

◆ 특집 ◆ 최신 정밀 설계재료 기술 I

## 결정소성학 모델과 손상 모델을 이용한 박판소재의 네킹 예측

### Prediction of Necking in Tensile Test using Crystal Plasticity Model and Damage Model

김종봉<sup>1,✉</sup>, 홍승현<sup>2</sup>, 윤정환<sup>3</sup>  
Jong-Bong Kim<sup>1,✉</sup>, Seung-Hyun Hong<sup>2</sup>, and Jeong Whan Yoon<sup>3</sup>

1 서울과학기술대학교 기계·자동차공학과 (Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul Nat. Univ. of Sci. Tech.)

2 현대기아자동차 연구소 박판개발팀 (Sheet Metal Development TFT, Hyundai Motor Company and Kia Motors Corporation)

3 Department of Engineering & Industrial Sci., Swinburne Univ. of Technol., Australia

✉ Corresponding author: jbkim@seoultech.ac.kr, Tel: 02-970-6434

Manuscript received: 2012.6.4 / Accepted: 2012.6.12

*In order to predict necking behaviour of aluminium sheets, a crystal plasticity model is introduced in the finite element analysis of tensile test. Due to the computational limits of time and memory, only a small part of tensile specimen is subjected to the analysis. Grains having different orientations are subjected to numerical tensile tests and each grain is discretized by many elements. In order to predict the sudden drop of load carrying capacity after necking, a well-known Cockcroft-Latham damage model is introduced. The mismatch of grain orientation causes stress concentration at several points and damage is evolved at these points. This phenomenon is similar to void nucleation. In the same way, void growth and void coalescence behaviours are well predicted in the analysis. For the comparison of prediction capability of necking, same model is subjected to finite element analysis using uniform material properties of polycrystal with and without damage. As a result, it is shown that the crystal plasticity model can be used in prediction of necking and fracture behavior of materials accurately.*

Key Words: Necking (네킹), Crystal Plasticity (결정소성학), Grain Orientation (결정립 방위), Grain Texture (결정립 집합 조직)

#### 1. 서론

박판성형 공정에서 네킹과 파단의 예측은 공정 및 부품의 강건 설계를 위해 매우 중요하다. 특히 박판 소재의 점진성형공정 (Incremental sheet metal forming) 에서는 네킹에서부터 파단까지의 변형이 성형성을 예측하는데 중요하다. 박판의 성형성 예측에 가장 많이 그리고 중요하게 이용되는 것이 성형한계도<sup>1-3</sup> (Forming limit diagram, FLD)이다. 일반적인 스탬핑 공정에서 네킹까지의 변형율과 파단까지의 변형율은 거의 비슷하게 측정이 된다. 왜

냐하면, 네킹부터 파단까지의 변형은 매우 국부적으로 발생하고, 변형율은 측정을 위한 그리드 (Grid)에서의 평균으로 측정이 되기 때문이다. 하지만, 박판소재의 점진성형공정에서는 일반적인 방법으로 구한 성형한계도에 기술된 파단 변형율보다 큰 변형율까지 성형이 되는 것을 알 수 있다.<sup>4,5</sup> 스탬핑과 같은 성형공정에서는 넓은 영역에 걸쳐 가해지는 응력에 의해 전체적으로 성형이 되고, 점진성형에서는 공구가 접촉하는 국부적인 영역에서만 성형하중이 가해지고 그 부분에서만 성형이 이루어지기 때문에 사료된다. 이와 같이

변형 미케니즘이 다른 공정에서도 일관되게 성형성을 예측하기 위해서는 네킹과 파단에 대한 근본적인 분석이 필요하다.

