

예비변형률 효과를 고려한 고변형률 속도에서의 차체용 강판의 물성 특성

김 석 봉¹⁾ · 임 지 호¹⁾ · 허 훈¹⁾ · 임 종 대²⁾

한국과학기술원 기계공학과¹⁾ · 현대 · 기아 연구개발본부²⁾

Characterization of the Material Properties of Sheet Metal for Auto-body at the High Strain Rate Considering the Pre-strain Effect

Seokbong Kim¹⁾ · Jiho Lim¹⁾ · Hoon Huh¹⁾ · Jongdae Lim²⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 350-701, Korea

²⁾Research & Development Division for Hyundai-Kia Motor Company, Gyeonggi-do 445-706, Korea

(Received 22 March 2004 / Accepted 19 April 2004)

Abstract : Most auto-body members fabricated by the sheet metal forming process. During this process the thickness and material properties of the sheet metal are changed with the residual stress and plastic strain. This paper deals with the material properties of the sheet metal at the high strain rate considering the pre-strain effect. Specimens are selected from sheet metals for outer panels and inner members, such as SPCEN, SPRC45E, SPRC35R and EZNCD. The specimens are prepared with the pre-strain of 2, 5 and 10 % by tensile elongation in Instron 5583, which could be equivalent to the plastic strain in sheet metal forming. High speed tensile tests are then carried out with the pre-stained specimens at the strain rate of 1 to 100 /sec. The experimental result informs that the material properties are noticeably influenced by the pre-strain when the yield stress of the specimens is moderate as SPCEN, SPRC35R and EZNCD. The result also demonstrates that the ultimate tensile strength as well as the yield stress is increased as the amount of the pre-strain is increased.

Key words : Pre-strain effect(예비변형률 효과), Sheet metal(강판), High strain rate(고변형률 속도), High speed tensile tests(고속 인장시험)

1. 서론

일반적으로 금속재료의 동적 인장특성은 정적 인장특성에 비하여 큰 차이를 보이기 때문에 차량의 정확한 충돌 해석을 위하여 자동차 구조용 강판의 동적 인장특성을 확보하는 것이 중요하다. 그러나 동적 인장특성의 확보를 위한 대부분의 실험들은 강판의 성형공정 과정에서 발생하게 되는 성형효과

에 대한 충분한 고려 없이 제조된 차체용 강판에서 직접 시편이 채취되어 수행된다. 실제 자동차 차체를 구성하는 부재들은 대부분 박판 성형(sheet metal forming)공정을 통하여 만들어지며 이 과정에서 변형이 집중되어 부재의 두께가 국부적으로 얇아지거나 잔류 응력, 소성 변형률이 발생하게 된다. 따라서 이러한 예비변형률 효과를 고려한 동적 물성에 관한 연구가 수행되어야 하며 부재의 설계과정에 적용할 수 있는 방안이 모색되어야 한다. 준정적인 변형률 속도에서는 예비변형률 효과가 재료의 물성에

*To whom correspondence should be addressed.
ksb79@kaist.ac.kr

미치는 영향이 거의 없으며 또한 예비변형률을 부과하지 않은 응력-변형률 선도를 따르는 경향은 이미 여러 실험 결과에서 알려져 있다. 그리고 수천 /sec 이상의 고변형률 속도에서 예비변형률과 관련된 실험은 대부분 재료의 미세 조직과 관련하여 연구가 수행되었다. 그러나 수에서 수백 /sec의 중변형률 속도(intermediate strain rate) 영역에서 예비변형률 효과에 대한 연구는 실험의 난해함 때문에 거의 이루어지지 않은 상태이며 차체용 박판의 인장 시험과 관련해서는 거의 전무한 실정이다. 또한 실제 차체 충돌 시 발생하는 변형률 속도는 대부분 500 /sec 이하의 중변형률 속도이며 이 경우 재료의 조직 변화보다 항복응력, 최대인장강도 등의 재료에 대한 평가요소가 차체용 부재의 설계와 제작에 관련된 분야에서 더 중요시 되고 있다.

