

## 다양한 노치 반경을 갖는 17-4PH강의 동적균열개시 특성

박성욱<sup>\*</sup> · 김덕희<sup>\*</sup> · 김재훈<sup>\*\*</sup> · 문순일<sup>\*\*\*</sup>

### Dynamic Crack Initiation of 17-4PH Casting Steel for Various Notch Radius

Sung-Wook Park<sup>\*</sup> · Duck-Hoi Kim<sup>\*</sup> · Jae-Hoon Kim<sup>\*\*</sup> · Soon-Il Moon<sup>\*\*\*</sup>

#### ABSTRACT

In this study, intrinsic dynamic fracture toughness of 17-4PH casting steel is evaluated from the apparent dynamic fracture toughness of notched specimen. Notch radius of notched specimen is manufactured from 0.1mm to 4mm. The results shows that dynamic fracture toughness decreases with decreasing of notch root radius above critical notch roof radius. The true dynamic fracture toughness can be predicted from test results of apparent dynamic fracture toughness measured by using notched specimen.

#### 초 록

본 논문에서는 17-4PH강의 동적파괴인성을 노치시편의 결보기 동적파괴인성으로부터 평가하고자 한다. 0.1mm~4mm의 다양한 노치반경을 갖는 시험편을 이용하였다. 임계노치반경 이상에서는 노치 반경이 증가할수록 결보기 동적파괴인성도 증가하는 결과를 보인다. 노치시편을 이용하여 측정된 결보기 동적파괴인성으로부터 동적파괴인성을 예측할 수 있다.

#### 1. 서 론

모든 재료의 내부에는 여러 모양의 결함이 존재한다. 파괴 역학은 이러한 재료의 제조 과정 중에 발생한 균열의 존재를 전제로 하거나 사용 중에 균열이 발생하여 성장한다는 가정 하에서 구조물의 강도나 신뢰도를 높이기 위한 방법 중의 하나로 연구되었다[1~4].

일반적으로 기계구조용 재료는 변형률속도, 하중속도에 대하여 의존성이 있다. 따라서 정적 파괴인성은 어느 특정한 경우의 하중속도일 때에만 적절한 설계값으로 이용될 때가 많으며, 급격한 하중변화가 있는 경우에 대해서는 이 조건에 맞는 정적 및 동적 파괴인성을 구하여 설계 기준으로 사용해야 할 것이다.

본 논문에서는 소형 노치 시험편을 이용하여

<sup>\*</sup> 충남대학교 대학원 (Chungnam National University, Graduate school)

<sup>\*\*</sup> 충남대학교 기계설계공학과(Chungnam National University, Dept. of Mechanical Design Engineering)

<sup>\*\*\*</sup> 국방과학연구소(Agency for Defence Development)

얻은 겉보기 동적파괴인성(apparent dynamic fracture toughness)과 동적파괴인성(intrinsic dynamic fracture toughness)과의 상관관계에 대하여 다루었다. 소형 시험편을 이용한 시험 방법은 피로예비균열을 생성하기 매우 어려우며, 동적 하중에 취약한 취성 재료의 정적 및 동적 파괴인성 평가에 적용될 수 있다. 또한, 만일 노치 시험편에서 얻은 파괴인성과 균열 시험편에서 얻은 파괴인성이 거의 비슷한 수준의 값을 갖는 임계노치반경(critical notch radius)을 결정할 수 있다면, 취성 및 연성재료의 파괴인성평가에 매우 유용하게 사용할 수 있을 것이다. 따라서 본 논문에서는 다양한 노치반경을 갖는 3PB 시험편을 이용하여 동적파괴인성시험을 수행하였고, 그 결과에 대하여 서술하고자 한다.

## 2. 재료 및 시험방법

본 연구에 사용된 재료는 Mill spec.에서 규정된 주강으로 전투기 외부에 형상이 복잡한 부품의 구조용 구조재로 사용되는 소재이다.

본 연구에 사용된 시험편은 3점 굽힘시험편으로 반경을 0.1~4mm로 변화시켜 노치파괴인성 시험을 수행하였고, 이 결과를 균열시험편의 파괴인성과 비교하여 노치반경 영향을 평가하였다. 노치부는 500배율 한계를 갖는 비전식 현미경을 이용하여 재 측정하였다. 파괴인성 시험편의 피로예비균열 삽입은, 전기유압식 피로시험기를 사용하였다. 또한, 노치 시험편의 a/W는 0.48로 일정하게 가공하였다. 균열길이는 디지털 이동식 현미경을 사용하여, 최종 균열길이가 0.48W가 되도록 일정하게 유지하였다.

