

# 연강 재질의 변형을 속도 민감도 특성 연구

## A Study on the Strain Rate Sensitive Behavior of Mild Steel



박종찬\*

\*현대자동차(주) 상용연구소 선임연구원

### 1. 서론

재질의 기계적 물성치는 구조물의 변형 특성을 결정짓는 가장 중요한 인자 중의 하나이다. 그러므로 적절한 방법으로 획득된 재질 물성치는 외부하중에 대한 구조 시스템의 거동을 이해하기 위한 필수적인 요소로 인식되고 있다. 금속 재질의 기계적 물성치 획득은 평판의 경우, 일반적으로 규정 시편을 이용한 인장 시험으로 이루어지며 정적 물성치에 대해서는 규격화된 시험에서 도출된 결과가 정리되어 있다. 반면에 변형률 속도(strain rate)에 영향을 받는 금속 재질의 동적 물성치는 시험방법과 조건이 까다롭고 시험 오차도 심하게 나타나므로 신뢰성 있는 결과 도출이 쉽지 않다. 그러나 차량의 차체를 구성하는 연강(mild steel) 재질은 일반적으로 변형률 속도에 매우 민감하므로<sup>1)</sup> 충돌이나 전복 등 급격한 동 하중이 작용하는 경우에는 신뢰성 있는 거동 예측을 위해 반드시 고려되어야 한다.

본 연구에서는 동 하중에 대한 연강 재질의 기계적 물성치를 획득하기 위해 인장 속도의 제어가 우수한 ESH servo-hydraulic test machine을 이용하였다. 일반적으로  $500\text{s}^{-1}$  이상의 높은 변형률 속도에 대한 재질의 물성치를 얻기 위해서는, striker의 충돌로 발생하는 충격파와 반사파의 위상차로 재질의 동적 특성을 얻는 Split Hopkinson Bar<sup>2)</sup>를 이용하지만 변형률 속도가  $100\text{s}^{-1}$  이하로 낮은 경

우에는 servo-hydraulic machine을 이용하는 것이 신뢰성 있는 결과를 얻는데 유리하다.

동 하중 시험을 통해서 획득한 데이터는 재질의 구성방정식(Constitutive Equation)상수의 산출에 이용되는데, 본 연구에서는 그 결과를 이용하여 연강 재질의 변형률 속도 민감도(strain rate sensitivity)와 변형률 경화(strain hardening)를 결합한 새로운 구성방정식을 도출하여 그 신뢰성을 시험 결과와의 비교를 통해 증명하였다.

### 2. 본론

#### 2.1 연강 재질의 동 하중 시험

연강의 기계적 물성치는 변형률 속도에 매우 민감한 것으로 알려져 있다. 일반적으로, 변형률 속도 민감도는 연강의 생산 과정에 의해 영향을 받게 되므로 동적 하중을 받는 구조물 구성에 사용되는 재질에 대한 동 하중 시험은 필수적으로 동일한 재질 시편을 이용하여 수행되어야 한다. 본 연구에서는 동 하중에 대한 연강 재질의 기계적 물성치 변화를 도출하기 위해 ESH servo-hydraulic test machine을 이용하여 4종의 연강 재질에 대한 시편 시험을 수행하였다.

표 1 Static material properties of mild steel specimens

| Material | 0.2% proof stress (MPa) | U.T.S. (MPa) | Elastic Modulus (GPa) | Ultimate Tensile Strain | Final Elong. (%) |
|----------|-------------------------|--------------|-----------------------|-------------------------|------------------|
|          | $\sigma_y$              | $\sigma_u$   | $E_e$                 | $\epsilon_u$            | $\epsilon_f$     |
| M1       | 192                     | 321          | 208.8                 | 0.235                   | 39.6             |
| M2       | 175.4                   | 311.6        | 208.4                 | 0.224                   | 41.6             |
| M3       | 278.9                   | 420          | 207.5                 | 0.21                    | 30.2             |
| M4       | 194.1                   | 316.5        | 215.3                 | 0.235                   | 40.6             |

