

성형해석을 이용한 랜싱공법 개발에 관한 연구

정동원[#], 고대림^{*}

A Study on the Development of Lancing Process Method Using Forming Analysis

Dong Won Jung[#] and Dae Lim Ko^{*}

ABSTRACT

The characteristics of sheet metal process are little loss of material during process, the short processing time and the excellent price and strength. It has been widely used in autobody, electronic components, aircraftbody, etc. Lancing is a press operation in which a single-line cut or slit is made on part way across the strip stock, without removing any metal. In this paper, we examined the validity of finite element method analysis on the automobile CTR-PLR -L/R stamping process by using the lancing engineering method. As a result, it has shown that the proper lancing engineering method could prevent fracturing by improving sheet metal flow.

Key Words : Lancing (랜싱), Sheet metal process (박판금속공정), Forming limit diagram (FLD; 성형한계도), Forming analysis (성형해석), CTR-PLR-L/R (센터필러)

1. 서론

오늘날 소성가공중 박판성형 공정은 가공 중에 재료의 손실이 적고 가공시간이 짧고 대량생산이 가능하다. 이와 같은 박판성형 공정을 이용하여 생산된 제품은 무게에 비해 강도가 높고 표면특성이 우수한 장점이 있어 자동차, 항공기, 전자부품, 주방용품 산업 등에서 많이 이용되는 제조방법이다. 이와 같은 박판성형 공정은 최근 원자재 가격의 상승과 국제 경쟁력 강화로 인하여 가공 중 재료의 손실을 적게 하고 새로운 공법의 개발로 생산원가의 절감이 절실히 요구되고 있다.¹⁻⁴ 생산성 향상과 제작된 제품의 개수를 맞추기 위해 일반적

로 대칭인 제품의 경우 보통은 한장의 블랭크(blank)를 사용하여 한번의 성형으로 2 개의 제품을 성형한 후 트리밍(trimming)등을 사용하여 제품의 최종형상을 얻는 방법이 많이 이용되고 있다.^{5,6} 이와 같은 방법으로 제품의 성형시 블랭크의 유입이 억제되어 파단, 주름 및 제품의 품질등의 문제점이 많이 발생한다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위한 방법으로 현장에서는 슬릿포밍(slit forming)을 응용한 랜싱(lancing)기법을 적용하여 문제를 해결하는 경우가 많다. 이와 같은 랜싱은 성형전이나 성형의 초기 상태에서 수행할 경우 재료의 지나친 유입과 랜싱 가장자리부의 찢어짐 등이 나타나므로 적정 성형깊이 및 위치, 크기 등을

접수일: 2007 년 9 월 27 일; 게재승인일: 2007 년 11 월 23 일

[#] 교신저자: 제주대학교 기계에너지시스템공학부

E-mail: jdwcjeju@cheju.ac.kr Tel. (064) 754-3625

^{*} 울산대학교 기계자동차공학부 대학원

고려하여 랜싱을 수행하여야 하며 일반적으로 드로잉 금형 내부에서 랜싱이 되도록 설계를 하여 이용하고 있다.

랜싱이란 소재의 제거 없이 한개 혹은 그 이상의 슬릿을 만드는 것으로 주로 프로그레시브 공정에서 제품의 형상에 적합한 블랭크의 모양을 만드는데 주로 이용되고 있다.⁷ 이와 같은 랜싱을 이용한 제품성형은 현장에서 경험에 의존하는 경우가 많아 유한요소법을 이용한 성형해석에 대한 연구가 활발하지 않은 상태이다.

본 논문에서는 실제 산업현장에서 사용되는 자동차의 좌,우 센터필러(CTR-PLR-L/R) 제품의 성형에서 나타나는 파단의 문제점을 해결하기 위해 랜싱 공법에 대한 유한요소해석을 수행하고, 도출된 결과가 실제 산업현장에서의 적용 가능성 및 타당성을 검토하고자 한다.

