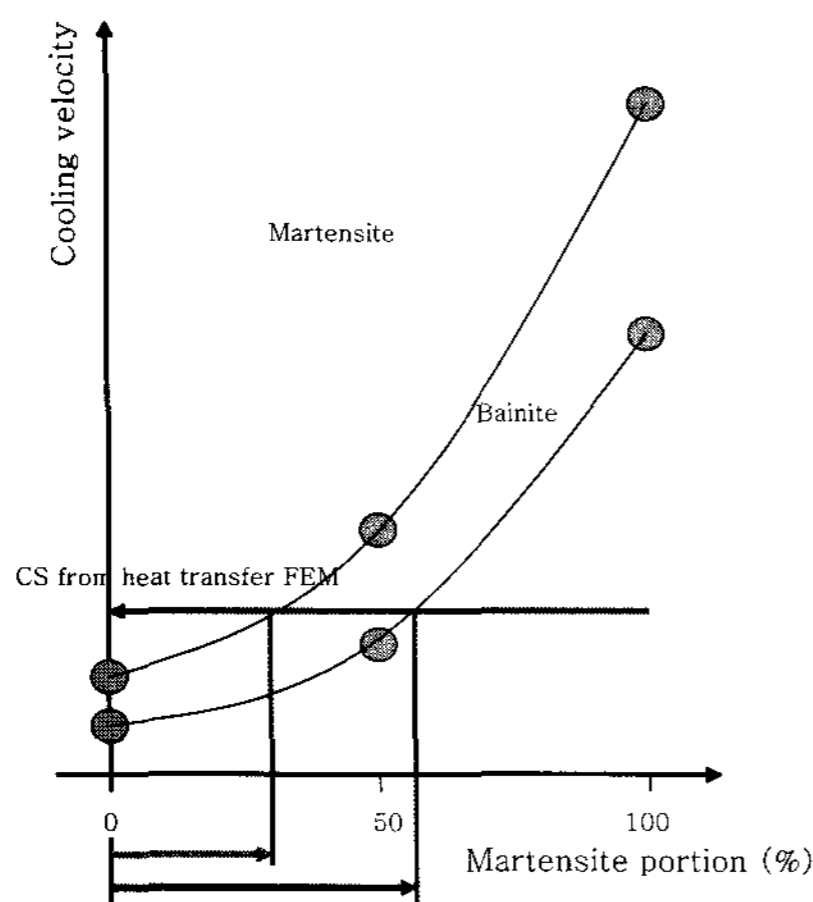


Fig. 2 Estimation of cooling rates by interpolation

식(3)에서 볼 수 있듯이 마지막 변태상인 마르텐사이트의 변태종료온도는 연강에서 상온보다 높다. 그러나 우리가 변형상태를 확인하고픈 온도가 상온으로 돌아오기 전이라면 각 상의 분율도 온도에 따른 함수로 구현되어야 한다. 상변태는 온도 변화에 따라 선형적으로 일어나는 것이 아니라 초반에 급격히 일어나며, 이는 냉각속도 항(식(4))을 사용하여 표현된다¹²⁾. 지수함수는 x축을 점근선으로 갖기 때문에 모양이 1% 남았을 때를 변태종료의 기준으로 삼았다¹³⁾.

$$M_s = 512 - 453C - 16.9Ni + 15Cr - 9.5Mo + 217(C)^2 - 71.5(C)(Mn) - 67.6(C)(Cr) - 11.1Si \quad (^\circ\text{C}) \quad (3)$$

$$M_f = M_s - 215$$

$$B_s = 830 - 270C - 90Mn - 37Ni - 70Cr - 83Mo$$

F : Ferrite

A : Austenite

B : Bainite

M : Martensite

[]_s : Phase transformation start temperature (°C)

[]_f : Phase transformation finish temperature (°C)

$$k_{A \rightarrow M} = \frac{\ln 0.01}{M_s - M_f} \quad (4)$$

$$k_{A \rightarrow B} = \frac{\ln X_M(T_R) - \ln X_{B+M}(T_R)}{B_s - M_s}$$

T_R : Room temperature (°C)

