

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.8.737>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

탄도 수정탄 롤제어시스템 충격해석 모델 개발에 관한 연구

고준복*† · 윤찬식* · 김용대** · 김완주** · 조승환*

* ㈜한화 종합연구소, ** 국방과학연구소

A Study on the Development of Impact Analysis Model of Roll Control System for Course Correction Munition

Jun Bok Ko*†, Chan Sik Yun*, Yong Dae Kim**, Wan Joo Kim** and Seung Hwan Cho*

* Hanwha Corporation R&D Center, ** Agency for Defense Development

(Received June 19, 2014 ; Revised April 27, 2015 ; Accepted May 25, 2015)

Key Words: Course Correction Munition(탄도수정탄), Roll Control System(롤제어장치), Explicit Code(외연적 코드), Impact Analysis(충격해석), Johnson-Cook Material(동특성 물질)

초록: 탄도 수정탄은 기존의 포탄에 조종 kit를 장착하여 목표를 정밀 타격할 수 있게 하는 무기 체계이다. 롤제어시스템은 조종 kit의 구성품으로 유도조종부와 탄체부 사이에 위치하며 포발사시 횡방향으로 5,000g 상당의 가속도 하중을 받게 된다. 따라서 내고충격 설계를 하는게 중요하다. 선진국에서는 탄도 수정탄의 개발과정에서 실사격 또는 포발사 회수 시스템을 이용하여 부품의 성능 및 강도를 평가하고 있으나 많은 시간과 비용이 든다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 CAE 해석적 방법으로 설계단계에서 롤제어시스템에 대한 충격 강도 평가를 할 수 있도록 해석 모델을 개발하였다. 충격 현상을 구현하기 위하여 Explicit code를 이용한 Dynamic 해석 기법을 적용하였고, 고변형률 물성 특성을 Johnson-Cook material model을 이용하여 구현하였다. 또한 베어링을 인너, 아우터 레이스, 리테이너, 볼 등으로 상세적으로 구현하여 충격시 베어링의 거동 특성이 분석될 수 있도록 하였다. 개발된 해석 모델은 가스건 충격시험을 통해 그 신뢰성이 있음을 검증하였다.

Abstract: Course correction munition are a weapon system for precision attacks and are assembled by applying a ballistic control system to existing projectiles. The roll control system is a subsystem of the ballistic control system and is placed between the guidance and control units inside of the projectile, which undergoes a 5000g lateral acceleration. Thus, it is very important to design the system to endure this load. Many developed countries evaluate the performance and safety of course correction munitions' parts using live-fire gun launch tests or a soft recovery system. However, these methods are expensive and slow. Thus, in this study, we develop impact analysis model of the roll control system using CAE. We apply the code to simulate impact phenomenon and use Johnson-Cook material model for modeling the high strain rate effect on the materials. We also design bearings in detail to analyze their behavior and verify the reliability of CAE model through gas-gun impact tests of the roll control system.

- 기호설명 -

σ : 응력 (MPa)
 ϵ : 소성 변형률

A : 항복응력(MPa)
B : 변형경화 계수(MPa)
n : 변형경화 지수
C : Strain rate coefficient
 $\dot{\epsilon}$: Strain rate
 ϵ_0 : Reference strain rate

† Corresponding Author, firstko77@hanwha.com

- M : Mass matrix
- I : Internal force
- P : External force
- C : 파장 전달 속도
- L : Characteristic length\
- ξ : Critical damping
- w_{max} : 최대 고유진동수

1. 서 론

현대전에서는 원하는 목표를 정밀 타격할 수 있는 무기체계의 개발이 요구되어 진다. 다양한 미사일 시스템이 이러한 목적 달성을 위해 개발, 운영되고 있으나 가격이 비싸다는 단점이 있어 전장에서 유연하게 활용하기에는 무리가 있다. 따라서 기존의 포병 시스템을 활용하면서도 정밀도가 높고 효율적인 포탄 개발이 요구되고 있다.⁽⁶⁾

