

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.6.573>

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

## 중간 변형률속도용 낙추식 충격 인장시험 장치의 신뢰성 확보 및 탄소강의 동적변형거동 평가

배경오\* · 김대웅\* · 신형섭\*† · 박이주\*\* · 김형원\*\*  
\* 안동대학교 기계설계공학과, \*\* 국방과학연구소

### Reliability Assessment of Impact Tensile Testing Apparatus using a Drop-bar Striker for Intermediate Strain-rate Range and Evaluation of Dynamic Deformation Behaviors for a Carbon Steel

Kyung Oh Bae\*, Dae Woong Kim\*, Hyung Seop Shin\*†, Lee Ju Park\*\* and Hyung Won Kim\*\*

\* Dept. of Mechanical Design Engineering, Andong Nat'l Univ.

\*\* Agency for Defense Development

(Received January 20, 2016 ; Revised March 15, 2016 ; Accepted March 21, 2016)

**Key Words:** Impact Tensile Test(충격 인장시험), Long Output Bar(긴 출력봉), Drop-bar Striker(낙추 충격봉), Dynamic Deformation(동적 변형), Intermediate Strain-rate(중간 변형률속도)

**초록:** 충격하중을 받는 재료의 변형거동에 관한 연구는 공학 및 산업의 다양한 분야에서 관심 받고 있으며, 이들 기계/구조물 부재의 변형 및 파괴거동의 다수는 중간 변형률속도 영역에 해당하는 것으로 알려져 있다. 따라서 이러한 변형률속도역에서 동적변형거동을 고려하는 것이 설계의 필수조건이 되었다. 이들 영역은 준정적과 SHPB 시험장치를 이용하는 고 변형률속도의 중간 영역에 위치하고 있어서, 종래의 적당한 시험장치를 이용하여 중 변형률속도를 얻는 것이 용이하지 않았다. 따라서 중간 변형률속도역에서 재료의 변형 및 파괴거동에 관한 유용한 데이터의 보고는 제한적이다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해, 구축한 낙추식 충격 인장시험 장치의 신뢰성을 확보하였고, 이를 사용하여 탄소강의 중 변형률속도역에서 동적거동을 평가하였다.

**Abstract:** Studies on the deformation behavior of materials subjected to impact loads have been carried out in various fields of engineering and industry. The deformation and fracture of members for these machines/structures are known to correspond to the intermediate strain-rate region. Therefore, for the structural design, it is necessary to consider the dynamic deformation behavior in these intermediate strain-rate ranges. However, there have been few reports with useful data about the deformation and fracture behavior at intermediate strain-rate ranges. Because the intermediate strain-rate region is located between quasi-static and high strain-rate regions, it is difficult to obtain the intermediate strain-rate using conventional reasonable test equipment. To solve this problem, in this study, the measurement reliability of the constructed drop-bar impact tensile test apparatus was established and the dynamic behavior at the intermediate strain-rate range of carbon steels was evaluated by utilizing the apparatus.

#### 1. 서 론

국방 분야에서 통상 고강도 고인성 강으로 이루어진 구조물에 대한 관통이나 중력투하식 무기 충

돌의 경우, 구조물 요소의 설계를 위해서는 실제 사용조건하에서 재료의 특성에 대한 이해가 요구된다. 이와 같은 충격 환경에서 작용하는 변형률속도(strain-rate)는 대개 접촉시작 1 ms 이내에 파단변형률에 도달하는 지속시간을 포함하고 있어서, 50% 파단변형률을 겪는 합금에 대한 충격의 경우 수백 s<sup>-1</sup>의 변형률속도에 해당된다. 또한 이러한

† Corresponding Author, hsshin@anu.ac.kr

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

변형률속도 영역은 중력투하식 무기, 차량충돌사고, 고속 금속포밍 가공 및 저속 발사체 충격 등의 분야가 해당이 된다.

