

노치위치의 변화에 따른 강도적 불균질재의 연성크랙 발생 거동 The ductile crack initiation behavior of strength mismatch by a location of notch root

안 규백*, 大畑 充**, 방 한서***, 豊田 政男**

* 삼성중공업 생산기술 연구소 용접연구팀

** 일본 오사카대학 대학원 생산과학전공

*** 조선대학교 선박해양공학과

ABSTRACT It has been well known that ductile fracture of steels are accelerated by triaxial stresses. The characteristics of ductile crack initiation in steels are evaluated quantitatively using two-parameters criterion based on equivalent plastic strain and stress triaxiality. The present study focuses on the effects of strength mismatching, which can elevate plastic constraint due to heterogeneous plastic straining, on critical condition to initiate ductile crack from notch root using equivalent plastic strain and stress triaxiality. In this study evaluate the criterion for ductile crack initiation in strength mismatch specimen effect of location of notch root.

1. 서 론

용접 강구조물의 연성크랙 발생에 있어서, 용접부의 구조적인 응력·변형을 집중부가 가장 취약한 부분으로 잘 알려져 있다. 특히, 용접구조물에 있어서 표면에서의 크랙이 발생하여 그것이 파괴의 기점이 되는 경우가 많이 있다. 또한, 용접이음부에서는 강도적으로 불균질한 분포를 필연적으로 갖게 되는데, 강도의 저하에 의한 불안전 요인과 구조적 불안전 현상이 복합적으로 작용하여 연성크랙 발생이 파괴의 원인이 되고 있다.

본 연구에서는, 용접 강구조물에서 볼 수 있는 강도적 불균질이 존재하는 부재의 표면에서의 연성크랙 발생 거동을 평가 하기 위하여, 환봉 인장시험편을 사용하여 정적 하중하에서 인장 실험을 실시하였다. 또한 강도적 불균질부에 존재하는 노치의 위치에 따른 연성크랙 발생 거동을 파악하기 위해, Fusion line에서부터 노치 위치를 변화 시켰으며, 실험결과를 바탕으로 하여, 종래¹⁻²⁾ 부터 제안되어진 상당소성변형률과 응력다축도의 2파라메타를 이용한 강재의 연성크랙 발생 조건을 열·응력 연성을 고려한 유한요소법에 의한 수치해석을 수행하여, 2파라메타를 이용한 연성크랙발생 한계조건에 대하여 검토하였다.

2. 실험목적 및 방법

본 연구에서는, 의도적으로 강도적 불균질을 갖는 시

험편을 제작하기 위하여, 고강도재료인 HT80과 저강도재료인 HT50 강재를 사용하여, 확산접합(가압력 10Mpa의 1050℃에서30분간 유지)에 의한 강도적 불균질 시험편을 제작하였다. 강도적 불균질부가 존재하는 이음부에서는 저강도를 갖는 부분이 취약한 조건을 갖게 되므로, HT50강의 크랙발생거동에 주목하여 형상적 불연속에 따른 소성구속의 정도의 영향을 살피기 위하여, Fig. 1 에 나타낸바와 같이, 직경 10mm의 환봉시험편과, 그 시험편에 노치를 넣은, 노치반경 R 이 각각 다른 3종류의 원주 노치시험편 (R 0.1, R 1, R 2)의 균질시험편과, 강도적 불균질재의 Fusion line에 노치를 넣은 M-R 0.1 시험편을 사용했다. 각 강재의 화학조성은 Table 1에 나타냈으며, 환봉 균질 시험편에서 얻은 응력-변형률 특성 및 기계적 특성을 Fig.2, Table 2에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of HT50 and HT80 steels used.

Steels	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
HT50	0.17	0.31	1.48	0.011	0.002	-	-
HT80	0.10	0.26	0.85	0.004	0.002	1.16	0.49

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

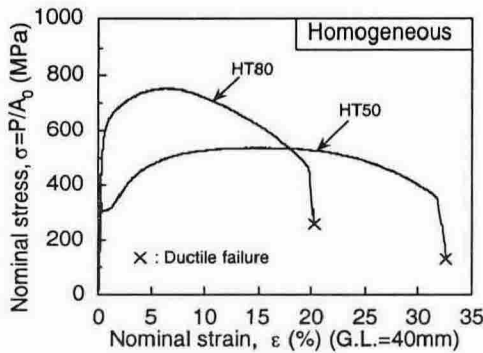


Fig. 2 Nominal stress, nominal strain curves obtained by tensile tests for homogeneous specimens (HT50, HT80).

Table 2 Mechanical properties of HT50 and HT80 steels used.

