

봉충격시험은 연세대학교 기계설계학과와 시험 장비를 이용하여 수행하였으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

## Mn-B 합금계 고강도 강의 동적 물성

최 참\*, 홍성인\*\*

### Dynamic Material Property of Mn-B Alloy High-Strength Steel

Chang Choi\*, Sungin Hong\*\*

#### ABSTRACT

The dynamic material property of Mn-B alloy high-strength steel is investigated through the rod impact test which is one of simple test methods for the analysis of the material behavior under high-strain-rate. Rod impact test is performed to produce the deformed shape of rod and analyzed by the one-dimensional theory based on conservation law and the two-dimensional hydrocode AUTODYN-2D. The dynamic yield stress is determined and compared with the static yield stress to investigate the strain-rate sensitivity of Mn-B alloy high-strength steel.

**Key Words :** Mn-B Alloy High-Strength Steel (망간-보론 합금계 고강도강), Rod Impact Test (봉충격시험), Hydrocode (유체동력학 프로그램), Dynamic Yield Stress (동적항복응력), Strain-Rate Sensitivity (변형률속도 민감도)

#### 1. 서론

고변형률속도 (High-strain-rate)에서 재료의 변형거동을 분석하기 위하여 다양한 시험방법이 이용되고 있으며, 특히 재료의 압축특성을 분석하기 위한 시험방법으로 낙하충격시험 (drop weight test), 홉킨슨봉시험 (Hopkinson bar test), 반무한봉시험 (semi-infinite bar test), 봉충격시험 (rod impact test), 판충격시험 (plate impact test) 등이 이용되고 있다<sup>(1-3)</sup>.

봉충격시험은 고변형률속도 범위의 시험방법 중에서 대변형을 얻을 수 있는 시험으로서 강체벽 (rigid anvil)에 평면끝단을 가진 봉형시험편 (flat-ended cylindrical rod specimen)을 고속으로 충돌시킨 후 시험편의 변형

형상을 측정하여 보존법칙 (conservation law)을 이용한 해석, 충격파전파 (shock wave propagation) 이론을 이용한 해석, 탄소성파전파 (elasto-plastic wave propagation) 이론을 이용한 해석, 유한차분 및 유한요소 수치해석 프로그램을 이용한 해석 등에 의하여 재료의 구성방정식을 결정하는 시험방법이다<sup>(4,5)</sup>.

보존법칙을 이용한 해석은 재료를 속도 비의존성 강완전소성체 (rate-independent rigid-perfectly plastic material)로 가정하고 응력과 전파의 단순화에 근거한 일차원 해석이론이다. 주로 금속재료의 동적항복응력 (dynamic yield stress)을 결정하기 위하여 이용되는 보존법칙을 이용한 해석에 있어서, Taylor<sup>(6)</sup> 와 Hawkward<sup>(7)</sup>는 각각 운동량보존법칙과 에너지보존법칙을 이용

\* 국방과학연구소

\*\* 충남대학교 기계공학과

하여 재료의 동적항복응력과 봉충격시험편의 충돌 완료 후의 변형형상을 봉충격시험편 충격단의 초기공칭압축변형률 (initial nominal compressive strain)의 함수로 나타내었다. 이로 부터 봉충격시험편의 변형형상간의 관계를 유도하였으며, 재료의 동적항복응력을 결정할 수 있는 방법을 제시하였다.

한편 Gillis 등<sup>(6)</sup>은 Taylor에 의하여 제시된 운동량보존법칙을 수정 보완하여 봉충격시험편의 변형형상으로부터 재료의 동적항복응력을 결정할 수 있는 방법을 제시하였으나, Taylor와 Hawkyard의 이론과는 달리 재료의 변형거동을 지배하는 변수간의 관계를 얻을 수 없으며 실험결과로부터 이론의 타당성을 분석할 수 없는 단점이 있다. 민옥기 등<sup>(4)</sup>은 Gillis 등에 의하여 제시된 수정 운동량보존법칙과 Hawkyard에 의하여 제시된 에너지보존법칙을 일반화한 수정 에너지보존법칙을 동시에 고려한 수정 운동량 및 에너지 보존법칙에 근거한 이론 (modified momentum and energy-based theory)을 제시하였다.

봉충격시험에 의한 시험편의 변형거동을 해석하기 위한 일차원 이론은 봉충격시험편의 축직각 방향의 유동은 무시하고 응력은 봉의 단면 전체에 걸쳐 일정하며 강완전소성체라는 가정조건을 이용한 단순 해석에 기초하고 있다. 이와 같은 단점을 보완한 해석을 수행하기 위하여 고속충격하중하에서 재료 및 구조물의 변형거동을 해석하기 위하여 개발된 유체동역학 프로그램 (Hydrocode)에 의한 봉충격시험의 해석이 수행되어 왔다<sup>(9-12)</sup>.

