

# 강도적 불균질을 갖는 구조물의 동적하중하에서의 연성크랙 발생조건

## Criterion for ductile crack initiation with strength mismatch under dynamic loading

안 규백\*, 大 畑 充\*\*, 望月正人\*\*, 방 한서\*\*\*, 豊田 政男\*\*

\* 일본 오사카대학 대학원 (현, 일본 히메지 공업대학 대학원 기계공학전공)

\*\* 일본 오사카대학 대학원 생산과학전공

\*\*\* 조선대학교 선박해양공학과

**ABSTRACT** The present study focuses on the effect of geometrical discontinuity, strength mismatch, which can elevate plastic constraint due to heterogeneous plastic straining, and loading rate on the ductile crack initiation using two-parameter criterion. Fracture initiation testing has been conducted under static and dynamic loading using circumferentially notched round-bar specimens. In order to evaluate the stress/strain state in the specimens, especially under dynamic loading, a thermal elastic-plastic dynamic finite element (FE) analysis considering the temperature rise due to plastic deformation has been carried out.

### 1. 서 론

건축 철골 구조물 등의 용접 강구조물에서는, 지진 하중 등에 의해 거대한 변형을 동반하는 경우, 초기결함 등의 응력집중원이 존재하지 않아도, 용접 접합부로 대표되는 구조적인 응력·변형을 집중부에서 큰 소성변형을 동반한 연성크랙이 발생하여, 그것이 취성파괴의 기점이 되는 경우가 많이 있다. 이러한 구조적 불안전 현상을 가지고있는 강구조물의 취성파괴를 방지하고, 적절한 안전성평가를 수행하여 취성파괴에 선행하여 발생하는 연성크랙의 발생조건과 지배인자를 해명하여, 그 한계평가수법을 확립하는 것이 매우 중요하다고 생각한다.

본 연구에서는, 강도적 불균질이 존재하는 부재, 또한 이것이 동적부하를 받는 경우의 연성크랙 발생거동을 평가하기 위하여, 환봉 인장시험편을 사용하여, 정적 및 동적하중하에서 인장시험을 실시하여, 연성크랙발생거동을 파악후, 그 실험결과를 바탕으로 하여, 종래<sup>1-2)</sup>부터 제안되어진 상당소성변형률과 응력다축도의 2파라메타를 이용한 강재의 연성크랙 발생 조건이, 이러한 크랙발생한계를 평가하는 통일적인 크라이테리언으로서 적용가능한가에 대하여 밝히기 위하여 열·응력 연성을 고려한 유한요소법에 의한 수치해석을 수행하여, 2파라메타를 이용한 연성크랙발생 한계조건에 대하여 검토하였다.

### 2. 실험목적 및 방법

실험에서는, HT50강의 크랙발생거동에 의한 형상적 불연속에 따른 소성구속의 정도의 영향을 살피기 위하여, Fig. 1 에 나타난 직경 10mm의 환봉시험편과, 그 시험편에 노치를 넣은, 노치반경  $R$  이 각각 다른 2종류의 원주 노치시험편( $R1$ ,  $R2$ )을 사용했다. 또한, 강도적 불균질이 갖는 소성구속과 그 정도의 영향을 검토하는 것을 목적으로, 폭  $H$ 를 3종류