한편, 충격하중을 받는 재료의 변형거동에 관한 연구는 공학 및 산업의 다양한 분야에서 관심을 받고 있으며, 이들 기계/구조물을 구성하는 부재의 변형 및 파괴는 중간 변형률속도(intermediate strain-rate)에 해당하는 것으로 알려져 있다.<sup>(1)</sup> 따라서 이러한 변형률속도 영역에서 동적변형거동을 파악하는 것이 필요하다. 특히, 방폭/방호 시설물에 작용하는  $10 \sim 500 \text{ s}^{-1}$  범위의 변형률속도 영역은 준정적과 고 변형률속도의 중간 영역에 위치하고 있어, 재료의 변형거동에 관한 유용한 데이터의 보고가 제한적이다. 탄도속도역보다 낮은 중간 변형률속도에서 금속의 변형거동 기구는 저속 전위 미끄럼 상승(glide-climb) 메커니즘이 작동하기에는 시간적 제한이 있고, 또한 고속탄도에서 적용되는 단열 전단띠(adiabatic shear bands) 기구는 아직 활성화되지 않는 영역이어서, 양 기구의 적용이 적절하지 않은 천이 영역(transition region)에 해당한다고 할 수 있다. 이것은 중간 변형률속도 혹은 sub-Hopkinson 변형률속도 영역으로 충격시험의 어려움이 있다.<sup>(1-4)</sup> 즉, 해당속도가 유압제어식 인장시험의 준정적 평형보다 빠르거나, SHPB 시험에서의 단일 응력과 전파의 경우보다 느리기 때문이다. 이러한 변형률속도역에서 관성 효과(inertia effect)는 준정적 시험에서 가정된 일축균일 응력 상태를 변화시키게 된다.<sup>(5)</sup> 이러한 어려움으로 인하여 유효성이 의문시되는 데이터가 많이 보고되어 오고 있는 실정이다. 이들 종래 실험의 경우, 대부분 하중신호에서 현저한 진동(oscillation)이나 울림(ringing)을 포함하고 있어서 단순히 시험 후 얻어진 데이터의 수치적 평활화(smoothing) 처리로 해결하고자 하였다. 이로 인해 각 재료의 동적거동과 특성치를 명확하게 구하는 것이 어려웠다.<sup>(6)</sup> 하중신호에 포함된 진동 문제를 해결하기 위해, 중력낙하식 실험, 전자기력 가속시험, 고속 유압서보기 등의 시험방식이 제안되어 왔지만, 여전히 진동을 완전히 배제하는 데까지 도달하지 않은 상태이다. 따라서 중간 변형률속도 영역에서 이러한 진동을 배제할 수 있는 동적 재료거동 평가기술 개발이 필요하며, 최근 중간 변형률속도에서 시험기법 개발 및 그를 통한 시험이 활발하게 진행중이다.<sup>(7-12)</sup>

본 연구팀에서는 최근 중 변형률속도역에서 재료의 동적거동 및 특성치를 평가하기 위해, 긴 출

Table 1 Mechanical properties of S45C steel

Yield strength, MPa	Tensile strength, MPa	Elongation, %
652	711	20.1

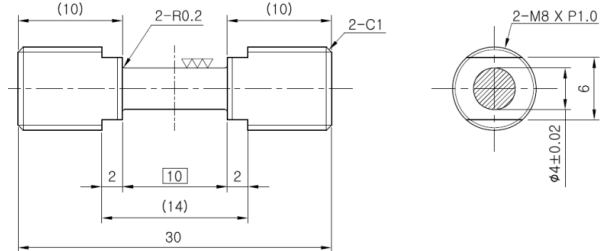


Fig. 1 Shape and dimensions of specimen used<sup>(13)</sup>

력봉을 갖는 낙추식 충격 인장시험 장치를 고안하였고, 그 결과 하중신호에서 진동을 완전히 제거하는 것이 가능하였다.<sup>(13)</sup> 따라서 본 연구에서는 구축한 낙추식 충격 인장시험 장치에 대한 계속 신뢰성을 확보하고, 이들 장치를 사용하여 획득한 탄소강 S45C의 동적변형거동을 파악 및 동적 물성치의 유효성을 검토하고자 하였다.

## 2. 시험편

본 연구에서는 대표적 탄소강(S45C)을 주로 사용하였다. 충격 및 준정적 시험용으로 사용한 시험편 형상은 Fig. 1과 같다.<sup>(13)</sup> 도그본(dog bone) 형상의 소형 인장시험편으로써, 전체길이가 30 mm이다. 시험편 양단을 고정하기 위해 나사부를 갖고 있으며, 봉상 모재로부터 압연방향으로 가공하였다. 게이지부는 길이 10 mm, 직경 4 mm로 하였다. 시험편 게이지부의 길이 대비 직경 비율( $L/D$ )이 2.5로, 통상 ASTM E8에서 권장하는 4의 값보다 작은 값을 나타낸다.<sup>(14)</sup> 이로 인해 표준 인장시험편을 사용한 경우에 비하여 다소 큰 연신율이 예상된다. 또한 충격시험 결과와 비교하기 위해, 낮은 변형률속도( $0.001 \text{ s}^{-1}$ ,  $1 \text{ s}^{-1}$ )에서 동일 형상의 시험편에 대하여 유압식 만능시험기(INSTRON 8516, load cell: 100 kN)를 사용하여 준정적 인장시험을 수행하였고, 준정적 상태에서 얻어진 기계적 물성은 Table 1과 같다.

