

동적하중하에서의 용접이음부의 강도적특성에 대한 온도상승을 고려한 열탄소성 해석

안규백* · 望月正人** · 大畑充** · 방한서*** · 豊田政男**

*大阪大學 大學院 工學研究科(현, 姫路工業大學 大學院 工學研究科)

**大阪大學 大學院 工學研究科

***조선대학교 항공·조선공학부

Thermal Elastic-Plastic Analysis of Strength Considering Temperature Rise due to Plastic Deformation by Dynamic Loading in Welded Joint

Guy-Baek An*, Masahito Mochizuki**, Mitsuru Ohata**, Han-Sur Bang*** and Masao Toyoda**

*Graduate School of Engineering, Osaka University, Osaka 565-0871, Japan
(Presently Himeji Institute of Technology, Himeji 671-2201, Japan)

**Graduate School of Engineering Osaka University, Osaka 565-0871, Japan

***Dept. of Naval Architecture & Ocean Eng., Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

Abstract

It is important to understand the characteristics of material strength and fracture under the dynamic loading like as earthquakes to assure the integrity of welded structures. The characteristics of dynamic strength and fracture in structural steels and their welded joints should be evaluated based on the effects of the strain rate and the service temperature. It is difficult to predict or measure temperature rise history with the corresponding stress-strain behavior. In particular, material behaviors beyond the uniform elongation can not be precisely evaluated, though the behavior at large strain region after the maximum loading point is much important for the evaluation of fracture. In this paper, the coupling phenomena of temperature and stress-strain fields under the dynamic loading was simulated by using the finite element method. The modified rate-temperature parameter was defined by accounting for the effect of temperature rise under the dynamic deformation, and it was applied to the fully-coupled analysis between heat conduction and thermal elastic-plastic behavior. Temperature rise and stress-strain behavior including complicated phenomena were studied after the maximum loading point in structural steels and their undermatched joints and compared with the measured values.

(Received February 3, 2003)

Key Words : Undermatched joint, Strength mis-match, Dynamic loading, Plastic deformation, Temperature rise, Thermal elastic-Plastic analysis

1. 서 론

1994년에 미국의 Nothridge에서 발생한 지진과 그 다음해 1995년의 일본 Hanshin Awaji 대지진에서는, 건축 철골 구조물의 일부에 큰 피해가 발생하였다^{1,2)}. 그것들 중에서도, 다수의 피해가 용접 이음부와 같은 용접부에서 발견된 것 처럼, 지진과 같은 비교적 고

속의 부하를 용접부가 받는 경우 용접 이음부의 신뢰성을 적절하게 평가하고, 설계와 시공, 보강을 해나가는 것이 중요한 기술 과제가 되어있다.

일반적으로, 지진 하중과 같은 동적 부하를 구조용강이 받는 경우, 정적하중을 받는 경우와는 다른 강도특성을 나타낸다. 즉, 변형속도와 온도에 의해 재료의 강도 및 파괴특성은 크게 변화한다³⁻⁸⁾. 구체적으로, 변형속도의 증대와 온도의 저하에 의한 재료의 강도는 높게

되고, 또한, 파괴형태는 연성측에서 취성측으로 이동한다. 반면에, 동적부하시의 고속변형에 의해 생기는 열의 확산이 충분히 일어나지 못해, 그것이 국소적으로 강재의 온도의 상승을 일으켜서 결과적으로 재료의 기계적 특성에 영향을 일으키는 것이 지적되어져 왔다⁹⁻¹⁷⁾. 즉, 동적 부하를 받는 재료의 강도 및 파괴특성에서는 온도뿐만 아니라 고속의 소성변형과 함께 수반되는 파괴부 근방에서의 온도상승의 영향에 크게 의존하는 것이 지금까지의 보고에서 밝혀져있다. 그러나, 그 파괴 특성에 의한 영향인자의 정량적 평가수법이 확립되었다고 할 수는 없고, 상세한 수치해석을 수행하는 것에 의해서 파괴시 응력-변형률분포와 온도상승량을 구하는 것 등의 각종의 검토의 여지가 남아 있다고 생각되어진다. 또한, 용접부의 동적 강도 및 파괴 특성에 대한 고속 소성변형과 함께 발생하는 온도상승의 영향을 고려해서 평가한 예가 거의 보이지 않아 강도 및 파괴 특성을 강도적 불균질과 동적 부하의 증첩효과를 고려해서 평가 가능한 수법을 확립하는 것도 중요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는, 실제의 열영향부 등의 연질부를 포함하는 경우가 많은 용접 이음부를 가산하여, 지진하중과 같은 빠른 변위속도를 갖는 경우의 변형과 강도 및 파괴특성을 명확화 하는 것을 목적으로 한다. 그 때문에, 각종의 변형률속도와 시험온도에서의 기계적 특성과 고속의 소성변형과 함께 수반되는 온도 상승량을 파악할 필요가 있지만, 대상 재료의 파괴시의 응력과 변형률분포와 온도 상승량이 파괴현상에 크게 영향을 주는 것이라고 고려하기 때문에, 재료가 파괴에 도달 할 때까지의 거동을 평가하는 것이 중요하다. 이것들의 현상

을 실험에서만 파악하는 것은, 현상이 고속이고 부재 내부에서의 거동이 직접적으로 관찰이 안되는 등 부적합한 점이 많다. 그러므로, 본 연구에서는, 열과응력의 연성을 고려한 대변형 열탄소성 해석을 수행 하는 것에 의해서 동적 부하를 받는경우의 구조용강 및 연질부를 포함한 경우의 시험편에 대해서 파괴에 도달 할 때까지의 응력-변형률 분포 특성 및 고속 소성변형과 함께 수반되는 온도상승거동을 구해서, 이것들의 해석결과를 실험결과와 비교 하는 것에 의해 사용한 해석수법의 타당성 및 해석정도에 대해서 검토했다.

