

## 경로의존성 없는 극좌표계 성형한계도를 이용한 판재 성형성 향상 기술

배문기<sup>1,#</sup> · 홍승현<sup>2</sup> · 최광용<sup>3</sup> · 윤정환<sup>4</sup> · 김영석<sup>5</sup>

### The Improvement of Formability using the Polar-coordinate FLD with Strain Path Independence

M. K. Bae, S. H. Hong, K. Y. Choi, J. W. Yoon, Y. S. Kim

(Received May 12, 2015 / Revised July 6, 2015 / Accepted July 13, 2015)

#### Abstract

The PEPS(Polar-coordinated Effective Plastic Strain) FLD(Forming Limit Diagram), a new type of FLD based on a polar representation of the EPS(Effective Plastic Strain), appears to be an effective solution to the problem of non-linear strain path effects. This method has the advantages of the familiar strain-based diagram for linear loading, but without the strain-hardening limitations of the stress-based diagram, or non-intuitive aspects of alternate Cartesian diagrams based on effective plastic strain. In the current study, the PEPS FLD was applied to the development process of an aluminum automobile-body panel, including the necking or crack prediction, die design, and die modification. As a result, the PEPS FLD provided improved formability of aluminum sheet as compared to deriving the potential formability with non-linearity.

**Key Words** : FLD, FLC, Non-linear FLD, Stress-based FLD, Polar-EPS FLD, Aluminum Sheet, Automobile-body Panel

#### 1. 서론

자동차 산업에 있어 판재 부품을 위한 프레스 성형은 경제적으로 제품을 대량으로 생산할 수 있는 가장 핵심적인 기술이다. 이 때문에 많은 연구기관과 기업체에서는 프레스 성형에 대한 연구와 생산 기술 및 공법개발에 투자하고 있으며, 이 결과 금형 설계, 가공 / 생산기술 및 유한요소해석법을 이용한 금형 설계 등, 프레스 관련 기술의 많은 발전을 이룩할 수 있었다. 이러한 판재의 프레스 공정에서 가장 중요하다고 할 수 있는 것이 바로 판재 성형의 한계에 대한 것이다. 프레스 가공 중에 재료가 넥킹, 혹은 파단 되지 않으면서 최대한으로 변형할 수 있는

한계가 어느 정도인지에 대한 데이터를 금형설계, 혹은 최종 제품 설계에 반영하여야만 실제 양산시에 안정적이고 효율적인 생산이 가능하기 때문이다.

Keeler[1]와 Goodwin[2]이 다양한 2축 인장상태하에 있는 판재의 변형율을 표시하고 온전한 변형과 넥킹-파단 변형의 경계로 재료의 변형한계를 표시한 것이 바로 성형한계도(forming limit diagram)인데, 이는 판재가 어느 순간에 넥킹이 발생하는 지를 판단할 수 있는 지표로 사용된다. 성형한계도는 여러가지 응력모드상에서 성형한계(넥킹 관측시점)시점의 주변형율(major strain)과 부변형율(minor strain)을 각각 X축, Y축에 나타낸 것으로, 사용 편의성이 뛰어나 지금까지도 널리 사용되고 있는 방법이다.

1. 현대기아자동차 남양연구소 금속재료리서치랩 연구원  
2. 현대기아자동차 남양연구소 금속재료리서치랩 연구위원  
3. 한국ESI  
4. Deakin Univ. (Australia)  
5. 경북대학교 공과대학 기계공학부  
#Corresponding Author : Hyundai Motor Company, BMK@hyundai.com

하지만 이러한 성형한계도는 비례부하(proportional loading) 시에만 해당되고, 성형 경로가 변하면 성형한계가 일정하게 유지되지 않는다는 단점이 있어[4], 사용자들 대부분이 이러한 단점을 감수하고 사용하고 있는 실정이다.

