

## 쿠션스트로크 변화에 따른 성형성에 관한 연구

고형훈\* · 정동원

\*제주대학교 대학원, 제주대학교 공과대학 기계에너지시스템공학부

### 요 약

박판 성형 공정은 재의 손실이 적고 가공 시간이 짧으며, 적은 재료비와 우수한 강도의 장점을 가지고 있다. 이러한 프레스 성형 공정은 사용되어진 장비의 능력 및 특징과 사용되어진 소재와 가공될 부품의 정밀도 및 공정조건을 최대한 고려하여 설계하여야 한다. 프레스 가공에 있어서 단순한 컵의 형상의 경우는 한 번의 공정으로 작업이 완료되지만, 컵의 형상이 복잡하거나 그 컵의 깊이가 깊은 경우에는 재 드로잉 공정이 요구되기도 한다. 또한 공정 간의 열처리나 윤활을 필요로 하는 경우도 있어, 가능한 한 부수적인 공정이 발생하지 않도록 각 공정별 형상과 크기를 사전에 정확히 결정하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 프레스 공정에 관련된 주요인자들 중 쿠션 스트로크의 변화에 따른 박판성형공정에서의 성형성에 관해 AutoForm 소프트웨어를 이용하여 유한요소해석 해보았다.

주요어 : 정적-내연적 유한요소법, 차체판넬 스템핑, 성형단계, 오토폼(AutoForm)

### 1. 서론

박판성형 공정은 금속 판재를 이용, 복잡한 형상의 제품을 성형해 내는 것으로서 짧은 가공시간과 가공 중 소재의 손실이 비교적 적고, 강도가 높고 우수한 표면특성과 소재의 단가가 저렴한 장점을 가지고 있어 자동차산업, 항공산업, 전자부품산업과 주방용품산업 등 현대 산업에 폭 넓게 자리매김 하고 있는 분야이다. 박판 성형은 드로잉, 스트레칭, 굽힘, 아이어닝 및 이들의 조합으로 구성된 복잡한 변형모드를 포함하고 있을 뿐만 아니라, 재료 자체의 성형성(formability), 이방성(anisotropy) 등의 기계적 성질이나, 두께의 불균일, 공구각부의 조합, 윤활 상태, 성형속도 등의 변형 영향인자 때문에

그 물리적 현상의 정량적 파악이 곤란하다. 또한 공정 중 소성변형을 수반하게 되어 판재의 파단 및 형상불량 등의 가공 결함이 발생하게 되어 우수한 박판 성형 결과물을 얻기 위한 가공공정의 알고리즘 개발 및 검증 작업이 필수적이다.

성형제품의 개발 초기 단계에는 제품을 올바르게 성형하기 위한 성형성 확보가 주된 관심일 수 있다. 금형개발 단계에서 이러한 성형성 확보를 위해 다이 개발 및 드로우 비드 조정과 바인딩 압력과 펀치 드로잉 압력 등 다양한 인자에 대한 연구가 이루어지고 있다.

쿠션 스트로크가 늘어날수록 소재가 자중에 의해 펀치 쪽으로 처지는 현상을 볼 수 있는데 스트로크가 너무 크면 자중량이 많아져서 Binding 상태가 좋지 못하게 될 수도 있다. 이

러한 문제를 보완하기 위해서는 Cushion stroke의 조절을 통해 소재의 자중처짐 현상을 적정 수준으로 맞춰주는 것이 좋은 성형성을 만들어 준다.

본 연구에서는 스위스의 Kubli 교수가 개발한 정적-내연적(static-Implicit) 소프트웨어인 AutoForm 프로그램을 사용하여 SPCC\_DWMC 판넬 성형시 쿠션 스트로크 값의 변경에 따른 성형성을 검증해 보았다.