2. 실험방법

먼저, HT50강(JIS : SM490B강)과 HT80강(JIS : HY685NS강) 및 그 조합으로부터 만들어진 강도적 불균질 이음재를 이용해서 인장시험을 수행했다. 즉, 실제의 열영향부등의 연질부를 포함하는 경우가 많은 용접 이음부를 HT50강과 HT80강의 조합으로 강도적 불균질재를 1050℃에서 30분유지 하는 조건으로 확산 접합에 의해서 작성했다. 또한, 동적 부하에 의한 기계적 특성을 파악하기 위해서 균질재(HT50, HT80)에 대해서도 동일한 조건으로 열처리를 수행했다. 강재의 화학적 조성을 Table 1에, 이음재 작성시의 확산접합의 열처리 전후의 정적 기계적 특성을 Table 2에 나타내었다. 항복응력 및 인장강도는 확산접합에 의한 열처리에 의해 모두 저하하는 경향이 있는 것을 알았다. 열처리한 재료로부터 제작한 균질재 및 강도적 불균질재의 시험편의 형상과 크기를 Fig. 1에 나타내었다. 여기서 연질부의 상대두께X를 연질부의 두께H와 시험편 직경D의 비 $X=H/D$ 라 정의하고¹⁸⁾, $X=0.15, 0.3,$

Table 1 Chemical compositions of materials used

Materials	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ti	Nb	Al	B	C _{eq}	P _{cm}
HT50	0.17	0.31	1.48	0.011	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.42	0.25
HT80	0.10	0.26	0.85	0.004	0.002	0.23	1.16	0.49	0.47	0.037	0.016	0.011	0.046	0.0012	0.53	0.25

$$C_{eq} = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15$$

$$P_{cm} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$$

Table 2 Mechanical properties of materials used before and after heat treatment

Materials	Before heat treatment			After heat treatment					
	σ_Y (MPa)	σ_T (Mpa)	E.L. (%)	σ_Y (MPa)	σ_T (Mpa)	YR (%)	UEL (%)	E.L. (%)	RA (%)
HT50	344	516	33.4	298	522	57.0	14.1	30.8	68.0
HT80	717	800	20.8	537	737	72.9	6.6	20.2	64.0

σ_Y : Lower yield stress, σ_T : Tensile strength, YR: Yield-to-tensile ratio(σ_Y/σ_T)

UEL : Uniform elongation, E.L. : Elongation(G.L.=40mm, Dia.=10mm), RA : Reduction in area

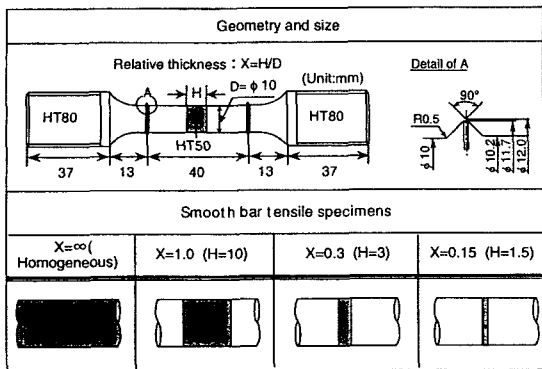


Fig. 1 Configurations of round-bar tension specimens and definition of the relative thickness in an undermatched joint

1.0로 변화시키는 것에 의해서 소성 구속의 크기를 변화 시켰다.

또한, 인장시험은 시험기의 크로스헤드 변위속도 0.01mm/s-200mm/s, 시험온도 -80°C~+40°C의 범위에서 실시했다. 인장시험의 실시 현황의 개략적인 그림을 Fig. 2에 나타내었다. 즉, 시험기는 자동제어형 만능시험기를 사용해서, 하중은 로드셀에서, 변위는 표점간거리40mm에 대해서 크리프게이지를 사용하여 시험기의 양쪽에서 변위를 측정하였다. 또한, 온도 상승은 시험편 중앙부의 표면에 열전대를 직접 붙여서 측정하였다. 시험편의 냉각은 적정의 액체질소를 냉각용기에 주입해서, 시험편 전체가 균일의 온도가 되었다고 생각되어지는 온도에서 10분 이상 목표온도에서 ±1°C로 유지한 후 각종의 시험온도, 변형률속도 하에서 인장시험을 수행하였다.

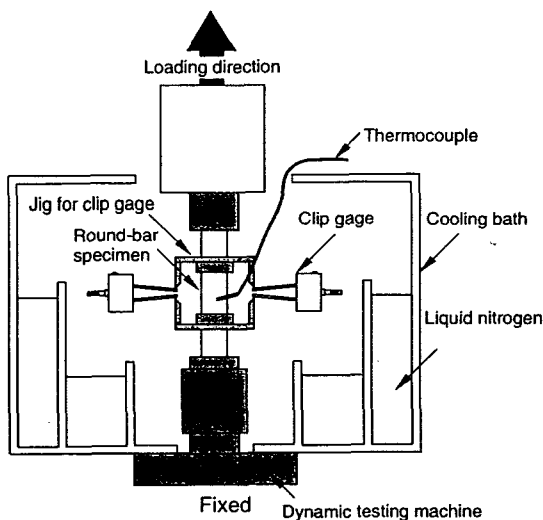


Fig. 2 Schematic illustration of round-bar tension test

3. 균질재의 기계적 특성의 파악

균질재료로서의 구조용강(HT50, HT80) 및 그 조합으로 구성되어진 연결이음부에 대하여 동적 부하시의 응력과 변형률 분포 및 온도상승 거동을 해석적으로 파악하기 위해서, 해석조건으로써 각종의 변위속도, 시험온도에 대한 각강재의 기계적 성질이 필요하다. 그러므로 본 장에서는, 실험에 의해 얻어진 기계적 특성의 결과를 수치해석에 이용 할 수 있도록 정리하였다.

3.1 균질재의 기계적 특성에 의한 온도 및 변형률 속도의 영향

연결이음부를 구성하는 2종류의 균질재료로서의 구조용강의 기계적 특성에 의한 변형률 속도 및 시험온도의 영향을 검토하기 위하여 인장시험을 수행하였다. HT50강과 HT80강의 공칭응력-공칭변형률 관계의 예를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서는, 실온에서의 정적하중(변위속도 : 0.1mm/s) 및 동적하중(변위속도 : 100mm/s)에서의 응력-변형률 관계를 각각 나타내고 있다. 이러한 관계를 여러 종류의 시험온도 및 변형률속도에 의해 얻는 것에 의하여, 균질재료의 기계적 특성으로서, 항복응력, 인장강도, 연신율, 파단연신율, 단면수축율에 대하여 각 재료에 대하여 정리하였다. 여기서, 공칭변형률은 부하시간에 대하여 거의 직선적으로 증가하고 있는 것으로부터, 변형의 대부분을 차지하는 소성변형 영역에 대하여 크리프게이지에 의하여 측정된 표점간거리 40mm에서의 공칭변형률의 평균 변화율으로써, 변형률 속도를 계산 하는 것으로 하였다.