따라서 본 논문에서는 박판 성형 공정에서 발생하는 예비변형률 효과가 재료의 동적 인장특성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 시편에 2, 5, 10 %의 예비변형률을 부과한 후 유압식 고속 재료시험기(high speed material testing machine)를 이용하여 100 /sec 이하의 변형률 속도에서 실험을 수행하였다. 먼저 준정적에서 각각 148.5 MPa, 312.1 MPa의 항복응력을 가지는 SPCEN, SPRC45E를 압연방향으로 예비변형률을 부과한 후 0.003에서 50 /sec의 변형률 속도 범위에서 실험을 수행하였다. 이 결과를 바탕으로 변형률 속도에 민감한 재료에 대한 예비변형률 효과를 더욱 자세히 고찰하기 위하여 항복응력이 각각 191.3, 153.7 MPa인 SPRC35R, EZNC를 추가로 선정하여 0.003에서 100 /sec 범위에서 실험을 수행하였으며 이를 통하여 응력-변형률 선도를 얻고 예비변형률 효과가 항복응력, 최대인장강도 등의 동적 인장특성에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

2. 중변형률 속도에서의 예비변형률 효과 실험

중변형률 속도 범위에서 동적 물성을 얻기 위하여 지금까지 공압, 유압 및 기계적인 방법이 이용되어 왔으며 본 연구에서는 고압의 유압 실린더를 사용하여 시편을 인장하는 방식을 채택하였다. 이를

위하여 표점부의 균일한 변형을 유도할 수 있는 시편이 사용되었다.

2.1 유압식 고속 재료시험기

본 연구에서는 수백 /sec 이하의 중변형률 속도 범위에서 예비변형률 효과를 고려하여 박판의 동적 물성 실험을 하기 위하여 고속 재료시험기를 사용하였으며 시험기의 사진은 Fig. 1과 같다. 인장시험기는 가로 1000, 세로 600, 높이 2300 mm의 크기를 가지며 크로스헤드의 높이를 220 mm 씩 3단계로 조절할 수 있다. 실린더의 최고 속도는 4000 mm/sec이고 최대 하중은 30 kN, 최대 변위는 100 mm이다. 작동유체의 최고 운전 압력은 300 kg/cm²이고, 최고 유량은 240 l/min이며 작동유체를 압축시키기 위하여 45 kW 용량의 유압모터를 2개 사용하였다. 시험은 신호발생기(function generator)에서 원하는 입력신호를 서보제어기에 보내고, 서보제어기는 변위계에서 측정된 변위와 입력신호를 비교하여 유압밸브에 피드백을 보냄으로써 수행된다. 중변형률 속도에서의 물성실험은 최고 수 msec 이내에서 끝나기 때문에 동적 특성이 좋은 로드셀을 사용하여야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 고속 응답특성이 좋은 Kistler 사의 9051A 압전형 로드셀이 사용되었다.

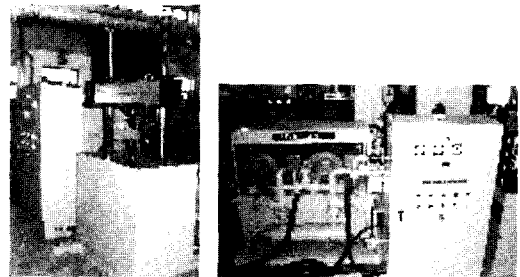


Fig. 1 High speed material testing machine

2.2 동적 인장시편의 결정

일반적으로 정적실험의 경우 ASTM, KS, JIS 등에서 실험 방법뿐만 아니라 실험에 사용되는 시편의 종류, 형상, 조건 등에 관하여 규정하고 있지만 고속 인장실험의 경우에 시편에 대한 이러한 규정이 명시되어 있지 않다. 따라서 중변형률 속도범위에서 인장실험을 수행하기 위하여 실험장치에 적합