실제로, 이러한 경우에 대한 많은 연구결과가 존재하며, 이를 오히려 이용하여 잠재적 성형성을 극대화한 경우도 있다[4]. 하지만 성형공정 중에 일정하게 유지 되지 않는 성형한계도는 성형시점 판단이나 제품 성형을 위한 금형설계에 있어 정확하지 않은 결과를 제공할 수 있기 때문에 이러한 단점을 극복하고자 새로운 개념의 성형한계도가 제안되기 시작했다. Stoughton[5]은 변형을 기반의 성형한계도가 아닌 응력 기반의 성형한계도를 제안하였다. 성형한계도를 변형을 평면에 표시한 것이 아니라 응력 평면(주응력-major stress 및 부응력-minor stress) 상에 나타낸 것으로, 이는 기존 변형을 기반의 성형한계도가 가지는 단점인 성형한계도가 일정하게 유지되지 못하는 단점이 개선되어 일부 연구기관 등에서 사용되고 있다. 하지만 변형을 기반의 성형한계도에 익숙해져 있는 금형 및 공정 설계자와 같은 실제 사용자가 사용하기가 직관적이지 못 하여 널리 사용되지 못하고 있다.

또한, Yoshida등[6] 및 Zeng등[7]도 새로운 개념의 성형한계도를 제안하였다. Yoshida등은 저서에서  $\bar{\epsilon}_p$  (effective plastic strain)을 제안하여 성형한계에 활용하였다.  $\bar{\epsilon}_p$ 은 비록 strain으로 표현되어있지만, 주변형률(principal strain)이나 변형률텐서(strain tensor)와 직접적으로 연관되지는 않고, 응력텐서(stress tensor)나 응력-변형률 관계와 특유한(unique) 형태로 연결된다. 이러한 이유로  $\bar{\epsilon}_p$ 의 개념을 도입하여 성형한계도를 표현하면 변형경로의 변화에도 성형한계가 변하지 않아 일정하게 유지되는 장점을 가지게 된다. 하지만 Yoshida등은  $\bar{\epsilon}_p$ 와 함께  $\alpha$ 를, Zeng등은  $\bar{\epsilon}_p$ 와 함께  $\beta$ 를 성형한계도에서 사용하고 있어 사용하는 사람들이 직관으로 사용하기 힘들다는 단점이 여전히 잔존한다.

Stoughton등[8]은 위에서 서술한 각 성형한계도의 여러 단점을 보완하기 위해 변형경로에 의존하지 않으면서도 사용자가 알아보기 쉬운 극좌표계 성형한계도를 제안하였다. 극좌표계 성형한계도는  $\bar{\epsilon}_p$ 만을 사용하고, 변형경로를 간단하게 적용하여 실제 사용자들이 알아보기 쉬우면서도 성형경로 변동에

도 일정하게 유지되기 때문에 최근 많은 관심을 받고 있다.

본 연구에서는 이러한 극좌표계 성형한계도를 실제 부품개발 단계에 적용하여 유의성을 검증하였으며, 실제 부품 개발 단계에 적용하여 「금형설계 → 부품 시생산 → 금형수정」에 이르는 일련의 과정에서 시행착오를 최소화해 보고자 하였다.

## 2. 극좌표계 성형한계도

극좌표계 성형한계도는  $\bar{\epsilon}_p$ (effective plastic strain)을 성형한계도에 도입하여, Cartesian X-Y평면에 극좌표계를 이용하여 성형한계를 표시하는 방법이다. 극좌표계 성형한계도상에서의 (y, x) 좌표는 ( $\bar{\epsilon}_p \cos\theta$ ,  $\bar{\epsilon}_p \sin\theta$ )로 구해지며 이때의 x, y값은 물리적 의미를 갖지는 않고, 단지 극좌표계상의 값을 직교(cartesian)좌표계에 옮기기 위한 값으로 간주된다.

이때의  $\bar{\epsilon}_p$ 와  $\theta$ , 그리고 앞서 서술한  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 각각 다음과 같이 결정된다.

$$\bar{\epsilon}_p = \frac{1+\bar{r}}{\sqrt{1+2\bar{r}}} \int_0^1 \sqrt{\dot{\epsilon}_1^2(t') + \dot{\epsilon}_2^2(t') + \frac{2\bar{r}}{1+\bar{r}} \dot{\epsilon}_1(t')\dot{\epsilon}_2(t')} dt' \quad (1)$$

