

홉킨슨 압축봉에서의 동적 재료특성에 관한 수치해석적 연구

이 승 우* · 홍 성 인**
(1999년 3월 26일 접수)

A Program Development for Dynamic Characteristics of Material in SHPB with Explicit Finite Element Method

Seung Woo Lee and Sung In Hong

Key Words: SHPB(홉킨슨 압축봉), Explicit Finite Element Method(외연적 유한요소법), Elastic-Plastic(탄-소성), Dynamic Characteristic(동적 특성), Stress Wave(응력파)

Abstract

To determine dynamic characteristics of materials, a program was developed under base of stress wave propagation theory for SHPB with explicit finite element method. Through the program, all kinds of quasi-static stress-strain curves can be directly converted to dynamic stress-strain curves at any strain rate. This simulation results were compared with experimental results in the references and they are in a good agreement with each other.

1. 서 론

재료의 동적특성은 고체내의 응력과 전파 및 물리적 특성으로 인하여 정적특성과는 크게 다른 양상을 나타내며, 또한 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 선결되어야 한다. 재료의 동적 물성 측정을 위한 여러가지 실험 방법 중에서 홉킨슨 압축봉(SHPB)실험은 시료의 균일변형을 유지하면서 높은 변형률 속도를 얻을 수 있고 로드셀(Load cell)을 이용하지 않고도 스트레인 게이지로부터 직접 동적 응력-변형률 곡선을 얻을 수 있으며 변형거동이 시간이력에 대한 정보도 얻는 장점이 있기 때문에 재료의 동적 물성연구에 가장 널리 이용

되고 있다. 실험장치 개발에서는 압축하중뿐만 아니라 인장하중과 비틀림 하중 및 반복인장하중에 대한 실험기법이 개발되어 다양한 하중조건에서의 재료의 동적 거동을 연구할 수 있게 되었고, 비틀림 하중 실험장치의 경우 단열전단밴드 연구에 활발히 사용되고 있다. 최근에는 이들 장치에 크랙(crack)을 갖는 시편을 사용하여 동적 응력확대계수(dynamic stress intensity factor) 측정 등의 파괴역학(fracture mechanics)에도 이용되고 있다. Albertini⁽³⁾과 Lindholm⁽⁴⁾은 홉킨슨 압축봉 장치의 실험 기법과 재료의 동적 거동에 대하여, Follansbee 및 Frantz⁽⁵⁾는 홉킨슨 바에서의 탄성과 전파이론 및 파 분산으로 인한 오차를 연구하였다.

국내에서도 최근에는 정동택 등 여러 연구자들^(6-8,11-12)에 의해 SHPB장치에 대한 개발 및 여러 재료에 대한 실험 결과들이 활발히 발표되고 있으며, SHPB장치를 이용한 동적파괴인성의 측정 및 평가,⁽⁹⁾ 동적응력프린치 측정연구⁽¹⁰⁾ 등으로 그 응용범위를 점차 확대하고 있다. 전산해석분야에서는 이억섭⁽⁷⁾ 등 및 조상순⁽⁸⁾ 등이 상용코드인 DYNA3D 및 ABAQUS/Explicit를 이용하여 그들이 개발한 SHPB장치의 실험 결과와 비교하였다.

* 회원, 국방과학연구소

E-mail : leesw4321@popsmail.com

TEL : (017)674-3865 FAX : (042)821-2224

** 회원, 충남대학교 기계공학과

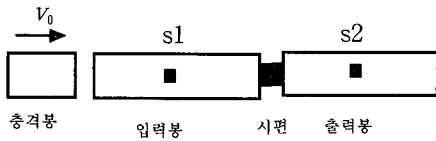


Fig. 1 Schematic drawing of SHPB

SHPB장치는 1차원 응력과 전파이론에 근거하였으므로 SHPB장치의 개발시 각 봉 내부의 응력과 거동을 1차원으로 유사시키기 위하여 길이 대 직경(L/D)비가 최소 20이상 이 되도록 하고 있으나 실제 실험시에는 3차원 효과가 어느정도 발생할 수 밖에 없다. 위에 언급한 상용코드들은 반경방향의 관성효과등 실제 실험 결과와 비교하는 데는 유리한 반면에 재료의 구성식(material constitutive law)을 개발하는 데 요구되는 1차원 응력과 전파이론에 근거한 SHPB장치에 대하여 충분히 표현할 수 없는 단점이 있으며, 아직 까지 SHPB장치에서의 동적 재료 특성을 얻기 위한 전용 프로그램이 개발된 예는 전무한 실정이다.