## 3. 낙추식 충격 인장시험기 구축

### 3.1 측정 원리

Fig. 2는 본 연구팀에서 구축한 낙추식 충격 인

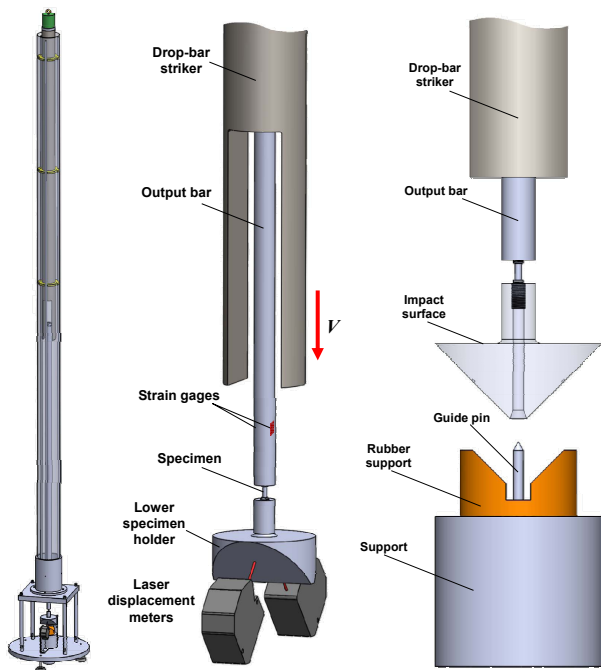


Fig. 2 Illustration of drop-bar type impact tensile test apparatus having a long output bar

장시험 장치로써, 직경 20 mm, 길이 1.8 m 이상의 긴 출력봉(output bar)을 갖고 있으며, 낙추 충격봉(drop-bar striker)을 낙하시켜 소형 인장시험편에 중 변형률속도의 인장하중을 부가할 수 있는 시험장치이다. 이를 위해  $10^3 \text{ s}^{-1}$  변형률속도 범위에서 많이 사용되고 있는 SHPB (Split Hopkinson Pressure Bar) 시험법을 기반으로 하여, 동적 하중신호는 충격하중 작용시 출력봉에 부착된 스트레인 게이지에서 신호를 획득하고, 입력봉의 반사파신호 대신 고속 레이저 변위계를 사용하여 충격 동안 시험편 파단까지 발생하는 변위신호를 직접 측정하게 된다. 따라서 충격 인장시험시 획득한 이들 신호를 사용하여 동적 하중-변위 선도 및 응력-변형률 선도의 모사가 가능하다.

구축된 시험장치는 Fig. 2와 같이 길이 1.95 m, 외경 70 mm, 내경 38 mm의 원통형상(cylindrical shape)을 지닌 무게 36 kg의 충격봉(drop-bar striker)을 사용하여, 낙추봉 낙하높이 1.5 m에서 5.4 m/s의 낙하속도와 530 J 급 충격에너지를 가할 수 있는 자유낙하 방식을 채택한 시험장치이다. 이 때 출력봉과 낙추봉은 투명 PC파이프 내에 수직으로 삽입되어 있고, 낙추봉의 상·하단부에는 ABS 폴리머 재질의 가이드 판(guide plate)이 설치되어 있다. 이들 가이드 판에는 반원형 구멍이 가공되어 있어서, 이를 통해 수직방향으로 삽입된 가이드 봉(guide bar)을 따라 낙추봉이 마찰 및 장애 없이 수

직 자유낙하 할 수 있도록 하였다.<sup>(13,15)</sup> 또한 낙추봉 상단에 체결되어 있는 디스크(disk)에 전자석을 부착하여 소정의 낙하높이( $h$ )까지 끌어올릴 수 있도록 하였다. 낙추봉이 설정된 낙하높이에서 낙하되면, 장치의 하단부에 위치한 상부판(upper plate)에 체결되어 있는 지지튜브(support tube)를 통과하게 된다. 여기서 지지튜브 내부에는 출력봉이 삽입되어 있고, 출력봉 하단부에는 소형 인장시험편이 하부 시험편홀더 사이에 체결되어 있다. 그리고 충격시험시 안정적인 하중신호를 얻기 위해, 장치의 상부판에 출력봉 지지튜브가 수직을 유지하고 반경방향으로 움직이지 않도록 고정하였다. 이는 지지튜브가 상부판에 수직을 유지하여 고정되지 않거나 흔들리는 경우, 하중신호에서는 노이즈가 발생하여 최대인장강도(UTS)를 명확하게 구할 수 없게 된다. 따라서 낙추봉이 자유낙하 하여 상부판을 통과하고, 하부 시험편홀더에 충격을 가하면 부가된 충격력이 시험편에는 인장하중으로 작용함과 동시에 소성변형이 일어나고 최종적으로 파단에 도달하게 된다. 시험편은 파단 후 하부 시험편홀더, 낙추봉과 함께 자유낙하 하게 되고, 하부에 충격흡수를 위해 설치한 고무받침대와 가이드 핀(guide pin)에 의해 착지한다.