$$\theta = \tan^{-1}(\dot{\epsilon}_1, \dot{\epsilon}_2) \quad (2)$$

$$\beta = \frac{\Delta\epsilon_1}{\Delta\epsilon_2} \quad (3)$$

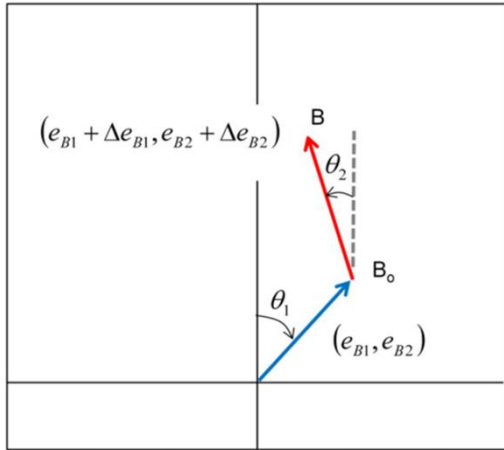
$$\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{\beta + \bar{r} + \bar{r}\beta}{1 + \bar{r} + \bar{r}\beta} \quad (4)$$

여기서  $\bar{r}$ 는 평균 r-value이며 식(5)와 같이 구한다.

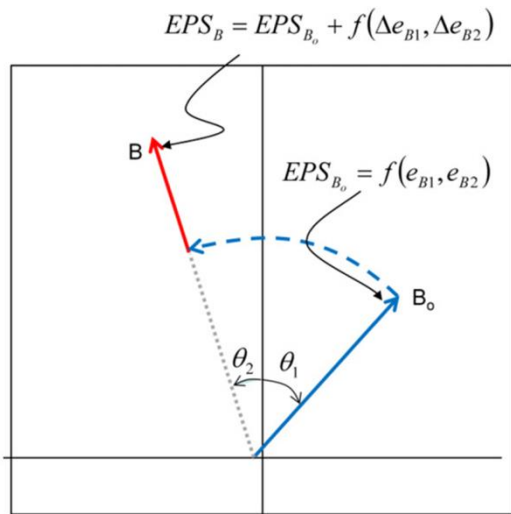
$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (5)$$

$r_0$ ,  $r_{45}$ ,  $r_{90}$ 는 각각 압연방향 0도, 45도, 90도 방향의 r값(소성이방성 계수)을 의미한다.

극좌표계 성형한계도 상에서 변형경로를 표현하는 방법은 기존 성형한계도와는 조금 다른데, 이를



(a) Strain FLD



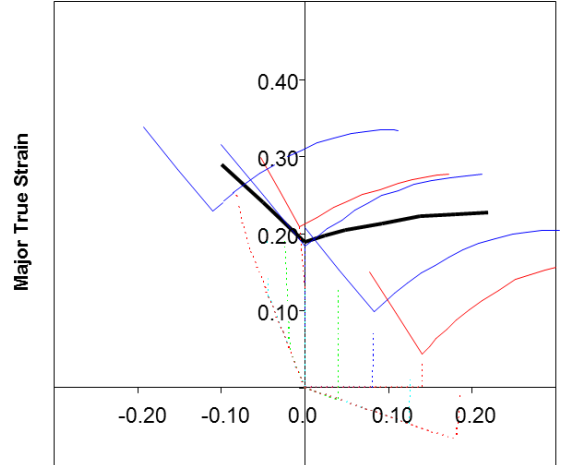
(b) Polar-EPS FLD

Fig. 1 Comparison between conventional strain FLD and Polar-EPS FLD during bi-linear path [8]

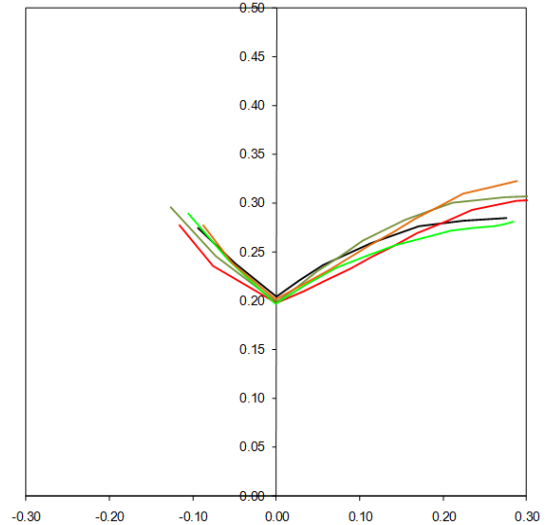
Fig. 1에 표현하였다.