이에 본 논문에서는 흡킨슨 압축봉 장치를 이용하여 재료의 동적 특성을 얻기 위한 전용 엑스플리시트 유한요소 프로그램을 개발하였으며, 이 프로그램은 준 정적실험을 통한 응력-변형률 관계식만 있으면 어떤 변형률속도에 대해서도 응력-변형률 관계를 얻을 수 있도록 구성되었으며, 프로그램 수행 결과를 참고문헌 (2)의 실제 실험한 결과와 비교하여 그 타당성을 입증하였다.

2. 흡킨슨 압축봉(SHPB) 장치와 기본이론

이 장치(Fig. 1 참조)는 충격봉, 입력봉, 출력봉 등으로 구성되어 있으며 입력봉과 출력봉 사이에 시편을 부착한 후 충격봉으로 입력봉에 정하여진 속도로 충돌시켜 이때 발생한 압력파가 입력봉내에 전달되고 시편에 도달된다. 초기 압력파중 일부는 다시 반사되어 반대방향으로 진행하고 나머지는 시편을 변형시키며 출력봉 내부로 전파되어 진행한다. 이 봉들은 탄성한계 내에 있지만 두 봉 사이에 위치한 시편은 임피던스 차에 의하여 소성변형을 하게 된다. 입력봉과 출력봉 중간에 위치한(S1, S2) 스트레인지지에 의하여 반사파와 투과파를 측정하고 이 데이터로부터 시편의

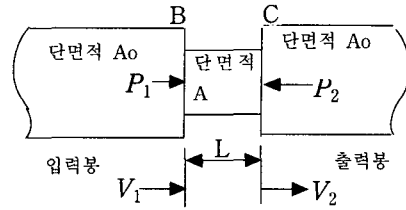


Fig. 2 Detail of specimen part

응력-변형률 곡선을 구하게 된다.

충격봉이 입력봉을 주어진 속도로 충격을 가하면 입력봉내에 변형률 $\epsilon_I(t)$ 를 갖는 압축파가 발생한다. 이 압축파가 입력봉의 다른 끝인 B에 도달하면(Fig. 2참조) 임피던스 차이에 의하여 압축파의 일부는 $\epsilon_R(t)$ 를 갖는 인장파로 반사되고, 압축파의 다른 일부분은 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(σ)는 투과파 $\epsilon_T(t)$ 에 비례한다. 이러한 결과는 다음에서 주어지는 설명에 의하여 이해될 수 있다.

즉, 특성선(characteristic line)의 관계식 (1) 과 접촉 경계면의 응력연속조건을 사용하고 시편 내부의 응력 상태가 일정하다(또는 변형이 균일하다)고 가정하면 시편 내부의 응력 식 (12)와 시편의 변형률속도 식 (13)을 얻을 수 있다.

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

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

여기서 $C_0 = \sqrt{\frac{E_0}{\rho}}$: 입력봉, 출력봉 내의 탄성 응력과 속도이다.

Fig. 2에서 시편의 변형률 속도는 경계면 1과 2에서의 속도 V_1 와 V_2 및 길이 L에 의해 다음 식과 같이 표현된다.