또한 낙추봉이 자유낙하 하여 낙추봉 타격부가 하부 시험편홀더의 타격면에 충격을 가하게 되면 시험편의 소성변형에 의해 하부 시험편홀더가 수직으로 변위를 나타내게 되는데, 실제로는 하부 시험편홀더가 기울어져 변위를 나타낸다. 따라서 수직방향 변위를 측정하기 위해, Fig. 2와 같이 2대의 레이저 변위계 헤드(KEYENCE, LK-G5000, Head: LH-055, sampling rate: 392 kHz)를 180° 각도로 설치하고 시험편홀더의 좌우 양측 변위계의 출력값을 평균하여 동적 변위로 하였다. 이와 같이 이중(double)으로 설치한 변위계로부터 획득한 변위신호를 평균함으로써 단일(single) 변위계를 사용한 경우보다 재현성이 높고 신뢰할 수 있는 변위신호 측정이 가능하다.

### 3.2 동적 하중 및 변위 교정

본 연구에서는 동적 하중 및 변위신호를 측정하기 위해, LabVIEW S/W 프로그램을 채택하였다.<sup>(15-17)</sup> 이로부터 두 신호의 데이터 수집(DAQ) 및 처리를 간편하게 할 수 있고, 획득한 하중과 변위신호로부터 동적 하중-변위 선도를 제시하는 것이 가능하다. 먼저 동적 하중신호 검출을 위해 출력봉의 하단 시험편 체결부로부터 출력봉(output bar) 직경의 3배( $3d = 60 \text{ mm}$ ) 만큼 떨어진 위치에

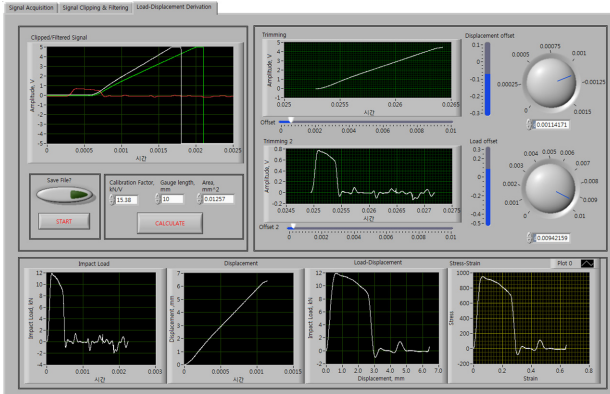


Fig. 3 Panel for DAQ and processing constructed using LabVIEW S/W

포일형 스트레인 게이지(KYOWA, 120 Ω, Gage factor: 2.0)를 양측에 각각 부착하였다. 여기서 출력봉은 충격시, 시험편을 통과한 응력파가 끝단에서 반사되어 반사파(reflected wave)로 출력봉의 하단으로 전달되는 시간보다 짧게 하여, 스트레인 게이지(strain gages)에 의해 검출되는 하중신호에 반사파가 포함되지 않게 인장 변형 및 파단에 이르는 시간이 충분한 길이로 구성되어야 한다. 만약 출력봉의 길이가 짧게 되면, 출력봉에 부착되어 있는 스트레인 게이지까지 반사파의 도달 시간이 짧아져 간섭(interaction)을 일으키게 되므로, 인장 파괴까지의 동적 소성변형 과정 동안 명확한 하중신호를 획득할 수 없게 된다. 충격인장시 하중신호는 two-gage법으로 휘스톤 브릿지(Wheatstone bridge) 회로를 구성하고 브릿지 박스(bridge box)를 거쳐, 동적 변형률 증폭기(KYOWA, CDV-900A, sampling rate: 500 kHz)에 의해 증폭된 전압신호를 검출한다.

한편, 소형 인장시험편을 사용한 충격시험의 경우, 통상적인 변위계를 사용하는 것이 적합하지 않은 관계로 하부 시험편홀더의 변위를 초고속 레이저 변위계를 사용하여 계측하였다. 변위신호는 하부 시험편홀더의 양측에 레이저 변위계를 180° 각도로 2개소 설치하여, 레이저 변위계의 sampling rate= 200 kHz (5 μs 간격)에서, 전압값으로 검출한다. 따라서 계측된 하중 및 변위신호 데이터는 PC에 내장되어 있는 DAQ board (NI PCI-6132, Sampling rate: 2.5 MS/s)를 통해 저장되고, PC에 설치된 LabVIEW S/W 프로그램에 의해 처리된다.