기존 성형한계도 상에서 변형 경로 진행은 Fig. 1(a)에서와 같이, 원점에서 출발하여 B<sub>0</sub>점에서 다시 다음 변형이 시작되며, 이는 실제 사용자들이 익숙하게 사용하는 방법이다.

그에 반해 극좌표계 성형한계도에서는 Fig. 1(b)에서와 같이, 원점에서 변형경로가 시작되는 것은 동일하지만, 변형 경로가 변경될 경우, B<sub>0</sub>점이 아닌 B<sub>0</sub>점과 동일한  $\bar{\epsilon}_p$ 선상에서 다음경로와 같은 각도 ( $\theta_2$ )를 갖는 점에서 다음 경로가 시작된다. 기존의 성형한계선 또한 같은 방법으로 옮겨올 수 있는데, 극좌표계 성형한계도 내에서는 예변형에 의한 여러



(a) Conventional FLD with strain path dependence



(b) PEPS FLD with strain path independence

Fig. 2 Comparison between conventional strain FLD and Polar-EPS FLD [8]

성형한계도가 한 개의 선으로 모이게 된다. 이러한 특성 때문에 극좌표계 성형한계도는 Fig. 2 (a), (b) [8]와 같이, 변형경로에 무관한 Non-Linear 성형한계도 성격을 지니게 된다.  $\bar{\epsilon}_p$ 을 도입하여 성형한계를 표현하는 특성상, 성형경로가 변하더라도 일정하게 유지 되기 때문인데, 그러면서도 기존의 성형한계도와 형태가 비슷하기 때문에 실 사용자가 친숙하게 접근할 수 있고, 사용하는 방법도 크게 다르지 않기 때문에 금형 설계, 혹은 변형 경로 설계 시에도 큰 혼란 없이 사용할 수 있다.  $\bar{\epsilon}_p$ 이 구성방정식에 의존적일 수 밖에 없다는 단점이 있으나, 근래 들어 재

**Table 1 Mechanical properties of Al-6000 sheet along the transverse direction**

Mechanical Properties				
YP	TS	EL	n	r
113MPa	218MPa	27.2%	0.273	0.681
Parameters of Voce's Hardening Law				
A	B	C		
366.14	217.05	9.22		

료별 구성방정식에 대한 많은 연구가 진행 되어 있으므로 극좌표계 성형한계도에 어려움 없이 적용하여 사용할 수 있다.

### 3. 부품 개발과정에 적용

극좌표계 성형한계도를 실제 부품 개발과정에 적용하여 유의성을 확인하고 향후 연구방향을 도출하고자 한다.

#### 3.1 적용 부품 및 소재 선정

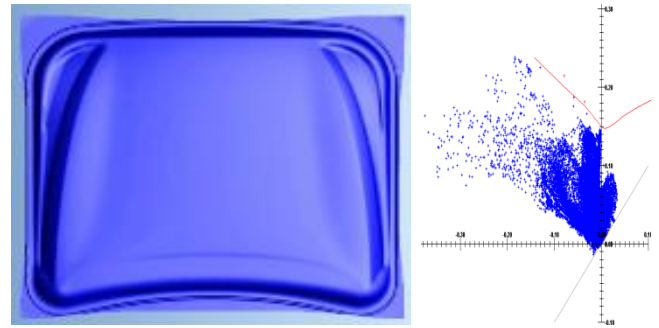
극좌표계 성형한계도를 이용하여 판재의 잠재적 성형능력을 최대한 끌어올리는 것이 가능하므로, 연신율이 높지 않은 알루미늄 6000계가 선정이 되었다. 또한 여러가지 성형경로를 수반하면서도 부품 자체 사이즈가 큰 부품인 후드 아우터 판넬이 선정이 되었다. 자세한 물성은 Table 1에 표시하였다.