2. 유한요소의 수식화

2.1 응력장식

Fig. 1 과 같이 형상이 Ω 이고, 경계표면이 Γ 인 자유물체에서, 경계표면은 표면력이 작용하는 Γ_F 와 변위가 규정된 Γ_D 의 부분으로 나눌 수 있다. 이 자유물체가 평형상태에 있을 때 σ_{ij} 는 다음의 평형방정식을 만족하는 임의의 응력장이다.^{8,9}

$$\sigma_{ji,t} = \rho b_i \quad \text{in } \Omega \quad (1)$$

$$\text{(경계조건)} \quad u_i = g_i \quad \text{on } \Gamma_D \quad (2)$$

$$\sigma_{ji} n_j = t_j \quad \text{on } \Gamma_F \quad (3)$$

여기서, $\sigma(= \sigma_{ji} e_j e_i)$ 는 변형된 형상 Ω 에서 정의되는 Cauchy 응력텐서이고, ρ 는 물체의 밀도를 나타내며, $b(= b_i e_i)$ 는 물체력 벡터이다. $u(= u_i e_i)$ 는 변위 벡터로서 Γ_D 에서는 $g(= g_i e_i)$ 의 벡터함수를 갖는다. $t(= t_i e_i)$ 는 단위수직벡터가 $n(= n_i e_i)$ 로 표시되는 Γ_F 에 작용하는 표면력 벡터이다.

2.2 Updated Lagrangian 수식화

$\bar{u}(= \bar{u}_i e_i)$ 를 Γ_D 에서 $\bar{u}_i = 0$ 인 임의의 가상 변위 벡터라 할 때, 식 (1) 의 양변에 곱해주고 Ω 에 대해 적분하여 발산정리(Divergence Theorem)를 적용하면 다음과 같은 지배방정식의 적분형(Weak Form)을 얻는다.¹⁰

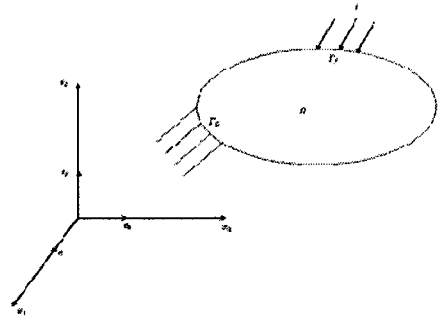


Fig. 1 Deformation of material and reference coordinates

$$\int_{\Omega} \sigma_{ji} \bar{u}_{i,j} d\Omega = \int_{\Omega} \rho b_i \bar{u}_i d\Omega + \int_{\Gamma_F} t_i \bar{u}_i d\Gamma$$

$$\forall \bar{u}_i, \text{ such that } \bar{u}_i = 0 \text{ on } \Gamma_D \quad (4)$$

이 식 (4) 이 변형된 형상 Ω 에서 수식화되었으므로, 변형량이 큰 경우에는 Ω 가 초기의 Ω^0 와는 차이가 크므로, 식 (4) 를 변형시켜서 초기 형상 Ω^0 와 일치하는 기준형상 Ω^R 에 대해 나타낼 필요가 있다. $J=1$ 이 되게 Δt 을 매우 작게 잡으면 다음을 얻을 수 있다.

$$\int_{\Omega} \Delta T_{ji} \bar{u}_{i,j} d\Omega = \int_{\Omega} \rho \Delta b_i \bar{u}_i d\Omega + \int_{\Gamma} \Delta t_i \bar{u}_i d\Gamma \quad (5)$$

2.3 구성방정식

유한 회전(Finite Rotation)효과를 허용하면서, 객관성을 갖는 Zienkiewicz - Jauman 증분(∇)을 Cauchy 응력텐서에 도입하면 Von Mises 항복조건을 따르는 재료의 Prandtl-Reuss 의 관계식은 다음과 같이 표현된다.^{11,12}

$$\sigma_{ij}^{\nabla} + \sigma_{ij} \Delta u_{n,n} = \hat{D}_{ijkl} \Delta \epsilon_{kl} \quad (6)$$

여기서

$$\hat{D}_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) - \frac{3\alpha \mu (s_{ij} s_{kl})}{\sigma^2 (1 + \hat{H}' / 3\mu)}$$

$$\hat{H}' = H'_0 / \left(1 - \frac{H'_0}{E} - \frac{(1-2\nu)\sigma}{E} \right)$$

이고, $\bar{\sigma} = \sqrt{3J_2}$ 는 유효응력이고, $H' = H'_0 / (1 - H'_0 / E)$, H'_0 는 진응력-대수 소성 변형률의 기울기이다. 탄성변형 또는 재하상태 일 때 $\alpha=0$ 이고, 소성변형

또는 부하상태에서 $\alpha=1$ 이다.

