

변형률속도 변화에 따른 INCONEL 718 초내열합금의 동적 물성특성

송정환¹ · 허 훈[#]

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

J. H. Song, H. Huh

(Received May 12, 2005)

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 is utilized 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. Accurate understanding of material's mechanical properties with various strain rates is required in order to guarantee the reliability of structural parts made of INCONEL 718. This paper is concerned with the dynamic material properties of the INCONEL 718 at various strain rates. The dynamic response of the INCONEL 718 at the intermediate strain rate is obtained from the high speed tensile test and at the high strain rate is from the split Hopkinson pressure bar test. The effect of the strain rate on dynamic flow stress, work hardening characteristics, strain rate sensitivity and elongation to the failure is evaluated with the experimental results. Experimental results from both the quasi-static and the high strain rate up to 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, High Speed Material Testing Machine, Split Hopkinson Pressure Bar, Strain Rate Sensitivity

1. 서 론

초내열합금인 INCONEL 718 은 니켈기 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 양호하기 때문에 가스터빈은 물론 증기터빈과 산업용, 발전

용 고온설비, 항공기 엔진용 디스크 부품소재 등 전체 초내열합금의 35%를 점유할 정도로 광범위하게 사용되고 있다[1].

발전설비 및 항공기엔진을 위시한 가스터빈에 사용되는 터빈 블레이드는 고온·고압하에 노출되어 있으며, 고속회전에 의한 원심력 및 열응력에 의하여 피로균열에 의한 파단이 발생한다[2].

특히 INCONEL 718 이 많이 사용되는 항공기 엔

1. 한국과학기술원 기계공학과

교신저자: 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : hhuh@kaist.ac.kr

진용 터빈 부품소재의 경우 작동과정에서 고속 회전에 의한 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.

INCONEL 718 초내열합금의 변형률속도 변화에 따른 기계적 특성에 관하여 Pereira 등은 열처리 조건을 달리한 네 종류의 INCONEL 718 판재에 관통실험(ballistic impact limit)을 수행하여 열처리 효과에 따른 INCONEL 718의 방호한계(ballistic limit)를 평가하였다[4]. Siueva 등은 관통실험으로 Alloy 718의 방호한계곡선(ballistic limit curve)을 구하고 INCONEL 718의 Copwer-Symonds 모델의 계수를 유한요소해석으로 결정하였다[5]. Mitrofanov 등은 Siueva의 결과를 이용하여 INCONEL 718의 초음파 가공공정에 관한 유한요소해석을 수행하였다[6]. 그러나 관통실험은 소재의 유동응력 곡선을 확보하지 못하며 단순히 타격물체(projectile)의 발사속도 변화에 따른 국부적인 변형량을 평가하기 때문에 변형률속도 변화에 따른 INCONEL 718의 정확한 변형률속도 민감도를 계산하는데 오차가 존재한다. 이를 보완하기 위하여는 일축 응력하에 재료의 균일한 변형에서의 응력-변형률 선도에 근거하여 유동응력의 변화를 조사하여 변형률속도 민감도를 계산하여야 한다.

본 논문에서는 INCONEL 718 합금의 준정적 인장실험 및 변형률속도 0.1~400/sec에서의 인장실험, 홉킨슨바를 이용한 1000~5000/sec에서의 고속 압축실험을 수행하여 각 변형률속도에서 응력-변형률 선도를 확보하였다. 이에 근거하여 변형률속도 변화에 따른 항복응력과 유동응력 및 파단연신율의 변화를 조사하였으며, INCONEL 718 합금의 변형률속도 민감도를 Johnson-Cook 모델과 modified Johnson-Cook 모델로 근사하여 동적 물성특성을 평가하였다. 본 논문에서 사용한 INCONEL 718의 미세조직 및 조성을 Fig. 1과 Table 1에 도시하였다.