X_[] : Portion of [] (0~1)

$$X_f(T) = 1 - X_{M+B}(T) \quad (5)$$

$$X_\gamma = \begin{cases} (1 - X_f(T)) \cdot e^{k_{A \rightarrow B} \cdot \text{Max}[(B_s - T), 0]} & (T \geq M_s) \\ (1 - X_f(T) - X_B(T)) \cdot e^{k_{A \rightarrow M} \cdot \text{Max}[(M_s - T), 0]} & (T < M_s) \end{cases}$$

$$X_\gamma = \begin{cases} (1 - X_f(T)) \cdot (1 - e^{k_{A \rightarrow B} \cdot \text{Max}[(B_s - T), 0]}) & (T \geq M_s) \\ (1 - X_f(T)) \cdot (1 - e^{k_{A \rightarrow M} \cdot \text{Max}[(B_s - M_s), 0]}) & (T < M_s) \end{cases}$$

$$X_M(T) = (1 - X_f(T) - X_B(T)) \cdot (1 - e^{k_{A \rightarrow M} \cdot \text{Max}[(M_s - T), 0]})$$

$$X_f(T) + X_\gamma(T) + X_B(T) + X_M(T) = 1$$

식(5)는 4가지 상을 기준으로 분율의 온도의존성 함수를 구현한 것을 보여준다. 특히 본 연구가 관심을 갖는 베이나이트는 높은 냉각속도에 대한 최종 상이 아닌 마르텐사이트 변태의 생성여부에 의존하고 있으므로, 잔류 오스테나이트와 베이나이트의 분율함수는 마르텐

사이트 시작온도를 기준으로 구분되어 있다. 또한 여기에는 탄소 0.2% 이하의 연강에는 오스테나이트가 거의 잔류하지 않는다는 가정도 포함하고 있다¹⁴⁾. 식(5)는 식(6)과 같이 물성치 계산에 가중치로 사용되어 최종상태의 베이나이트 분율이 식(2)에서 구현되도록 만들어 준다.

$$f(T) = \sum_{i=F,A,B,M}^4 X_i(T) \cdot f_i(T) \quad (6)$$

5. 일반 강재의 화학조성에 따른 항복강도 추산

TMCP 강재 내에서 열영향부의 페라이트의 항복강도는 이제 더 이상 Mill Certificate에 언급된 수치로 계산하지 않을 것이다. Normalize 강재에 비해 낮은 원소 함량에 의하여, TMCP 강재의 페라이트 강도는 낮게 추산될 것이며, 본 연구에서는 K-S-T의 추산식(식(7))을 활용하였다¹¹⁾. 이 결과는 인장강도 및 연신율의 추정도 포함하고 있어서, 소성경화를 반영한 고유변형도(식(2))를 계산하는 데에도 매우 유용하다.

$$C_y = C + \frac{Mn}{5} + \frac{Si}{7} + \frac{Cu}{7} + \frac{Ni}{20} + \frac{Mo}{2} + \frac{V}{0.9} + \frac{N}{0.04} \quad (7)$$

$$C_t = C + \frac{Mn}{5} + \frac{Si}{7} + \frac{Cu}{7} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr}{9} + \frac{Mo}{2} + \frac{V}{2}$$

$$C_e = C + \frac{Mn}{9} + \frac{Si}{12} + \frac{Cu}{10} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr}{4} + \frac{Mo}{2.5} + \frac{V}{1.25}$$

$$\sigma_{y_asset} = 373.8C_y + 167.3$$

$$\sigma_{t_asset} = 609C_t + 241.5$$

$$EL_asset = 0.495\sigma_y - 0.512C_e$$

$$\sigma_y = (370 + \frac{27.1}{\sqrt{D}}) + (480 - 370) \frac{\sqrt{C}}{\sqrt{0.2}} + \frac{\sqrt{C}}{\sqrt{0.2}} \times \frac{48.0 - 27.1}{\sqrt{D}} \quad (8) \quad (MPa)$$