3. 성형해석 결과 및 고찰

본 연구에서는 프레스 금형 성형해석 상용 시스템인 Autoform 소프트웨어를 이용하였으며, 성형해석에 사용된 재료는 고장력강판인 SPRC35E 로 가공성이 우수하여 자동차 판넬 등의 강도 보장을 위해 많이 사용되는 강판이다. 소재의 두께는 0.8mm 이며 수직이방성계수 값이 $R=1.61$ 이고 가공경화지수는 0.14 이며 세부적인 물성치는 아래 Table 1 과 같다.

Table 1 Material Property

Young's Modulus	210 GPa
Yield strength	245 MPa
R - value	1.61
Poisson's Rate	0.3
Work-hardening Exponent	0.14

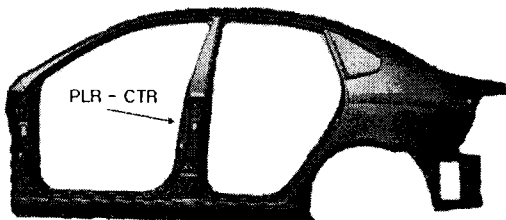


Fig. 2 Position of CTR-PLR-L/R

Fig. 2 는 본 연구에 사용된 부품인 자동차의 센터 필러의 위치를 나타낸 것이며 Fig. 3 은 성형해석시 툴 셋팅 상태를 나타낸 것이고, Fig. 4 는 최종 제품을 얻기 위한 트리밍 라인을 나타낸 것으로 좌,우 제품이 하나의 금형으로 제작된 것을 알 수 있다.

Fig. 5 는 성형깊이가 350mm 인 최종 제품의 성형해석 결과를 나타낸 것이며, Fig. 6 은 최종제품의 성형해석 결과에 대한 FLD 선도이다. 여기서 Formability 는 재료의 성형 시 성형성을 나타내는 말로 평면 변형을 상태에서의 성형한계를 나타내는 성형한계도와 연관되어 성형된 제품의 성형상태(파단, 성형안전성, 주름발생) 등을 나타낸다. Fig. 5 의 ㉠부분을 기준으로 적색구간으로 나타나는 좌,

우 대칭인 제품의 다이 어깨부에서 파단이 일어났으며, 이는 ㉠부분에서 재료의 유입이 원활하지 않은 결과라고 판단된다. 또한 블랭크의 코너 플랜지(flange)부에서는 압축응력이 발생하나 성형에는 영향을 미치지 않으며, 그 외 다른 부분에서는 성형이 매우 양호하다는 것을 알 수 있다.

이와 같은 문제점을 해결하는 방안으로 파단이 일어나는 지점의 다이 어깨부 곡률반경을 확대하는 방법을 고려할 수 있으나, 이는 제품의 형상에 영향을 미치므로 경우에 따라서는 불가능 할 수도 있다. 따라서 랜싱 공법을 이용하면 제품의 형상을 변경하지 않고 블랭크의 유동을 원활히 하여 성형성을 향상시킬 수 있다.

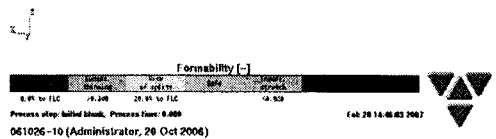
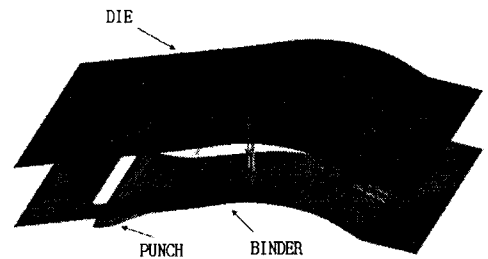