Fig. 3은 충격 인장시험 후 얻은 동적 하중 및 변위신호를 처리하기 위한 LabVIEW S/W 프로그램 기반 데이터 처리 패널(panel for data processing)을 보여주고 있다. 하중신호와 달리 각각의 변위계로부터 얻어진 2개의 변위신호가 다른 기울기

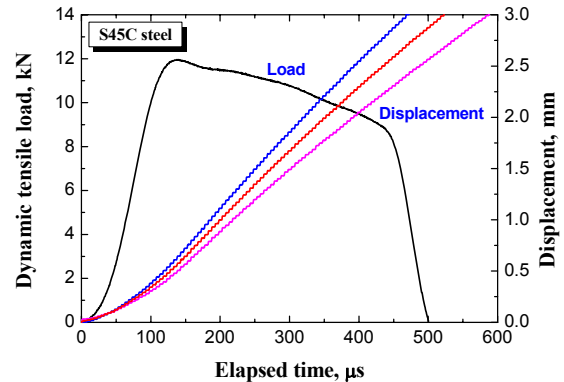


Fig. 4 Typical dynamic load and displacement-time curves obtained for S45C steel specimens tested at H= 1.5 m

를 갖는 것을 볼 수 있다. 이들 두 변위신호를 평균한 신호와 하중신호는 각각 트리밍(trimming) 한 뒤, 하중 교정계수(Calibration Factor:  $C.F.$ )와 시험편의 게이지부 길이 및 단면적을 입력하여 계산하면, 시험편의 동적 하중-변위 선도 및 응력-변형률 선도를 그릴 수 있게 된다. 또한 얻어진 하중신호는 raw data의 어떠한 평활화(smoothing) 작업 없이도 진동이 포함되어 있지 않는 선도를 얻을 수 있다. 여기서 동적 출력하중의 출력교정을 위해 출력봉의 교정을 실시하였다.<sup>(13,15)</sup> 인장하중 작용시 출력봉에 부착한 스트레인 게이지로부터 출력되는 전압값을 10 kN까지 0.5 kN 간격으로 하중을 부가/제하 하여 전압값을 기록하였다. 따라서 하중-전압 선도의 평균 기울기로부터 15.38 kN/V의 정적 교정값을 얻을 수 있었다. 이들 정적 교정값의 유효성을 동적 교정을 통해서 확인하였다. 따라서 충격시험시 스트레인 게이지로부터 얻은 하중 출력전압값을 식 (1)과 같이 교정값 15.38 kN/V를 곱하여 동적 하중을 구하게 된다. 그리고 레이저 변위계로부터 얻어진 변위  $\delta_1$ 은 시험편홀더면에 45°로 경사진 면에서 측정된 값으로, 삼각함수를 이용하여 식 (2) 하중 작용방향 시험편의 변위  $\delta$ 를 얻게 된다.

$$P(t) = V_{output} \times C.F. \quad (1)$$

$$\delta(t) = \frac{\delta_1(t)}{\sin 45^\circ} \quad (2)$$

#### 4. 실험결과

##### 4.1 동적 신호처리 및 변형률속도 측정

Fig. 4는 S45C 강재에 대하여, 낙하높이 1.5 m에서 충격 인장시험시 획득한 동적 하중 및 변위의 경과시간에 따른 선도를 보여주고 있다. Fig. 4에서

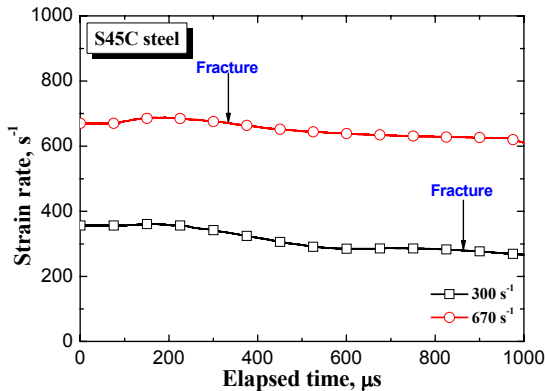


Fig. 5 Variations of strain-rate during testing for S45C steels when impacted at the drop height of H=1.5 m