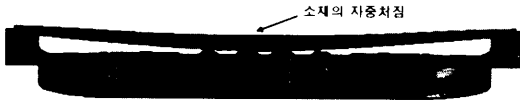


Fig. 1. Gravity sink material inflow

## II. 본론

변형된 물체는 Fig. 2와 같이 3차원 공간에서 고려해 볼 수 있다. 단계적 과정(step-by-step procedure)으로 비정상상태 변형을 해석하는데 있어, 시간  $t_0$ 에서  $t_0 + \Delta t$ 까지 1 스텝 동안의 변형을 고려하자. Fig. 1.에서  $\theta^1$ 과  $\theta^2$ 축을 박판 표면의 절점 좌표계(convected coordinates)를 나타내고,  $\theta^3$ 축은 박판표면에 법선방향으로 주어진다.  $G_{\alpha\beta}$ 와  $g_{\alpha\beta}$ 는 변형전과 변형 후 형상의 행렬텐서를 나타내고,  $G^{\alpha\beta}$ 와  $g^{\alpha\beta}$ 는 각각의 역행렬을 나타낸다. 변형전의 형상에서 기본 벡터(base vector)들은  $E_\alpha$ 와 그 역인  $E^\alpha$ 로 나타내었다. 마찬가지로, 변형된 물체에서의 기본 벡터들은  $e_\alpha$ 와 그 역인  $e^\alpha$ 로 표시하였다.

$$E_\alpha = \frac{\partial X}{\partial \theta^\alpha} \quad , \quad e_\alpha = \frac{\partial x}{\partial \theta^\alpha} \quad (1)$$

$$G_{\alpha\beta} = E_\alpha \cdot E_\beta \quad , \quad g^{\alpha\beta} = e_\alpha \cdot e_\beta \quad (2)$$

$$E^{\alpha\beta} = G^{\alpha\beta} E_\beta \quad , \quad e^\alpha = g^{\alpha\beta} e_\beta \quad (3)$$

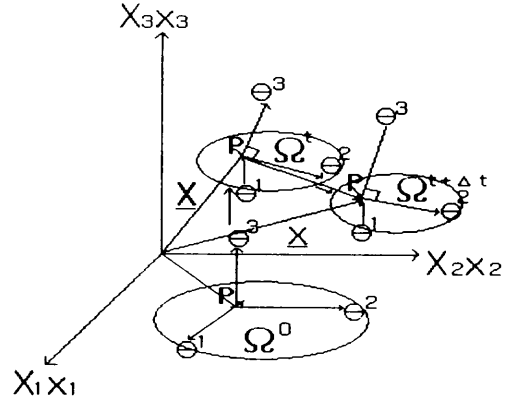


Fig. 2 Polar coordinates system of transformation process

변형전의 형상에서 변위벡터  $u$ 는

$$u = u^\alpha E_\alpha = u_\alpha E^\alpha = u_i E^i \quad (4)$$

여기에서  $u = G^{\alpha\beta} u_\beta$ 이다. 그리스 지수들은 질점좌표계를, 라틴 지수들은 직교 카티션 좌표계(rectangular Cartesian coordinates)를 나타낸다. 질점좌표계에서 라그랑지안 변형을 텐서(Lagrangian strain tensor)  $\epsilon$ 는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\epsilon = \epsilon_{\alpha\beta} E^\alpha E^\beta = \epsilon^{\alpha\beta} E_\alpha E_\beta \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{\alpha\beta} &= \frac{1}{2} (g_{\alpha\beta} - G_{\alpha\beta}) = \\ &= \frac{1}{2} (u_{\alpha,\beta} + u_{\beta,\alpha} + u_{\gamma,\alpha} u_{\gamma,\beta}) \\ &= \frac{1}{2} (u_{\alpha\beta} + u_{\beta\alpha} + u_{\gamma,\alpha} u_{\gamma,\beta}) \end{aligned} \quad (6)$$

여기에서 콤마는 변형되지 않은 행렬에 관하여 공변미분(covariant differentiation)을 나타낸다. 라그랑지안 응력텐서를 선형부와 비선형부로 나누면, 아래의 (7)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{\alpha\beta} = e_{\alpha\beta} + \eta_{\alpha\beta} \quad (7)$$

