

碩士學位請求論文

AutoForm을 이용한 차체 판넬 금형개발에 관한 연구



黃 材 信

2005年 2月

AutoForm을 이용한 차체 판넬 금형개발에 관한 연구

指導教授 鄭 東 垣

黃 材 信

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2005年 2月

黃材信의 工學 碩士學位 論文을 認准함



審査委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

濟州大學校 大學院

2005年 2月

A Study of Die Development for Auto-Body
Panel by using AutoForm

Jae-Sin Hwang

(Supervised by professor Dong-Won Jung)

A thesis submitted in partial fulfillment of the
requirement for the degree of Master of
Engineering



Department of Mechanical Engineering
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

February 2005

목 차

NOMENCLATURE	i
SUMMARY	iii
I. 서 론	1
1-1 연구개요	1
1-2 연구의 목적과 범위	2
II. 유한 요소 수식화	4
2-1 응력장식	4
2-2 Updated Lagrangian 수식화	5
2-3 구성방정식	6
2-4 접촉기법	7
2-4-1 접촉의 조건	7
2-4-2 마찰 법칙	9
2-5 유한 요소 근사식	9
2-6 성형한계곡선과 이방성	10
III. 성형해석결과	15
3-1 REF SILL OTR-R/L 채질선택	16
3-1-1 1차 성형해석결과(SP781-590_1.6t)	16

3-1-2 2차 성형해석결과(SP782-440_1.6t)	21
3-1-3 3차 성형해석결과(SP782-440_1.8t)	25
3-1-4 4차 성형해석결과(SP782-440_2.0t)	29
3-1-5 5차 성형해석결과(SP783-590_1.6t)	33
3-1-6 6차 성형해석결과(SP782-390_1.8t)	36
3-2 REF SILL OTR-R/L 공법개발	40
3-2-1 1차 공법개발(SP782-440_1.8t_2draw)	41
3-2-2 2차 공법개발(SP781-390_1.8t_2draw)	49
3-2-3 3차 공법개발(SP152-440_1.8t_2draw)	57
3-2-4 4차 공법개발(SP782-390_1.8t_2draw)	65
3-2-5 공법계획의 비교(Comparison for operation plan)	73
3-2-6 최종 공법개발(SP782-390_1.8t_final)	78
3-3 시제품 제작	86
IV. 결론 및 고찰	90
V. 참고문헌	92

NOMENCLATURE

- σ_{ji} : Cauchy stress tensor
- ρ : Density of material
- b : Material force vector
- Γ_F : Surface applied surface force
- Γ_D : Surface restricted displacement
- n : Surface force vector applied to Γ_F
- \overline{u}_i : Virtual displacement vector
- J : Deviatoric stress
- T_{ji} : The first Piola-Kirchhoff stress tensor
- ΔT_{ji} : Increment of the first Piola-Kirchhoff stress tensor
- σ_{ij}^{∇} : Zaremba-Jauman increment of Cauchy stress tensor
- \hat{D}_{ijkl} : Stress tensor of material
- λ : Lamé constant
- μ : Surface friction coefficient
- δ : Kronecker delta
- α : $\alpha = 0$ at plastic strain or unloading state
 $\alpha = 1$ at elastic strain or loading state
- s_{ij} : Deviation stress tensor ($= \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_{kk} / 3$)
- H_0' : Slope of true-algebraic elastic strain rate curve

$$\dot{H} = \dot{H}_0 / (1 - \dot{H}_0 / E)$$

f : Yield function



SUMMARY

The characteristic of sheet metal process is the few loss of material during process, the short processing time and the excellent price and strength. The sheet metal process with above characteristic is common used in industrial field, but in order to analysis irregular field problems the reliable and economical analysis method is demanded. Finite element method is very effective method to simulate the forming processes with good prediction of the deformation behaviour. Among finite element method, the static-implicit finite element method is applied effectively to analyze real-size auto-body panel stamping processes, which include the forming stage.

Using a new method in this study, out of the existing one, could solve the problem that was the unsolved with the existing method, pannel manufacture after selecting the most proper material out of the possibility of manufacture materials. The possibility of application in the practical industry site and validity were verified. This study is about analyzing the stamping process problems by using AutoForm commercial software which used static-implicit method. According to this study, the results of simulation will give engineers good information to access the die design of optimization.

I. 서론

1. 1 연구의 개요

박판 금속성형은 금속 판재를 이용하여 다양하고, 비교적 복잡한 형상의 제품을 만드는 것으로서 저렴한 소재, 제품의 높은 비강도, 대량 생산성 등의 큰 장점으로 인해서 현대 산업에 폭 넓게 적용되어지고 있는 분야이다. 하지만 대부분의 박판 성형물은 제조과정 중에 커다란 소성변형을 수반하게 되어 판재의 파단, 형상불량 등의 가공 결함이 발생하게 된다. 따라서 우수한 박판 성형물을 얻기 위해서는 합리적인 가공공정의 설계가 필수적이라 할 수 있다[1~2].

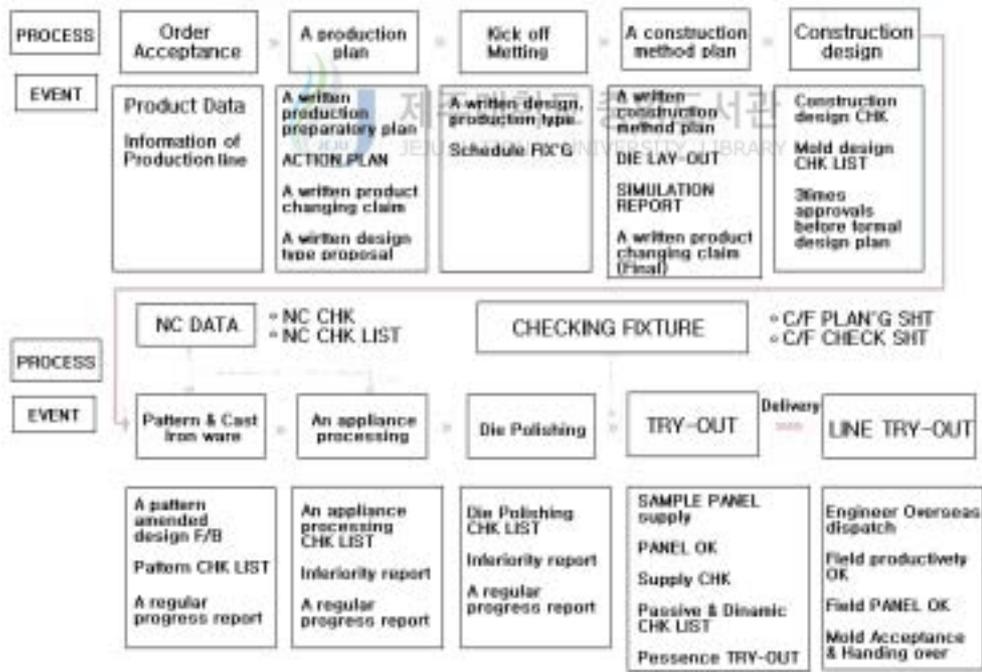


Fig. 1 Metallic mould manufacture process

Fig. 1과 같이 금형제작 과정은 차체부품의 최적설계를 위한 제품 솔루션을 한 후 현재제품상태에서 전개할 수 있는 최적의 공정계획, 제품물, 생산라인 작업조건, 성형성 확보방안 등을 제안한 다음 성형해석을 위한 제품 필렛팅, 다이모델링을 3차원으로 모델링한다. 다음으로 해석시스템을 직접 수행함으로써 실제 트라이-아웃 상황에서 발생하는 모든 변수들을 데이터 입력 시 고려하여 실제상황에 최대한 근접한 실제 트라이-아웃을 구현할 수 있게 한 다음 초기공법계획에 성형해석시스템의 해석결과에 대한 기술적 대응방안을 사전에 반영함으로써 최적의 다이 레이아웃을 완성한다.

1. 2 연구의 목적과 범위

금형을 설계 제작하는 방법에는 Fig. 2와 같이 제품도가 완성된 후에 펀치 프로파일과 다이 페이스를 얻기 위해 경험에 의한 데이터베이스를 이용하는 방법과 성형 시뮬레이션을 이용하는 두 가지 방법이 있다. 이러한 경험에 의한 방법은 금형개발비로 소요되는 비용 및 트라이아웃(try-out)의 횟수가 많아 질수 있는 단점이 있다. 반면에 성형 시뮬레이션은 금형개발비 및 트라이아웃(try-out)을 줄임으로서 개발기간을 단축시킬 수 있고, 개발투자비를 절감할 수 있다. 그러나 현재로서는 경험에 의한 설계가 지배적이며, 향후에는 성형 시뮬레이션으로 점차 변경 될 것으로 예상된다. 그리고 두 방법은 모두 수정과 검토 반복 작업이 이루어진다. 따라서 레이아웃의 변경에 따라, 금형 설계의 변경이 신속히 이루어져야 한다[3~6].

그동안의 금형 설계는 정해진 재질을 기준으로 공정변수와 공법을 개발하여

금형을 설계하는 것이 일반적이었다. 이러한 방법은 초기에 원했던 판넬을 얻지 못하는 일이 종종 일어나기도 한다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 가장 정확한 결과를 얻을 수 있는 해석방법이 필요하다. 특히 대형 차체판넬이나 가격이 비싼 판넬에는 정확한 결과 값이 필요하다. 때문에 본 연구에서는 정적-내연적 유한요소법을 이용하여 개발된 상용프로그램인 AutoForm을 사용하여, 실제 현장에서 사용하고 있는 차체 판넬들 중 하나를 선택하고, 기존의 방법을 탈피하여 새로운 방법으로 판넬을 제작 가능한 재질들 중에서 가장 적합한 재질을 선택한 후 기존의 공법으로 인해 문제가 되는 부분을 새로운 방법으로 공법을 개발하여, 실제 산업현장에서의 적용가능성 및 타당성을 검증하고자 한다.

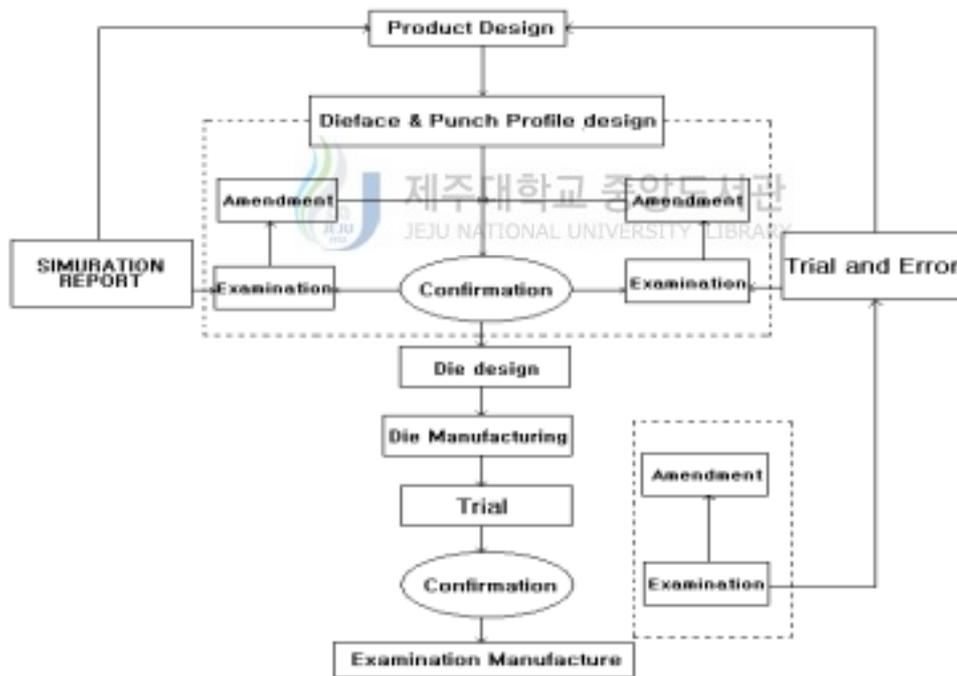


Fig. 2 Flow chart for die manufacturing

II. 유한 요소 수식화

2.1 응력장식

Fig. 3과 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_{ji} 는 다음의 평형방정식을 만족하는 임의의 응력장이 된다 [7~8].

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

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

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

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. 한편 경계표면은 표면력이 작용하는 Γ_F 와 변위가 규정된 Γ_D 의 부분으로 나눌 수 있으며, $t (= t_i e_i)$ 는 단위수직 벡터가 $n (= n_i e_i)$ 로 표시되는 Γ_F 에 작용하는 표면력 벡터이다.

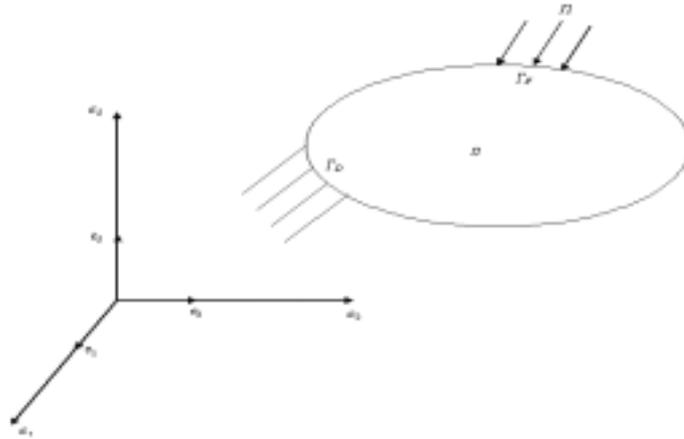


Fig. 3 Deformation of material and reference coordinates

2.2 Updated Lagrangian 수식화

$\bar{u} (= \bar{u}_i e_i)$ 을 Γ_D 에서 $\bar{u}_i = 0$ 인 임의의 가상변위 벡터라 할 때, (1)식의 양변에 곱해주고 Ω 에 대해 적분하여 발산정리(Divergence Theorem)를 적용하면 다음과 같은 지배방정식의 적분형(Weak Form)을 얻는다.[9]

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

such that $\bar{u} = 0$ on Γ_D (4)

이 (4)식이 변형된 형상 Ω 에서 수식화되었으므로, 변형량이 큰 경우에는 Ω 가 초기의 Ω^o 와는 차이가 크므로, (4)식을 변형시켜서 초기 형상 Ω^o 과 일치하는 기

준형상 Ω^R 에 대해 나타낼 필요가 있다. $J=1$ 이 되게 Δt 을 매우 작게 잡으면 다음을 얻을 수 있다.

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

2.3 구성방정식

유한 회전(Finite Rotation)효과를 허용하면서, 객관성을 갖는 Zienbatta-Jauman 증분(∇)을 Cauchy응력텐서에 도입하면 Von Mises 항복조건을 따르는 재료의 Prandtl-Reuss의 관계식은 다음과 같이 표현된다[10~11].

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

여기서

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

$$\hat{H}' = \frac{H_0'}{(1 - \frac{H_0'}{E} - \frac{(1-2\nu)\sigma}{E})}$$

이고, $\bar{\sigma} = \sqrt{3J}$ 는 유효응력이고, $H' = H_0'/(1 - H_0'/E)$, H_0' 는 진응력-대수 소성변형률의 기울기이다. 탄성변형 또는 재하상태일 때 $\alpha = 0$ 이고, 소성변형 또는 부하상태에서 $\alpha = 1$ 이다.

2.4 접촉기법

2.4.1 접촉의 조건

Fig. 4에서와 같이 변형체의 표면과 강성물체를 각각 아래와 같이 표현하면

$$x_2 = \phi(x_1) \text{ (변형체)} \quad (7)$$

$$x_2 = \psi(x_1) \text{ (강성물체)} \quad (8)$$

이고, 불침투조건은 다음을 만족해야 한다.

$$\phi(x_1) + v(x_1) \geq \psi(x_1 + u(x_1)) \quad (9)$$

여기서, $u(x)$, $v(x)$ 는 P점의 x_1 , x_2 방향의 속도를 뜻하고, 2차원의 작은 변형에 대해서 다음식으로 선형화 할 수 있다.

$$n_1 u(x_1) + n_2 v(x_2) \leq g(x_1) \quad (10)$$

여기서 $g(x_1) = \phi(x_1) - \psi(x_1)$ 을 Gap Function이라고 한다. $n (= n_i e_i)$ 는 Fig. 4에서와 같이 접촉면에 수직한 단위벡터이다. Die와 접촉하는 점은 $\phi = \psi$ 이므로 (10)식은 다음과 같이 되고

$$\Delta u_n - \Delta g_n = 0 \text{ on } \Gamma_c^* \quad (11)$$

이때 $\Delta u_n (= \Delta u_n \cdot n)$ 은 주어진 Δg_n 에 의해서 제한되는 수직 변위의 증분이고, 이 제한 조건을 부여하기 위해 벌칙 함수법(Penalty Method)를 쓰면, 수직 반력의 증분은 다음과 같다. 여기서 k_n 은 Penalty 상수이다.

$$\Delta u_n = -k_n (\Delta u_n - \Delta g_n) \text{ on } \Gamma_c^* \quad (12)$$

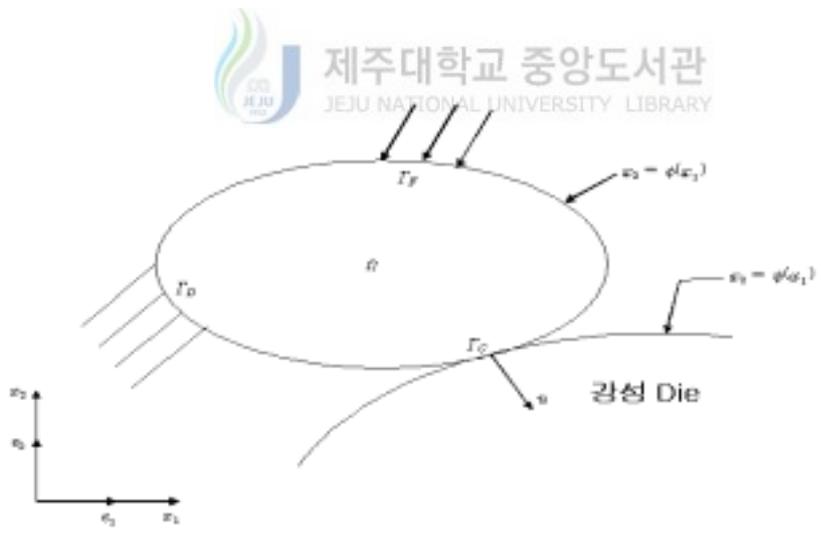


Fig. 4 2-Dimensional contact problem

2.4.2 마찰 법칙

마찰은 접촉점에서 질점의 상대운동에 의해 일어나며, 접촉면에서 마찰이 존재한다면 접촉조건 이외에도 마찰조건이 만족되어야 한다. 마찰 경계조건을 수정된 마찰식에 의해서 다음과 같이 절점의 외력으로 표현하였다.

$$F_T = \frac{u_T}{|u_T|} u F_N \tanh\left(\alpha \frac{u_T}{|u_T|}\right) \quad \text{on } \Gamma_c^* \quad (13)$$

여기서, K 는 매우 큰 상수이고, α 는 1보다 큰 수이다. 그리고 F_N 는 접촉 절점에 작용하는 수직력을 나타낸다.

2.5 유한요소 근사식

구성방정식과 앞의 (12)식과 관련된 (13)식을 이용하면 접촉조건을 포함한 Updated Lagrangian Approach의 가상일의 원리는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega^t} (L_{ijkl} \Delta u_{k,l} + \sigma_{jk}^t \Delta u_{i,k}) \bar{u}_{i,j} d\Omega^t + \\ & \int_{\Gamma_c^*} \left\{ k_n (\Delta u_n - \Delta g_n) \bar{u}_n + \mu \sigma_n \Phi_\epsilon \left(\frac{|u_T|}{|u_T|} \right) \frac{u_T}{|u_T|} \bar{u}_T \right\} d\Gamma^t \quad (14) \\ & = \int_{\Omega^t} \rho \Delta b_i \bar{u}_i d\Omega^t + \int_{\Gamma_D^t} \Delta t_i \bar{u}_i d\Gamma^t \end{aligned}$$

$$\forall \bar{u}_i (= \delta u_i) \text{ such that } u_i = 0 \text{ on } \Gamma_D^t$$

최종적으로 (15)식과 같이 유한요소 근사식을 얻을 수 있다.

$$\left(\sum_e K_{ija\beta}^{\Omega_e} + \sum_e K_{ija\beta}^{\Gamma_{ce}}\right) \Delta u_{j\beta} = \sum_e f_{ia}^{\Omega_e} + \sum_e f_{ia}^{\Gamma_{fe}} + \sum_e f_{ia}^{\Gamma_{ce}} \quad (15)$$

좌변항으로 표시되는 $K_{ija\beta}^{\Omega_e}$ 와 $K_{ija\beta}^{\Gamma_{ce}}$ 는 요소의 강성행렬(stiffness matrix)을 의미하고, 우변항의 $f_{ia}^{\Omega_e}$, $f_{ia}^{\Gamma_{fe}}$ 및 $f_{ia}^{\Gamma_{ce}}$ 는 요소의 외력벡터를 나타낸다.[12]

2.6 성형한계곡선과 이방성

박판 성형기술이 예술의 경지에서 과학의 한 분야로 취급되기 시작한 것은 1960년대 중반 그릿드에 의한 변형 측정 기술과 성형한계도가 적용되기 시작하면서 부터이다.

성형한계도란 판면의 주 및 부 변형률의 비를 변화시키면서 파단이 일어나는 한계 주 및 부 변형률을 측정하여 주 및 부 변형률 평면상에 도시한 것이다. Fig. 5는 성형한계도를 나타내고 있다. 이 성형한계도는 Fig. 6과 같이 일반적으로 끝이 둥근 편치에 의한 스트레칭(stretching)에 의해서 측정된다. 즉, 원형의 그릿드가 프린트 된 판재의 주위를 링 형상의 다이로 꼭 잡은 상태에서 반구형의 끝을 가진 편치로 파단이 일어날 때까지 눌러서 파단부 주위의 변형된 원 즉, 타원의 장축과 단축의 길이를 측정함으로써 얻어진다. 판의 폭과 윤활조건을 변화시킴으로써 주 및 부 변형률의 비를 변화시킬 수 있다. 실제 성형공정에서 일어나는 변형률의 조합이 Fig. 5에서 성형한계 곡선의 상단부에 있으면 파단이 일

어나고 그 하단부에 있으면 안전하다는 것을 의미한다.

성형한계도는 1960년대 중반 Keeler와 Backofen[13] 그리고 Goodwin[14]에 의해서 실험적으로 그 존재가 알려졌다. Keeler와 Backofen은 이축인장하에서 판재의 파단을 연구하면서 성형 한계도의 존재를 증명하였다. 이축도가 증가할수록 국부파단이 일어나는 한계 주변형률의 크기가 커진다는 사실도 발견하였다. 강, 동, 황동 및 알루미늄에 대하여 실험적으로 성형 한계도의 $\epsilon_2 / \epsilon_1 > 0$ 쪽 부분을 얻었다. Goodwin은 여러 가지의 컵 시험과 인장시험을 통하여 성형한계도를 $\epsilon_2 / \epsilon_1 < 0$ 쪽까지 연장하였다. 컵 시험에서 블랭크의 형상, 블랭크 홀딩압력의 제어로 파단부의 주 및 부 변형률의 비를 변화시킬 수 있었다.

성형한계도의 한계변형률은 원형 그릿드의 직경, 소판에서 시편을 채취한 방향, 윤활조건, 판의 두께, 변형이력, 변형률 속도 등에 따라서 영향을 받는다. 그릿드 원의 직경이 작아질수록 성형 한계가 약간씩 높아지고 실제에 보다 가깝게 된다고 할 수 있다. 그러나, 측정상의 오차는 점차 증가하게 된다. 재료의 이방성 때문에 소판에서 판을 채취하는 방향에 따라서도 성형 한계에 있어서 다소의 차이가 나타나게 된다. 펀치-판재간의 윤활조건에 따라서 판단부 주위의 주-부 변형률비가 변함은 물론 성형 한계에 있어서도 다소의 차이가 나타난다. 즉, 윤활조건이 개선되면 성형 한계가 약간 높아진다. 판재의 두께가 두꺼워질수록 성형 한계가 높아지는 경향을 보인다. 변형이력 즉, 변형경로의 변화에 따른 영향은 보통의 시험 및 작업조건 범위에서는 큰 영향이 없는 것으로 알려져 있다.[15~17]

성형한계도는 새로운 박판 성형 공정의 개발 시에 성형난이도의 평가도구로서 널리 이용되고 있다. 즉, 주어진 재료에 대하여 설계 및 제작된 금형에서 트라이아웃을 통하여 측정된 각 부분의 주 및 부 변형률을 성형 한계도 상에 표시하여

그것과 비교함으로써 성형의 가부 및 성형 난이성을 평가할 수 있다. 즉, 성형 한계에 가까울수록 성형이 어렵다는 의미가 된다. 과단의 위험이 클 경우에는 금형설계 및 작업 조건을 개선하고 그것으로도 해결이 불가능 할 때는 성형 단계를 나누고 실제 공정이 성형 공정이 성형 한계보다 매우 낮은 경우에는 성형 단계를 줄이거나 보다 저급의 재료를 상용함이 바람직할 것이다. 그릿드 마킹법을 이용함으로써 이러한 판단을 정량적인 자료에 의해서 행할 수 있게 된다. 주름현상에 대한 한계를 측정하여 성형한계도상에 표시하게 된다. 보다 유용한 자료가 될 수 있는데 그 한 예를 Fig. 7과 같다.