D : Diameter of average grain

C : Carbon %

식(7)은 이 식이 만들어질 당시의 제강기술상 주로 들어가는 원소 위주로 구성되어 있다. 여기에 포함되어 있지 않은 원소 중 그 역할이 강도에 미친다고 알려진 것들은 선형화시켜서 반영되어야 할 것이다. 본 연구는 추가되는 원소의 부류를 둘로 구분하였다. 첫째는 강을 세립화시킴으로서 강도를 증가시키는 경우이다. Vanadium(V)가 그 목적에 부합하며, 따라서 같은 목적의 Niobium,

Titanium 및 강을 킬드시키고 남은 Aluminium에 대해서 같은 계수를 사용하여 선형적으로 동일한 역할을 수행하도록 하였다. 두번째로는 극저온 강재인 FH 강재(Test 온도 : 영하 60도)가 포함한 질소를 고려하였다¹⁵⁾. 질소는 강중에 침입형으로 고용되어 저온인성을 향상시키는 것으로 알려져 있으며, 이러한 효과때문에 dislocation의 이동을 방해하여 전위이동에 의해 발생하는 소성변형(항복)을 억제(항복강도의 상승)시키는 효과가 있다. 이의 반대급부로 다른 강재에 비하여 탄소량이 매우 적으므로, 질소를 고려하지 않는다면 FH 강재의 변형을 매우 적게 판단할 것이다. 본 연구에서는 Mill Certificate의 자료를 바탕으로 식(7)내의 Cy 값을 개정시켜 사용하였으며, 일반 조선용강재와 해양구조물용 API 강재에 대하여 통계분석을 통해 다른 범위의 값을 사용하였다.

또한 질소가 고려됨에 따라, 질소가 알루미늄과 반응하여 열간가공시 낮은 최대도달온도에서 오스테나이트 결정립 조대화온도를 만드는 것을 Fig. 3의 제시 온도대로 반영하였다¹⁶⁾. 이 부분은 고유변형도 계산시 세립강의 ASTM 수(Fig. 4)에 영향을 주고 최종적으로는 탄소량과 더불어 마르텐사이트 항복응력에 영향을 주도록 설계(식(8))되었다^{3,17)}.

API 강재에서는 2W가 TMCP를 의미하는데, 이 강재에 두께별로 본 계산결과를 적용한 경우 Fig. 5와 같이 Mill Certificate에 제시된 항복강도보다 훨씬 균일한 열영향부의 강도추산을 하고 있음을 확인할 수 있다.

Table 1은 가정된 냉각 속도(10~100 °C/s) 및 2차원 원판-스프링 구속 상태 아래에서 강재별 고유변형도의 차이를 계산(식(2))하고 정리한 것이다. 표의 수치들은 항복강도가 높을수록 노말라이즈 강재와 TMCP 강재사이에서 용접을 모사하려는 고유변형도의 값이 커지고 있는 것을 보여 준다. 이는 TMCP 강재가 고장력 강일수록 더 높은 수준의 냉각속도 조절이 있었음을 뜻