이에 여러 선진국에서는 기존의 포탄은 그대로 두고 추가적인 조종 kit를 부착하는 형태인 탄도수정탄(Course Correction Munition)에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 탄도수정탄은 조종 kit가 탄체와 회전분리되어 움직이는 형태로 탄체의 회전을 감소시키지 않고 유도하는 방법이다.⁽⁶⁾ 조종 kit는 포발사 환경에서 축방향으로 20,000g, 횡방향으로 5,000g 이상의 극심한 가속도 하중을 받게 되므로 내고충격 설계를 하는 것이 무엇보다도 중요하다. 미국 육군연구소(ARDEC)에서는 실사격 또는 포발사 회수시스템(Soft Recovery System)을 이용하여 탄도수정탄등의 개발과정에서 부품의 성능 및 강도를 평가하고 있으나 많은 시간과 비용이 든다는 단점이 있다.⁽⁵⁾ 따라서 본 연구에서는 CAE 해석 방법을 이용하여 설계단계에서 조종 kit의 롤제어시스템에 대한 충격강도 평가를 할 수 있도록 해석모델을 개발하였고 시험결과와 비교 분석을 통해 그 신뢰성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 포발사 하중 분석

Fig. 1은 미국육군연구소(ARDEC)에서 발표한 포발사 환경에서 탄이 받게되는 하중분포도로 Setback, Balloting, Set-forward구간으로 분석할 수 있다.⁽¹⁾ Setback 하중은 추진하중에 의해 발생하는 축방향 하중으로 약 20,000g의 가속도가 8~10msec 동안 발생한다. Balloting 하중은 강 내에서 탄의

회전방향 운동에 의해 발생하는 힘으로 5,000g 수준이다. Set-forward 하중은 포강을 이동하던 탄두가 포구를 빠져나올 때 탄저에 작용하던 압력이 갑자기 대기압으로 강하하면서 발생하는 충격 하중으로 그 크기는 일반적으로 Setback 하중의 20%정도로 탄에 인장파를 유발한다.⁽⁵⁾ 조종 kit 설계를 위해서는 상기의 Setback, Balloting, Set-forward 하중을 모두 고려하여 내고충격 설계가 되어야 한다. 본 연구에서는 롤제어시스템의 베어링부에 지배적인 영향을 미치는 횡방향 5,000g 하중 조건을 기준으로 검토하였다.

2.2 충격해석

2.2.1 해석 모델

본 연구에서는 조종 kit 구성품중 롤제어시스템을 대상으로 충격해석 모델을 검토하였다. 롤제어시스템은 베이스링에서 탄체부(Projectile)와 체

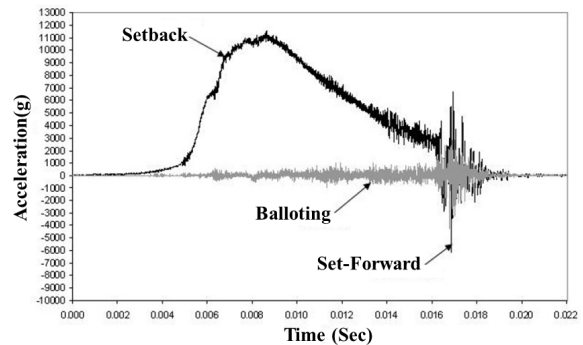


Fig. 1 Typical Live-Fire Gun Launch Environment⁽¹⁾

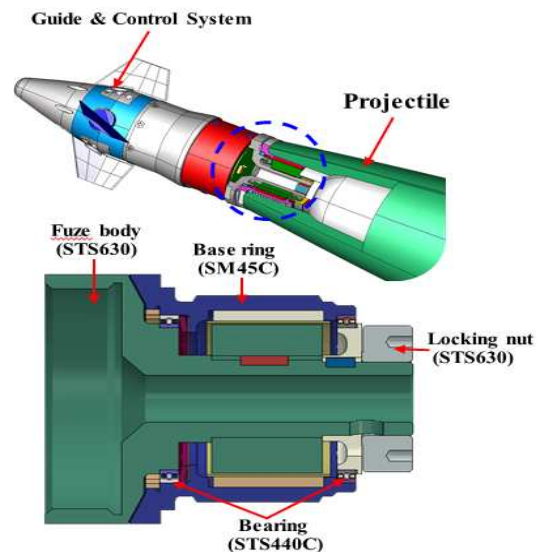


Fig. 2 Roll Control System

Table 1 Johnson-Cook Material model

Material	A(MPa)	B(MPa)	C	n	m
STS630	1,150	739	0.014	0.26	1.03
SM45C	557.2	777.3	0.0661	0.488	1.04