먼저, HT50강과 HT80강에 대한 항복응력 및 인장강도에 의한 변형률 속도와 시험온도의 영향을 Fig. 4

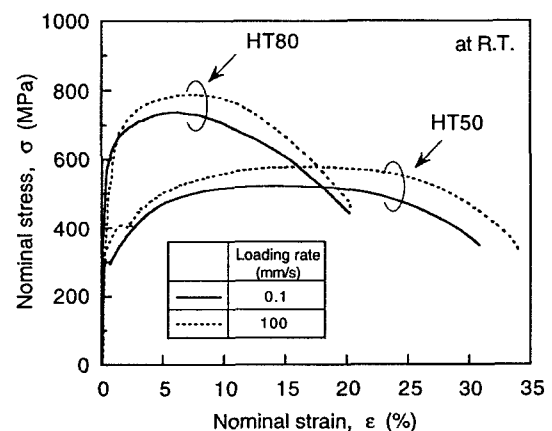


Fig. 3 Examples of nominal stress-nominal strain curve obtained by round-bar tension tests on static and dynamic loadings

에 나타내었다. 여기에서, 항복응력은 하항복점의 값으로써 정리했다. 양강재의 항복응력, 인장강도 모두 변형률 속도의 증가 또는 시험온도의 저하와 함께 상승하는 경향이 있다. 또한, 변형률 속도에 관해서는 $10^{-2}/s$ 이하의 속도에서는 항복응력 및 인장강도는 거의 일정한 값이 되고, 그 값에 의해서 정적 조건하에서의 값으로 보는 것이 가능하다고 생각된다. 또한, 항복응력과 인장강도의 상승 경향에서는 항복응력쪽이 크기 때문에 변형률속도의 증가와 시험온도의 저하에 의한 재료의 항복비는 크게 되는 것을 알았다.

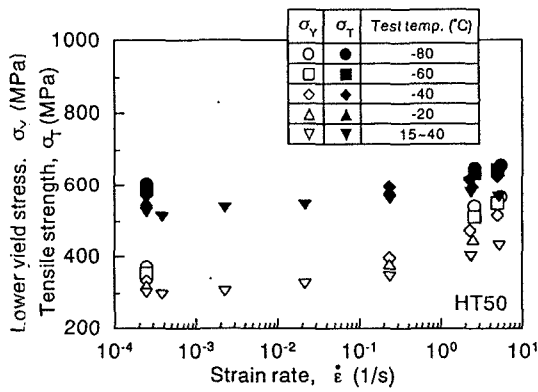
Fig. 5에는 양강재의 연신율, 파단연신율과 변형률속도 및 온도의 관계를, Fig. 6에는 단면수축율과 변형률속도 및 온도의 관계를 나타내었다. 양강재 모두 연신율, 파단연신율, 단면수축율에 대해서 이번의 실험조건인 범위내에서는 변형률 속도의 변화의 영향을 특별히 받지 않고, 거의 일정한 값을 나타내고 있는 것을 알았다. 또한, 시험 온도의 차에 대해서 실험 값이 전체적으로 흩어짐을 가지고 있지만, 그 결과에 특별한 상관은 없는 것처럼 보이고, 거의 일정한 값으로써 보는 것

이 가능하다고 고려되어진다.

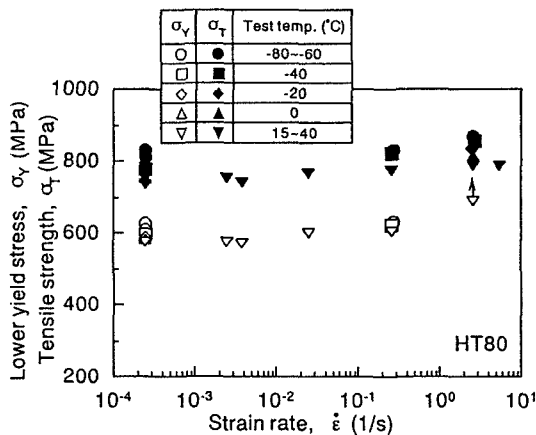
이것들의 결과로부터, 이번의 연구에 사용한 두 종류의 재료에 대하여, 강도 특성에 대해서는 변형률속도의 증대 및 시험온도의 저하와 함께 상승 하지만, 연성에 관해서는 변형률 속도 및 온도의 영향을 거의 받지 않는 것을 알았다. 또한, 두종류의 강재의 파괴 양식은, 실온에서는 모든 변형률속도의 조건하에 대하여 Cup and Con의 연성 파괴 양식을 나타내었다.

3.2 기계적 특성의 파라메타 R 에 의한 정리

동적부하에서의 강재의 항복응력과 인장강도는 변형률속도와 시험 온도의 영향을 받는다. 이처럼 동적 하중 하에서의 항복응력 σ_Y 와 변형률속도 $\dot{\epsilon}$ 및 온도 T 의 관계를 표시한 파라메타로써, 변형률속도-온도 파라메타 R (Strain rate and temperature parameter R)^{19,20}이 유효하다고 생각되어지고, 지금까지도 여

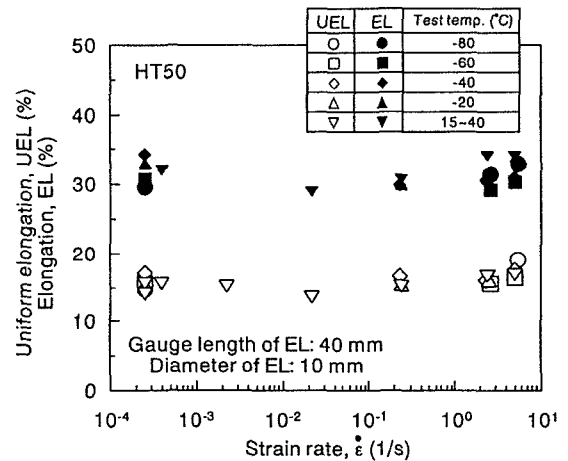


(a) HT50 steel

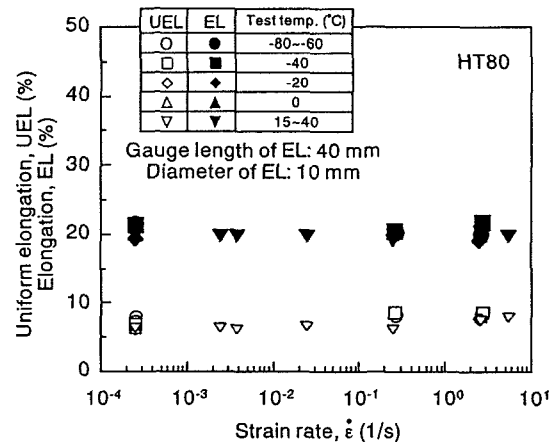


(b) HT80 steel

Fig. 4 Effects of strain rate and temperature on yield stress and tensile strength

