

# 익스플리시트 유한요소법을 이용한 텅스텐합금의 동적특성에 관한 연구

황두순\* · 노병래\*\* · 홍대훈\*\*\* · 홍성인\*\*\*\*

## A Study on the Dynamic Characteristics of Tungsten Alloy using Explicit FEM

D. S. Hwang, B. L. Rho, D. H. Hong and S. I. Hong

### Abstract

Tungsten heavy metal is characterized by a high density and novel combination of strength and ductility. Among them, 90W-7Ni-3Fe is used for applications, where the high specific weight of the material plays an important role. They are used as counterweights, rotating inertia members, as well as for defense purposes(kinetic energy penetrators, etc.). Because of these applications, it is essential to determine the dynamic characteristics of tungsten alloy. In this paper, Explicit FEM(finite element method) is employed to investigate the dynamic characteristics of tungsten heavy metal under base of stress wave propagation theory for SHPB, and the model of specimen is divided into two parts to understand the phenomenon that stress wave penetrates through each tungsten base and matrix. This simulation results were compared to experimental one and through this program, the dynamic stress-strain curve of tungsten heavy metal can be obtained using quasi static stress-strain curve of pure tungsten and matrix.

**Key Words** : Tungsten heavy metal, Explicit FEM, SHPB, Dynamic characteristics,  
Stress wave propagation theory

### 1. 서론

텅스텐 중합금(tungsten heavy alloy, WHA)은 일반적으로 철-니켈 및 다른 재료로 구성된 기지금속(matrix) 내에 텅스텐 입자가 무게 기준으로 약 90%이상을 차지

하고 있다. 이들중 기계적 성질이 우수하고 가공성이 양호한 W-Ni-Fe중합금은 구형의 순수텅스텐 입자와 일부 텅스텐이 바인더에 용해되어 기지상(matrix)으로 이루어진 복합조직으로 구성되어 있다. 텅스텐중합금은 높은 밀도와 고충격에너지를 가지고 있을 뿐만 아니라 기계가

---

\* 한국타이어 중앙연구소  
\*\* 국방과학연구소  
\*\*\* 충남대학교 기계공학과 대학원  
\*\*\*\* 충남대학교 기계공학과

공성과 2차 성형성이 양호하기 때문에 회전자용 로터, 항공기의 평형추, 진동 감쇄장치 및 장갑판재 파괴용 운동에너지탄의 관통자로 널리 응용되고 있다. 이러한 텅스텐 중합금의 적용성으로 인하여 이 재료의 정적특성뿐 아니라 재료내의 응력과 전파 및 물리적 특성으로 인한 동적특성이 더욱 중요성을 가지게 된다.

재료의 동적 변형거동은 변형률속도에 중요한 영향을 받는 것으로 알려져 있기 때문에, 동적 또는 충격하중을 받는 구조물을 해석하거나 설계하려면 변형률속도에 따른 그 재료의 여러가지 기계적 특성을 결정하는 것이 선행되어야 한다. 재료의 동적 물성 측정을 위한 여러가지 실험 방법 중에서 흡킨슨 압축봉 실험은 시료의 균일변형을 유지하면서 높은 변형률 속도를 얻을 수 있고 로드 셀(Load cell)을 이용하지 않고도 스트레인 게이지로부터 직접 동적 응력-변형을 곡선을 얻을 수 있으며 변형거동이 시간이력에 대한 정보도 얻는 장점이 있기 때문에 재료의 동적 물성연구에 가장 널리 이용되고 있다.

본 논문에서는 텅스텐 중합금의 동적 변형거동을 파악하기 위하여 응력과 전파이론에 근거한 익스플리시트 유한요소법을 사용하였으며 재료적 측면에서 응력파가 순수텅스텐입자와 기지상을 통과하는 현상을 규명하도록 프로그램을 구현하였다. 이 프로그램은 순수텅스텐과 기지상의 정적 응력-변형을 관계식만 있으면 어떤 변형률 속도에 대해서도 응력-변형을 관계를 얻을 수 있도록 구성되었으며, 프로그램 수행 결과를 실제 실험한 결과와 비교하여 그 타당성을 확인하였다.