Table 2 Material property of STS440C

Material	True Stress(MPa)		Plastic Strain ($\epsilon_{plastic}$)
	Yield	Tensile	
STS440C	1,900	2,265	0.01

$$\ast \epsilon_{plastic} = \epsilon_{true} - \frac{\sigma_{true}}{E}$$

결이 이루어지고 퓨즈바디를 통해 유도조정부와 조립이 이루어진다. 시스템 전/후방에 각각 1개의 베어링이 배치되어 있다. 따라서 전/후방에 배치되는 베어링에 고충격으로 인한 찍힘/이탈등의 현상이 발생하지 않고 회전이 가능하도록 충격 흡수 방안이 강구되어야 한다.

2.2.2 재료 물성치

물제어시스템 각 구성품의 재료 물성치는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 STS630, SM45C, STS440C 등으로 이루어져 있다. 물제어 시스템은 짧은 시간동안 큰 충격하중을 받기 때문에 수치 해석시 이러한 구조 부재의 동적 변형 효과를 고려할 필요성이 있다. 구조 부재의 동적 변형 거동을 고려하기 위해서는 재료의 변형률 속도를 고려한 동적 물성치의 확보가 필수적이다. 이러한 부재의 동적 특성을 모사하기 위해 가장 많이 사용되고 있는 방법으로는 Johnson-Cook material model 이 있으며 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma = [A + B\epsilon^n][1 + C\ln(\frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_0})][1 - (\frac{T - T_0}{T_f - T_0})^m] \quad (1)$$

Table 1은 해석에서 STS630과 SM45C 재료에 적용한 Johnson-Cook Material model parameter 이며 관련 논문에서 발췌하였다.^(2,3)

동적 물성치가 미 확보된 STS440C 소재에 대한 물성치로는 준정적인 인장시험을 통해 측정된 물성치를 적용하였다. Table 2는 해석에 적용한 bilinear 탄소성 물성치를 나타낸다.

2.2.3 경계조건

약 1msec의 짧은 시간동안 물제어시스템에 발생하는 고충격 현상을 구현하기 위하여 본 연구에서는 구조해석 상용 S/W인 Abaqus 6.12 Explicit code를 이용하여 Dynamic 해석을 수행하였다. 해석에 사용한 유한요소 모델은 4-node linear tetra C3D4 element 1,468,912개, 8-node linear hexa C3D8 element 133,542로 구성하였으며 전체 node수는 434,605개 이다. 동적 특성 해석을 위한 Explicit code에서 사용되는 운동 방정식은 다음과 같이 표현된다.⁽⁴⁾

$$M\ddot{u} + I - P = 0 \quad (2)$$

이 방정식을 시간에 대해 적분하면 속도와 변위를 계산할 수 있게 된다. 즉, 중앙 차분법을 이용하여 상기의 운동 방정식을 적분하면 속도와 변위는 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{u}^{(i+1/2)} = \dot{u}^{(i-1/2)} + \frac{\Delta t^{(i+1)} + \Delta t^{(i)}}{2} \ddot{u}^{(i)} \quad (3)$$

$$u^{(i+1)} = u^{(i)} + \Delta t^{(i+1)} \dot{u}^{(i+1/2)} \quad (4)$$

Explicit code 해석에서는 시간증분(t)이 다음과 같이 정의되는 시간증분보다 작아야 안정적인 해를 구할 수 있다.

$$\Delta t \leq \frac{2}{w_{max}} (\sqrt{1 + \xi^2} - \xi) \quad (5)$$

여기서 w_{max} 는 최대 고유 진동수를, ξ 는 임계감쇠비를 나타낸다. 안정적인 해를 얻기위한 최소 시간 증분은 다음과 같이 파장 전달속도 C와 요소의 특성 길이 L의 성분으로 표현될 수 있다.

$$\Delta t = \min(\frac{L}{C}), C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (6)$$

따라서 Explicit code 해석에서 solving time을 단축시키기 위해서는, 재료의 강성을 감소시키고 재료의 밀도를 증가 시키거나 또는 요소의 특성 길이를 증가시키도록 모델을 구성해야 한다.⁽⁴⁾ 본 연구에서는 시간증분은 Abaqus S/W에서 제공하는 Automatic 기능을 이용하였고, 재료의 밀도를 변경시키는 Mass scaling 기법은 적용하지 않았다.