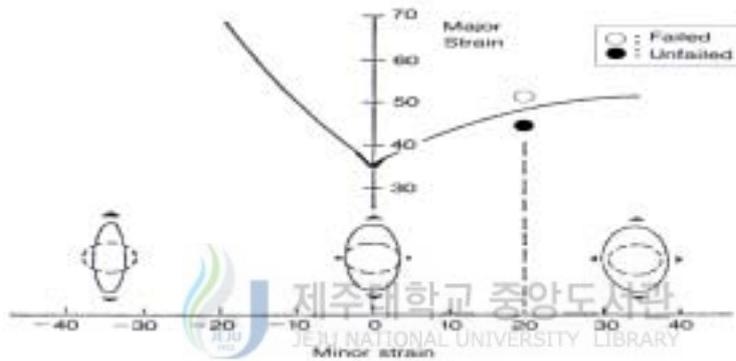


Fig. 5 Forming limit diagram(FLD)

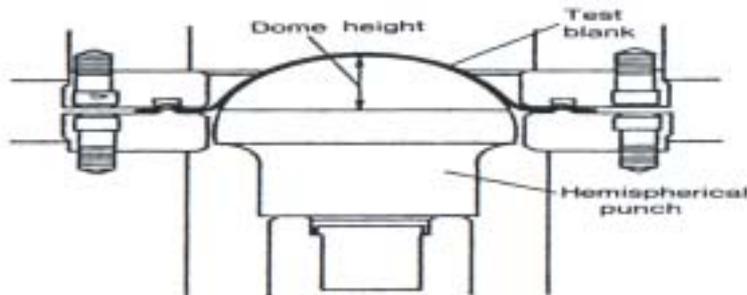


Fig. 6 Geometric description of the tooling for deep drawing

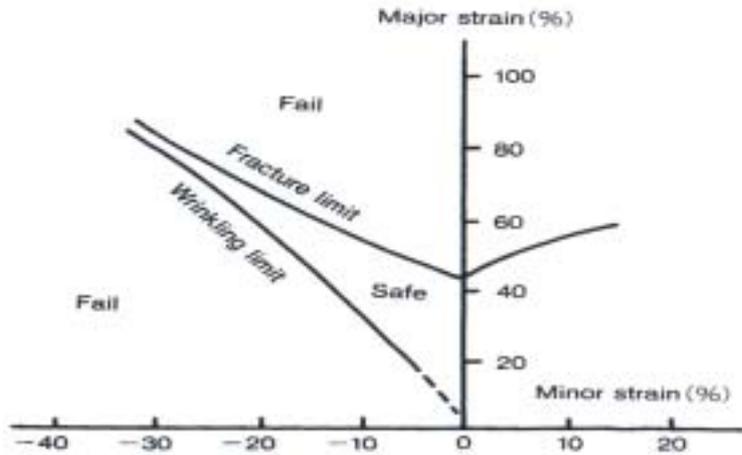


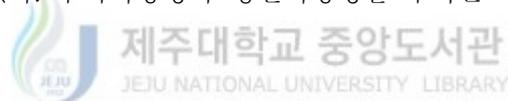
Fig. 7 Forming limit diagram(FLD)

금속판재성형에서의 또 다른 중요한 인자는 판재의 이방성, 즉 방향성이다. 이 방성은 판재의 열기계적 가공능력에서 생기는데, 결정학적 이방성과 기계적 섬유화가 있다. 이방성은 판재 면에만 나타나는 것이 아니고, 두께방향으로도 생길 수 있다. 이 때, 전자를 평면이방성, 후자를 수직이방성 또는 소성이방성이라고 한다. 금속판재의 수직이방성지수 r 이 크면 딥드로잉성이 향상된다. 그 이유는 정상적인 딥드로잉 공정에서는, 컵의 벽면에 길이방향으로 높은 인장응력이 걸림으로써 파단이 일어난다. 재료가 다이공동부로 움직이는 것을 관찰해 보면 재료는 폭이 줄어들면서 컵 벽면에서는 길이 방향으로 인장응력을 받아야한다. 두께에 대한 폭 방향 변형률의 비는 (16)식으로서 r 은 금속판재의 수직이방성이라고 한다. 수직 이방성이 크게 되면 깊이 방향의 변형률이 크게 된다. 즉 같은 길이로 늘어난다고 가정하면, 수직 이방성이 크게 되면 보다 작은 인장응력이 생기고

과단을 지연시키므로 딥드로잉성이 향상된다.

$$r = \frac{w}{t} = \frac{\ln\left(\frac{W_o}{W_f}\right)}{\ln\left(\frac{t_o}{t_f}\right)} \quad (16)$$

그리고 관재성형에서 성형한계도의 왼쪽영역에서 변형률을 조절하는 것이 좋은 이유는 Fig. 5를 보면 곡선의 위치가 높을수록 재료의 성형성이 좋다고 할 수 있다. 또한 그림에서 관재의 과단 시에 같은 부변형률의 크기, 예를 들어 20%로 압축된 경우(음의 부변형률)가 20%로 인장된 경우보다 큰 주변형률 값을 가지며, 이로부터 부변형률은 음의 값, 즉, 단축방향으로 수축을 일으키는 것이 성형성을 향상시킬 수 있는 방법임을 알 수 있다. 따라서 오른쪽보다는 왼쪽 영역에서 작업하는 것이 좋다고 하겠다. 수직이방성과 평면이방성을 구하는 법은 두 가지 방법이 있다.



첫 번째로는 $\bar{r} = (r_0 + 2r_{45} + r_{90}) / 4$ 으로 구하는 방법과 두 번째로 $\Delta r = (r_0 - 2r_{45} + r_{90}) / 2$ 으로 구하는 방법 두 가지가 있다. 전자에서의 첨자 0, 45, 90은 채취된 시편이 압연방향과 이루는 각도로서, 등방성 재료인 경우에는 \bar{r} 값이 1 이 되며, 후자에서의 압연방향에 대하여 0°, 90°방향의 평균 r 값과 45°방향의 r값의 차를 나타낸다.[18]

Ⅲ. 성형해석결과

본 장에서는 정적-내연적 유한요소법을 이용하여 개발되어진 상용프로그램인 AutoForm을 사용하여, 실제 현장에서 사용되어지고 있는 Fig.8에 표시된 차체 파트에 들어가는 보강재로써 기존의 재질선택방법을 탈피한 새로운 방법으로 제작이 가능한 재질들 중에서 가장 적합한 재질을 선택하였다. 본 결과들은 최적의 재질을 선택하는 과정에서 나온 해석결과들이며, 전체적인 재질선택을 위한 성형 해석의 차수와 입력조건을 Table. 1에 나타내었다.



Fig. 8 A part by using forming analysis

Table. 1 Input condition

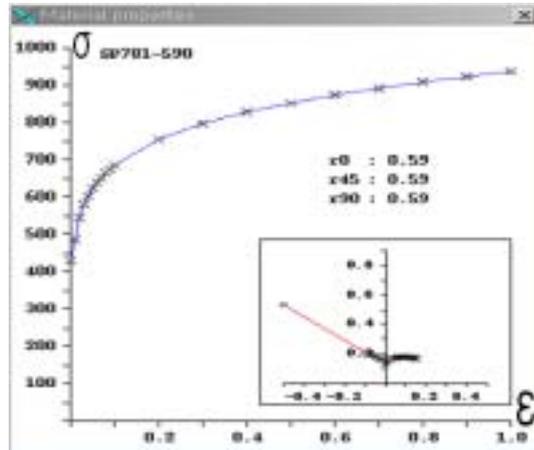
Analysis degree	1st	2nd, 3rd, 4th	5th	6th
Material	SP781-590	SP782-440	SP783-590	SP782-390
r-values	0.59	1.18	0.61	1.48
Thickness	1.6t	1.6t, 1.8t, 2.0t	1.6t	1.8t
Drawing Pressure	90TON	70TON	70TON	70TON
Binder Pressure	1060TON	1000TON	1000TON	1000TON
Blank Size	1995mm X 390mm	1970mm X 350mm	1970mm X 350mm	1970mm X 350mm

3.1 REF SILL OTR-R/L 재질선택

3.1.1 1차 성형해석결과



Fig. 9에서는 SP781-590 재질의 특성을 응력-변형율곡선과 성형 한계 곡선(내부 그래프)으로 나타내었다. 이는 박판 성형 중 재료에 주름(Wrinkling)이나 파단(Crack)이 발생하게 될 때, 그 부분을 새롭게 설계하거나 제조방법을 바꾸어 변형율의 상태가 재료의 성형한계를 넘지 않도록 하는데 없어서는 안되는 중요한 자료가 된다. 이러한 성형한계는 실험을 통해 결정하며, 이는 성형한계곡선으로 다시 나타내고 이 곡선은 주변형률의 향으로 결정이 된다.[18] 그리고 r은 이방성 계수를 말하며 r0, r45, r90에서 0, 45, 90은 채취된 시편이 압연 방향과 이루는 각도를 말한다.



Model = QW
 P/Name = REF SILL OTR-R/L
 Application = AutoForm(B/H+DR)
 Material = SP781-590
 r-values = 0.59
 Poisson's ratio = 0.3
 Young's modulus = 2.1×10^5 MPa
 Thickness = 1.6
 Binder Pressure = 90 TON
 Drawing Pressure = 1060 TON
 Blank Size = 1995mm X 390mm

Fig. 9 The first input condition

Fig. 10에서는 성형이 완료 후의 두께 감소 분포도를 보여주고 있으며, SP781-590_1.6t 재질로 성형해석 한 결과 파단이 일어날 가능성이 있는 곳이 5군데에서 나타났다. 파단으로 문제가 된다고 생각하는 기준은 두께 감소가 -0.250으로 25%이상이 되는 부분을 파단의 가능성이 있다고 판단한다.

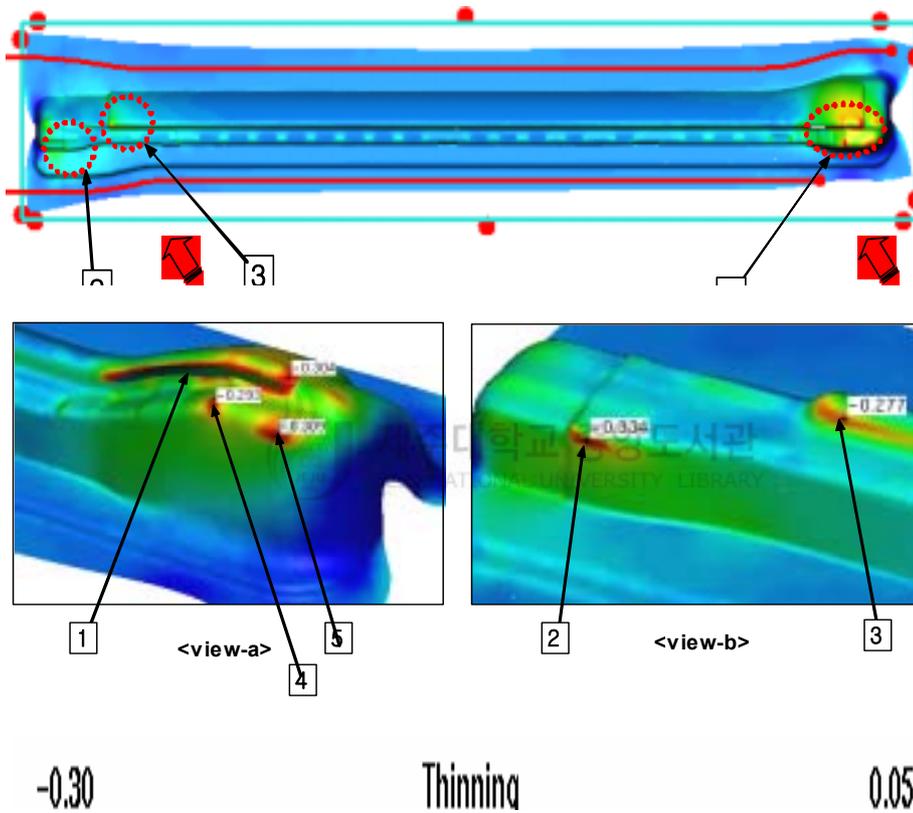


Fig. 10 Thickness reduction

Fig. 11은 최종 성형 완료단계에서의 주름의 경향을 보여주고 있으며, 한 부분에서 주름이 심하게 나타났다. 특히, 이 부분은 다른 판넬과 접하는 매칭부분이라 주름 문제를 해결해야만 한다.

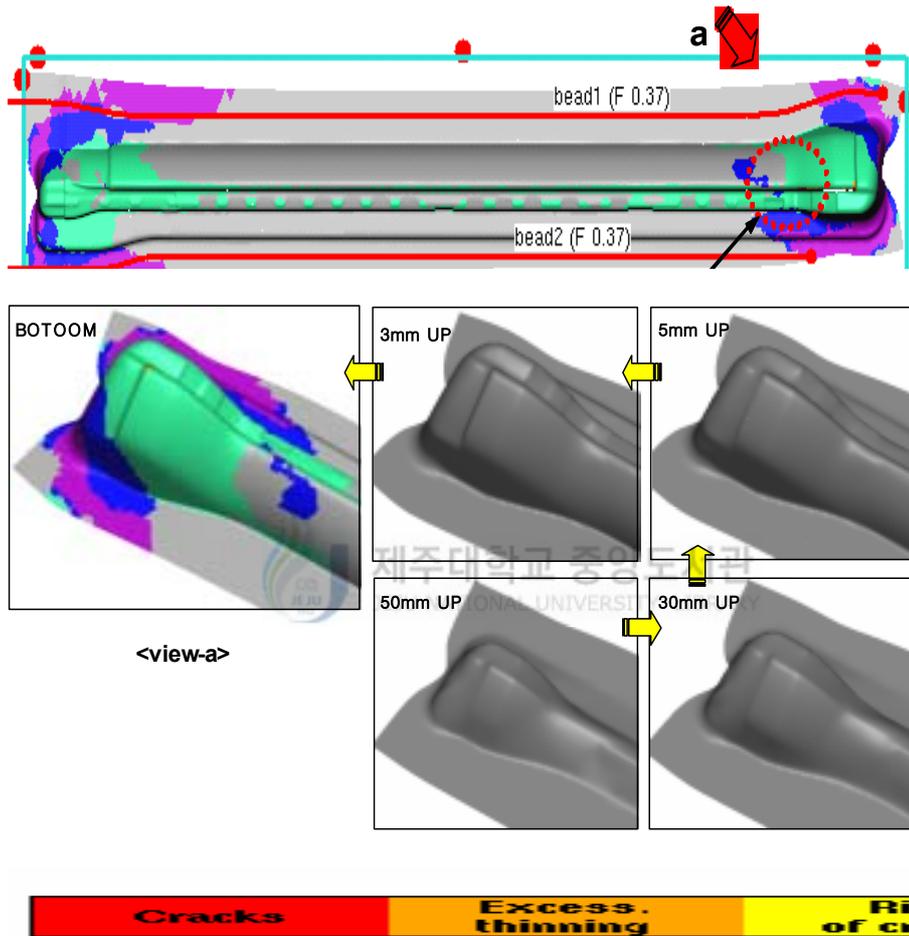


Fig. 11 Wrinkling

Fig. 12은 판넬의 성형 완료후의 변형된 형상들을 성형한계곡선으로 나타내었다. 과도한계곡선 주위에 분포한 부분들은 과단이 일어났거나 가능성이 있다고 간주하며, 순수전단 상태의 분포한 부분들은 주름이 발생하는 것으로 간주한다.

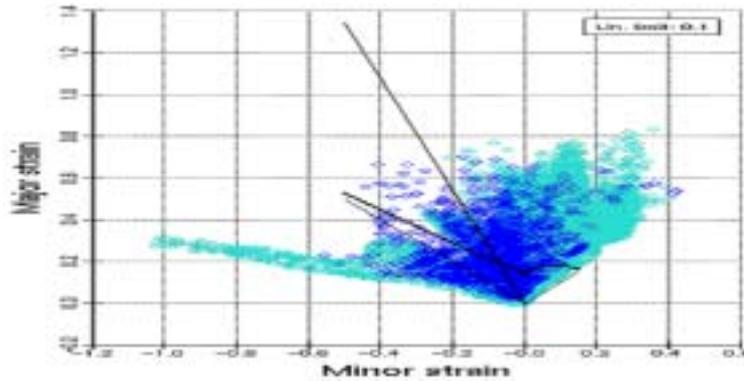


Fig. 12 Forming limit diagram distribution chart

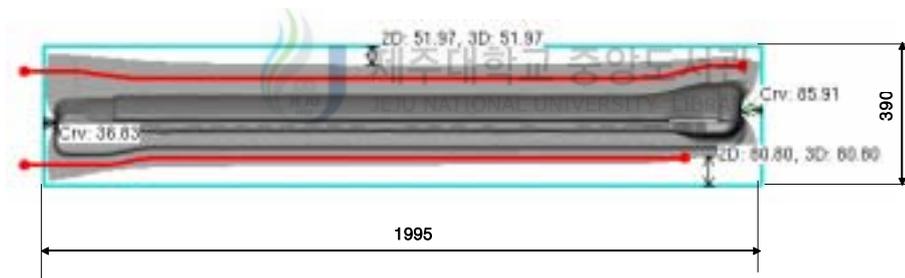


Fig. 13 Blank size & Metal flow

Fig. 13에서는 판넬의 성형 완료 후의 다이페이스와 비드의 위치, 다이페이스에서 성형완료단계까지의 방향성과 거리를 보여주고 있다. 이 부분은 최적의 공정변수를 결정하기 위한 것으로 블랭크사이즈가 불필요하게 크다는 것과 바인더 압력, 드로잉압력을 적당하게 줄여야 한다는 것을 메탈 프로우(Metal flow)의 결과로 알 수 있었다. 본 해석은 최적의 공정변수를 정하기 위한 초기 단계에서 해

석한 결과이며, 재질이 정해지지 않은 상태에서 가해석한 결과이다.

3.1.2 2차 성형해석결과

2차 성형해석에서는 초기단계에서의 결과를 바탕으로 판넬이 제작 가능한 다른 재질로 변경하고 불필요한 블랭크사이즈를 가로, 세로 각각 25, 40mm 줄이고, 파단과 주름으로 문제를 해결하기 위해 마찬가지로 바인더압력과 드로잉압력을 각각 20, 60TON을 적당히 줄여 성형해석하였다.

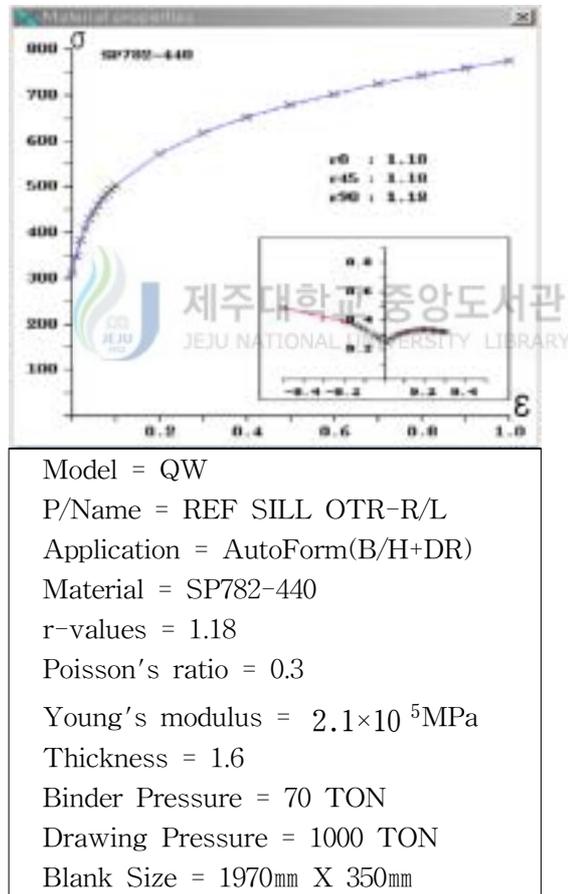


Fig. 14 The second input condition

재질을 SP782-440_1.6t로 변경한 후 성형 해석한 결과 Fig. 15에서 보는 바와 같이 과도한 파단이 일어났다.

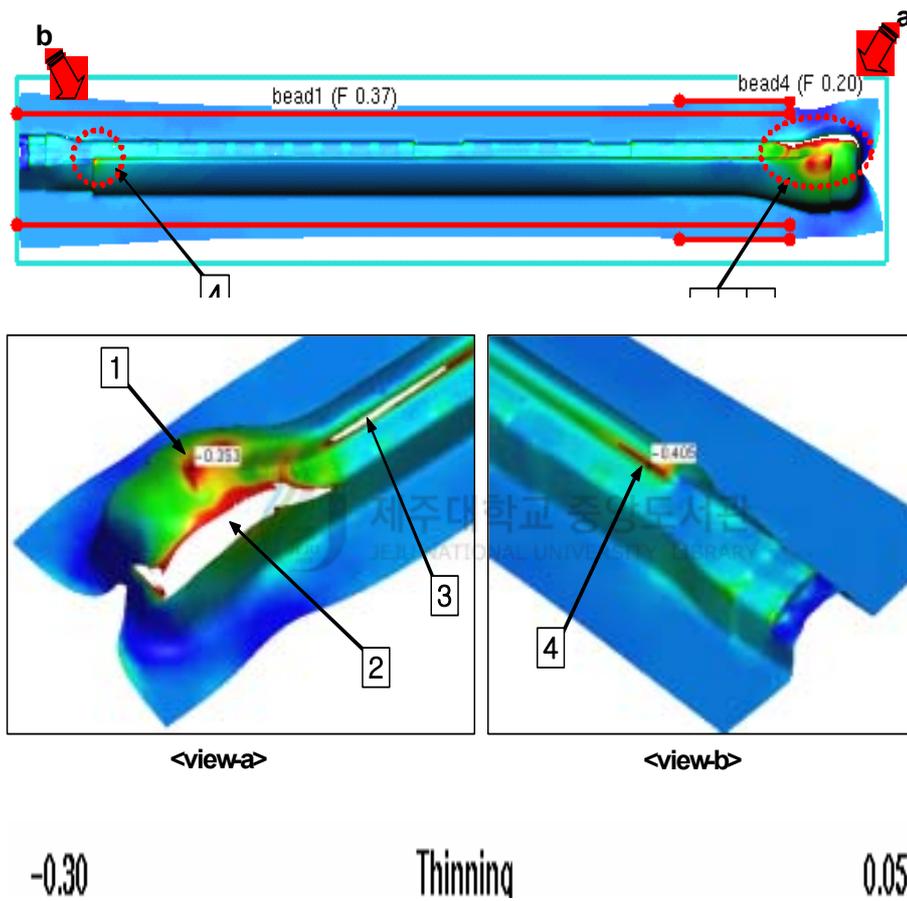


Fig. 15 Thickness reduction

성형성을 개선하기 위해 재질을 변경하였지만 Fig. 16에서 보는 바와 같이 매칭부분에서 여전히 주름이 발생하였다.

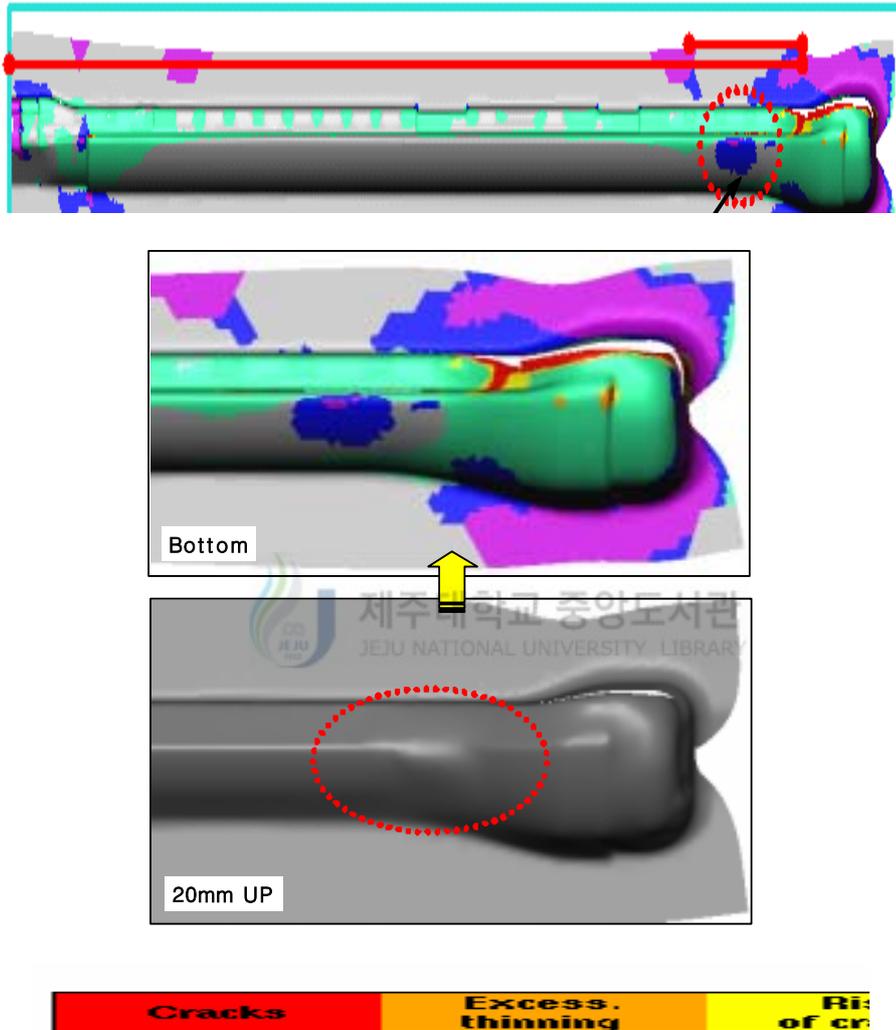


Fig. 16 Wrinkling

Fig. 17에서는 성형완료 후의 변형된 부분들을 성형한계곡선으로 나타낸 결과, 파단한계곡선 주위로 파단이 일어났거나 가능성이 있는 부분이 많이 보이고 있으며, 순수전단 상태부분에서의 분포를 보면 주름의 발생이 심각하다는 것을 알 수 있었다.

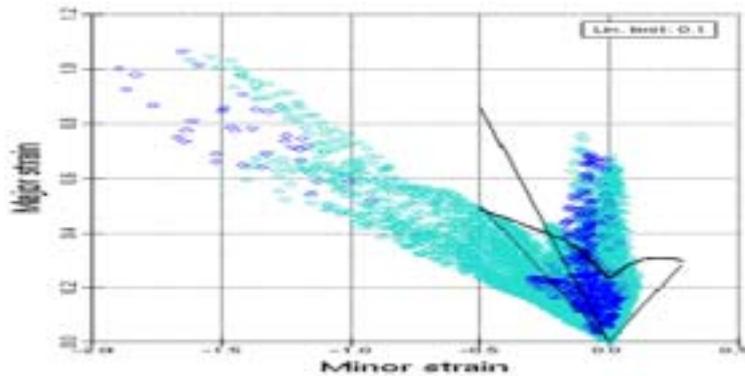


Fig. 17 Forming limit diagram distribution chart

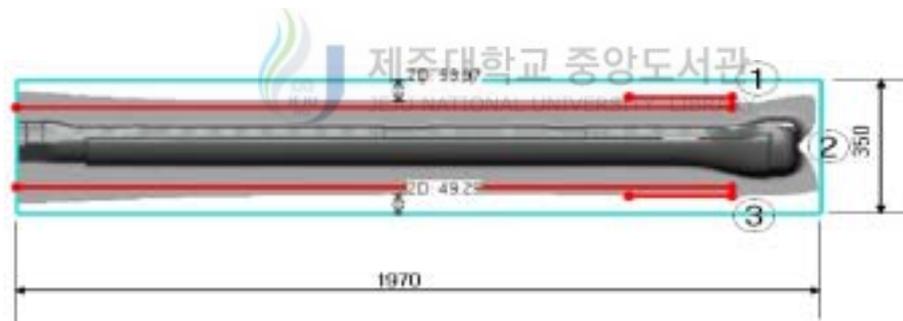


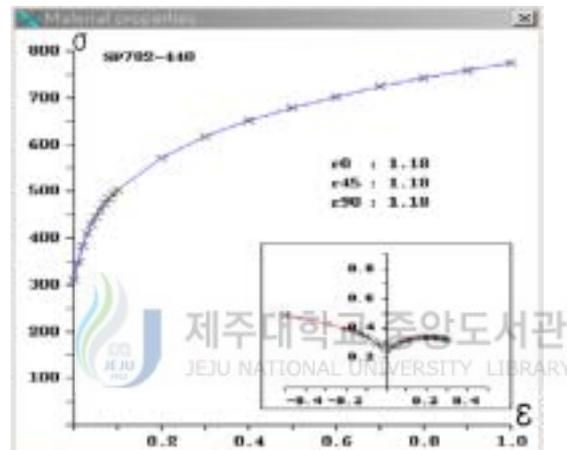
Fig. 18 Blank size & Metal flow

Fig. 18에서는 재질을 SP782-440_1.6t의 성형성을 볼 때 블랭크 사이즈는 적당하며, ②, ③부분에서는 성형이 잘되지만 ①부분에서 성형이 잘 되지 않아 파단이 일어나는 것을 알 수 있었다. 파단의 원인으로 재질과 두께의 부적합한 것으

로 판단되어지며, 과단과 주름을 완화시키기 위한 방법으로 재질의 두께를 변경하거나 다른 재질로 변경하는 방법이 있다. 3.1.3에서는 주름과 과단의 문제를 해결하기 위한 방법으로 두께를 변경하였다.