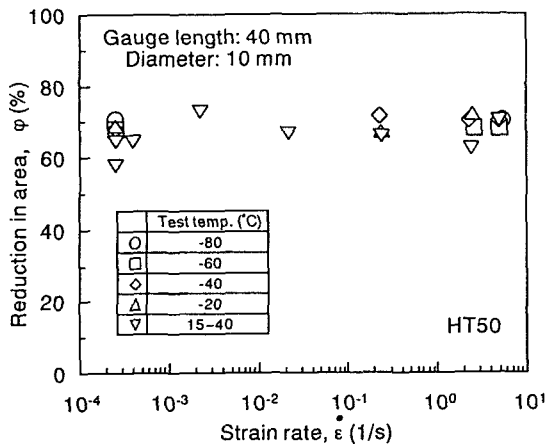


(a) HT50 steel

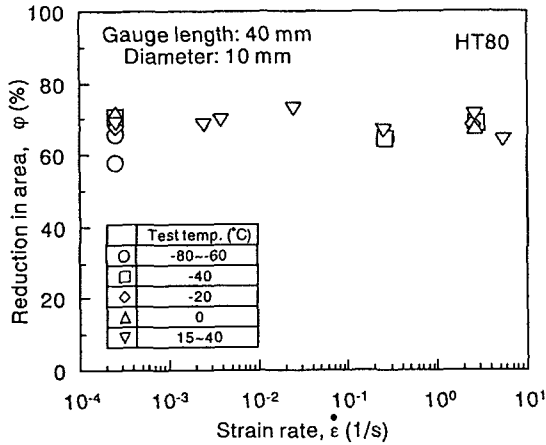


(b) HT80 steel

Fig. 5 Effects of strain rate and temperature on uniform elongation and elongation



(a) HT50 steel



(b) HT80 steel

Fig. 6 Effects of strain rate and temperature on reduction in area

러 조건하에서 정리가 되어져서, 그것의 유효성이 검증되어져 있다^{11,13,15-17,21}. 본 연구에 있어서도, 항복응력에 대해서 다음 식에 표시된 변형률속도-온도 파라메타 R 를 사용하여 실험 결과를 정리하였다.

$$R = T \cdot \ln(A_Y / \dot{\epsilon}) \quad (1)$$

재료 정수 A_Y 는 변형 속도와 온도의 상관성을 고려해서 구하는 것이 가능하다. 즉, 항복 응력 σ_Y 는 파라메타 R 의 관계로서 이하의 식으로 표현된다.

$$\sigma_Y = B_Y \cdot \exp(C_Y / R) \quad (2)$$

여기서, B_Y , C_Y 는 재료정수.

HT50강재 및 HT80강재의 항복 응력 σ_Y 를 파라메

타 R 로 정리한 것을 Fig. 7에 나타내었다. 재료정수 A_Y 의 값은, 측정결과를 식(2)에 회귀할 때의 상관성을 고려해서 $A_Y = 10^8 / s$ 로서 정리하였다. 이 그림에서, 온도와 변형률속도의 항복응력에 의한 영향은, 파라메타 R 에 의해서 통일적으로 정리 가능한 것을 알았다. 또한, 인장강도 σ_T 에 대해서도 동일한 관계식으로 정리 가능할 것으로 생각되지만, 동적부하를 받는 경우에 있어서 항복점 이후의 온도 상승량은 크게 될 것으로 고려해서, 온도 상승의 영향을 고려한 변형률속도-온도 파라메타 R ^{11,13,15-17}를 사용해서 정리했다.

$$R = (T + \Delta T) \cdot \ln(A_Y / \dot{\epsilon}) \quad (3)$$

$$\sigma_T = B_T \cdot \exp(C_T / R) \quad (4)$$

여기서, A_T , B_T , C_T 는 재료정수 이고, $A_T = 10^9 / s$ 로써 인장강도 σ_T 의 결과를 정리한 것이다. 또한, 동적부하에 의한 인장강도에 도달시의 온도상승 ΔT 를 후술의 수치해석에서 구하는 것에 의해, 그 인장강도의 온도 의존성에 의한 영향을 회귀적으로 결정하고 있다. HT50 강재 및 HT80강재의 인장강도 σ_T 를 온도상승의 영향을 고려한 파라메타 R 로 정리한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 동적하중에 의한 온도상승을 고려한 변형률속도-온도 파라메타 R 을 사용하는 것에 의해, 인장강도의 변화는 변형률속도 시험온도에 관계없이 거의 하나의 곡선으로 평가 가능한 것을 알았다. 또한,

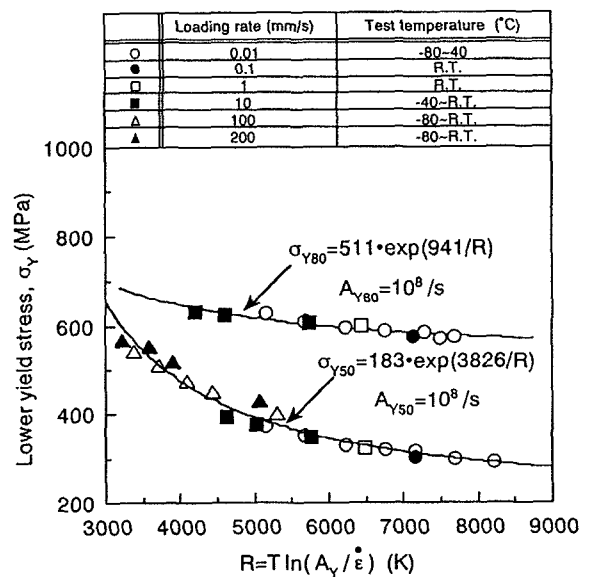


Fig. 7 Characterization of yield stress using rate temperature parameter R

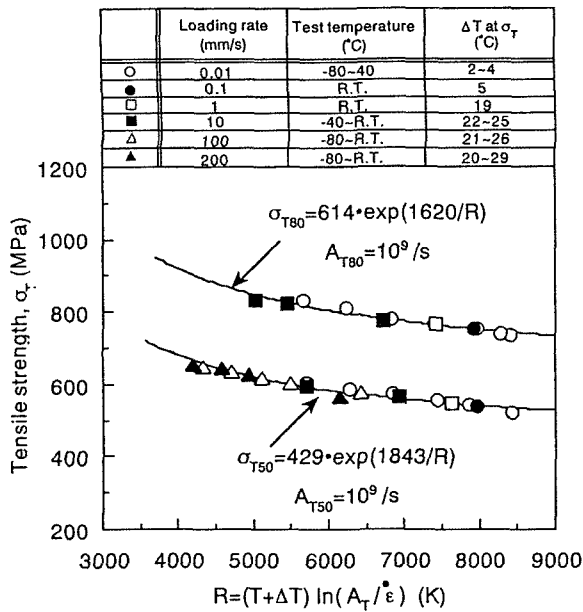


Fig. 8 Characterization of tensile strength using modified rate-temperature parameter R

항복시에 있어서 온도 상승은 무시 가능할 정도로 작게 보이 지는 것으로부터, 항복응력 및 인장강도 모두 온도 상승의 영향을 고려한 파라메타 R 를 이용하는 것에 의해서 온도와 변형률속도의 관계를 통일적으로 정리 가능하다고 말 할수있다.