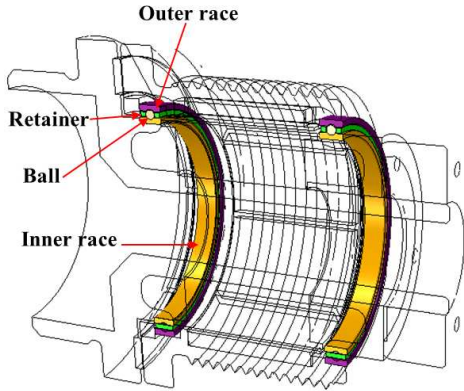


Fig. 3 Bearing analysis model

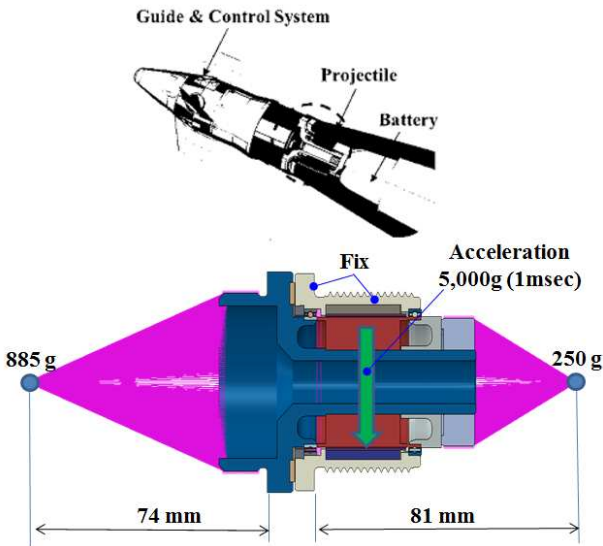


Fig. 4 Boundary condition

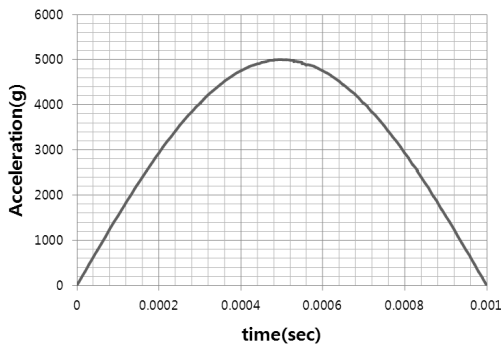
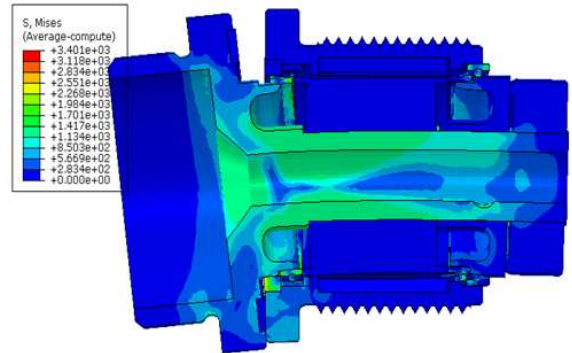
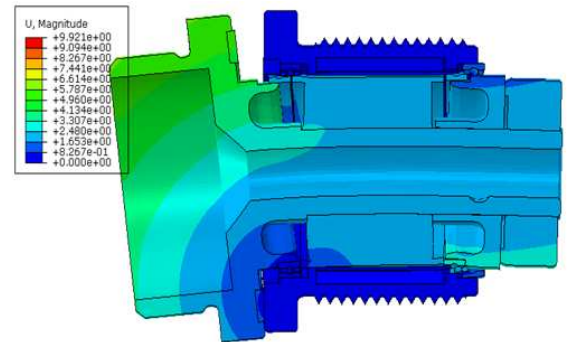