본 연구에서는 네킹과 파단의 발생 미케니즘을 분석하기 위해 결정소성학 모델과 손상모델을 유한요소 해석에 적용하였다. 균일 물성을 이용하는 인장시험 해석에서는 네킹의 발생을 예측할 수 없다. 네킹의 발생을 예측하기 위해 초기 결함을 이용할 수 있지만, 이 방법을 통해서도 정확하게 네킹을 예측하기는 어렵다. 본 연구에서는 재료의 결정립간 방위의 불일치로 인한 응력 집중이 네킹을 유발할 수 있다고 생각하였다. 그래서 각 결정립을 여러 개의 요소로 분할하고 각 결정립 내의 요소에는 동일한 방위를 주어 해석을 수행하였다. 이와 같은 해석을 위해서 결정 소성학 모델을 도입하였다. 결정 소성학 모델은 소재의 이방성 거동을 관찰하기 위해 광범위하게 적용이 되어 왔다. Yoon 등<sup>6</sup>은 정방형 집합조직 (Cube texture)을 가지는 알루미늄 합금의 이방성 거동을 연구하였고, Choi 등<sup>7</sup>은 마그네슘 합금의 결정립계 사이에서의 응력집중에 대해 연구하였다. 결정립 방위를 할당하기 위해 EBSD (Electron backscatter diffraction) 데이터를 이용하였다. Dao 와 Li<sup>8</sup>는 굽힘 변형에서 발생하는 균열의 발생을 예측하였다. Ko 등<sup>9</sup>은 Ti-6Al-4V 소재의 프레팅 피로 균열을 결정소성학 모델을 이용하여 해석하여 재료의 마이크로 구조가 프레팅 피로에 미치는 영향을 파악하였다. Ha 와 Kim<sup>10</sup>은 속도 독립적 (Rate independent) 결정소성 모델과 속도 의존적 (Rate dependent) 결정소성 모델의 결과를 비교하였다.

인장 시험에서 네킹 발생 후 인장 하중이 급격하게 감소한다. 이것은 네킹 발생 후에 단면적이 줄어드는 원인도 있지만, 재료가 손상이 되기 때문이기도 하다.<sup>11</sup> Nielsen 과 Tvergaard<sup>11</sup>는 수정된 Gurson 손상 모델<sup>12</sup>을 이용하여 마찰열을 이용한 접합판재의 네킹과 파단을 분석하였다. Zhang 등<sup>13</sup>은 연성과 피 과정을 결함 생성 (Void nucleation), 결함 성장 (Void growth), 그리고 결함의 합체 (Void coalescence)로 모델링하고 각 모델의 계수를 실험 결과를 이용하여 찾았다. 본 연구에서는 단순하면서 많이 사용되는 Cockcroft-Latham 손상모델<sup>14</sup>을 적용하였다.

결정소성학 모델과 손상모델을 인장시험의 유한요소 해석에 적용하여 결함의 발생, 결함의 성장, 그리고 결함의 합체를 초기 결함의 도입 없이 해석할 수 있었다. 또한 네킹의 발생 과정도 해석

을 통해서 자세히 관찰할 수 있었다. 그리고, 다결정 균일 물성을 가지는 균일 재료로 해석을 수행하여 네킹 해석 결과를 비교하였다.

## 2. 해석 모델

해석은 인장시험 시편에 대해 수행하였다. Kim 등<sup>15</sup>이 이미 이 문제를 해석하였다. 본 연구에서는 그 연구의 방법과 결과를 보다 자세히 기술하고 다결정 균일 물성으로 해석한 결과와 비교 분석하고자 한다. 결정소성학 모델을 이용한 본 해석에서는 결정립 각각이 여러 개의 요소로 분할되기 때문에 해석 메모리와 시간의 제약으로 인장시험 전체를 해석할 수 없었다. 그래서 Fig. 1에 보인 것과 같이 시편의 일부분에 대해서만 해석을 수행하였다. 해석 영역의 위와 아래 면에 인장 변위 조건을 적용하였고, 왼쪽 면은 소재의 연속성을 고려해서 x 방향 변위를 고정하였다.

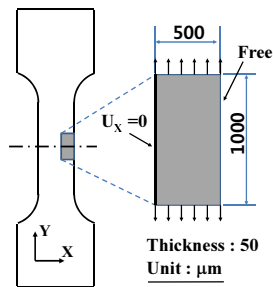


Fig. 1 Definition of analysis domain and boundary conditions for tensile test

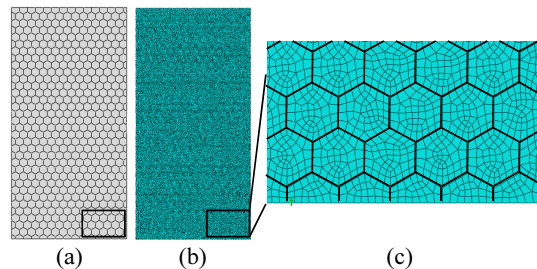


Fig. 2 (a) Grain shapes, (b) element discretization, and (c) detailed view of element shape