3.1.3 3차 성형해석결과

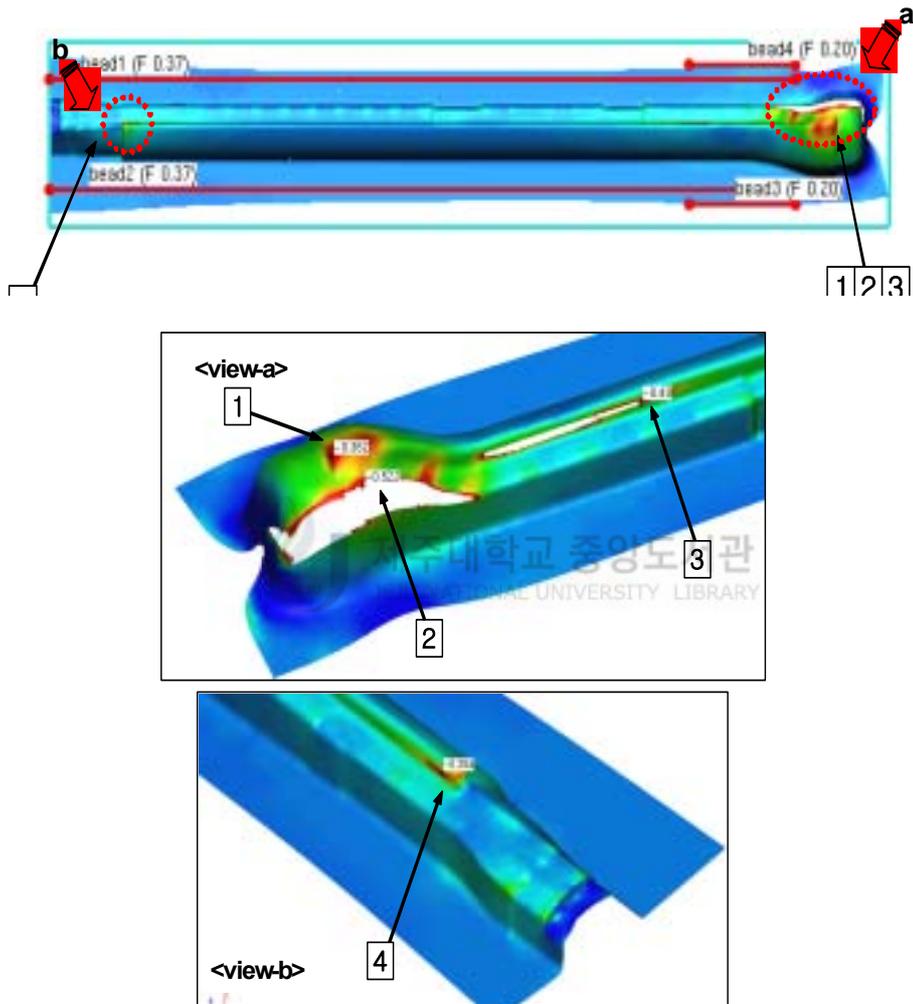
3차 해석에서는 주름과 과단으로 문제가 되는 부분을 해결하기 위한 방법으로 재질의 두께를 변경하여 성형해석하였다.



Model = QW
 P/Name = REF SILL OTR-R/L
 Application = AutoForm(B/H+DR)
 Material = SP782-440
 r-values = 1.18
 Poisson's ratio = 0.3
 Young's modulus = 2.1×10^5 MPa
 Thickness = 1.8
 Binder Pressure = 70 TON
 Drawing Pressure = 1000 TON
 Blank Size = 1970mm X 350mm

Fig. 19 The third input condition

두께를 변경하여 성형해석 한 결과를 두께감소율로 나타낸 결과 파단이 조금은 완화되었지만 여전히 과도한 파단이 나타났다.



-0.30

Thinning

0.05

Fig. 20 Thickness reduction

두께분포도와 마찬가지로 두께를 변경하여 해석한 결과 Fig. 21에서 보는 바와 같이 주름이 조금은 완화되었지만 여전히 다른 판넬과 매칭하는 부분에서 주름이 발생하였다.

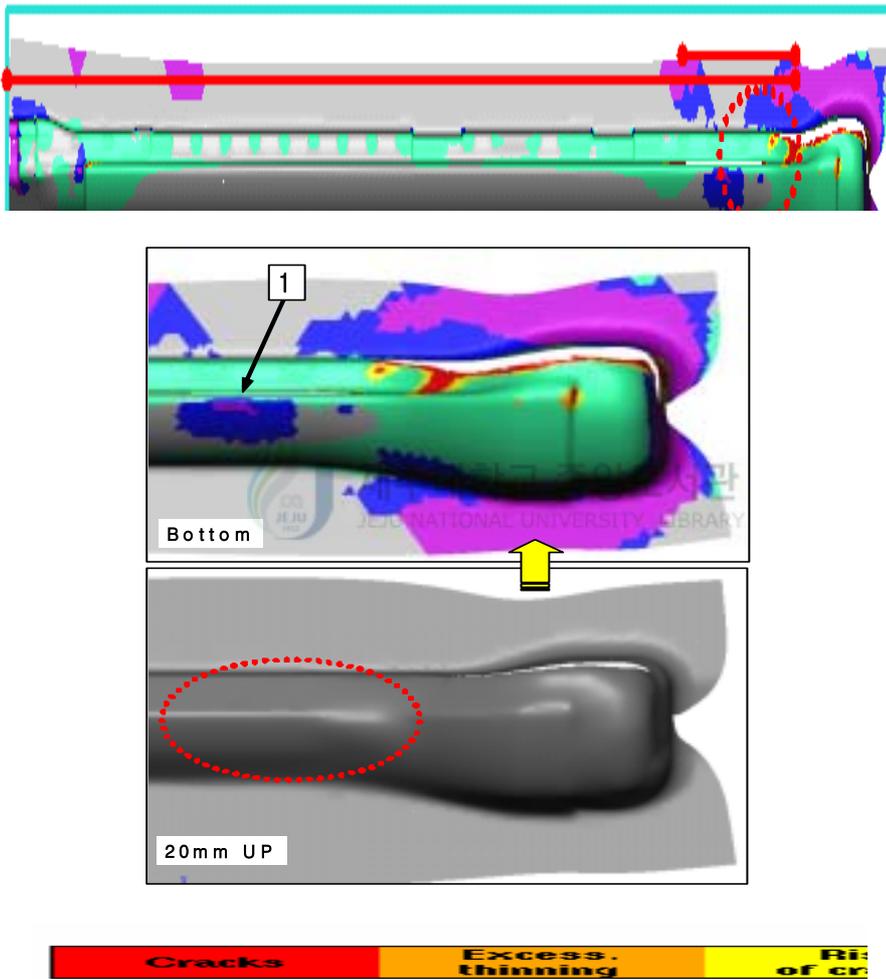


Fig. 21 Wrinkling

기존 두께 1.6t에서의 성형한계곡선보다 좋은 결과를 보여주고 있으며, 재질의 성형한계곡선도 올라간 것을 볼 수 있다. 즉, 재질의 두께를 변경으로 성형성을 개선할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

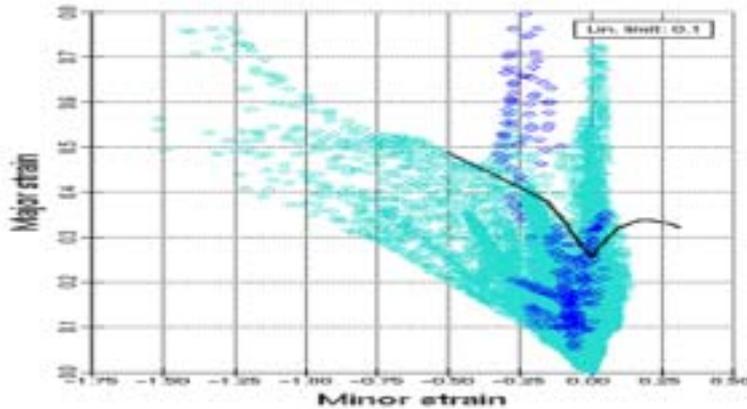


Fig. 22 Forming limit diagram distribution chart



Fig. 23 Blank size & Metal flow

Fig. 23에서는 두께 1.6t로 성형해석 한 결과와 마찬가지로 ①부분에서 성형이 잘 이루어지지 않는 것을 볼 수 있다. 주름과 파단의 대책 방안으로 두께를 또 다시 변경하여 성형해석하였다.

3.1.4 4차 성형해석결과

4차 성형해석에서는 두께 1.8t로는 파단과 주름을 해결하지 못하여 또 다시 두께를 2.0t로 높여 해석한 결과이다.

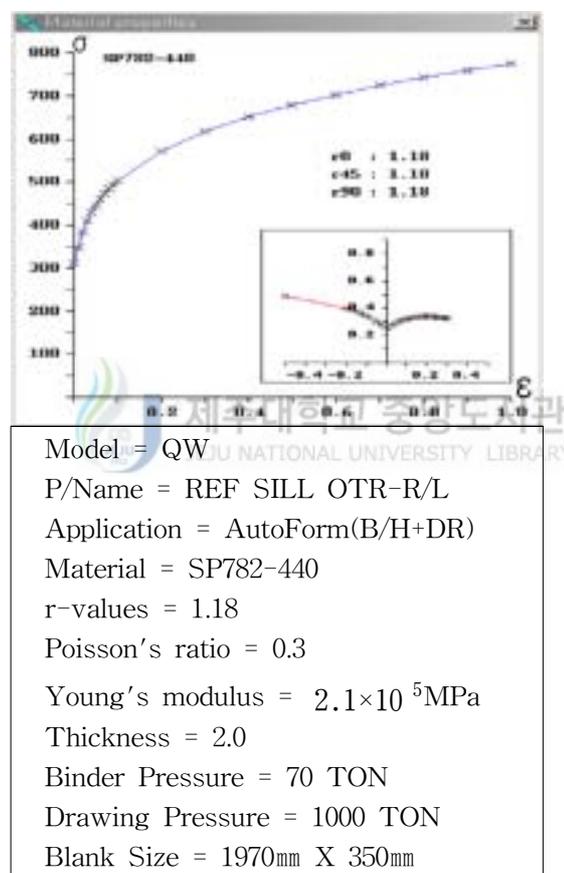


Fig. 24 The 4th input condition

해석한 결과 1.8t에서보다는 결과가 좋았지만, Fig. 25에서 보는 바와 같이 여전히 심한 파단을 보이고 있었다.

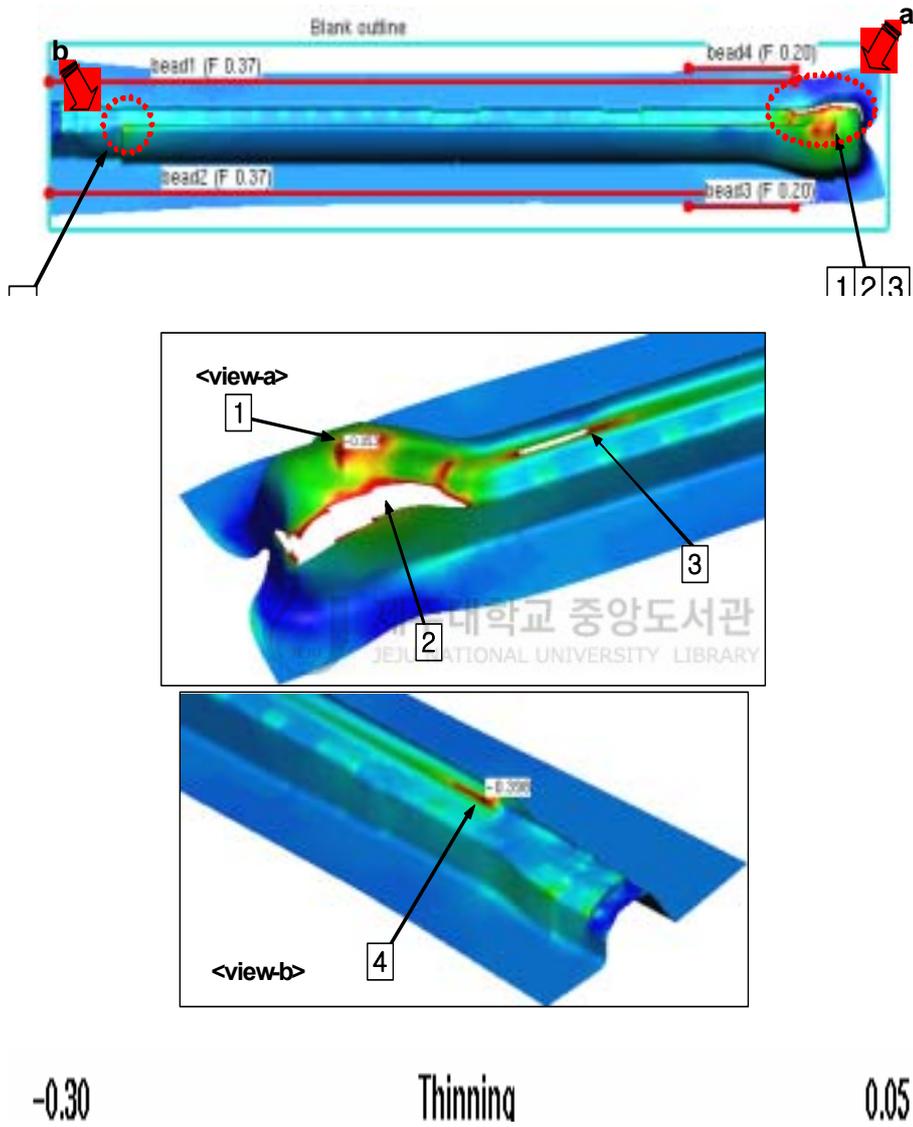


Fig. 25 Thickness reduction

주름도 마찬가지로 여전히 매칭부분에서 문제가 되므로 SP782-440 재질은 두께의 변경으로는 주름과 파단을 해결하지 못한다는 것을 성형해석을 통해 알 수 있었다.

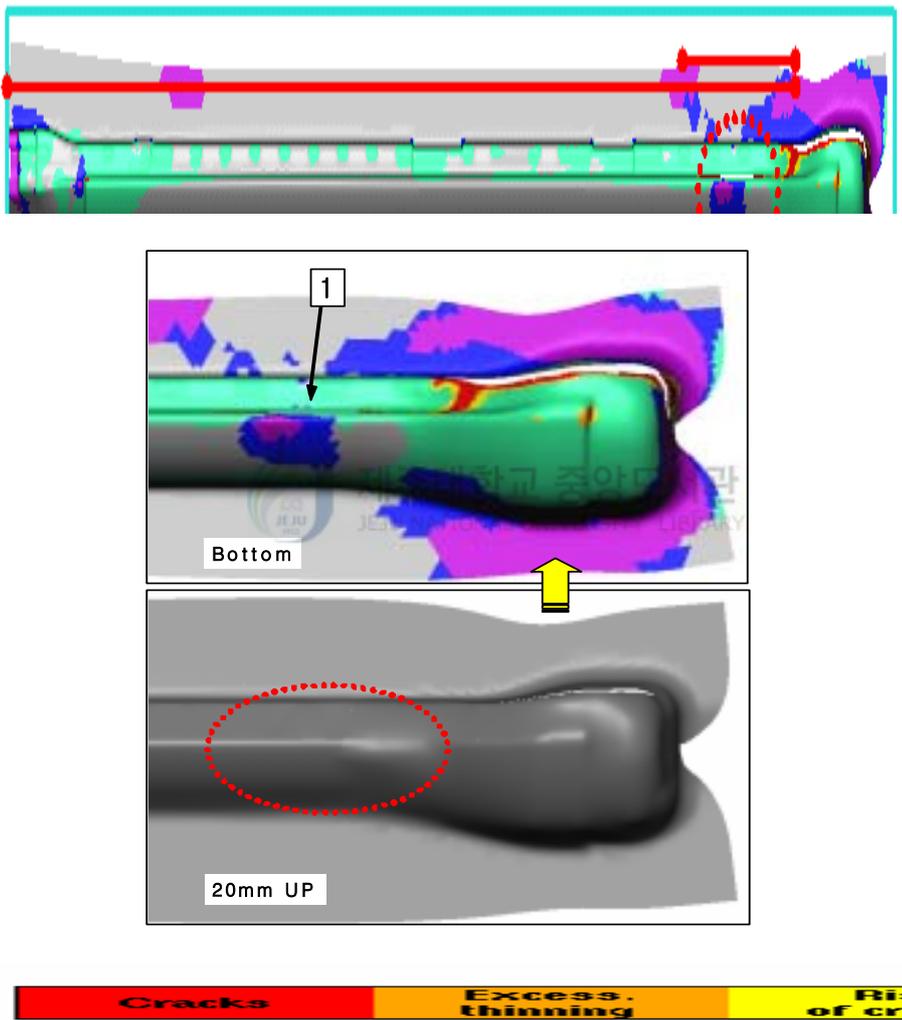


Fig. 26 Wrinkling

SP782-440 재질의 두께를 변경하여 성형해석 한 결과들 중 가장 좋은 성형한 계곡선이 나왔으며, 두께를 변경하는 것이 성형성을 개선시킬 수는 있었지만 파단과 주름의 문제는 여전히 해결하지 못하였다. 즉, REF SILL OTR-R/L의 차체 판넬에는 SP782-440 재질은 적합하지 않다는 결론을 얻었다.

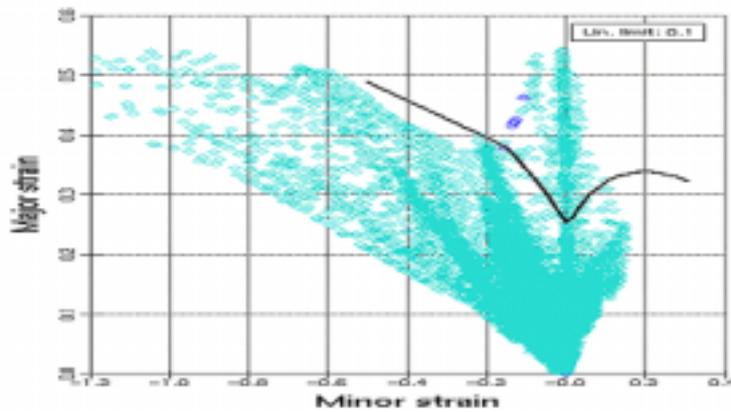


Fig. 27 Forming limit diagram distribution chart

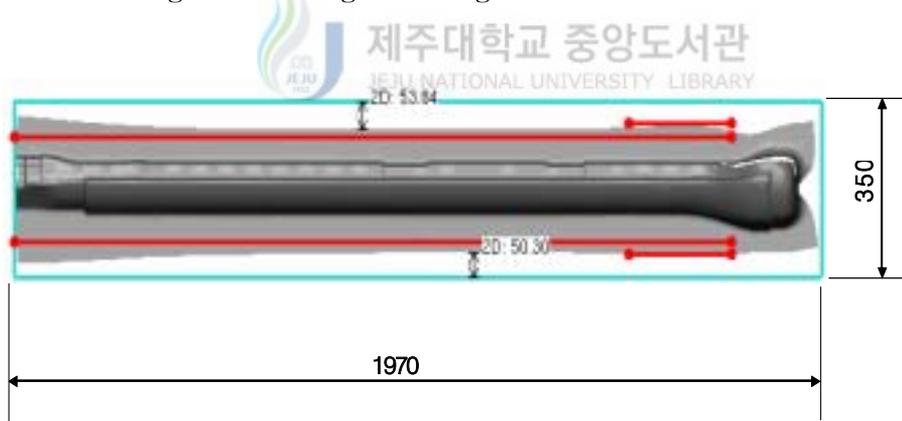


Fig. 28 Blank size & Metal flow

Fig. 28에서 보는 바와 같이 계속적으로 ①부분에서 성형성이 좋지 않았다.

두께의 변경으로 파단과 주름을 해결하지 못하여 적합한 재질을 선택하기 위한 방법으로 재질을 변경하였다.

3.1.5 5차 성형해석결과

5차 성형해석에서는 두께의 변경으로는 주름과 파단을 해결하지 못하여 다른 재질로 변경하여 성형해석하였다.

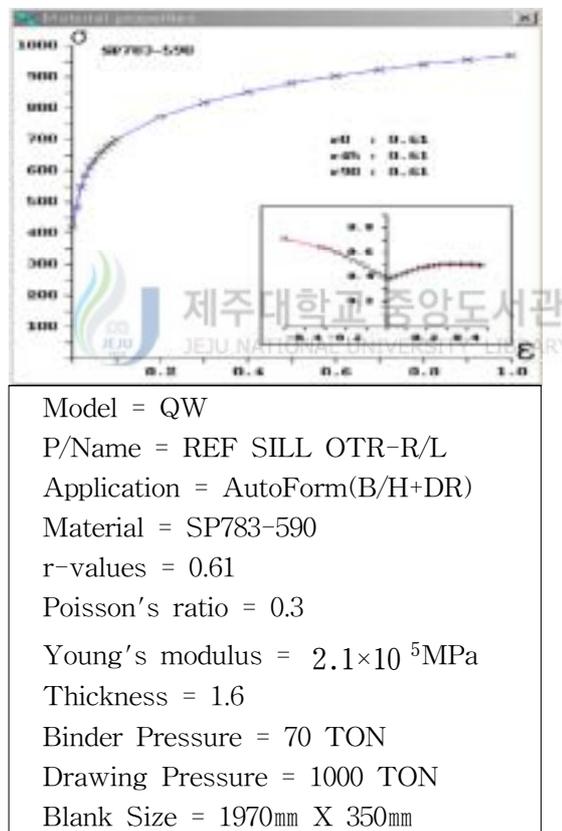


Fig. 29 The 5th input condition

SP783-590 재질로 변경하여 성형해석한 결과 Fig. 30에서 보는 바와 같이 SP782-440 성형해석 결과보다 더 심하게 파단이 일어났다. 눈으로 보기에 이 재질은 두께를 변경으로 파단을 줄 일 수 없을 것으로 판단되어졌다.

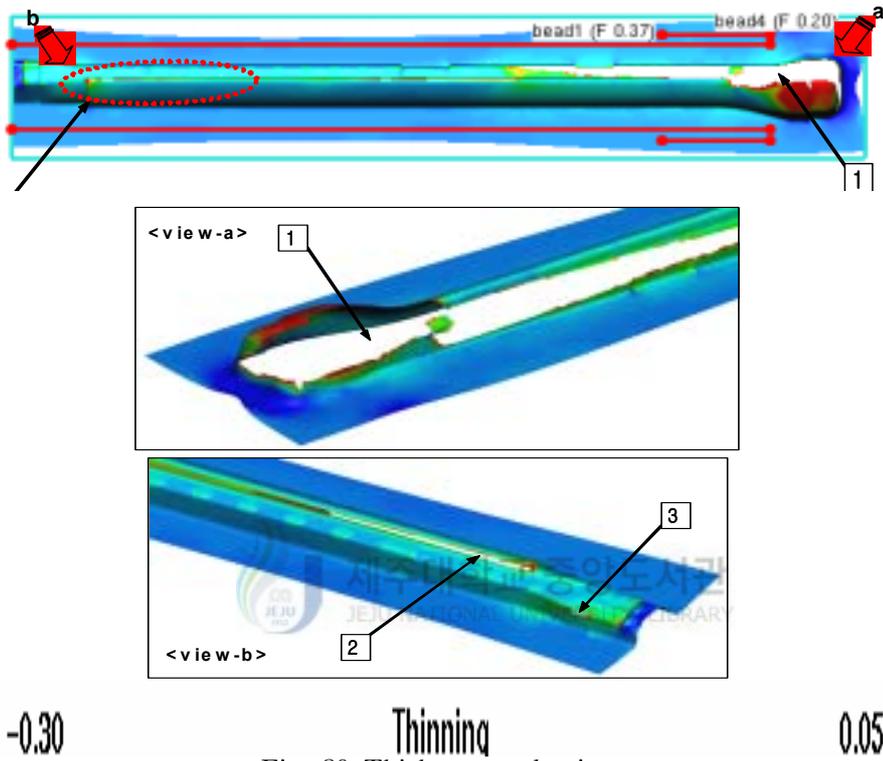


Fig. 30 Thickness reduction

Fig. 31에서의 주름의 분포는 과도한 파단으로 인해 정확한 주름을 파악하기가 힘들다.

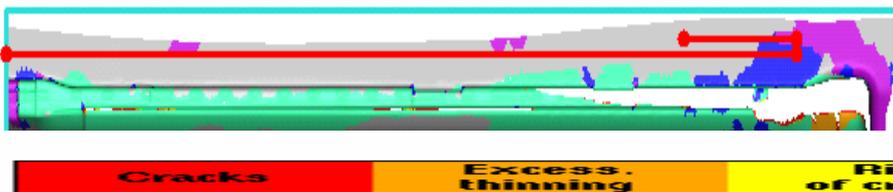


Fig. 31 Wrinkling

Fig. 32에서의 성형한계곡선을 보면 과도한계곡선부분 주위에서 파단이 많이 일어났으며, 순수전단상태의 부분도 다른 실험결과들과 마찬가지로 주름의 문제가 심각한 것을 알 수 있다.

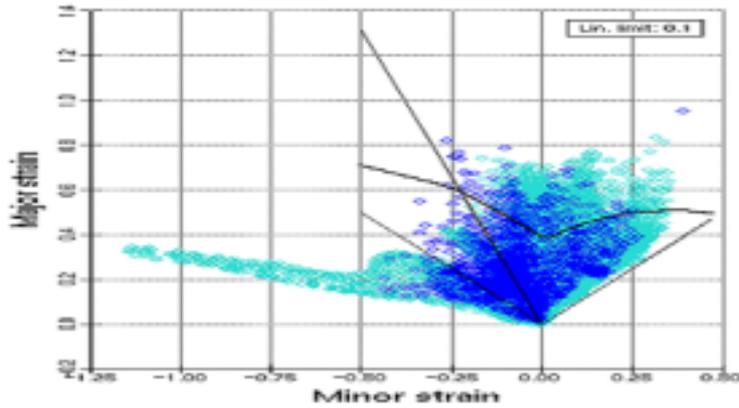


Fig. 32 Forming limit diagram distribution chart

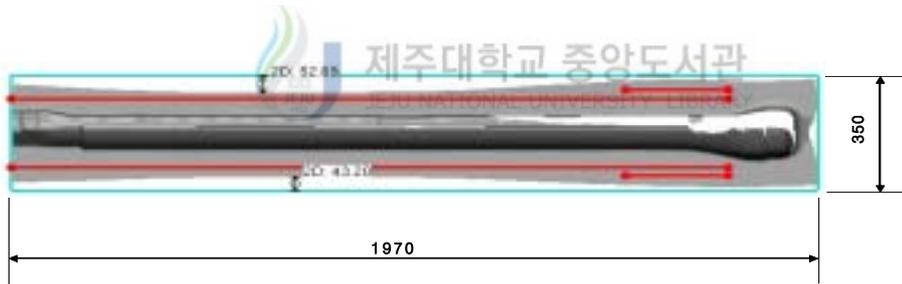


Fig. 33 Blank size & Metal flow

이번 성형해석에서는 주름과 파단을 개선하기 위해 재질을 변경하였지만 오히려 더 심하게 파단이 발생하였다. 메탈프로우를 볼 때 성형이 얼마 되지 않아 파단으로 인해 재질의 성형성을 파악할 수가 없었다. 결론적으로 SP783-590 재질은 판넬에 적합하지 않다고 결론지었으며 적합한 재질로 변경이 필요하다.

3.1.6 6차 성형해석결과

주름과 파단을 해결하기 위한 방법으로 비교적 이방성계수가 큰 SP782-390 재질로 변경하여 성형해석을 하였다.