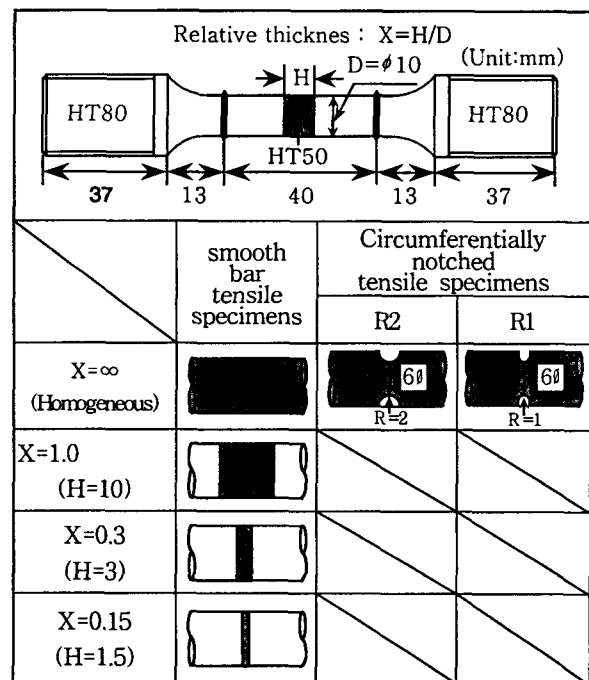


Fig. 1 Configuration of round-bar tensile specimens with geometrical heterogeneity and strength mismatch

Table 1 Chemical compositions of HT50 and HT80 steels used

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ti	Nb	Al	B	C <sub>eq</sub>	P <sub>cm</sub>
HT50	0.17	0.31	1.48	0.011	0.002	-	-	-	-	-	-	-	0.016	-	0.43	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	0.50	0.25

C<sub>eq</sub>=C+Mn/6+(Cr+Mo+V)5+(Cu+Ni)/15, P<sub>cm</sub>=C+Si/30+Mn/20+Cu/20+Ni/60+Cr/20+Mo/15+V/10+5B

로 변화시킨 HT50강(H=1.5, 3.0, 10.0mm)의 양측에 고강도의 HT80강을 확산접합 하여 인위적으로 강도적불균질재를 제작하여 인장실험을 실시하였다. 각 강재의 화학조성은 Table 1에 나타냈으며, 기계적 특성은 Table 2에 나타내었다. 인장시험은 크로스헤드 변위속도가 0.1mm/s (정적하중)과 100mm/s (동적하중)에서 실온에서 실시하였다.

Table 2 Mechanical properties of HT50 and HT80 steels used

Steel	σ <sub>Y</sub>	σ <sub>T</sub>	YR	ε <sub>T</sub>	EL	RA	S <sub>c</sub> (Y)	S <sub>c</sub> (T)
HT50	298	522	57	14.1	30.8	68	1.81	1.41
HT80	537	737	73	6.6	20.2	64		

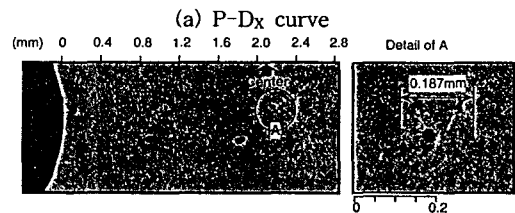
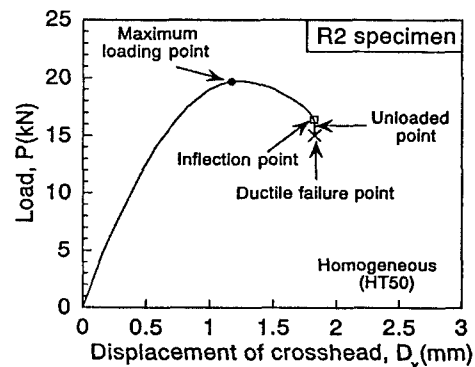
σ<sub>Y</sub> : Lower yield stress, σ<sub>T</sub> : Tensile strength  
 YR : Yield-to-tensile ratio (σ<sub>Y</sub>/σ<sub>T</sub>)  
 ε<sub>T</sub> : Uniform elongation  
 EL : Elongation (G.L.=40mm, Dia=10mm)  
 RA : Reduction in area,  
 S<sub>c</sub>(Y):σ<sub>Y</sub><sup>HT80</sup>/σ<sub>Y</sub><sup>HT50</sup>/S<sub>c</sub>(T): σ<sub>T</sub><sup>HT80</sup>/σ<sub>T</sub><sup>HT50</sup>