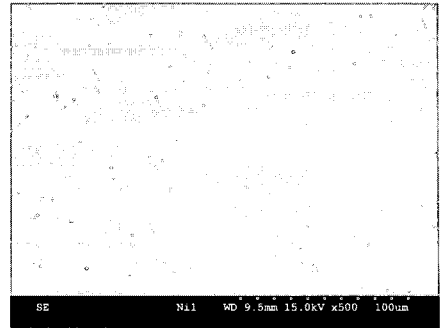


Fig. 1 Microstructure of the INCONEL 718 alloy

Table 1 Chemical composition of INCONEL 718 alloy

Element	Ni	Fe	Cr	Nb	Mo	Ti	Al	Si	C
Wt (%)	53.66	17.87	17.67	5.95	3.01	0.97	0.70	0.14	0.03

2. INCONEL 718의 동적 물성실험

2.1 INCONEL 718의 준정적 인장실험

INCONEL 718의 준정적 인장특성을 알아보기 위하여 만능 재료시험기인 INSTRON 5583을 이용하여 인장실험을 수행하였다. 실험에 사용한 원소재는 지름 122mm×높이 200mm의 원통형으로 이를 Fig. 2에 도시한 ASTM E-8 규격의 박판형 시편으로 제작하여 사용하였다. 표점거리 30mm인 시편에 대하여 인장속도를 5.4mm/min으로 정하여 시편에 작용하는 변형률속도가 0.003/sec이 되도록 하였다.

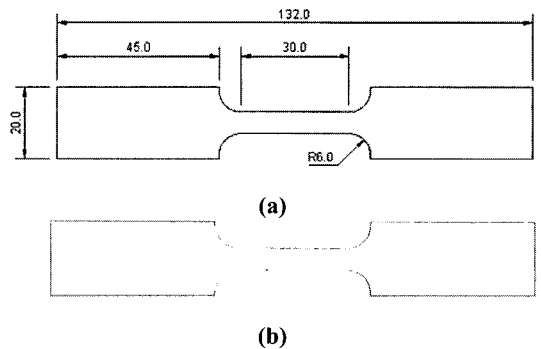


Fig. 2 The specimen for the quasi-static tensile test of INCONEL 718 (ASTM E-8): (a) schematic description; (b) photograph

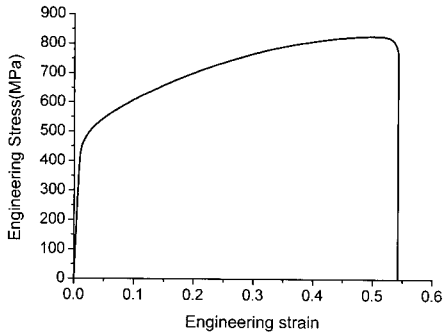


Fig. 3 Quasi-static engineering stress-strain curve of INCONEL 718

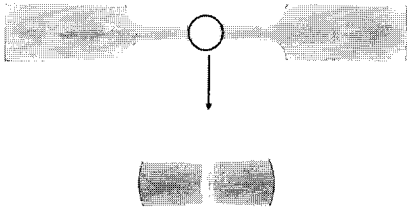


Fig. 4 Failure surface of INCONEL 718 with quasi-static tensile test

Fig. 3에 정적 실험을 통하여 얻은 INCONEL 718 합금의 응력-변형률 선도를 도시하였다. 정적 인장실험 결과 항복응력은 약 450MPa, 최대응력은 830MPa로 재료의 경화가 많이 발생함을 알 수 있다. 그리고 INCONEL 718 합금의 파단 연신율은 약 55% 정도라서, Fig. 4에 도시한 파단면을 살펴보면 인장과정에서 연신율이 증가함에 따라 연성 파괴가 발생함을 살펴 볼 수 있다.

2.2 INCONEL 718의 중고속 인장실험

중고속 변형률속도(intermediate strain rate)에서 INCONEL 718합금의 동적 특성을 알아보기 위하여 Fig. 5에 도시한 고속 인장시험기를 이용하여 인장실험을 수행하였다. 인장시험기는 가로 1000, 세로 600, 높이 2300mm의 크기를 가지며 크로스 헤드의 높이를 220mm씩 3단계로 조절할 수 있다. 실린더의 최고 속도는 7000mm/sec이고 최대 하중은 30 kN, 최대 변위는 300mm이다. 작동유체의 최고 운전압력은 300kg/cm²이고 45kW 용량의 유압모터를 2개 사용하여 압축시킨다. 변위와 하중의 측정은 LDT (Linear Displacement Trans-ducer)와 압전형 로드셀을 사용하였다.