한 시편의 결정이 필요하게 된다. 이를 위하여 본 논문에서는 여러 형상 인자를 고려하여 유한요소해석에 의하여 결정된 시편이 사용되었다.⁶⁾

시편은 변형의 대부분이 표점부에서 이루어져야 하며 곡률반경에 의한 응력집중 없이 변형량이 균일하여야 한다. 박판 인장시편의 형상인자는 표점부의 길이(L), 폭(W)과 필렛부의 반경(R)으로 크게 나눌 수 있으며 이때 표점부의 길이가 증가할수록 측정변위의 오차가 감소하며 시편의 변형률 분포가 균일하게 발생한다. 하지만 관성에 의하여 시편이 균일하게 변형하지 않고 구동부 쪽에 변형이 집중할 수 있다. 폭의 경우 크기가 감소할수록 측정변위의 오차가 감소하고 변형률의 분포가 균일하여 지지만 실험상의 오차가 증가하며 필렛부의 반경의 경우 그 길이가 감소할수록 측정변위의 오차가 감소하지만 응력집중이 발생하는 단점이 있다. 따라서 이상과 같은 형상인자의 영향을 고려하여 본 논문에서 사용된 중변형률 속도에서의 인장 시편은 L=20mm, W=6mm, R=6mm(L20W6R6)과 L=30mm, W=6mm, R=6mm(L30W6R6)이며 준정적 실험에서의 L=50mm, W=10mm, R=10mm(L50W10R10) 시편과 함께 총 3개의 시편이 사용되었으며 각 시편의 형상은 Fig. 2와 같다.

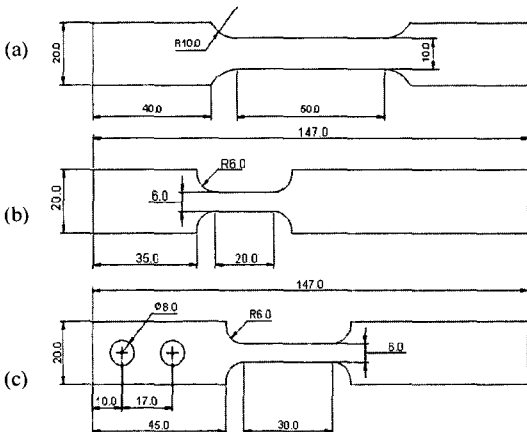


Fig. 2 Schematic description of specimens: (a) L50W10R10; (b) L20W6R6; (c) L30W6R6

2.3 예비변형률 효과 실험

예비변형률 효과가 동적 인장특성에 미치는 영향

의 유무에 대한 고찰이 필요하며 이를 위하여 재료의 물성 중에서 변형률 속도에 민감하게 영향을 받는 인자로 준정적에서의 항복응력을 고려하여 SPCE, SPRC45E, SPRC35R, EZNCD에 대하여 실험을 수행하였다. 각 재료에 대한 정적 실험에서의 물성은 Table 1과 같다. 먼저 항복응력의 차이가 나는 재료인 SPCE와 SPRC45E를 선정하여 예비변형률 효과의 정도를 고찰하였으며 이를 통하여 항복응력이 비교적 작은 재료에 대하여 예비변형률이 큰 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 이를 바탕으로 항복응력이 200 MPa 이하인 SPRC35R, EZNCD를 추가적으로 선정하여 예비변형률 효과에 대한 연구를 수행하였다. 각 재료에 대하여 정적 인장시험기(Instron 5583)를 사용하여 2, 5, 10%의 예비변형률을 부과한 후 유압식 고속 재료시험기를 사용하여 50 또는 100 /sec 이하의 변형률 속도에서 실험을 수행하였다. 다양한 변형률 속도에 적합하게 유압 장치의 속도를 변화시켰으며 각 변형률 속도마다 3에서 5개의 시편이 사용되었다.

Table 1 Material properties from static test

Material	Thickness (mm)	Yield stress(MPa)	Ultimate stress(MPa)	Elongation (%)
SPCEN	0.70	148.5	295.1	60.7
SPRC45E	1.20	312.1	465.0	45.8
SPRC35R	1.40	191.3	359.8	44.3
EZNCD	1.98	153.7	307.6	54.4