## 2. 흡킨슨 압축봉 장치와 충격이론

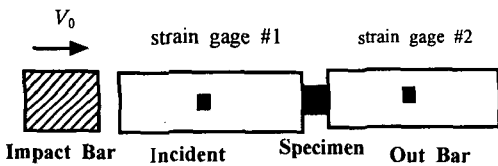


Fig. 1 Schematic drawing of SHPB

이 장치는 Fig.1에 도식된 것처럼 충격봉(Impact Bar), 입력봉(Incident Bar), 출력봉(Output Bar) 등으로 구성되어 있으며 입력봉과 출력봉 사이에 시편을 부착한 후 충격봉으로 입력봉에 정하여진 속도로 충돌시켜 이때 발생한 압력파가 입력봉내에 전달되고 시편에 도달된다. 초기 압력파 중 일부는 다시 반사되어 반대방향으로 진행하고 나머지는 시편을 변형시키며 출력봉 내부로 전파

되어 진행한다.

이 봉들은 탄성한계 내에 있지만 두 봉 사이에 위치한 시편은 임피던스 차에 의하여 소성변형을 하게 된다. 입력봉과 출력봉 중간에 위치한(S1, S2) 스트레인게이지에 의하여 반사파와 투과파를 측정하고 이 데이터로부터 시편의 응력-변형을 곡선을 구하게 된다.

충격봉이 입력봉의 A에 주어진 속도로 충격을 가하면 입력봉 내에 변형률  $\epsilon_I(t)$ 를 갖는 압축파가 발생한다. 이 압축파가 입력봉의 다른 끝인 B에 도달하면 임피던스 차에 의하여 압축파의 일부는  $\epsilon_R(t)$ 를 갖는 인장파로 반사되고, 압축파의 다른 일부부분은 시편을 소성변형 시키고 출력봉으로  $\epsilon_T(t)$ 를 갖는 압축파로 전파된다.

시편이 균일하게 변형될 때 시편내의 변형률 속도( $\dot{\epsilon}$ )는 반사파  $\epsilon_R(t)$ 에 비례하고 또한 시편 내부의 응력크기( $\sigma$ )는 투과파  $\epsilon_T(t)$ 에 비례한다. 이러한 결과는 다음에서 주어지는 설명에 의하여 이해될 수 있다.

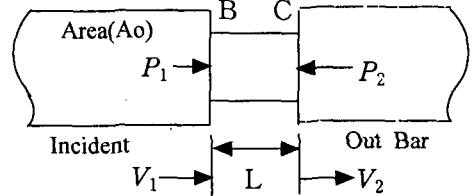


Fig. 2 Detail of specimen part

즉, 특성선(characteristic line)의 관계식(1)과 접촉경계면의 응력연속조건을 사용하고 시편 내부의 응력상태가 일정하다(또는 변형이 균일하다)고 가정하면 시편 내부의 응력 (2)식과 시편의 변형률속도 (3)식을 얻을 수 있다.

$$C_0 \epsilon \pm V = const.$$

$$\text{along } \frac{dx}{dt} = \mp C_0 \quad (1)$$

여기서,  $C_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$  : 입력봉, 출력봉 내의 음속

$$\sigma(t) = E \frac{A_0}{A} \epsilon_T(t) \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}(t) = -2 \frac{C_0}{L} \epsilon_R(t) \quad (3)$$

또한, 식(3)을 적분하면 (4)식의 시편의 변형률을 얻을 수 있다.

$$\epsilon(t) = \int_0^t \dot{\epsilon}(\tau) d\tau = -2 \frac{C_0}{L} \int_0^t \epsilon_R(\tau) d\tau \quad (4)$$

즉, 시편의 응력-변형을 곡선을 입력봉과 출력봉의  $\epsilon_R(t)$ 와  $\epsilon_T(t)$ 의 값을 구하여 얻을 수 있다.