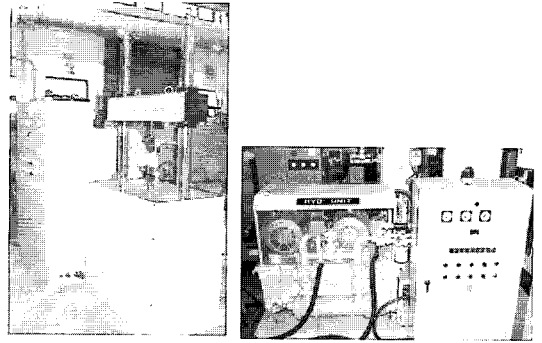


Fig. 5 Picture of the high speed material testing machine

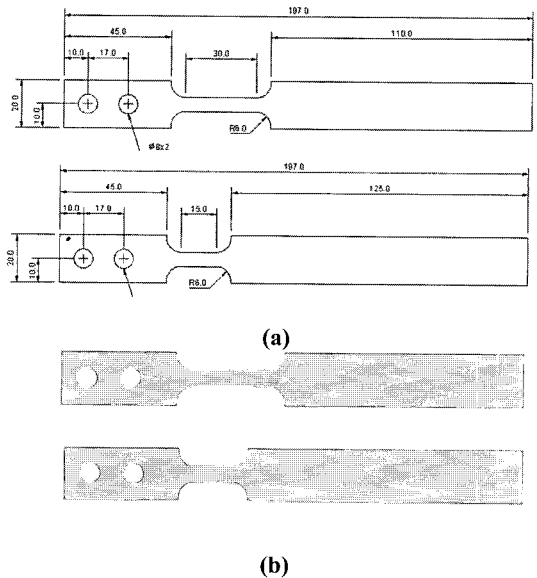


Fig. 6 The specimen for the intermediate tensile test; (a) schematic description; (b) photograph

변형률속도의 범위는 고속인장시험기의 피스톤 속도와 시편의 표점거리를 조절하여 0.1~400/sec으로 결정하였다. Fig. 6에 실험에 사용된 시편의 형상을 도시하였다. ASTM E-8 규격의 정적시편과 비교하여 일정한 인장 속도를 얻기 위하여 그립부의 길이를 증가시켰으며 표점거리 및 곡률반경은 동일하다. 200/sec 까지의 변형률 속도에서는 표점거리 30mm의 시편을 사용하였으며, 400/sec의 변형률 속도에서의 인장실험은 실린더 속도의 한계로 인하여 표점거리를 15mm로 조절하여 사용하였다.

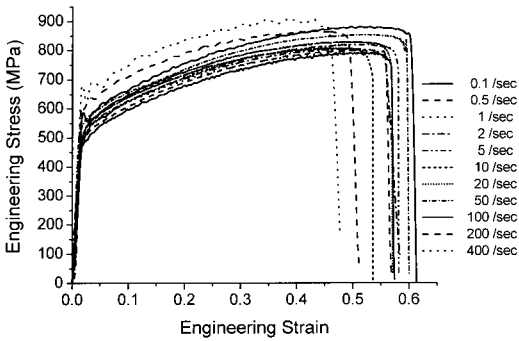


Fig. 7 Engineering stress-strain curve of INCONEL 718 with the variation of strain rate

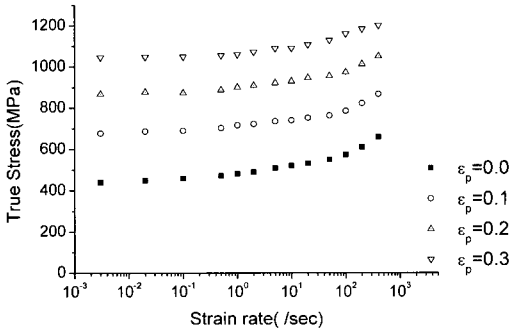


Fig. 8 Work hardening characteristics of INCONEL 718 with the variation of strain rate

