

변형률 속도를 고려한 유한요소 기반 연성 찢김 해석 기법 개발

남현석* · 김지수* · 김진원** · 김윤재**

* 고려대학교 기계공학부, ** 조선대학교 원자력공학과

Development of Finite Element Ductile Tearing Simulation Model Considering Strain Rate Effect

Hyun Suk Nam*, Ji Soo Kim*, Jin Weon Kim** and Yun Jae Kim**†

* Dept. of Mechanical Engineering, Korea Univ.,

** Dept. of Nuclear Engineering, Chosun Univ.

(Received August 19, 2015 ; Revised December 6, 2015 ; Accepted December 7, 2015)

Key Words: Ductile Fracture(연성 파괴), Finite Element Analysis(유한요소해석), High Strain Rate Condition(고변형률 조건), Damage Simulation(손상해석)

초록: 본 논문은 유한요소해석을 이용한 고변형률 조건에서의 연성파손 해석기법을 제안한다. 고변형률 하중이 작용하는 구조물에 대한 파괴거동 예측을 위해 본 논문에서는 Johnson/Cook 모델을 고려한 수정 응력 파괴변형률 모델을 사용하였다. 제시된 모델은 인장 실험 모사해석결과로부터 얻어지는 삼축응력 및 파괴변형률에 의해 파손이 정의된다. 다양한 실험속도의 인장 실험결과 및 정적 하중조건에서의 파괴인성 실험을 이용하여 수정응력 파괴변형률 모델의 변수를 결정하였다. 결정된 모델을 이용하여 동적 하중조건에서 파괴인성시험에 대한 해석을 수행하였으며 해석결과와 실험결과를 비교하여 해석기법을 검증하였다.

Abstract: This paper proposes ductile failure simulation under high strain rate conditions using finite element (FE) analyses. In order to simulate a cracked component under a high strain rate condition, this paper applies the stress-modified fracture strain model combined with the Johnson/Cook model. The stress-modified fracture strain model determines the incremental damage in terms of stress triaxiality (σ_m/σ_e) and fracture strain (ϵ_f) for a dimple fracture using the tensile test results. To validate the stress-modified fracture strain model under dynamic loading conditions, the parameters are calibrated using the tensile test results under various strain rates and the fracture toughness test results under quasi-static conditions. The calibrated damage model predicts the CT test results under a high strain rate. The simulated results were then compared with the experimental data.

- 기호설명 -

1. 서론

ϵ_f : 파괴 변형률
 $\Delta\epsilon_e^p$: 등가 소성 변형률 증분
 σ_m : 정수압 응력
 σ_e : 등가응력
 σ_m/σ_e : 삼축응력
 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: 주응력
 ω_c : 임계 손상

원자력 발전소를 비롯한 플랜트 설비는 수 많은 배관으로 구성되어 있으며 이러한 배관은 다양한 동적인 하중이 발생할 시 발전 설비의 손상을 초래할 수 있다. 특히 후쿠시마 원전 사고 이후에 설계기준을 초과한 지진하중 조건에서의 배관 건전성에 대한 중요성이 더욱 부각되고 있으며, 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. 다수의 재료는 동적 하중영역에서 정적 하중조건에서와 다른 재료적 특성을 보이며⁽¹⁻³⁾ 이로 인해 배관이 갖는 최대 지지

† Corresponding Author, kimy0308@korea.ac.kr
 © 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

하중도 실험속도에 따라 다른 경향을 보인다고 보고되었다. 하지만 현재 적용되고 있는 지진하중 조건의 배관 건전성 평가 절차를 보면, 선형탄성해석을 통해 배관에 작용되는 지진하중의 크기를 계산하고 정적 하중 조건에서 실험된 재료 물성치를 이용하여 결합 안정성을 평가한다.⁽⁴⁻⁶⁾ 그러나 지진하중 조건에서 실제 배관에 작용하는 하중은 동적이고 반복적인 특징을 가지고 있다.⁽⁷⁾

따라서 지진 하중 조건에서 배관 계통에 대한 건전성 평가를 수행하기 위해서 다양한 실험속도에 따른 재료 물성치 및 파손 거동 모사에 대한 연구가 요구되고 있다. 그러나 다양한 실험속도에 따른 재료에 대한 물성 실험을 수행하기 위해서는 많은 비용 및 시간과 노력이 요구 된다. 이러한 실기실험의 대안으로서 유한요소 손상해석을 이용한 가상 실험법은 하중과 시편 형상에 변경이 용이하고 경제적으로도 효율적이다.