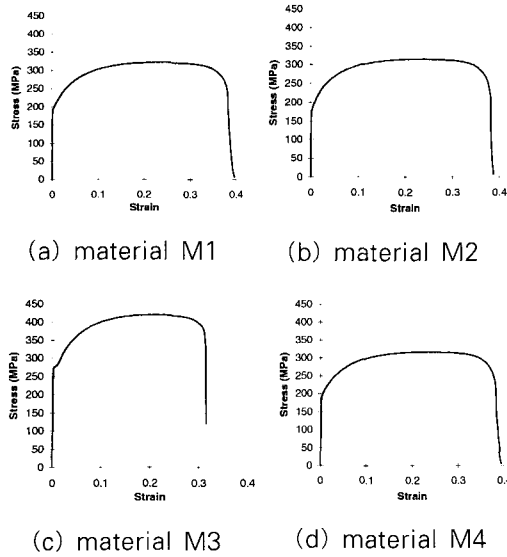


그림 1 Static nominal stress-engineering strain curves for mild steel specimens

시험에 이용된 시험기의 최대 램 속도는 10m/sec이므로 시편의 게이지 길이를 통상 50mm로 정하는 경우, 최대 약 200s<sup>-1</sup>의 변형률 속도를 얻을 수 있다. 본 시험에서는 변형률 속도 142s<sup>-1</sup>까지 측정하였으며, 더 높은 변형률 속도에 대해서는 Cowper-Symonds 구성 방정식을 이용하여 추정하였다. 통상 높은 변형률 영역에서는 변형률 변화에 대한 응력의 변화가 심하지 않으므로 구성 방정식에 의해 추정된 값에 대한 오차는 크지 않을 것으로 보인다. 더군다나 본 연구의 목적은 차량의 충돌이나 전복 등 낮은 속도의 동 하중에 대한 재료 거동을 이해하는 것이므로 매우 높은 변형률 속도에 대한 민감도 효과는 극히 국부적인 영

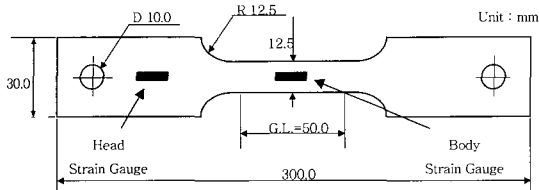


그림 2 Geometry of the specimen used in dynamic tensile tests

역으로 제한되게 된다.

시험 시편으로 사용된 연강은 모두 4종으로서 표 1과 같은 물성치를 갖고 있으며, 정적상태의 응력-변형률 선도는 그림 1에 나타나 있다. 동하중 시험 시편은 정 하중 시험 시편과 동일한 재질, 크기의 시편들을 사용하였으며, 그림 2와 같이 시험 시편 몸체부(body)와 머리부(head)에 단축 스트레인 게이지를 부착하여 변형 초기의 변형률과 시험 과정 동안의 하중 이력을 각각 측정하였다. 스트레인 게이지는 시편의 초기 굽힘에 의해 발생할 수 있는 축중 불일치(non-axiality)를 보상하기 위해 시편 양면의 동일한 위치에 부착하였다. 하중이 가해지는 시간에 대한 응력 변화는 시험기 내부에 장착된 로드 셀(load cell)로부터 측정된 하중-시간 곡선을 이용하여 도출될 수 있다. 그러나 높은 속도의 인장 시험에서는 시편의 불규칙한 강성(stiffness)영향으로 전체 하중-시간 곡선에서 바람직하지 않은 하중의 요동현상이 나타난다. 이러한 경우는 하중에 비해 덜 민감한 변위나 변형률을 시편 머리부에 부착된 게이지로 측정하여 그림 3의 점선과 같은 안정적인 응력-변형률 선도를 얻을 수 있다.

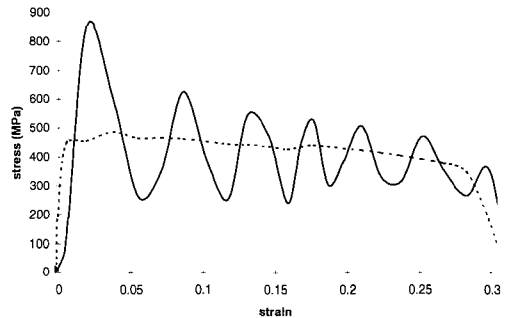


그림 3 Stress-strain curves at a high strain rate (M2;  $\dot{\epsilon} = 127s^{-1}$ )