인장실험을 통하여 얻어진 0.1~400/sec 에서 INCONEL 718 합금의 응력-변형률 선도를 Fig. 7 에 도시하였다. 변형률 속도가 증가 할수록 항복 강도는 약 450MPa 에서 600MPa 로 증가하고 최대 강도는 약 800MPa 에서 900MPa 까지 증가하며, 변형률에 따라 증가하는 양이 변하게 된다. 변형률속도 변화에 따른 가공경화특성을 조사하기 위하여 각 소성변형률에서 유동응력의 변화량을 Fig. 8 에 도시하였다. 변형률속도의 증가에 따라 각 소성변형률에서 유동응력이 지수승(exponential)으로 증가하는 경향을 보이며, 특정 변형률속도에서 변형률의 증가에 따라 유동응력의 증가폭이 감소한다.

변형률속도의 변화에 따른 과단연신율의 변화를 Fig. 9에 도시하였다. 실험결과 과단 연신율은 45%에서 60%의 범위에서 분포하며, 변형률속도 변화에 따라 5~10/sec에서 감소하며 이후 증가하다 100/sec 이상에서 다시 감소하게 나타났다.

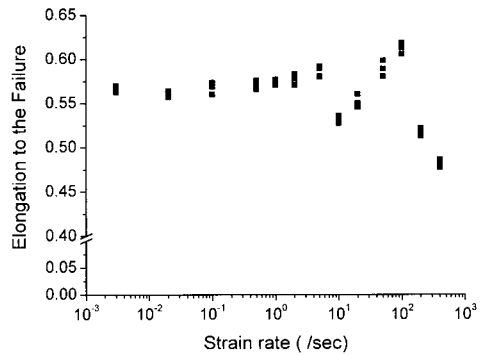
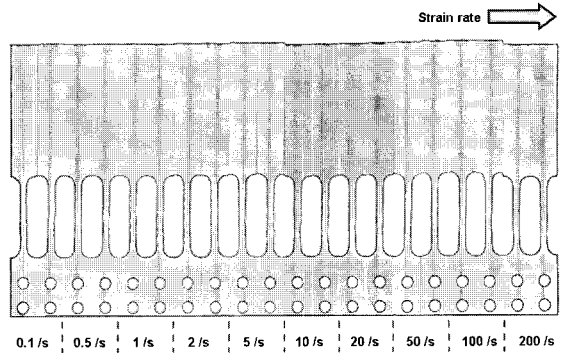


Fig. 9 Variation of the failure strain of INCONEL 718 at intermediate strain rates

2.4 INCONEL 718 의 고속 압축실험

변형률속도 1000/sec 이상에서 INCONEL 718의 거동을 살펴보기 위하여 홉킨슨바 시험기를 이용하여 고속 압축실험을 수행하였다. 홉킨슨바 시험기는 1차원 탄성과 이론에 근거하며, 입력봉(incident bar)과 출력봉(transmitted bar) 사이에 시편이 위치하며 충격봉(projectile)으로 타격하여 입력봉과 출력봉에서 반사파와 투과파를 측정 식(1)과 (2)의 관계를 이용하여 시편의 응력 및 변형률 관계를 구할 수 있다[7].

$$\sigma(t) = E \frac{A_0}{A} \varepsilon_T(t) \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2C_0}{L} \varepsilon_R(t) \quad (2)$$

이때 E 는 봉의 탄성계수, A_0 와 A 는 봉과 시편의 단면적, ε_T 는 투과파, ε_R 은 반사파, C_0 는 응력파의 전파속도, L 은 시편의 표점거리이다.