Fig. 3 Tool setting

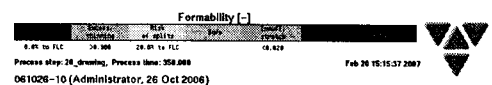
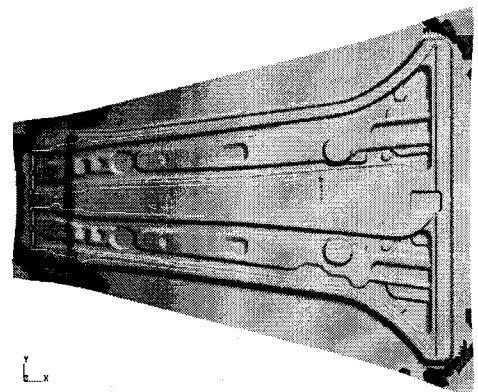


Fig. 4 Trimming line

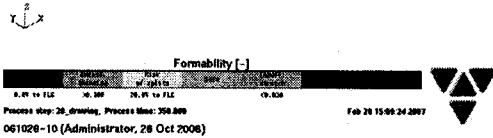
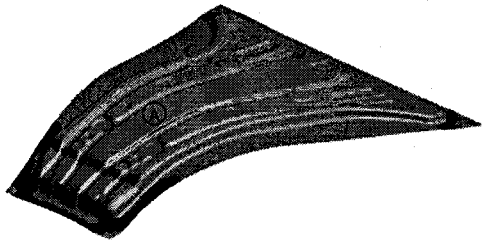
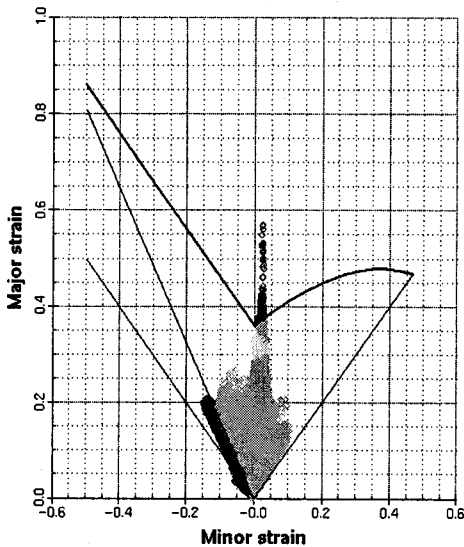


Fig. 5 The final results of formability distribution (no lancing)



Forming Limit Diagram (True strains)

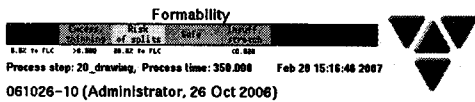


Fig. 6 FLD (no lancing)

Fig. 5 의 ④부분은 실제 제품에서 트리밍 후에 스크랩으로 남는 부분이므로 이 부분에 랜싱을 수행하면 재료 상호간의 인장력이 감소되어 재료의 유입이 원활하리라고 판단된다.

일반적으로 성형전이나 또는 전체 공정중 성형 깊이가 너무 적은 조건에서 블랭크에 랜싱을 행한

후 제품을 성형할 경우 재료의 지나친 유입과 랜싱 가장자리에서 응력집중에 의한 찢어짐 현상이 나타남으로 인해 스프링백(Spring-back) 등과 같은 현상으로 제품의 품질을 저하시킬 수도 있다. 따라서 충분한 성형이 이루어져서 터짐이 발생하기 직전에 랜싱을 취해야 한다는 것을 알 수 있다.

랜싱의 적정위치와 성형깊이를 찾기 위해 각 단계별 성형과정을 살펴보면 아래와 같다.

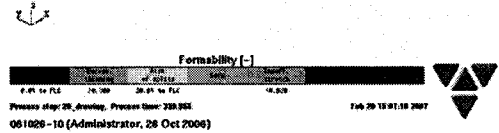
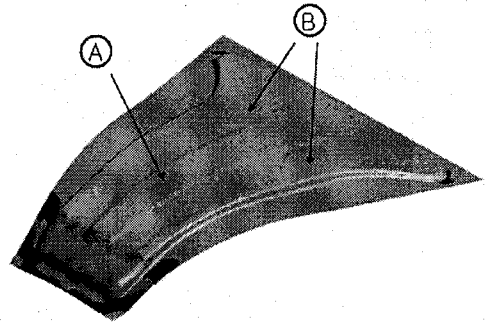