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{V_1(t) - V_2(t)}{L} \quad (2)$$

여기서, 특성선 관계식으로부터

$$V_1 = C_0(\epsilon_I - \epsilon_R) \quad (3)$$

$$V_2 = C_0 \epsilon_T \quad (4)$$

이므로 식 (3), (4)를 식 (2)에 대입하면

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{C_0(\epsilon_I - \epsilon_R) - C_0 \epsilon_T}{L} \quad (5)$$

따라서

$$\dot{\epsilon} = \frac{C_0(\epsilon_I - \epsilon_R - \epsilon_T)}{L} \quad (6)$$

시편의 평균 응력은 식 (8) 과 같다.

$$\sigma = \frac{P_1(t) + P_2(t)}{2A} \quad (7)$$

여기서 $P_1(t)$ 와 $P_2(t)$ 는 경계면1과 2에서 작용하는 힘이며 이들은 식 (8), (9)과 같다.

$$P_1(t) = A_0 E_0 (\epsilon_I + \epsilon_R) \quad (8)$$

$$P_2(t) = A_0 E_0 \epsilon_T \quad (9)$$

따라서

$$\sigma = \frac{A_0 E_0}{2A} [\epsilon_I(t) + \epsilon_R(t) + \epsilon_T(t)] \quad (10)$$

여기서 A_0 는 입력봉, 출력봉의 단면적이다.

시편 내부의 응력상태가 일정하다는 가정 ($P_1 \approx P_2$) 하에서 식 (8), (9)부터 아래 관계식이 성립한다.

$$\epsilon_I + \epsilon_R \approx \epsilon_T \quad (11)$$

따라서 식 (6), (7)로부터

$$\sigma(t) = E \frac{A_0}{A} \epsilon_T(t) \quad (12)$$

$$\dot{\epsilon}(t) = -2 \frac{C_0}{L} \epsilon_R(t) \quad (13)$$

또한 식 (13)을 적분하면 식 (14)의 시편의 변형률을 얻을 수 있다

$$\epsilon(t) = \int_0^t \dot{\epsilon}(\tau) d\tau = -2 \frac{C_0}{L} \int_0^t \epsilon_R(\tau) d\tau \quad (14)$$

즉 시편의 응력-변형률 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 참고문헌 (2)의 실제 실험과 같은 충격봉, 입력봉, 시편 및 출력봉의 규격 및 재료(Table 1 참조)를 사용하였다. 충격봉, 입력봉 및 출력봉

은 시험시 탄성 범위내에 있어야 하므로 탄성계수들만 사용하였고, 시편재료의 응력-변형률 관계식은 탄소성 재료를 포함할 수 있는 가장 일반적인 탄-가공경화 소성식이며, 참고문헌 (2)의 실험에 사용된 고순도 전기동의 응력변형률 곡선에 근사하기 위하여 아래 형태의 식을 대표적으로 사용하였다.

$$\sigma = A + B \epsilon_p^n \quad (15)$$

Fig. 6에서는 등방성 재질인 고순도 전기동의 345℃의 질소분위기 속에서 3시간 유지후 노냉시킨 준정적 응력변형률 곡선의 실험값과 이를 근사화하여 나타냈으며 시편의 형상은 실린더(cylinder)형을 사용하였다. 유한요소 생성시 각 절점(node)간격은 Table 2와 같이 충격봉, 입력봉, 출력봉은 모두 1mm로 하였으며 시편에서의 절점간격은 0.33mm로 하였다. 이때 입력봉, 시편, 출력봉간의 완전히 접촉되어 있고, 충격봉과 입력봉간의 간격은 0.5mm로 두었다. 응력-변형률 곡선은 식 (12), (14)와 같이 Fig. 1에서 스트레인 게이지 부착지점인 입력봉 및 출력봉의 중간지점(S1과 S2), 즉 Fig. 3에서의 요소번호750에서 동일한 시간에 얻어진 $\epsilon_R(t)$ 와 $\epsilon_T(t)$ 의 값을 획득하여 응력-변형률 그래프로 나타냈다.