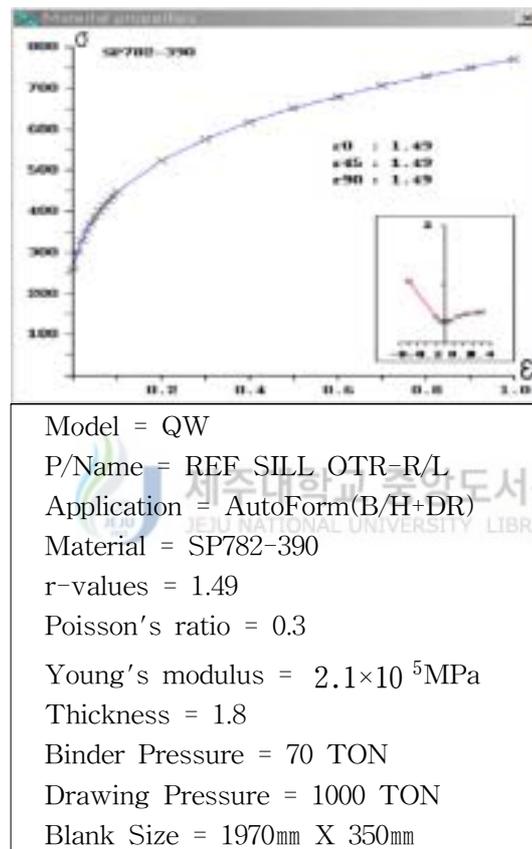


Fig. 34 The 6th input condition

Fig. 36의 주름분포도를 보는 것과 같이 지금까지 해석한 다른 재질들과 마찬가지로 가장 중요한 매칭부분에서 주름이 발생하였다. 이러한 재질변경으로도 해결하지 못한 문제는 공정을 계획하고 공법을 개발하여 해결해야한다는 것을 본 성형해석을 통해 알 수 있었다.

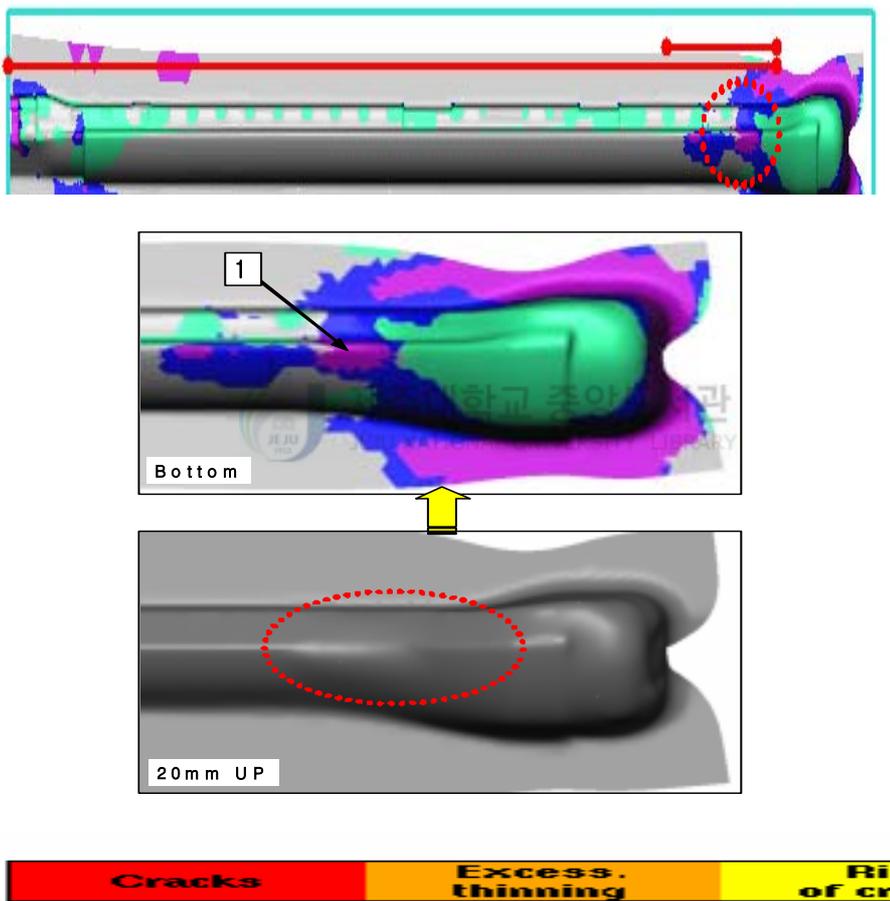


Fig. 36 Wrinkling

성형한계곡선에서의 과단한계곡선 주위의 분포를 볼 때 과단으로 성형성에 문제는 없을 것으로 판단되어지지만 주름의 문제는 다른 재질들과 마찬가지로 문제가 되었다.

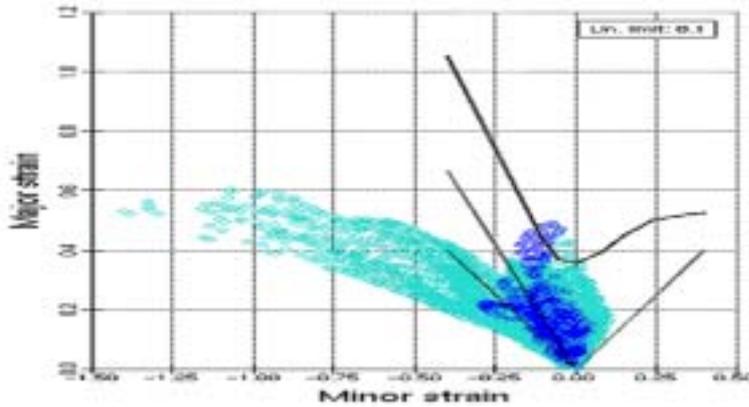


Fig. 37 Forming limit diagram distribution chart

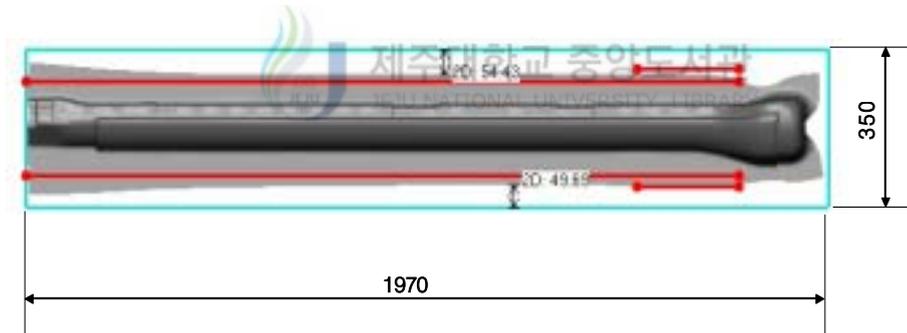


Fig. 38 Blank size & Metal flow

여러 재질을 성형해석 한 결과 REF SILL OTR-R/L 차체판넬에 가장 적합한 재질은 SP782-390으로 결론 내렸다. 하지만 가장 적합한 재질의 변경으로 해결 되지 않은 주름 문제는 공정을 계획하고 공법을 개발하여 해결해야만 한다는 것을 도출할 수 있었다.

3.2 REF SILL OTR-R/L 공법개발

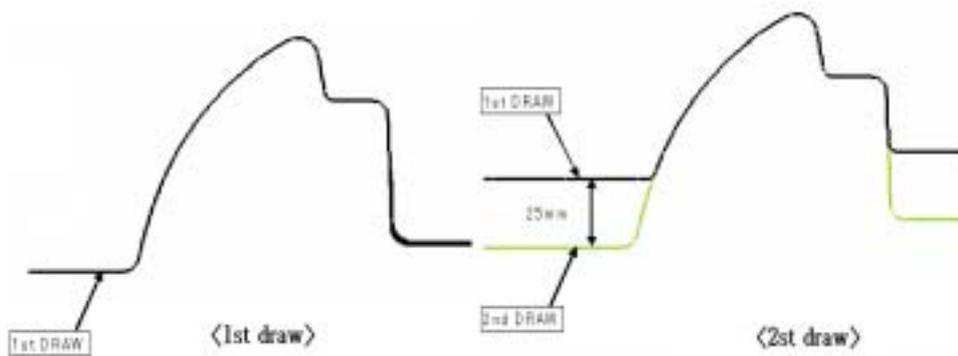


Fig. 39 Draw Shape

Table. 2 Input condition

Analysis degree	1st	2nd	3rd	4th
Material	SP782-440	SP781-3900	SP152-440	SP782-390
r-values	1.18	1.13	1.38	1.48
Thickness	2.0t	1.6t, 1.8t, 2.0t	1.6t	1.8t
1차 Drawing Pressure	70TON	70TON	70TON	70TON
1차 Binder Pressure	1000TON	1000TON	1000TON	1000TON
1차 Drawing Pressure	40TON	40TON	40TON	40TON
1차 Binder Pressure	500TON	500TON	500TON	500TON
Blank Size	1970mm X 350mm	1970mm X 350mm	1970mm X 350mm	1970mm X 350mm

3.2.1 1차 공법개발

적합한 재질의 변경의 필요성과 주름의 문제를 해결하기 위한 방법으로 공정을 계획하여 성형해석하였다.

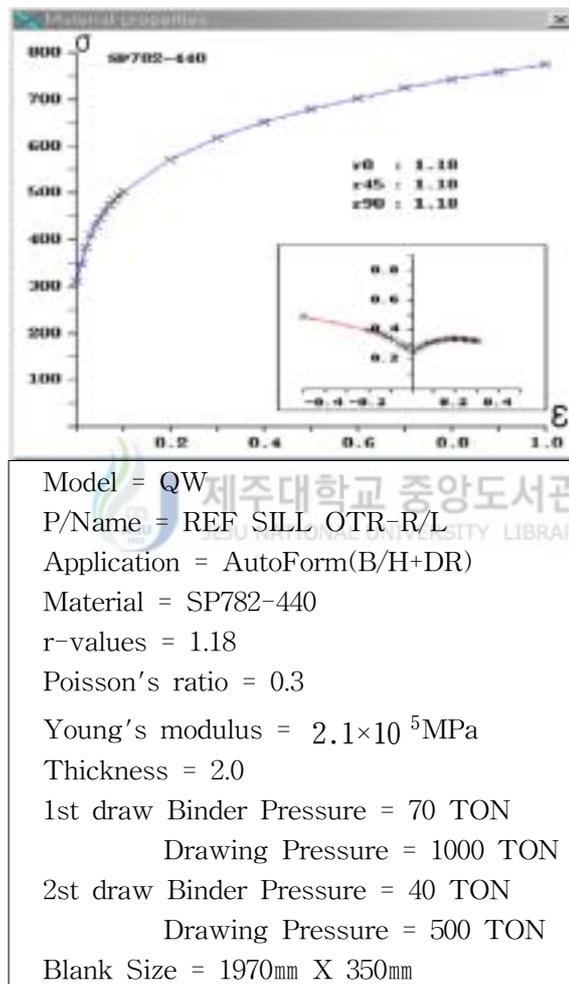


Fig. 40 The first input condition

Fig. 41에서는 a측면에서 판넬의 성형모습을 보는 것과 같이 1차공정에서 전반적인 형상을 성형한 후 2차공정에서 25mm정도 더 성형을 하여 완료하는 공정으로 공정을 계획하였다.

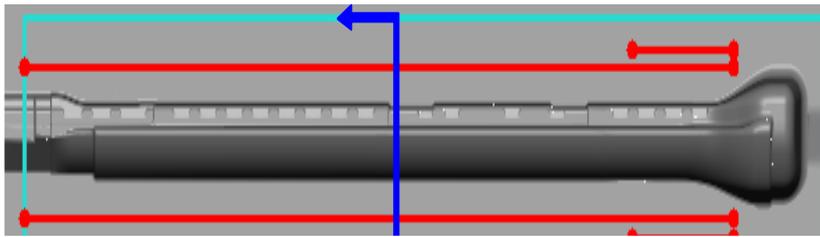


Fig. 41 Draw Shape

Fig. 42에서는 1차 공정에서 두께분포도를 보여주고 있으며, 결과는 여전히 과
 단으로 문제가 되고 있었다. 즉, 재질의 변경이 필요하다는 것을 검증하였다.

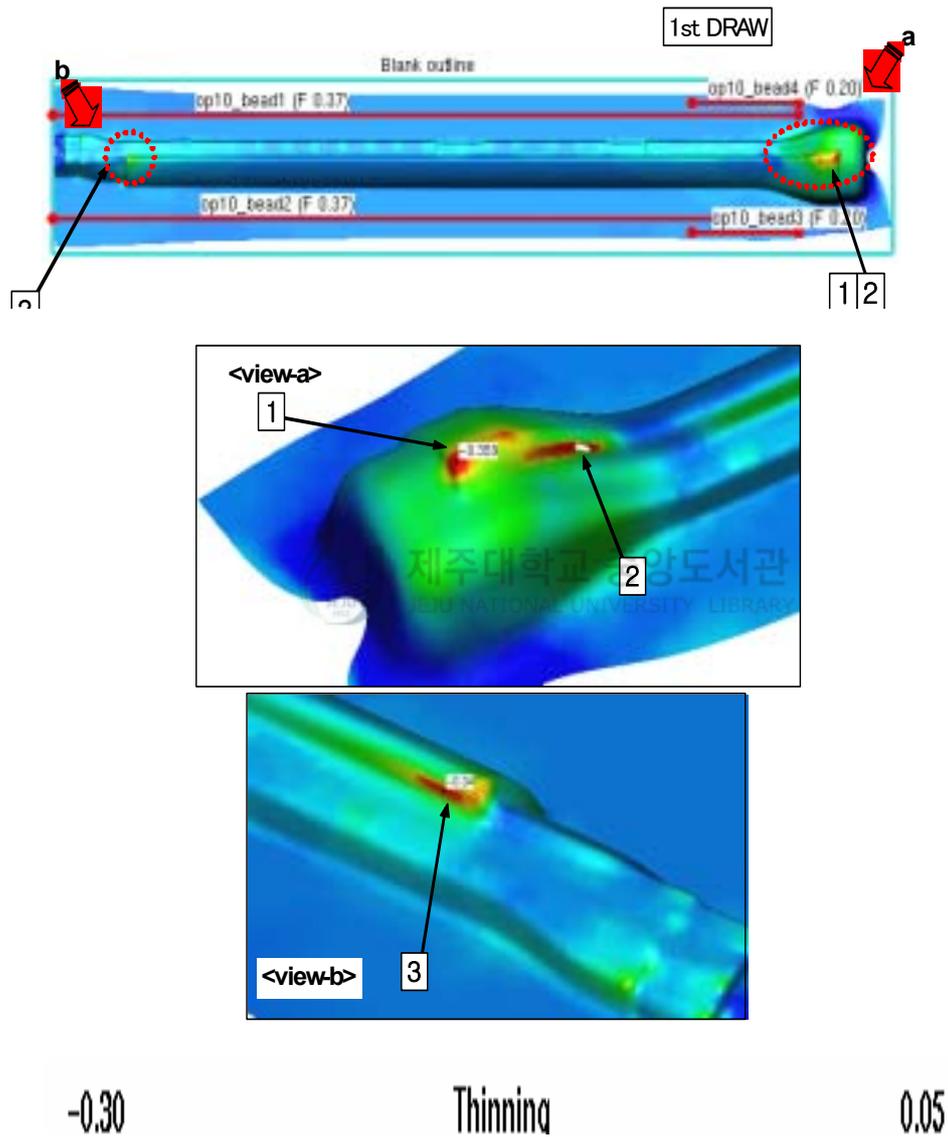


Fig. 42 Thickness reduction(1st draw)

기존의 1차공정으로 성형이 완료되는 공정의 주름결과와 별다르지 않았으며, 판넬에 가장 중요한 부분인 매칭부분에서 계속해서 문제가 되었다.

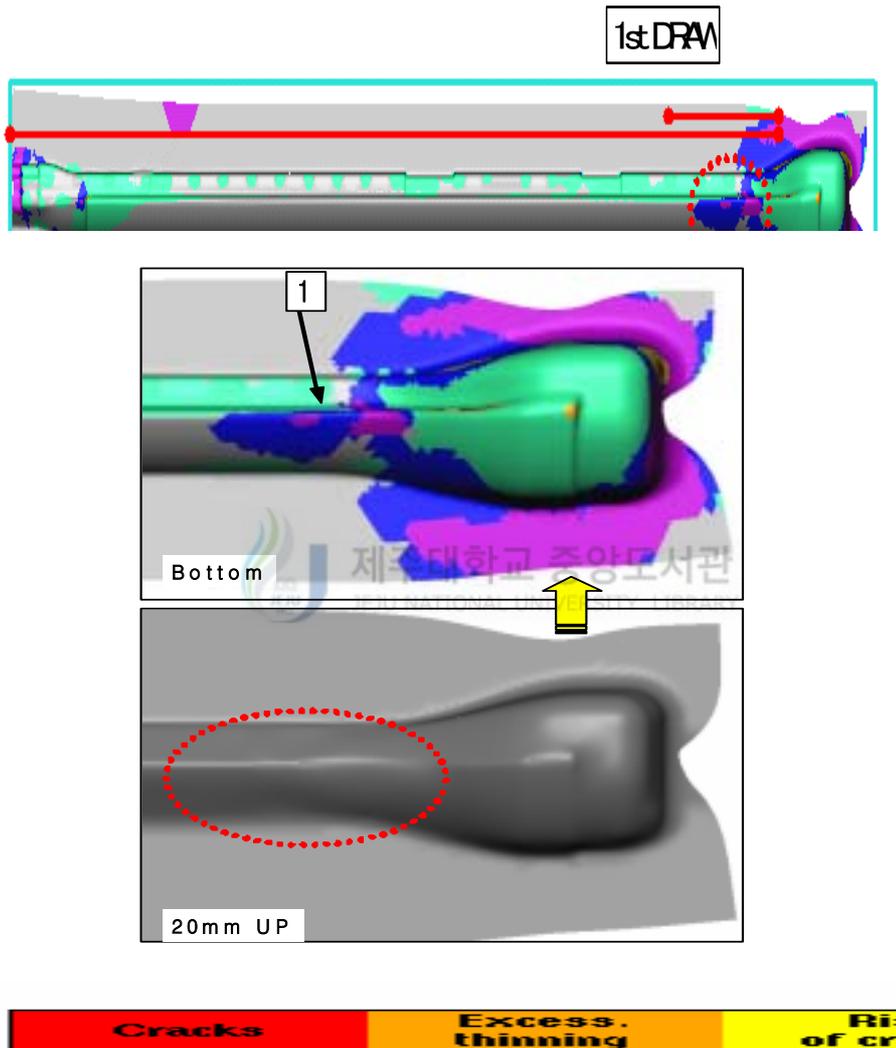


Fig. 43 Wrinkling(1st draw)

Fig. 44에서 성형한계곡선을 보는 바와 같이 과단한계곡선과 순수전단상태부분에서 과단과 심한 주름으로 문제가 되는 것을 알 수가 있었다.

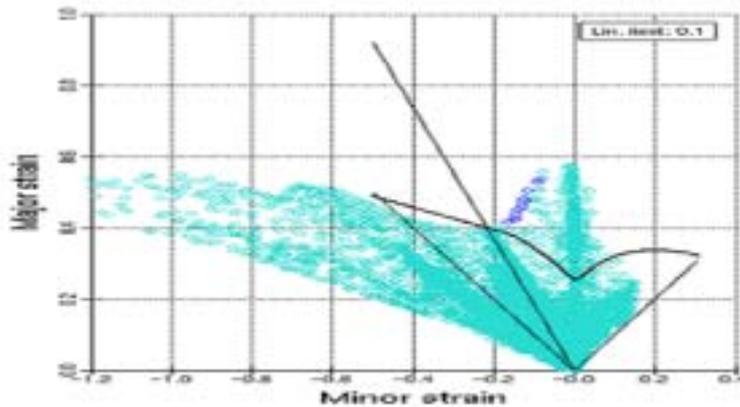


Fig. 44 Forming limit diagram distribution chart

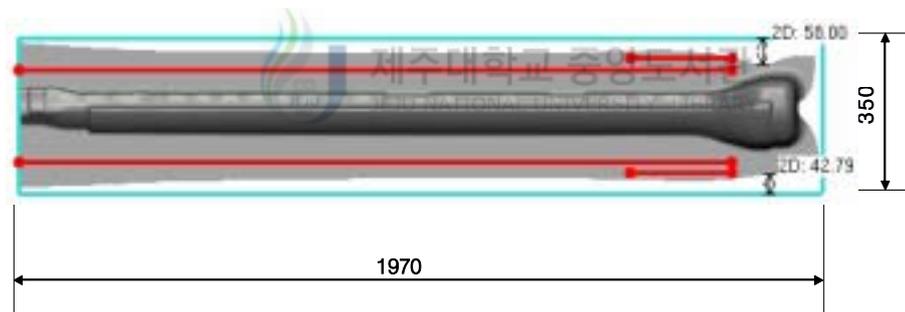


Fig. 45 Blank size & Metal flow(1st draw)

Fig. 45에서 블랭크사이즈와 메탈프로우를 보면 ①부분이 ③부분보다 15.21mm 더 성형이 되었다. 즉, ①부분에서 과도한 소재유입이 되고 있는 것을 알 수 있었다. 이 부분의 변경이 필요할 것으로 판단되었다.

2차공정으로 공법을 계획하고 성형해석한 결과, Fig. 46에서의 두께분포도를 보면 이상적인 성형결과를 주지는 못하였다. 즉, 재질의 변경이 필요하며, 새로운 공법계획과 개발을 해야 한다는 것을 알 수 있었다.

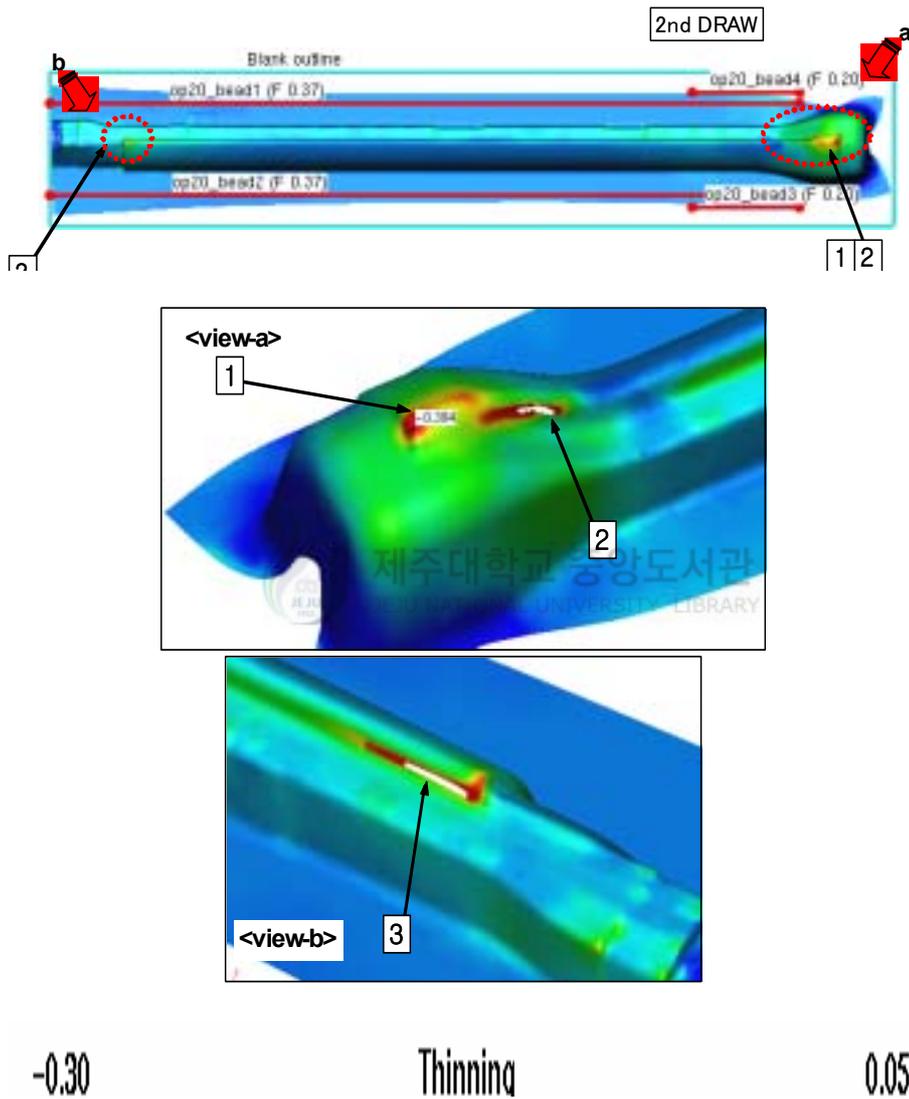


Fig. 46 Thickness reduction(2st draw)

1차공정의 주름보다는 개선되었지만 여전히 매칭부분에서 주름의 문제가 나타났습니다.

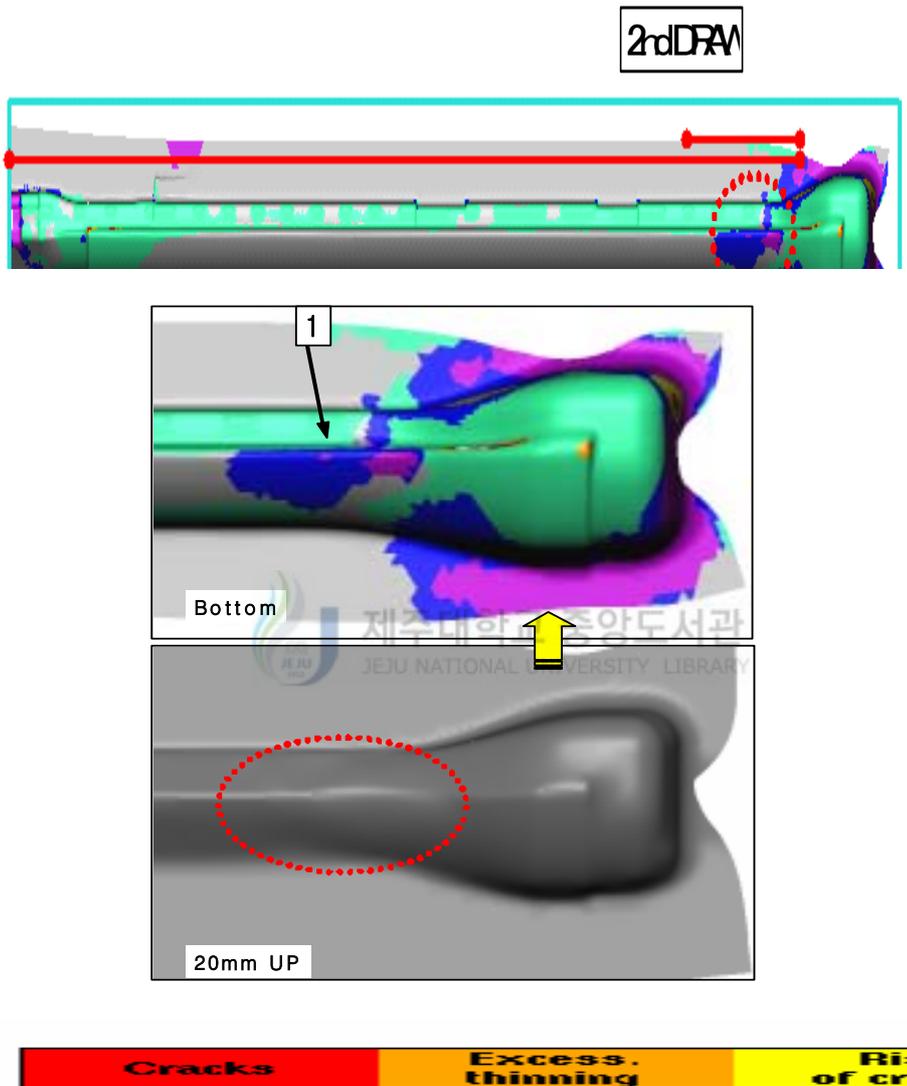


Fig. 47 Wrinkling(2st draw)

성형한계곡선을 보면 1차공정과 마찬가지로 과단과 주름의 문제가 심각하다는 것을 알 수가 있었다. 하지만 1차로 성형을 완료하는 공정결과와 2차로 성형을 완료하는 결과를 비교해 보면 2차로 성형을 완료하는 것이 성형성에서 더 좋은 결과를 얻었다.