Wilkins와 Guinan<sup>(8)</sup>은 구성방정식으로서 강완전소성 및 소성경화 모델을 이용하여 유한차분 Hydrocode인 HEMP에 의한 해석 결과를 봉충격시험 완료후 측정된 변형형상과 비교하여 각종 금속재료의 동적항복응력을 결정하였다. Johnson과 Cook<sup>(10)</sup> 및 Zerilli와 Armstrong<sup>(11)</sup>은 재료의 변형률경화 (strain hardening), 변형률속도경화 (strain-rate hardening), 열연화 (thermal softening)를 고려하여 각각 실험적 구성방정식과 전위론에 기초한 구성방정식을 개발하였다. 한편 Johnson과 Holmquist<sup>(12)</sup>는 구성방정식에 이용되는 파라미터 값을 봉충격시험으로부터 직접 결정할 수 있는 방법론을 제시하였다.

본 연구에서는 구조물의 중요 소재로 이용되고 있는 Mn-B 합금계 고강도 강의 동적 물성을 봉충격시험에 의하여 분석하였다. Mn-B 합금계 고강도 강의 봉형 시험편을 고속으로 강체에 충돌시킨 후 변형 형상을 측정하

고, 보존법칙을 이용한 일차원 해석이론과 이차원 유한차분 유체동역학 프로그램인 AUTODYN-2D<sup>(13-14)</sup>에 의하여 해석을 수행하여 Mn-B 합금계 고강도 강의 동적 항복응력 및 변형률속도 민감도를 결정하였다.

## 2. 실험

### 2.1 시험편

봉충격시험에 사용된 시험편의 재료는 구조물의 중요 소재로 사용되고 있는 Mn-B 합금계 고강도 강으로서 두께 16 mm 및 19 mm의 판재가 이용되었다. 두께 16 mm 판재는 19mm 판재보다 강도가 우수한 특성을 나타내며, 압연방향(rolling direction) 및 압연수직방향(rolling transverse direction)별 기계적 정적 물성을 Table 1에 정리하였다. 봉충격 시험편 형상은 평면 끝단을 가진 봉형으로서 판재를 기계가공하여 제작하였으며 직경은 10mm이고 길이는 40mm이다. 본 논문에서 사용된 시험편 표시 및 분류는 영문과 숫자를 사용하여 첫 영문자는 봉 시험편이 채취된 판재의 두께표시로서 A는 16.0mm 판재를, B는 19.0mm 판재를 나타내고, 둘째 영문자는 시험편의 채취방향에 따라 R은 압연방향, T는 압연직각방향을 표시하고, 세 번째 숫자 4는 봉 시험편의 길이대 직경비 즉 L/D값이며, 나머지 두자리 숫자는 사용된 시험편의 serial 번호이다. 그리고 영문자뿐만 표시된 시험편에 대한 자료 값은 다수 시험편의 평균 값 또는 대표 값을 나타내고, 영문자+숫자로 표시된 시험편에 대한 자료 값은 그 시험편에만 해당되는 값을 의미한다.

Table 1. Static mechanical properties of Mn-B alloy high-strength steel

Material	Specimen	T <sub>s</sub> (MPa)	Y <sub>s</sub> (MPa)	Elongation
Mn-B 16.0 mm Rolling Direction	AR	1177.5	1115.8	0.1660
Mn-B 16.0 mm Transverse Direction	AT	1159.4	1106.4	0.1600
Mn-B 19.0 mm Rolling Direction	BR	1065.3	1008.4	0.1905
Mn-B 19.0 mm Transverse Direction	BT	1047.8	1002.8	0.1833

(Note) T<sub>s</sub> : Nominal tensile strength, Y<sub>s</sub> : Nominal yield strength

봉충격시험의 일차원 해석이론에 의하여 결정되는 동적항복응력은 진응력이며, 이차원 수치해석에 이용되는 유동응력도 진응력이므로 Mn-B 합금계 고강도 강의 정적 기계적물성을 진응력으로 변환해야 한다. 이를 위하여 Table 2와 같이 진응력-진소성변형률의 관계식 및 파라

미터 값을 결정하였다. 이 과정에서 Mn-B 합금계 고강도 강의 탄성 변형량이 비교적 작아 탄성 변형량은 무시하였다.

Table 2. Relation between true stress and true plastic strain for Mn-B alloy

Specimen	A <sub>0</sub> (MPa)	B <sub>0</sub> (MPa)	n	Remarks
AR	1115.8	621.03	0.4632	$\sigma = A_0 + B_0 \epsilon_p^n$ $\sigma$ : True stress $\epsilon_p$ : True plastic strain
AT	1108.4	574.65	0.4605	
BR	1008.4	581.32	0.4459	
BT	1002.8	548.86	0.4417	

2.2 실험 장치 및 방법

실험 장치는 Fig.1과 같이 시험편을 가속하기 위한 추진력을 제공하는 폭발장치 (explosion system), 시험편 장착기 (specimen loader), 시험편의 가속이 이루어지는 가속관 (accelerating tube), 시험편의 충돌 속도를 측정하기 위한 속도측정장치 (velocity measurement system), 시험편의 변형을 위한 강체 (rigid anvil), 그리고 충돌 완료 후 변형된 시험편의 회수를 위한 회수함 (recovery box)으로 구성되어 있다.