— : stress from load cell data  
 ..... : stress from strain gauge data

시험의 변형률 속도는 ESH 시험기의 램 속도로 조정되므로 게이지 길이 범위 내의 전체적인 평균 변형률 속도는 시험기에 의해 얻을 수 있다. 그러나 시편을 고정하는 그립부의 미끌어짐 등으로 실제 시편 몸체 변형률 보다 큰 변형률이 측정될 수 있으므로 본 시험에서는 ZIMMER OHG 광학 카메라를 이용하여 시편 게이지 길이의 정확한 인장치를 측정하였다. 광학 카메라는 명암 표시기(indicator)를 이용하여 인장길이와 속도를 측정하므로 시편 머리부에 명암을 구분하기 위한 스트립을 부착하고 카메라 반대편에 광원을 위치하였다. 본 시험에 사용된 변형률 속도 범위는 대략 0.18s<sup>-1</sup>부터 142s<sup>-1</sup>까지다.

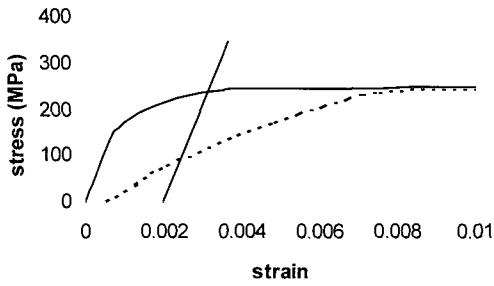


그림 4 Stress-strain curves for the yield stress region (M1;  $\dot{\epsilon} = 0.18s^{-1}$ )

----- : strain from strain gauge data  
 ———— : strain from ZIMMER data

비록 전체적인 변형율을 얻는데 광학 카메라가 유용하지만 매우 작은 변위에는 그리 민감하지 못하다. 따라서 시편 몸체의 스트레인 게이지에 측정된 데이터가 초기 상태의 응력-변형을 선도를 도출하는데 사용되었다.

그림 4에는 광학 카메라와 스트레인 게이지의 변형율 초기 상태 응력 변화를 비교하였다. 광학 카메라에서 측정된 탄성계수는 연강의 통상적인 값(205GPa)에 훨씬 못 미치지만 스트레인 게이지에 의해 측정된 값은 통상적인 값에 매우 근접해 있다. 그러므로 항복점이 불확실한 연강의 경우 스트레인 데이터를 이용하여 그림 4와 같이 0.2% proof stress를 항복 응력으로 대체할 수 있다.

2.2 동하중 시험 결과

각기 다른 변형율 속도에 대한 응력-변형율 선도는 연강 재질 M1, M2, M3, M4에 대해 각각 그림 5(a), (b), (c), (d)에 나타나 있다.

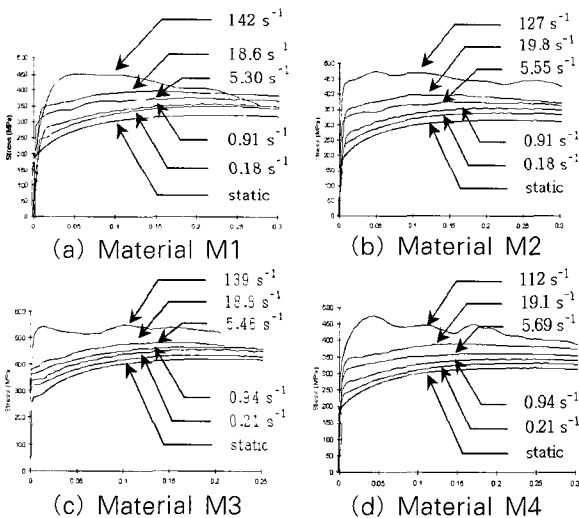


그림 5 Engineering stress-strain curves on various strain rates for mild steel

변형율 속도가 증가함에 따라 항복응력과 최대 인장응력은 모두 증가하지만 증가율은 서로 차이를 보인다. 즉, 최대 인장응력은 항복응력에 비해 변형율 속도에 따른 증가율이 작게 나타난다. 재질의 변형율 속도 민감도 효과를 일반화하기 위해 식(1)과 같이 Cowper-Symonds 구성방정식이 이용되었다.

$$\frac{\sigma'_o}{\sigma_o} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D}\right)^{\frac{1}{q}} \tag{1}$$

여기서,  $\sigma'_o$ 와  $\sigma_o$ 는 각각 동적 유동응력과 정적 유동응력을 나타내며  $D$ 와  $q$ 는 동하중 시험으로 얻을 수 있는 재질 상수이다.