볼 수 있듯이, 이중 변위계로부터 획득한 각각의 변위신호 데이터는 기울기가 다른 값을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 단일 변위계를 사용한 경우와 이중 변위계를 사용한 경우를 비교하여 시험장치의 신뢰성을 확보하고자 하였다. 경과시간에 따른 하중과 변위 데이터로부터 동적 하중-변위 선도 및 공칭 응력-변형률 선도를 나타낼 수 있게 된다. 따라서 본 연구에서 채택한 긴 출력봉을 사용함으로써 하중신호에 나타나는 진동을 제거하는 것이 가능하였고, 재료의 동적거동에서 나타나는 기계적 특성치를 구할 수 있다. 또한, 충격 인장시험 동안 시험편에 부가되는 변형률속도(strain-rate)는 식 (3)과 같이 계산할 수 있다. 여기서  $\delta$ 는 수직방향 변위,  $L_0$ 는 시험편 게이지부 길이(gauge length),  $\Delta t$ 는 경과시간(elapsed time)을 의미한다. Fig. 5는 충격 낙하높이 0.4 m ( $300 \text{ s}^{-1}$ ), 1.5 m ( $670 \text{ s}^{-1}$ )에서 충격시험시 경과시간에 따른 변형률속도의 거동을 보여주고 있다. 두 선도를 비교하면, 낙하높이 1.5 m의 충격시험에서는 시험편의 파단이 완료되는 시간까지 변형률속도가 거의 일정한 값을 나타내고 있는 반면, 0.4 m 충격시험에서는 경과시간이  $300 \mu\text{s}$ 를 지나면서 변형률속도 값이 감소가 일어나는 것을 볼 수 있다. 이는 충격봉의 낙하높이가 낮은 경우, 충격에너지가 충분히 크지 않아서 발생하는 현상이다.

$$\dot{\epsilon} = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta t} = \frac{\delta(t)}{L_0 \Delta t} \quad (3)$$

#### 4.2 동적 하중-변위/응력-변형률 선도

시험장치의 재현성을 알아보기 위해, 1.5 m 충격 낙하높이에서 충격 인장시험을 5회 반복하였다. 이로부터 획득한 경과시간에 따른 동적 하중신호

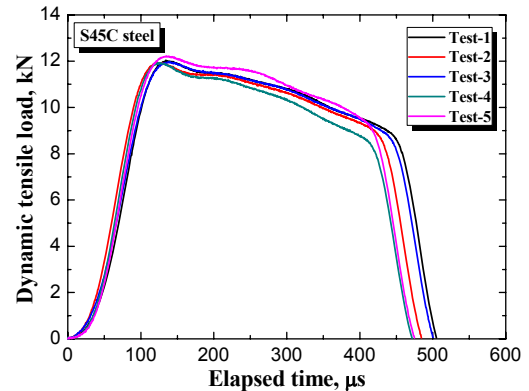
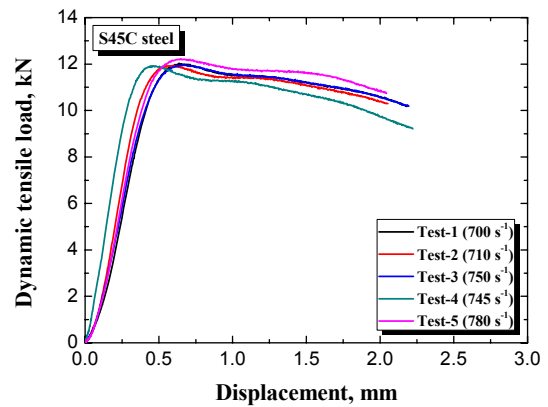
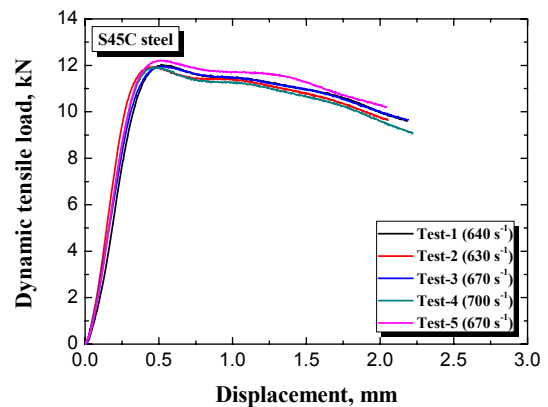


Fig. 6 Raw data signals of dynamic load for S45C steel during impact tensile testing



(a) Single laser displacement meter



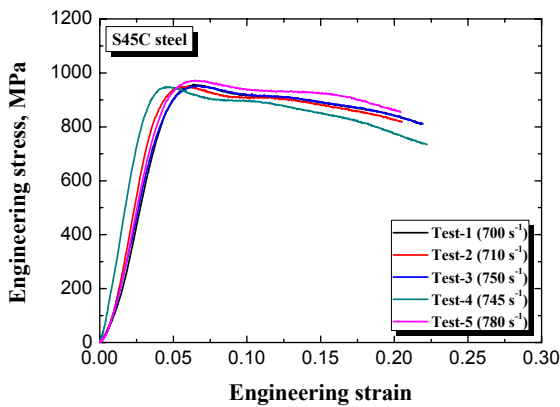
(b) Double laser displacement meters

Fig. 7 Comparison of load-displacement curves using single and double laser displacement meters