### 3. 모델링 및 수치해석

#### 3.1 모델링

모델링은 수치해석 결과의 타당성을 확인하기 위해 실제 실험에 사용된 충격봉, 입력봉, 시편 및 출력봉의 규격 및 재료를 사용하였다. 충격봉, 입력봉 및 출력봉은 일반적인 steel을 사용하였으며 시험시 탄성 범위내에 있어야 하므로 탄성계수들만 사용하였다. 또한 시편은 90W-7Ni-3Fe 텅스텐 중합금을 사용하였으며 시편재료의 응력-변형을 관계식은 가장 일반적인 가공경화식인 아래 형태의 식을 사용하였다.

$$\sigma = A + B\epsilon^n \quad (5)$$

순수텅스텐 90%와 기지상이 10%인 텅스텐 중합금에서 응력파가 순수텅스텐과 기지상을 각각 통과하는 현상을 구현하기 위하여 그 비율을 고려하여 10개의 시편요소중 9개의 순수텅스텐요소와 가운데 1개의 기지상요소로 나누어서 모델링하였다.

Table 1 Used material Properties

구분	재질	밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	탄성 계수 (GPa)	응력-변형률관계
충격봉 입력봉 출력봉	Steel	7.8	200	$\sigma = E\epsilon$ (탄성영역이내)
시편	W(순수 텅스텐)	17.1	400	$\sigma = 0.73 + 0.562\epsilon_p^{0.0751}$
	W-Ni-Fe (기지상)	9.2	256.9	$\sigma = 0.15 + 0.546\epsilon_p^{0.208}$

Table 2 Dimensions and FEM data of SHPB

구분	길이 (mm)	직경 (mm)	Node 수	Element 수
충격봉	254	18.75	255	254
입력봉	1500	18.75	1501	1500
출력봉	1500	18.75	1501	1500
시편	5.26	6.57	11	10

시편의 형상은 실린더(cylinder)형을 사용하였으며 유한요소 생성시 각 절점(node)간격은 Table2와 같이 충격

봉, 입력봉, 출력봉은 모두 1mm로 하였으며 시편에서의 절점 간격은 동일한 충격봉의 초기속도를 증가시키지 않고 시편의 길이를 조정하여 시편의 변형을 속도를 증가시키기 위하여 0.562mm로 하였다. 이때 입력봉, 시편, 출력봉은 완전히 접촉되어 있고, 충격봉과 입력봉간의 간격은 0.5mm로 두었다. 텅스텐합금의 입자분포는 Fig. 4(a)와 같으며, 본 연구에서는 순수텅스텐 입자와 그 입자 사이는 기지(matrix)를 고려하여 Fig. 3과 같이 시편을 모델링 하였으며, Fig. 4(b)는 변형후의 입자형상을 나타낸다.

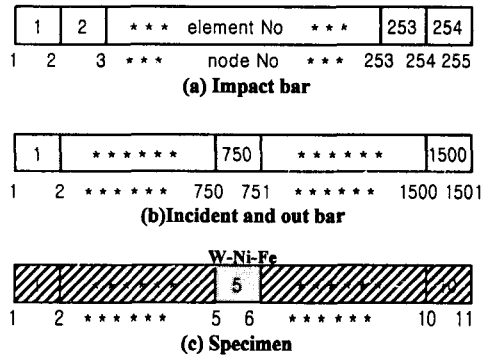


Fig. 3 Nodes and elements numbering of each bar

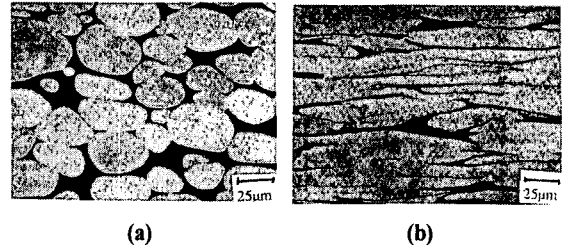


Fig. 4 Microstructure of a W-Ni-Fe alloy ; (a) before deformation (b) after deformation