폭발장치는 추진 장약에 의하여 압력을 순간적으로 발생시키는 장치로서, 추진장약은 시험편의 충돌속도 변화를 위하여 0.3-0.6gram범위의 약량이 이용되었으며, 가속관의 재질은 중탄소강 (SM45C)으로서 길이는 1000mm, 내경은 10mm이다. 한편 시험편의 충돌속도 측정은 가속관의 출구와 강체표면 사이에 설치된 광섬유 (optical fiber: Keyerice FU-75)를 100mm 간격의 두 위치에 고정시키고 광센서 (photoelectronic sensor: Keyence FS2-65)에 연결시켜 시험편의 통과시간을 오실로스코프에 의하여 측정하여 결정한다. 강체는 고속으로 충돌하는 시험편의 변형을 위한 부분으로서 시험편의 충돌시 강체의 변형을 방지하기 위하여 브리넬경도 500의 고강도강판을 사용하였다. 강판의 표면은 마찰효과를 감소시키기 위하여 정밀 가공되었고, 시험편의 비정상충돌을 최소화하기 위하여 강판의 표면은 시험편의 운동방향에 수직이 되도록 설치되었다.

봉충격시험편은 강체벽에 고속으로 충돌후 변형 형상을 측정하였다. 강체에 충돌시킨 시험편중에서 강체에 수직으로 충돌되지 않았거나 좌굴이 발생한 시험편은 해석대상에서 제외시켰으며 충돌표면에 미소균열이 발생 한 시

험편도 해석에서 제외시켰다.

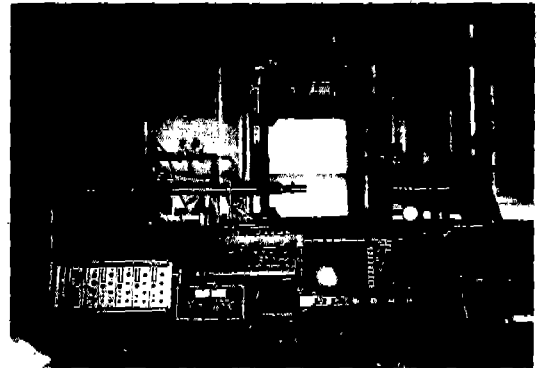


Fig.1 Experimental setup for rod impact test

2.3 실험 결과

봉충격 시험편을 강체에 충돌시킨 후 충돌속도 V와 최종전체변형길이 (final total deformed length) L<sub>f</sub>, 충돌면에서의 최종변형직경 (final deformed diameter) D<sub>f</sub> 등의 변형량을 측정하였으며, 시험편의 변형형상은 Fig.2와 같다. 여기서 V는 시험편이 강체에 충돌할 때의 속도를 나타낸다.

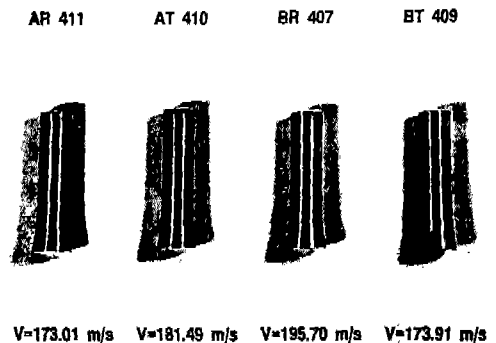


Fig.2 Deformed shape of rod specimens.

시험편의 초기길이 L로 무차원화된 최종전체변형길이 L<sub>f</sub>/L의 충돌속도 V에따른 변화를 각 재료에 대하여 도시하여 본 결과 Fig.3과 같다. 사용된 충돌속도의 범위는 150 m/sec ~ 270 m/sec이다. L<sub>f</sub>/L은 충돌속도 범위에서 충돌속도의 증가와 함께 선형적으로 감소하고 있으며 이는 기존의 실험결과<sup>(4,5)</sup>와 일치하고 있다. 동일 충돌속도에서 Mn-B 16.0 mm 판재는 19.0 mm 판재에 비해

여  $L_f/L$ 이 큰 값을 나타내고 있으며, 이는 정적 하중에서와 마찬가지로 고변형률속도하에서 Mn-B 16.0 mm 판재의 항복응력이 Mn-B 19.0 mm 판재 보다 큰 것을 나타내고 있다.