노치 시험편의 동적파괴인성 시험은 낙하식 충격 시험기(drop weight impact testing machine, Model : Dynatup 8250)를 이용하여 시험하였다.

충격 텡 및 추의 무게는 2.375kgf로 일정하게 유지하였으며, 공압을 이용하여 텡이 시험편을

타격하는 순간 속도를 7.17~7.20 m/sec로 일정하게 유지하였다.

## 3. 시험결과 및 고찰

본 논문에서의 동적파괴인성은 균열 선단의 변형률장을 기초로 하는 스트레인게이지법을 이용하여 수행하였다[5]. 계장화 샤르피 시험기를 이용한 17-4PH강의 파괴인성 시험 결과는 Fig. 1과 같다. 최대 변형률을 식 (1)에 대입하여 균열시험편의 동적 파괴인성을 계산할 수 있다.

$$K_I = 3.0331E\sqrt{r\epsilon'} \quad (1)$$

식(1)에 의하여 계산된 17-4PH강의 동적 파괴인성은 186.2kgf/mm<sup>3/2</sup>이다.

스트레인게이지법에 의한 방법은 균열시험편에만 유효하므로, 노치 시험편의 경우 피로 예비균열이 없는 노치 시험편의 동적 균열개시하중 추정 절차[6,7]에 따라 하중을 결정하고, 겉보기 동적파괴인성을 평가하였다. 이 방법을 대략적으로 설명하면 다음과 같다.

노치 샤르피 시험편을 이용한 계장화 충격 시험의 경우, 하중-시간 선도는 Fig. 2와 같이 나뉘어 진다. 유형 I 은 선형 탄성 재료의 경우에 주로 나타나며, 재료의 항복이 최대하중 혹은 이전에 발생하는 경우이다. 유형 II와 유형 III은 일반적인 탄소성 재료에서 볼 수 있으며, 균열은 최대하중에 이전에 개시된다. 따라서, 유형 I 의 경우 경험적인 연구들을 통하여 최대하중의 0.8에 해당하는 감소 계수(reduction factor)를 고려하여 ASTM E399에 준해 파괴인성을 평가한다[7]. 이 경우 오차의 범위는 ±20% 정도가 발생하는 것으로 알려져 있다. 유형 II와 유형 III의 경우 여러 연구자에 의하여 실험적인 경험들을 토대로 동적균열개시 하중을 예측하였다. Ghoneim과 Hammad[8]는  $(P_{max} + P_{GY})/2$ 를 파괴개시 하중으로 제안하였다. 반면, Norris[9]는 유한요소해석 및 시험 결과를 근거로 최대하중

에 이르는 시간  $t_{max}$ 의 40%에 이르는 시점  $t_i$ 에서의 하중을 동적균열개시하중으로 제시하였다. 본 연구에서는 보수적인 시험 데이터를 얻고자  $t_i/t_{max}=0.4$ 를 균열개시하중으로 간주하여 계산하였다.

Fig. 3은 0.14~0.51mm의 노치 반경을 갖는 17-4PH강의 시간-하중 선도를 도시한 결과이다. 앞의 결과와는 달리 시간-하중 선도의 궤적이 Fig. 2의 유형 I과 같은 형태를 보이고 있다. 따라서, 이 경우에는 동적 균열개시하중을 최대하중의 80%로 설정하여 결보기 동적파괴인성을 계산하였다.

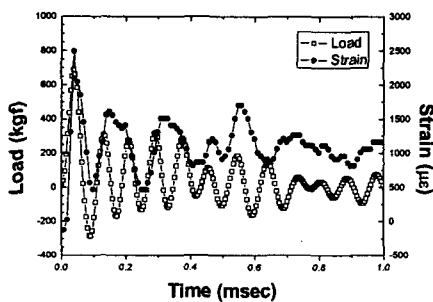


Fig. 1 Load and strain versus time response for cracked specimen of 17-4PH steel ( $v=7.2$  m/sec)

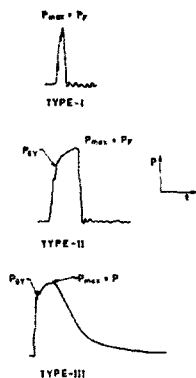


Fig. 2 Three types of load-time traces from instrumented tests of Charpy specimen[8]

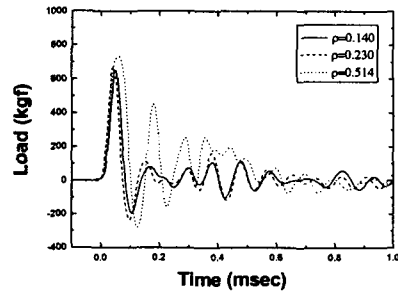


Fig. 3 Time-load traces for 17-4PH Charpy specimens with various notch radii (0.140~0.514mm)

