

변형률속도 변화에 따른 INCONEL 718 초내열합금의 동적 물성특성

송정한¹, 허훈[#]

Dynamic Material Characteristics of Superalloy INCONEL 718 with the Variation of Strain Rates

J. H. Song, H. Huh

Abstract

INCONEL 718, nickel based superalloy, has good formability, high strength, excellent corrosion resistance and mechanical properties at high temperature. Owing to these attractive properties, it finds use in applications such as combustion system, turbine engines and nuclear reactors. In such applications, components are typically required to be tolerant of high stress impact loading. This may cause material degradation and lead to catastrophic failure during service operation. In order to design optimal structural parts made of INCONEL 718, accurate understanding of material's mechanical properties, dynamic behavior and fracture characteristic as a function of strain rates are required.

This paper concerned with the dynamic material properties of the INCONEL 718 for the various strain rates. The dynamic response of the INCONEL 718 at intermediate strain rate is obtained from the high speed tensile test machine test and at the high strain rate is from the split Hopkinson pressure bar test. Based on the experimental results, the effects of strain rate on dynamic flow stress, work hardening characteristics, strain rate sensitivity and elongation to the failure are evaluated. Experimental results from both quasi-static and high strain rate up to the 5000 /sec are interpolated in order to construct the Johnson-Cook model as the constitutive relation that should be applied to simulate and design the structural parts made of INCONEL 718.

Key Words INCONEL 718(INCONEL 718 초내열합금), High speed material testing machine (고속인장시험기), Split Hopkinson pressure bar(홉킨슨바), Strain rate sensitivity(변형률속도민감도)

1. 서론

초내열합금인 INCONEL 718 은 니켈계 초내열합금에서 상당량 포함되어 있는 Co 대신에 Fe 를 약 20 % 첨가하여 비용절감을 꾀하도록 설계된 합금으로, 650℃ 까지 기계적 특성이 우수하고 여타 초내열합금에 비해 가공성 및 성형성이 양호

하기 때문에 가스터빈은 물론 증기터빈과 산업용, 발전용 고온설비, 항공기 엔진용 디스크 부품소재 등 전체 초내열합금의 35%를 점유할 정도로 광범위하게 사용되고 있다.

발전설비 및 항공기엔진을 위시한 가스터빈에 사용되는 터빈 블레이드는 고온·고압하에 노출되어 있으며, 고속회전에 의한 원심력 및 열응력

1. 한국과학기술원 기계공학과

교신저자: 한국과학기술원 기계공학과, hhuh@kaist.ac.kr

에 의하여 피로균열에 의한 파단이 발생한다[1,2].

특히 INCONEL 718 이 많이 사용되는 항공기 엔진용 터빈 부품소재의 경우 작동과정에서 고속 회전으로 인한 충격하중 및 외부 물체 유입에 의한 충격 손상(foreign object damage; FOD)등이 문제가 되고 있으며, 파손 시 막대한 인명 및 재산상 피해를 유발하기 때문에 미국에서는 FAR (Federal Aviation Regulation)을 통하여 엔진 블레이드의 파단 및 디스크 부품소재의 충격 안전성을 규정하고 있다[3]. 따라서 이러한 부품에 대한 제조 및 설계의 신뢰성과 안전성을 확보하기 위해서는 충분한 강도를 갖는 재질을 선정하고, 변형률속도에 따른 강도변화와 같은 INCONEL 718의 기계적 특성에 대한 연구가 필수적이다.

본 논문에서는 INCONEL 718 합금의 준정적 인장실험 및 변형률속도 0.1~400 /sec 에서의 인장실험, 홉킨슨바를 이용한 1000~ 5000 /sec 에서의 고속 압축실험을 수행하고 각각의 변형률속도에서 응력-변형률 선도를 확보하였다. 이에 근거하여 변형률속도 변화에 따른 항복응력과 유동응력 및 파단연신율의 변화를 조사하였으며, INCONEL 718 합금의 변형률속도민감도를 Johnson-Cook 모델, modified Johnson-Cook 모델, Cowper-Symonds 모델로 근사하여 INCONEL 718의 동적 물성특성을 평가하였다.