Fig. 7 Formability distribution (depth: 340mm, no lancing)

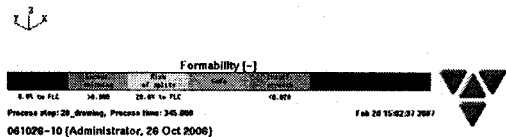
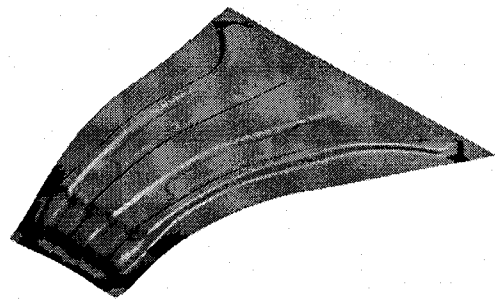


Fig. 8 Formability distribution (depth: 345mm, no lancing)

Fig. 7 과 Fig. 8 은 성형깊이가 각각 340mm 와

345mm 에서의 성형해석 결과를 나타낸 그림이다. 위의 두 경우 모두 파단은 일어나지 않지만 성형 깊이가 340mm 인 경우, Fig. 7 의 ㉔부분은 제품의 형상부로서 세부형상의 성형이 시작되지 않은 상태로 재료의 변형이 거의 없는 상태이므로 최적의 성형이 이루어 지려면 소재 유입의 억제등과 같은 적정의 구속이 필요하다고 판단된다. 또한 ㉑영역의 많은 부분에서 변형이 거의 일어나지 않은 상태임으로 성형이 계속 진행되어도 유동여력이 남아 있는 것으로 판단되므로 현 상태에서 랜싱 수행은 적절치 않다고 생각된다.

성형깊이가 345mm 인 경우의 성형상태를 살펴 보면, Fig. 7 의 ㉔부분이 성형이 진행됨에 따라 소재의 유입이 억제되면서 드로잉(drawing)과 스트레칭(stretching)에 의한 제품 성형이 이루어짐을 알 수 있었고, Fig. 7 ㉑영역에서는 ㉔부분으로 소재의 유입에 따른 상호 인장력의 증가로 인해 가공경화 현상이 발생하여 차츰 재료의 유입을 억제하고, 이로 인해 다이 어깨부에서 과도한 변형의 집중이 일어나고 있음을 알 수 있다(Fig. 8).

따라서 제품의 성형 상태와 파단을 고려한 결과 성형깊이가 345mm 에서 랜싱을 수행하는 것이 적절하다는 판단을 할 수 있었다. Fig. 9 는 앞의 결과를 바탕으로 345mm 성형후의 제품에서 수행한 랜싱의 위치 및 길이를 나타낸 것이다.

Fig. 10 은 랜싱을 수행한 후 성형깊이가 347mm 에서 성형해석 결과를 나타낸 것이다. 랜싱 후 성형깊이가 깊어짐에 따라 랜싱부의 폭이 넓어지는데 이는 성형시 랜싱으로 인해 제품 좌,우의 유동이 원활함을 알 수 있고, 이로 인해 성형된 제품에서 성형깊이가 깊어져도 변형률의 차이가 거의 없음을 알 수 있었다.

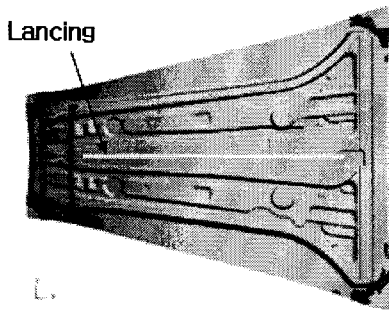


Fig. 9 Position of lancing (depth: 345mm)

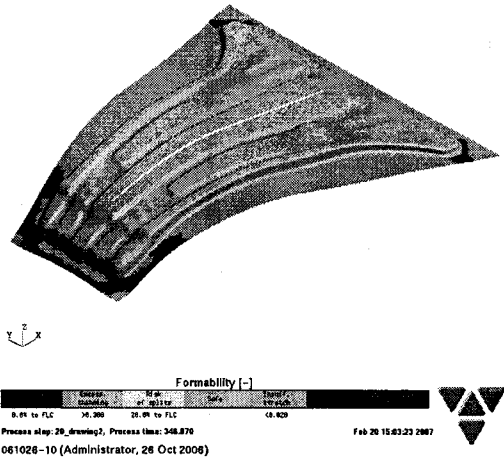


Fig. 10 Formability distribution (depth: 347mm, lancing)