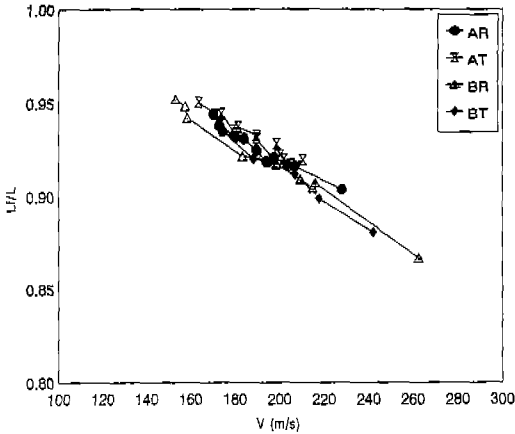


Fig. 3 Variation of nondimensionalized final total deformed length  $L_f/L$  with impact velocity  $V$ .

### 3. 보존법칙을 이용한 일차원 해석

#### 3.1 해석 이론 정리<sup>(4,5)</sup>

봉충격시험편을 고속으로 강체벽에 충돌시키면 시험편은 소성변형을 일으키며, 충돌 후 임의의 시간에서 변형길이 (deformed length), 미변형길이 (undeformed length), 시험편 끝단 변위의 변화는 소성파의 전파속도와 미변형부분의 속도의 함수로 표시될 수 있다. 재료는 속도비의존성 강완전소성체이고, 봉충격시험편의 축적 각 방향의 유동은 무시되고 응력은 봉의 단면 전체에 걸쳐 일정한 일차원 변형으로 간주하며, 충돌후 소성변형부위는 정지한다는 가정조건하에서 변형부분과 미변형부분의 평형상태를 고려하면 연속방정식 (continuity equation), 운동량방정식 (momentum equation), 에너지방정식 (energy equation)을 얻을 수 있다. 이로부터 봉충격시험편의 초기 운동에너지로 무차원화된 동적항복응력  $Y$ 는 식(1)과 같이 초기공칭압축변형률 (initial nominal compressive strain)  $e_0$ 의 함수로 표시된다.

$$\frac{1}{2} \rho V^2 = \frac{e_0}{1-e_0} - \ln \frac{1}{1-e_0} \quad (1)$$

여기서  $\rho$ 는 재료의 밀도이고  $V$ 는 시험편의 초기 충돌속도이다. 또한 미변형길이  $x$  및 변형길이  $h$ 는 식(2) 및 (3)과 같이 공칭압축변형률  $e$ 의 함수로 표시될 수 있으며, 변형 완료 후 최종미변형길이  $X$  및 최종변형길이  $H$ 는 초기공칭압축변형률의 함수로 식(4) 및 (5)와 같이 나타내어 질 수 있다.

$$\int_L^x \frac{dx}{x} = \ln \frac{x}{L} = - \int_{e_0}^e \frac{e}{e(1-e) + 2(1-e)^2 \ln(1-e)} de \quad (2)$$

$$\frac{dh}{dx} = -1 + e \quad (3)$$

$$\int_L^X \frac{dx}{x} = \ln \frac{X}{L} = - \int_{e_0}^e \frac{e}{e(1-e) + 2(1-e)^2 \ln(1-e)} de \quad (4)$$

$$H = - \int_L^X (1-e) dx \quad (5)$$

변형 형상의 기하학적 조건으로부터 최종전체변형길이  $L_f$ 는 식(6)과 같이 최종변형길이  $H$ 와 최종미변형길이  $X$ 의 합으로 표시될 수 있으므로 초기공칭압축변형률의 함수가 된다.

$$L_f = H + X \quad (6)$$

이와 같이 동적항복응력과 봉충격시험편의 충돌 완료 후의 변형형상들이 초기공칭압축변형률의 함수로 표시된다. 이로 부터 동적항복응력 및 변형형상간의 관계가 유도될 수 있으며, 변형형상의 측정으로부터 동적항복응력이 결정될 수 있다.

봉충격시험에 있어서 봉충격시험편은 충돌 과정중 충돌속도가 변화하므로 변형률속도도 변화하게 되어 일정 변형률속도를 얻을 수 없다. 그러나 보존법칙을 이용한 일차원적 해석에 있어서는 동적항복응력이 변형률속도에 관계없이 일정하다고 가정되므로 이에 해당되는 평균변형률속도를 구하는 것이 필요하다. 이를 위하여 Taylor는 운동량보존법칙을 이용한 해석에 있어서 소성파의 전파속도는 일정하고 충돌속도는 선형적으로 감소한다는 추가적인 가정 조건을 부여하여 식(7)와 같은 변형률속도식을 제시하였으며<sup>(6)</sup> 본 연구에서도 이를 이용하였다.

$$\dot{e} = \frac{V}{2(L-X)} \quad (7)$$

#### 3.2 해석 결과

측정된 충돌속도 및 최종전체변형길이를 이용하여 밀도 7.8 g/cm<sup>3</sup>인 Mn-B 봉시험편의 동적항복응력  $Y$ 와 변형

률속도  $\dot{\epsilon}$ 를 결정하였으며, 충돌속도  $V$ 에 따른 변화를 Fig.4 및 Fig.5에 각각 나타내었다. 동적항복응력과 변형률속도는 충돌속도범위에서 거의 일정한 값을 나타내고 있으며, Mn-B 16.0 mm 판재는 Mn-B 19.0 mm 판재에 비하여 다소 큰 동적항복응력 값을 보여주고 있다.