이러한 이유로 본 논문에서는 다양한 실험 속도의 인장 물성 및 정적 하중조건에서의 파괴인성 실험결과를 이용하여 동적 하중조건이 작용하는 구조물의 파괴거동을 예측할 수 있는 파손 모델에 대한 연구를 수행 하였으며 이와 같은 기법을 토대로 미국 바텔 연구소(Battelle Memorial Institute)에서 수행한 동적 하중이 작용하는 파괴인성 시편(CT 시편) 실험결과⁽⁸⁾를 모사하고 해석을 통한 예측 결과와 실험결과를 비교하여 변형률 속도에 따른 연성파손 해석기법의 신뢰성을 검증하였다.

2. 실험 결과 요약

미국 바텔연구소에서 배관건전성 국제공동연구 IPIRG(International Piping Integrity Research Group)의 일환으로 다양한 재료와 균열 형상에 대한 파괴인

성 및 실패관 실험을 수행하였다.⁽⁸⁾ 본 연구에서는 실험속도에 따른 인장실험, 파괴인성실험으로 구성되어 있는 288°C 에서의 A106 Gr. B 탄소강 재료에 대해 실험결과를 분석하였다.

2.1 실험속도에 따른 인장실험 결과

바텔연구소에서는 다양한 변형률 조건에서의 재료의 물성변화를 확인하기 위해, 4x10⁻⁴, 3.4, 11.5/s 의 세 가지 속도로 인장실험을 수행 하였다. 인장실험은 유압식 실험기로 수행 되었으며 flat 타입의 pin-load 시편으로 수행되었으며, 시편의 폭은 6.35mm, 두께는 3.18mm, 표점거리는 25.4mm 이다. 실험속도에 따른 공칭 응력-변형률 그래프는 Fig. 1에 나타내었으며, 각각의 실험결과로 계산된 항복강도, 인장강도, 연신률은 Table 1에 나타내었다. 일반적인 재료와 달리 A106 Gr. B 재료의 경우 동적변형시효(DSA, Dynamic Strain Aging)현상^(9,10)으로 인하여 특정 온도 영역에서 실험 속도가 빨라질수록 인장 강도가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

2.2 실험속도에 따른 파괴인성 실험결과

바텔연구소에서는 실험속도에 따른 파괴인성실험을 수행하였다. 실험에 사용된 시편형태는 CT 시편이며 A106Gr. B 배관에서 추출한 0.5T CT 의 시편이

Table 1 Summary of tensile test results

No.	Strain rate (1/s)	Yield Strength, (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
1	4x10 ⁻⁴	294	599	26.0
2	3.4	279	550	21.6
3	11.6	356	479	17.0