해석 시편을 Fig. 2(a)에 보인 것과 같이 결정립으로 영역을 분할하였다. 결정립은 정육각형 모양으로 하였고, 크기는 약 40  $\mu\text{m}$  (최대 대각선)로 하였다. 실제의 결정립 형상과 크기는 다르지만,

본 연구에서는 결정립 형상과 크기가 균일하다고 가정하고 분석을 수행하였다. 각각의 결정립은 Fig. 2(b)에 보인 것과 같이 약 45 개의 요소로 분할하였다. 분할된 요소를 잘 보이게 Fig. 2(c)에 확대하여 도시하였다.

사용된 소재는 알루미늄 6022-T4 이고, 응력-변형을 물성은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 444.6 (\bar{\epsilon} + 0.002)^{0.257} \quad (1)$$

압연 방향의 90 도 방향의 시편으로 얻은 최대 인장강도는 195.7 MPa 이고 균일 연신율은 23%, 과단까지 총 연신율은 28%이다. 다결정 균일 재료 해석에는 식(1)의 관계식을 사용하였고, 결정소성학 모델을 이용한 해석에서는 슬립 시스템 (Slip system)에서 슬립에 대한 저항 관계식으로 Taylor 인자를 구해서 수정한 관계를 이용하였다. Taylor 인자는 몇 번의 사전 해석을 통해서 2.253 으로 결정하였고, 슬립에 대한 응력-변형을 관계식을 다음과 같이 수정하여 이용하였다.

$$\bar{\sigma}_s = 197.3 (\epsilon + 0.002)^{0.257} \quad (2)$$

### 3. 해석 결과

#### 3.1 다결정 균일물성을 이용한 해석

다결정 균일 물성을 이용한 해석에서는 네킹이 발생하지 않는다. 네킹을 유도하기 위해 시편의 중앙에 인위적으로 그루브 형태의 결함을 주고 해석을 수행하였다. 그루브 크기  $d/w=1/500, 7/500, 12/500$  ( $d$ =그루브 깊이,  $w$ =시편폭) 의 세가지 경우와 그루브가 없는 경우에 대해 해석하였다. 해석은 손상이 고려되지 않은 내연적 (Implicit) 해석과 손상을 고려한 외연적 (Explicit) 해석 두 가지에 대해 수행하였다. 결과의 정확한 비교를 위해 요소 형상은 결정소성학 모델에 이용된 형상 그대로 사용하였다.

Fig. 3 은 손상모델 없이 내연적 방법으로 40% 까지 인장 해석한 결과를 보여준다. 그루브 없는 Fig. 3(a)는 0.34의 균일한 변형율이 얻어졌고, 그루브 깊이가 커짐에 따라 그루브로부터 45 도 방향으로 변형율이 커지기는 하지만 변형이 집중되어 네

킹으로까지는 전개되지 않고 있다. 넓은 영역에서 변형이 일어나고 있기 때문이다.

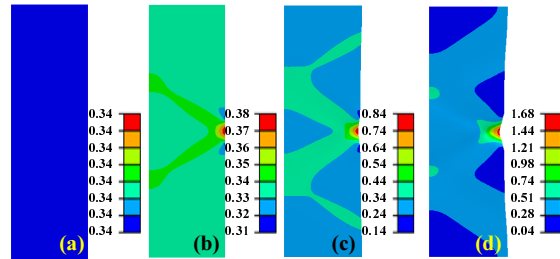


Fig. 3 Effective plastic strain distributions when  $\epsilon_{2,g}=0.4$  (implicit, without damage): (a)  $d/w=0$ , (b)  $d/w=1/500$ , (c)  $d/w=7/500$ , (d)  $d/w=12/500$

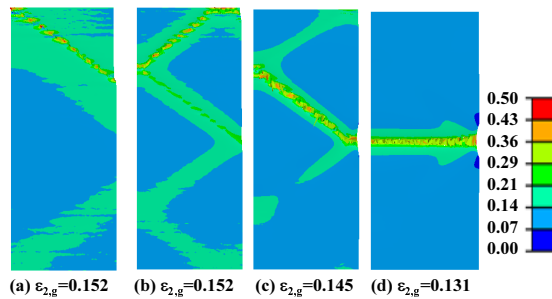


Fig. 4 Effective plastic strain distributions when  $\epsilon_{2,g}=0.4$  (explicit, with damage): (a)  $d/w=0$ , (b)  $d/w=1/500$ , (c)  $d/w=7/500$ , (d)  $d/w=12/500$

