

## 유한요소법과 초음파 메카트로닉스 시스템에 의한 강도적 불균질 이음부의 노치위치에 따른 균열발생 한계 조건

안 규 백\* · 방 한 서\*\* · 豊田政男\*\*\*

\*삼성중공업 생산기술연구소 용접연구팀

\*\*조선대학교 공과대학 항공·조선공학부

\*\*\*오사카대학 대학원 공학연구과 생산과학전공

### Evaluation of Notch Location Effect on Ductile Crack Initiation at Strength Mismatched Joints by Finite Element Method and Ultrasonic-Mechatronics System

Gyu-Baek An\*, Han-Sur Bang\*\* and Masao Toyoda\*\*\*

\*Institute of Industrial Technology Welding Research Part, Samsung Heavy Industries Co., LTD. Geoje Shipyard 530, Korea

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

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

#### Abstract

It has been well known that ductile fracture of steels is accelerated by triaxial stresses. The characteristics of ductile crack initiation in steels are evaluated quantitatively using a two-parameters criterion based on equivalent plastic strain and stress triaxiality. The present study focuses on the effects of strength mismatch, which can elevate plastic constraint due to heterogeneous plastic straining, on the critical condition for ductile fracture initiation using a two-parameter criterion. Fracture initiation testing has been conducted under static loading using notched round bar specimens which had different notch locations.

This study provides the fundamental clarification of the effect of strength mismatching and effect of notch location on the critical condition to ductile crack initiation from notch root using finite element method and ultrasonic-mechatronics system. The critical condition of ductile crack initiation from notch root of strength mismatched tensile specimens under static loading appeared to be almost the same as those of homogeneous tensile specimens with circumferential sharp notch specimen. Also, the effect of notch location in mismatched specimens was estimated using finite element(FE) analyses.

\* Corresponding author : gyubaek.an@samsung.com

(Received September 9, 2005)

Key Words : Ductile crack initiaion; strength mis-match; Sstress triaxiality; Equivalent plastic strain; Ultrasonic-mechatronics system

#### 1. 서 론

건축 철골등의 용접 구조물에서는, 지진과 같은 큰 부하에 따라 초기 결함 등의 응력 집중원이 존재하지 않아도 용접부와 같은 구조적인 응력-변형률 집중부로부터 큰 소성변형을 수반한 연성균열이 발생하여, 그것

이 취성 파괴의 기점이 되는 경우가 많이 있다. 일본의 효고현 남부 대지진에서는 건축 철골 구조물의 기둥과 보의 용접 이음부에서 이와 같은 연성균열의 발생 및 진전을 수반한 취성적인 파괴 사례가 많이 보고되었다<sup>1-2)</sup>. 이와 같은 구조적 불안정 현상을 가져오는 강구조물의 취성 파괴를 방지하고 적절한 안전성 평가를 위해

서는 취성 파괴에 앞서 발생하는 연성균열의 발생 조건과 지배 인자를 밝히고 그 한계 평가 수법을 확립하는 것이 중요하다.

종래로부터 강재의 연성균열 발생은 다축 응력장에 의하여 촉진되는 것으로 알려져 있고<sup>3-4)</sup>, 이와 같은 연성균열의 발생 특성의 정량적 평가에 상당소성변형률과 응력다축도의 2 파라메타를 이용한 연구가 많이 발표되고 있다<sup>5-6)</sup>. 또한 실제의 강구조물에 있어서는 일반적으로 부재의 표면에서 균열이 발생한 경우가 많고, 저자<sup>7)</sup>는 날카로운 원주 노치를 갖는 환봉 시험편을 이용한 2파라메타에 의한 균열발생 조건의 검토를 수행하여 단순부하로 인한 노치표면에서의 연성균열은 거의 상당소성변형률 일정 조건하에서 발생한다는 것을 명확하게 하였다. 한편 노치표면 부근에 강도적불균질이 존재한 경우에는 노치의 위치에 따라서 연성균열은 다르게 거동할 것으로 생각된다.