#### 3.2 수치해석

수치해석시 운동방정식의 시간적분은 수정된 중앙차분(modified central difference) 방식을 사용하였으며, 즉 속도는 전방 차분(forward difference) 방식으로 적분하고 변형은 후방차분(backward difference) 방식으로 적분하였다. 즉, 절점에서의 적분방식은 다음과 같다.

$$a_t = \frac{F}{m} \quad (6)$$

$$V_{t+\Delta t} = V_t + a_t \Delta t \quad (\text{전방차분}) \quad (7)$$

$$u_{t+\Delta t} = u_t + V_{t+\Delta t} \Delta t \quad (\text{후방차분}) \quad (8)$$

여기서  $F$  는 절점력이고  $m$  은 집중질량(lumped

mass)이며  $\Delta t$  는 시간증분이다. 중앙차분 연산자 (central difference operator)는 조건에 따라 안정하고 연산자의 안정조건은 아래식과 같으므로 본 논문에서는  $\alpha = 0.6$ 을 사용하였다.

$$\Delta t = \alpha \frac{L_{\min}}{C_0} \quad (0 < \alpha \leq 1) \quad (9)$$

여기서  $C_0$  는 탄성응력과 속도,  $L_{\min}$  은 요소의 최소길이,  $\alpha$  는 시간증분계수(time step scale factor)이다. 탄소성 구성방정식의 응력증분에 따른 수치적분은 Radial Return Method 를 사용하였다