Steel	σ_Y (MPa)	σ_T (MPa)	YR (%)	ϵ_T (%)	EL (%)	RA (%)		
HT50	298	522	57.0	14.1	30.8	68	1.81	1.41
HT80	537	737	72.9	6.6	20.2	68		

σ_Y : Lower yield stress, σ_T : Tensile strength, ϵ_T : Uniform elongation
 YR : Yield-to-tensile ratio (σ_Y/σ_T), EL : Elongation (G.L.=40mm)
 RA : Reduction in area, $S_n(Y) : \sigma_Y^{HT80}/\sigma_Y^{HT50}$, $S_n(T) : \sigma_T^{HT80}/\sigma_T^{HT50}$

3. 강도적 불균질재의 노치 표면에서의 연성크랙 발생 거동

3.1 실험에 의한 연성 크랙 발생 거동

노치 표면에서의 연성크랙 발생 거동이 균질재에 비하여 강도적 불균질의 영향에 의한 효과를 파악하기 위하여, M-R0.1 시험편을 사용하여 정적하중하에서 인장시험을 실시하였다. Fig. 3에는 각 제하 하중레벨에서의 SEM에 의한 단면 관찰사진을 나타내었다. Level 1에서는 시험편 단면의 사진에 크랙이 관찰되지 않았지만, Level 2, 3에서는 스페리텐 분리에 의한 연성크랙이 발견되었다. 전체적으로 연성크랙 발생거동은, 균질재와 동일한 거동을 보였다. 한편, 노치의 위치에 의한 크랙발생 거동을 파악하기 위하여, 제하 시험편의 단면에 대한 부식에 의한 크랙발생·진전에 대한 검토를 수행하였다. Fig. 4에 그 결과를 나타내었다. 사진에서 알 수 있듯이 (a)는 HT50쪽에 연성크랙이 발생하여 진전된 것이고, (b)는 HT80에서 연성크랙이 발생하여 진전된 사진이다. 이것으로부터 초기 노치의 존재 위치가 다를 수 있었다. 이러한 초기 노치의 위치에 의한 연성크랙 발생 거동과 발생 한계조건에 영향을 상세히 파악하기 위하여 유한요소법에 의한 수치 해석을 수행하였다.

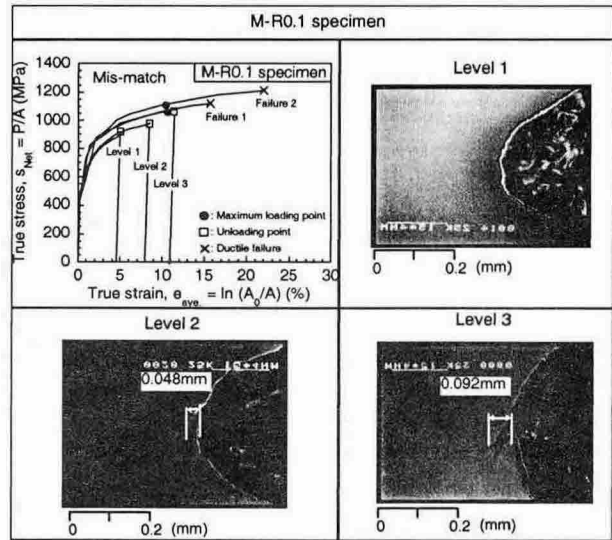
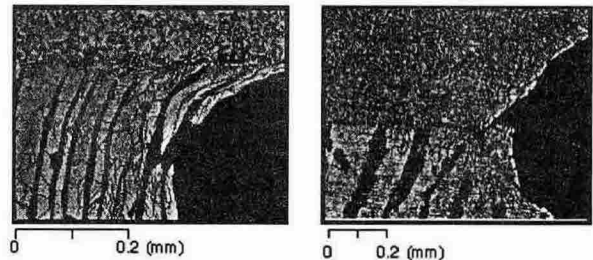


Fig. 3 Ductile crack initiation behavior of M-R0.1 specimen in mis-matched specimen.



(a) HT50 steel side. (b) HT80 steel side.

Fig. 4 Micrographs of the sectioned specimens near the notch root after corrosion.

3.2 노치위치의 영향에 의한 연성크랙 발생 조건

노치위치에 의한 연성크랙의 발생 거동을 파악하기 위하여 노치 위치를 변화시켜 유한요소법에 의한 열과 응력의 연성을 고려한 열탄소성해석을 수행하였다. 해석은 범용 FEM해석코드인 ABAQUS Ver. 5.8³⁾를 사용하였다.

정적하중하에서의 노치 위치에 따른 연성크랙 발생조건을 검토하기 위하여, 노치 위치를 변화시켜서 해석을 수행하였으며, 노치 부근의 요소분할을 Fig. 5에 나타내었다. 해석결과와 실제 실험에서 제하 단면의 검토에 의한 변형후의 노치 위치에 따른 초기 노치위치를 해석에 의하여 추정하고자 하였다. Fig. 6에는 각각의 해석모델에 대한 해석 결과를 나타내었다. 해석모델은 노치위치가 Fusion line에 정확하게 위치한 경우 (d=0)와 Fusion line에서 0.09mm떨어지 곳에 노치가 위치한 경우(d=0.09), Fusion line에서 0.19mm 떨어진 곳에 노치가 위치한 경우

(d=0.19)의 3가지에 대하여 해석을 수행하였다. 또한, 이들의 해석 결과는 실제의 실험에서와 동일한 변형률레벨에서의 변형후의 그림이며, 실험 후 단면의 관찰에 의한 연성크랙과 경계면과의 떨어진 거리를 표시한 사진도 함께 나타내었다. 그 결과 d=0.09인 경우가 실제 실험에서의 변형이 발생한 정도의 변형률과 같은 레벨의 변형률에서 초기 노치 위치와 Fusion line과의 거리가 가장 잘 일치 하고 있음을 알 수 있었다. 이 결과부터 실험에 사용한 시험편의 초기 노치 위치는 Fusion line에서 0.09mm에 위치 하였음을 추정할 수 있었다.