본 연구에서는 강도적 불균질을 갖는 용접이음부에 대한 노치의 위치 변화에 따른 연성균열발생 메커니즘을 규명하고 용접이음부의 건전성을 평가하기 위해 초음파현미경을 이용한 단면탐상법과 시험편의 중앙단면까지 연마한후 Scanning electron microscope (SEM)을 이용하여 단면을 관찰하는 단면연마법에 의한 실험적 관찰을 행하였다. 또한 노치 위치의 변화에 따른 균열발생한계조건을 규명하기 위하여 실험결과를 기본으로 탄소성이론에 의한 3차원 탄소성 해석을 수행하여 응력다축도와 상당소성변형률의 2파라메타를 사용한 검토를 수행하였다. 또한 초음파메카트로닉스 시스템과 SEM 및 FEM해석을 사용하여 용접이음부에 대한 균열발생의 메커니즘 분석과 건전성을 평가하였다.

2. 대상 시험편 및 실험 방법

강도적 불균질부를 갖는 용접이음부에 대한 표면과 중앙에서의 균열발생 거동에 대한 소성구속의 영향을

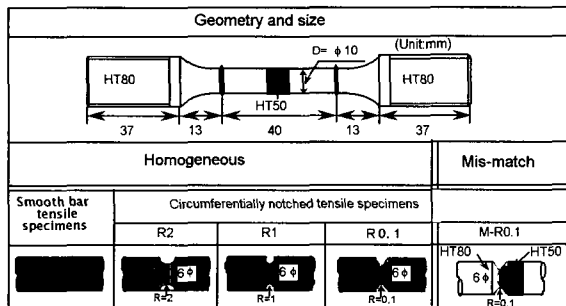


Fig. 1 Configuration of round-bar tensile specimens with geometrical heterogeneity and strength mismatching

파악하기 위하여, Fig. 1에서와 같이 확산접합에 의해 의도적으로 강도적 불균질부를 갖는 시험편을 제작하였다. 시험편 중앙(Smooth, R2, R1시험편: 균질재)에서의 균열발생 거동에 대해서는 선행연구<sup>8)</sup>에서 비슷한 검토를 수행하였으므로 본 연구에서는 생략하고, 시험편의 표면(R0.1, M-R.01시험편)에서의 노치위치의 변화에 따른 연성균열 발생 거동에 대한 상세한 검토를 수행하였다. 실험에 사용한 HT50, HT80강재의 화학조성을 Table 1에 나타내었으며, 환봉인장시험에서 얻어진 응력-변형률관계 및 기계적 특성을 정리한 것을 Fig. 2, Table 2에 각각 나타내었다. 균질재와 강도적 불균질부를 갖는 시험편에서, 노치 표면에서의 균열발생 거동에 대하여 하중 제하 실험 후에 초음파음향현미경을 이용하여 내부 균열의 유무와 위치를 확인하였으며, SEM에 의한 파면과 단면의 관찰을 통해 연성균열 발생거동에 대해서 상세 검토를 수행하였다.

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

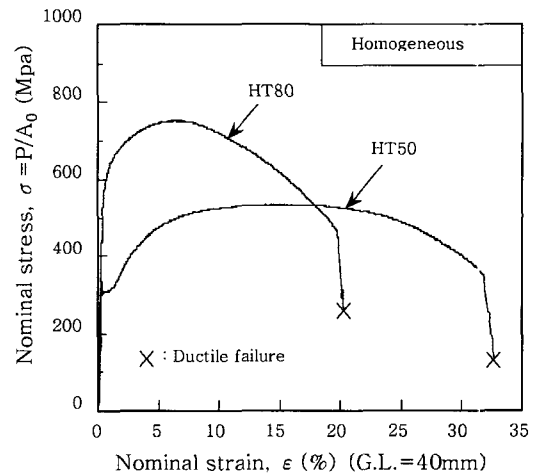


Fig. 2 Nominal stress and nominal strain curves obtained by tensile tests for homogeneous specimens

Table 2 Mechanical properties of HT50 and HT80 steels used

Steels	$\sigma_Y$ (MPa)	$\sigma_T$ (MPa)	YR (%)	$\epsilon_T$ (%)	ET (%)	RA (%)	$S_r(Y)$	$S_r(T)$
HT50	298	522	57.0	14.1	30.8	68	1.81	1.41
HT80	0.10	0.26	72.9	6.6	20.2	68		