Table 1 Used material properties

구 분	재질	밀도 (g/cm ³)	탄성계수 (GPa)	응력-변형률관계
충격봉 입력봉 출력봉	Steel	7.8	200	$\sigma = E \epsilon$ (탄성영역이내)
시편	구리	8.96	124	$\sigma = 0.039 + 0.66 \epsilon_p^{0.57}$

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	3.3	8.65	11	10

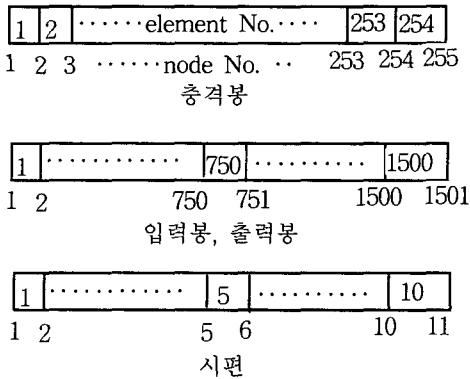


Fig. 3 Nodes and elements numbering of each bar

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.

$$a_t = \frac{F}{m} \tag{16}$$

$$V_{t+\Delta t} = V_t + a_t \Delta t \text{ (전방차분)} \tag{17}$$

$$u_{t+\Delta t} = u_t + V_{t+\Delta t} \Delta t \text{ (후방차분)} \tag{18}$$

여기서 F 는 절점력이고 m 은 집중질량 (lumped mass)이며 Δt 는 시간증분이다. 중앙차분 연산자(central difference operator)는 조건에 따라 안정하고 연산자의 안정조건은 아래식과 같으므로 본 논문에서는 $\alpha=2/3$ 를 사용하였다.

$$\Delta t = \alpha \frac{L_{\min}}{C_0} \quad (0 < \alpha \leq 1) \tag{19}$$

여기서 C_0 는 탄성 응력과 속도, L_{\min} 은 요소의 최소길이, α 는 시간증분계수(time step scale factor)이다. 탄소성 구성방정식의 응력증분에 따른 수치적분은 Radial Return Method 를 사용하였으며, 프로그램의 흐름도는 Fig. 4와 같다.

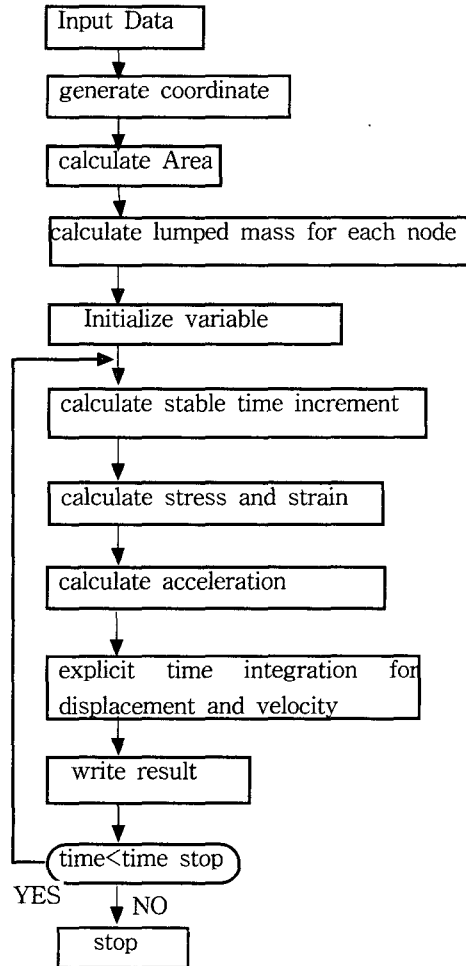


Fig. 4 Flow chart of program

4. 결과 및 고찰

Fig. 7, Fig. 8 Fig. 9은 충격봉이 입력봉을 14.0 m/sec로 부딪혔을 때 각각 충격봉, 입력봉 및 출력봉에서 각 봉의 양 끝단과 스트레인 게이지 (strain gage)부착지점인 입력봉 및 출력봉의 중간 지점에서의 변위를 시간에 따른 변화를 나타내었다. Fig. 7, Fig. 10, Fig. 13에서 충격봉의 변위, 속도 및 응력의 시간에 따른 변화를 살펴보면, 충격봉이 입력봉과의 거리 0.5mm를 14.0m/sec로 비행했을 때 약 35.7 μ sec 후에 서로 충돌함을 알 수 있고 충돌후에 압축파(compression wave)가 충격봉의 끝단에 도달하여 다시 인장파(tension wave)로 되어 돌아올 때까지 입자속도는 7m/sec로, 응력은 0.275GPa의 압축응력으로 유지되다