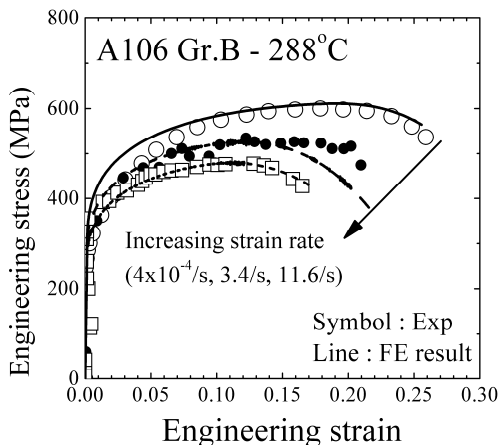


Fig. 1 Engineering stress-strain curve for A106 Gr.B

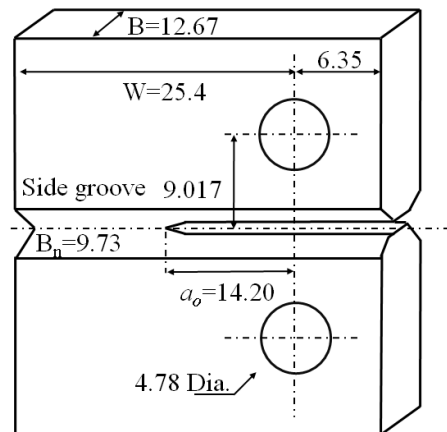


Fig. 2 Geometry of CT specimen

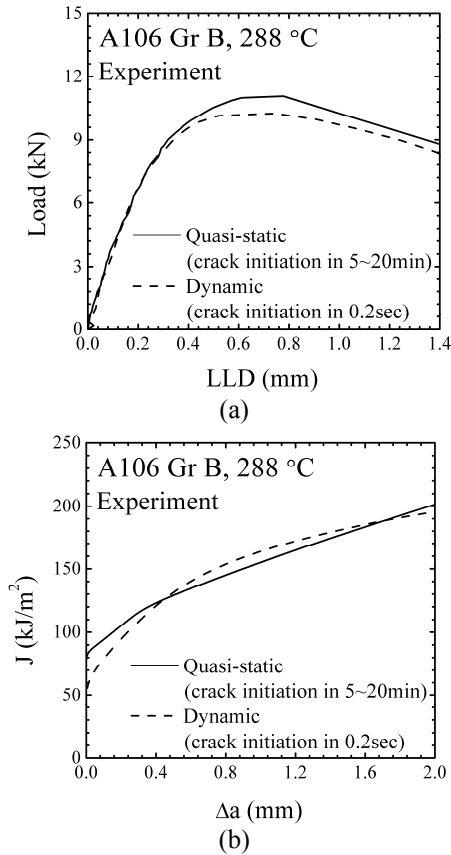


Fig. 3 Fracture toughness test result include strain rate effect: (a) Load-LLD Curve (b) J-R curve

사용되었다. 시편의 개략도는 Fig. 2에 나타내었다. 정적실험의 경우 균열 개시까지 5~20분, 동적실험의 경우 균열개시까지 0.25초의 속도로 수행되었다. 파괴인성 실험 결과(Load-LLD 선도, J-R 선도)는 Fig. 3에 나타내었다.

3. 변형률 속도에 따른 손상해석 기법

3.1 정적 하중조건에서의 손상해석 기법

동적 하중조건에서의 연성파손모사 기법에 대한 정의에 앞서 정적 하중조건에서의 연성파손을 모사하기 위해서는 손상기준이 되는 손상모델이 필요하다. 본 연구에서 사용하는 손상모델은 균열 선단에서 국부적인 재료파괴가 삼축응력에 따라 결정되는 수정응력 파괴변형률 모델(stress-modified fracture strain model)⁽¹¹⁻¹⁴⁾이다. 파괴변형률은 삼축응력에 의존하며 이들의 관계는 아래와 같은 지수함수로 표현 가능하다.

$$\epsilon_f = A \exp\left(-C \times \frac{\sigma_m}{\sigma_e}\right) + B \quad (1)$$

위 식에서 주어진 수정응력 파괴 변형률을 결정하기 위해 다양한 반경을 가진 노치인장실험결과가

필요하다. 하지만 노치시편이 유용하지 않을 경우 상수 C는 Rice와 Tracey⁽¹²⁾의 제안에 따라 1.5로 결정하여 사용한다. 식 (1)을 통해 파괴변형률이 삼축응력의 함수로 표현이 가능하다면, 응력 형성에 따른 증분 손상값은 다음을 사용하여 계산된다.

$$\Delta \omega = \frac{\Delta \epsilon_e^p}{\epsilon_f} \quad (2a)$$

$$\omega = \sum \Delta \omega = \omega_c (=1) \quad (2b)$$

전통적인 손상이론은 위 식의 임계손상값(ω_c)이 상수 1로 정해져 있지만 이 값은 요소크기에 따라 달라질 수 있다. Kim^(15,16)의 논문에서는 요소크기의존성 임계손상모델을 제시하여 요소크기에 따른 임계손상값을 계산하는 방법을 제안하여 스테인리스강 및 탄소강에서 모두 잘 적용되는 것을 확인하였다. 본 연구에서는 요소크기를 0.2mm로 고정하고 이에 맞는 임계손상값을 정의하였다. 누적 손상값이 임계손상값에 도달하게 되면 연성파괴는 국부적으로 가정되고, 유한요소 적분점에서 응력값을 강제로 낮춰서 균열정장을 모사한다. 이러한 과정은 ABAQUS⁽¹⁷⁾에서 제공하는 UHARD subroutine을 통해서 구현하였다.