Fig. 4 는 손상을 고려하여 외연적 방법으로 해석한 결과이다. 손상 모델은 ABAQUS<sup>17</sup> 에서 제공하는 Johnson-Cook 모델을 이용하였고 이용된 모델의 계수로는  $C_1=0.07, C_2=0.07, C_3=0.003$  을 이용하였다. 실험 결과를 이용하여 최적의 계수를 결정해야 하지만, 본 연구에서는 손상 모델을 이용한 네킹의 예측 가능성만을 판단하기 위함이었기 때문에 임의의 값으로 사용하였다. 손상에 따른 소재의 연화현상 고려는 ‘DISPLACEMENT TYPE’으로 하였고, 요소의 평균 크기의 절반인 2.5 mm 을 사용하였다. Fig. 4 의 결과를 보면 그루브의 깊이가 작은 경우에는 45 도 방향으로, 깊이가 큰 ( $d/w=12/500$ ) 경우는 인장에 수직 방향으로 네킹이 발생했다. 손상모델을 외연적 해석에 적용하여 해석하면 그루브의 깊이에 따라 결과의 차이가 있지만 네킹의 발생을 예측할 수 있음을 알 수 있다.

### 3.2 결정소성학 모델을 이용한 해석

결정소성학 모델은 결정학적인 슬립 시스템에서의 변형을 고려한다. 본 연구에서는 Dao 와 Asaro<sup>16</sup>의 논문에 자세히 기술되어 있는 속도 의존적 TBH 모델을 이용하였다. 모델에 대한 자세한 내용은 참고문헌<sup>6,16</sup>에 기술되어 있다. Fig. 5 는 Fig. 2 에 보인 각 결정립 내부의 요소에 대해 같은 결정립 방위를 부여한 결과를 보여준다. R(2,2)는 결정립 방위와 직교좌표계간의 변환행렬의 (2,2) 성분으로 다음과 같다.

$$R(2,2) = -\sin\varphi_1 \sin\varphi_2 + \cos\varphi_1 \cos\varphi_2 \cos\Phi \quad (3)$$

여기서,  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ , 그리고  $\Phi$ 는 오일러 각도(Euler angle)이다. 각 절점과 요소의 좌표를 이용하여 각 요소가 어떤 결정립에 속하는지 분리하였다. 그리고, 각 결정립에 속한 요소들에 측정된 결정립 방위를 부여하였다. Fig. 5 에서 각 요소들이 잘 분류되었고, 같은 결정립에 같은 방위가 부여된 것을 확인할 수 있어 초기 방위가 잘 부여되었음을 알 수 있다.

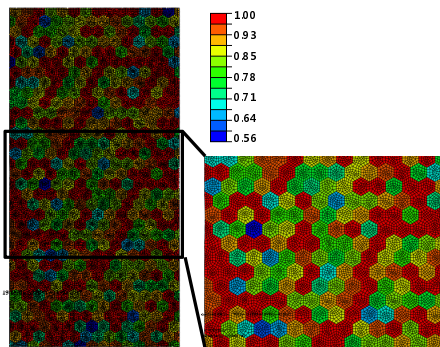


Fig. 5 Contour of R(2,2) showing the correct allocation of orientation angles

Fig. 6 은 측정된 1000 개의 결정립에 대한 극점도와 해석에 이용된 520 개의 결정립의 극점도를 보여준다. 해석에서 결정립이 520 개이기 때문에, 1000 개의 방위를 같은 비율로 줄여 520 개를 선택하여 사용하였는데 비율이 유사하게 잘 선택이 되었음을 알 수 있다.

네킹 발생 이후 급격한 하중 강하를 예측하기 위해 손상 모델을 적용하였다. Cockcroft 와 Latham<sup>14</sup>은 손상을 주응력과 유효변형률 증분으로 다음과 같이 제안하였다.