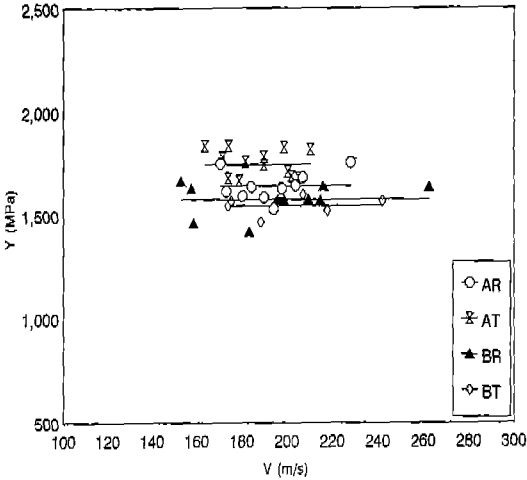


Fig. 4 Variation of dynamic yield stress  $Y$  with impact velocity  $V$

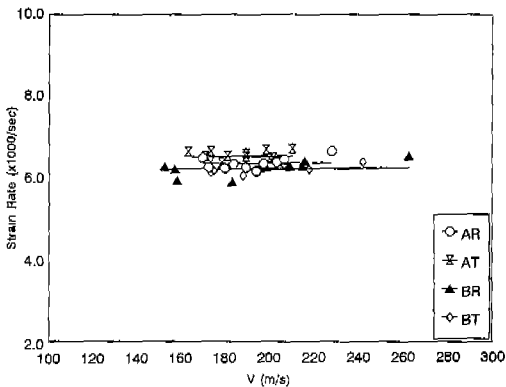


Fig.5 Variation of strain-rate  $\dot{\epsilon}$  with impact velocity  $V$

봉충격시험의 일차원 해석이론에 있어서 재료는 속도비의존성 강완전소성체로 가정되었기 때문에 결정된 동적항복응력은 평균 변형률 및 변형률속도에 대한 평균 동적항복응력이며, 이때 평균 공칭소성변형률은 식(8)과 같이 정의된다.

$$e_p = [1 - L_f/L][1 - X/L] \quad (8)$$

식(8)을 이용하여 결정된 공칭소성변형률을 진소성변형률로 변환하고 Table 2에서 결정된 정적 진응력과 진소성변형률 관계에 대입하여 정적 유동응력을 결정하고 재료별 평균값을 봉충격시험과 보존법칙에 기초한 이론에 의하여 결정된 동적항복응력과 비교하여 보면 Table 3과 같다. 여기서  $Y_{da}$ 는 각 시험편의 평균 동적항복응력,  $Y_{sa}$ 는 평균 정적유동응력,  $Y_{da}/Y_{sa}$ 는 변형률속도 민감도,  $\dot{\epsilon}_a$ 는 평균 변형률속도이다. 동적 항복응력에 대한 정적 유동응력의 비인 변형률속도 민감도 (strain-rate sensitivity)에 있어서 Mn-B 합금은 1.17- 1.27의 값을 나타내고 있다.

Table 3. Strain-rate sensitivity of Mn-B alloy

Specimen	$Y_{sa}$ (MPa)	$Y_{da}$ (MPa)	$Y_{da} / Y_{sa}$	$\dot{\epsilon}_a$ (x 1000/sec)
AR	1643.02	1407.97	1.17	6.3111
AT	1745.44	1373.75	1.27	6.4789
BR	1576.26	1292.05	1.22	6.1837
BT	1548.46	1281.40	1.21	6.1629

#### 4. 이차원 수치해석

##### 4.1 구성 방정식

이차원 수치해석에 의하여 Mn-B 합금계 고강도 강의 동적항복응력을 결정하기 위하여 AUTODYN-2D<sup>(13, 14)</sup>에 의하여 해석을 수행하였다. AUTODYN-2D는 유한차분법에 기초한 유체동역학 프로그램 (hydrocode)으로서 재료의 변형거동을 나타내기 위한 다양한 종류의 구성방정식 (constitutive equation)과 상태방정식 (equation of state)을 이용한다. 본 수치해석에 사용된 구성방정식은 Johnson과 Cook<sup>(9)</sup>에 의하여 제시된 실험적 구성방정식이며, 상태방정식으로는 체적 계수 (bulk modulus)를 이용한 선형 상태방정식이 사용되었다.