식(1)의 양변에 로그를 취하면 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln \dot{\epsilon} = q \ln \left( \frac{\sigma'_o}{\sigma_o} - 1 \right) + \ln D \tag{2}$$

식(2)를  $x = \ln(\sigma'_o/\sigma_o - 1)$ ,  $y = \ln \dot{\epsilon}$ 로 놓으면 기울기  $q$ ,  $y$  축과의 접점  $\ln D$ 를 갖는 1차 방정식으로 변환된다. 그러므로 상수  $q$ ,  $D$ 는 그림 6과 같이 실험적인 방법으로 구할 수 있다. 그림 6(a)~(d)의 추세선(trend line)은 시험 데이터의 최소자승법(least square method)을 이용하여 구하였으며, 이 선도를 이용하여 상수  $q$ ,  $D$ 를 구하여 표 2에 나타내었다.

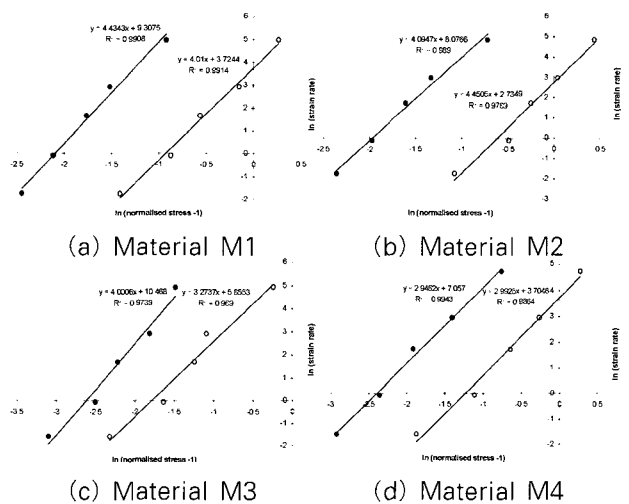


그림 6 Trend lines of the experimental results for the yield and ultimate tensile stresses for mild steel specimens.

- : experimental data for UTS
- : experimental data for yield stress

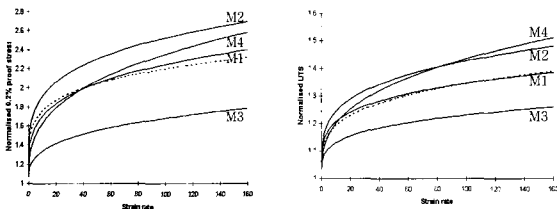
표 2의  $q$ 와  $D$ 를 식(1)에 대입하면 그림 7(a), (b)와 같이 변형율 속도에 대한 무차원 응력 변화를 알 수 있다. 그

림 7(a)와 (b)를 비교해 보면, 인장응력 보다는 항복응력에 대해 변형을 속도 민감도가 높음을 알 수 있다. 또한 항복강도가 낮은 재질일수록 민감도가 높아지는 경향을 보이고 있다.

표 2 Material constants of the constitutive equations for mild steel specimens

| Material | Material Constants |               |        |                     |
|----------|--------------------|---------------|--------|---------------------|
|          | 0.2% proof stress  |               | U.T.S. |                     |
|          | $q_y$              | $D_y(s^{-1})$ | $q_u$  | $D_y(s^{-1})$       |
| M1       | 4.01               | 41.4          | 4.43   | $1.1 \times 10^4$   |
| M2       | 4.45               | 15.4          | 4.09   | 3218                |
| M3       | 3.27               | 349           | 4      | $3.517 \times 10^4$ |
| M4       | 2.99               | 40.6          | 2.95   | 1161                |

일반적인 연강의 상수 값은 항복응력에 대해,  $q=5$ ,  $D=40.4s^{-1}$ 이며 인장응력에 대해,  $q=3.91$ ,  $D=6844s^{-1}$ 로 보고되고 있는데,<sup>3)</sup> 재질 M1의 변형을 속도 민감도는 이와 매우 유사하게 나타난다. 재질 M2와 M4는 일반적인 값보다 약간 높게 민감도가 나타나며, M3는 반대로 약간 낮게 나타난다. 압연강의 특성은 일반적으로 압연과정과 압연 방향에 의해 영향을 받으므로 동 하중 시험에서는 모두 동일한 조건을 갖는 시편을 사용하여야 한다.