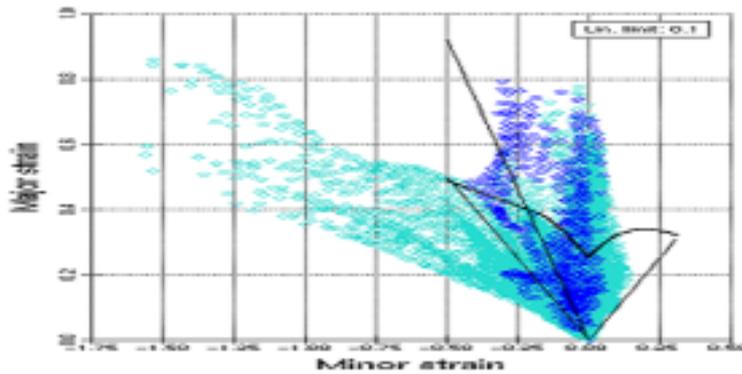


Fig. 48 Forming limit diagram distribution chart

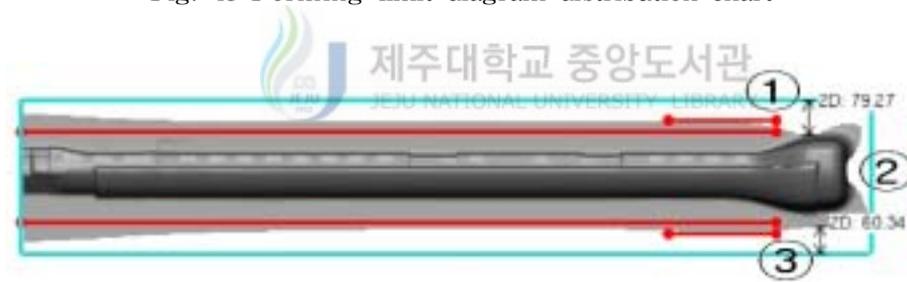


Fig. 49 Blank size & Metal flow(2st draw)

Fig. 49에서 블랭크사이즈와 메탈프로우를 보면 ①부분이 ③부분보다 18.93mm 더 성형이 되었다. 이런 성형성과 방향성이 공정을 계획하고 공법을 개발하는데 많은 도움이 된다. SP782-440_2.0_2draw으로 공정을 계획하여 해석한 결과 재질의 변경이 필요하다는 것을 검증하였으며, 과도한 소재유입으로 문제가 되고 있

는 부분에 새로운 공법이 필요하다는 것을 알 수 있었다.

3.2.2 2차 공법개발

본 성형해석은 2차공정으로 공정 계획을 세우고, 재질을 SP781-390으로 변경하여 성형해석을 하였다.

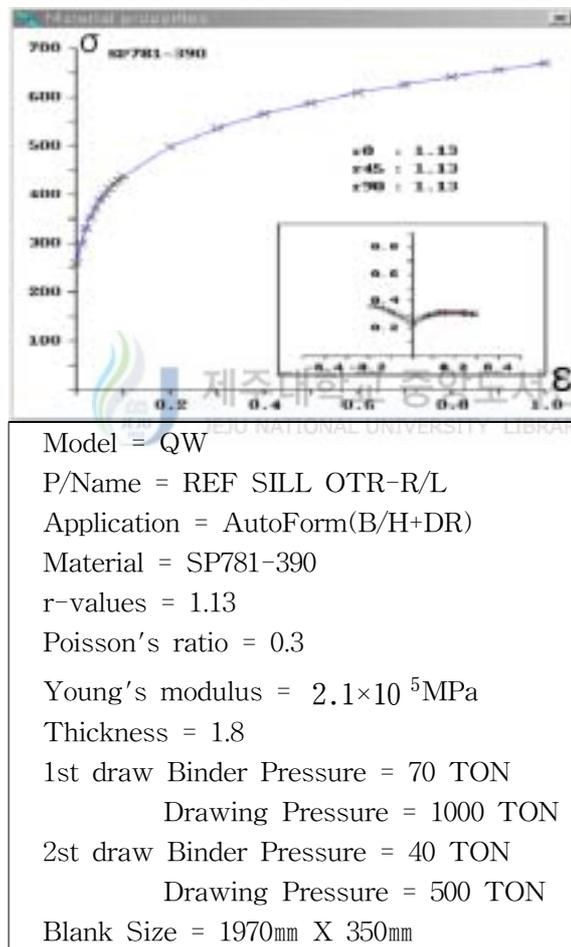
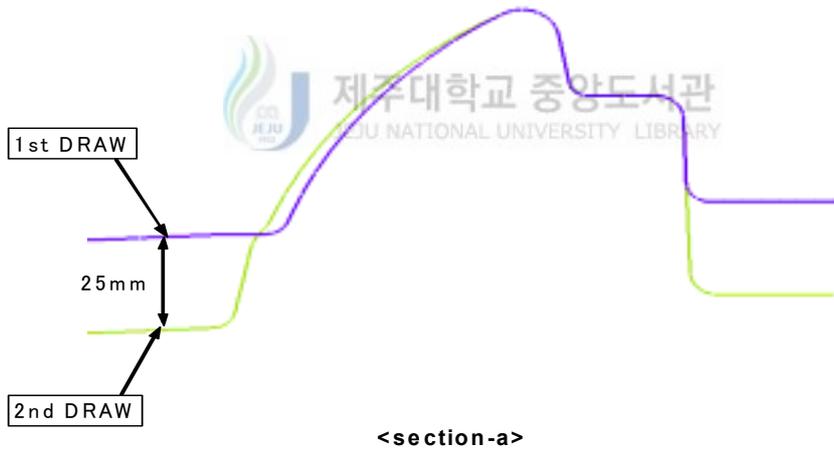
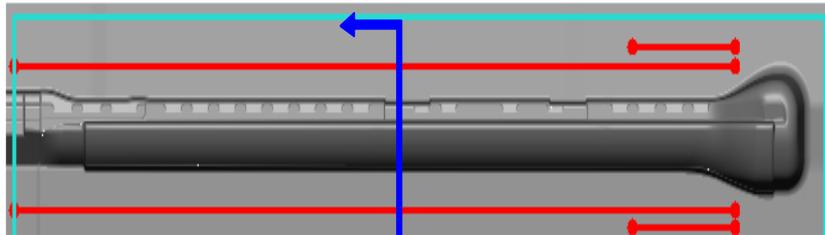


Fig. 50 The second input condition

Fig. 51에서는 a측면에서 본 판넬의 1차공정과 2차공정의 성형되는 형상을 보여주고 있다. 여기서 중점해서 봐야 할 점은 1차공정에서 대략적인 성형을 한 후 2차공정에서 완벽한 판넬이 성형이 되면서 쇼크라인이 발생 할 가능성이 있다. 쇼크라인을 방지하기 위해 재질의 변경이나 공정을 계획하고 새로운 공법을 개발해야 한다고 판단되어졌다.



<section-a>

Fig. 51 Draw Shape

1차공정의 두께 분포도를 보면 파단이 일어날 가능성이 있는 곳이 2군데 나타났으며, 이 부분은 SP782-440 재질로 성형해석 한 결과보다 개선되지는 못하였다.

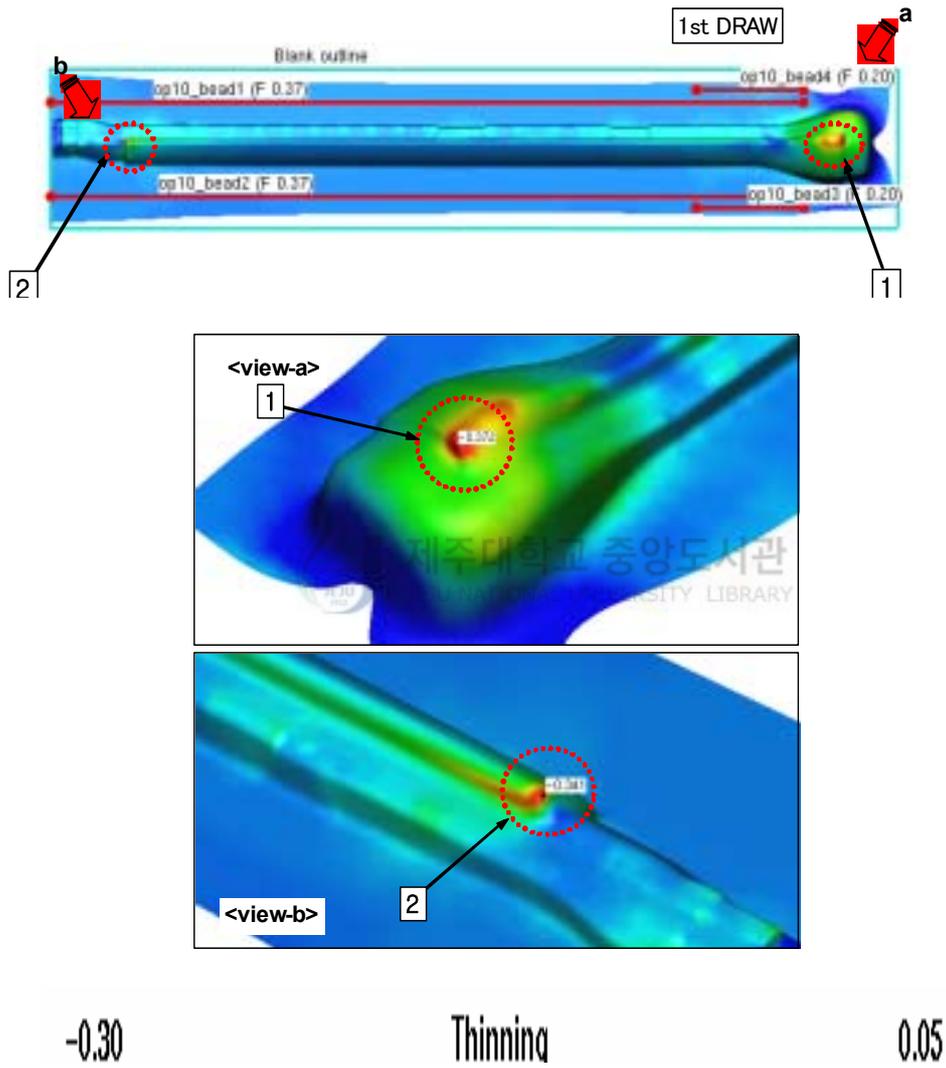


Fig. 52 Thickness reduction(1st draw)

Fig. 53에 보는 바와 같이 여전히 주름은 매칭부분에서 발생하였다.

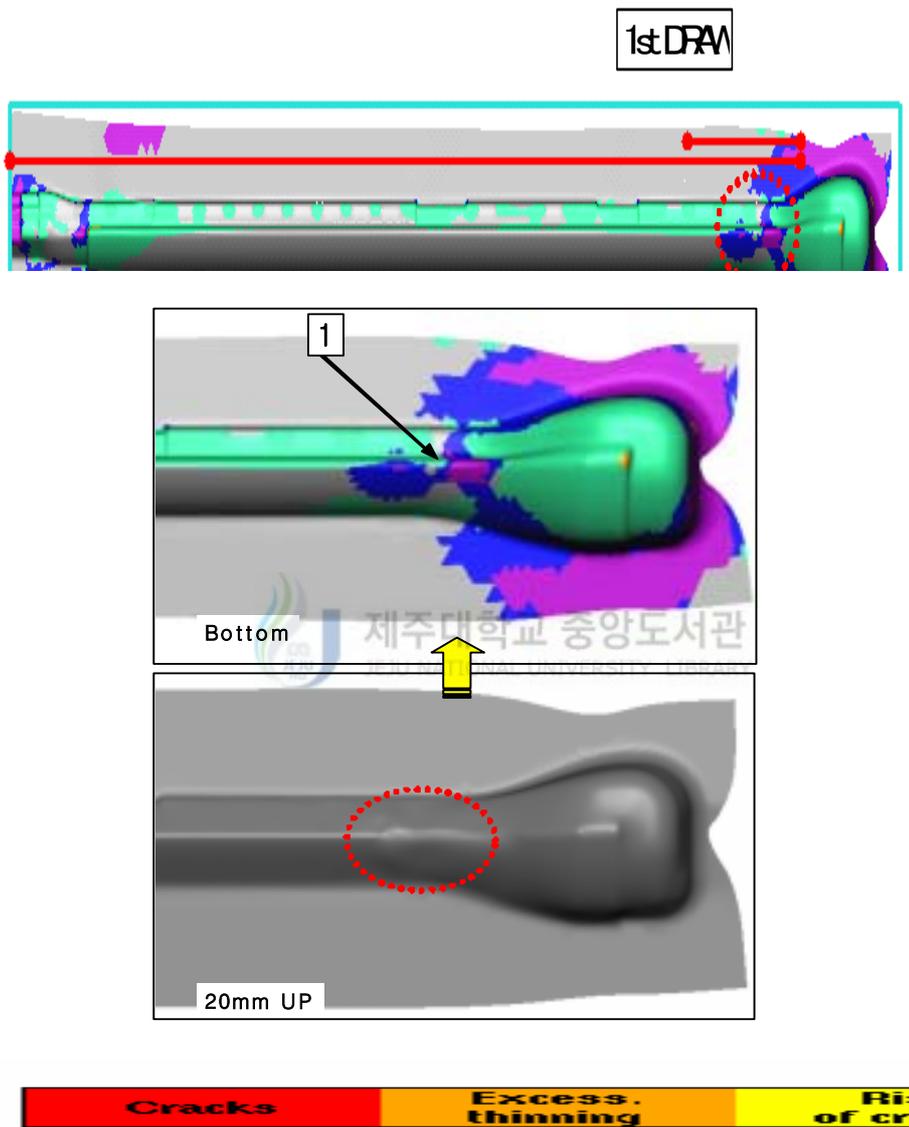


Fig. 53 Wrinkling(1st draw)

성형한계곡선을 볼 때 과도한계곡선과 순수전단상태부분에서의 분포가 많으므로 과도와 주름으로 문제가 되고 있는 것을 알 수 있다.

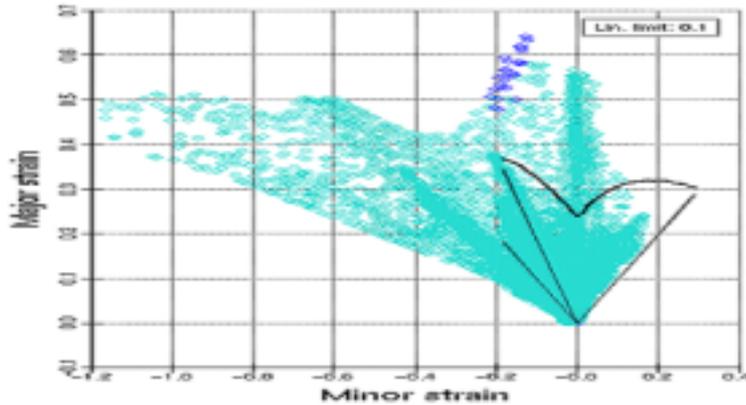


Fig. 54 Forming limit diagram distribution chart

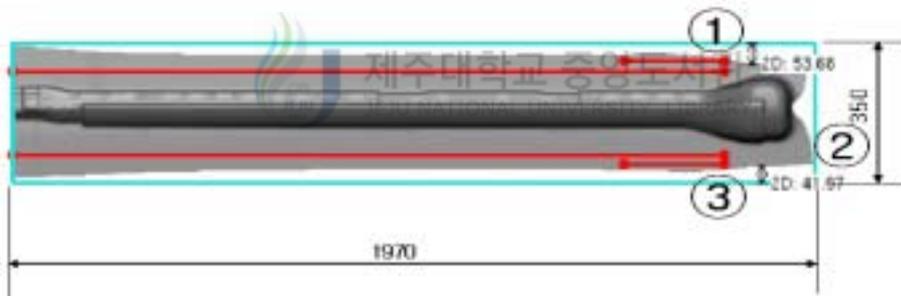


Fig. 55 Blank size & Metal flow(1st draw)

성형은 대체적으로 잘 이루어지고 있으며, ①부분이 ③부분보다 11.81mm정도 더 성형이 되고 있다. 성형하는 과정에서 ①부분의 성형이 더 되면서 주름이 생기고 있다고 판단되었다. 첫 번째 공정계획을 하고 성형해석한 결과와 마찬가지로 ①부분에서 과도한 소재유입이 발생하고 있는 것을 알 수 있었다.

Fig. 56에서 보는 바와 같이 2차공정으로 성형하는 과정에서 성형깊이가 높아지면서 파단이 일어났다. 즉, 재질의 변경이 필요하다는 것을 검증하였다.

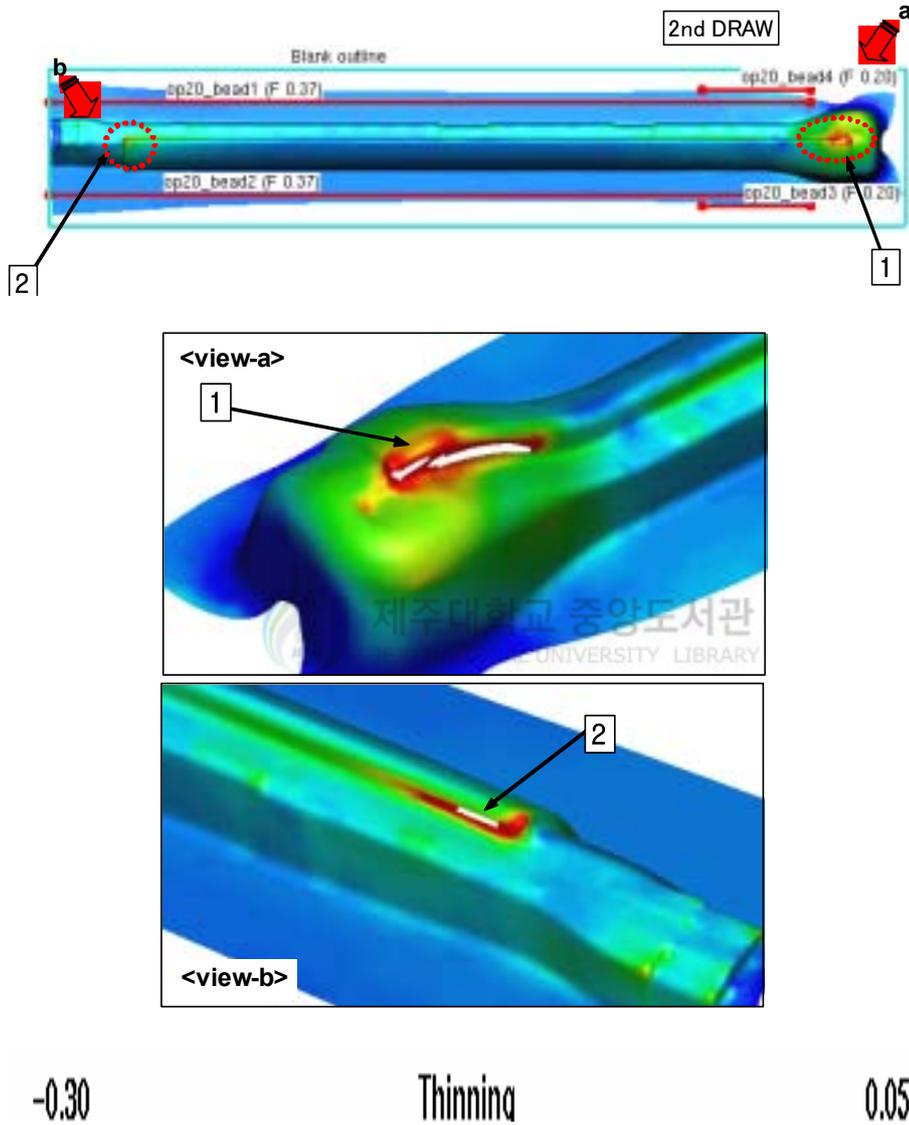


Fig. 56 Thickness reduction(2st draw)

Fig. 57에서 보는 바와 같이 주름은 조금 개선되었지만 계속해서 매칭부분에서 문제가 되었다.

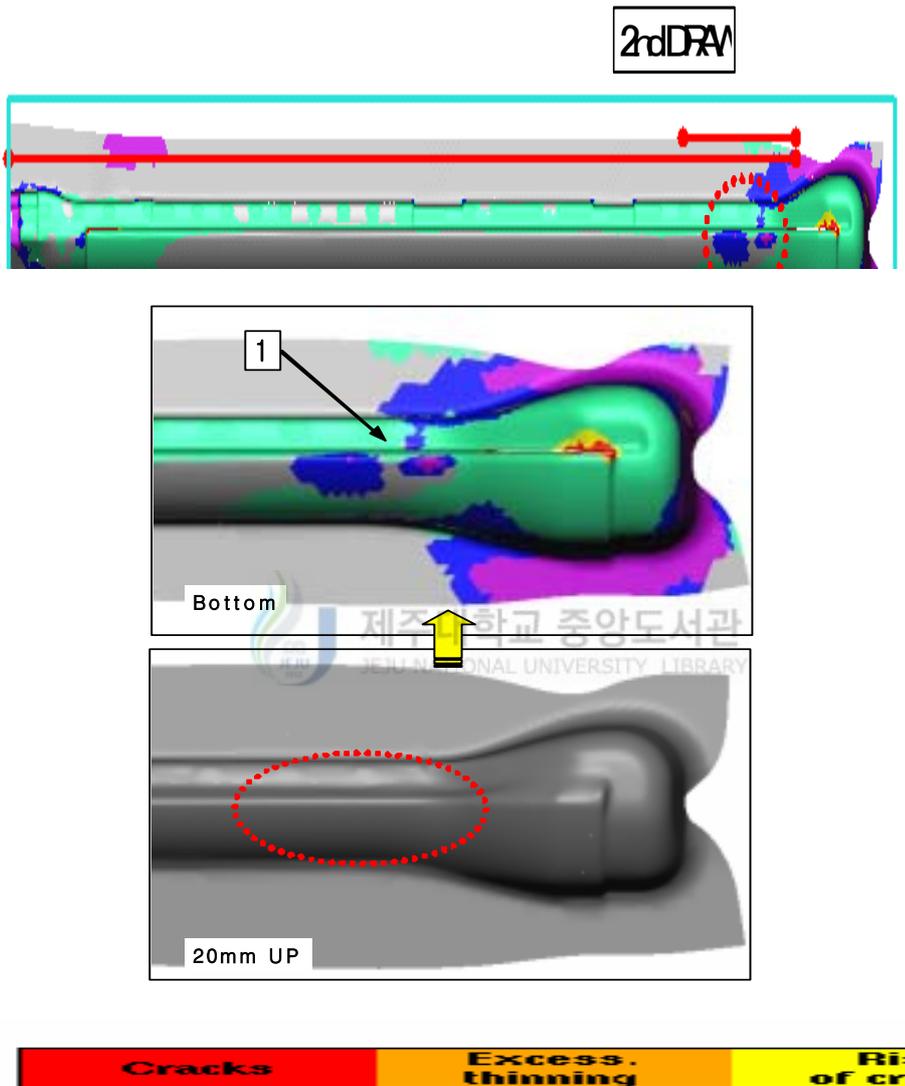


Fig. 57 Wrinkling(2st draw)

Fig. 58에서 성형한계곡선을 보는 것과 같이 파단과 주름의 문제가 심각하다.
파단과 주름을 해결할 수 있는 새로운 공법개발이 필요하다.

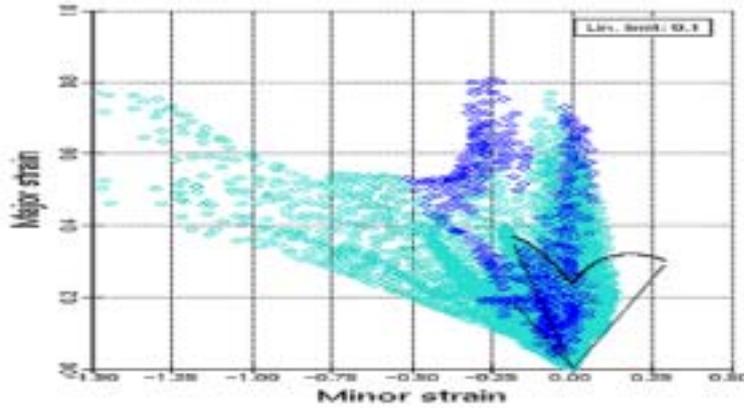


Fig. 58 Forming limit diagram distribution chart

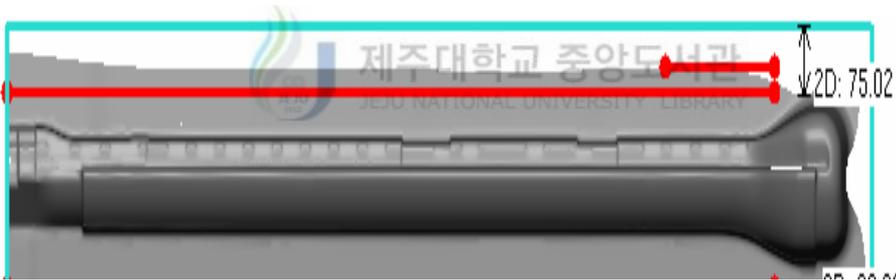


Fig. 59 Blank size & Metal flow(2st draw)

본 해석결과 SP781-390재질은 SP782-440 재질로 성형해석 한 결과보다 개선되지는 못하였다. 성형이 잘 되었지만 주름과 파단의 문제를 해결하지는 못하였다. 파단과 주름을 해결할 수 있는 재질의 변경과 공법개발이 필요하다.

3.2.3 3차 공법개발

주름과 파단을 개선하기 위해 2차공정으로 공정을 계획하고 비교적 이방성 계수가 큰 재질인 SP152-440으로 변경하여 성형해석하였다.