3.2 변형률 속도에 따른 손상해석 기법

본 논문에서는 실험속도에 따른 파괴변형률과 삼축응력의 관계를 정의하기 위해 Johnson/Cook⁽¹⁸⁾에 의해 제시된 실험속도에 따른 파괴변형률과 삼축응력의 관계에 기초하여 연구를 수행하였다. Johnson/Cook⁽¹⁸⁾의 연구결과에 따르면 실험속도에 따른 파괴변형률과 삼축응력의 관계는 아래와 같은 지수함수로 표현될 수 있다.

$$\epsilon_f = \left[A \exp\left(-C \times \frac{\sigma_m}{\sigma_e}\right) + B \right] \left[1 + D \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{01}}\right) \right] \quad (3)$$

위 식에서 상수 A, B, C는 정적 하중조건에서의 수정응력 파괴변형률 모델과 같은 방법으로 계산되며, 상수 D, $\dot{\epsilon}_{01}$ 는 실험속도에 따른 파괴변형률과 삼축응력의 관계에서 계산되는 재료상수이다. 식 (3)에서 삼축응력 및 변형률 속도에 따른 파괴변형률이 계산되면 정적 하중조건에서의 수정응력 파괴변형률 모델과 같은 방법으로 손상증분이 계산된다.

4. 변형률 속도에 따른 손상기준 결정 및 유한요소 해석

4.1 실험 속도에 따른 인장물성 결정

본 연구에서는 Johnson/Cook⁽¹⁸⁾의 연구결과로

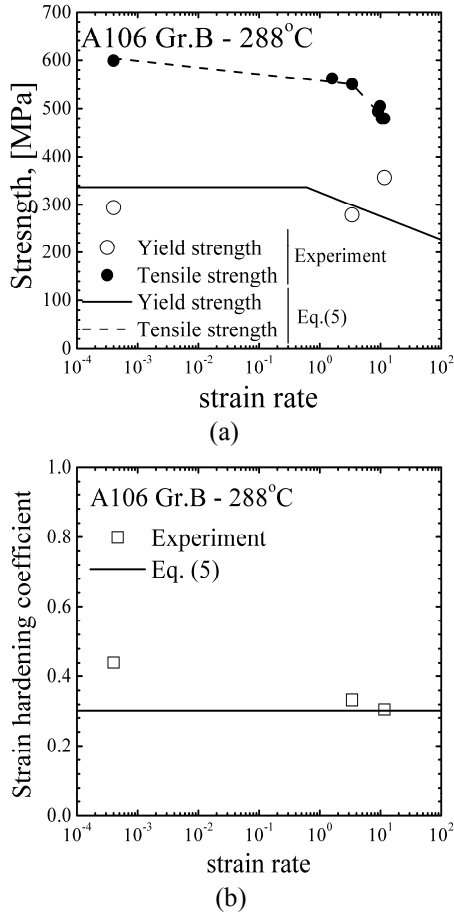


Fig. 4 Fracture toughness test result include strain rate effect: (a) Yield strength, Tensile strength (b) Strain hardening coefficient

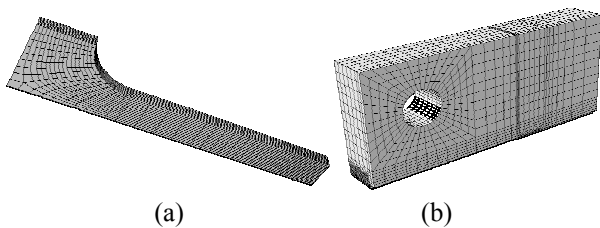


Fig. 5 Typical FE mesh (a) Tensile specimen (b) CT specimen (element size=200μm)

제시하고 있는 변형률 속도에 따른 재료 인장물성 관계식에 기초하여 A106 Gr. B 탄소강 재료의 인장물성을 정의하였다. Johnson/Cook 의 논문에서는 변형률 속도에 따른 인장 물성 관계식을 아래와 같이 제시하고 있다.

$$\sigma_{eq} = (\alpha + \beta(\epsilon_{eq}^{pl})^n) \left(1 + \gamma \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{02}}\right) \right) \quad (4)$$

위 식에서 상수 α, β, n 은 정적 하중 조건에서 수행된 인장실험에 기반하여 계산되며, 상수 $\gamma, \dot{\epsilon}_{02}$

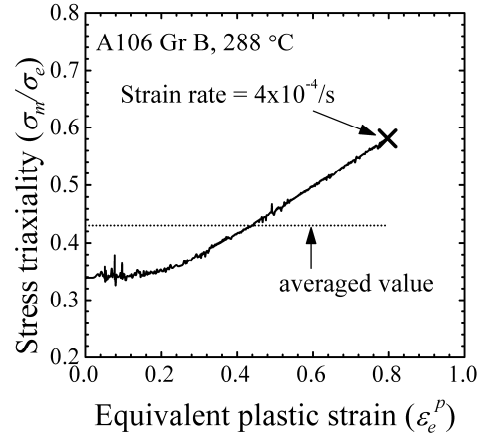


Fig. 6 Variations of the stress triaxiality with equivalent plastic strain under quasi-static condition