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

### 3. 노치 표면에서의 초음파메카트로닉스 시스템에 의한 연성균열 발생 거동의 실험적 검토

노치 표면에서의 균열발생 거동을 파악하기 위하여 파괴 및 하중제하 실험을 실시하였다. Fig. 3에는 균질 시험편(R0.1)에 대한 각각의 진응력-진변형률 곡선에서 하중제하 레벨이 다른 3개의 시험편 단면을 초음파 현미경과 SEM으로 관찰한 결과를 나타내었다. 초음파 현미경은 Fig. 4에 나타난 것과 같은 UH3(Olympus 사 제작)장치를 이용하였다. Level 1에서는 노치반경을 따라서 표면에 다소 곡률의 흐트러짐이 보이지만 균열은 발견할 수 없었으며, Level 2에서는 노치표면에 전단형으로 성장한 보이드가 관찰되었고, Level 3에서는 완전한 연성균열로서 인장축에 대하여 45°방향으로 진전되고 있는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 관찰 결과로부터 노치표면에서의 미끄러짐에 의해서 근처의 보

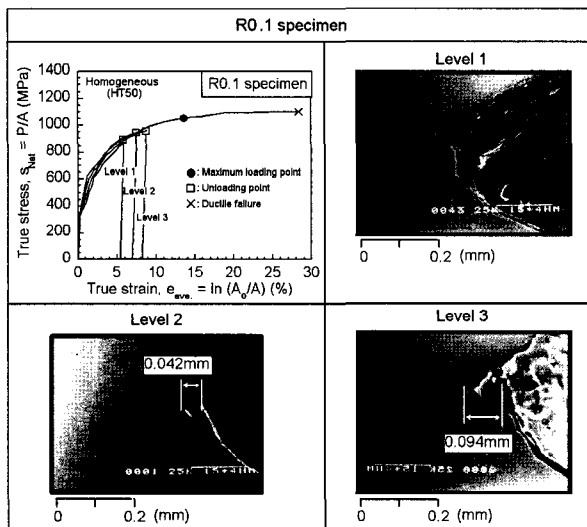


Fig. 3 Ductile crack initiation behavior of R0.1 specimen

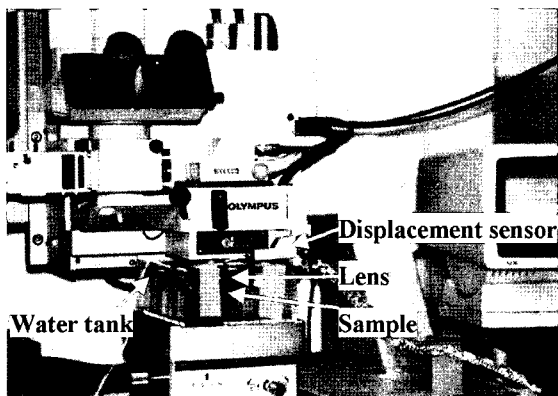


Fig. 4 Measurement part of scanning acoustic microscope

이드가 서로 연결되어 균열로 성장되는 거동임을 알 수 있었다.

한편 강도적불균질재로 강도가 급변한 계면에 노치를 갖는 강도적불균질재(M-R0.1 시험편)에 대하여 노치 표면에서의 연성균열발생 거동에 관한 검토를 수행하기 위해, 강도적불균질재 (M-R0.1 시험편)에 대해 파단 시험과 제하 시험을 수행하였다. 진응력-진변형률 관계와 각각의 제하레벨에 대응한 단면 관찰 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 Level 1에서는 연성균열이 보이지 않지만, Level 2 이후에서는 미끄러짐 분리에 의한 전단형태의 균열이 확인되었다. 또한 균열의 발생거동은 균질재의 노치표면에서의 연성균열발생 거동과 흡사한 양상을 나타내었다. 한편, 진응력-진변형률 관계에서 나타내는 것처럼, 시험편마다 강도의 불규칙함이 있고, 또 2개의 파단 시험에서도 파단변형률에 상당한 차이를 보였다. 이는 노치위치가 변함에 따른 현상이라 판단되어, 초기노치 위치를 추정하기 위해, 제하한 시험편의 중앙 단면을 SEM으로 관찰하여 균열 발생방향을 확인하였다. 중앙단면의 관찰결과를 Fig. 6에 나타내었다. (a)에서는 균열이 HT50강 쪽에 발생하여 성장하였음을 알 수 있었으며, (b)는 HT80강 측에서 연성균열이 발생하여 성장하였음을 알 수 있었다. 이것으로부터 (a)와(b)에서는 초기노치가 각각 다른 곳에 위치 하였음을 알 수 있었다. 즉 원주 부분의 변형정도로 부터 초기의 위치는 (a)의 시험편은 HT50강측에 (b)의 시험편은 HT80강측에 위치하고 있었던 것이 밝혀졌으며, 이로부터 노치의 위치가 파괴 강도 등에 영향을 미친 것으로 생각된다. 노치위치에 따른 노치 주위의 응력-변형률 관계 등의 상세한 검토