Fig. 11 은 랜싱을 수행한 후 최종 성형깊이에 따른 성형해석결과를 나타낸 것으로, 랜싱부의 폭은 성형깊이가 347mm 일 때 보다 더 넓게 나타났으며, 이는 제품의 성형 시 ㉑부분에서 재료의 유입이 계속적으로 일어남을 알 수 있었다. 이로 인해 랜싱공법의 적용 없이 초기 성형해석에서 나타난 파단현상도 나타나지 않음을 확인할 수 있었다. 또한 랜싱 유무에 따른 제품의 성형성을 파악하기 위해 Fig. 5 와 Fig. 11 의 상태에서 각각 살펴보면, 랜싱공법을 적용하지 않은 상태에서는 ㉔부분에서 적당한 스트레칭(stretching)이 소재의 두께 변형률이 크게 나타나지 않음을 알 수 있었으나, 랜싱을 수행한 후에는 소재의 두께 변화가 매우 적은 부분이 ㉔의 일부에서 나타나고 있으나, 전체적인 비율이 매우 적으므로 제품의 품질에는 영향이 없는 것으로 판단된다. 만약 위와 같은 부분이 넓게 나타날 경우 스프링백과 같은 치수불량으로 제품의 품질을 저하 시키는 요인으로 작용할 수도 있다.

Fig. 12 는 랜싱공법을 적용한 성형해석에서의 성형한계도를 나타낸 것이다. 아래의 그림에서 파단은 랜싱의 끝부분에서 소재의 유입에 따라 인장력의 증가로 인해 찢어지는 현상이 나타남을 보여주는 것이다. 위와 같은 찢어짐 현상은 최대응력이 작용하는 방향으로 일어나고 이와 같은 방향은 랜싱의 길이방향으로 항상 일어난다고 볼 수 없다. 따라서 성형의 초기에 랜싱을 수행하면 대칭인 제품의 좌,우 재료의 유입량이 달라 품질이

다르게 나타남으로 적당한 성형깊이에서 랜싱을 적용하여야 이와 같은 현상을 최소화하는 것이 유리하다고 판단된다.

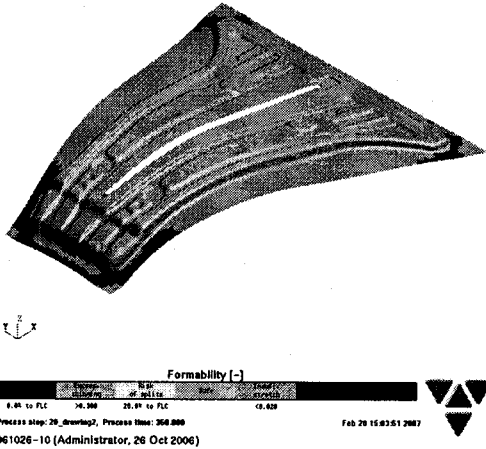


Fig. 11 Formability distribution (final, lancing)

본 연구에서는 자동차 센터필러의 성형을 위해 랜싱공법을 도입하였으며, 랜싱의 최적의 조건을 찾기 위해 CAE 성형해석을 수행하여 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

랜싱공법의 적용없이 성형 깊이가 350mm 인 제품의 1 차 성형해석 결과 다이 어깨부에서 파단이 발생하였으며, 파단의 원인이 재료의 유입불량임을 판단할 수 있었다. 단순히 파단만을 고려한 랜싱은 제품의 품질저하로 나타남을 알 수 있었다. 따라서 랜싱공법에서 최적의 조건은 랜싱부의 위치와 크기 그리고 랜싱을 시도할 최적의 시점인 적당한 성형깊이 등 임을 알 수 있었다. 이와 같이 랜싱공법을 도입하면 금형의 수정없이 제품의 성형이 가능하여 금형의 트라이아웃 기간을 단축하고 원가 절감이 가능하리라 판단된다.