#### 3.2 금형 초도 설계 및 T/O (Try-Out)

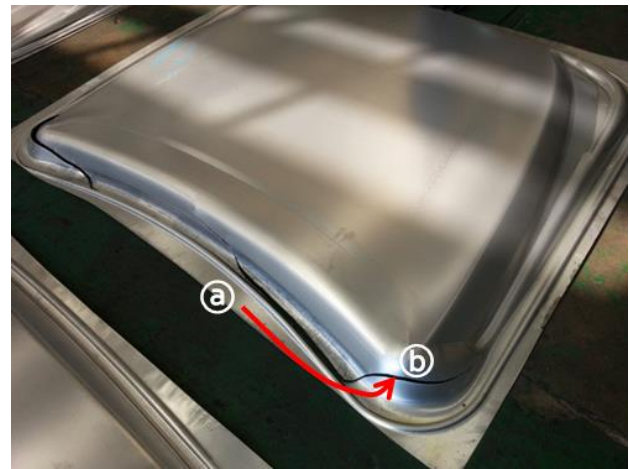
먼저, 최종 디자인된 후드 아우터 제품을 참조하여 금형 초도 설계를 진행하였다. 성형성 평가는 기존 성형한계도를 이용하였고, 대상 프레스 사양은 1000톤 싱글 스트로크 유압프레스이고, 드로잉 공정을 대상으로 금형을 설계하였다.

금형비드의 높이는 통상 알루미늄 재질에 맞도록 강판 금형 대비 비드의 높이를 낮추고 비드의 곡률반경을 높여, 알루미늄 판재의 유입을 유도하고, 이를 통해 비교적 낮은 알루미늄 판재의 성형성을 극복하고자 하였다.

또한, 초도 설계된 금형을 Pam-Stamp 2G를 이용하여 Fig. 4와 같이 성형해석을 진행하였다. 그 결과, 기존 성형한계도를 이용하여 성형평가를 했을때, 성형한계내에 모든 절점이 포함되어 무난히 성형이



**Fig. 4 The result of forming FEA for proto-die with conventional FLD**



**Fig. 5 The result of the first Try-out**

완료될 것으로 판단되어 금형 제작에 착수하였다.

제작된 금형을 이용하여 부품 T/O를 진행하였다. 사용된 프레스는 금형 설계 대상과 동일한 1000톤 유압프레스로, 드로잉 공정만 진행하였다. 리스트라이킹, 트리밍 등 양산을 위한 금형은 본 연구에서는 제외되어 있으며 향후 연구예정이다.

드로잉 공정의 T/O결과, 기존 성형한계도로는 예측할 수 없었던 크랙이 발견되었다. Fig. 5에서와 같이 비드에서 시작된 크랙(a)은 측벽을 통해 진행되어(화살표 방향) 가장 가혹한 드로잉 지점(b)으로 진전 되었다. 문제는 이렇게 실제로 크랙이 생겨 성형이 불가능함에도 기존 성형한계도로는 이를 예측할 수 없다는데 있다. 이로 인해 부품 T/O도 실패할 뿐만 아니라, 실패 이후에 금형 수정 단계에서도 기존 성형한계도는 아무런 대안을 제시하지 못한다. 성형경로 변화에 따른 성형한계도의 변동을 감안하지 못 하기 때문이다.