2. INCONEL 718의 동적 물성실험

2.1 INCONEL 718의 준정적 인장실험

INCONEL 718의 저속 변형률 특성을 알아보기 위하여 만능 재료시험기인 INSTRON 5583을 이용하여 준정적 인장실험을 수행하였다. Fig. 1에 도시한 ASTM E-8 규격의 박판형 시편에 대하여 인장속도를 5.4 mm/min 으로 정하여 시편에 작용하는 변형률속도가 0.003 /sec 이 되도록 하였다.

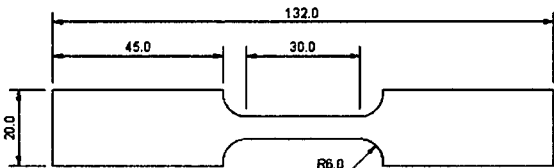


Fig. 1 The specimen for the quasi-static tensile test of INCONEL 718 (ASTM E-8)

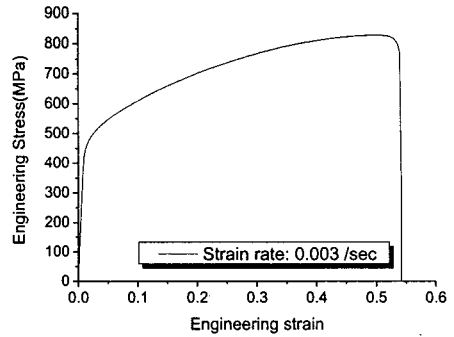


Fig. 2 Quasi-static engineering stress-strain curve of INCONEL 718

Fig. 2에 정적 실험을 통하여 얻은 INCONEL 718 합금의 응력-변형률 선도를 도시하였다. 정적 인장실험 결과 항복응력은 약 450 MPa, 최대응력은 830 MPa로 재료의 경화가 많이 발생함을 알 수 있다. 그리고 INCONEL 718 합금의 파단 연신율은 약 55%로 나타났다.

2.2 INCONEL 718의 중고속 인장실험

INCONEL 718의 중변형률속도 (intermediate strain rate)에서의 동적 특성을 알아보기 위하여 고속 인장시험기를 이용하여 인장실험을 수행하였다. 변형률속도의 범위는 고속인장시험기의 피스톤 속도와 시편의 표점거리를 조절하여 0.1 ~ 400 /sec 으로 결정하였다. Fig. 3에 실험에 사용된 시편의 형상을 도시하였다. ASTM E-8 규격의 시편과 비교하여 일장속도를 확보하기 위하여 그림부를 증가하였다. 200 /sec 까지의 변형률 속도에서는 표점거리 30 mm의 시편을 사용하였으며, 400 /sec의 변형률 속도에서의 인장실험은 실린더 속도의 한계로 인하여 표점거리를 15 mm로 조절하여 사용하였다.

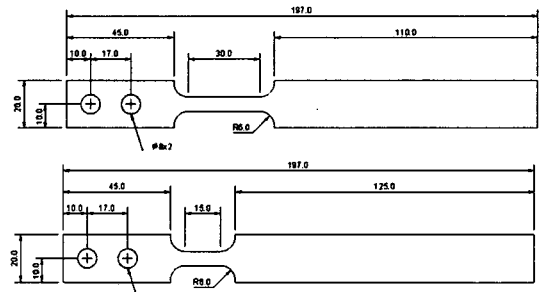


Fig. 3 The specimen for the intermediate tensile test

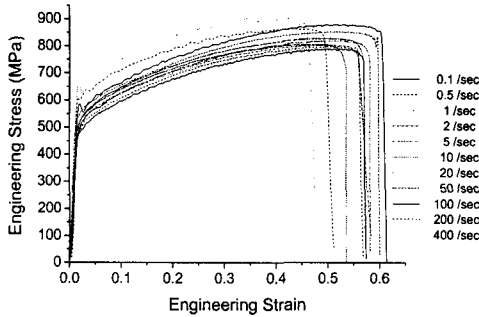


Fig. 4 Engineering stress-strain curve of INCONEL 718 with the variation of strain rate