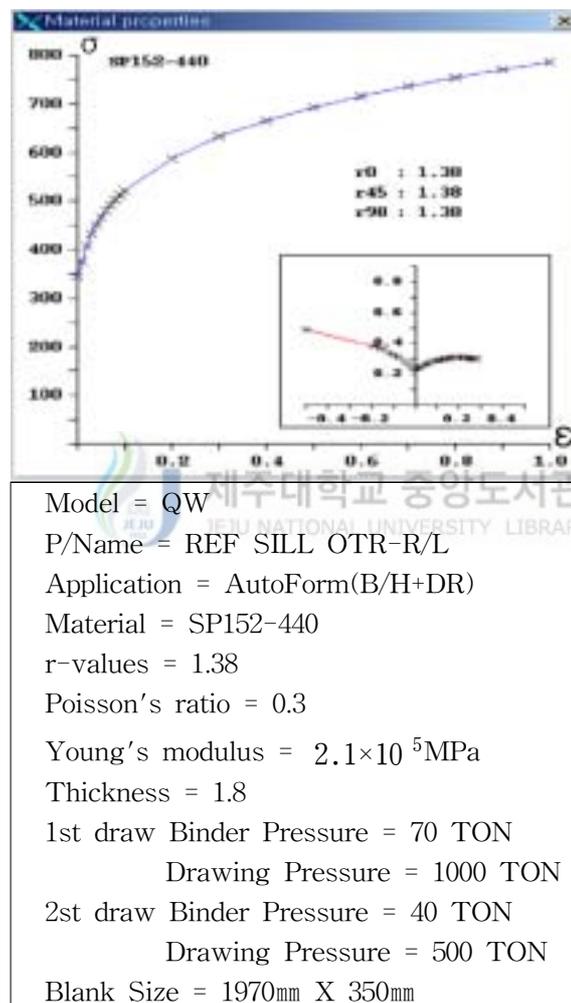
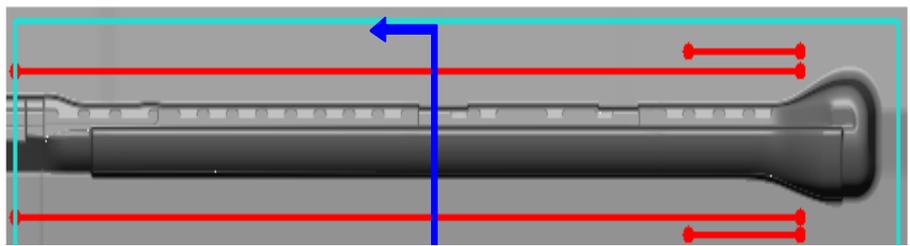


Fig. 60 The third input condition

Fig. 61에서는 SP152-440의 재질로 성형하는 과정에서 a측면의 1차공정과 2차 공정으로 성형되는 모습을 보여주고 있다. 2차공정으로 인한 쇼크라인 현상은 없을 것으로 보인다.

쇼크라인(Shock Line)이란 2차공정으로 계획하는 과정에서 가장 문제가 되는 부분으로 1차공정에서 성형을 한 후 2차공정으로 성형되는 과정에서 성형이 일정한 방향으로 가는 것이 아니라 다른 방향으로 성형이 되어 판넬에 굽임현상을 주는 것을 말한다.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



Fig. 61 Draw Shape

Fig. 62에서는 1차 공정에서의 두께분포를 보여주고 있으며, 파단이 일어날 가능성이 있는 부분이 2군데 나타났다. 즉, SP152-440 재질도 이상적인 결과를 주지는 못하였다.

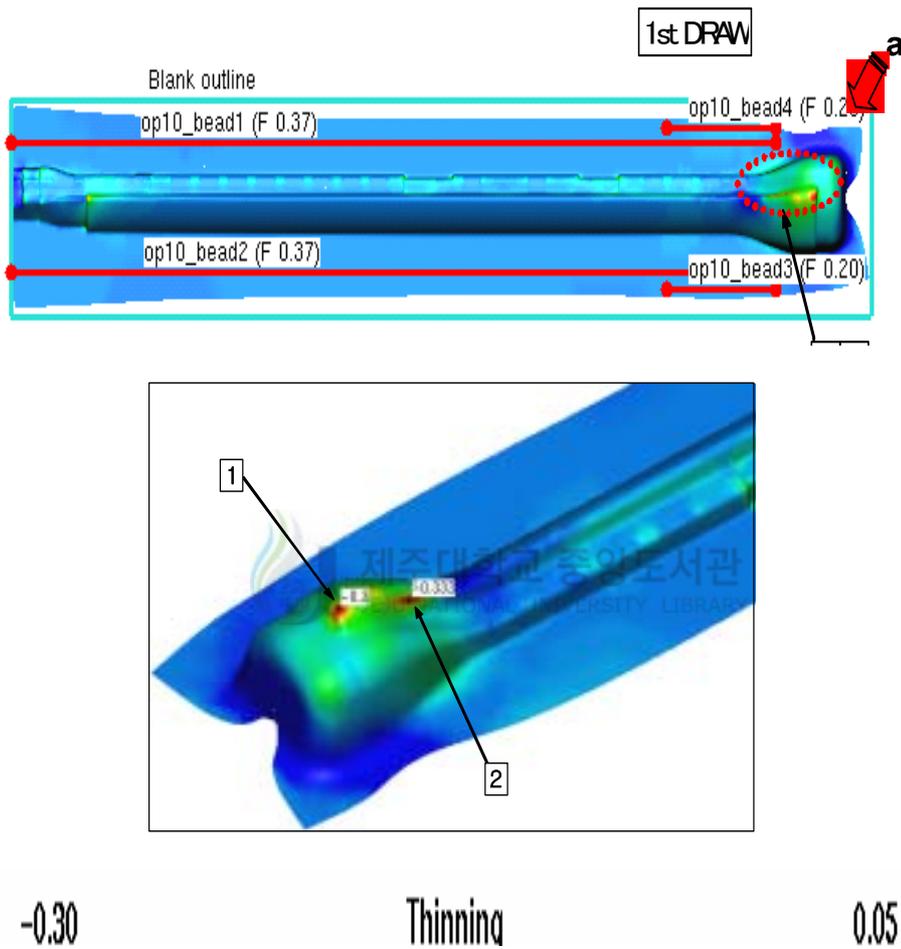
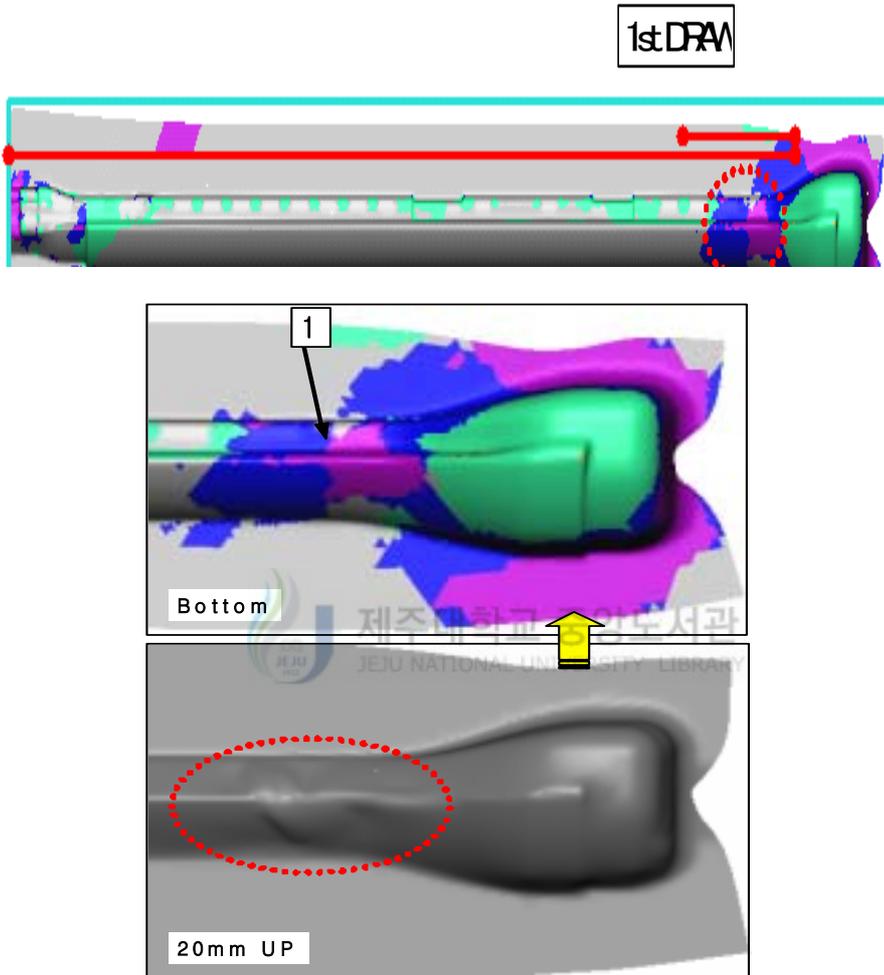


Fig. 62 Thickness reduction(1st draw)

Fig. 63에서 보는 바와 같이 1차공정의 성형완료 후의 주름의 경향을 보면 매칭부분에서 주름이 여전히 발생하였다.



Formability

Fig. 63 Wrinkling(1st draw)

과단한계곡선 주위로 과단의 문제가 보이고 있으며, 다른 성형해석과 마찬가지로 주름의 문제가 심각하다는 것을 성형한계곡선을 통해 알 수 있었다. 해결방안으로는 새로운 공법개발이 필요하다.

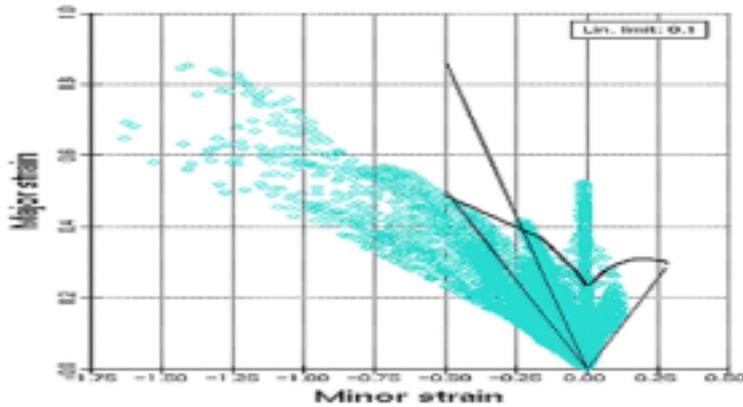


Fig. 64 Forming limit diagram distribution chart

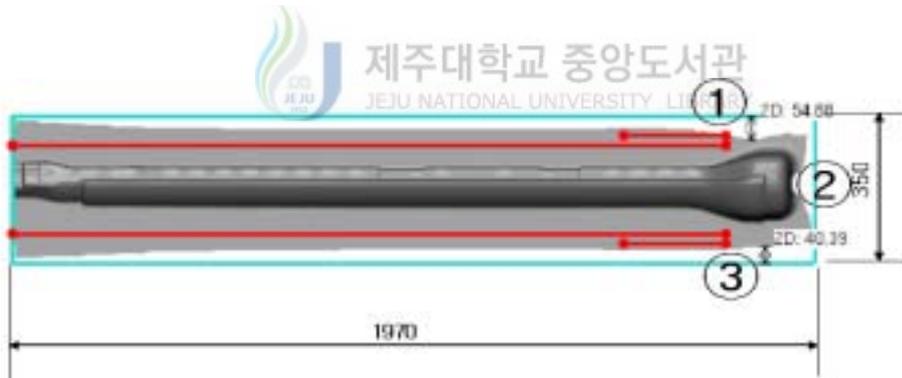
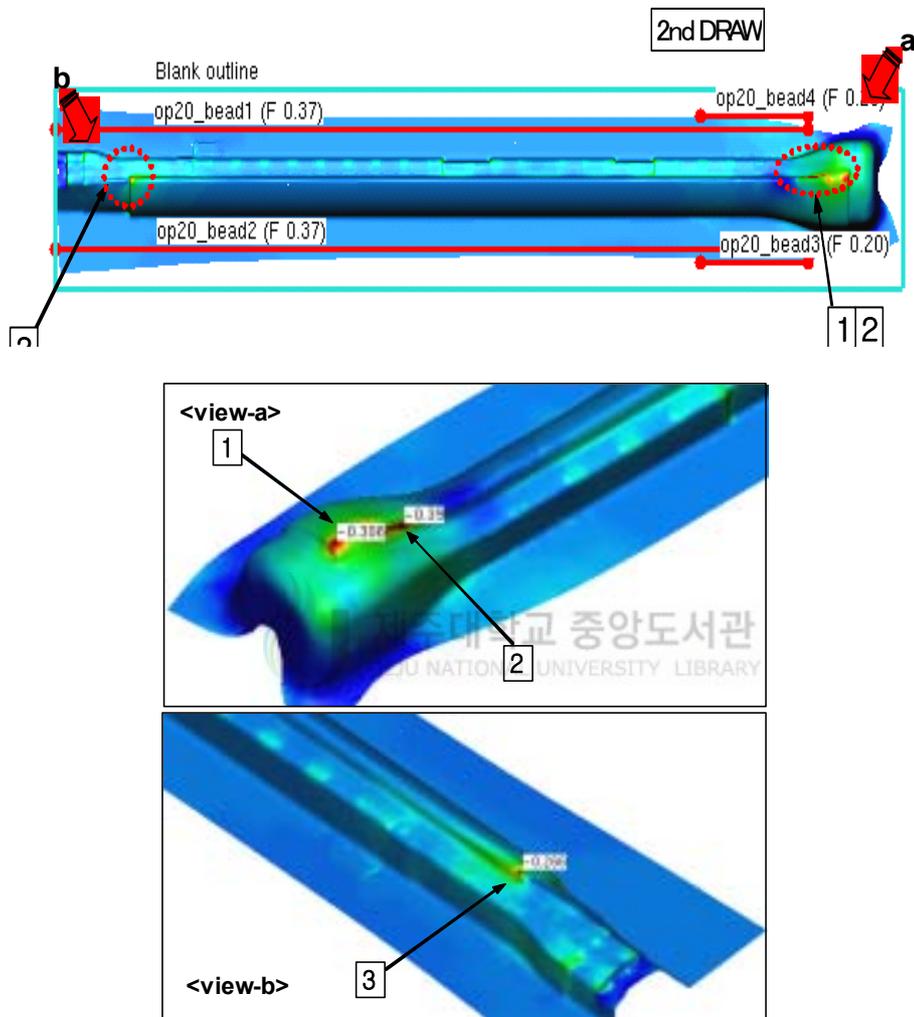


Fig. 65 Blank size & Metal flow(1st draw)

1차공정의 블랭크사이즈와 메탈프로우를 볼 수 있으며, 공정계획을 계획한 후의 성형결과들과 별다른 차이를 보여주지 못하였다.

2차공정에서는 1차공정보다 더 깊이 성형되면서 두께 감소가 더 심하게 일어났다. 재질의 변경과 공법의 개발이 필요하다.



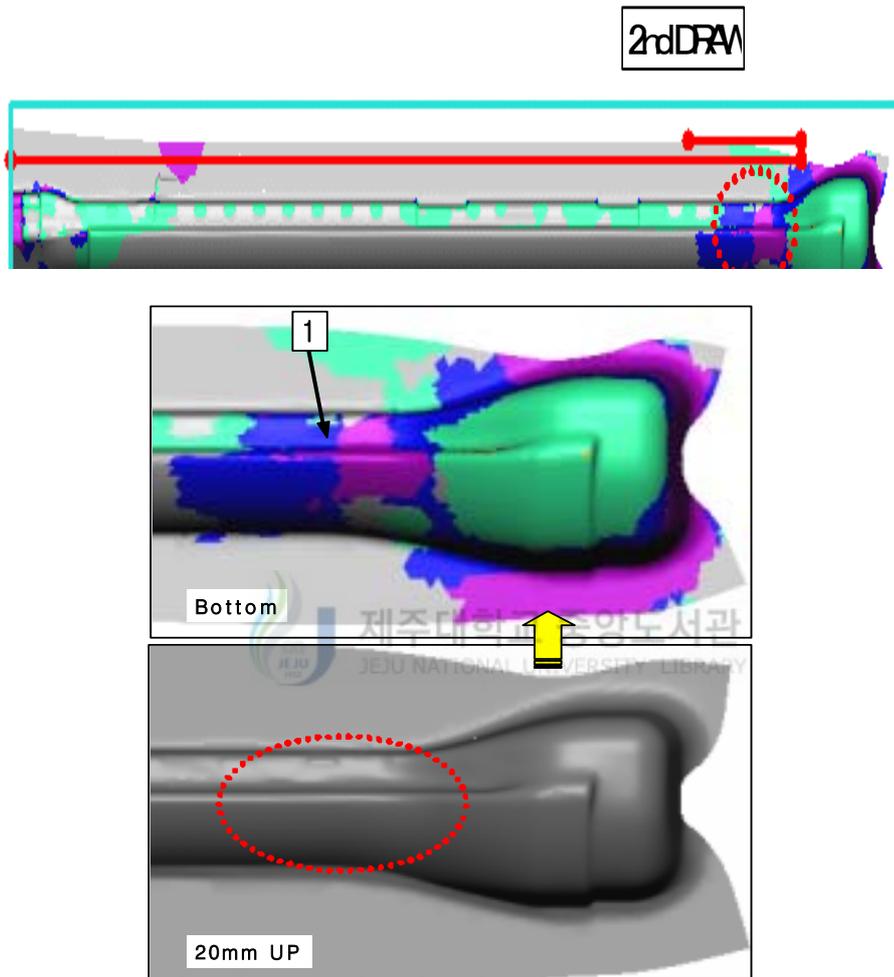
-0.30

Thinning

0.05

Fig. 66 Thickness reduction(2st draw)

Fig. 67에서는 1차공정보다 주름은 완화되었지만 여전히 매칭부분에서 주름이 문제가 되었다.



Formability

Fig. 67 Wrinkling(2st draw)

성형한계곡선에서와 같이 과단한계선 주위와 순수전단 상태에서 과단과 주름의 문제가 심각하다는 것을 알 수 있다. 해결 방안으로 재질의 변경이 필요하며, 현재 가장 중요한 주름을 획기적으로 줄일 수 있는 공법을 개발해야 한다.

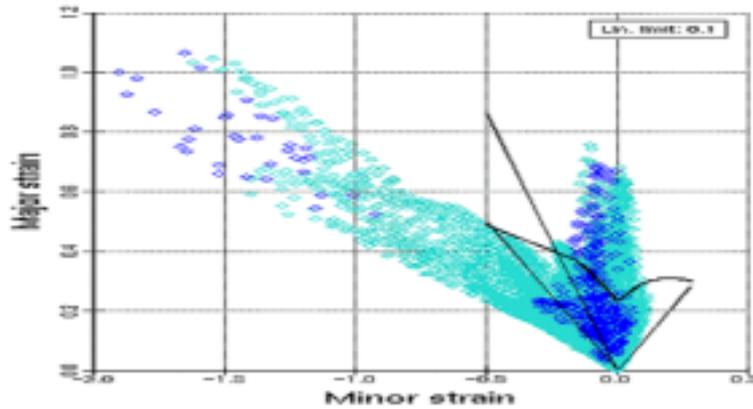


Fig. 68 Forming limit diagram distribution chart



Fig. 69 Blank size & Metal flow(2st draw)

최종상태의 블랭크 사이즈와 메탈프로우를 보여주고 있으며, 재질의 변경과 계속해서 문제가 되는 주름 문제를 해결할 수 있는 공법의 개발이 필요하다.

3.2.4 4차 공법개발

최적의 재질을 선택하는 과정에서 선택한 SP782-390의 재질로 변경하여 성형 해석하였다.

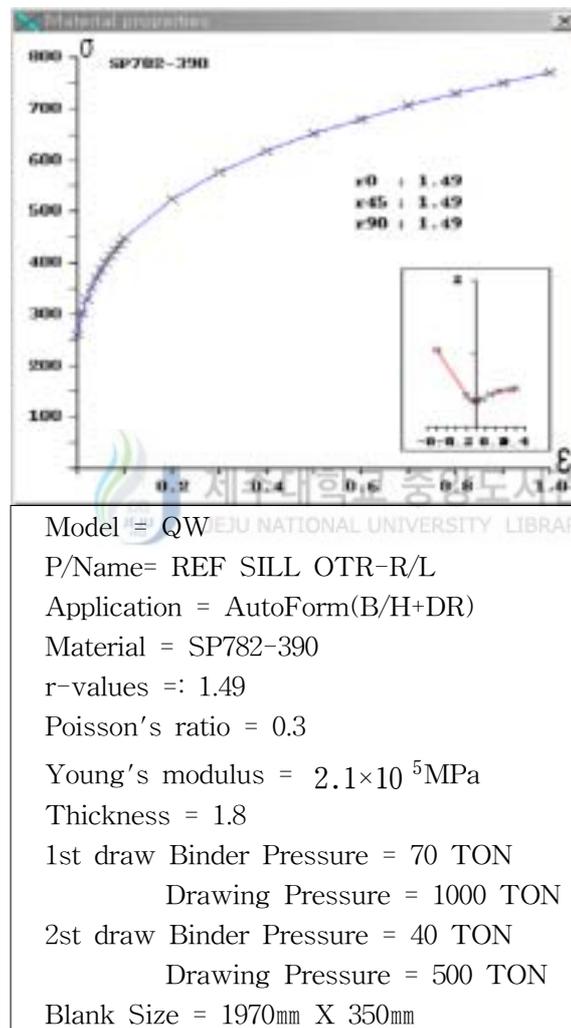


Fig. 70 The 4th input condition

Fig. 71에서 보는 바와 같이 a측면의 2차공정까지의 드로우 형상을 본 결과 쇼크라인현상으로 문제가 될 가능성을 보였다. 방지대책으로 제품 형상의 변경이나 새로운 공법개발을 하는 것이 필요하다.

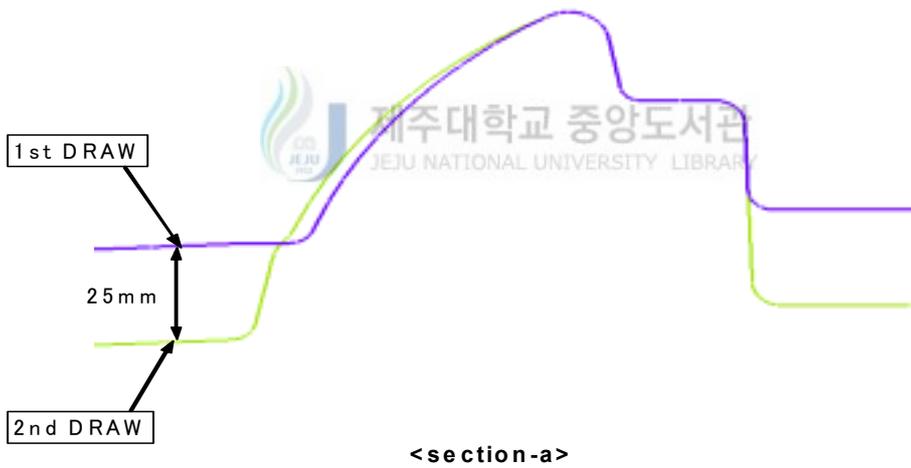
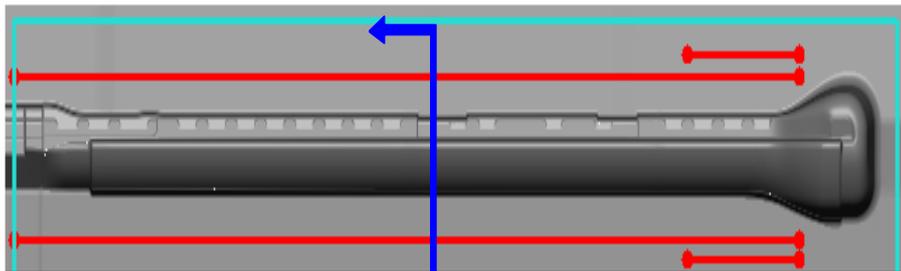


Fig. 71 Draw Shape

Fig. 72에서 보는 바와 같이 1차공정까지 성형해석 한 결과 한부분에서 파단의 문제가 되었다. 지금까지 2차공정으로 계획하여 성형해석 한 결과들 중에서 가장 이상적인 결과를 보였다.

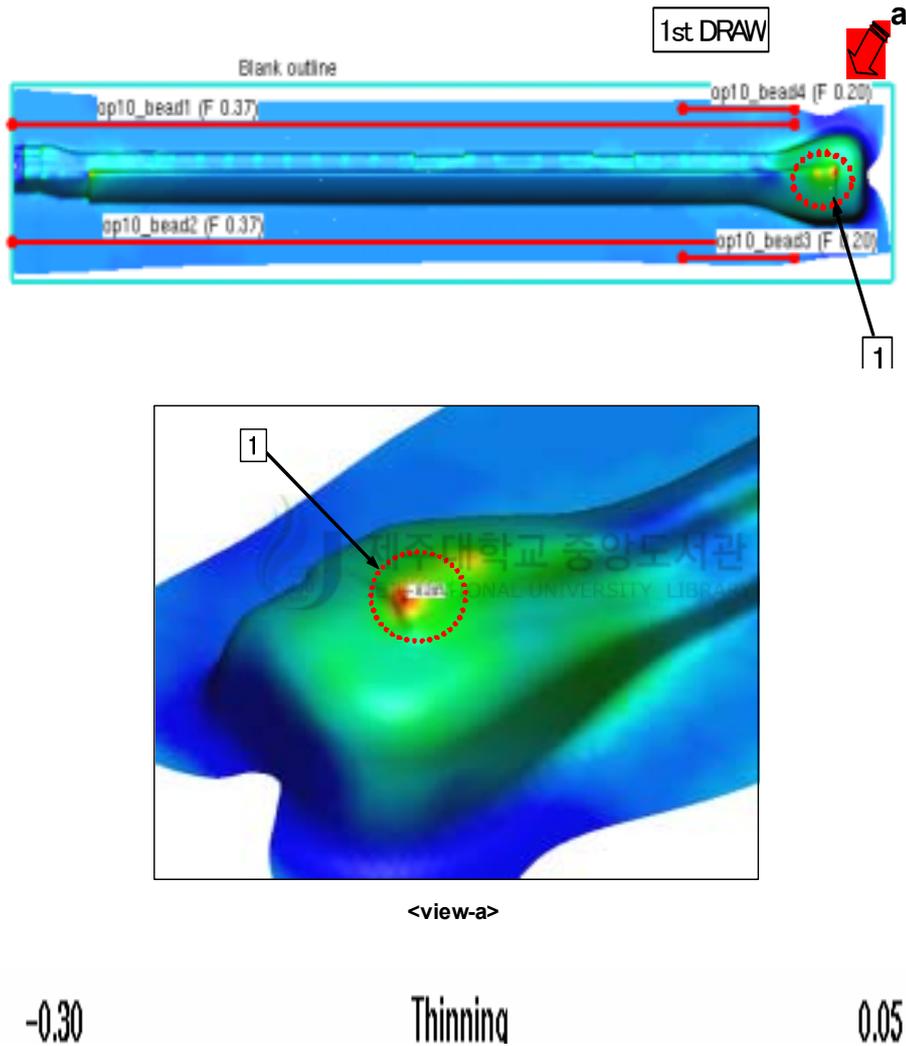


Fig. 72 Thickness reduction(1st draw)

지금까지 해석한 주름의 경향에서와는 달리 매우 좋은 결과를 얻었다. 하지만 매칭부분에서는 문제가 크므로, 주름의 완전 해소가 필요하다. 그러기 위해서는 새로운 공법의 개발이 필요하다.