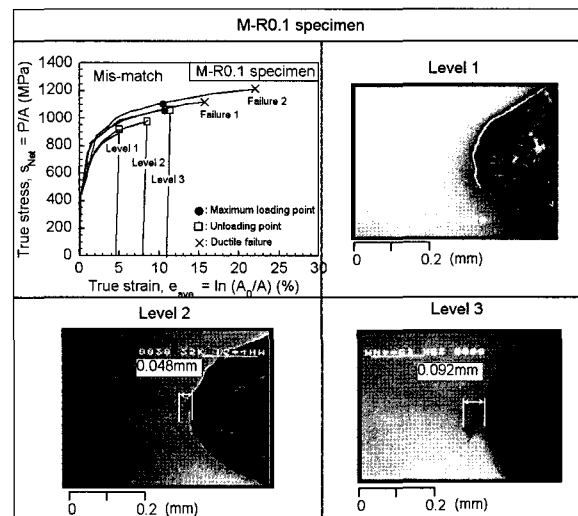


Fig. 5 Ductile crack initiation behavior of M-R0.1 specimen in mis-matched specimen

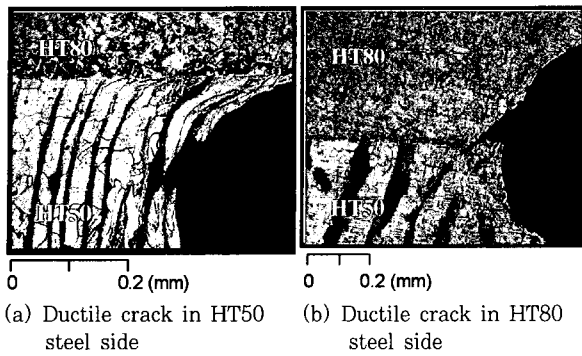


Fig. 6 Micrographs of the sectioned specimens near the notch root after corrosion

를 수행하기 위하여 유한요소법에 의한 수치해석을 수행하였다.

#### 4. 강도적불균질재의 노치위치의 영향에 따른 균열발생 한계조건

##### 4.1 해석모델 및 조건

실험에서는 강도적불균질재의 연성균열발생 거동이 노치위치에 따른 파악이 곤란하였기 때문에, 실험결과를 바탕으로 유한요소법에 의한 수치해석을 통하여 초기노치의 위치의 추정과 균열발생 한계에 미치는 노치위치의 영향에 대하여 검토하였다. 해석 모델의 형상과 치수는 시험편과 동일 하고 노치위치를 변화시키기 위하여 Fig. 7에 나타난 것처럼 HT50 강과 HT80 강의 접합 계면에 메시 라인을 두어 노치(notch root)와 접합 계면과의 거리(=d)가 0 (이 경우 접합 계면에 정확하게 노치가 위치한 경우), 0.03, 0.06, 0.09, 0.14, 0.19mm이 되도록 모델을 제작하였다. 또한 노치의 위치가 HT50강, HT80강에 위치하도록 하여 총 11개의 모델에 대하여 해석을 수행하였다. 또한, 해석에 사용한 요소는 4절점 축대칭 요소를 이용하였고 모