(a) on the 0.2% proof stress (b) on the U.T.S.

그림 7 Influence of strain rate for mild steel specimens (Equation (1))

— : tested materials  
 ..... : reference material<sup>3)</sup>

그림 5와 같이 연강의 변형을 속도 민감도는 보통 변형을 속도가 증가함에 따라 커지게 되지만 재질 종류 뿐만 아니라 변형율의 범위에 따라 그 정도가 달라진다. 그림 7(a)에서 보면 재질 M2는 낮은 변형을 속도에서는 가장 높은 변형을 속도 민감도와 증가율을 나타내지만,  $10s^{-1}$  이상의 변형을 속도 범위에서는 증가율이 재질 M4의 증가율 보다 작아지게 된다. 이러한 경향은 더 높은 변형을 속도의 영역에 대한 재질 M4의 항복응력이 M2보다 커질 수 있음을 말한다. 그러나 변형을 속도가  $500s^{-1}$  이상인 영역에 대한 재질의 민감도를 낮은 변형을 속도 영역의 시험 결과로 추정하는 것은 오차를 유발할 가능성이 있으므로,

$500s^{-1}$  이상의 높은 변형을 속도 영역에 대한 변형을 속도 민감도는 Split Hopkinson Bar를 이용하여 도출하는 것이 보다 정확한 결과를 얻을 수 있는 방법이다.

### 2.3 변형을 경화의 영향

차량 충돌 등에 의해 구조물에서 발생한 높은 소성 변형을 문제의 경우에는 유동응력이 변형을 속도 뿐만 아니라 변형율에 의해서도 영향을 받게 된다. 이러한 변형을 속도 민감도에 대한 재질의 변형을 경화의 영향을 고려하기 위해 Jones<sup>4)</sup>는 식(3)과 같은 구성방정식을 제안하였다.

$$\frac{\sigma'_o}{\sigma_y} = f(\dot{\epsilon}, \epsilon) \cdot g(\epsilon) \quad (3)$$

여기서, 함수  $f(\dot{\epsilon}, \epsilon)$ 는 변형을에 대한 변형을 속도의 변화를 나타내는 것이고  $g(\epsilon)$ 는 정하중 시험에서 나타난 재질의 변형을 경화를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 Jones의 구성방정식에서 문제가 되는 Drucker의 안정공리 (Drucker's stability postulate)를 만족하기 위해 새로운 구성방정식을 아래와 같이 재 정립하였다.

재질의 변형을 경화를 지수 함수 형태로 나타내면 식(3)의 변형을 경화,  $g(\epsilon)$ 는 식(4)로 표현된다.

$$g(\epsilon) = \frac{\sigma'_o}{\sigma_y} = \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_y} \right)^{m_0} \quad (4)$$

여기서,  $\sigma_y, \sigma'_o, \epsilon_y, \epsilon$ 는 각각 정적 항복응력, 정적 유동응력과 각 응력에 대응되는 변형율을 말하며,

$m_0 = \frac{\ln(\sigma'_u/\sigma_y)}{\ln(\epsilon_u/\epsilon_y)}$ 는 정적 응력-변형율선도의 경화지수(hardening exponent)를 나타낸다. 동적 변형을 경화식도 정적인 경우와 유사한 방법으로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\sigma'_o}{\sigma'_y} = \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_y} \right)^m \quad (5)$$

여기서,  $\sigma'_y, \sigma'_o$ 는 각각 동적 항복응력과 동적 유동응력을 말하며  $m$ 은 동적 변형을 경화지수이다.  $m$ 은 변형을 속도의 함수이며,  $\dot{\epsilon} = 0$  (정하중 경우) 일 때,  $m = m_0$ 이다. 지수  $m$ 은 변형율에 독립적인 함수이므로 식(5)에 최대 인장 변형율,  $\epsilon_u$ 을 대입하여 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$m = \frac{\ln\left(\frac{\sigma'_u}{\sigma'_y}\right)}{\ln\left(\frac{\epsilon_u}{\epsilon_y}\right)} \quad (6)$$

식(5)로부터, 정적인 경우에 대한 동적 유동응력의비인 식(3)의  $f(\dot{\epsilon}, \epsilon)$ 는 식(7)과 같이 표현된다.