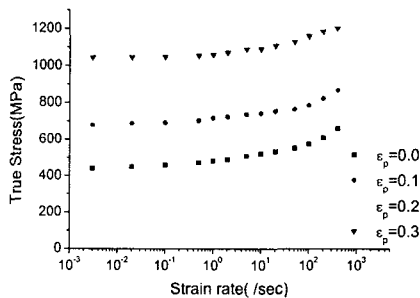


Fig. 5 Work hardening characteristics of INCONEL 718 with the variation of strain rate

인장실험을 통하여 얻어진 0.1 ~ 400 /sec 에서 INCONEL 718 합금의 응력-변형률 선도를 Fig. 4 에 도시하였다. 변형률속도 변화에 따른 가공경화 (work hardening) 특성을 조사하기 위하여 각 소성 변형률에서 유동응력의 변화량을 Fig. 5 에 도시하였다. 변형률속도의 증가에 따라 각 소성 변형률에서 유동응력이 지수증(exponential)으로 증가하는 경향을 보이며, 특정 변형률속도에서 변형률의 증가에 따라 유동응력의 증가폭이 감소한다.

변형률속도의 변화에 따른 파단연신율의 변화를 Fig. 6 에 도시하였다. 실험결과 파단 연신율은 45 %에서 60 %의 범위에서 분포하며, 변형률속도 변화에 따라 5 ~ 10 /sec 에서 감소하며 이후 증가하다 100 /sec 이상에서 다시 감소하게 나타났다.

2.4 INCONEL 718 의 고속 압축실험

변형률속도 1000 /sec 이상에서 INCONEL 718 의 거동을 살펴보기 위하여 홉킨슨바 시험기를 이용하여 고속 압축실험을 수행하였다[4]. 고속 압축실험은 직경이 10 mm 이고 두께가 각각 4 mm, 6 mm, 8 mm 인 원통형 시편을 사용하여 변형률 속도를

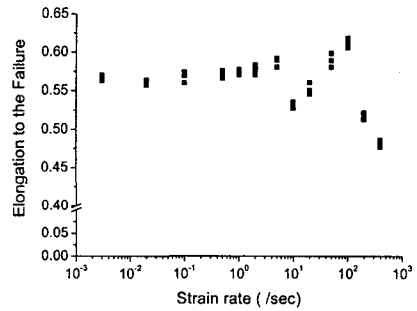


Fig. 6 Variation of the failure strain of INCONEL 718 at intermediate strain rates

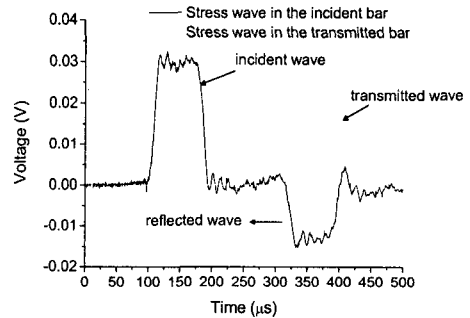


Fig. 7 Stress wave in the incident and transmitted bar of INCONEL 718 from (strain rate: 1000 /sec)

1000 /sec, 2000 /sec, 5000 /sec 로 수행하였다.

Fig. 7 에 INCONEL 718 의 변형률 속도 1000 /sec 실험에서 스트레인 게이지를 통하여 얻어진 입력 봉과 출력봉에서의 응력파를 도시하였다. 이와 같이 측정된 응력파를 반사파 투과파 부분으로 분리된 후 시편의 응력 변형률 관계로 변환하였다.

3. INCONEL 718 의 동적 물성모델

동적 물성모델은 많은 경우 재료 거동을 변형률경화(strain hardening), 변형률속도경화(strain rate hardening) 및 열적연화(thermal softening) 효과로 구분하고 각각의 영향을 서로 독립적인 항으로 수식화 한 후 재료거동을 표현한다. Johnson-Cook 물성모델은 식 (1), Cowper-Symonds 물성모델은 식 (2)로 표현되며 각 계수들은 실험적으로 결정된다.