Johnson과 Cook은 이차원 유한요소법에 기초한 유체동역학 프로그램용 구성방정식으로 식(9)와 같이 등가 유동응력 (equivalent flow stress)  $\sigma_f$ 가 등가 소성변형률 (equivalent plastic strain)  $\epsilon$ , 무차원 등가 소성변형률속도 (dimensionless equivalent plastic strain-rate)  $\dot{\epsilon}^*$ , 등가 온도 (homologous temperature)  $T^*$ 의 함수인 열연화 (thermal softening)를 고려한 속도의존성 구성방정식을 이용하였다.

$$\sigma_f = [A + B\epsilon^n][1 + C \ln \dot{\epsilon}^*][1 - T^{*m}] \quad (9)$$

여기서  $\dot{\epsilon}^*$ 와  $T^*$ 는 각각 식(10) 및(11)과 같이 정의되며,  $\dot{\epsilon}$ 는 등가 소성변형률속도,  $\dot{\epsilon}_0$ 는 기준 등가 소성변형률속도인 1.0/sec 이고,  $T$ 는 재료의 온도,  $T_r$ 는 실험실의 온도,  $T_m$ 은 재료의 용융 온도이다.

$$\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0 \quad (10)$$

$$T^* = [T - T_r] / [T_m - T_r] \quad (11)$$

한편 A, B, n, C, m은 실험에 의하여 결정되는 파라미터로서 일부 금속재료에 대한 값이 정리되어 있다.<sup>(9)</sup> 본 논문에서 사용된 Mn-B 합금의 재료상수는 Table 4 및 5와 같다. 변형률속도지수 C 및 열연화지수 m은 Mn-B 합금에 대한 기존 값을 이용하였고, 재료상수 A, B, n은 Table 2의 값을 변형률속도 1.0 sec<sup>-1</sup>에서의 값으로 변환하여 결정하였다.

Table 4. Mn-B alloy constants for AUTODYN-2D simulation.

Density ( $\rho$ )	7.8 g/cm <sup>3</sup>
Bulk Modulus (K)	1.59 Mbar
Shear Modulus (G)	8.18x10 <sup>-1</sup> Mbar
Strain-Rate Constant (C)	0.0049
Thermal Softening Exponent (m)	1.09
Reference Temperature (T <sub>r</sub> )	298 °K
Melting Temperature (T <sub>m</sub> )	1.793E+3 °K

Table 5. Work-hardening coefficients A, B, and n of Mn-B alloy.

Specimen	A (Mbar)	B (Mbar)	n
AR	1154.9 x 10 <sup>-5</sup>	642.77 x 10 <sup>-5</sup>	0.4632
AT	1147.2 x 10 <sup>-5</sup>	594.76 x 10 <sup>-5</sup>	0.4605
BR	1043.7 x 10 <sup>-5</sup>	601.67 x 10 <sup>-5</sup>	0.4459
BT	1037.9 x 10 <sup>-5</sup>	567.86 x 10 <sup>-5</sup>	0.4417

#### 4.2 해석 결과

Table 6에 정리된 실험에 의하여 결정된 변형 형상을 Johnson-Cook 구성방정식을 이용하여 AUTODYN-2D에 의하여 시뮬레이션하여 비교하여 본 결과 Figs. 6-9과 같이 변형률속도지수 C=0.0049를 이용한 결과는 전 시편에 걸쳐 실험에 비하여 최종전체변형길이에 있어서 다소 작은 값을 나타내고 있으며 최종변형직경에 있어서는 큰 값을 나타내고 있다.

시뮬레이션에 의한 형상을 보장하기 위하여 변형률속도지수 C=0.025를 사용한 결과 전반적으로 수치해석 결

과는 실험과 유사한 변형특성을 나타내고 있다. 이는 기존의 변형률속도지수에 의한 Mn-B 합금계 고강도강은 변형률속도에 민감하지 않는 특성을 나타내나, 본 연구에서 사용된 Mn-B 합금계 고강도강은 변형률속도 민감성을 나타내고 있다.

Table 6. Experimental results for L<sub>r</sub>, D<sub>r</sub>, and W<sub>r</sub>

Specimen	V (m/s)	L (mm)	L <sub>r</sub> (mm)	D (mm)	D <sub>r</sub> (mm)	W <sub>r</sub> (mm)
AR411	173.01	40.01	37.531	9.96	12.562	10.293
AT410	181.49	39.95	37.424	9.96	12.486	10.430
BR407	186.70	40.07	37.054	9.95	13.143	10.461
BT409	173.91	39.96	37.498	9.95	12.534	10.460

(Note) W<sub>r</sub>: Deformed diameter at 0.2L

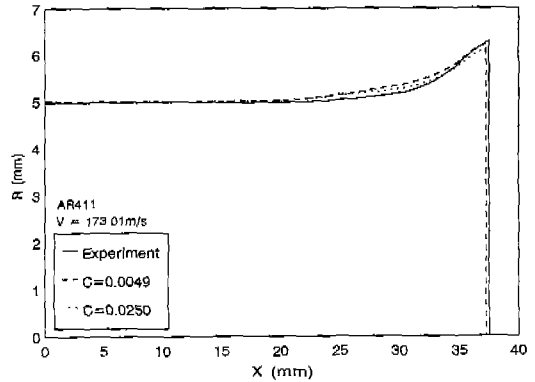


Fig. 6 Comparison between experiment and AUTODYN-2D simulation for the deformed shape of specimen AR411