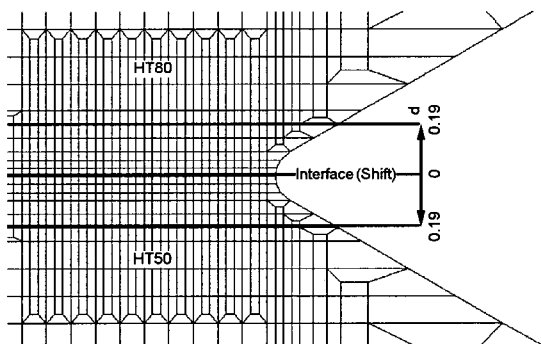


Fig. 7 Mesh division of M-R0.1 specimens

든 모델에서 중앙 단면내의 최소 요소크기는 0.03mm × 0.03mm로 동일하게 하였다. 탄소성이론에 의하여 기하학적 비선형성을 고려한 대변형해석을 수행하였으며 비압축성의 Mises의 항복조건을 채용한 등방경화모델을 사용하였다. 본 해석은 향후의 실험속도에 따른 열의 발생에 의한 온도상승과 소성일에 의한 열의발생과 열전도의 현상을 고려한 열-응력의 연성해석을, 범용 FEM해석 코드인 ABAQUS Ver.5.8을 이용하여 수행하였다<sup>9)</sup>.

#### 4.2 강도적불균질재의 노치위치의 변화에 따른 표면에서의 연성균열발생 한계 평가

강도적불균질재의 접합계면에 노치가 위치하는 경우 (d=0)의 접합계면으로부터 HT50강에 위치하는 요소와 HT80강에 위치하는 요소에 대하여 상당소성변형률과 응력다축도의 관계의 이력을 Fig. 8에 나타내었다. 균질재(HT50강)의 경우의 이력에 비하여 불균질재의 HT50강 쪽의 요소는 응력다축도가 상승하고, HT80강 쪽의 요소는 응력다축도가 하강함을 볼 수 있었다. 이는, HT50강은 주위에 존재하는 경질부에 의해서 변형이 구속되어 소성구속의 영향을 받고, 반대로 HT80강의 경우는 주위에 존재하는 연질부가 변형하는 것에 의해서 소성완화가 발생한 때문으로 보여진다. 이것으로부터 실험에서 하중제하 레벨에서의 균열발생의 단면 사진과 해석의 결과를 비교하여서 초기 노치의 위치를 추정하고자 하였다. Fig. 9에는 실험의 단면 변형 사진과 그것과 동일한 부하 레벨에서의 해석 모델의 변형도 (d=0, 0.09, 0.19) 를 나타내었다. 접합 계면과 변

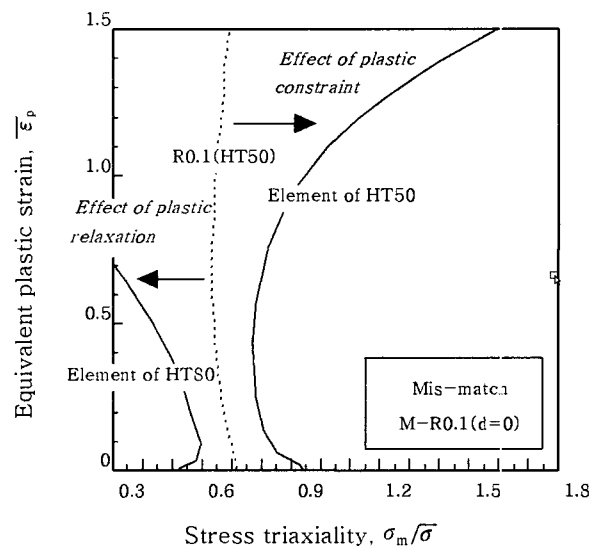


Fig. 8 Relation between equivalent plastic strain and stress triaxiality of HT50 and HT80 side element in the notch bottom of d=0 model