여기서,  $e_{\alpha\beta} = \frac{1}{2}(u_{\alpha,\beta} + u_{\beta,\alpha})$ ,

$$\eta_{\alpha\beta} = \frac{1}{2}\gamma_{,\alpha}u_{,\beta}$$

대변형(large deformation)을 고려한 개정 라그랑지언 방정식(updated Lagrangian equation)은 아래식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_{V_0} \Delta S^{\alpha\beta} \delta e_{\alpha\beta} dV + \int_{V_0} \tau^{\alpha\beta} u^k_{,\alpha} \delta u^k_{,\beta} dV = \int_{S_0} t_1^{(t_0+\Delta t)} \delta u_i dS - \int_{V_0} \tau^{\alpha\beta} \delta e_{\alpha\beta} dV \quad (8)$$

(8)식의 자세한 유도과정은 Shim과 Yang [4]의 논문 부록에 수록되어 있다. 또한 구성방정식이 2차 Piola-Kirchhoff 응력증분과 Lagrangian 변형율과의 관계식으로 주어졌다면,

$$\Delta S^{\alpha\beta} = L^{\alpha\beta\gamma\rho} e_{,\gamma\rho} \quad (9)$$

식(9)에 관한 자세한 수식화도 Shim과 Yang[4]의 논문 부록에 수록되어 있고, Hill의 이방성 항복함수를 만족하는 정상상태이고 일관성을 유지하는 구성텐서의 성분  $L^{\alpha\beta\gamma\rho}$ 은 기존의 참고 논문들에 잘 언급되어 있다. 위의 (8)과 (9)식을 결합하여 정리하면 탄소성 재료에 대한 최종적인 개정된 라그랑지언 방정식을 얻을 수가 있다.

$$\int_V L^{\alpha\beta\gamma\rho} e_{\alpha\beta} \delta e_{\gamma\rho} dV + \int_{V_0} \tau^{\alpha\beta} \frac{\partial u_i}{\partial \theta^\alpha} \cdot \frac{\partial u_i}{\partial \theta^\beta} dV = \int_{S_0} t_1^{(t_0+\Delta t)} \delta u_i dS - \int_{V_0} \tau^{\alpha\beta} \delta e_{\alpha\beta} dV \quad (10)$$

2차 Piola-Kirchhoff 응력 텐서의 성분들은 질점좌표계에서의 Kirchhoff 응력텐서 성분과 같으므로 응력 적분과정은 질점좌표계로 변형을 묘사하였을 경우가 다른 좌표계와 비교해 볼 때 매우 간단함을 알 수 있다. 변위증분

(displacement increment)들의 근사값은 (10)식을 사용하여 계산되고  $t_0 + \Delta t$ 시간에 해당하는 응력성분은 (9)식을 사용하여 구할 수 있다.

$$(S^{\alpha\beta})^{(t_0+\Delta t)} = (S^{\alpha\beta})^{t_0} + \Delta S^{\alpha\beta} \quad (11)$$

$$(\tau^{\alpha\beta})^{(t_0+\Delta t)} = (S^{\alpha\beta})^{(t_0+\Delta t)} \quad (12)$$

또한 변형하는 물체가 금속일 경우 일반적으로 비압축성이라고 가정하여도 무방하므로 Kirchhoff 응력텐서  $\tau$ 는 Cauchy 응력텐서  $\sigma$ 와 같다고 놓을 수 있다.

### III. 성형해석 결과

쿠션스트로크란 블랭크 홀더와 펀치와의 간격을 말하며, 본 실험에서는 쿠션스트로크를 40, 60, 80, 100, 120, 140(mm)으로 변경하며 각 단계별로 성형 해석을 하여 그에 따른 주름 경향 및 두께 감소율, 성형한계곡선을 나타내었다.



Fig. 3. Tool setting

Fig. 3은 금형형상은 보라색과 초록색 부분이 다이(Die)와 펀치(Punch)이며 갈색은 바인더(Binder)이다.