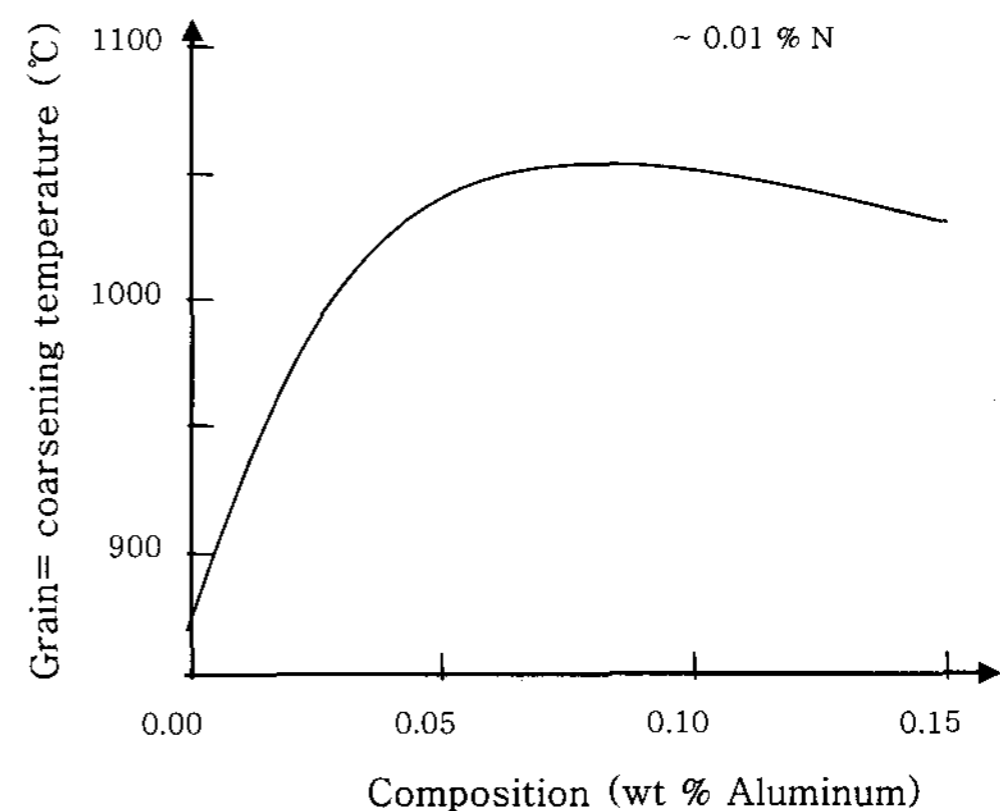


Fig. 3 Grain-coarsening temperature

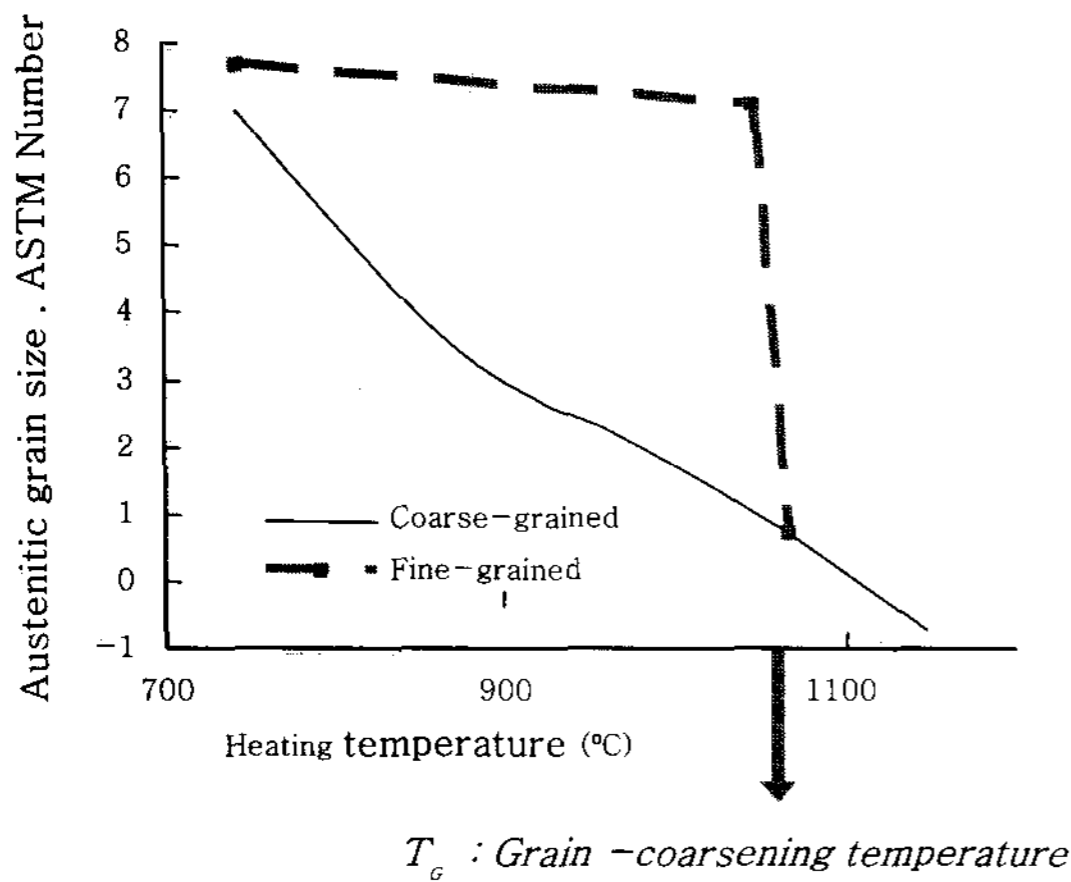


Fig. 4 ASTM number (austenitic grain size)

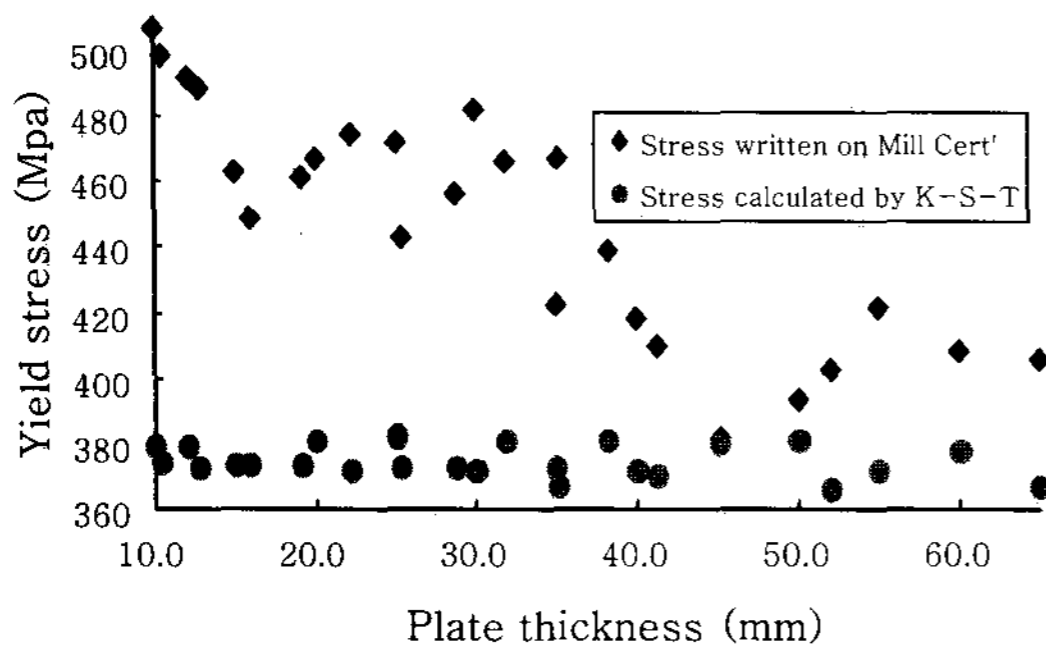


Fig. 5 Standard module of API

Table 1 Inherent strain table

		Inherent Strain (10°C/s)		Inherent Strain (100°C/s)	
AH	32	Normalized	-0.00681	Normalized	-0.00832
		TMCP	-0.00630	TMCP	-0.00771
	36	Normalized	-0.00774	Normalized	-0.00904
		TMCP	-0.00663	TMCP	-0.00787
DH	32	Normalized	-0.00687	Normalized	-0.00841
		TMCP	-0.00634	TMCP	-0.00782
	36	Normalized	-0.00776	Normalized	-0.00907
		TMCP	-0.00666	TMCP	-0.00791
EH	32	Normalized	-0.00690	Normalized	-0.00845
		TMCP	-0.00638	TMCP	-0.00787
	36	Normalized	-0.00777	Normalized	-0.00910
		TMCP	-0.00669	TMCP	-0.00795
FH	36	Normalized	-0.00826	Normalized	-0.00957
		TMCP	-0.00762	TMCP	-0.00913
	40	Normalized	-0.00916	Normalized	-0.01023
		TMCP	-0.00785	TMCP	-0.00931

한다. F급 강재에서는 급냉시 고유변형도의 차이가 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 F급 강재에서 질소가 강도에 상당히 공헌하는데 질소의 양은 TMCP 강재라고 해서 작게 사용되지 않기 때문이다. 따라서 상

대적으로 다른 원소들의 강도에 대한 공헌도가 떨어졌기 때문에 두 강재간 고유변형도 차이가 좁혀졌다고 볼 수 있다.