는 실험속도에 따른 인장실험결과를 토대로 계산되는 상수이다. 본 연구에서는 정적 하중조건에서의 인장물성을 토대로 상수 α, β, n 을 결정하였고, 각 실험속도에 따른 인장강도를 고려하여 변형률 속도관련 상수 $\gamma, \dot{\epsilon}_{02}$ 를 결정하였다. 본 연구에 사용된 A106 Gr. B 재료에 대한 288 °C 에서의 인장물성은 식 (5)에 나타내었으며, 식 (5)에 의해 계산되는 항복강도, 인장강도, 가공경화지수와 실험결과를 비교하여 Fig. 4 에 나타내었다.

$$\sigma_{eq} = (200 + 879(\epsilon_{eq}^{pl})^{0.3}) \left(1 - 0.0641 \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{0.61}\right) \right) \quad (5)$$

4.2 정적 하중조건에서 파괴변형률 결정

유한요소해석을 이용한 정적 하중조건에서의 연성과손을 모사하기 위해서는 손상기준이 되는 손상모델이 필요하다. 본 연구에서 사용된 손상모델은 3.1 절에서 언급한 수정응력 파괴변형률 모델이다. 본 연구에서 고려한 손상모델을 사용하기 위해서는 파괴변형률과 삼축응력간의 관계식이 필요하며 노치반경에 대한 인장실험을 수행하지 못한 경우 앞서 언급한 바와 같이 식 (1)에서 상수 C 가 1.5 로 결정되어 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_f = A \exp\left(-1.5 \times \frac{\sigma_m}{\sigma_e}\right) + B \quad (6)$$

위 식에서 상수 A, B 는 인장실험과 파괴인성실험의 유한요소해석 결과를 토대로 결정된다. 손상기준식 결정에 사용한 인장실험과 파괴인성실험의 시편형상과 유한요소망을 Fig. 5에 나타내었다. 상용프로그램 ABAQUS⁽¹⁷⁾에서 제공하는 3차원 8절점요소(C3D8)를 사용하였으며 기하학적 대변형을 고려하여 해석을

수행하였다. 해석의 효율성을 위해 인장시편과 CT 시편의 형상 대칭조건을 활용하여 각각 1/8 모델과 1/4 모델을 사용하였다. 4.1절에서 정의된 재료 물성을 ABAQUS 에서 제공하는 UHARD subroutine 을 이용하여 구현하였다. 정적 하중조건에서의 인장실험해석결과를

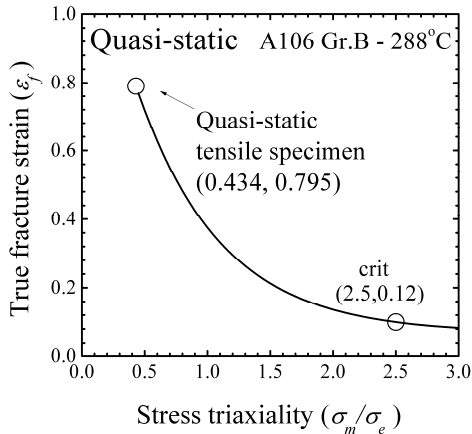


Fig. 7 Stress-modified fracture strain under quasi-static condition

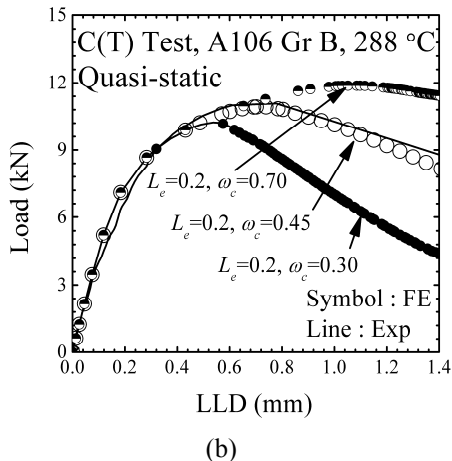
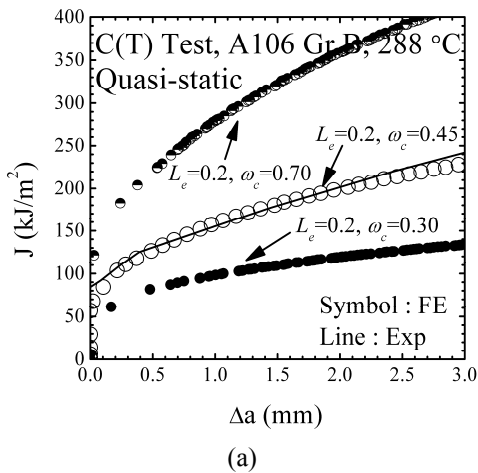