인장파가 통과한 후 해제되며, 이때 속도와 응력은 영점근방에서 재료의 탄성에 의하여 계속 진동함을 보여준다. Fig. 8, Fig. 11 Fig. 14는 입력봉의 변위, 속도 및 응력을 시간에 따른 변화를 나타낸 그림으로서 속도는 충격봉과 충돌에 의하여 충격봉의 초기속도 즉 14m/sec의 반인 7m/sec의 속도로 유지되다가 시편과의 경계 절점에서 반사파와 투과파로 나뉘면서 반사파의 영역으로 속도는 두배로 증가하며 Fig. 14에서 응력은 재료의 임피던스(impedence)차에 의하여 1501절점에서의 응력은 투과파의 크기를 460 μ sec 이후의 751절점의 응력은 반사파의 크기를 잘 나타내 주고 있으며 이는 이론과 정확히 일치함을 보여주고 있다. 출력봉의 변위, 속도 및 응력에 대한 시간에 따른 변화는 Fig. 9, Fig. 12, Fig. 15에서 보여주고 있는데 시편의 소성변형에 의한 소성파의 영향으로 변위, 속도 및 응력이 비선형적으로 변화하며, 최종 끝단은 자유단이므로 속도는 두배로, 응력은 걸리지 않음을 알 수 있다. 프로그램 수행 결과의 타당성을 입증하기 위하여 Fig. 16, Fig. 17, Fig. 18에서 참고문헌 (2)의 실제 실험한 결과와 비교하였다. Fig. 16, Fig. 17은 시간에 따른 ϵ_L , ϵ_R , ϵ_T 그래프를 나타내었는데 Fig. 16는 변형률 값을, Fig. 17은 참고문헌 (2)의 오실로스코프에서의 전압측정 값을, Fig. 18은 식 (12), (13), (14)로부터 응력과 변형률 및 변형률 속도를 구하여 비교하였으며 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다. 실험치와의 약간의 차이를 보이는 것은 실제 홉킨슨 바 장치의 실험 시에는 봉의 L/D의 비가 아무리 크더라도 정확히 1차원 거동을 보이지 않으므로 반경방향의 관성효과 발생문제 및 봉끼리의 접촉 및 정렬을 완벽히 할 수 없는 문제, 시편양면의 윤활 문제, 게이지 신호 측정시 고주파 잡음문제등이 있으므로 정확히 같을 수 없고, Fig. 6에서 보는 바와 같이 준정적 응력-변형률 값을 본 시뮬레이션에서 약간 낮게 사용한 영향도 있다. Fig. 19은 여러 가지 변형률속도에서 동적 응력-변형률 곡선을 나타냈으며, 변형률속도가 증가함에 따라 소성변형량의 증가로 인하여 떨림 현상이 훨씬 커짐을 보여준다.

5. 결론

본 연구에서 홉킨슨 압축봉 장치를 통한 재료

의 동적 특성을 얻기 위해 개발한 엑스플리시트 유한요소 프로그램의 결과들을 다음과 같이 정리할 수 있다.

- (1) 본 연구에서 개발한 프로그램은 준 정적 실험을 통한 응력-변형률 관계식만 있으면 어떤 변형률속도에 대해서도 응력-변형률 관계를 얻을 수 있도록 구성되었다.
- (2) 프로그램 수행 결과를 순수 전기동 재료의 실제 실험한 결과와 비교한 결과 비교적 잘 일치하였다.
- (3) 프로그램을 통한 결과와 실험치와의 약간의 차이는 홉킨슨 바 장치는 1차원 응력과 전파이론에 근거하였으나 실제 실험 시에는 봉내의 반경방향의 관성효과 발생문제 및 봉끼리의 접촉 및 정렬 문제, 시편양면의 윤활 문제, 게이지 신호 측정시 고주파 잡음문제등으로 인한 것으로 보인다.
- (4) 향후 보다 많은 실험 결과와 프로그램 결과와의 비교를 통하여 두 결과 값의 차이에 대한 분석이 요망된다.