#### 4. 수치해석 결과 및 고찰

##### 4.1 텅스텐합금의 동적변화

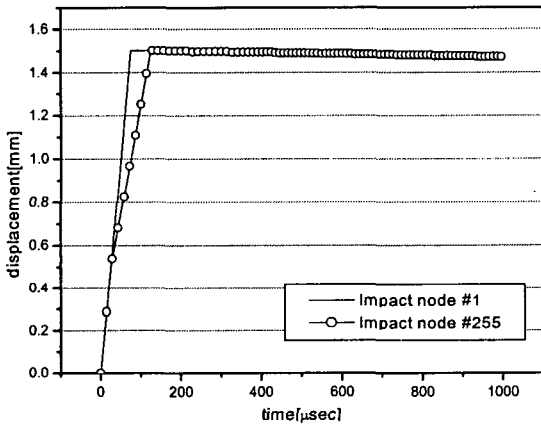


Fig.5 Variation of displacement with time in impact bar

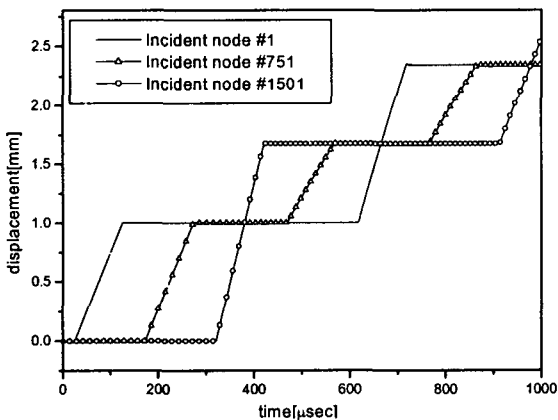


Fig.6 Variation of displacement with time in incident bar

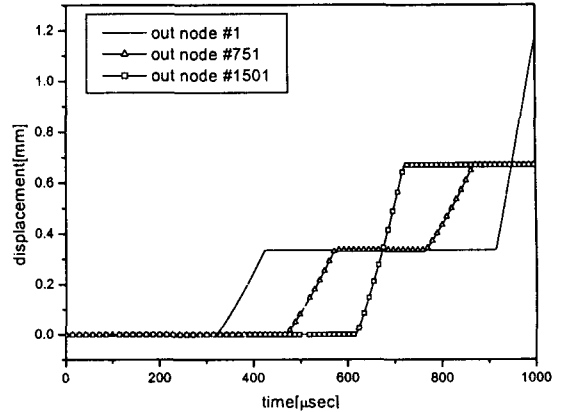


Fig.7 Variation of displacement with time in out bar

Fig.5, Fig.6, Fig.7에서는 충격봉이 20m/sec로 입력봉을 때렸을 때, 입력봉과 출력봉에서의 변위 변화를 조사하기 위해 입력봉 및 출력봉의 양 끝단과 실제 흡킨슨 압축봉 실험시 스트레인 게이지가 부착되는 위치인 각 봉의 중심부 절점의 변위 변화를 나타낸 것이다. Fig.5에서 충격봉의 양 끝단의 절점은 충격봉이 입력봉에 충돌 직후 일정한 변위증가를 보이다가 충격봉의 압축으로 인해 양 끝단의 변위증가가 차이가 나타난다. Fig.6과 Fig.7에서 볼 수 있듯이 응력파의 전파에 따라 입력봉과 출력봉 내에서 순차적인 변위 증가가 일어남을 알 수 있다.

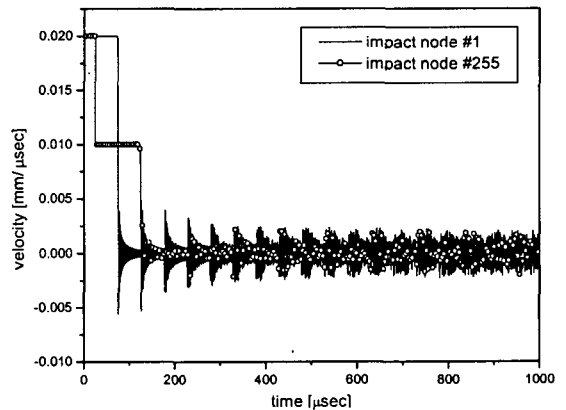


Fig.8 Variation of velocity with time in impact bar

Fig.8에서 충격봉의 속도변화를 살펴보면, 초기속도 20m/sec에서 입력봉과 접촉하는 충격봉의 끝단(impact node #255)이 먼저 속도가 떨어지다가 10m/sec에서 일정한 속도를 유지한다. 끝단의 속도가 유지되는 동안 충격봉 전단의 속도는 0으로 된 후 속도가 0을 기준으로 진동하는 것을 볼 수 있다. 충격봉의 끝단은 전단에 비

해 늦게 진동된다.

입력봉의 속도변화를 살펴보면, 충격봉의 초기속도 20m/sec의 반인 10m/sec로 유지되다가, 시편과의 절점에서 반사파와 투과파로 나뉘면서 반사파의 영역으로 속도는 두 배로 증가됨을 알 수 있다. 그리고, 반사파는 다시 충격봉과의 접촉면에서 충격봉 내 진동하는 응력파의 영향을 받아 감소하는 경향을 보이며 봉내를 왕복한다.[Fig.9] 출력봉은 입력봉의 끝단(incident node #1501)에서 투과파가 전달된 직후 속도 변화가 일어나며, 출력봉의 끝단에서도 마찬가지로 반사파의 영역으로 속도는 두 배로 증가됨이 보여진다.[Fig.10]