$$\bar{\sigma} = [A + B\bar{\epsilon}^n][1 + C_1 \ln \dot{\bar{\epsilon}}][1 + T^{*m}] \quad (1)$$

$$\text{여기서, } T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}$$

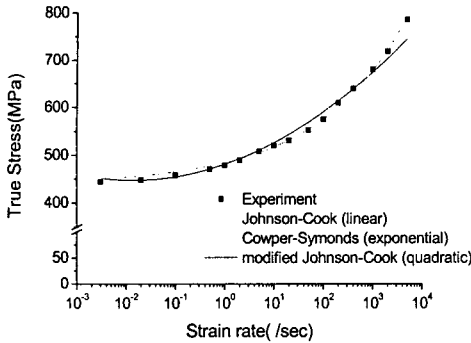


Fig. 8 Strain rate sensitivity of INCONEL 718

$$\bar{\sigma} = \sigma_0(\bar{\epsilon}) \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{\frac{1}{p}} \right] \quad (2)$$

그러나 Johnson-Cook 모델의 경우 수 백/sec 의 변형률속도 이상에서 유동응력이 급격하게 증가하는 것을 제대로 표현하지 못하는 단점이 있으며, Cowper-Symonds 모델은 열적연화를 고려하지 않아 이를 보완하기 위하여 Johnson-Cook 모델에서 변형률속도 경화항을 2 차 log 함수로 모사하는 식 (3)의 수정모델과 Cowper-Symonds 모델에 열적연화항을 추가한 식 (4)의 모델이 제안되었다[5].

$$\bar{\sigma} = [A + B\bar{\epsilon}^n][1 + C_1 \ln \dot{\epsilon} + C_2 (\ln \dot{\epsilon})^2][1 + T^{*m}] \quad (3)$$

$$\bar{\sigma} = \sigma_0(\bar{\epsilon}) \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{\frac{1}{p}} \right] [1 + T^{*m}] \quad (4)$$

본 논문에서는 INCONEL 718의 정적 인장시험, 중고속 인장시험, 고속 압축시험에서 얻은 실험결과를 Johnson-Cook 모델, Cowper-Symonds 모델 그리고 각각의 수정모델로 근사하여 계수를 결정하였다. 변형률속도경화항의 계수를 Fig. 8 과 같이 근사하여 결정하였다. 각 물성모델에 따른 계수값을 Table 1 과 2 에 도시하였다.

Table 1 Constants of INCONEL 718 in the original and modified Johnson-Cook model

A (MPa)	B (MPa)	n	C	C ₁	C ₂	m
483.5	1469	0.7837	0.0532	0.0323	0.0038	0.289

Table 2 Constants of INCONEL 718 in the original and modified Cowper-Symonds model

A (MPa)	B (MPa)	n	D	p	m
445.3	1674	0.8419	12611.7	4.099	0.318

4. 결론

본 논문에서는 INCONEL 718 합금의 동적 물성특성을 평가하기 위하여 변형률속도를 달리하여 준정적 인장시험, 고속인장시험기를 이용한 중변형률속도에서의 인장시험, 홉킨슨바를 이용한 고속 압축시험을 수행하였다. 실험을 통하여 각각의 변형률 속도에서의 응력-변형률 선도를 확보하고 파단연신율의 변화를 조사하였다. INCONEL 718 합금의 동적 물성특성을 실험 결과에 근거하여 Johnson-Cook 모델, Cowper-Symonds 모델로 표현하고 정확한 모사를 위하여 modified Johnson-Cook, modified-Cowper-Symonds 모델로 근사하고, 물성 데이터베이스를 구축하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(과제관리번호 02-중-17) 주관으로 수행된 과제임. 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 염종택, 박노광, 이종수, 2004, 고품위 초내열합금 Alloy 718 빌렛 제조기술, 한국소성가공학회지, 제 13 권, 제 8 호, pp. 653~662
- [2] 엄철용, 염종택, 박노광, 2004, 직접시효 처리된 Alloy 718 합금의 미세조직과 기계적 특성, 소성가공학회 추계학술대회 논문집, pp. 222~ 225.
- [3] J. Hou, B. J. Wicks and R. A. Antoniou, 2002, An investigation of fatigue failures of turbine blades in a gas turbine engine by mechanical analysis, Engineering Failure Analysis, Vol. 9, pp. 201~211.
- [4] H. Kolsky, 1963, *Stress waves in solids*, Dover publications, New York, pp. 41~98
- [5] W. J. Kang, S. S. Cho, H. Huh and D. T. Chung, 1999, Modified Johnson-Cook model for vehicle body crashworthiness simulation, Int. J. Vehicle Design, Vol. 21, pp.424~435.