### 3. 정적·동적하중하에서의 강도적 불균질재의 연성크랙 발생거동

Fig. 2에는 R 2시험편의 파괴까지의 하중 P-크로스헤드 변위 D<sub>X</sub>의 관계를 나타내었다. P-D<sub>X</sub>의 관계에 있어서 파괴직전에 변곡점이 보였으며, 그후 급속히 하중이 저하한 후 파괴에 도달하였다. 파괴후의 시험편은 전형적인 cup and con 형태의 파면을 나타내었으며, 파면 중앙부에서는 동축딴플이 관찰되었다. 이것으로부터 시험편 중앙부 부근에서 보이드의 발생·성장에 기본 하여 연성크랙이 발생한 것이라고 추정된다.

연성크랙의 발생거동을 더욱 상세하게 관찰하기 위하여, 하중 P-변위 D<sub>X</sub> 관계에서 나타난 변곡점의 직전 및 직후에 제하후, 시험편의 중앙단면을 SEM에 의해서 관찰결과를 Fig. 2(b)에 나타내었다. 시험편의 잘록해진 단면의 중앙부에서 큰 보이드가 관찰되었으며, 그 보이드 사이에서 미소 보이드가 발생·연결에 의해서 발생한 것이라고 생각되는 연성크랙이 명료하게 관찰되었다. 환봉 및 R 1시험편에 있어서도 동일한 결과를 얻었다.

이러한 관찰결과로부터, 하중 P-크로스헤드변위 D<sub>X</sub> 관계에서 보여진 변곡점이 크랙발생시의 부하레벨에 상당하는 것이라고 추정하였다.



(a) P-D<sub>X</sub> curve  
 (b) SEM micrographs of the specimen sectioned near the center of specimen just before ductile failure  
 Fig. 2 Ductile crack initiation behavior of R2 specimen under static loading

### 4. 동적 FEM해석을 이용한 강도적 불균질재의 연성크랙발생 특성

균질재 및 강도적불균질재에 대하여 정적 및 동적하중에서의 연성크랙발생 한계조건을 검토하기 위하여 각각의 시험편에 대하여 실제 시험조건과 동일한 조건에서 유한요소법에 의한 열과 응력의 연성을 고려한 열탄소성해석을 실시하여, 2파라메타를 사용한 연성크랙발생조건에 의한 강도적불연속 및 동적부하의 영향에 대하여 검토했다. 해석은 열과 응력의 연성을 고려한 범용 FEM해석코드 ABAQUS Ver. 5.8<sup>3)</sup>를 사용해서 수행했다.

동적하중하에서의 연성크랙 발생조건을 검토하기 위하여, 고변형률속도에 의한 강도의 상승, 소성일에 따른 열의 발생 및 확산을 고려한 열·응력연성해석을 수행하였다. 그 동적해석결과의 예

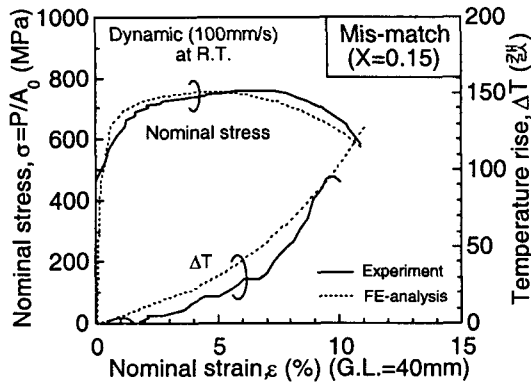


Fig. 3 Comparison of experimental and numerical nominal stress and strain curves and temperature rise in mismatch specimen under dynamic loading