Fig. 5 Acceleration Profile

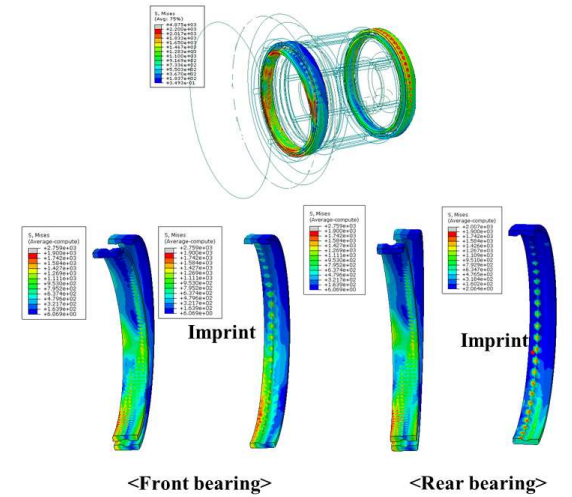
Fig. 4는 본 연구에서 적용한 경계조건을 나타낸다. 물제어장치는 조종 kit의 일부분 시스템으로 베이스링 나사산부에서 탄 몸체와 체결이 이루어지고 퓨즈 바디부에서 유도조종부와 체결이 이루어진다. 본 연구에서는 해석 모델의 간략화를 위하여 유도조종부와 후방의 배터리 부는 상세 모델링을 하지 않고 집중 질량으로 부가하여



(a) Stress contours



(b) Deformation contours



(c) Stress contours of bearing

Fig. 6 Analysis results

고충격 해석시 관성모멘트의 하중으로 작용하도록 하였다. 전/후방에 배치되어 있는 베어링은 Fig. 3과 같이 인너, 아우터 레이스 및 리테이너, 볼 등을 상세 모델링 하여 고충격 해석시 베어링의 변형 특성이 분석될 수 있도록 하였다. 물제어시스템 각 구성품간의 관계는 조립 조건을 고려하여 두 파트가 하나의 몸체처럼 움직이는 Tie

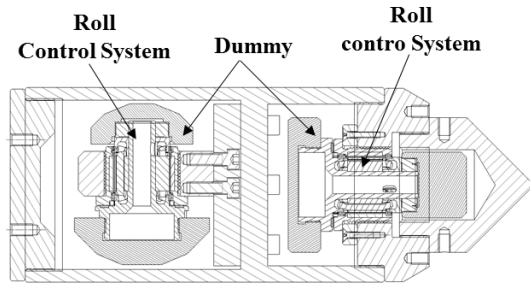


Fig. 7 Impact test scheme

또는 Interface gap을 고려한 General contact 조건으로 구현하였다. Abaqus S/W에서 General contact은 다물체간 접촉 조건을 효율적으로 구현할 수 있는 기법이다.

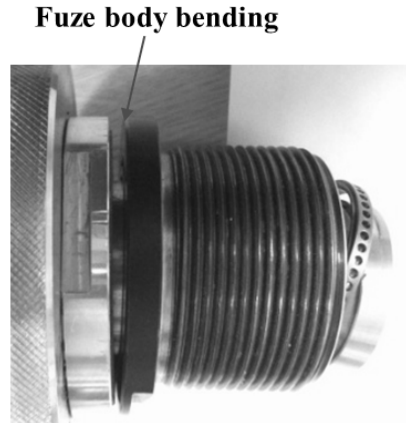
적용 하중으로는 앞서 검토된 포발사 환경에서의 하중조건중 Balloting 횡방향 하중 5,000g 조건을 고려하였다. 해석에서는 횡방향 하중 5,000g을 포발사 환경과 유사하게 1msec 시간동안 sin파의 형태로 부가하였다. 본 연구에서는 시험과형과 직관적으로 유사한 sin 파의 형태로 부가하였지만 향후 충격에너지 분석등을 통해 포발사 환경과 유사한 Damage를 갖는 등가 파형에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