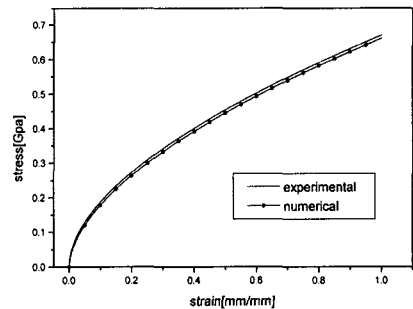


Fig. 6 Plots of experimental and used numerical Quasi-static stress-strain curves

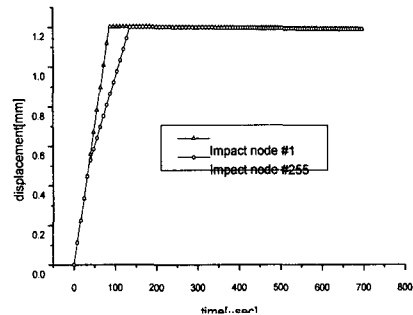


Fig. 7 Displacement-Time relation in impact bar

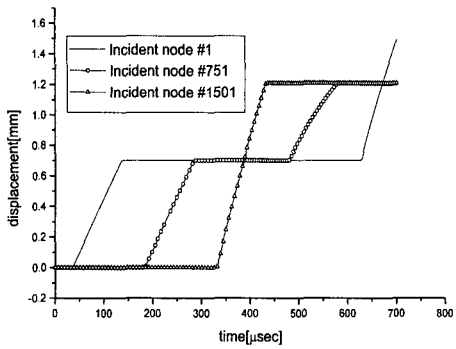


Fig. 8 Displacement-time relation in incident bar

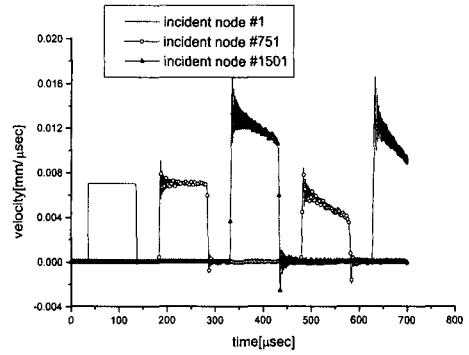


Fig. 11 Velocity-time relation in incident bar

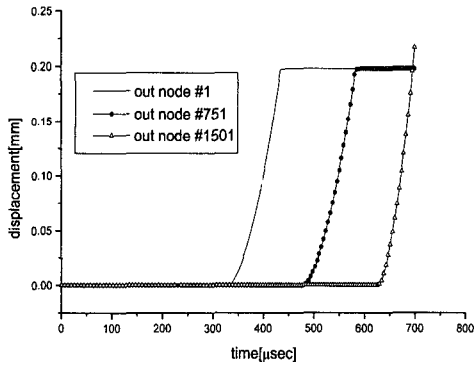


Fig. 9 Displacement-time relation in out bar

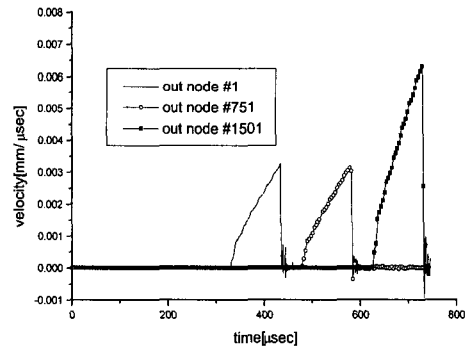


Fig. 12 Velocity-time relation in out bar