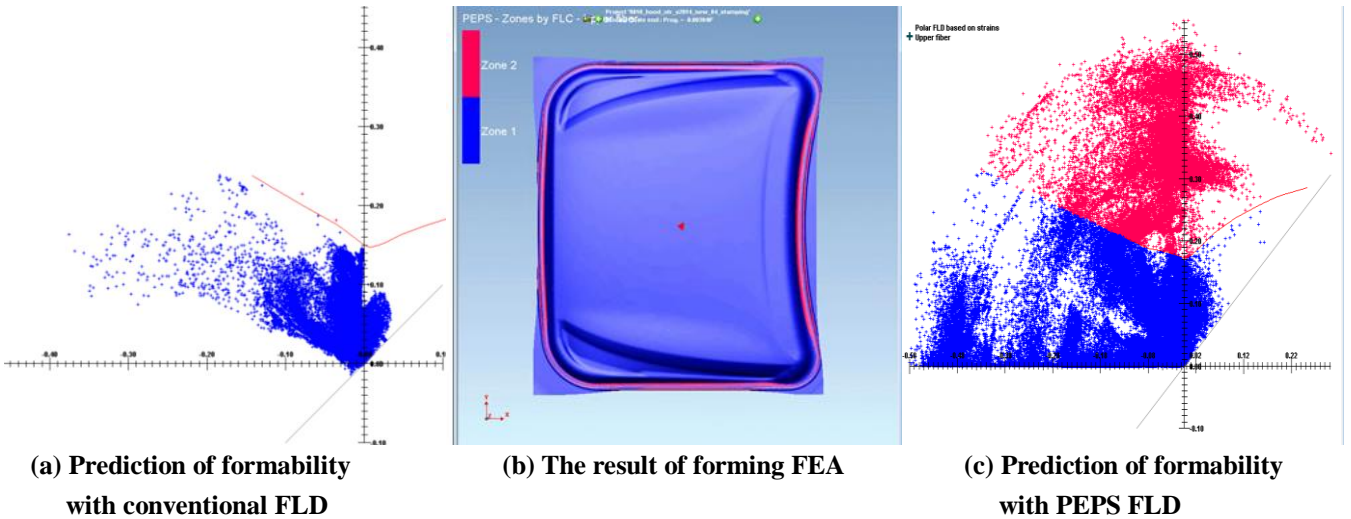


Fig. 6 The result of forming FEA with conventional-FLD and PEPS FLD

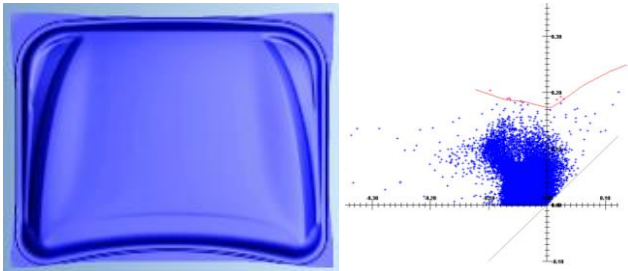


Fig. 7 Result of forming FEA with PEPS after die revision

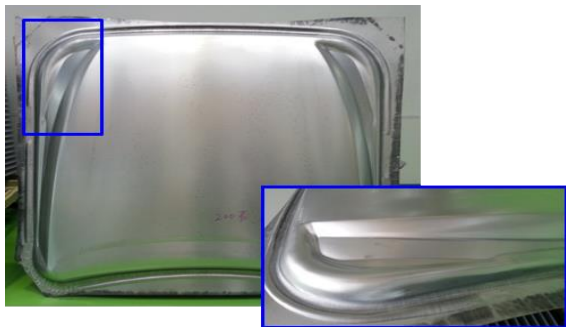


Fig. 8 The final panel of Hood Outer Panel

### 3.3 금형 수정을 위한 극좌표계 성형한계도 적용

앞서 설계된 금형에 극좌표계 성형한계도를 적용하여 다시 성형해석을 수행하였고, 이를 통해 성형성 평가를 진행하였다. 사용된 상용코드는 앞서 2.2 절에서 언급한 극좌표계 성형한계도가 적용된 최신 버전의 PAM-Stamp 2G이다.

극좌표계 성형한계도의 유의성을 판단하기 위해

기존 성형한계도와 병행하여 해석을 수행하였다. 이로 인해 해석 시간이 본 부품 (후드 아우터 판넬) 기준으로 3~5%가량 증가하며, 이러한 수치는 실제 사용자에게는 크게 유의하지 않은 수준이다.

Fig. 6과 같이 기존의 성형한계도로는 예측할 수 없었던 넥킹 및 파단이 극좌표계 성형한계도로는 예측이 되었다. 또한 이 과정에서, 적용된 비드의 높이가 너무 높고 곡률반경이 적어 성형성을 저해하고 있음을 알 수 있었다.

이를 바로 잡기 위해 금형수정을 진행하였다. PAM-Stamp 2G 및 극좌표계 성형한계도를 이용한 해석결과, 많은 수의 절점들이 이미 클램핑 과정에서 성형한계를 넘어선 것으로 판단되었으므로, 알루미늄 판재에 맞는 비드를 다시 설계하였다. 전 부분의 비드높이를 하향하고, 비드의 곡률반경을 늘려 최대한 유입을 유도 하였다. 부분적으로는 비드를 삭제하여 단축 인장모드를 인가하는 한편, 수평방향으로의 유입성 증대를 유도 하고, 비드 높이를 낮추어 수직방향으로는 유입을 증대하면서도 블랭크 홀딩 포스(BHF)를 유지하고자 하였다. 이를 통해 알루미늄 판재의 잠재적 성형성을 이끌어 내어 성형성을 최대한 증대시킬 수 있었다.