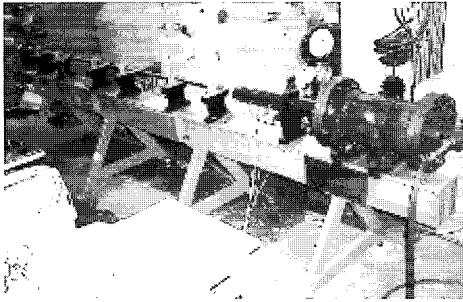


Fig.10 Split Hopkinson pressure bar apparatus



Fig.11 The specimen of INCONEL 718 for Hopkinson bar test

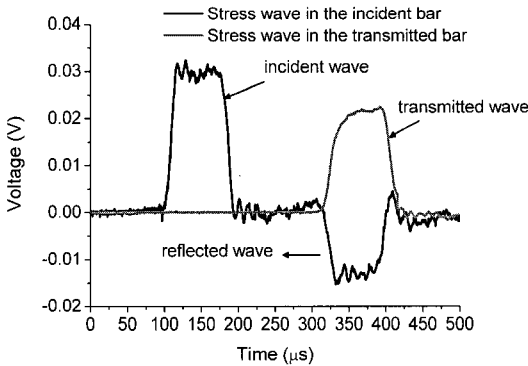


Fig.12 Stress wave in the incident and transmitted bar of INCONEL 718 from (strain rate: 1000 /sec)

고속 압축실험은 직경이 10mm 이고 두께가 각각 4mm, 6mm, 8mm 인 원통형 시편을 사용하여 변형률속도를 1000/sec, 2000/sec, 4000/sec 로 변화시켜 수행하였다. 실험에 사용한 홉킨슨바 시험기와 시편은 Fig. 10 및 Fig. 11 과 같다.

Fig. 12에 INCONEL 718의 변형률 속도 1000/sec 실험에서 스트레인 게이지를 통하여 얻어진 입력봉과 출력봉에서의 응력파를 도시하였다. 입력파는 약 14 μs의 증가 시간을 갖는 사각파이며, 투과파는 반사파에 비하여 약간의 지연시간을 거친 후 얻어 지는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 측정된

응력파를 반사파 투과파 부분으로 따로 분리된 후 식 (1) 과 식 (2)의 관계를 통하여 시편의 응력 변형률 관계로 변환하였다.

3. INCONEL 718의 동적 물성모델

재료의 동적 물성모델은 실험 및 이론에 근거하여 많은 연구자들이 제안하고 있다. 동적 물성 모델은 많은 경우 재료 거동을 변형률 경화(strain hardening), 변형률속도경화(strain rate hardening) 및 열적 연화(thermal softening) 효과로 구분하고 각각의 영향을 서로 독립적인 항으로 수식화 한 후 재료거동을 표현한다. 대표적인 것으로 Johnson-Cook 모델이 있다[8].

Johnson-Cook 물성모델은 식 (3)과 같이 표현되며 실험적으로 A, B, n, C, m 의 변수를 결정한다. 식(4)처럼 T*를 정의하여 열적 연화계수 m 을 적용하였다.

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

$$T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \quad (4)$$

Johnson-Cook 모델은 유동응력을 변형률 경화항, 변형률속도 경화항으로 구분하였기 때문에 적용이 쉽다는 장점이 있고, 실제로 많은 상용프로그램에 적용되어 있다. 그러나 Johnson-Cook 모델의 경우 변형률속도의 민감도를 1 차 log 함수를 이용하여 표현하기 때문에 수 백/sec 의 변형률속도 이상에서 유동응력이 급격하게 증가하는 것을 제대로 표현하지 못하는 단점이 있다. 이를 보완하기 위하여 Huh 등이 Johnson-Cook 모델에서 변형률속도 경화를 2 차 log 함수로 모사하는 식 (5)의 수정 모델이 제안되었다[9].

$$\bar{\sigma} = [A + B\bar{\epsilon}^n][1 + C_1 \ln \dot{\epsilon} + C_2 (\ln \dot{\epsilon})^2][1 + T^{*m}] \quad (5)$$

본 논문에서는 INCONEL 718 의 정적 인장시험, 중고속 인장시험, 고속 압축실험에서 얻은 실험결과를 Johnson-Cook 모델과 modified Johnson-Cook 모델로 근사하여 계수를 결정하였다. Johnson-Cook 모델의 변형률 경화항 상수 A, B, n 은 변형률속도 1/sec 인 경우의 응력-변형률 선도를 Ludwick 식으로 근사하여 상수를 결정하였다. 그리고 각 변형