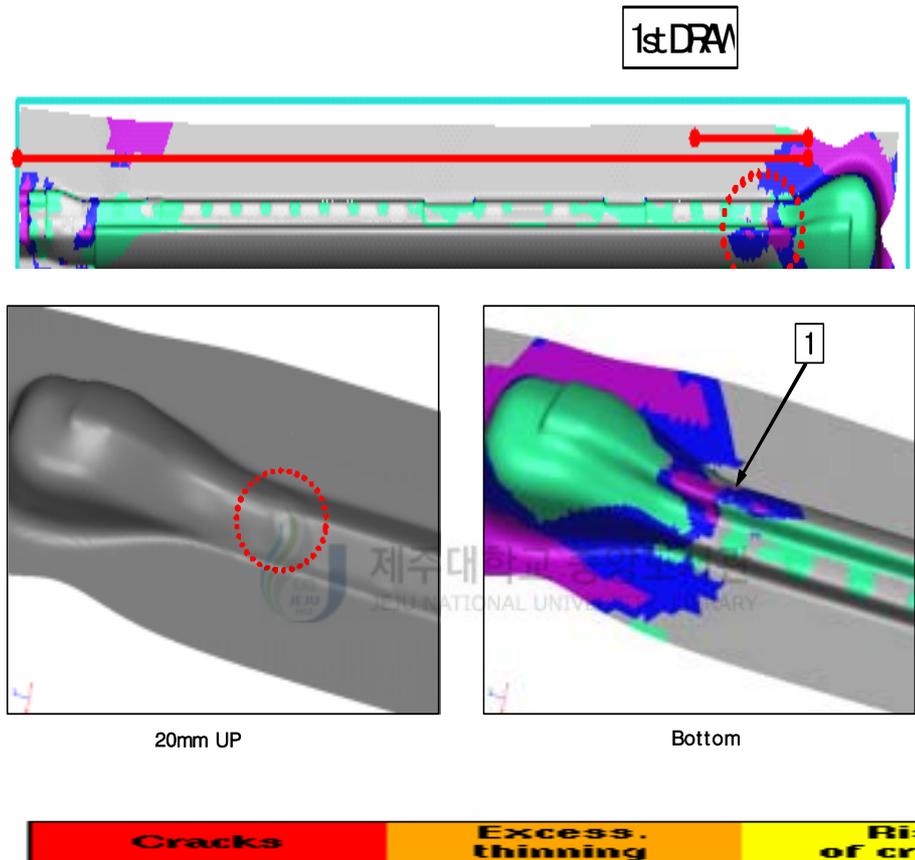


Fig. 73 Wrinkling(1st draw)

과단한계곡선을 넘는 곳이 한 부분도 보이지 않고 있다. 즉, 과단의 문제는 해결하였다. 하지만 순수전단 상태의 주름부분은 다른 재질들과 같이 문제가 되고 있다.

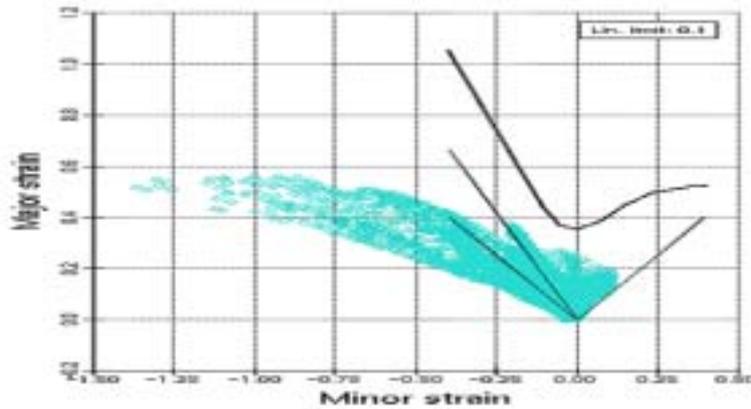


Fig. 74 Forming limit diagram distribution chart

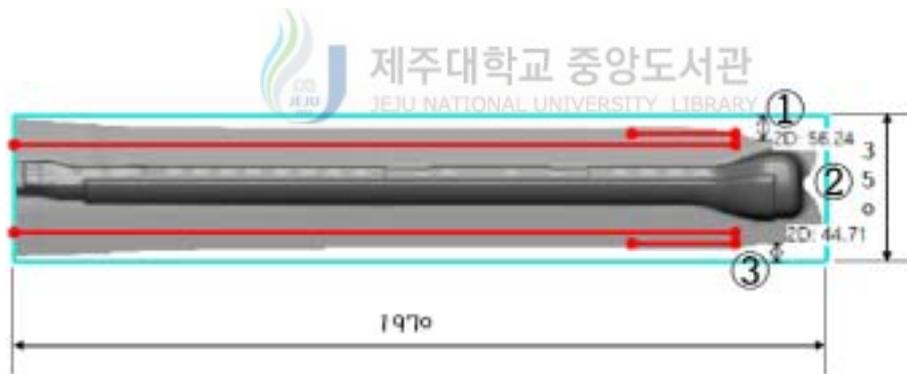


Fig. 75 Blank size & Metal flow(1st draw)

SP782-390의 1차공정의 블랭크사이즈와 메탈프로우를 보면 ①부분이 ③부분보다 11.53mm 더 성형이 되었다.

2차공정에서는 좀 더 깊게 성형되면서 두께 감소가 더 심해졌다. 하지만 이 정도는 제품의 트라이아웃공정과정에서 사상을 통해 해결이 가능하기 때문에 별 문제는 없는 치수이다.

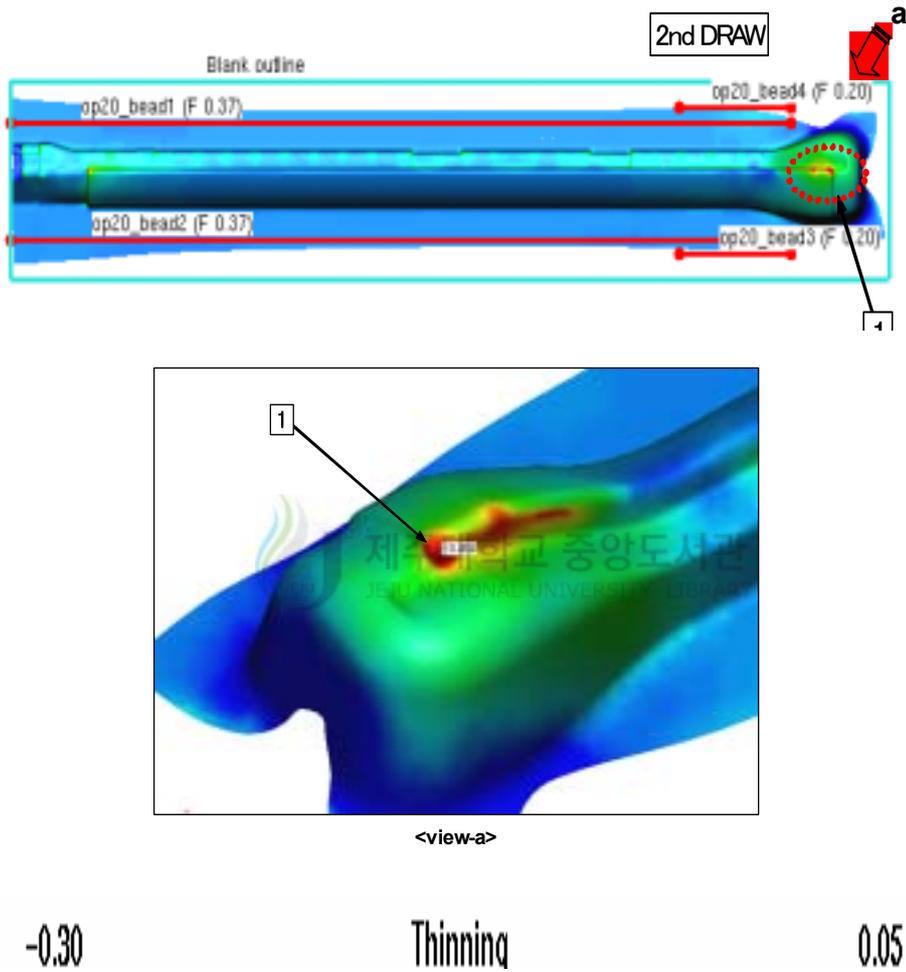


Fig. 76 Thickness reduction(2st draw)

하지만 가장 문제가 심각부분인 매칭부분에서는 여전히 주름이 나타났다. 재질의 변경으로 해결되지 않는 부분은 새로운 공법개발을 통해 해결해야만 한다.

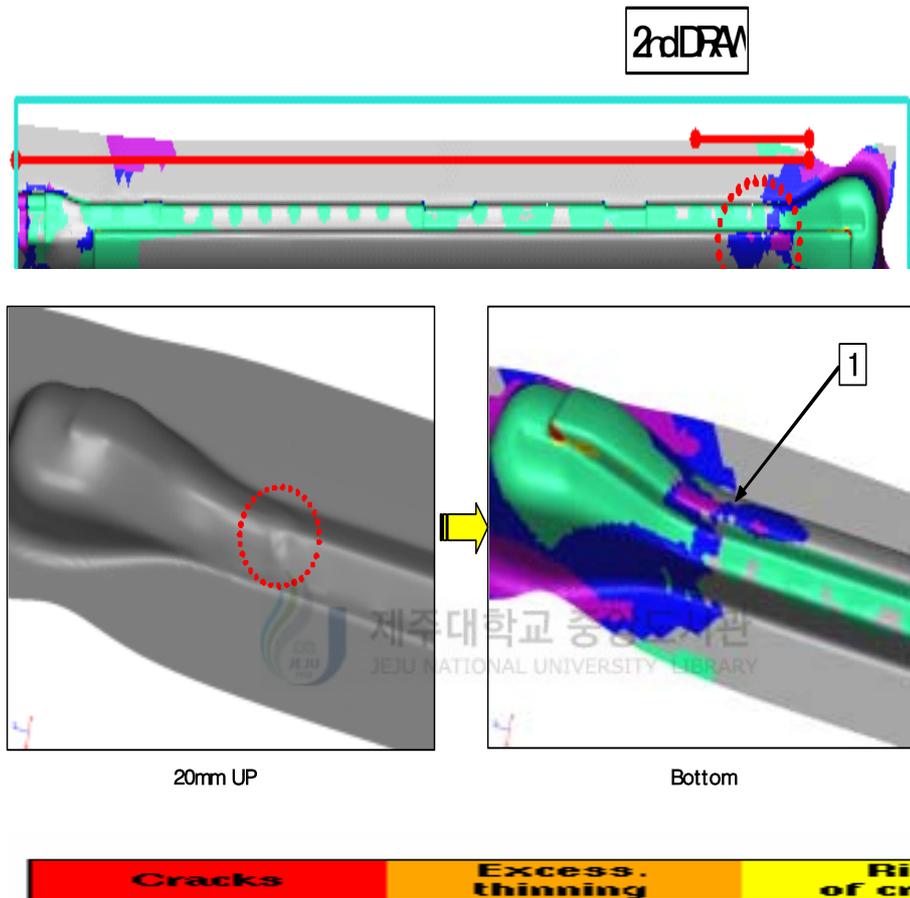


Fig. 77 Wrinkling(2st draw)

과단한계곡선 주위로 과단이 문제가 되는 부분이 있지만 이 부분들은 트라이아웃공정과정에서 사상을 통해 해결이 가능한 치수이므로 별 문제가 없었다. 하지만 순수전단 상태인 주름의 부분에서는 다른 재질들과 별다른 차이 없이 심각한 문제가 되고 있었다.

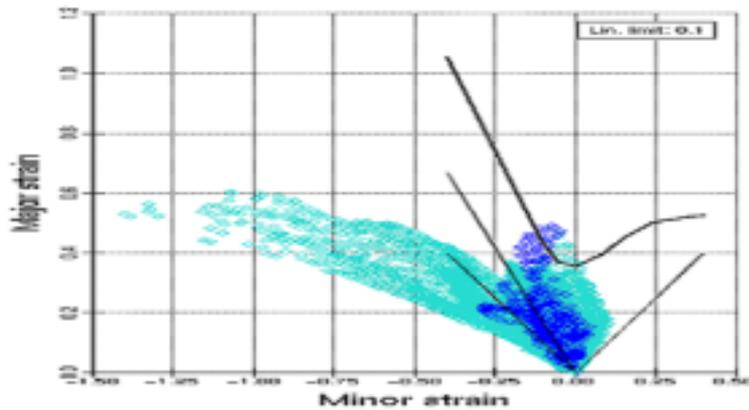


Fig. 78 Forming limit diagram distribution chart

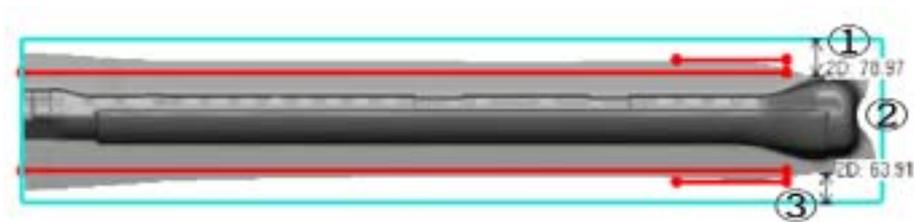
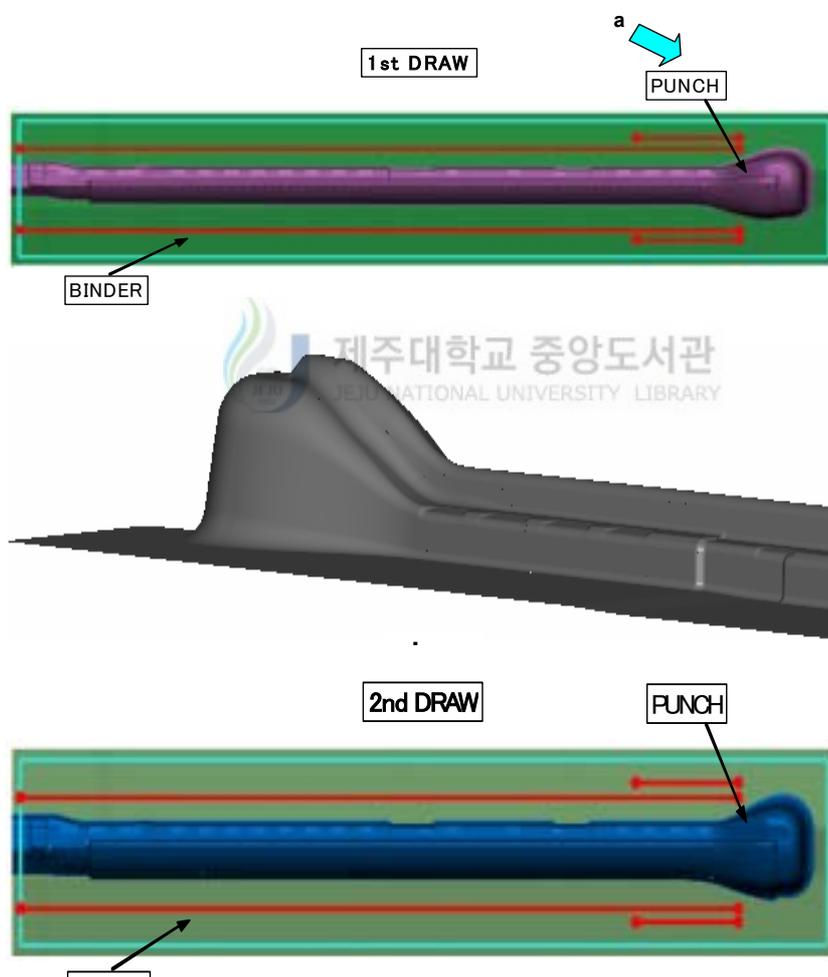


Fig. 79 Blank size & Metal flow(2st draw)

최적의 재질을 선택하고 공정을 계획하였지만 판넬에 가장 중요한 부분인 매칭부분에서 주름을 해소하지는 못하였다. 이 부분을 해결하기 위한 방법으로 기존의 공법에서의 문제점을 파악하고 연구한 결과로 새로운 공법을 개발하였다.

3.2.5 공법계획의 비교(Comparison for Operation Plan)

재질의 변경으로 해결이 되지 않은 부분을 공정계획으로 해결해야 하지만 공법계획으로도 해결되지 않는 부분은 획기적인 공법을 개발하여 해결하였다. 이번 장에서는 기존 공법계획과 새로운 공법계획을 비교하여 설명하였다.



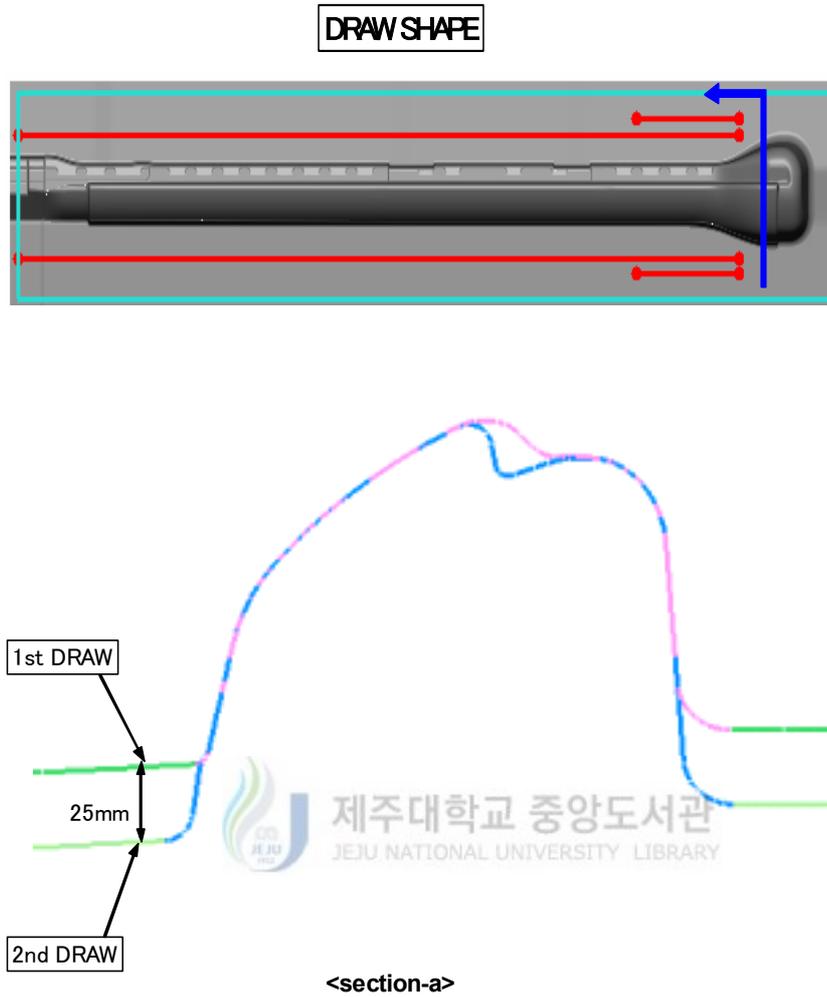
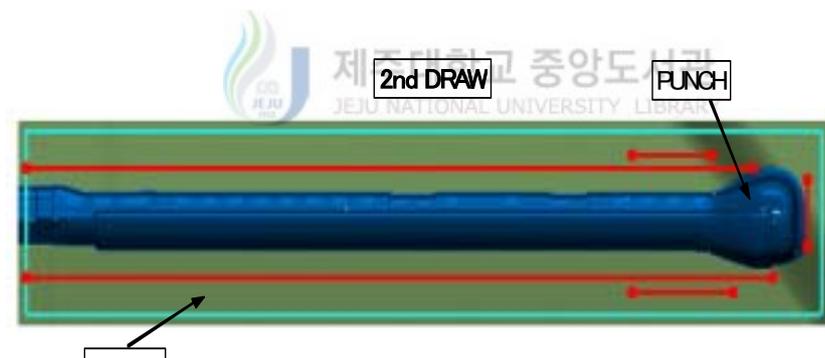
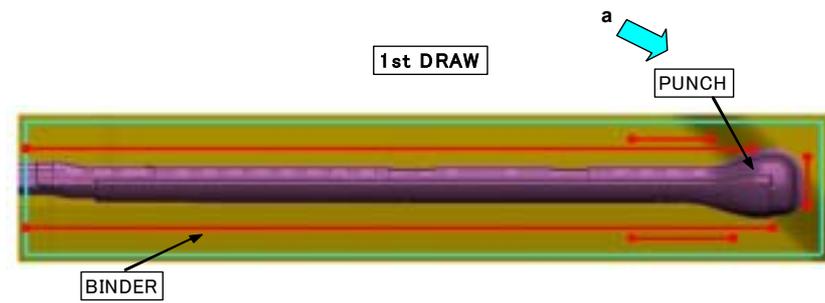


Fig. 80 Old Operation Plan

기존의 공법방법은 Fig. 80과 같으며, 지금까지 성형해석 한 결과들을 토대로 획기적으로 공법을 개발할 수가 있었다.



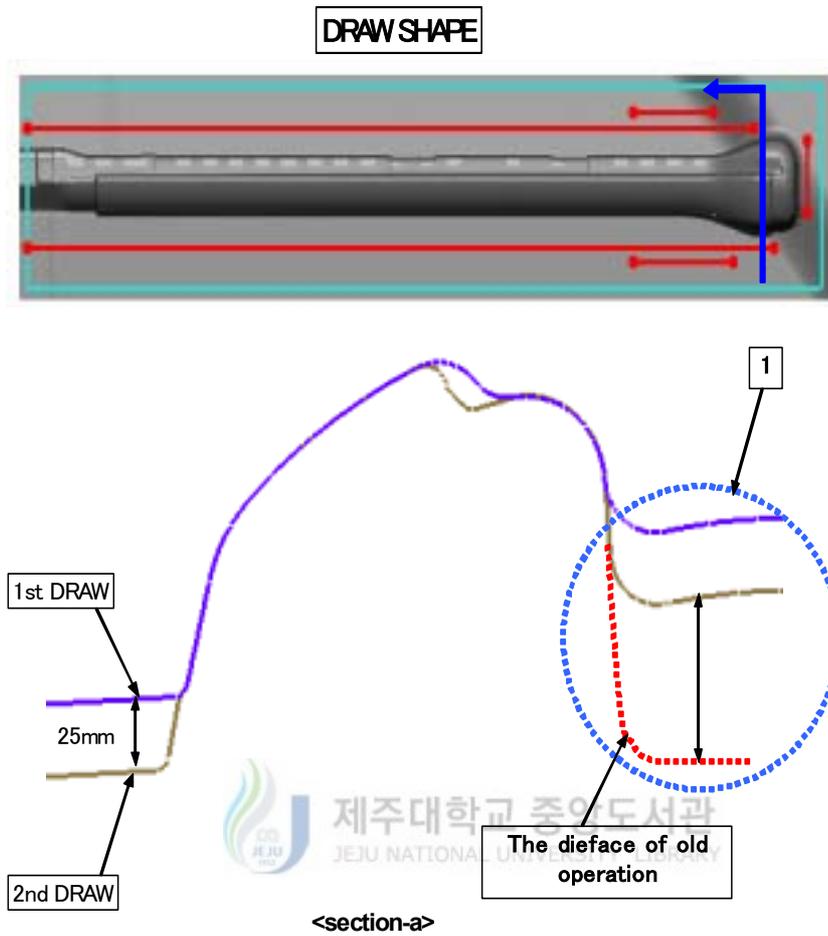


Fig. 81 New Operation Plan

기존방법에서 성형이 되면서 주름이 발생하고 있었던 점을 고려하여, 다이페이스부분을 대각선 방향으로 50mm 높여 공법을 개발하였다. 이 개발하고 획기적인 공법은 관넬의 성형성과 방향성을 토대로 분석하여 도출한 것이다.

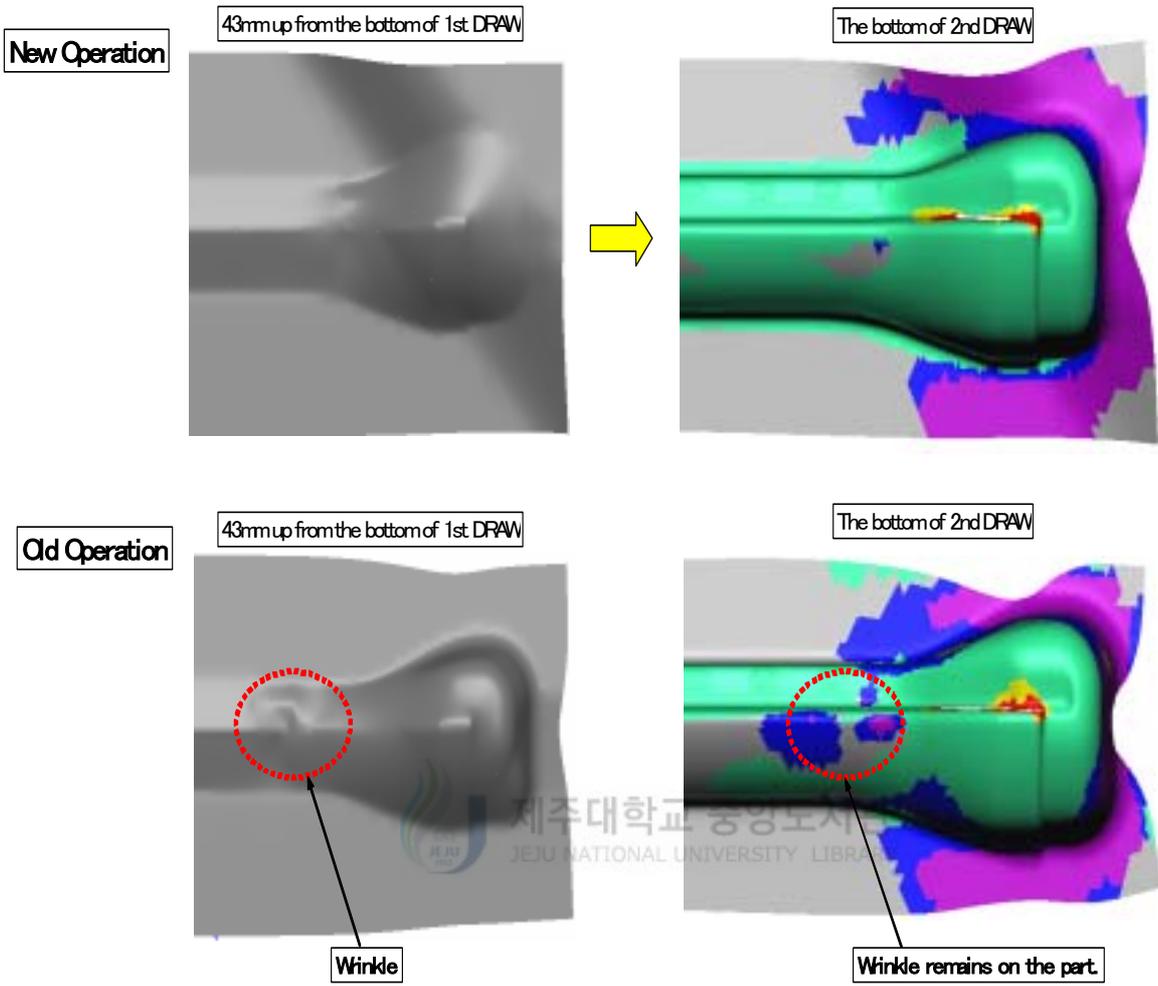


Fig. 82 Comparison of Wrinkle

기존의 방법과 새로운 방법의 성형해석을 비교한 결과 매칭부분에서의 주름문제를 완벽하게 해결한 것을 볼 수 있었다.

3.2.6 최종공법개발

새로운 공법개발을 토대로 공법계획을 세워 최종적으로 성형해석을 하였다.