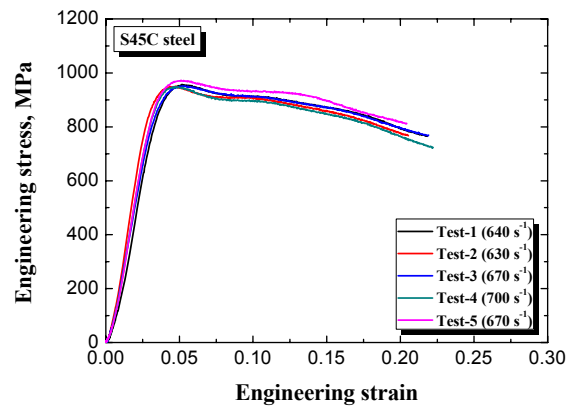
선도는 Fig. 6과 같다. Fig. 7(a)는 단일 변위계를 사용한 경우를, Fig. 7(b)는 이중 변위계를 사용하여 구한 평균 변위데이터를 사용한 경우의 하중-변위 선도를 보여주고 있다. 단일 변위계의 경우, 탄성역 기울기가 다소 다른 기울기를 갖는 선도로 보여주고 있는 반면, 이중 변위계를 사용한 경우는

**Table 2** Mechanical properties obtained using single and double displacement meters for S45C steel

Type		Test-1	Test-2	Test-3	Test-4	Test-5	Mean	Standard deviation
Single	Yield strength, MPa	795	816	764	836	797	801.6	24.0
	Strain-rate, s <sup>-1</sup>	700	710	750	745	780	737.0	28.9
Double (average)	Yield strength, MPa	811	836	840	836	826	829.8	10.5
	Strain-rate, s <sup>-1</sup>	640	630	670	700	670	662.0	24.8

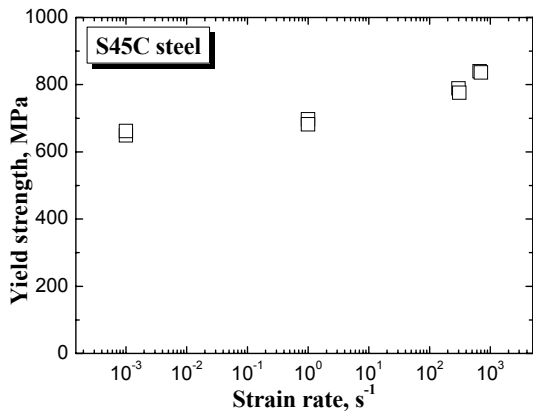


(a) Single laser displacement meter



(b) Double laser displacement meters

**Fig. 8** Comparison of nominal stress-nominal strain curves using single and double laser displacement meters



**Fig. 9** Strain-rate dependence of yield strength in S45C steel

거의 동일한 기울기를 나타내 이중 변위계로부터 평균한 변위신호를 사용한 경우, 재현성 있는 신뢰성 높은 하중-변위 선도를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7의 하중-변위 선도로부터 얻은 응력-변형률 선도를 Fig. 8에 나타내고 있다. 단일 변위계를 사용하였을 때, 탄성역 기울기의 차이로 인해 항복점의 위치가 달라져 항복강도가 다소 차이를 나타내는 반면, Fig. 8(b)와 같이 이중 변위계를 사용하게 되면 거의 동일한 선도를 나타내었다.

Fig. 8로부터 얻은 실험결과를 Table 2에 정리하

였다. 5회 시험결과의 표준편차는 이중 변위계를 사용한 경우가 단일 변위계를 사용한 경우보다 훨씬 줄어든 값을 나타내었다. 또한 준정적 인장시험 결과와 함께 변형률속도에 따른 항복강도를 Fig. 9와 같이 정리하였다. 변형률속도에 따라 항복강도가 증대하는 경화거동을 확인할 수 있고, 따라서 본 연구에서 구축한 낙추식 충격시험 장치를 사용하여 중 변형률속도역에서 재료의 인장 파괴거동 및 항복강도 등 동적 특성치를 높은 신뢰성을 가지고 구할 수 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 중 변형률속도역에서 충격 인장시험이 가능한 긴 출력봉을 갖는 낙추식 충격 인장시험 장치를 구축하였다.

동적 하중신호는 중 변형률속도역에서 출력봉의 길이를 길게함으로써, 충격인장시 나타나는 반사파의 간섭에 따른 영향 및 관성 효과에 의한 진동을 완전히 배제할 수 있었다. 또한 구축한 시험장치로부터 수직방향으로의 변위신호를 획득하기 위해, 이중 레이저 변위계를 설치하였다. 실험결과, 단일 변위계의 경우 탄성역 기울기의 차이로 인해 항복점의 위치가 달라져 항복강도가 다소 차이를 나타내었지만, 이중 변위계를 사용하게 되면 거의 동일

한 선도를 얻을 수 있었고, 단일 변위계를 사용한 경우보다 항복강도에 대한 표준편차가 훨씬 낮은 값을 나타내었다. S45C강은 중 변형률속도에서 준정적 경우보다 항복강도의 증가를 나타내었다.