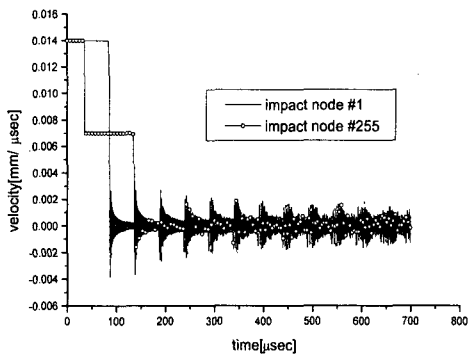


Fig. 10 Velocity-time relation in impact bar

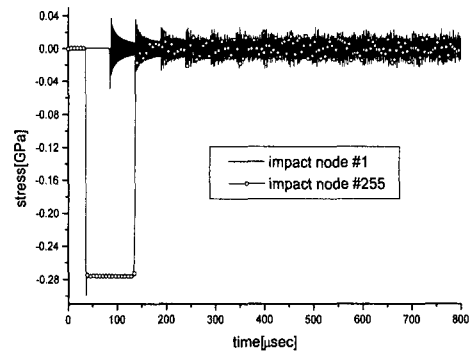


Fig. 13 Stress-time relation in impact bar

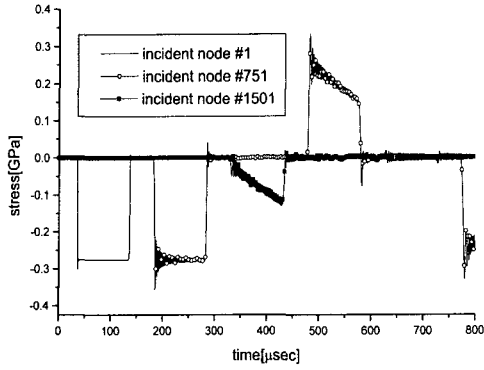


Fig. 14 Stress-time relation in incident bar

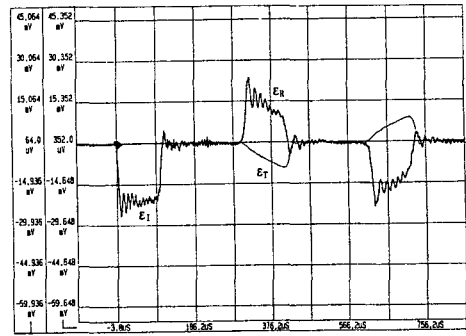


Fig. 17 Experimental wave profiles of $\epsilon_I, \epsilon_R, \epsilon_T$

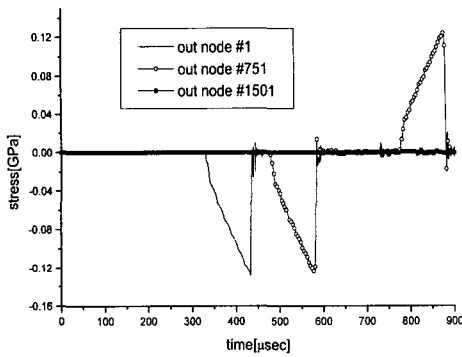


Fig. 15 Stress-time relation in out bar

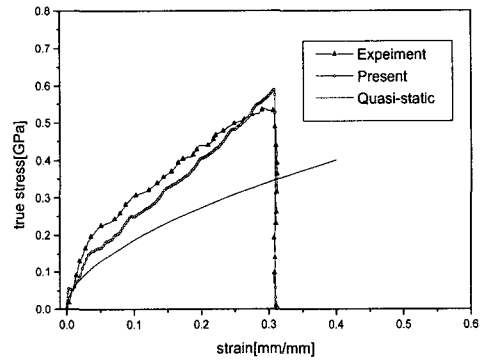


Fig. 18 Comparison of stress-strain curve with present analysis and experiment at strain rate 3060/sec