변경된 금형 설계안으로 다시 부품 성형 해석을 진행하였고, 대부분의 절점의 변형율이 Fig. 7과 같이 성형한계 안쪽으로 들어옴을 확인하였다. 이를 통해 금형을 수정하여 다시 T/O를 실시하였고 최종적으로 Fig. 8과 같이 양품을 생산할 수 있었다.

통상 「금형 설계변경 → 유한요소해석 → 금형

수정 → 재 T/O」와 같은 일련의 단계에서, 작업자의 경험에 의해 금형 수정이 진행되어 3~4번의 시행착오를 거쳐야만 양품을 생산할 수 있는데 반해, 극좌표계 성형한계도를 금형 수정단계에 적용하여 시행착오를 최소화한 상태에서 양품을 생산하였다. 이는 정확한 성형한계 예측능력 덕분이며 더 이상 작업자의 경험에 의존하지 않고 데이터 및 사실에 입각하여 금형 설계 및 수정을 진행할 수 있게 하였다. 이러한 과정에서 극좌표계 성형한계도의 장점을 확연하게 확인할 수 있었다.

차후 부품 개발 과정에서는 금형 초도 설계과정에까지 적용하여, 판재의 잠재적 성형능력을 끌어올림과 동시에 금형 수정 과정을 최소화 할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

성형경로의 변화에도 일정하게 유지되는 극좌표계 성형한계도를 실제 판재 부품 개발 과정에 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 극좌표계 성형한계도를 상용 판재 성형 해석 프로그램에 적용하여 사용 편의성을 극대화 하였다.
- (2) 극좌표계 성형한계도를 이용한 해석을 통해 넥킹(및 파단) 시점 및 위치를 예측하였고, 부품 T/O를 통해 부품의 실제 넥킹 위치를 확인한 결과, 예측된 위치가 일치하였다.
- (3) 성형경로 설계를 통해 판재의 잠재적 성형성을 극대화하여, 최종적으로 판재 성형성을 향상 하였다.
- (4) 극좌표계 성형한계도를 실제 판재 부품 설계 과정에 적용할 경우 더욱 정확한 파단 시점 및 위치 예측과 성형 경로 설계가 가능하므로, 금형개발 과정 「금형 설계 - 부품T/O - 금형 수정」의 시행착오를 최소화 할 수 있다.

#### 후 기

본 연구에서의 성형해석 및 부품에 관한 항목은 현대자동차의 기밀사항이므로, 이에 관한 상세사항을 밝힐 수 없음을 양해바랍니다.

#### REFERENCES

- [1] S. P. Keeler, 1965, Determination of Forming Limits in Automotive Stampings, SAE paper, No.650535.
- [2] G. M. Goodwin, 1968, Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop, SAE paper, No.680093.
- [3] A. F. Graf, W. F. Hosford, 1993, Calculations of Forming Limit Diagrams for Changing Strain Paths, Metall. Tans. A, Vol. 24, pp. 2497~2501.
- [4] H. Ishigaki, 1977, Deformation Analysis of Large Sized Panels in the Press Shop, GMR Symposium, pp. 315~338.
- [5] T. B. Stoughton, 2000, A General Forming Limit Criterion for Sheet Metal Forming, Int. J. Mech. Sci., Vol. 42, pp. 1~27.
- [6] K. Yoshida, T. Kuwabara, M. Kuroda, 2007, Path-Dependence of the Forming Limit Stresses in a Sheet Metal, Int. J. of Plast., Vol. 23, pp. 361~384.
- [7] D. Zeng, L. Chappuis, Z. C. Xia, X. Zhu, 2008, A Path Independent Forming Limit Criterion for Sheet Metal Forming Simulations, SAE 2008-01-1445.
- [8] T. B. Stoughton, J. W. Yoon, 2012, Path Independent Forming Limits in Strain and Stress Spaces, Int. J. Solid Struct., Vol. 49, pp. 3616~3625.
- [9] H. W. Swift, 1952, Plastic Instability Under Plane Stress, J. Mech. Phys. Solids, Vol. 1, pp. 1~18.
- [10] H. S. Son, S. H. Jung, S. S. Han, Y. S. Kim, 2000, Proc. Kor. Soc. Automot. Eng. Spring Conf., Vol. 2, Kor. Soc. Automot. Eng. Seoul, Korea, pp. 468~473.
- [11] Y. S. Kim, 2014, Plasticity and Application, Sigma Press, Seoul, Korea, pp. 531~610.