고유변형도는 FEM의 탄성해석시 변형량에 비례하는 값이므로, 표의 수치로부터 변형량의 상대적비교를 할 수 있다.

6. 검증 및 실용화 계획

본 연구 결과는 다양한 강재가 사용되는 해양구조물 내 T-butt 형태로 용접되는 스킨드 레일에 먼저 적용해 보았다. 이곳은 각변형이 발생하기 매우 쉬운 구조이나 레일 위에 구조물이 다니는 관계로 그 평탄도는 매우 엄격하게 관리된다. Fig. 6은 해양구조물상의 스킨드 레일(25m)에서 측정된 용접변형과, 사용된 강재를 바탕으로 본 알고리즘이 변형량을 계산해 낸 결과의 비교를 보여준다. 구조물 중간에 보강재가 사용되었으므로 변형량이 균질하지는 않지만, 측정된 최대값이 본 알고리즘으로 예측된 수치와 상당히 유사함을 확인할 수 있다. 이는 이러한 구조물을 사전에 일(-)자형 하중 교정기로 역변형을 준 뒤 용접후 변형이 자동으로 돌아오게 하여 매우 순정한 구조물을 생산할 수 있다는 뜻이 된다.

Fig. 7을 통해 레일구조 전용 용접변형 프로그램을 PDA 기반으로 구현된 것을 확인할 수 있다. 메뉴에 TMCP 여부를 지정하여 지금까지의 여타 알고리즘보다 상당히 높은 정도를 지향할 수 있도록 하였다.

7. 결 론

1) 본 연구에서는 고유변형도를 기반으로 하는 열변형 해석법을 바탕으로 제강원리와 항복강도간 상호관련성을 다루었다.

2) 고유변형도 알고리즘 내 최종 상변태율을 계산하는 부분에 베이나이트 상을 추가하였으며, 이를 고려하기 위해 CCTD와 관련한 냉각속도 식들을 이용하였다.