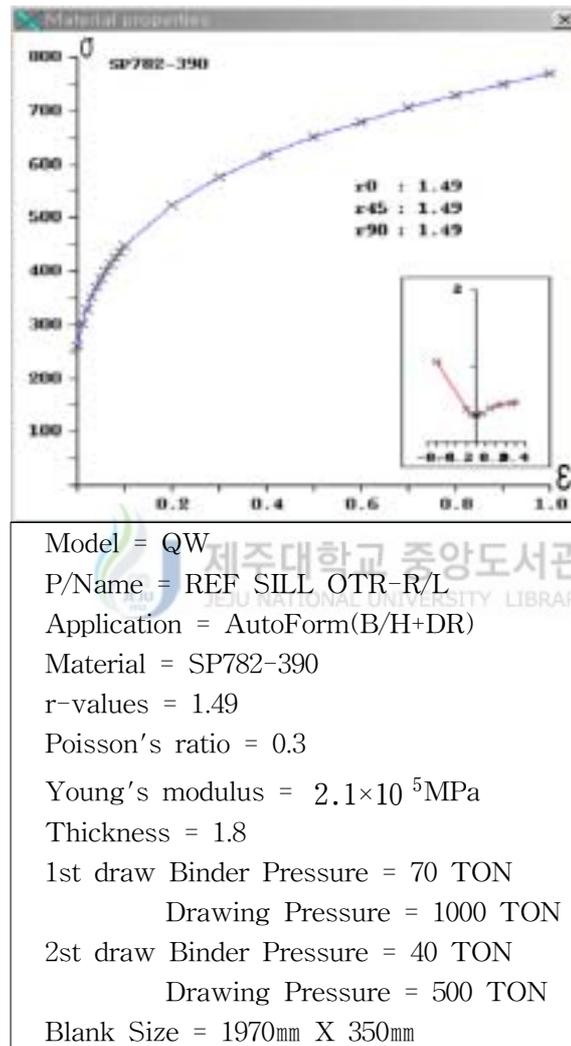


Fig. 83 The final input condition

Fig. 84에서 보는 바와 같이 다이페이스부분의 대각선 방향으로 50mm 높여 성형하는 획기적인 공법을 개발하였다.

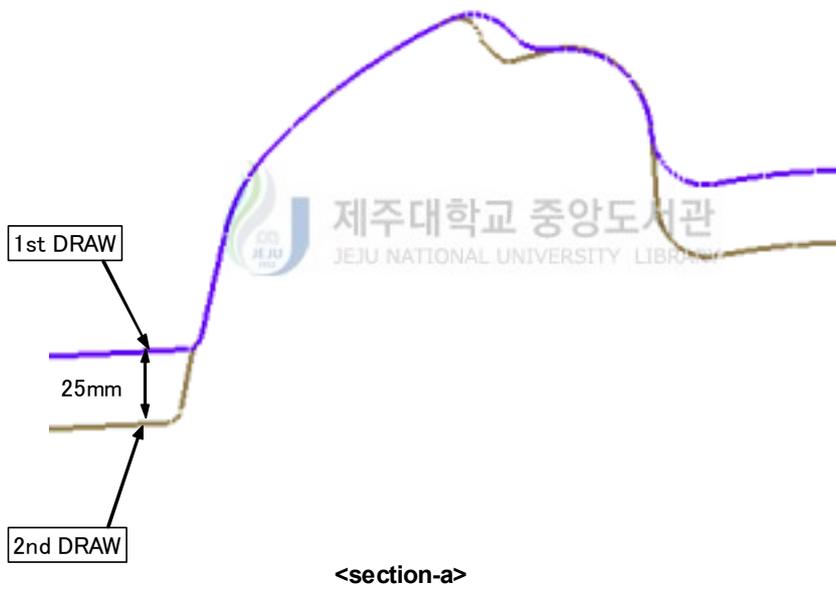
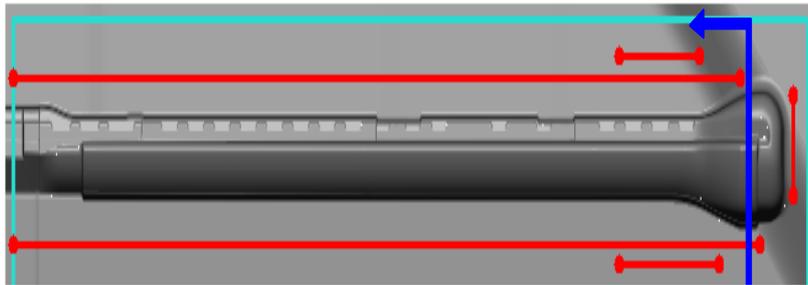


Fig. 84 Draw Shape

공법을 개발한 후 1차 공정으로 성형해석 한 결과 파단이 일어날 가능성이 있는 부분이 있었지만, 이 정도의 파단은 트라이아웃공정과정에서 사상을 통해 해결할 수 있는 치수이므로 별 문제가 없다.

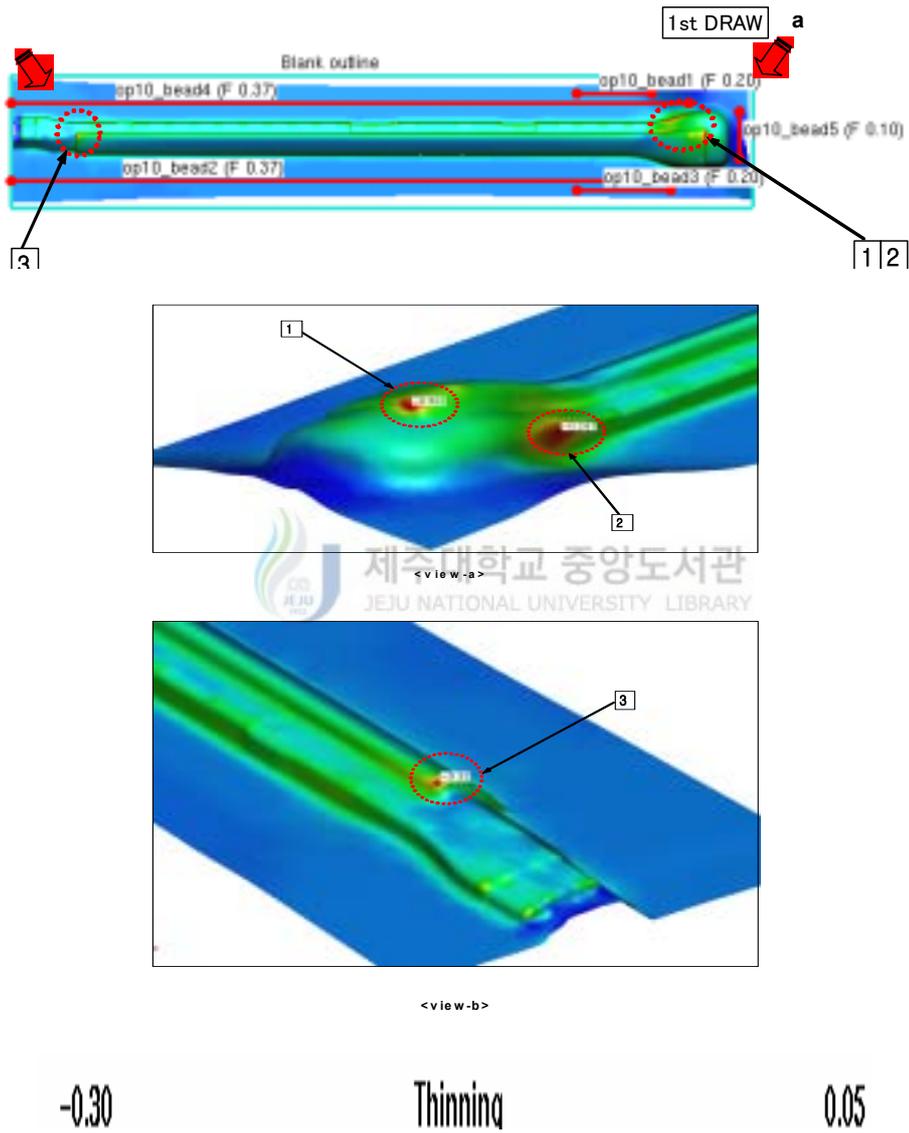


Fig. 85 Thickness reduction(1st draw)

Fig. 86의 주름경향을 보았을 때 가장 문제가 되었던 매칭부분의 주름에 대한 문제를 해결하였다.

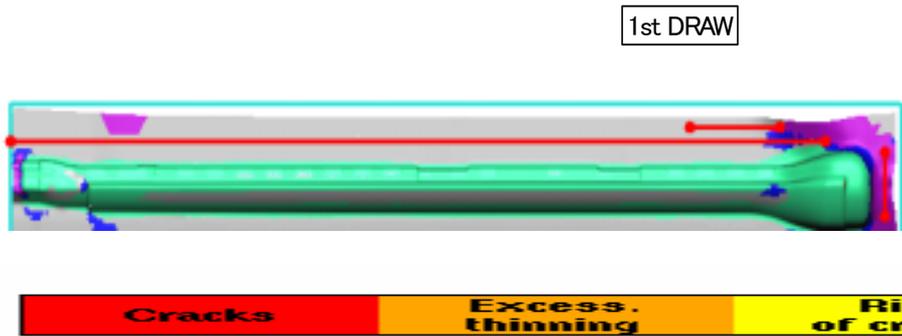


Fig. 86 Wrinkling(1st draw)

성형한계곡선에서의 파단한계곡선부분과 순수전단 상태부분에서의 파단과 주름의 문제가 없을 정도로 이상적인 결과를 보여주었다.

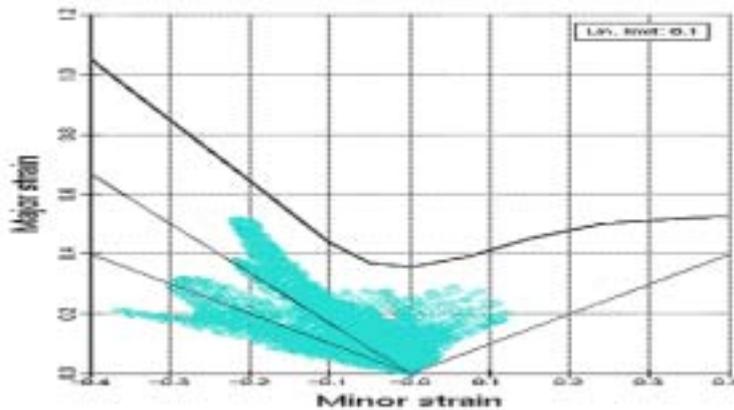


Fig. 87 Forming limit diagram distribution chart

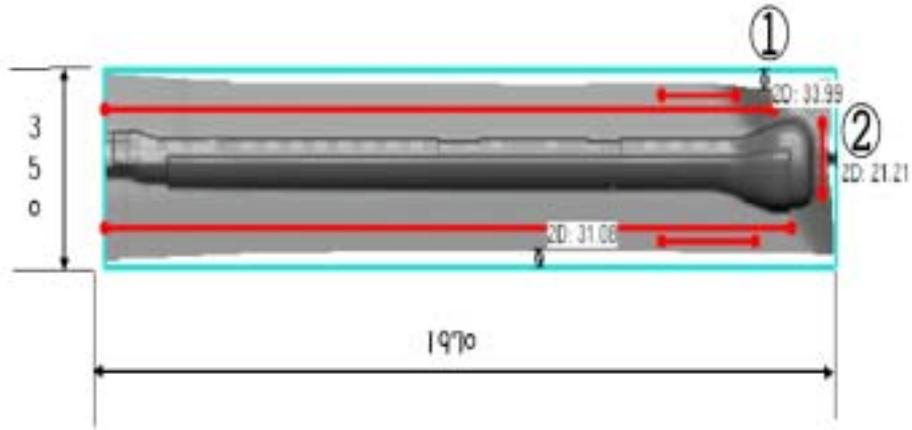


Fig. 88 Blank size & Metal flow(1st draw)

새로운 공법개발을 하여 1차공정까지 해석한 결과 성형성은 기존의 방법보다 월등히 뛰어났으며, 가장 문제가 되었던 매칭부분에서의 주름 문제를 해결 할 수가 있었다.



2차공정에서 더 깊이 성형이 되면서 두께 감소가 더 심하게 되었다. 하지만 이 정도의 파단은 트라이아웃공정과정에서 사상을 통해 해결할 수 있는 치수이므로 별 문제가 없다.

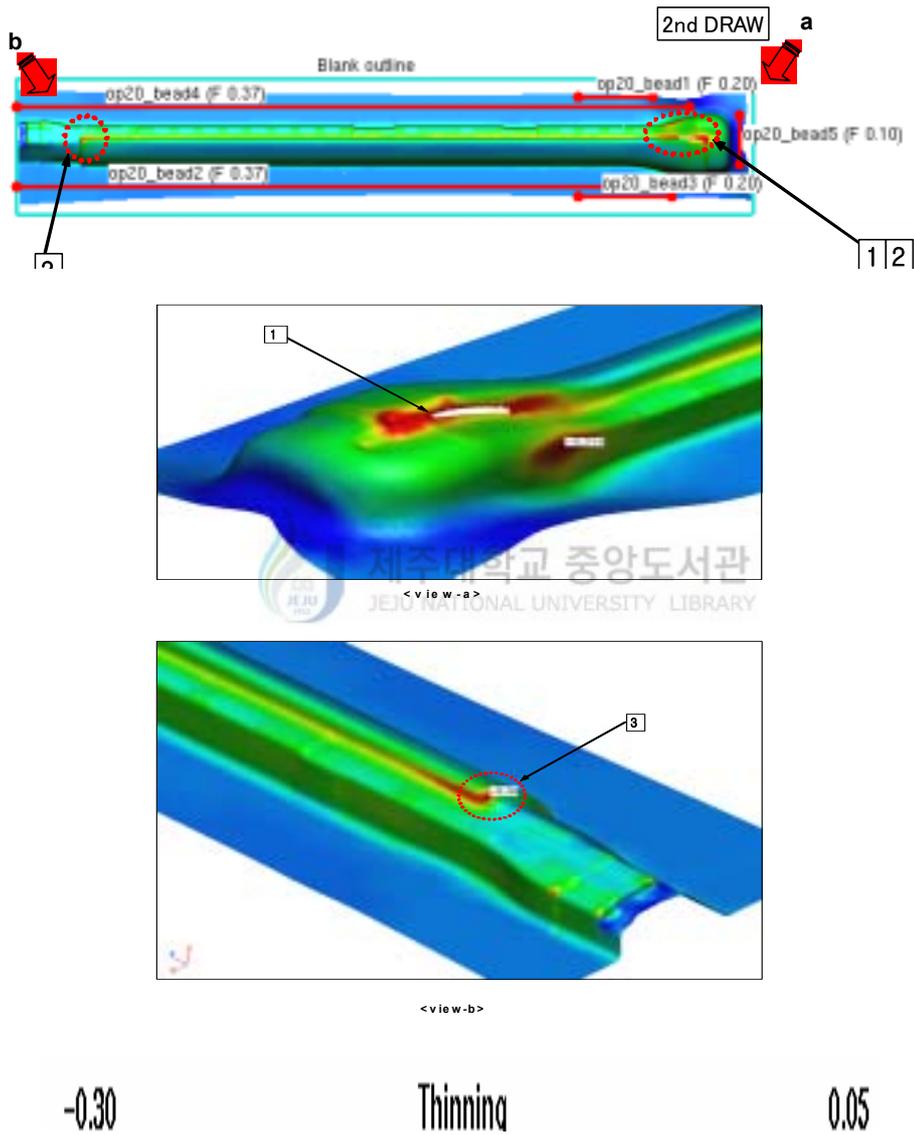


Fig. 89 Thickness reduction(2st draw)

1차공정에서 2차공정으로 성형이 완료되면서 완벽하게 주름이 해소가 되었다.

2nd DRAW

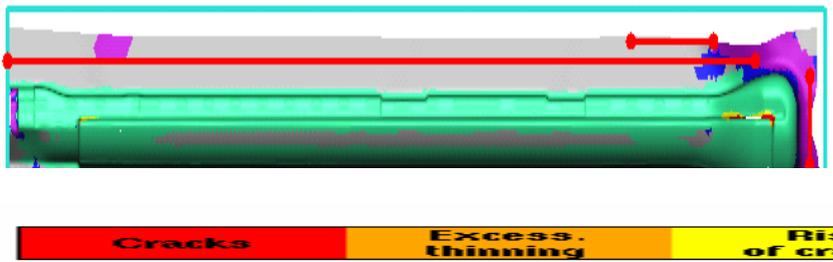


Fig. 90 Wrinkling(2st draw)

파단한계곡선부분과 순수전단 상태부분의 파단과 주름에 대한 문제는 없을 것으로 판단되어지며, 보이는 성형한계곡선에서 발생하고 있는 파단과 주름부분들은 트리밍 공정으로 해결할 수 있는 부분들이다.

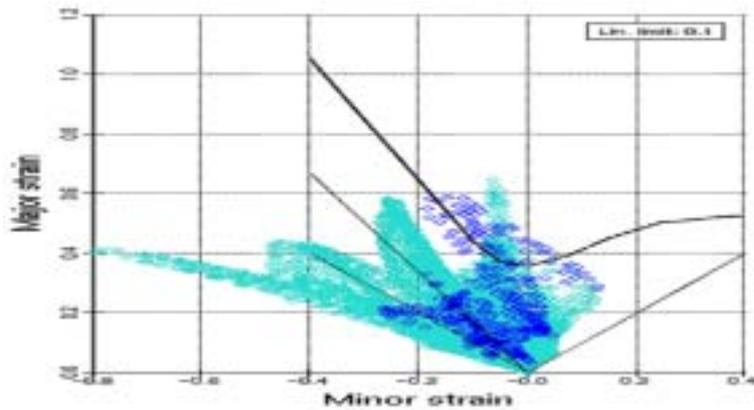


Fig. 91 Forming limit diagram distribution chart

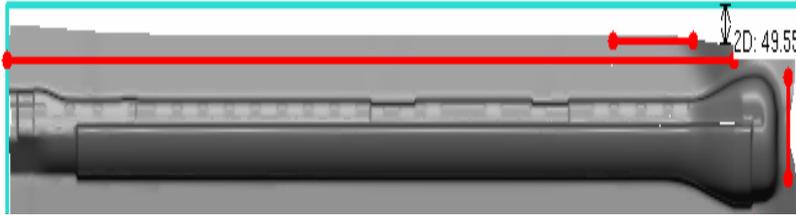


Fig. 92 Blank size & Metal flow(2st draw)

REF SILL OTR-R/L 차체판넬의 재질에 적합한 SP782-390을 최종적으로 변경하고 성형 깊이가 깊은 부분에 대한 문제(터짐과 주름)를 해결하기 위해 대각선 방향의 다이페이스를 수정 변경하는 새로운 공법을 개발한 결과들이며 현재 최종적으로 성형해석 한 결과들이다. 이러한 해석 결과들을 토대로 금형을 제작하여 실제 시제품을 제작해 보기로 하였다.



3.3 시제품 제작

최종적인 성형해석을 바탕으로 트라이아웃공정과정을 걸쳐 금형을 제작하여 직접 REF SILL OTR-R/L 차체판넬을 제작해 봄으로써 성형해석의 실용성을 검증하였다. 다음은 실제 시제품을 제작한 사진들이다.



Fig. 93 Sill Side Outer-RH_2nd Draw I



Fig. 94 Sill Side Outer-RH_2nd Draw II



Fig. 95 Final photo of tryout I



Fig. 96 Final photo of tryout II



Fig. 97 Final photo of tryout III



Fig. 98 Final photo of tryout IV

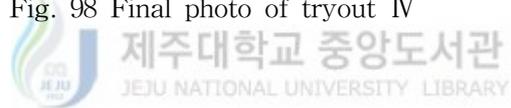


Fig. 99 Final photo of tryout V



Fig. 100 Final photo of tryout VI

IV 결론 및 고찰

본 연구에서는 실제 현장에서 사용하고 있는 차체 판넬들 중 하나를 선택하여 최적의 금형을 제작하기 위한 제반적 조건을 얻기 위해 기존의 방법을 탈피한 새로운 방법으로 제작 가능한 재질들 중에서 가장 적합한 재질을 선택하는 방법으로 성형해석을 하였으며, 가장 적합한 재질의 변경으로도 해결하지 못한 문제들은 새로운 공법을 개발하여 문제를 해결하였다. 이를 바탕으로 실제 금형을 제작한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 여러 재질들 중에서 REF SILL OTR-R/L 차체판넬에 가장 적합한 재질은 SP782-390_1.8t이었으며, 성형성을 개선하기 위해서는 재질의 변경이 필요하다는 것을 성형해석을 통해 검증하였다. 그리고 재질의 변경으로 해결되지 않는 문제들은 공법을 통해 해결해야 한다는 것을 성형해석을 통해서 알 수 있었다.
2. 최종재질을 SP792-390_1.8t로 변경하고 공법을 계획하여 성형해석 한 결과 1차공정과 2차공정으로 변경 한 후에도 여전히 파단과 주름이 문제가 되었다. 이러한 현상의 대책으로 성형 깊이가 깊은 부분에 파단을 대응하기 위해 재질 변경을 해야 하며, 또한 2차공정으로 인한 쇼크라인(shock line)을 방지하기 위해 측면에 제품형상의 변경이 불가피하다는 것을 성형해석을 통해 알 수가 있었다.

3. 최종 메탈프로우(Metal flow)에서 판넬의 성형특성을 짐작하고 분석하였다. 결과적으로 기존방법에서 성형이 시작되면서 주름이 발생하고 있었던 점을 고려하여 새로운 공법을 개발하였다. 공법은 형상깊이가 높은 부분에 대각선 방향의 다이페이스를 수정 변경하는 새로운 공법을 개발하였으며, 이를 통해 가장 문제가 되었던 매칭부분의 주름문제를 해결할 수 있었다.

4. 지금까지 성형해석 한 결과들을 바탕으로 금형을 제작하여 실제로 차체 판넬 시제품을 제작해 봄으로써 성형해석의 타당성과 적합성을 검증하였다.

본 연구에서는 원활한 금형제작을 위해서는 각 제작공정의 고유기술과 더불어 적시에 적절한 업무를 투입시킬 수 있는 프로젝트 관리기술이 뒷받침 되어야 하며 각 프로젝트 고유의 액션플랜을 기획, 이에 준한 업무를 추진함으로써 제작기간 중 발생할 수 있는 모든 종류의 리스크를 최소화하기 위한 성형해석공법의 개발이 절실하다는 것을 고찰 할 수 있었다. 더 나아가서 성형해석공법들에 연구 결과들을 다양한 금형제작에 적용될 수 있는 표준화 연구가 필요하다.

VII. 참고문헌

- [1] 정효상, 이성수, "자동차 프레스 금형 자동 설계지원시스템," 한국정밀공학회 제19권, 제8호, pp. 194-202, 2002.
- [2] 정동원, 안동규, 양동열, 이장희, "강소성 외연적 유한요소법을 이용한 자동차 박판제품의 성형공정에 대한 단면해석," 자동차공학회 제3권, 제3호, pp. 19-28, 1995.
- [3] Huh. H., Han. S. S., Yang. D. Y., "Elastic-Plastic Finite Element Analysis with Directional Reduced Integration in Sheet Metal Forming Process", 3rd ICTP, pp. 1375-1381, 1991.
- [4] Sumaga. H., Makinouchi. A., "Elastic-Plastic Finite Element Simulation of Sheet Metal Bending Process for Auto-Body Panels", 3rd ICTP, pp. 1525-1530, 1990.
- [5] 정동원, 양경부, 김광희 "원형컵 드로잉 공정에 미치는 영향인자에 관한 실험적 연구", 소성가공학회, 제8권, 제5호, pp. 449-453, 1999.
- [6] 이승훈, 양형일, 정동원 "딥 드로잉 공정에 미치는 영향인자에 관한 실험적 연구", 한국동력기계학회, 제7권 제2호, pp. 61-65, 2003.
- [7] Cheng, J. H., Kikuchi, N., "An Analysis of Metal Forming Processes using Large Deformation Elastic - Plastic Formulation", Comp. Meth. Appl. Eng., pp. 71-108, 1985.
- [8] Choi, T. H., "Numerical Simulations of Sheet Forming Processes by an Elasto-Plastic Finite Element Method", KAIST MS thesis, pp. 6-18, 1993.
- [9] Chun, B. K., "Numerical Simulation of Bead Formation by an

- Elasto-Plastic Finite Element Method”, KAIST MS thesis, pp. 7-23, 1992.
- [10] 김동원, "소성학", 청문각, pp. 87-108, 1997.
- [11] Kim, C. M., Im, Y. S., Heo, Y. M., Kim, N. S., Jung, G. C., Seo, D. G.,
"Finite-element analysis and experimental verification for drawbead drawing
processes", J. of Materials Processing Technology, pp. 188-194, 1997.
- [12] 이재우, 금영탁, "박판 성형공정의 유한요소해석을 위한 드로비드 전문모델
개발", 한국소성가공학회지 제7권, 제1호, pp. 3-22, 1998.
- [13] Keleer. S. P., Backofen W. A., "Trans", ASM, Vol. 53, No. 25, 1963.
- [14] Goodwin. G. M., "La Metallurgia Italiana", Vol. 8, No. 767, 1968.
- [15] Ghosh. A. K., Hecker. S. S., "Metal. Trans.", Vol. 6, No. 1065, 1975.
- [16] Lange K., "Handbook of Metal Forming", McG-Hill, Vol. 14, No. 18, pp.
11-18, 1985.
- [17] Hasek. V., Lange. K., "Wirtech. Z. Ind., Fertig., Vol. 70, 1980.
- [18] 전기찬, "박판금속의 성형", 반도출판사, pp. 179-204, 1993.

감사의 글

이제 감사의 글을 쓰려고 합니다. 지난 2년 동안의 일들이 머릿속으로 한 순간에 지나가는 것 같습니다. 순간순간들을 채워 주었던 모든 분들께 감사 말씀을 전하고 싶습니다. 비록 몇 줄 안되는 글이지만 저의 모든 정성을 모아 고마움의 뜻을 전해드리고 싶습니다.

이 논문이 완성되기까지 창의성으로 학문의 길을 열어주시고, 연구하는 자세에 대해 행동으로 가르쳐 주신, 지도교수이신 정동원 교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한 바쁘신 중에도 심사위원으로 저의 부족한 점을 일일이 지적해 주신 김귀식 교수님, 조경호 교수님께도 아울러 깊이 감사드립니다.

마지막까지 연구에 필요한 자료와 실험을 지원해 주신 (주)Dieart에 계신 안병일 사장님, 문원섭 부장님, 여러 관계자분들께도 감사의 마음을 전합니다.

다른 학부를 졸업하고 대학원을 기계공학과로 들어오면서 많은 격려와 도움을 준 동기이자 선배님이신 김대현, 김상혁, 김희철, 양경조, 한세웅 선배님들과 컴퓨터 정형가공 실험실에서 학문적 조언과 토론으로 많은 도움을 준 이승훈 선배님, 고희훈 선배님, 안현길, 강용철, 한유리에게 진심으로 감사드립니다.

제주도 낯선 곳으로 처음부터 다시 시작하자는 단호한 결심을 갖고 온지 6년이 다 되어갑니다. 대학생생활에서 가장 보람되고 돈으로도 바꿀 수 없을 만큼의 좋은 선배님과 친구, 후배들을 만날 수 있었던 청석회 식구들에게 저의 작은 결실을 보여드리고자 합니다.

범창이형, 유성이형, 강청이형, 용섭이형, 형석이형, 동화, 병열, 보은, 병구, 근웅, 대범, 성용, 동원, 재봉, 민성, 철우, 두표, 아람, 수현, 성룡, 창근, 상래, 지혜, 도운, 준영, 미향, 해선, 선영 등등 저에게 힘이 되어 준 모든 분들께 감사에 말씀을 전하고 싶습니다. 여러분들과 만나서 서로 얘기하고 정을 나누었던 그 순간순간이 저에겐 큰 축복의 시간이 아니었던가 싶습니다.

나에게 지칠 때마다 항상 힘과 자신감을 주고, 애정과 사랑으로 나를 대해준 승임이에게 진정한 사랑을 전합니다.

끝으로 저를 낳아주시고 오늘이 있기까지 보살펴 주시고도 이 작은 결실을 지켜보시지 못한 아버님, 자식의 일이라면 언제나 온 정성을 다 기울이시는 어머님께 말로는 그 은혜를 표현조차 할 수 없습니다.

이 작은 결실을 저의 가족에게 바칩니다.