따라서 성형해석을 통해 적정의 성형깊이에서 랜싱의 위치와 크기를 미리 예측함으로써 금형의 공법설계에 큰 도움이 되리라고 판단된다.

참고문헌

1. Ko, H. H., Jung, D. W., Ahn, H. G., Lee, C. H., Ahn, B. L. and Moon, W. S., "A Study of Tool Planning for Forming Analysis in REF SILL OTR-R/L Auto-Body Panel Stamping Process," Journal of the KSPE, Vol. 23, No. 3, pp. 118-124, 2006.
2. Jung, H. S. and Lee, S. S., "Automatic Design Supporting System for Automobile Stamping Tool," Journal of the KSPE, Vol. 19, No. 8, pp. 194-202, 2002.
3. Shim, H. B., Jang, S. D. and Park, J. K., "A Study on the Generation of Initial Shape for the Initiation of Optimal Blank Design Sequence," Transactions of Materials Processing, Vol. 13, No. 1, pp. 90-101, 2004.
4. Shim, H. B., Lee, S. H., Park, J. K. and Kim, H. U., "Development of Stamping Process Optimization System: Integration of Optimal Blank Design and Optimal Nesting," Proceedings of 2003 Spring Conference on the Korean Society for Technology of Plasticity, pp. 283-287, 2003.
5. Chung, W. J., Park, C. D., Song, Y. J. and Oh, S. W., "Trimming Line Design using Incremental Development Method and Finite Element Inverse

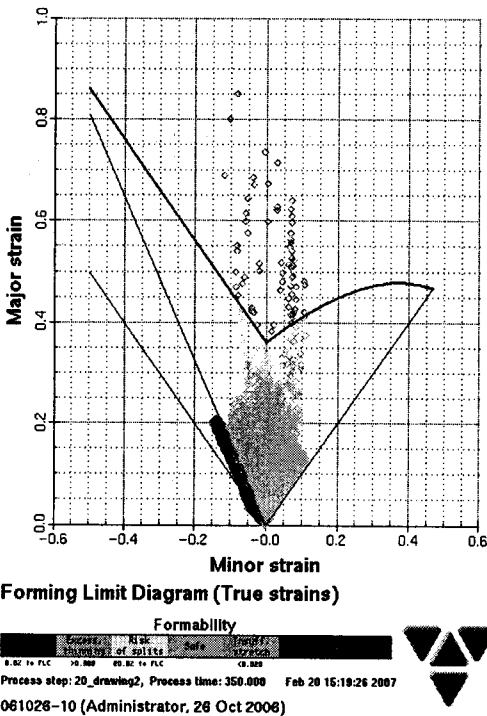


Fig. 12 FLD (final, lancing)

4. 결론

- Method," Transactions of Materials Processing, Vol. 15, No. 6, pp. 445-452, 2006.
6. Song, Y. J. , Hahn, Y. H, Park, C. D. and Chung, W. J., "Trimming Line Design of Auto-body Panel with Complex Shape Using Finite Element Inverse Method," Transactions of Materials Processing, Vol. 15, No. 6, pp. 459-466, 2006.
 7. SAE, METALS HANDBOOK "Forming," American Society for Metals, pp. 31-32, 1969.
 8. Cheng, J. H. and Kikuchi, N., "An Analysis of Metal Forming Processes using Large Deformation Elastic - Plastic Formulation," Comp. Meth. Appl. Eng., Vol. 49, Issue 1, pp. 71-108, 1985.
 9. Choi, T. H., "Numerical Simulations of Sheet Forming Processes by an Elasto-Plastic Finite Element Method," KAIST MS thesis, pp. 6-18, 1993.
 10. Chun, B. K., "Numerical Simulation of Bead Formation by an Elasto-Plastic Finite Element Method," KAIST MS thesis, pp. 7-23, 1992.
 11. Kim, D. W., "Plasticity," CHEONG MOON GAK, pp. 87-108, 1997.
 12. Kim, C. M., Im, Y. S., Heo, Y. M., Kim, N. S., Jung, G. C. and Seo, D. G., "Finite-element analysis and experimental verification for drawbead drawing processes," J. of Materials Processing Technology, Vol. 72, Issue 2, pp. 188-194, 1997.