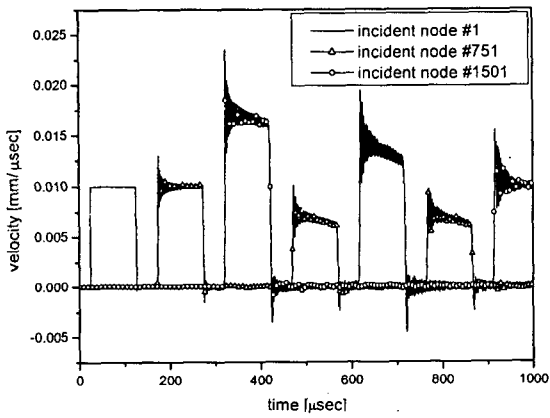


Fig. 9 Variation of velocity with time in incident bar

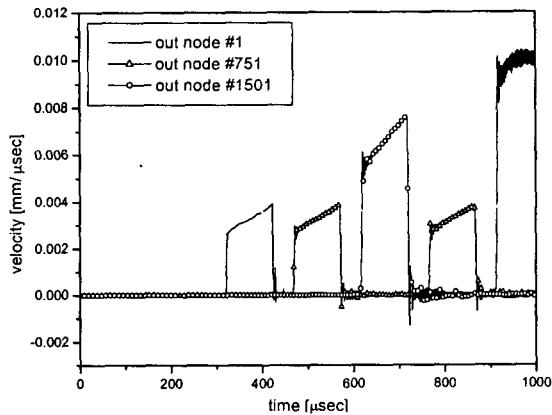


Fig. 10 Variation of velocity with time in out bar

Fig.11에서 충격봉의 응력변화를 살펴보면, 충돌후 0이었던 응력이 충격봉과 입력봉의 전단에서 압축응력이 동시에 발생하여 0.4GPa의 응력을 받는다. 이 응력파가 충격봉의 전단(impact node #1)에 도달하여 다시 인장파로 바뀌어 충격봉의 끝단(impact node #255)으로 되돌아오

면서, 충격봉의 응력이 해제되어 충격봉의 응력이 영점 부근에서 탄성 성질로 인해 계속 진동함을 알 수 있다.

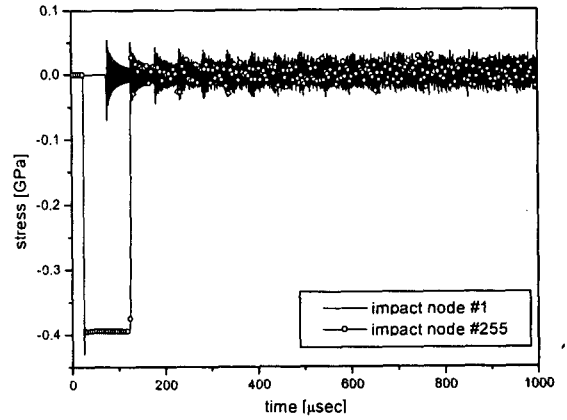


Fig. 11 Variation of stress with time in impact bar

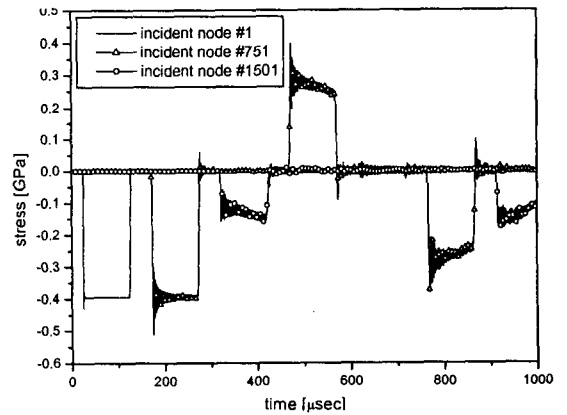


Fig. 12 Variation of stress with time in incident bar

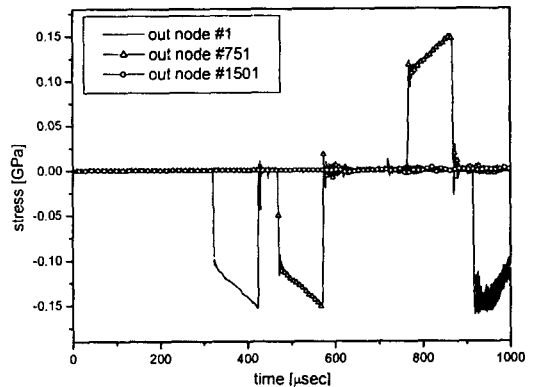


Fig. 13 Variation of stress with time in out bar

Fig.12는 입력봉 내의 응력변화를 나타낸 것으로 재료의 임피던스(impedance)차에 의해 압축파의 응력이 인장

파로 변화하는 과정을 보여준다. 응력파가 입력봉의 끝단에 다다르면 시편으로 전달되는 투과파와 반사파로 나누어지며 입력봉을 지나는 압축파는 감소되는 경향을 보인다. 반면 입력봉내에서 이 압축파가 소멸된후 인장파가 발생함을 볼 수 있다. 출력봉의 응력변화를 살펴보면 시편으로부터 전달된 압축파가 출력봉의 끝단에서 인장파로 바뀔 수 있다.[Fig. 13]