를 Fig.3 에 나타내었다. 본 연구에서 제안한 동적해석방법에 의한 해석결과와 실험 결과가 잘 일치하고있는 것을 알았다. 실험·관찰로부터 환봉, R2시험편 및 R1시험편의 모든 시험편에 있어서 시험편의 중앙부 근방에서의 연성크랙이 발생하였으므로, 이상의 해석수법을 이용하여 시험편 가장 중앙부에서 크랙발생시의 상당소성변형률  $\bar{\epsilon}_p$  과 응력다축도  $\sigma_m/\bar{\sigma}$  의 관계를 Fig. 4 에 나타내었다. 크랙발생시의 상당소성변형률은, 응력다축도의 함수로서 표시되고, 종래의 결과<sup>1-2)</sup>와 같이 노치반경의 저하와 함께 응력다축도의 상승과 함께 작게된다. Fig.5 에는 강도적 불균질 이음부의 정적 및 동적하중하에서의 크랙발생시의 응력다축도와 상당소성변형률 관계 및 그 이력을 나타내었다. 동적하중을 받는 경우에는, 온도상승과 가공경화특성의 변화에 의한 강도적 불균질에 따른 소성구속의 정도가 조금씩 완화되어지는 경향이 있지만, 그 한계값은 Fig.4에서 얻은 정적하중하에서의 한계값으로 평가 가능하다는 것을 알았다.

### 5. 결 론

2파라메타를 이용한 연성크랙발생조건이 재료 고유의 크라이테리언 으로서, 각각의 강도적 불균질재 또는 각종의 부하속도하에서의 부재의 크랙발생한계평가에 적용 가능한 것을 알았다. 이것으로부터, 균질재를 대상으로 정적하중하에서의 인장시험 및 그 FEM해석을 사용한 2파라메타에 의한 크랙발생조건을 결정하면, 열—응력

연성해석 만으로부터 실험에서 얻은 각종의 형상적 불연속부재 또는 강도적 불균질재의 정적 및 동적하중하에서의 연성크랙발생한계를 정도 좋게 예측 가능한 것을 알았다.

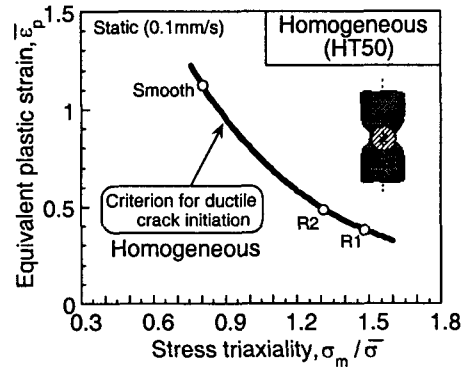


Fig. 4 Condition for ductile cracking using two parameter for HT50 steel under static loading

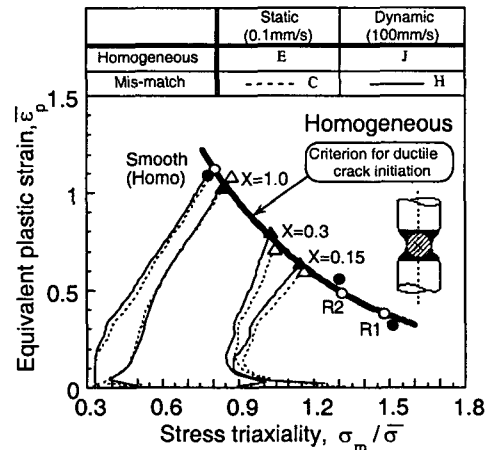


Fig. 5 Effect of loading rate on condition for ductile crack initiation using two parameter for strength mismatch specimens

### 참고문헌

1. M. Toyoda, M. Ohata, N. Ayukawa, G. Ohwaki, Y. Ueda and I. Takeuchi : Ductile Fracture Initiation Behavior of Pipe under A Large Scale of Cyclic Bending. Proc. 3rd Int. Pipeline Technology Conf., Brugge, Belgium. 2 (2000). 87-102.
2. H. Shimanuki, H. Furuya, T. Inoue, Y. Hagiwara, M. Toyoda : Effect of Stress Triaxiality and Strain Rate on Ductile Fracture Initiation in Steel. Journal of The Society of Naval Architects of Japan. 186 (1999). 475-483. (in Japanese).
3. Hibbit Karlsson, Sorensen., ABAQUS/Standard Users Manuals, Ver. 5.8,1998; 1 to 3.