$$f(\dot{\epsilon}, \epsilon) = \frac{\sigma_o}{\sigma_y} = \frac{\sigma_y}{\sigma_y} \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_y} \right)^{(m-m_o)} \quad (7)$$

그러므로 변형을 속도 민감도와 변형을 경화를 결합한 구성방정식은 식(4)와 식(7)을 식(3)에 대입하여 식(8)과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\sigma_o}{\sigma_y} = \frac{\sigma_y}{\sigma_y} \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_y} \right)^m \quad (8)$$

식(8)을 이용하여 시험에 사용된 연강 재질의 동적 응력-변형을 선도를 여러가지 변형을 속도에 대해 그림 8과 같이 나타내었다. 이 선도들은 변형을 속도 민감도에 대한 변형을 경화 효과가 변형율이 증가할수록 감소함을 말해주고 있으며, Drucker의 안정 가설을 만족하고 있다.

### 2.4 최대 인장 변형율의 영향

그림 7에 나타나듯이 항복응력에 대한 변형을 속도 민감도가 인장응력에 대한 민감도 보다 크므로 소성계수(plastic modulus)는 변형을 속도가 증가함에 따라 감소하게 된다. 그러나 그림 5와 같이 시험결과에서는 최대 인장 변형율이 변형을 속도가 증가함에 따라 감소하므로 소성계수는 거의 일정하게 유지되는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 최대 인장 변형율과 변형을 속도의 이러한 관계를 위해 식(9)과 같이 제시하였다.

$$\frac{\epsilon_u}{\epsilon_u} = 1 - \frac{\ln(\dot{\epsilon} + 1)}{\ln B} \quad (9)$$

여기서,  $\epsilon_u$ ,  $\dot{\epsilon}_u$ 는 각각 정적, 동적 최대 인장 응력에 대응되는 변형율을 말하며 B는 시험결과에서 도출되는 재질 상수이다.

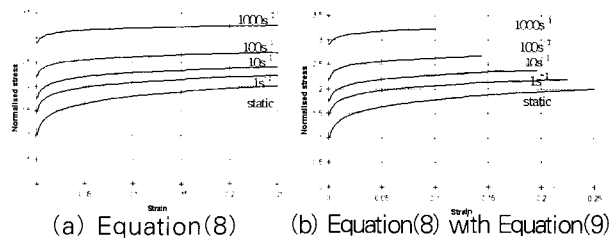
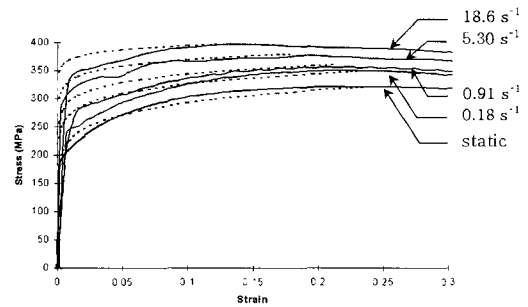


그림 8 Normalised stress-strain curves for various strain rates when nonlinear strain hardening is assumed

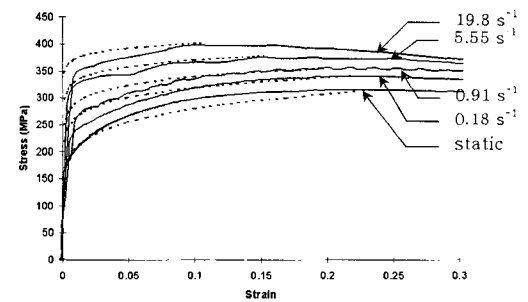
그림 8(a)는 최대 변형율이 변화하지 않는 경우에 대한 응력-변형율 선도를 식(8)을 이용하여 나타낸 것으로서 변형을 속도가 증가함에 따라 소성계수는 감소함을 보여

주고 있다. 반면에 그림 8(b)는 식(9)를 이용하여 변형을 속도의 증가와 관계 없이 소성계수가 거의 일정함을 보여주고 있다.