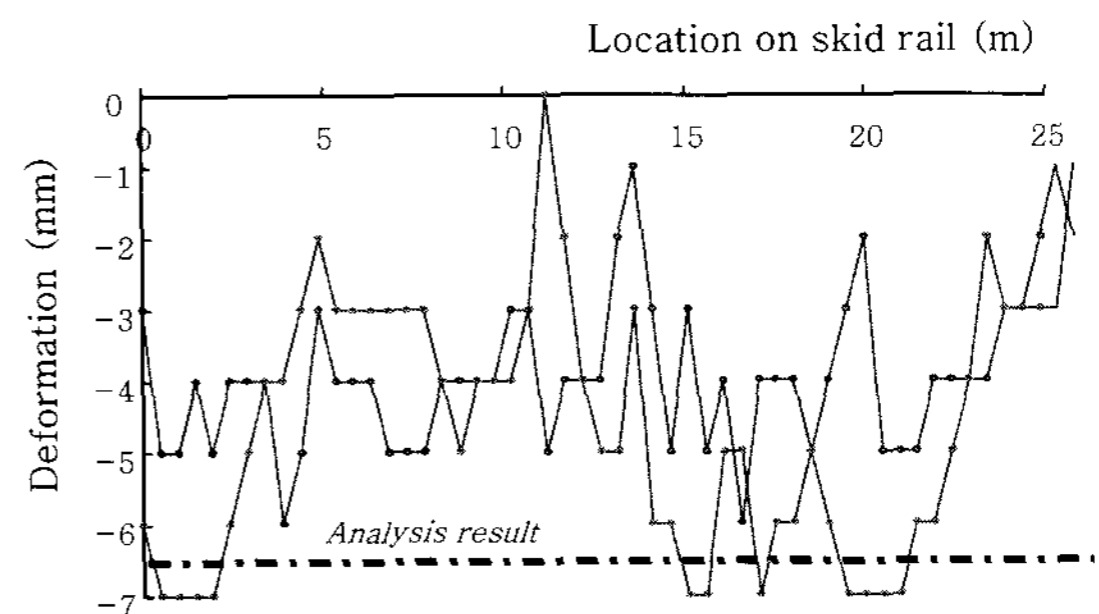


Fig. 6 Analysis result with deformations of skid rails

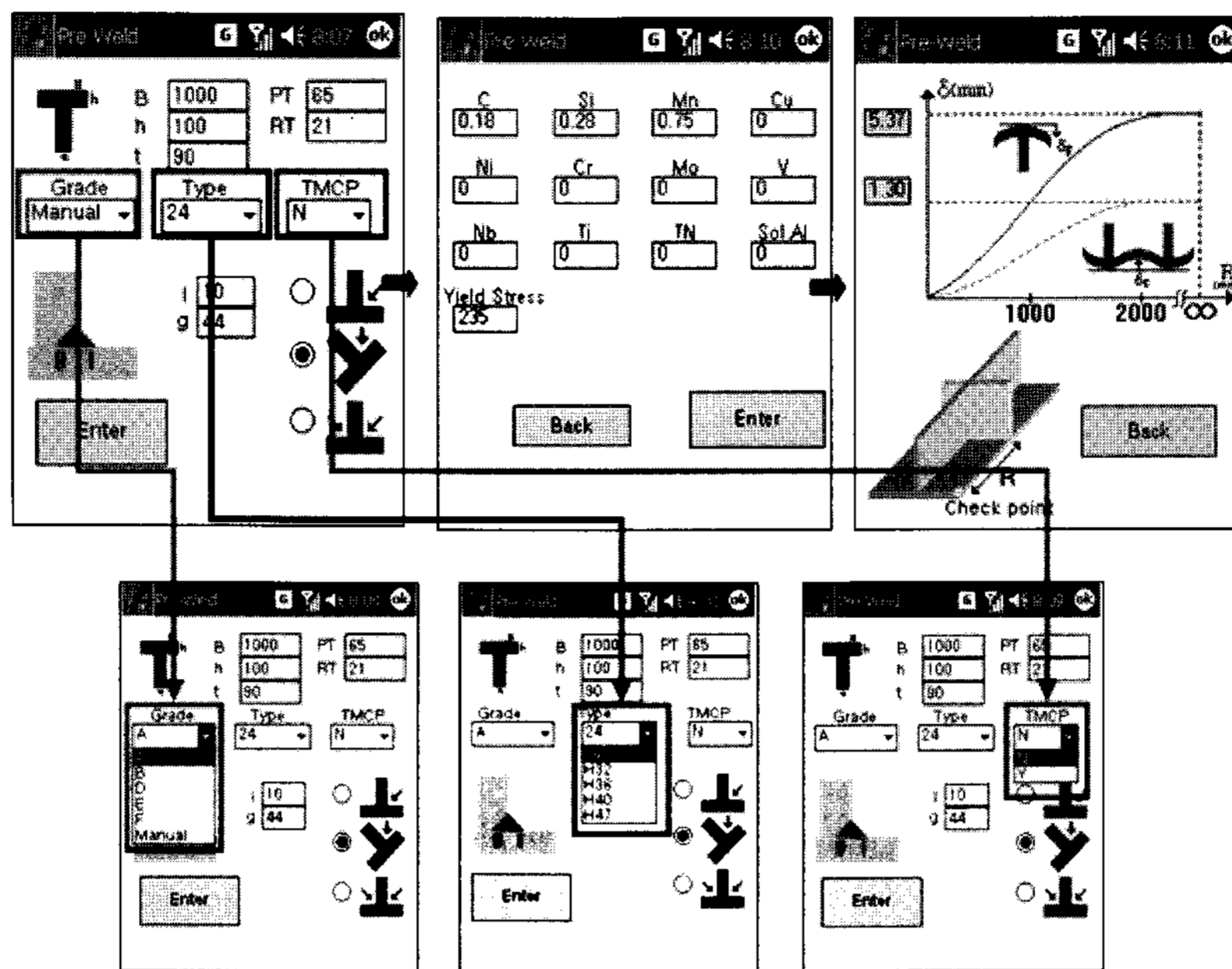


Fig. 7 PDA Programming of welding deformation considering TMCP

3) 일반강재를 기준으로 한 강도추산식을 특정 원소를 포함하도록 통계적으로 확장하였다.

4) 연강의 HAZ내 페라이트에 대해서는 선급강재의 등급으로 판단되는 강도보다 추산식에 의해 계산된 강도를 적용하여, TMCP의 열변형을 평가할 수 있는 기술을 개발하였다.

참 고 문 헌

- Gonghyun Jung : A shell-element-based Elastic Analysis Predicting Welding-Induced Distortion for Ship Panels, *Journal of Ship Research*, **51-2** (2007), 128-136
- Jang, C. D., Seo, S. I. and Ko, D. E. : A Study on the Prediction of Deformations of Plates Due to Line Heating using a Simplified Thermal Elasto-plastic Analysis, *Journal of Ship Production*, **13-1** (1997), 22-27
- Ha, Y. S. and Jang, C. D. : An Improved Inherent Strain Analysis for Plate Bending by Line Heating Considering Phase Transformation of Steel, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, **17-2** (2007), 139-144
- Yun Sok Ha, Chang Doo Jang, Jong Tae Kim and Hyung Suk Mun : Analysis of Post-Weld Deformation at the Heat-Affected Zone Using External Forces Based on the Inherent Strain, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, **8-4** (2007), 56-62
- Sung Il Seo : Calculation of Welding Distortions by Simplified Thermal Elasto-plastic Analysis, *Journal of Ship and Ocean Technology*, **8-3** (2004), 40 - 49
- Yunsok Ha : Development of Thermal Distortion Analysis Method on Large Shell Structure Using Inherent Strain as Boundary Condition, *Journal of SNAK*, **45-1** (2008), 93-100 (in Korean)