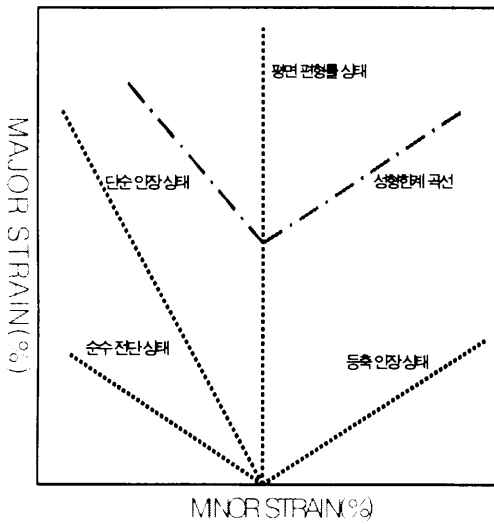


Fig. 4-1. Forming Limit Diagram

Fig. 4-1은 성형한계곡선의 기본 형태로서 그래프에서 점선들은 각각의 시험에 의한 주변형률 (Major Strain)과 부 변형율(Minor strain)의 관계를 나타내고 있다. 성형한계도를 작성하는 이유는 한계도를 작성함으로써 특정판재에 대하여 일련의 실험을 행하고 파단된 영역과 파단되지 않은 안전영역을 경계지을 수 있기 때문이다.

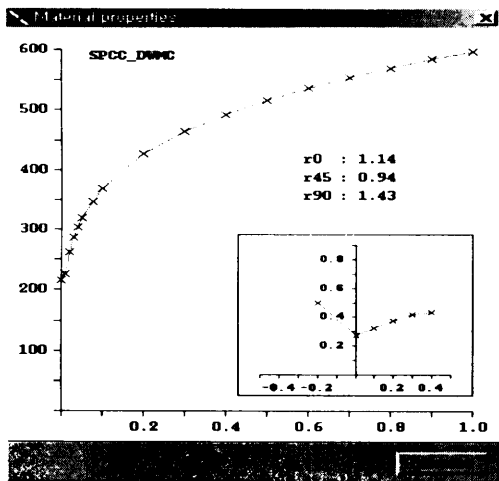


Fig. 4-2. Material properties

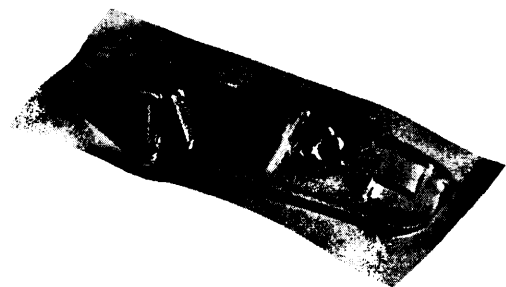
성형에 사용된 재료는 SPCC\_DWMC로 Fig.

4-2는 성형해석에 사용된 재료의 응력-변형을 곡선과 성형 한계 곡선(내부 그래프)이다. 박판 성형 중 재료에 넥킹(Necking)이나 파괴 (Crack)가 발생하게 될 때, 그 부분을 새롭게 설계하거나 제조방법을 바꾸어 변형율의 상태가 재료의 성형한계를 넘지 않도록 해야 한다. 이러한 성형 한계는 실험을 통해 결정하며, 이는 성형한계곡선으로 다시 나타내고 이 곡선은 주 변형률의 향으로 결정이 된다.

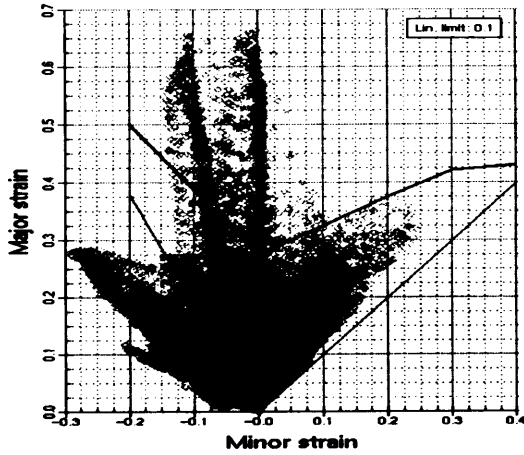
이방성 계수( $r_0, r_{45}, r_{90}$ )에서 0, 45, 90은 채취된 시편이 압연 방향과 이루는 각도이다.