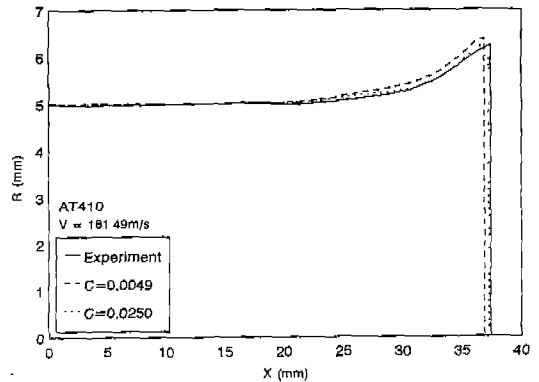


Fig. 7 Comparison between experiment and AUTODYN-2D simulation for the deformed shape of specimen AT410

AUTODYN-2D에 의한 해석결과의 오차를 해석하기 위하여 Table 6에 정리된 실험결과와 수치해석 결과를 이용하여 식(12)-(14)에 정의된 오차식을 이용하여 계산

하여 본 결과 Table 7과 같이 수치해석 오차는 최대 1.6%로서 비교적 오차가 작은 것으로 판단된다.

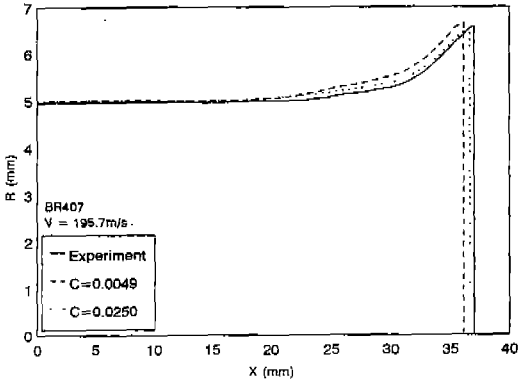


Fig. 8 Comparison between experiment and AUTODYN-2D simulation for the deformed shape of specimen BR407

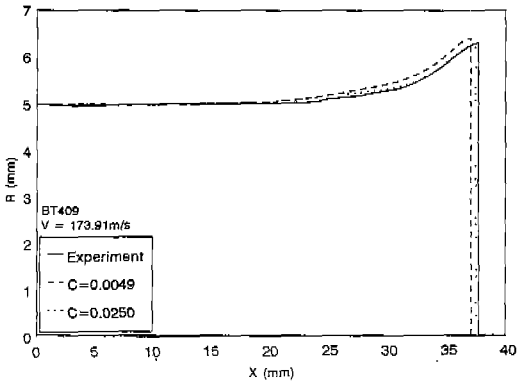


Fig. 9 Comparison between experiment and AUTODYN-2D simulation for the deformed shape of specimen BT409

$$L_f \text{ error} = \frac{(L_f/L)s - (L_f/L)e}{(L_f/L)e} \quad (12)$$

$$D_f \text{ error} = \frac{(D_f/D)s - (D_f/D)e}{(D_f/D)e} \quad (13)$$

$$W_f \text{ error} = \frac{(W_f/L)s - (W_f/L)e}{(W_f/L)e} \quad (14)$$

$$\text{Total error} = \frac{|L_f \text{ error}| + |D_f \text{ error}| + |W_f \text{ error}|}{3} \quad (15)$$

보존 법칙에 기초한 일차원 해석이론에 의한 결과와 이차원 수치해석에 의한 해석 결과를 비교하기 위하여 각

Table 7. Error analysis

Specimen	L <sub>f</sub> error	D <sub>f</sub> error	W <sub>f</sub> error	Total error
AR411	-0.000843	-0.027945	0.017836	0.015575
AT410	-0.005093	0.001903	0.005453	0.004150
BR407	-0.007820	-0.011284	0.003569	0.007568
BT409	-0.008311	-0.006702	0.004276	0.005763

시험편에 대한 동적항복응력  $Y_d$ , 변형률속도 민감도  $Y_d/Y_s$ 의 값을 비교하여 Table 8에 나타내었다. 일차원 해석이론의 경우 변형률 민감도는 1.16-1.29의 값을 갖고 있으며 이차원 수치해석의 변형률 민감도 값인 1.26-1.27과 유사한 특성을 나타내고 있다. 일차원 해석이론의 경우 재료를 속도비의존성 강완전소성체로 가정하였으나 변형률 경화, 변형률속도 경화, 열연화를 고려한 Johnson-Cook 구성방정식을 이용한 이차원 수치해석의 경우와 비교적 일치하여 단순성에도 불구하고 일차원 해석이론은 타당성을 나타내고 있다.