형후의 노치로 부터의 거리를 비교하면,  $d=0.09$ 의 모델이 실험과 가장 잘 일치하고 있으며, 따라서, 초기 노치가 접합 계면으로부터 약 0.09mm 떨어진 위치에 존재하였다고 추정된다. 또한 초기노치의 위치가 HT50 강쪽에 위치하는 경우의 각 모델에 대한 노치요소의 상당소성변형률과 응력다축도의 이력을 노치위치가 접합 계면으로부터 떨어진 거리에 대하여 Fig. 10에 나타내었다. 노치위치와 접합 계면의 거리가 멀어질수록, HT80 강의 구속의 영향을 작게 받기 때문에, 응력 다축도의 상승이 완만해지는 것을 알 수 있듯이, 노치의

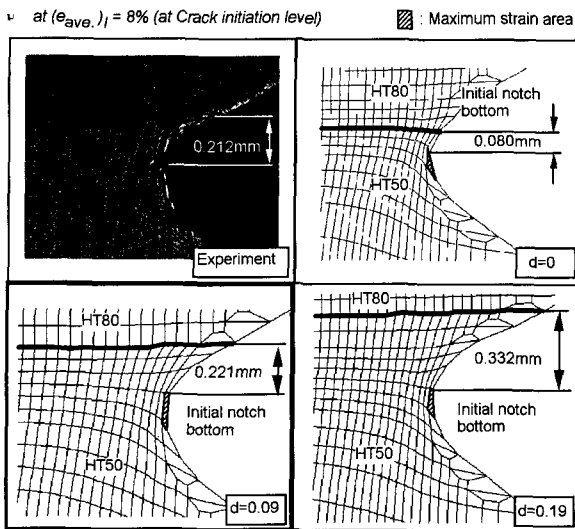


Fig. 9 Comparison of deformation at ductile crack initiation level between experiment and FE-analysis

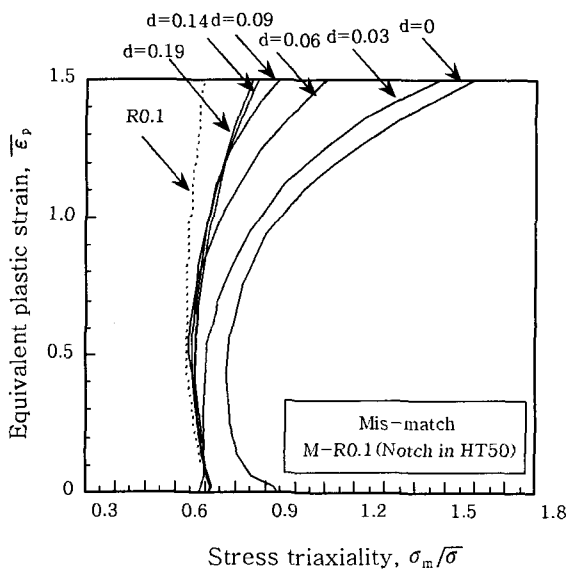


Fig. 10 Relation between equivalent plastic strain and stress triaxiality of HT50 side element in the notch bottom of strength mismatch specimen

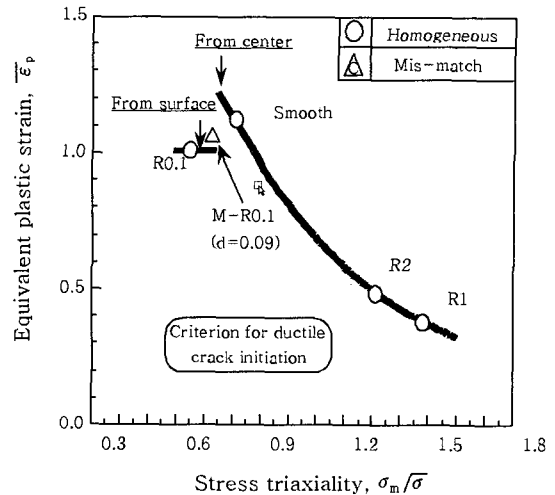


Fig. 11 Criterion for ductile crack initiation from specimen surface of mis-matched specimens