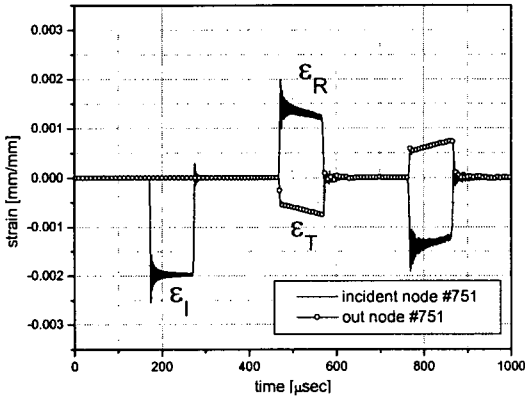


Fig. 14 Wave profiles in strain rate 2410/sec

Fig.14에서는  $\epsilon_I$ ,  $\epsilon_R$ ,  $\epsilon_T$  의 그래프를 나타내었는데, 이것은 흡킨슨바에서 입력봉과 출력봉의 스트레인게이지가 부착된 지점의 변형률을 보여준다. 초기 입력봉에서 압축파의 응력을 받아 음의 값에서 변형을 충분히 나타내고, 응력파가 투과파와 반사파로 나누어져 입력봉에서는 반사파  $\epsilon_R$  가 발생되고, 출력봉에서는 투과파  $\epsilon_T$  가 발생된다.

Fig.15에서는 본 연구에서 사용된 익스플리시트 유한요소법을 이용한 프로그램의 결과로서, 텅스텐의 기지금속(matrix)을 고려한 동적 응력-변형을 관계와 순수 텅스텐을 비교한 것이다. 상대적으로 순수 텅스텐에 비하여 낮은 응력분포를 텅스텐합금이 보여주고 있는데, 이는 기지금속이 순수 텅스텐에 비해 작은 탄성계수와 항복응력을 가지는 정적 물성에 기인한다고 생각될 수 있다. 사용된 텅스텐합금이 변형율이 크지만, 판의 관통에서는 텅스텐 입자를 쪼개면서 지나가는 것보다는 기지금속을 따라 관통하는 것이 관통시간을 지연시킨다는 특성에서는 순수 텅스텐에 비해 유리하다고 생각할 수 있다. Fig.16은 다른 문헌[10]에서 텅스텐합금을 가지고 흡킨슨바 장치를 이용하여 실험한 결과로서 Fig.15의 동적 응력-변형을 관계와 유사한 경향을 보인다.

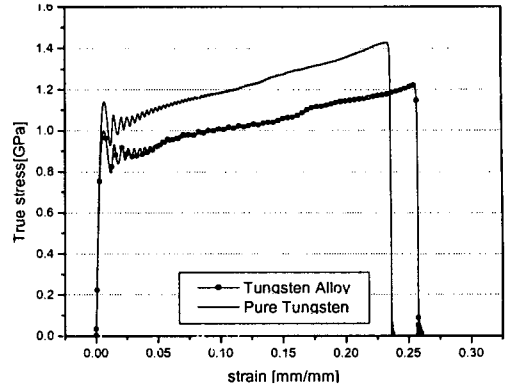


Fig. 15 Comparison of dynamic stress-strain curve with pure tungsten and tungsten alloy