(a) Wrinkles tendency distribution and Crack



(b) The thickness reduction rate



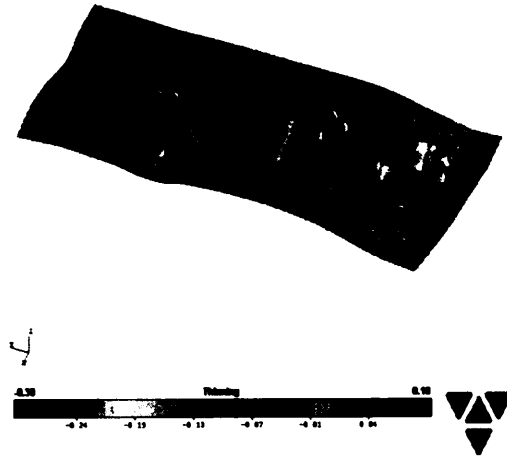
Forming Limit Diagram

(c)Forming Limit Diagram

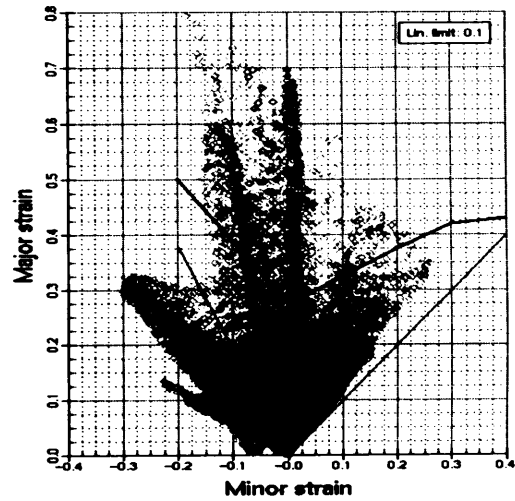
Fig. 5. Cushion stroke - 40

Fig. 5에서 B구간은 두께감소율이 20%를 넘는 파단 발생지역임을 보여주고 있으며, A구간과 C구간은 주름 발생 지역이다.

특히 A구간에서 볼 수 있듯이, 쿠션스트로크 40mm 구간에서는 주름 발생 위험 지역이 전반적으로 넓게 분포 되고 있다. 또한 두께 분포도에서 볼 때 안정된 구역이 적게 나타나고 있다.



(b)The thickness reduction rate

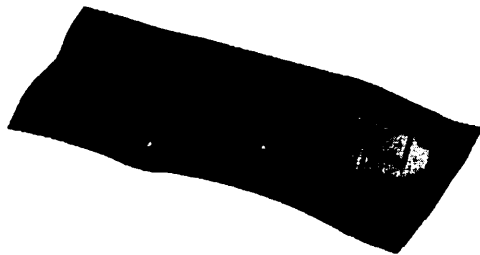


Forming Limit Diagram

(c)Forming Limit Diagram

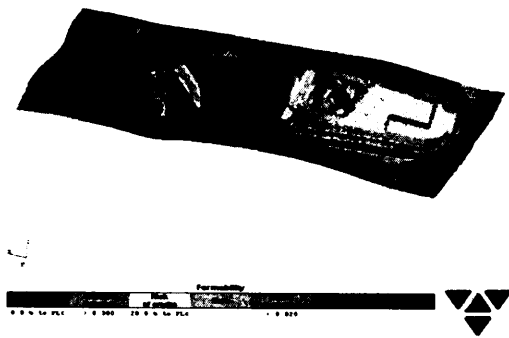
Fig. 6. Cushion stroke - 60

Fig. 6에서 볼 때 A구간과 C구간의 주름경향은 스트로크 40에서 보다 안정적으로 나타나고 있으나, B구간의 파단률은 더 커진 것을 확인할 수 있다. 또한 전반적인 두께 감소율은 크게 변화하지 않고 있음을 볼 수 있다.