4. 응력-변형률 거동 및 온도 상승량의 열탄소성 해석

건장의 실험에서 얻은 항복점 및 인장강도로 부터 온도 상승의 영향을 고려한 각 온도, 각 변형률속도에서의 응력-변형률 관계를 변형률속도-온도 파라메타 R 를 사용하여 회귀적으로 결정해서, 최종적으로 얻은 재료특성을 이용해서 열과 응력의 연성에 의한 열탄소성 해석을 수행했다. 또한, 이것의 해석결과를 실험결과와 비교해서, 본 해석에 사용한 해석수법의 타당성을 검토했다.

4.1 열과 응력의 연성 해석 방법

동적하중하 에서의 재료의 응력 및 변형률분포와 온도 상승거동을 상세하게 파악하기 위하여 유한요소법을 이용하여 열탄소성 해석을 수행하였다. 해석에서는 (1) 고변형률속도에 의한 강도의 상승, (2)소성일에 따른 열의 발생 및 확산과, 그것들에 의한 온도의 상승에 의한 강도의 저하, 더욱더, (3)그것들 상호 영향에 의한 연성효과를 고려한 열과 응력의 연성 해석을 범용 유한

요소법 구조해석코드ABAQUS Ver.5.8^{22,23)}를 사용해서 수행하였다. 즉, 변형률속도-온도파라메타 R 에서 얻은 각각의 온도 및 변형률속도에서의 항복 응력 및 인장 강도에서 유도된 각각의 조건에서의 응력-변형률 관계를 사용해서 해석을 수행했다.

해석에 사용한 모델형상은 Fig. 9에 나타 내었다. 해석모델은 실험에 사용한 환봉시험편과 동일한 크기로 하였다. 사용한 요소는 4절점 축대칭 요소이고, 최소 요소크기는 시험편 중앙부에서 0.03mm × 0.03mm이다. 해석 모델의 요소수 및 절점수는 각각 817, 938 이다. 또한, 열전도해석에 사용한 재료의 물리적 특성을 Table 3에 나타 내었다. 이것들의 값은 본 연구 에서 사용한 온도범위(-80°C ~ +150°C정도)에서는 거의 일정 하다고 보아도 틀리지 않다고 보여져서 설정한값이다. 또한, 영률 E 및 프와송의비 ν 에 대해서도, 이 온도 범위내 에서는 거의 변화가 없다고 보아서, 영률 E = 206Gpa, 프와송의비 ν = 0.3을사용했다.

반면, 동적 하중를 받는 강재는, 고속 변형과 함께 온도 상승도 크게 되는것으로 고려 되어서, 해석적으로 이것들을 평가 하기 위하여, 사용 대상인 재료의 각각의 일정 온도에 대한 응력-변형률 관계의 설정이 필요하다. 그러나, 실험에서는 동적하중에 의해서 필연적으로 온도가 상승하기 때문에, 어떤 일정한 온도에 있어서 응력-변형률 관계를 동적 하중하에 있어서 직접적으로 측정하는 것은 불가능하다. 그래서, 본 연구의

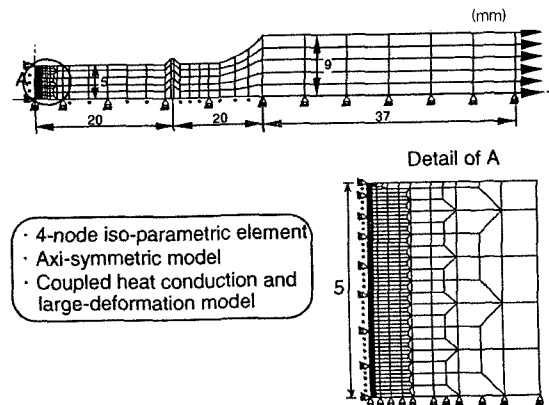


Fig. 9 Mesh division of round-bar tension specimen for heat-stress coupling FE-analysis

Table 3 Physical properties used for FE-analysis

	Specific heat c(J/(kg · K))	Density ρ(kg/mm ³)	Heat diffusivity a(m ² /s)	Coefficient of linear expansion α _L (1/K)
HT50	4.8 × 10 ²	8.0 × 10 ⁻⁶	2.17 × 10 ⁻⁵	1.2 × 10 ⁻⁵
HT80				

동적 해석에서는, 이하에 나타내는 순서에 의해서 재료의 각 온도 및 각 변형률속도에 있어서 응력-변형률 관계를 설정하는 것으로 해서 계산을 수행하였다.

① HT50강 및 HT80강 각각의 재료의 항복응력 σ_Y , 인장강도 σ_T 를 각 변형률속도, 각 시험온도에서의 실험 결과를 식(1)에 표현한 변형률속도-온도 파라메타 R 를 사용해서 정리한다. 정리한 결과로부터, 실험을 수행하지 않은 조건을 포함하여 각각의 변형률속도, 실험온도에 대하여 항복응력, 인장강도를 결정한다. 이것들의 값에는 현 시점에서는 온도상승의 영향이 고려되어 있지 않다. 또한, 해석에 사용한 변형률속도, 실험온도의 설정에 관해서는, 동적하중하에서의 온도상승도 크게 되어 지는 것으로 고려되기 때문에, 시험 온도 범위뿐만 아니라 온도상승의 효과를 포괄하는 변형률속도, 온도범위에 대하여 설정 할 필요가 있다.