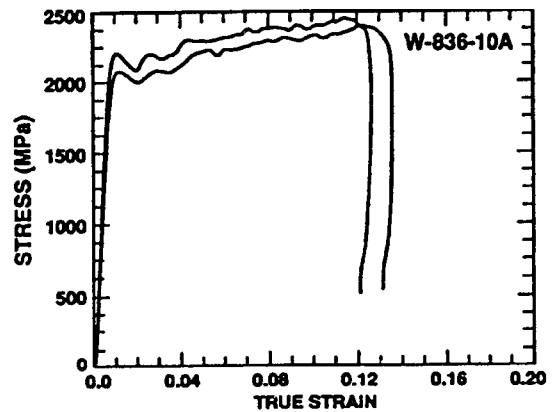


Fig. 16 Experimental dynamic stress-strain curve of tungsten alloy

## 5. 결론

본 연구에서는 텅스텐합금의 동적특성을 알기 위해 흡킨슨 압축장치를 익스플리시트 유한요소법을 이용하여 수치적으로 모델링하여 적용함으로써 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 텅스텐합금은 동적변형이 일어나는 과정에서 짧은 탄성변형과 완만한 응력증가를 보이며 소성변형을 한다.
- (2) 순수텅스텐에 비해 텅스텐합금은 변형이 심하고, 동적 응력-변형을 곡선에서 살펴볼 수 있듯이 완만한 경향을 나타내며 이는 관통문제에 있어서는 보다 유리한 장점을 가진다고 할 수 있다.
- (3) 본 연구에서 개발된 응력파 전파이론을 기반으로 한 프로그램은 실험치와 비교하여 같은 경향을 나타내며, 기지금속을 고려하여 텅스텐합금을 보다 잘 표현하였다고 생각할 수 있다.

향후 본 연구에서 사용된 텅스텐합금을 흡킨슨바 실험장

치를 이용하여 수치적 결과를 확인하고 비교하는 것이 필요하며, 동적 변형시 수반될 수 있는 열적 변화를 추가적으로 고려한 프로그램 개발이 필요하다고 생각된다.

### 참 고 문 헌

- (1) Erik Lasser and Wolf-Dieter Schubert, 1998, "Tungsten Properties, Chemistry, Technology of the Element, Alloys, and Chemical Compounds", Kluwer Academic / Plenum Publishers.
- (2) 황두순, 남경오, 이승우, 홍성인, 1999, "익스플리시트 유한요소법을 이용한 분말금속의 동적 특성에 관한 연구", 대한기계학회 충청지부 추계학술대회 논문집, pp. 102~107.
- (3) Marc A. Meyers, 1994, "Dynamic Behavior of Materials", John Wiley & Sons, Inc.
- (4) 이승우, 홍성인, 1998, "홉킨슨 압축봉에서의 동적 재료특성에 관한 수치해석적 연구", 대한기계학회논문집 A권, 제24권, 제6호, 논문집, pp. 129~132.
- (5) Follansbee, P.S. and Frantz, 1983, "Wave Propagation in the Split Hopkinson Pressure Bar", ASME J. eng. material. technology, Vol. 105, pp. 61~66.
- (6) 황인평, 1995, "홉킨슨 바 장치를 이용한 고순도 전기동의 거동에 관한 연구", 충남대학교 석사학위 논문.
- (7) Valle, G.E. and Shukla, A., 1996, "A Study of the Dynamic Behavior of Elastomeric Materials Using Finite Elements", ASME J. Eng. Mat. Tech., Vol.118, Oct., pp. 503~508.
- (8) 조상순, 강우종, 허훈, 정동택, 1997, "새로운 Tension Split Hopkinson Bar를 이용한 박판의 고속인장시험", 대한기계학회논문집A, Vol.21, No.12(ISSN 1226-4873), pp. 2209~2219.
- (9) 이승우, 2000, "고속충격하에서의 재료의 동적특성 및 단열전단 밴드 형성 연구", 충남대학교 박사학위 논문.
- (10) Anna K. Zurek, Paul S. Follansbee, and Deepak Kapoor, 1999, " Strain rage and temperature effects in Tungsten and tungsten alloys", Proceedings of a symposium sponsored by the Refractory Metals Committee and the Structural Materials Division, held during TMS Fall meeting.