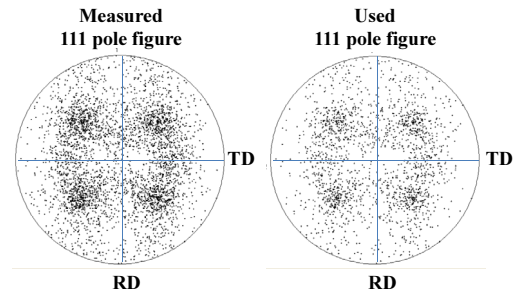


Fig. 6 (111) Pole figure for 6022-T4 sheet sample

$$D = \int_0^{\bar{\epsilon}} \frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} \quad (4)$$

여기서  $D$ 는 손상값,  $\bar{\epsilon}$ 는 유효변형률,  $\bar{\sigma}$ 는 유효응력, 그리고  $\sigma_1$ 는 주응력이다. 본 연구에서는 응력이 일정 값 이하일 때는 손상이 발생하지 않고, 임계값 이상의 응력이 유발되었을 때 손상이 발생한다고 가정하여 다음과 같이 수정하여 사용하였다.

$$dD = \begin{cases} \frac{\sigma_1 d\epsilon_1}{\sigma_{cr} \cdot \Delta\epsilon_{cr}} & \text{for } \sigma_1 \geq \sigma_{cr} \text{ and } d\epsilon_1 \geq 0, \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

$$D = \int dD. \quad (6)$$

여기서  $\sigma_{cr}$ 은 손상이 시작되는 임계 주응력,  $\Delta\epsilon_{cr}$ 은 손상이 누적되어 파단이 발생하는 임계 주변형률, 그리고  $\epsilon_1$ 은 주변형률이다. 여러 가지 값으로 사전 해석하여  $\sigma_{cr}=500$  PMa,  $\Delta\epsilon_{cr}=0.1$ 을 사용하였다. (6)은 주응력이 임계응력보다 크고 주변형률이 인장인 경우 손상이 누적되고, 그렇지 않을 경우 손상의 누적이 없음을 의미한다. 손상이 발생하면 소재에 미세 균열이 생성 (Void nucleation) 되었다고 볼 수 있다. 유한요소 해석에서 이와 같은 균열을 직접 반영하기 쉽지 않기 때문에 손상에 따른 소재의 연화로 다음과 같이 고려하였다.

$$\sigma_{ij,n} = (1-D) \times \sigma_{ij,o} \quad (7)$$

여기서  $\sigma_{ij,n}$ 은 손상된 소재의 응력성분이고,  $\sigma_{ij,o}$ 는

손상이 고려되지 않고 계산된 응력성분이다. 결정소성학 모델을 이용한 응력계산과 식(5)-(7)의 결합 관련 식의 적용은 ABAQUS<sup>17</sup> 사용자 사용함수인 VUMAT 을 이용하였다.

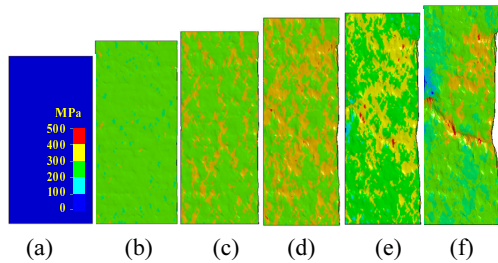


Fig. 7 Major stress distributions when (a)  $\epsilon_{2,g}=0.000$ , (b)  $\epsilon_{2,g}=0.075$ , (c)  $\epsilon_{2,g}=0.145$ , (d)  $\epsilon_{2,g}=0.210$ , (e)  $\epsilon_{2,g}=0.241$ , and (f)  $\epsilon_{2,g}=0.272$