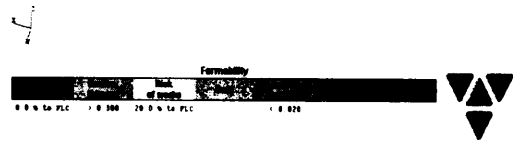
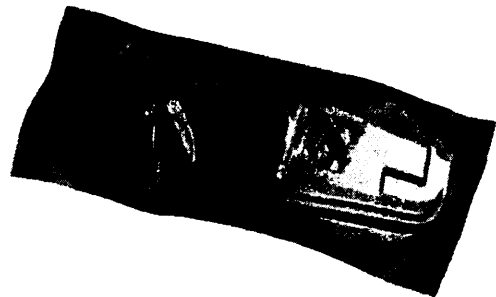


(a)Wrinkles tendency distribution and Crack

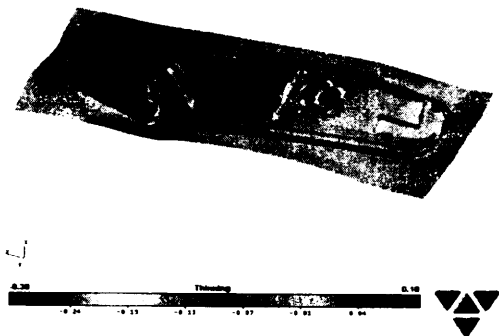
Fig. 7에서 볼 때 쿠션스트로크 40일 때보다 A구간과 C구간의 주름은 다소 양호해 졌으나, 역시 B구간에서의 파단 상태는 더욱 악화된 것을 확인할 수 있다.



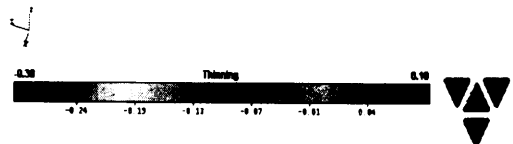
(a) Wrinkles tendency distribution and Crack



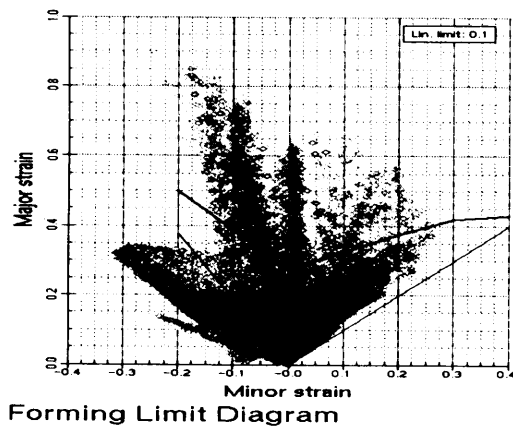
(a) Wrinkles tendency distribution and Crack