3. 예비변형률 효과 실험 결과

3.1 실험 결과

3.1.1 SPCE

SPCE는 준정적에서 148.5 MPa의 비교적 낮은 항복응력을 가진다. 이 재료에 5, 9 %의 예비변형률을 압연방향으로 부과한 후 0.003, 1, 10, 20, 50 /sec의 변형률 속도에서 인장실험을 수행하였다. 시편은 준정적실험과 중변형률 속도 실험에 대하여 각각 L50W10R10, L20W6R6이 사용되었다. 예비변형률을 부과한 후 각 변형률 속도에 대하여 실험한 후에 얻어진 응력-변형률 선도는 Fig. 3과 같으며 여기서 준정적인 변형률 속도와 1 /sec의 변형률 속도의

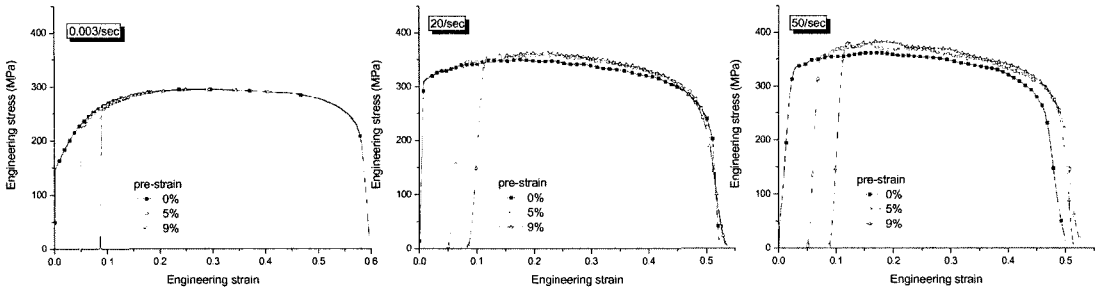


Fig. 3 Stress-strain curve of SPcEN with pre-strain effect

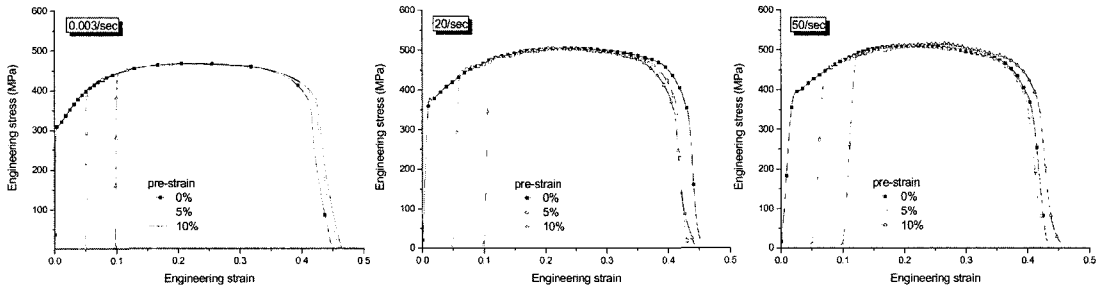


Fig. 4 Stress-strain curve of SPrc45E with pre-strain effect

경우에는 예비변형률 효과가 재료의 동적 거동에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 그러나 10 /sec 이상의 변형률 속도에서 항복응력과 최대인장강도가 증가하는 현상이 관찰되었다.

3.1.2 SPrc45E

SPrc45E는 준정적에서 312.1 MPa의 높은 항복응력을 가진다. 이 재료에 5, 10 %의 예비변형률을 부과한 후 0.003, 1, 10, 20, 50 /sec의 변형률 속도에서 인장실험을 수행하였다. 시편은 준정적실험과 중변형률 속도 실험에 대하여 각각 L50W10R10, L20W6R6이 사용되었다. 예비변형률을 부과한 후 각 변형률 속도에 대하여 실험한 후에 얻어진 응력-변형률 선도는 Fig. 4와 같으며 준정적인 경우와 50 /sec 이하의 변형률 속도에서 예비변형률이 재료의 동적 인장특성에 미치는 영향이 관찰되지 않았다.