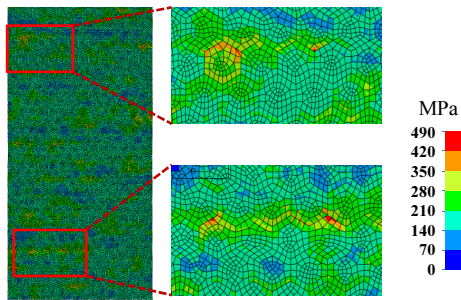


Fig. 8 Von-Mises stress distributions when  $\epsilon_{2,g}=0.02$

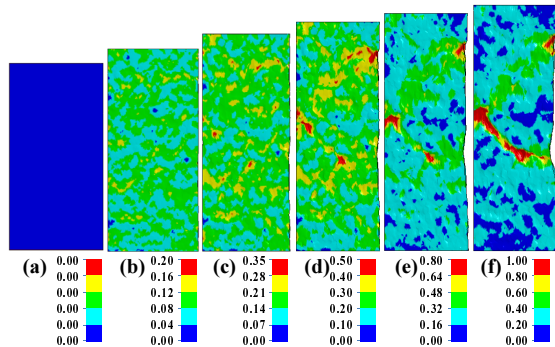


Fig. 9 Major strain distributions when (a)  $\epsilon_{2,g}=0.000$ , (b)  $\epsilon_{2,g}=0.075$ , (c)  $\epsilon_{2,g}=0.145$ , (d)  $\epsilon_{2,g}=0.210$ , (e)  $\epsilon_{2,g}=0.241$ , and (f)  $\epsilon_{2,g}=0.272$

Fig. 7 은 인장이 진행되는 과정에서 주응력 분포를 보여준다. 그림 제목에서  $\epsilon_{2,g}$  는 시편의 게이지 변위로부터 계산한 게이지 변형율을 의미한다.

다결정 균일 물성을 이용한 해석 결과와 달리 소재의 여러 부분에서 불균일 응력이 발생함을 알 수 있다. Fig. 7(f)에서 요소가 많이 변형된 부분에서 응력이 작은 이유는 손상모델에 의해서 연화가 되었기 때문이다. 응력이 집중되는 부분을 확대한 Fig. 8 을 보면, 결정립계에서 응력이 집중됨을 알 수 있다. 이것은 결정립간의 방위 차이로 인해 변형이 부드럽지 않기 때문으로 사료된다.

Fig. 9 는 해석 단계에서 주변형을 분포를 보여준다. Fig. 7 의 주응력 분포와 같이 변형율이 균일하지 않고 여러 점에서 변형율이 크게 나타남을 알 수 있다. Fig. 10 은 식(5)와 (6)을 이용하여 계산한 결함의 분포를 보여준다. 게이지 변형율  $\epsilon_{2,g}=0.075$  (Fig. 10(b))까지는 손상이 발생되지 않고, 게이지 변형율  $\epsilon_{2,g}=0.145$  (Fig. 10(c))부터 손상이 발생됨을 알 수 있다. Fig. 10(c)에서 소재의 여러 점에서 손상이 발생됨을 알 수 있는데, 이것은 결함의 생성 (Void nucleation) 현상이라고 볼 수 있다. Fig. 10(d)와 (e)에서는 더 많은 곳에서 결함이 생성되고 있고, 기존의 결함은 성장 (Void growth) 함을 알 수 있다. Fig. 10(f)에서 성장하는 결함들이 여러 개 모여 합쳐지는 것을 알 수 있는데, 이것은 결함의 합성 (Void coalescence)와 같다고 볼 수 있다.

이 결과로 볼 때, 결정소성학 모델과 결함 모델을 사용하여 소재의 변형을 해석할 경우 결함의 생성과 성장을 잘 예측함을 알 수 있다.

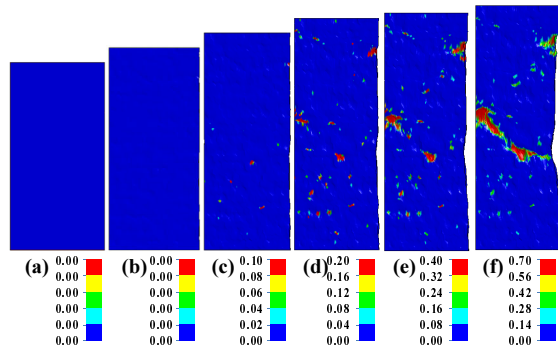


Fig. 10 Damage value distributions when (a)  $\epsilon_{2,g}=0.000$ , (b)  $\epsilon_{2,g}=0.075$ , (c)  $\epsilon_{2,g}=0.145$ , (d)  $\epsilon_{2,g}=0.210$ , (e)  $\epsilon_{2,g}=0.241$ , and (f)  $\epsilon_{2,g}=0.272$