Fig. 8 Calibration results for ductile fracture simulation: (a) *J*-*R* curve, (b) Load-LLD curve

실험결과와 비교하여 Fig. 1에 나타내었다. 인장시편에서의 삼축응력과 소성변형률 간의 관계를 분석하기 위해 파손시점에서의 삼축응력 및 소성변형률을 시편 중앙에서 추출하였으며, Fig. 6에 나타내었다. 응력과 변형률 이력을 포함하기 위해 소성변형률에 대한 삼축응력의 평균값을 사용하였다.⁽¹⁹⁾ Fig. 7에 표기된 “tensile specimen”은 인장실험 결과를 이용해 결정된 인장시편에서의 손상기준값이다. Fig. 7의 두 번째 점은 파괴변형률을 $\sigma_m/\sigma_e=2.5$ 의 높은 삼축응력값에서 가정하는 것으로 상정된다. $\sigma_m/\sigma_e=2.5$ 를 선택하는 이유는 Prandtl⁽²⁰⁾ 필드의 이론적인 최대 값이 이에 해당되기 때문이다. $\sigma_m/\sigma_e=2.5$ 에서 파괴변형률은 다양한 철강 재료에 대한 자료 검토 결과 인장실험의 파괴변형률의 10% 부근에 있다고 제안되었으며 CT 시편 실험결과와 비교하여 조정된다. CT 시편 실험결과로부터 얻은 *J*-*R* 선도를 이용하여 찢어짐 계수(tearing modulus, *dJ/da*) 결정하고 해석결과와 비교하여 $\sigma_m/\sigma_e=2.5$ 에서의 파괴 변형률을 결정하였으며 앞서 언급한 임계 손상값(ω_c)의 경우 앞서 *J*-*R* 선도의 임계 파괴 인성 ($J_{0.2}$)값과의 비교를 통해 결정되었다. 파괴인성시편에 대한 해석에서 사용된 요소 사이즈를 0.2mm로 고정하여 0.2mm 균열이 성장하였을 때의 임계파괴인성 값을 고려하여 연구를 수행하였다. 정적 하중조건에서의 임계손상값에 따른 해석결과를 Fig. 8에 나타내었으며 정적 하중조건에서의 파괴인성실험결과와 비교하였다. 최종적으로 결정된 임계손상값은 0.45이며 결정된 손상기준식은 아래와 같다.

$$\epsilon_f = 1.3 \exp\left(-1.5 \times \frac{\sigma_m}{\sigma_e}\right) + 0.089 \quad (7)$$

4.3 동적 하중조건에서 파괴변형률 결정
동적 하중조건에서의 연성파손모사를 위한 손상기준

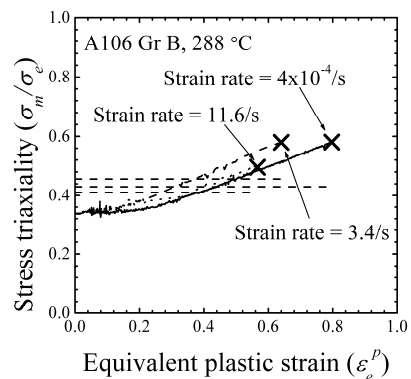


Fig. 9 Variations of the stress triaxiality with equivalent plastic strain under dynamic condition