② 파라메타 R 에서 구한 각각의 변형률속도 및 온도조건하에 있어서 항복응력 σ_Y 와 인장강도 σ_T , 또한, 연신율 ϵ_T 를 사용해서, 각각의 변형률속도 및 온도조건에 대하여 변형경화지수 n 및 정수 α 를 각각 이하의 식에 의해서 결정했다.

$$\sigma_T = \sigma_Y (n/\alpha)^n \cdot \exp[-(n-\alpha)] \quad (5)$$

$$\epsilon_T = \exp(n-\alpha) - 1 \quad (6)$$

단, 연신율 ϵ_T 에 관해서는, Fig. 5 에 나타낸 것과 같이 변형률속도와 온도의 영향을 거의 받지 않기 때문에, HT50강 및 HT80강 각각에 대해서 모든 시험 조건하에 있어서 실험결과의 평균값을 구하였다. 그것으로부터, HT50강의 연신율 ϵ_T 는 16% HT80강의 연신율 ϵ_T 는 7%로 했다.

③ 순서②에서 결정한 변형경화지수 n 및 정수 α 를 사용해서, 각각의 변형률속도 및 온도에 대하여 상당응력-상당소성변형률 관계를 다음 식을 사용해서 결정했다.

$$\bar{\sigma} = \sigma_Y [1 + \bar{\epsilon}_p / \alpha]^n \quad (7)$$

여기서, $\bar{\sigma}$: 상당응력, $\bar{\epsilon}_p$: 상당소성변형률 이다.

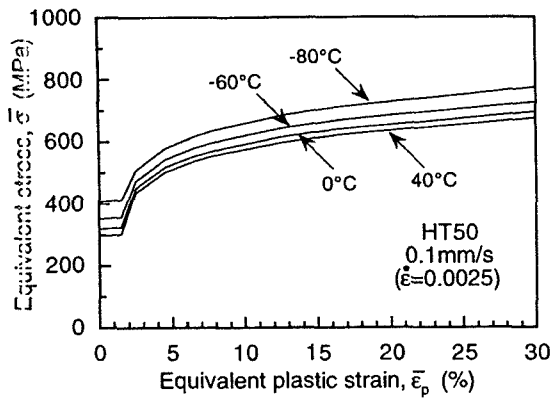
④ HT50강재 및 HT80강재 각각의 균질재의 응력-변형률 관계를 사용해서 인장강도 σ_T 에 도달할 때의 온도 상승량을 FEM해석에 의해 구해서, 인장강도 σ_T 를 식(3)에 나타낸 온도상승을 고려한 변형률속도-온도 파라메타 R 를 사용해서 재정리 했다. 또한, 항

복응력 σ_Y 에 도달할 때까지의 온도상승은 무시 할수있을 정도로 적은 값이라 생각되어져서, 항복응력의 재정리는 하지 않았다. 한편, 소성변형을 동반한 발열에 관해서, 본 해석에서는 강재의 온도상승량 ΔT 를 소성일 90%가 열로 변환되어지는 것으로 계산했다¹⁵⁾. 즉, 열의 변환되어진 소성일량 W_T 는 이하와 같이 표현되어진다.

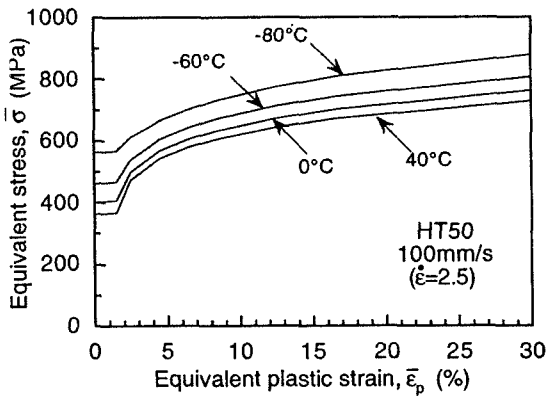
$$W_T = 0.9 \int \bar{\sigma} d\bar{\epsilon}_p \quad (8)$$

⑤ 항복응력 σ_Y 에 관한 파라메타 R 및 현재의 인장강도 σ_T 에 관한 온도상승을 고려한 파라메타 R 를 사용해서, 다시②~④의 조작을 응력-변형률 관계 및 온도상승 거동이 실험결과와 해석결과가 잘 일치할 때까지 회귀적으로 반복한다. 그것으로부터 최종적으로 HT50강 및 HT80강의 상당응력-상당소성변형률 관계를 결정해서, 그것을 이용해서 균질재 및 연질 이음재의 열과 응력의 연성FEM해석을 수행했다. 또한, 최종적으로 얻은 온도상승을 고려한 파라메타 R 를 이용해서 인장강도를 정리한 것을 Fig. 8에 나타내었다. 이 그림에서 나타내고 있는 것 처럼, 최대하중점에서의 온도상승량은 동적부하시에는 30°C정도까지 올라가고 있기 때문에, σ_T 인장강도의 정리결과는 온도상승을 고려하지 않은 초기의 정리결과와 비교해서 많은 차이를 나타내고있다.

순서 ①~⑤에 의해서 결정된 균질재 및 연질이음재의 열과응력 연성 해석에 사용한 각각의 변형률속도 및 온도에 대한 상당응력-상당소성변형률 관계의 예를 Fig. 10에 나타내었다. HT50강의 변위속도 0.1mm/s 에 상당하는 변형률속도 $\dot{\epsilon} = 0.0025/s$ 와, 변위속도 100mm/s에 상당하는 변형률속도 $\dot{\epsilon} = 2.5/s$ 의 경우에 대해서 각각 나타내고 있다. 이것들의 관계는 온도상승을 고려한 파라메타 R 에서 얻은 각각의 온도와 변형률속도에서의 항복응력 및 인장강도로 부터 얻어진 것이다. 또한, HT50강에 관해서는, 실험결과를 기본으로 해서 모든 조건하에 대해서 1.5%의 유다스 변형률을 도입하여 해석에 사용한 응력-변형률 관계를 보정 하였다. 반면, HT80강에 대해서는 유다스 변형률은 발생하지 않는 것으로 했다. 이러한 응력-변형률 관계를 사용해서, 미세스의 항복응력, 등방경화법칙, 변형률증분이론의 조건하에서 열탄소성해석을 수행하였다.