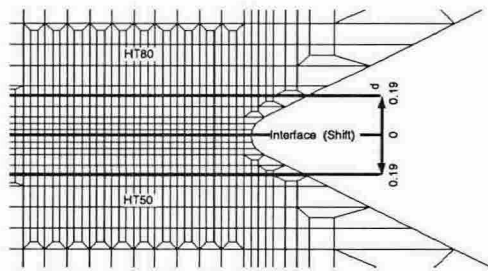


Fig. 5 Different models of M-R0.1 specimens obtained by shift of bonded interface.

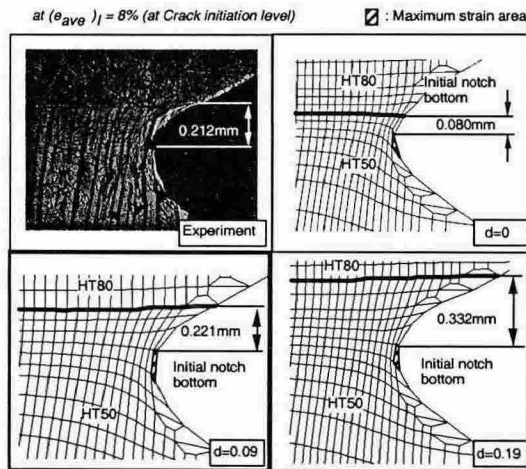


Fig. 6 Comparison of deformation at ductile crack initiation level between experiment and FE-analysis.

실험에서는 시험편의 표면에서 연성크랙이 발생 하고 있다. 강도적 불균질재의 경우, 최대 변형율을 갖는 요소는 변형이 진행 하면서 다르기 때문에, 연성크랙 발생시의 변형률레벨에서의 시험편 표면의 최대의 변형율을 갖는 요소에 주목해서 한계상당소성변형율을 정의 하고, 그 위치에서의 응력다축도의 값을 구하였다. 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 균질재의 R0.1시험편과 비

교하면, 응력다축도는 약간 높지만, 구속의 정도는 거의 변화하지 않고, 소성한계변형률레벨도 균질재와 거의 동등 하였다. 즉, 본 실험의 범위에서의, 연성 크랙 발생한계변형율은, 불균질성의 여향은 거의 받지 않고, 균질재의 한계값과 동등하다고 생각된다. 이것은 강도적 불균질의 영향을 나타내기 위해서는 초기 노치의 위치가 Fusion line에 거의 정확하게 위치하여야 하지만, 노치반경 0.1mm의 제작에 있어서 다소의 차이가 있었을 것으로 생각되며, 이것의 영향이 크게 작용한 것으로 생각된다.

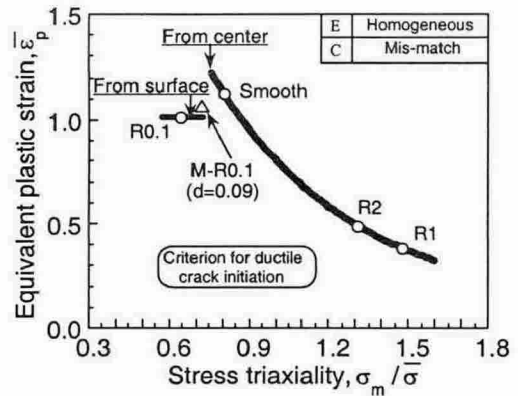


Fig. 7 Criterion for ductile crack initiation from specimen surface of mis-matched specimens.

4. 결 론

본 연구에서는 강도적 불균질재의 노치의 위치에 따른 연성크랙 발생 한계조건에 대하여 검토 하였다. 본 연구의 범위에서는 초기노치의 위치에 따른 강도적 불균질의 영향에 의한 연성크랙의 발생 거동에 차이가 있음을 알수 있었고, 초기노치의 위치가 Fusion line으로부터 0.1mm떨어지게 되면 강도적 불균질의 영향을 거의 나타낼수 없음을 알았으며, 강도적 불균질에 의한 연성크랙 발생의 영향을 알기 위해서는 초기노치 위치가 Fusion line에서 0.1mm이내의 범위에 있어야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

- 1.A. Otsuka, T. Miyata, S. Nishimura, M. Kimura, M. Mabuchi: J. Soc. Mater Sci. Japan, 29, (1976), 55-61.
- 2.G.-B. An, M.Ohata, M. Toyoda: Eng. Frac. Mech. 70, (2003), 1359-1377.
- 3.Hibbit, Karlsson, Sorensen, Inc. ABAQUS: 1-3.