(b) The thickness reduction rate

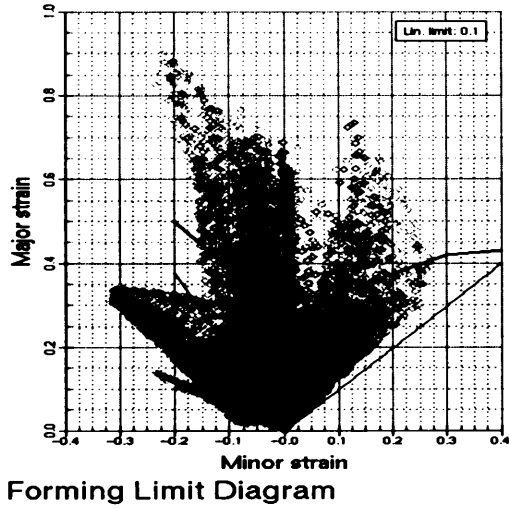


(b) The thickness reduction rate



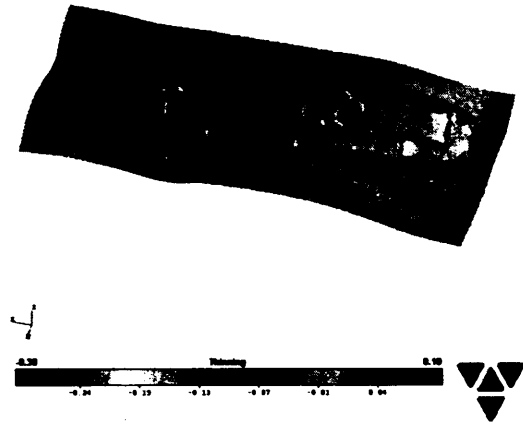
(c) Forming Limit Diagram

Fig. 7. Cushion stroke - 80



Forming Limit Diagram

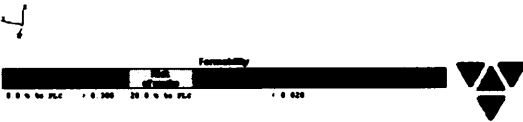
(c)Forming Limit Diagram



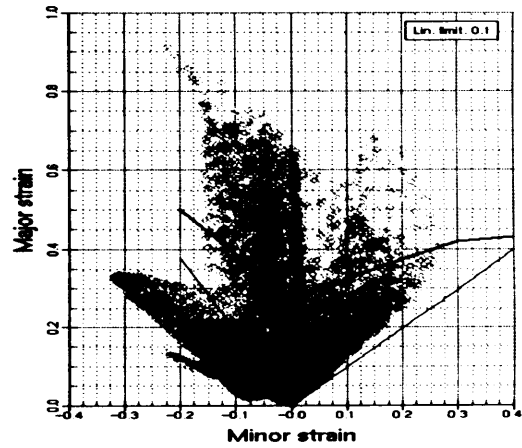
(b)The thickness reduction rate

Fig. 8. Cushion stroke - 100

Fig. 8에서 볼 때 각 구역의 주름 경향이 완화되지 않음을 볼 수 있으며, 파단 상태 또한 좋아지지 않음을 알 수 있다.



(a)Wrinkles tendency distribution and Crack



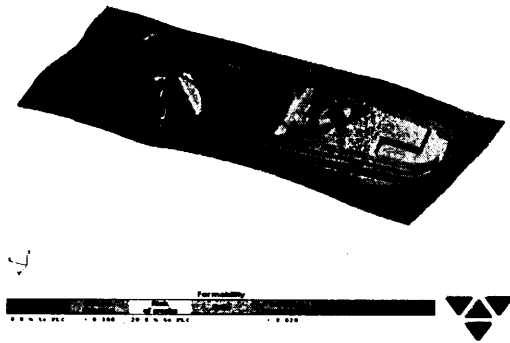
Forming Limit Diagram

(c)Forming Limit Diagram

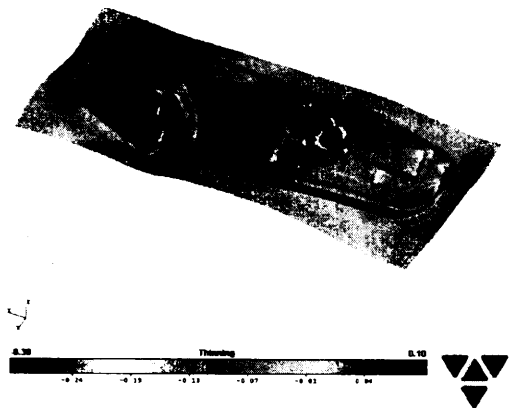
Fig. 9. Cushion stroke - 120

Fig. 9에서 볼 때 쿠션스트로크 40 / 60 / 80 / 100과 비교하여 각 구역의 주름경이 크게 완화되어 있음을 확인 할 수 있다.

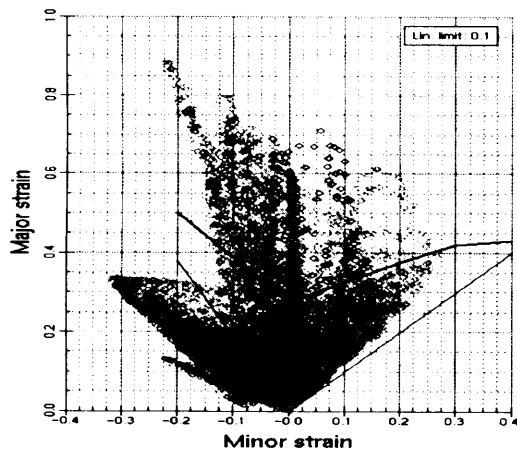
또한 B구간의 파단 상태는 40일 때에 비하여는 다소 불량해 졌으나 그 외 값에 비하여는 완화되어있음을 확인 할 수 있다.