(a) Strain rate $\dot{\epsilon} = 0.0025$

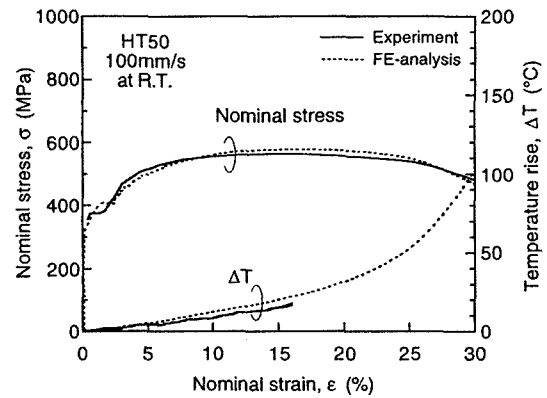


(b) Strain rate $\dot{\epsilon} = 2.5$

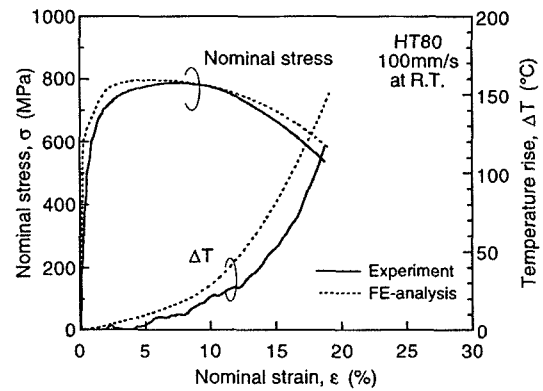
Fig. 10 Examples of relation between equivalent stress and equivalent plastic strain in each test temperature and each strain rate for FE-analysis in HT50 steel

4.2 균질재의 실험 및 해석결과의 비교

정적하중(변위속도 : 0.01mm/s) 및 동적하중(변위속도 : 100mm/s)에서의 균질재인 HT50강 및 HT80강의 공칭응력-공칭변형률 관계와 온도상승 이력의 예를 Fig. 11에 나타내었다. 그림에는, 실험 온도를 실온으로 한 경우의 응력-변형률관계의 이력 및 온도상승의 해석결과와 실험결과의 비교를 나타내었다. 균질재의 공칭응력-공칭변형률 관계는, 최대하중 이하의 파괴에 도달할 때까지의 거동을 포함해서 해석결과가 실험결과와 잘 일치하고 있다고 말할 수 있다. 변형률속도의 증가와 함께, 양강재 모두 강도가 상승하는 것이 확인되었다. 또한, 동적하중하에서의 온도상승에 대해서도 실험과 해석결과가 잘 일치하고 있는 것을 알았다. 즉, 이 결과로부터, 본 연구에 사용한 열과 응력의 연성 해석수법이 타당한 것으로 검증되었다고 할수있다. 또한, 각각의 조건하에서의 파괴에 도달할 때까지의 응력, 변형률과 온도이력의 분포를 정도 좋게 구하는 것이 가능



(a) HT50 steel (100 mm/s at R.T.)



(b) HT80 steel (100 mm/s at R.T.)

Fig. 11 Comparison of stress-strain curves and temperature rise in round-bar tension specimen of HT50 steel obtained by experiment and FE-analysis

하다고 할 수 있다. 또한, 응력 및 변형률 거동의 해석결과와 측정결과가 잘 일치하고 있는 것과 더욱이, 온도상승량에 대해서도 양자가 잘 일치하고 있는 것은, 식(8)에 이용한 열이 변환되어진 소성일량의 $\eta = 0.9$ 가 타당한 값이었다는 것을 검증 결과로써도 얻었다.

4.3 연질이음부의 실험 및 해석결과의 비교

연질이음부의 정적하중(변위속도 : 0.1mm/s) 및 동적하중(변위속도 : 100mm/s)에서의 공칭응력-공칭변형률과 온도상승거동을 Fig. 12에 나타내었다. 그림 중에서는, 예로서 실험온도 실온에서의 상대두께 0.15와 1.0의 이음부의 응력이력 및 온도거동의 해석결과와 실험결과의 비교를 나타내고 있다. 연질이음부에 대해서도 최대하중 이하의 파괴에 도달 할 때까지의 거동을 포함한 공칭응력-공칭변형률 관계 및 온도상승 모두 해석결과와 실험결과가 잘 일치하고 있는 것을 알았다. 또한, 변형률속도의 증가와 함께 강도가 상승하고, 온

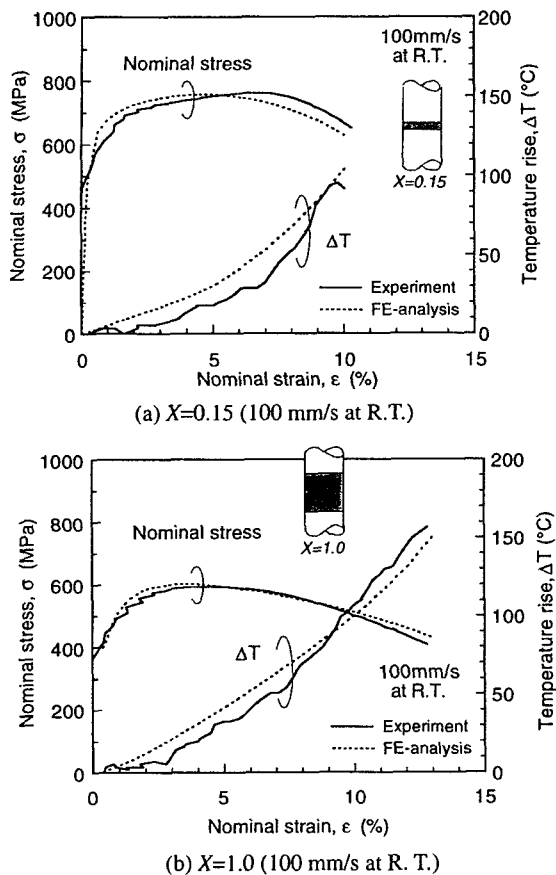


Fig. 12 Comparison of stress-strain curves and temperature rise in round-bar tension specimen of undermatched joints obtained by experiment and FE-analysis

도상승 또한 큰 폭으로 증가하는 것을 알았다. 반면, 연신률은 균질재에 비하여 무척 적어지고 있다. 연질이음부의 경우, 항복점이후의 변형영역이 주로 연질층에 집중되어져 있는 것으로부터, 그것만큼 온도가 상승하기 쉽고 또한, 이음부 전체로서는 변형이 발생하기 어렵기 때문에 결과로서 연신율도 감소하는 것이라고 생각한다. 또한, 여기에 나타난 조건이외의 거동에 대해서도, 파괴에 도달하기까지의 응력-변형률 관계와 온도이력의 해석결과는 변위속도와 실험온도, 상대두께에 관계없이 실험결과와 잘 일치하고 있는 것이 확인되었다.

이상과 같이, 정적하중에서의 거동은 물론, 동적하중에 있어서도 파괴에 도달 할 때까지의 응력과 변형률 분포와 온도상승을 해석적으로 구하는 것이 가능했다. 이것으로부터, 연질이음부의 강도 및 파괴특성을 검토하고, 실험적으로 구하는 것이 어려운 상세한 응력, 변형률 분포를 해석에 의해서 얻는 것으로부터, 종래에는 없었던 여러 가지의 유용한 역학적 고찰이 가능하게 되었다고 고려된다.