3.1.3 SPrc35R

이상의 두 실험을 통하여 예비변형률 효과는 항복응력이 비교적 낮은 재료에 대하여 항복응력과 최대인장강도 등의 물성에 영향을 준다고 판단하였다. 이에 대한 심도 있는 고찰을 위하여 191.3 MPa의 항복응력을 가지는 SPrc35R을 추가로 선정하여

예비변형률과 관련된 실험을 수행하였다. 각 시편에 2, 5, 10 %의 예비변형률을 부과한 후 5, 100 /sec의 변형률 속도를 추가하여 고속 인장실험을 수행하였다. 이 재료의 경우 준정적 실험과 중변형률 속도에 대하여 동일하게 L30W6R6 시편이 사용되었다. 예비변형률을 부과한 후 각 변형률 속도에 대하여 얻어진 응력-변형률 선도는 Fig. 5와 같으며 여기서 10 /sec 이상의 변형률 속도에서 항복응력과 최대인장강도가 증가하는 현상이 관찰되었다.

3.1.4 EZncD

EZncD는 차체용 박판 금속의 하나로서 비교적 낮은 항복응력을 가지므로 변형률 속도에 민감한 재료라 할 수 있다. 따라서 예비변형률 효과의 영향을 고찰하기에 적절한 재료이며 이를 위하여 2, 5, 10 %의 예비변형률을 부과한 후 100 /sec 이하의 변형률 속도에서 고속 인장실험을 수행하였다. 각 변형률 속도에 대하여 실험한 후에 얻어진 응력-변형률 선도는 Fig. 6과 같으며 여기서 1 /sec 이상의 변형률 속도에서 항복응력과 최대인장강도가 증가하는 현상이 관찰되었다. 이는 앞서 실험이 수행된 SPcEN과 SPrc35R의 동적 거동과 유사하며 이를 통하여 예비변형률 효과는 변형률 속도에 민감한

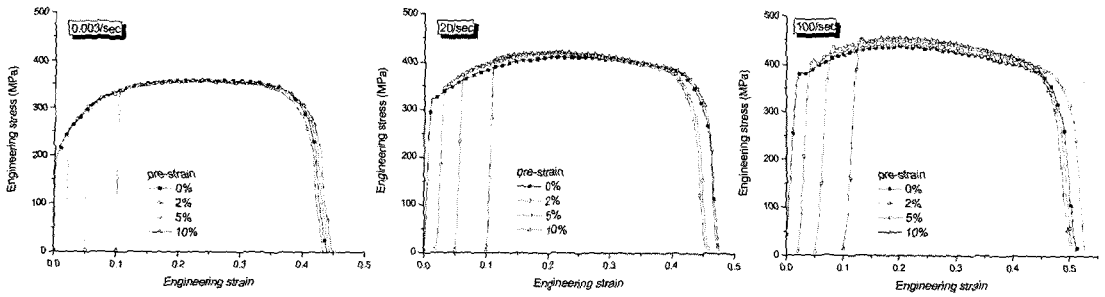


Fig. 5 Stress-strain curve of SPRC35R with pre-strain effect

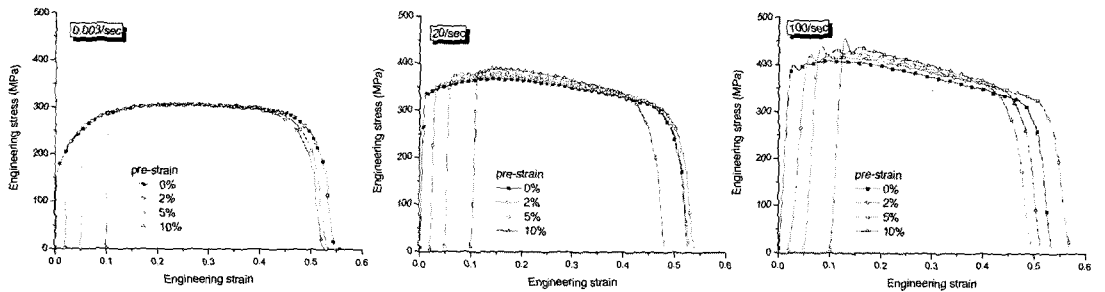


Fig. 6 Stress-strain curve of EZNCD with pre-strain effect

차체용 강판의 동적 인장특성에 영향을 준다고 할 수 있다.