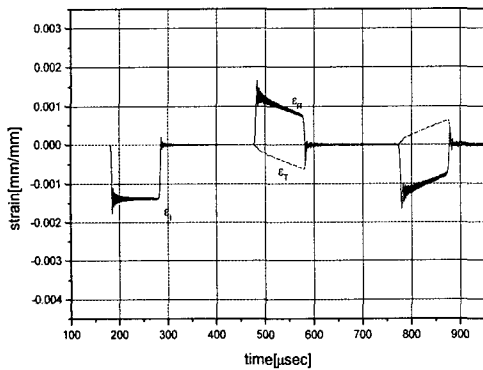


Fig. 16 Wave profiles in strain rate 3060/sec

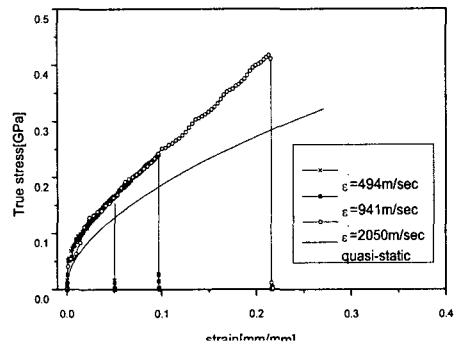


Fig. 19 Stress-strain curves at various strain rates

참고문헌

- (1) 이승우, 노병래, 홍성인, 1998, "엑스플리시트 유한요소법을 이용한 동적 재료특성 해석 프로그램 개발," 대한기계학회 충청지부 추계학술대회 논문집, pp. 129~132.
- (2) 황인평, 1995, "홉킨슨 바 장치를 이용한 고순도 전기동의 거동에 관한 연구," 충남대학교 석사학위 논문.
- (3) Albertini.C. and Montagnani M., 1974, "Testing techniques based on the split Hopkinson bar," *Institute of Physics Conf. Ser.* No.21.
- (4) Lindholm U. S.,1974, "Review of Dynamic Testing Technique and Material Behavior," *Institute of Physics Conf. Ser.* No.21.
- (5) Follansbee, P. S. and Frantz C., 1983, "Wave Propagation in the Split Hopkinson Pressure Bar," *ASME Journal of Engineering Materials Technology*, Vol. 105, pp. 61~66.
- (6) 정동택, 1994, "SHPB를 이용한 응력-변형률 측정," 대한기계학회, '94년도 추계학술대회논문집(1), pp. 33~41.
- (7) Lee O. S., You S. S., Chong J. H., Kang H. S., 1998, "Dynamic Deformation under a modified Split Hopkinson Pressure Experiment," *KSME International Journal*, Vol. 12, No. 6, pp. 1143~1149.
- (8) 강우중, 조상순, 허훈, 정동택, 1997, "새로운 Tension Split Hopkinson Bar를 이용한 박판의 고속인장시험," 대한기계학회논문집A, Vol. 21, No. 12, pp. 2209~2219.
- (9) 김지훈, 김영남, 양 인영, 1998, "CFRP 적층판의 동적 출간파괴인성의 평가법," 한국자동차공학회논문집, Vol. 6, No. 2, pp. 80~91.
- (10) 황재석, 강충현, 신동철, 이효재, 서정희, 1999, "직교이방성체의 동적 물성치와 동적응력 프린지치 측정에 관한 연구," 대한기계학회논문집A, Vol. 23, No. 4, pp. 649~659.
- (11) 김문생, 이현철, 1993, "충격하중을 받는 급속복합재료의 동적변형거동에 관한 연구," 대한기계학회논문집, Vol. 17, No. 7, pp. 1772~1782.
- (12) 김문생, 1987, "동압축 하중을 받는 재료의 고변형도율에서의 마찰영향," 대한기계학회논문집, Vol. 11, No. 3, pp. 454~464.
- (13) 유요한, 정동택, 1991, "엑스플리시트 시간적분 유한 요소법을 이용한 고속 성형 해석(I)," 대한기계학회논문집, Vol. 15, No. 1, pp. 1~10.
- (14) 유요한, 정동택, 1991, "엑스플리시트 시간적분 유한 요소법을 이용한 고속 성형 해석(II)-고속압연해석," 대한기계학회논문집, Vol. 15, No. 5, pp. 1~10.