Table 8. Comparison between the results of 1D theory and 2D hydrocode

Specimen	$(Y_d)_{1D}$ (MPa)	$(Y_d)_{2D}$ (MPa)	$Y_s$ (MPa)	$(Y_d)_{1D} / Y_s$	$(Y_d)_{2D} / Y_s$	$\dot{\epsilon}$ (x 1000/sec)
AR411	1616.00	1759.90	1395.60	1.16	1.26	6.2152
AT410	1760.40	1733.00	1369.10	1.29	1.27	6.4986
BR407	1574.60	1611.15	1277.80	1.23	1.26	6.1827
BT409	1545.70	1591.15	1262.30	1.22	1.26	6.0949

## 5. 결론

봉충격시험에 의하여 구조물의 중요 소재로 이용되고 있는 Mn-B 합금계 고강도강의 동적물성을 분석하였다. 봉형 시험편을 고속으로 강체에 충돌시킨 후 변형형상을 측정하고, 보존법칙을 이용한 일차원 해석이론과 이차원 유한차분 유체동력학 프로그램인 AUTODYN-2D에 의하여 해석을 수행하였다.

▶ 일차원 해석이론에 의한 해석시 동적 항복응력에 대한 정적 유동응력의 비인 변형률속도 민감도 (strain-rate sensitivity)는 Mn-B 합금계 고강도강의 경우 평균 1.22의 값을 나타내고 있다.

▶ Mn-B 합금계 고강도강의 동적 변형에 대한 Johnson-Cook 구성방정식을 이용한 이차원 수치해석 시물래이션에 있어서 Mn-B 합금계 고강도 강은 변형률속도 지수  $C=0.025$  값을 나타낸다.

▶ 일차원 해석이론의 경우, 변형을 경화, 변형률속도 경화, 열연화를 고려한 Johnson-Cook 구성방정식을 이용한 이차원 수치해석의 결과와 비교적 일치하여, 재료를 속도비의존성 강 완전소성체로 가정하였음에도 불구하고 해석의 타당성을 갖고 있는 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

1. Bitans, K. and Whitton, P.W., "High-Strain-Rate Investigations, with Particular Reference to Stress/Strain Characteristics," *Int. Metal. Rev.*, Vol.17, pp.66-78, 1972.
2. Holzer, A.J., "A Tabular Summary of Some Experiments in Dynamic Plasticity," *J. Eng. Mat. Tech., Trans. ASME*, Vol.101, pp.231-237, 1979.
3. Staker, M.R. et al., "High Strain Rate Testing," in *Metals Handbook Ninth Edition*, Vol.8, American Society for Metals, 1985.
4. 민옥기, 이정민, 남창훈, 황재준, "금속재료의 동적 항복응력 결정을 위한 봉충격시험법," *대한기계학회 논문집*, 제17권, 제1호, pp.78-89, 1993.
5. 이정민, 민옥기, "봉충격시험에 의한 동합금의 동적 항복응력 결정," *대한기계학회 논문집*, 제19권, 제4호, pp.1041-1050, 1995.
6. Taylor, G.I., "The Use of Flat-Ended Projectiles for Determining Dynamic Yield Stress," *Proc. R. Soc.*, A194, pp.289-299, 1948.
7. Hawkyard, J.B., "A Theory for the Mushrooming of Flat-Ended Projectiles Impinging on a Flat Rigid Anvil, Using Energy Considerations," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.11, pp.313-333, 1969.
8. Gillis, P.P., Jones, S.E., and Foster, J.C., "On the Equation of Motion of the Undeformed Section of a Taylor Impact Specimen," *J. Appl. Phys.*, Vol.51, pp.499-502, 1987.
9. Wilkins, M.L. and Guinan, M.W., "Impact of Cylinders on a Rigid Boundary," *J. Appl. Phys.*, Vol.44, pp.1200-1206, 1973.
10. Johnson, G.R. and Cook, W.H., "A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures," *Proc. 7th Int. Sym. on Ballistics*, The Hague, The Netherlands, pp.541-547, 1983.
11. Zerilli, F.J. and Armstrong, R.W., "Dislocation-Mechanics-Based Constitutive Relations for Material Dynamics Calculations," *J. Appl. Phys.*, Vol.51, pp.1816-1825, 1987.
12. Johnson, G.R. and Holmquist, T.J., "Evaluation of Cylinder-Impact Test Data for Constitutive Model Constants," *J. Appl. Phys.*, Vol.64, pp.3901-3910, 1988.
13. Birnbaum, N.K., Cowler, M.S., Itoh, M., Katayama, M., and Obata, H., "AUTODYN - An Interactive Non-Linear Dynamic Analysis Program for Microcomputers through Supercomputers," *Int. Conf. Structural Mechanics in Reactor Technology*, Lausanne, Switzerland, 1987.
14. Zukas, J.A., *High Velocity Impact Dynamics*, John Wiley & Sons, Inc., 1990.