위치에 따라 소성구속의 영향이 다를 수 있었다. Fig. 11에는 노치표면에서의 연성균열발생 한계조건을 파악하기 위하여 상당소성변형률과 응력다축도의 2파라미터로써 중앙에서의 균질재(HT50강재)의 균열 발생조건과 동시에 나타내었다. 시험편 표면에서 균열 발생한계조건에 주목하여 초기노치의 위치가  $d=0.09$ 의 경우를 나타내었는데, 균질재의 균열발생 한계값과 조금의 차이는 있지만 거의 동일한 한계값을 나타내었다. 이것은 앞에서 고찰한 것과 같이 초기노치가 접합부의 경계면에 위치하지 못함으로 인해 소성구속의 완화로 균질재(HT50강재)와 큰 차이를 나타내지 않는 것이라고 생각된다. 한편, 본 연구에서는 시험편의 가공의 어려움으로 인해 정확하게 경계면에 노치를 위치시킨 경우( $d=0$ )에 대한 실험을 수행할 수 없었지만,  $d=0$ 인 경우에 대한 해석결과를 바탕으로, 향후 시험편 가공정도를 향상시켜  $d=0$ 인 경우에 대한 실험과 해석에 의해서 균열발생한계조건을 검토할 계획이다.

### 5. 결 론

강도적 불균질을 갖는 용접이음부에 대한 노치위치의 변화에 따른 연성균열발생의 메카니즘분석과 발생 한계조건을 확립하고 용접이음부의 건전성을 평가하기 위해, 유한요소법(FEM)에 의한 열-응력 연성해석과 초음파메카트로닉스 시스템에 의한 관찰을 행하였다. 이하에 얻어진 결과를 요약하여 나타내었다.

1) 본 실험에서 균질재와 강도적 불균질의 노치 표면에서의 연성균열발생은 미끄러짐에 따른 면분리에 의한 하중방향의 45°방향으로 전단균열이 발생하였으며, 발생 변형률에는 다소 차이가 있었지만, 거동 자체는 거

의 동일함을 알았다.

2) 유한요소법에 의한 수치해석에 의해서 초기노치 위치의 추정이 가능하였으며, 상당소성변형률과 응력다축도의 2과라메타에 의해서 표면에서의 연성균열발생 한계 조건의 평가가 가능하였다. 또한, 노치위치가 접합계면으로부터 멀어 질수록 소성구속의 영향을 작게 받게 되며, 본 연구의 범위에서는 균질재와 강도적 불균질재의 표면에서의 연성균열발생 한계값은 거의 동일하게 평가되었다.

### 참 고 문 헌

1. AIJ : Reconnaissance Report on Damage of Steel Building Structures Observed from the 1995 Hyogoken-Nanbu (Hanshin/Awaji) Earthquake, Steel Committee of Kinki Branch, (1995), (in Japanese)
2. M. Toyoda : How Steel Structures Failed in Japan Great Earthquake. Welding Journal, **74-12** (1995), 132-136
3. F A. McClintock : A Criterion for Ductile Fracture by the Growth of Holes. Journal of Applied Mechanic. Transactions of the ASME, **35** (1968), 363-371
4. J W. Hancock and A C. Mackenzie : On the Mechanisms of Ductile Failure in High-Strength Steels Subjected to Multi-Axial Stress-States, Journal of Mech. Phys. Solids, **24** (1976), 147-169
5. A. Otsuka, T. Miyata, S. Nishimura, M. Kimura and M. Mabuchi : Effect of Stress Triaxiality on Ductile Fracture Initiation Low Strength Steels. Journal of The Society of Materials Science of Japan, **29-322** (1976), 717-723. (in Japanese)
6. 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
7. G. B. An, M. Ohata, M. Mochizuki, H.S. Bang, M. Toyoda: Effect of strength mismatch on ductile crack initiation behavior from notch root under static loading, Key Engineering Materials, **298** (2005), 756-761
8. G. B. An, M. Ohata, H. S. Bang and M. Toyoda : Analytical Examination of Ductile Crack Initiation with Strength Mismatch under Dynamic Loading -Criterion for Ductile Crack Initiation Effect of Strength Mismatch and Dynamic Loading (Report 2), Journal of Korean Welding Society, **21-7**(2003), 755-764 (in Korean)
9. Hibbit Karlsson, Sorensen., ABAQUS/Standard Users Manuals, **Ver. 5.8**, (1998), 1 to 3