3.2 예비변형률 효과에 의한 재료의 동적 물성 변화

3.2.1 항복응력의 변화

각 예비변형률 부과량에 대하여 변형률 속도에 따른 항복응력을 관찰하였으며 Fig. 7과 같이 정리하였다. 각 재료에 대하여 SPCEN, SPRC35R, EZNCD의 경우 예비변형률을 부과한 선도의 항복응력이 예비변형률을 부과하지 않은 선도의 예비변형률 지점(ref.)에서의 상당응력에 비하여 증가하는 경향을 보인다. 이때 SPCEN, SPRC35R은 10 /sec, EZNCD는 1 /sec 이상의 변형률 속도에서 항복응력이 크게 측정되었다. 그러나 SPRC45E의 경우 변형률 속도의 증가에 따른 재료의 동적 거동과 관련된 예비변형률 효과가 거의 관찰되지 않았다.

3.2.2 최대인장강도의 변화

변형률 속도의 증가에 따라서 예비변형률 효과가 최대인장강도에 미치는 영향을 관찰하였으며 Fig. 8과 같이 정리하였다. 예비변형률이 부과된 경우

SPCEN, SPRC35R은 10 /sec, EZNCD는 1 /sec 이상의 변형률 속도에서 부과되지 않은 경우와 비교하여 최대인장강도가 증가하였음을 알 수 있다. 특히 Fig. 9를 통하여 예비변형률의 부과량이 2에서 10%로 점차 증가함에 따라 최대인장강도가 점차 커지는 경향을 살펴볼 수 있다. 여기서 재료와 예비변형률 부과량에 따라 인장강도가 약 2에서 5% 이상으로 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 그러나 SPRC45E의 경우 최대인장강도와 관련하여 예비변형률 효과의 영향이 관찰되지 않았다.

4. 결론

예비변형률 효과가 중변형률 속도에서 차체용 강판의 동적 인장특성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 각 재료에 10% 이하의 예비변형률을 부과하여 유압식 고속 재료시험기를 이용하여 100 /sec 이하의 변형률 속도에서 시험을 수행하였다. 본 실험을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) SPCEN, SPRC35R, EZNCD와 같이 정적에서의 항복응력이 낮은 강판은 예비변형률을 부과한 선도의 항복응력이 부과하지 않은 선도의 상당