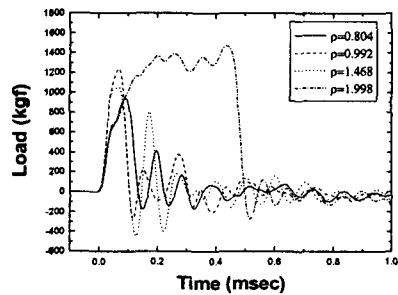


Fig. 4 Time-load traces for 17-4PH Charpy specimens with various notch radii (0.804~1.998mm)

그러나, 0.8~2mm의 노치 반경을 갖는 17-4PH강의 시간-하중의 궤적(Fig. 4)은 유형 II와 비슷하여  $t_i/t_{max}=0.4$ 인 지점을 균열개시시점으로 간주하여 계산하였다.

Fig. 5는 노치반경 변화에 따른 17-4PH강의 동적 임계 하중 변화를 나타낸 결과이다. Fig. 6은 노치반경 변화에 따른 17-4PH강의 결보기 동적 파괴인성 변화를 나타낸 그래프이다. 정적인 경우와 마찬가지로 동적인 경우에도 임계 노치 반경은 존재하고 있으며, 이 이하에서는 균열 시험편의 동적파괴인성과 동일한 결보기 동적 파괴인성을 보이고 있다.

## 참고 문헌

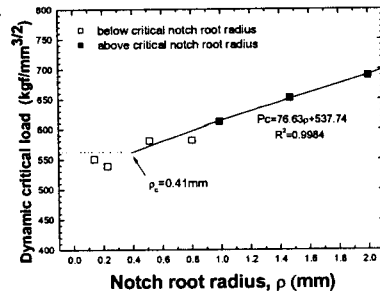


Fig. 5 Notch root radius versus dynamic critical load for 17-4PH steel

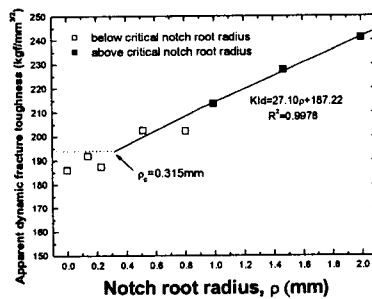


Fig. 6 Apparent dynamic fracture toughness as a function of notch root radius under dynamic loading for 17-4PH steel

이 두 결과들을 선형 회귀 분석하여 동적 임계 노치반경을 결정하면 약 0.3~0.4mm 근방으로 예측할 수 있다.

## 4. 결론

- 1) 계장화 샤르피 시험기의 시간-하중 선도에 서 균열개시 시점을 하중-시간 선도의 궤적을 이용하여 결정하였다.
- 2) 17-4PH의 임계노치반경은 0.3~0.4mm 근방으로 평가된다.
- 3) 다양한 재료에서 노치부 동적균열개시 평가를 기초로 취성재료의 동적파괴인성 평가에도 적용이 가능할 것으로 판단된다.

1. M. F. Kanninen and C. H. Popelar, 1985, Advanced Fracture Mechanics, Oxford University Press.
2. T. L. Anderson, 1995, Fracture Mechanics Fundamental and Application, CRC Press.
3. M. A. Meyers, 1994, Dynamic Behavior of Materials, Wiley International.
4. H. P. Rossmanith and A. J. Rosakis, 1991, Dynamic Failure of Materials, Elsevier Applied Science.
5. 이현철, 김덕희, 김재훈, 문순일, 2000, "스트레인게이지법을 이용한 동적응력확대계수 평가", 대한기계학회 추계학술대회 논문집 A, pp. 304~309.
6. P. R. Sreenivasan, A. Moitra, S. K. Ray, S. L. Mannan, 1996, "Dynamic Fracture Toughness Properties of a 9Cr-1Mo Weld from Instrumented Impact and Drop Weight Test", International Journal of Pressure Vessel and Piping, Vol. 69, pp. 149~159.
7. P. R. Sreenivasan, S. K. Ray, S. L. Mannan and P. Rodriguez, 1996, "Dynamic Fracture Toughness and Charpy Impact Properties of an AISI 403 Martensitic Stainless Steel", Journal of Nuclear Materials, Vol. 228, pp. 338~345.
8. M. M. Ghoneim and F. H. Hammad, 1992, "Instrumented Impact Testing of an Irradiated 20MnMoNi55 PVS Weld Material", Journal of Nuclear Materials, Vol. 186, pp. 196~202.
9. D. M. Norris, 1979, "Computer Simulation of the Charpy V-Notch Test", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 11, pp. 261~274.