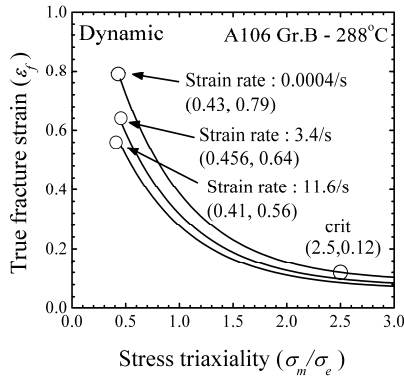


Fig. 10 Stress-modified fracture strain under dynamic condition

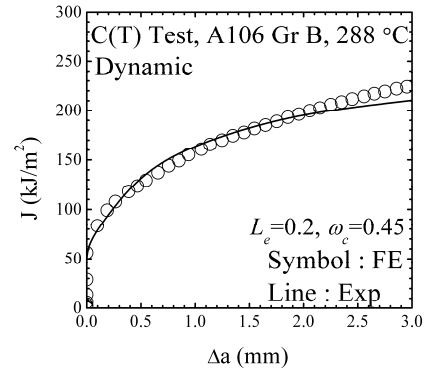
식 결정을 위하여 본 연구에서는 변형률 속도에 따른 인장실험에 대한 해석을 수행하였으며, 해석 결과를 Fig. 1 에 나타내었다. 앞선 절차와 동일하게 각 실험 속도에 따른 해석결과의 파손시점에서의 삼축응력 및 소성변형률을 시편 중앙에서 추출 하였으며, Fig. 9 에 나타내었다. 각각의 해석 결과에 대한 응력과 변형률 이력을 포함하기 위해 소성변형률에 대한 삼축응력의 평균값을 사용하였다. 변형률 속도에 따른 인장실험 해석결과를 통해 결정된 각각의 실험속도에서의 손상기준값을 이용하여 식 (3)의 변형률 속도에 따른 재료상수를 결정하였으며, 변형률 속도를 고려한 최종 손상기준식은 아래와 같으며 Fig. 10 에 나타내었다.

$$\epsilon_f = \left[1.34 \exp \left(-1.5 \times \frac{\sigma_m}{\sigma_e} \right) + 0.089 \right] \left[1 - 0.083 \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{0.39} \right) \right] \quad (8)$$

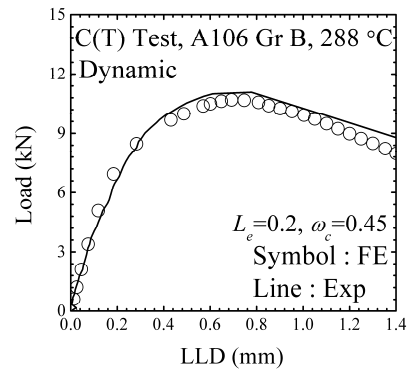
4.4 동적 하중조건에서의 CT 실험 결과 모사

앞서 결정된 변형률 속도를 고려한 손상기준식을 토대로 해석 기법에 대한 검증을 위해 동적 하중조건에서의 파괴인성 실험결과에 대한 유한요소 해석을 수행하였다. 실험조건에 언급된 것과 같이 균열 개시까지 0.25 초의 속도를 고려하여 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 모델은 대칭조건을 활용하여 1/4 모델을 사용하였으며 요소/절점의 개수는 각각 6400/7942 개이다. 균열단면에서 파손모사를 위해 사용된 요소 크기는 0.2mm 이며 임계손상값은 정적 하중조건과 같은 0.45 이다.

손상해석기법을 이용한 동적 하중조건에서의 파괴인성 해석결과와 실험결과와의 비교를 Fig. 11에 나타내었다. 해석결과와 실험결과를 비교해보면 최대하중의 경우 4%의 이내의 오차를 보이고 있으며, 균열 개시지점에서의 J_{0.2}값의 경우 3% 이내의 오차를 보이는 것을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 11 Comparison of experimental data with simulated results from dynamic CT test: (a) J-R curve (B) Load-LLD curve

5. 결론

본 논문에서는 변형률 속도를 고려한 연성파손 모사기법을 제안하였다. 제안된 연성파손 모사기법은 수정응력 파괴변형률 모델과 Johnson/ Cook 모델에 기초를 둔다. 제안된 손상모델은 다양한 실험속도의 인장실험과 정적 하중조건에서의 파괴인성 실험으로부터 파괴기준이 결정되며, 결정된 모델을 적용하여 동적 하중조건에서의 파괴인성 시편의 파괴거동을 예측할 수 있다. 이와 같은 기법을 적용하여 고변형률 조건에서의 파괴인성 시편에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 예측결과와 바텔연구소에서 수행한 온도 288°C 의 A106 Gr. B 재료의 실험속도에 따른 파괴인성 실험결과를 비교하여 해석기법을 검증하였다. 추가적으로 다양한 재료 및 변형률 조건에서의 연구가 수행 중이며 향후 배관 설비에 본 해석기법을 적용하는 것을 최종 목표로 하고 있다. 이와 같은 연구 결과는 고변형률의 하중이 작용하는 구조물의 파손 평가에 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 2013 년도 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구 과제입니다. (NRF-2013M2A8A1040924)