- S. B. Shin, H. G. Kim and K. G. Kim : The Korean Welding and Joining Society, *IWJC* 2007, 1291
- T. G. Keon, W. Y. Song, H. J. Jeo, M. J. Heo : Study of HT50 TMCP Steels on the HOT Formability, *KWS Annual Autumn meeting*, (2007), 6-7
- SNAK : Literature Survey for the Further Use of TMCP Steel in Shipbuilding Industries, *SNAK*, **3-4** (2006)
- K. B. Jang : A Study on the Analysis of Welding Residual Stress Considering Martensitic Transformation and the Precise Prediction of Welding Deformation in Arc-spot Welded Structure, *Pusan Nat'l University. Ph. D. Thesis*, (2001), (In Korea)
- M. Atkins : Atlas of continuous cooling transformation diagrams for engineering steels, *American Society for Metals*, **229** (1980)
- M. Avrami : *Journal of Chemical Physics*, **7** (1939), 1103
- Y. K. Lee : Analysis of Heat Transfer and Thermoelastoplastic Deformation Considering Phase Transformation during Cooling of Steel, *Seoul Nat'l University. Ph. D. Thesis*, (1996), (In Korea)
- Marder, AR, and Krauss, G : The Morphology of Martensite in Iron Carbon Alloys, *Trans ASM*, **60** (1967), 651-660
- Lloyd's Register : Rules for the Manufacture, Testing and Certification of Materials, *Lloyd's Register of shipping*, **July**, (2007)
- T. Gladman : In Metallurgical Developments in Carbon Steels, *The Iron and Steel Institute, Special Report* **81** (1963), 68-70
- ASTM : Estimating the Average Grain Size of Metals, *ASTM Designation*, **112-63** (1963)