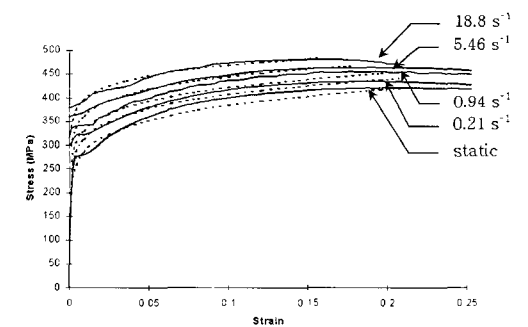
시험 결과와의 비교를 위한 예상 응력-변형을 곡선에서도 식(6)에서  $\epsilon_u$  대신  $\dot{\epsilon}_u$ 를 사용하면 그림 9 점선과 같은 값을 얻을 수 있으며 이러한 경우의 소성계수는 변형을 속도



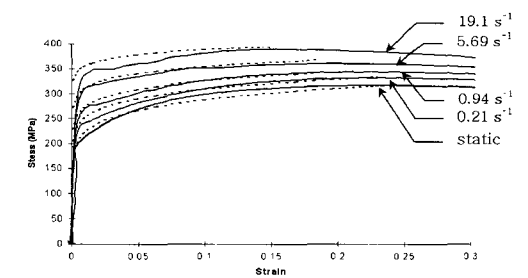
(a) Material M1



(b) Material M2



(c) Material M3



(d) Material M4

그림 9 Comparison of stress-strain curves between the predictions from Equation(8) with (9) and the experimental results. — : experiment ; - - - : prediction

에 관계없이 거의 일정하게 나타난다. 본 시험에서 사용된 재질 M1~M4에 대한 B의 값은 각각  $B=2383s^{-1}$ ,  $413s^{-1}$ ,  $77751s^{-1}$  와  $13078s^{-1}$  이다. 그림 9에서와 같이 식(8)과 (9)를 이용한 응력-변형을 관계에 대한 예측은 시험에 사용된 4종의 연강 재질 시편 시험 결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 단, 그림 9의 시험결과 선도는 광학 카메라를 이용하여 나타낸 것이므로, 그림 4에서 언급하였듯이 Body strain gauge data의 항복응력 값으로 표시하면 이론치와 보다 유사한 결과를 나타낼 것으로 보인다.

### 3. 결 론

차량을 구성하는데 사용되는 연강의 기계적 물성치는 정해진 크기의 시편을 이용한 인장 시험으로 구해진다. 그러나 정적 인장시험과는 달리 동적 인장시험은 측정이 매우 까다롭고 시편에 따른 편차도 비교적 크므로 정확한 값을 얻기가 쉽지 않다.

본 연구에서는 이러한 측정오차를 최소화하여 정확한 시험치를 획득하기 위해 빠른 동 하중변화에 비교적 안정적인 시편 머리부의 변형율을 측정하여 시간에 따른 응력 변화를 구하였으며, 광학 카메라와 시편 몸체부의 스트레인 게이지로 변형 초기부터 전 과정에 걸친, 시간에 따른 변형을 변화를 구하였다.

시험결과로부터 획득한, 각 변형율 속도에 대한 응력-변형을 선도들은 Cowper-Symonds 구성방정식의 상수를 구하는데 이용되었으며, 변형율 속도의 변화에 따른 각 변

형을 영역의 응력 변화를 이론적으로 산출할 수 있었다. 특히, 변형을 경화의 효과를 변형율 속도 민감도 식과 연계하는 새로운 구성 방정식을 제시하였으며, 시험 결과와의 비교를 통해 그 타당성을 입증하였다.

본 연구에서 제시한 구성방정식은 준 정적상태(quasi-static state)의 이론식과 연계하여, 충돌하중을 받는 박판 구조물의 붕괴 거동(collapse behavior) 모사를 위해 사용될 수 있으며 충돌이나 전복 등에 의한 차량의 이론적 동적 거동의 신뢰성을 향상시키는데 활용될 수 있다.

### 참 고 문 헌

1. Jones, N., 1997, Structural impact, Cambridge University Press, London, pp. 333~383
2. Kang, W.J., Cho, S.S., Huh, H. and Jung, D.T., 1997, "High Strain Rate Tensile Test of Sheet Metals with a New Tension Split Hopkinson Bar," KSMJ Journal (A), Vol. 21, No. 12, pp. 2209~2219
3. Abramowicz, W. and Jones, N., 1986, "Dynamic progressive buckling of circular and square tubes," Int. J. Impact Engng., Vol. 4, pp. 243~270
4. Jones, N., 1993, "Material properties for structural impact problems," In Advances in materials and their applications (Rao, P.R., Ed.), Wiley Eastern Limited, pp. 151~163