예비변형을 효과를 고려한 고변형을 속도에서의 차체용 강판의 물성 특성

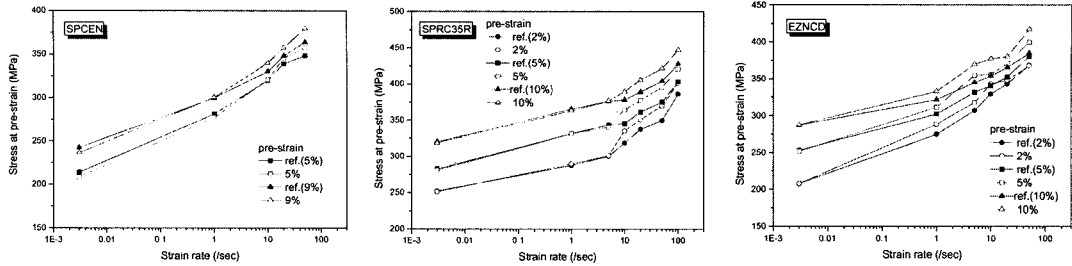


Fig. 7 Stress at pre-strain for strain rate with pre-strain effect

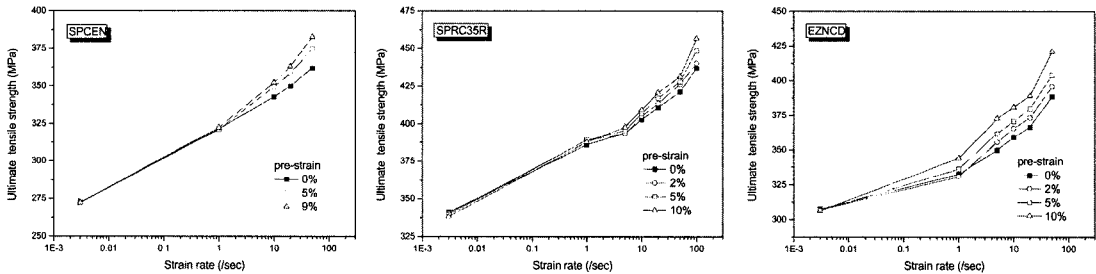


Fig. 8 Ultimate tensile strength for strain rate with pre-strain effect

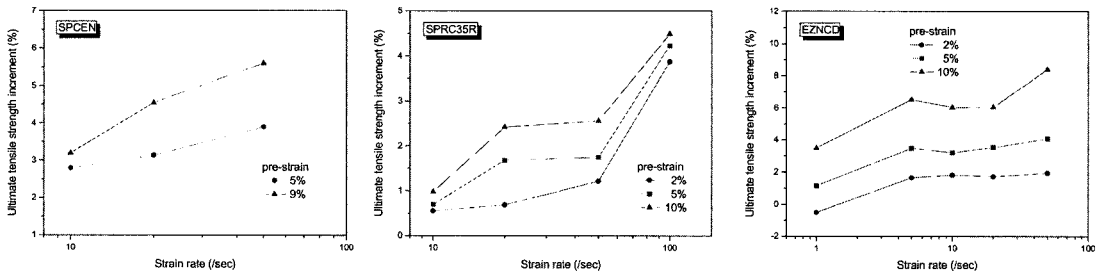


Fig. 9 Ultimate tensile strength increment for strain rate with pre-strain effect

응력에 비하여 값이 증가한다. 그러나 고강도 강판인 SPRC45E의 경우 예비변형을 효과의 영향은 관찰되지 않았으며 예비변형을 부과하지 않은 응력-변형률 선도를 그대로 따르는 것으로 관찰되었다.

- 2) SPCEN, SPRC35R, EZNCD의 경우 예비변형을 부과한 선도의 최대인장강도는 부과하지 않은 선도에 비하여 값이 증가하였다. 또한 예비변형을 부과량이 커짐에 따라 최대인장강도가 일정한 경향을 가지며 증가하는 현상을 관찰하였다.
- 3) 예비변형을 효과는 고강도 차체용 강판의 경우 동적 인장특성에 거의 영향을 주지 않는다. 그러

나 강도가 낮은 강판의 경우에는 항복응력과 최대인장강도에 영향을 주며 예비변형을 부과하지 않은 선도에 비하여 그 값이 증가하는 경향을 보인다. 따라서 이러한 강판의 경우 차체용 부재의 해석에 예비변형을 효과가 고려된 동적 물성을 적용한다면 더욱 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이다.

References

- 1) J. L. Raphanel, J.-H. Schmitt, "Effect of a Prestrain on the Subsequent Yielding of Low Carbon Steel Sheets: Experiments and Simu-

- lations," *Int. J. of Plasticity*, Vol.2, pp.371-378, 1986.
- 2) K. Ishikawa, S. Tanimura, "Strain Rate Sensitivity of Flow Stress at Low Temperatures in 304N Stainless Steel," *Int. J. of Plasticity*, Vol.8, pp.947-958, 1992.
 - 3) K. Miura, S. Takagi, T. Obara, S. Tanimura, "High Strain Rate Deformation of High Strength Sheet Steels for Automotive Parts," *Steel Sheet and Steel Bar Products and Processing for Automotive Applications*, pp. 23-30, 1998.
 - 4) H. Qui, M. Enoki, "Effect of Strain Rate and Plastic Pre-strain on the Ductility of Structural Steels," *ISIJ International*, Vol.39, No.9, pp. 955-960, 1999.
 - 5) W.-S. Lee, C.-F. Lin, "Effects of Prestrain and Strain Rate on Dynamic Deformation Characteristics of 304L Stainless Steel Part1-Mechanical Behavior," *Material Science and Technology*, Vol.18, pp.869-876, 2002.
 - 6) J. H. Lim, H. Huh, "Dynamic Material Tests of Steel Sheets for an Auto-body Using the High Speed Material Testing Machine," *KSAE, Fall Conference Proceeding*, Vol.2, pp.1525-1530, 2002.