#### 4. 결론

본 연구에서는 결정소성학 모델과 손상 모델을



유한요소 해석에 적용하여 초기 결함 없이 박판 소재의 인장시험에서 발생하는 네킹 현상을 예측하였다. 해석을 통해서 결함의 발생, 성장, 그리고 합성 미케니즘을 묘사할 수 있었다. 또한, 균일 재료로 가정된 해석을 수행하여 네킹의 예측 가능성을 분석하였다. 손상 모델이 없는 내연적 해석의 경우 초기 결함을 주어도 네킹의 예측이 어려웠고, 손상 모델을 적용한 외연적 방법의 경우 네킹의 예측은 가능했지만, 초기 결함에 영향을 많이 받는 것 알 수 있었다. 결정소성학 모델을 이용한 해석에서는 보다 논리적인 기준으로 네킹의 해석이 가능하였다.

## 후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- Kim, S. B., Huh, H., Bok, H. H., and Moon, M. B., "Forming limit diagram of auto-body steel sheets for high-speed sheet metal forming," *J. of Mater. Process. Technol.*, Vol. 211, No. 5, pp. 851-862, 2010.
- Kuroda, M. and Tvergaard, V., "Forming limit diagrams for anisotropic metal sheet with different yield criteria," *Int. J. of Solids and Struct.*, Vol. 37, No. 37, pp. 5037-5059, 2000.
- Stoughton, T. B. and Yoon, J. W., "A new approach for failure criterion for sheet metals," *Int. J. Plasticity*, Vol. 27, No. 3, pp. 440-459, 2011.
- Dejardin, S., Thibaud, S., and Gelin, J. C., "Finite element analysis and experimental investigation for improving precision in single point incremental sheet forming process," *Int. J. Mater. Form.*, Vol. 1, Suppl. 1, pp. 121-124, 2008.
- Kim, T. J. and Yang, D. Y., "Improvement of formability for the incremental sheet metal forming process," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 42, No. 7, pp. 1271-1286, 2000.
- Yoon, J. W., Barlat, F., Gracio, J. J., and Rauch, E., "Anisotropic strain hardening behaviour in simple shear for cube textured aluminium alloy sheets," *Int. J. Plasticity*, Vol. 21, No. 12, pp. 2426-2447, 2005.
- Chio, S.-H., Kim, D. H., Park, S. S., and You, B. S., "Simulation of stress concentration in Mg alloys using the crystal plasticity finite element method," *Acta Mater.*, Vol. 58, No. 1, pp. 320-329, 2010.
- Dao, M. and Li, M., "A micromechanical study on strain-localization-induced fracture initiation in bending using crystal plasticity models," *Philosophical Magazine A*, Vol. 81, No. 8, pp. 1997-2020, 2001.
- Ko, J. B., Goh, C. H., and Lee, K. S., "The study of microstructure influence at fretting contacts using crystal plasticity simulation," *J. of the KSPE*, Vol. 22, No. 8, pp. 84-91, 2005.
- Ha, S. Y. and Kim, K. T., "Finite element analysis for rate-independent crystal plasticity model," *Trans. of the KSME A*, Vol. 33, No. 5, pp. 447-454, 2009.
- Kielsen, K. L. and Tvergaard, V., "Effect of a shear modified Gurson model on damage development in a FSW tensile specimen," *Int. J. Solids and Struct.*, Vol. 46, No. 3-4, pp. 587-601, 2009.
- Tvergaard, V. and Needleman, A., "Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar," *Acta Mater.*, Vol. 32, No. 1, pp. 157-169, 1984.
- Zhang, Z. L., Thaulow, C., and Odegard, J., "A complete Gurson model approach for ductile fracture," *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 67, No. 2, pp. 155-168, 2000.
- Cockcroft, M. G. and Latham, D. J., "Ductility and the workability of metals," *J. of the Institute of Metals*, Vol. 96, pp. 33-39, 1968.
- Kim, J. B., Hong, S. H., and Yoon, J. W., "An analysis of necking behavior of Aluminium 6022-T4 based on crystal plasticity model," *Proc. of KSME*, pp. 81-82, 2012.
- Dao, M. and Asaro, R. J., "Localized deformation modes and non-schmid effects in crystalline solids. Part I. Critical conditions of localization," *Mech. Mater.*, Vol. 23, No. 2, pp. 71-102, 1996.
- ABAQUS Inc., "ABAQUS theory manual," 2006.