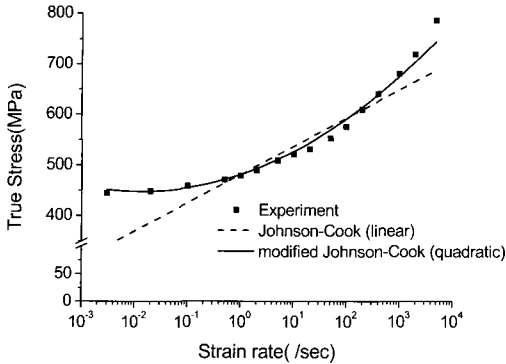


Fig.13 Strain rate sensitivity of INCONEL 718

Table 2 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

률속도에서의 초기 항복응력을 이용하여 변형률 속도 경화항의 계수를 결정하였다. Johnson-Cook 모델과 modified Johnson-Cook 모델로 근사한 변형률 속도 민감도를 Fig. 13에 도시하였다.

Fig. 13에 도시된 바와 같이 변형률속도에 대한 민감도를 일차함수로 근사한 Johnson-Cook 모델은 실험결과와 비교하여 큰 차이를 보인다. 그러나 modified Johnson-Cook 모델의 이차 곡선은 준정적에서 고변형률속도 범위의 시험 데이터와 잘 일치함을 살펴볼 수 있다. 이상의 기술한 방법으로 INCONEL 718 합금에 대하여 각 물성모델의 상수들을 결정하고 이를 Table 2에 나타내었다.

4. 결론

본 논문에서는 INCONEL 718 합금의 동적 물성 특성을 평가하기 위하여 변형률속도를 달리하여 준정적 인장실험, 중고속 인장실험 및 고속 압축실험을 수행하여 변형률속도 변화에 따른 INCONEL 718 합금의 응력-변형률 선도를 확보하고 변형률 속도 민감도 및 과단연신율의 변화를 조사하였다. 그리고 실험 결과에 근거하여 변형률속도에 따른 유동응력의 변화를 Johnson-Cook 모델과 modified Johnson-Cook 모델로 근사하였다. 그 결과 유동응력은 변형률속도의 증가에 따라 지수승으로 증가하는 경향을 보이며 이를 log 선도에서 이차 곡선

으로 근사한 modified Johnson-Cook 모델이 변형률 속도 민감도를 잘 표현하는 것으로 평가되었다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력 연구원(과제관리번호 R-2002-B-256) 주관으로 수행된 과제임. 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 엄철용, 엄종택, 박노광, 2004, 직접시효 처리된 Alloy 718 합금의 미세조직과 기계적 특성, 소성가공학회 추계학술대회 논문집, pp. 222~225.
- [2] 엄종택, 박노광, 이종수, 2004, 고품위 초내열합금 Alloy 718 빌렛 제조기술, 한국소성가공학회지, 제 13 권, 제 8 호, pp. 653~662.
- [3] S. Sarkar, S. N. Atluri, 1996, Effects of multiple blade interaction on the containment of blade fragments during a rotor failure, Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 23, pp. 211~223.
- [4] J. M. Pereira, B. A. Lerch, 2001, Effects of heat treatment on the ballistic impact properties of INCONEL 718 for jet engine fan containment applications, Int. J. Impact Engng. Vol. 25, pp. 715~733.
- [5] M. D. Sciuva, C. Frola, S. Salvano, 2003, Low and high velocity impact on INCONEL 718 casting plates: ballistic limits and numerical correlation, Int. J. Impact Engng. Vol. 28, pp. 849~876.
- [6] A. V. Mitrofanov, V. I. Babitsky, V. V. Silberschmidt, 2004, Finite element analysis of ultrasonically assisted turning of INCONEL 718, J. Mater. Process. Technol. Vol. 153-154, pp. 233~239.
- [7] H. Kolsky, 1963, Stress waves in solids, Dover publications, New York, pp. 41~98.
- [8] G. R. Johnson, W. H. Cook, 1983, A Constitutive Model and Data for Metals subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures, Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistics, The Hague, The Netherlands, pp. 541~547.
- [9] W. J. Kang, S. S. Cho, H. Huh, D. T. Chung, 1999, Modified Johnson-Cook Model for Vehicle Body Crashworthiness Simulation, Int. J. Vehicle Design, Vol. 21, pp. 424~435.