2.2.4 해석결과

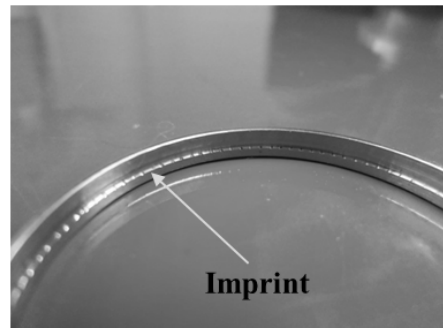
롤 제어시스템은 1msec 시간동안 횡방향으로 가속도 5,000g 충격 하중을 받을 경우 Fig. 6의 (a),(b)에서 보는 바와 같이 전방 유도조정부와 후방 배터리부의 회전관성 모멘트에 의해 퓨즈바디에 휨 현상이 발생하는 것으로 예측되었다. 이로 인해 (c)에서 보는 바와 같이 전/후방 베어링 레이스에 찍힘 현상이 발생하는 것으로 분석된다. 특이할만한 점은 전방측 베어링의 찍힘량이 후방 베어링 보다 약하게 나타났는데 이는 전방측 베어링 후방에 배치된 디스크 스프링이 충격 하중을 완충해주었기 때문인 것으로 분석된다. 베어링의 찍힘 발생 여부는 소재의 항복강도값을 기준으로 판단하였다.

2.3 충격시험

물제어시스템의 충격거동 분석 및 강도 평가를 위하여 가스건 충격 시험을 실시하였다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 시험치구에 물제어장치를 장착하고 고압 가스의 압력을 이용하여 충격시험을 실시하였다.



(a) Fuze body



(b) Bearing race

Fig. 8 Impact test results

충격시험 결과 해석에서 예측한 대로 퓨즈바디의 휨 현상이 발생하였고 전/후방 베어링 레이스에 찍힘 현상이 나타났다. Fig. 8은 시험후의 퓨즈바디와 베어링 레이스의 모습을 나타낸다.

3. 결 론

본 연구에서는 탄도수정탄 물제어시스템의 CAE 충격 해석모델 개발을 위해 Explicit Code를 이용한 Dynamic 해석을 수행하였으며 그 신뢰성을 시험 결과와 비교/분석을 통해 검증하였다. 본 연구를 통해 정립된 사항은 다음과 같다.

- (1) Explicit Code를 이용한 고충격 Dynamic 해석 절차를 정립할 수 있었다.
- (2) Johnson-Cook material model을 이용하여 동적 물성 특성 효과를 반영하였다.
- (3) 충격해석 모델의 신뢰성 검증을 위하여 가스건 충격 시험을 실시하였다.
- (4) 충격해석/시험 결과는 유사한 변형 경향성을 나타내고 있어 베어링 내/외륜 STS440C 소재의 rate dependent 물성치 미반영으로 인한 영향은

제한적인 것으로 보이며, 전체적인 해석 모델은 신뢰성이 있는 것으로 판단된다.

참고문헌
(References)

- (1) Myers, T., Geissler, D., Ellis, B., Cordes, J.A. and Vega, J., 2007, "Statistical Comparison Between Component Level and System Level Testing for the Excalibur Projectile," 23rd International Symposium on Ballistics Tarragona, Spain 16~20.
- (2) Yang, H. and Min, O., 2007, "Dynamic Behavior of SM45C at High Strain-rate and High Temperature," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 31, No. 11, pp. 1093~1099.
- (3) Sadeghinia, H., Razfar, M.R. and Takabi, J., 2007, "2D Finite Element Modeling Of Face Milling With Damage Effects," 3rd WSEAS International Conference on Applied and Theoretical Mechanics, Spain, December 14-16.
- (4) Kim, K.-W., Jeong, H.-S. and Beom, H.-G., 2003, "Transient Dynamic Analysis of a Patterned Tire Rolling over a Cleat with an Explicit Finite Element Program," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng.*, Vol. 11, No. 6, pp. 164~170.
- (5) Park, K.J., 2010, "The Utilization of CAE for developing the Projectile," *Journal of the KSME*, Vol. 50, No.4, pp. 33~35.
- (6) Kim, B.S., 2010, "Precision Guided Munition Development and Technology," *Journal of the KSME*, Vol. 50, No.4 pp. 36~41.
- (7) Abaqus User's Manual