5. 결 론

동적부하를 받는 구조용강 및 연질부를 포함한 용접 이음부등의 강도적불균질 이음부에 대해서, 고속 소성 변형과함께 동반되는 온도상승을 고려한 열탄소성 해석을 수행했다. 즉, 각종의 변형률속도와 시험온도에서의 기계적 특성과 온도상승량을 파악하기 위하여, 열과 응력의 연성을 고려한 열탄소성 해석을 수행하였으며, 그 결과를 실험결과와 비교하는 것으로부터, 동적하중을 받는 구조용강 및 연질이음부의 응력-변형률 특성 및 고속 소성변형과 함께 발생하는 온도 상승 이력에 대해서도 검토했다. 그 결과, 균질재료로서의 구조용강 및 연질이음부의 어떤 종류에 있어서도, 최고 하중점 이하를 포함한 파괴에 도달할 때까지의 실험결과와 해석결과가 잘 일치할 수 있도록 정도 좋게 해석하는 것이 가능했다.

참 고 문 헌

1. V. V. Bertero, J. C. Anderson and H. Krawinkler : Performance of Steel Building Structures During the Northridge Earthquake. The Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, Report No. **UCB/EERC-94-09** (1994).
2. M. Toyoda : How Steel Structures Fared in Japan Great Earthquake. *Welding Journal*, **74-12** (1995), 132-136.
3. J. M. Krafft and A. M. Sullivan : Effects of Speed and Temperature on Crack Toughness and Yield Strength in Mild Steel. *Trans. ASM*, **56** (1963), 160-175.
4. A. R. Rosenfield and G. T. Hahn : Numerical Description of the Ambient Low-Temperature and High-Strain Rate Flow and Fracture Behavior of Plain Carbon Steel. *Trans. ASM*, **59** (1966), 962-980.
5. D. Sunamoto and T. Funada : Study on the Dynamic Fracture Toughness of Steel, *Mitsubishi Juko Giho*, **11-6** (1974), 775-780. (in Japanese).
6. Y. Nakano, Y. Sakai, G. Yagawa, K. Ando and Y. Ando : Dynamic Fracture Toughness of LWR Pressure Vessel Steel A508 Cl. 3: A Japanese Round-Robin Study. *Int. J. Pres. Ves. Piping*, **31** (1988), 255-270.
7. Y. Liu, J. Zhu, H. Zhou and P. S. Follansbee : Variation of Yield Stress with Strain Rate for Three Carbon Steels. *Trans. ASME, J. Eng. Mater. Tech.*, **114** (1992), 348-353.
8. K. Kussmaul, T. Link, A. Klenk and T. Nguyen-Huy : Determination of Crack Initiation and Crack Resistance Using Compact Specimens and Comparison with Results of Numerical Simulation of Dynamically Loaded Wide Plates. *Nucl. Eng. Des.*, **151** (1994), 489-502.
9. J. M. Krafft and G. R. Irwin : Crack-Velocity Considerations, *Fracture Toughness Testing and Its Applications*, ASTM STP 381, American Society for Testing and Materials (1965), 114-129.
10. J. R. Rice and N. Levy : Local Heating by Plastic

- Deformation at a Crack Tip, Physics of Strength and Plasticity, Edited by A. S. Argon, M. I. T. Press (1969), 277-293.
11. E. Fujii, I. Ohkuma, Y. Kawaguchi, M. Tsukamoto : Effect of Temperature and Strain Rate on Dynamic Fracture Toughness of Steel, Journal of The Society of Naval Architects of Japan, **158** (1985), 619-629.
 12. K. Sano : Effect of Local Temperature Rise at a Crack Tip on the Fracture Toughness of 9%Ni Steels, Tetsu-to-Hagane, **73** (1987), 380-386. (in Japanese).
 13. M. Toyosada, E. Fujii, K. Nohara, Y. Kawaguchi, K. Arimochi, K. Isaka : The Effect of Strain Rate on Critical CTOD and J Integral, **161** (1987), 367-380. (in Japanese).
 14. Y. Nakano, T. Kubo : Effect of Loading Rate on Fracture Toughness of Steels for Pressure Vessels, **39** (1990), 1417-1423. (in Japanese).
 15. M. Toyosada, K. Gotoh, K. Sagara : Temperature Rise Distribution near a Crack Tip due to Plastic Work under High Loading Rate. Journal of The Society of Naval Architects of Japan, **170** (1991), 651-663. (in Japanese).
 16. F. Minami, T. Hashida, M. Toyoda, J. Morikawa, T. Ohmura, K. Arimochi, N. Kond : Dynamic Fracture Toughness Evaluation of Structural Steels Based on the Local Approach - Application of the Local Approach to Fracture Control Design (Part 3). Journal of The Society of Naval Architects of Japan, **184** (1998), 457-468. (in Japanese).
 17. T. Tagawa, H. Shimanuki, Y. Hagiwara, T. Miyata : Application of Local Fracture Criterion Approach for Dynamic Fracture Toughness, Journal of The Society of Naval Architects of Japan, **185** (1999), 309-317. (in Japanese).
 18. M. Toyoda : Study on Static Tensile Behaviors of Welded Joints with a Lower Strength Weld Metal Doctor Thesis, Osaka University 1973. (in Japanese).
 19. P. E. Bennett and G. M. Sinclair : An Analysis of the Time and Temperature Dependence of the Upper Yield Point in Iron, Trans. ASME, J. Basic Eng., **83** (1961), 557-564.
 20. P. E. Bennett and G. M. Sinclair : Parameter Representation of Low-Temperature Yield Behavior of Body-Centered Cubic Transition Metals, ASME Publication, 65-M ET-11 (1965), and also Trans. ASME, J. Basic Eng., **88** (1966), 518-524.
 21. H. T. Corten and A. K. Shoemaker : Fracture Toughness of Structural Steels as a Function of the Rate Parameter $TlnA/\dot{\epsilon}$, Trans. ASME, J. Basic Eng., **89** (1967), 86-92.
 22. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. : ABAQUS/Standard User's Manuals, Version 5.8, Vols. 1 to 3 (1998).
 23. D. Hugh Hibbitt and V. Pedro Marcal : A Numerical, Thermo-Mechanical Model for the Welding and Subsequent Loading of a Fabricated Structure. Computer and Structures, **3** (1973), 1145-1174.