본 연구는 2014 년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20141520100860)

참고문헌
(References)

- (1) Scott, P., Olson, R., Bockbrader, J., Wilson, M., Gruen, B., Morbitzer, R., Yang, Y., Williams, C., Brust, F., Fredette, L., and Ghadiali, N., 2005, "The Battelle Integrity of Nuclear Piping (BINP) Program Final Report," *NUREG/CR-6837*, Vol.2.
- (2) Solomos, G., Albertini, C., Labibes, K., Pizzinato, V., and Viacoz, B., 2004, "Strain Rate Effects in Nuclear Steels at Room and Higher Temperatures," *Nucl. Eng. & Design*, Vol. 229, pp. 139~149.
- (3) Kim, J. W., Choi, M. R., 2015, "Effect of Loading Rate on the Deformation Behavior of SA508 Gr. 1a Low Alloy Steel and TP316 Stainless Steel Pipe Materials at RT and 316°C," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 39, No. 4, pp. 123~180.
- (4) DeGrassi, G., Nie, J., and Hofmayer, C., 2008, "Seismic Analysis of Large-Scale Piping Systems for the JNES-NUPEC Ultimate Strength Piping Test Program," *NUREG/CR-6983*.
- (5) American Society of Mechanical Engineer, ASME B&PV Code Sec.III, "Nuclear Components," 1998e
- (6) American Society of Mechanical Engineer, ASME B&PV Code Sec.XI, "Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components," 1998ed.
- (7) Tong, L.L., Duan, R., and Cao, X.W., 2015, "Seismic Analysis of RCS with Finite Element Model for Advanced PWR," *Prog. Nucl. Energy*, Vol. 79, pp. 142~149.
- (8) Pipe Fracture Encyclopedia, Volume 3: Pipe Fracture Test Data, Battelle, Columbus, 1997.
- (9) Baird, J.D, 1971, "The Effects of Strain Aging due to Interstitial Solutes on the Mechanical Properties of Metals," *Metall. Reviews*, Vol.16, pp.1~18.
- (10) Marschall, C.W., Mohan, R., Krishnaswamy, P., and Wilkowski, G., 1994, "Effect of Dynamic Strain Aging on the Strength and Toughness of Nuclear Ferritic Piping at LWR Temperatures," *NUREG/CR-6226*.
- (11) McClintock, F. A., 1968, "A Criterion for Ductile Fracture by the Growth of Holes," *Journal of Applied Mechanics* Vol. 35, No. 2, pp. 363~371.
- (12) Rice, J. R and Tracey, D. M. 1969, "On the Ductile Enlargement of Voids in Triaxial Stress Fields," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 17, No.3, pp.201~217.
- (13) Hancock, J. W. and Mackenzie, A. C., 1976, "On the Mechanisms of Ductile Failure in High-Strength Steels Subjected to Multi-Axial Stress-States," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 24, No. 2-3, pp. 147~160.
- (14) Kanvinde, A and Deierlein, G., 2006, "The Void Growth Model and the Stress Modified Critical Strain Model to Predict Ductile Fracture in Structural Steels," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 132, No. 12, pp. 1907~1918.
- (15) Kim, J. H., Kim, N. H., Kim, Y. J., Hasegawa, K. and Miyazaki, K., 2013, "Ductile Fracture Simulation of 304 Stainless Steel Pipes with Two Circumferential Surface Cracks," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 36, No. 10, pp. 1067~1080.
- (16) Nam, H. S., Oh, Y. R., Kim, Y. J., Kim, J. S., Miura, Naoki, 2016, "Application of Engineering Ductile Tearing Simulation Method to CRIEPI Pipe Test," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 153, pp. 128~142.
- (17) ABAQUS 6.13, Analysis User's Manual, Dassault Systemes Simulia Corp., Providence, RI, 2013.
- (18) Johnson, G. R., Cook, W. H., 1985, "Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperature and Pressure," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 21, pp. 31~48.
- (19) Oh, C. S., Kim, N. H., Kim, Y. J., Baek, J. H., Kim, Y. P. and Kim, W. S., 2011, "A Finite Element Ductile Failure Simulation Method Using Stress-Modified Fracture Strain Model," *Engineering Fracture Mechanics* Vol. 78, No. 1, pp. 124~137.
- (20) Kachanov LM, 1971, "Foundation of the Theory of Plasticity," *North-Holland*, Amsterdam.