과단부 관찰 결과, 준정적 및 충격 인장시험 모두 시험편 중앙에서 연성과괴의 특징인 넥킹과 함께 과단이 발생된 것을 확인할 수 있었다.

따라서 본 연구에서 구축한 낙추식 충격 인장시험 장치를 사용하여, 중 변형률속도역에서 인장 파괴거동 평가가 가능한 신뢰성 있는 장비임을 확인할 수 있었다.

### 후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방특화연구실 사업 UD110089GD의 일환으로 수행되었습니다. 지원에 감사 드립니다.

### 참고문헌 (References)

- (1) Boyce, B. L. and Dilmore, M. F., 2009, "The Dynamic Tensile Behavior of Tough, Ultrahigh-strength Steels at Strain-rates from  $0.0002 \text{ s}^{-1}$  to  $200 \text{ s}^{-1}$ ," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 36, No. 2, pp. 263~271.
- (2) Murr, L. E., 1987, *Metallurgical Effects of Shock and High-strain-rate Loading*, Elsevier Applied Science, England, T. Z. Blazynski Editor, pp. 1~46.
- (3) Meyers, M. A., 1994, *Dynamic Behavior of Materials*, New York, John Wiley & Sons.
- (4) Bleck, W. and Schael, I., 2000, "Determination of Crash-relevant Material Parameters by Dynamic Tensile Tests," *Steel Research*, Vol. 71, No. 5, pp. 173~178.
- (5) Regazzoni, G., Johnson, J. N. and Follansbee, P. S., 1986, "Theoretical Study of the Dynamic Tensile Test," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 53, No. 3, pp. 519~528.
- (6) Shin, H. S., Lee, H. M. and Kim, M. S., 2000, "Impact Tensile Behavior of 9% Nickel Steel at Low Temperature," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 24, No. 6, pp. 571~581.
- (7) Singh, N. K., Cadoni, E., Singha, M. K. and Gupta, N. K., 2011, "Dynamic Tensile Behavior of Multi Phase High Yield Strength Steel," *Material and Design*, Vol. 32, No. 10, pp. 5091~5098.
- (8) Huh, H., Kim, S. B., Song, J. H. and Lim, J. H., 2008, "Dynamic Tensile Characteristics of TRIP-type and DP-type Steel Sheets for an Auto-body," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 50, No. 5, pp. 918~931.
- (9) Bardelcik, A., Salisbury, C. P., Wells, M. A. and Worswik, M. J., 2010, "Effect of Cooling Rate on the High Strain Rate Properties of Boron Steel," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, No. 6, pp. 694~702.
- (10) Kim, H. J., Kim, C. M., Barlat, F., Pavlina, E. and Lee, M. G., 2013, "Nonlinear Elastic Behaviors of Low and High Strength Steels in Unloading and Reloading," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 562, pp. 161~171.
- (11) Lee, H. J., Song, J. H., Huh, H. and Park, S. H., 2007, "Dynamic Constitutive Equations of Auto-Body Steel Sheets with the Variation of Temperature (I)," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 31, No. 2, pp. 174~181.
- (12) Lee, H. J., Song, J. H., Huh, H. and Park, S. H., 2007, "Dynamic Constitutive Equations of Auto-Body Steel Sheets with the Variation of Temperature (II)," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 31, No. 2, pp. 182~189.
- (13) Shin, H. S., Bae, K. O., Kim, D. W., Park, L. J. and Kim, H. W., 2015, "Investigation of Dynamic Deformation Behaviors in Structural Steels at Intermediate Strain Rates using Newly Constructed Impact Tensile Test Apparatus," *International Journal of Impact Engineering*, Submitted.
- (14) ASTM E8-01, 2002, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, Annual Book of ASTM Standards: Section 3 – Metals Test Methods and Analytical Procedures, Vol. 3.01, West Conshohocken, PA: ASTM, pp. 60~103.
- (15) Shin, H. S. and Tuazon, B. J., 2015, "An Instrumented Drop-bar Impact Testing Apparatus for Investigating the Impact Fracture Behaviors of Structural Steels," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 84, No. 10, pp. 124~133.
- (16) Lee, S. H., Tuazon, B. and Shin, H. S., 2014, "Construction of Data Acquisition/Processing System for Precise Measurement in Split Hopkinson Pressure Bar Test," *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 566, pp. 554~559.
- (17) Tuazon, B. J., Bae, K. O., Lee, S. H. and Shin, H. S., 2014, "Integration of a New Data Acquisition/Processing Scheme in SHPB Test and Characterization of the Dynamic Material Properties of High-strength Steels Using the Optional form of Johnson-Cook Model," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 28, No. 9, pp. 3561~3568.