(a) Wrinkles tendency distribution and Crack



(b) The thickness reduction rate



(c) Forming Limit Diagram

Fig. 10. Cushion stroke - 140

Fig. 10에서 볼 때 쿠션스트로크 120일 때 보다 A와 C구역의 주름경향이 다소 불량해 지고 있으며, 파단 또한 좋아지고 있지 않음을 볼 수 있다.

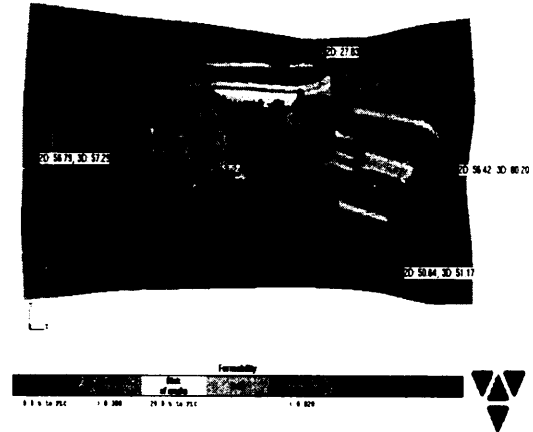


Fig. 11. After formation completing influx condition of material (cushion stroke-40)

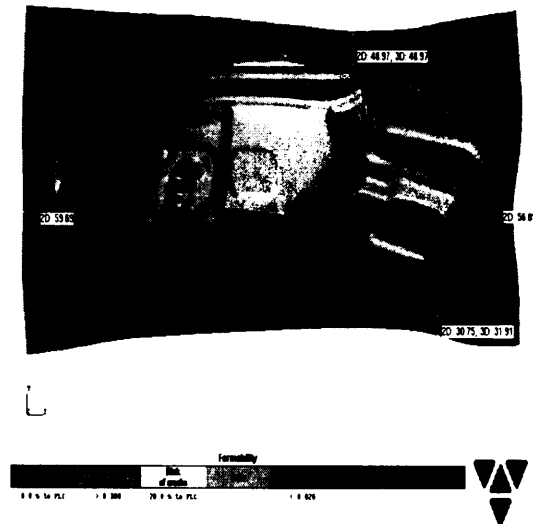


Fig. 12. After formation completing influx condition of material (cushion stroke-140)

Fig. 11과 12는 본 실험에서 쿠션스트로크의 값 증 최저와 최상 상태에서의 재료의 유입 상태를 보여주고 있다.



#### IV. 결론

본 연구에서 SPCC\_DWMC 판넬을 유한요소해석 함에 있어 기존의 해석 방향과 달리 쿠션스트로크 변화에 따른 성형성에 대하여 해석하여 보았으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

[1].입력조건에서 Cushion stroke를 증가시킬수록 주름 경향이 점차 좋아지다 140입력에서 다시 주름 경향이 불량해 짐을 알 수 있다.

[2].전체의 해석결과 중 주름 발생 경향을 볼 때 스트로크가 증가할수록 재료의 유입이 많아지면 전반적으로 스트레칭 상태가 불량하여 제품 내부에 주름이 많아짐을 확인 할 수 있었다.

[3].이러한 문제점 해결을 위해서 쿠션스트로크를 조절하여 소재의 자중 처짐 현상을 적정하게 만들어 주어 Bead를 넘어 들어오는 소재의 폭을 알맞게 만들어 주면 문제점을 해결 해 볼 수 있음을 알 수 있었다.

[4].입력조건에서 쿠션스트로크를 증가 시킬수록 크랙 발생이 점차 증가함을 알 수 있었다.

종합적으로 성형해석결과를 볼 때 쿠션스트로크가 성형성에 직접적인 영향을 미치고 있음을 알 수 있었으며, 스트레칭 불량 등으로 발생하는 주름 및 파단의 문제를 해결하기위해 Cushion Stroke를 조절하여 소재 및 성형품에 가장 알맞은 스트로크 양을 결정하여야 함을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

- [1]D. Y. Yang., D. W. Jung., I. S. Song., D. J. Yoo. and J. H. Lee., 1995, Comparative investigation into implicit, explicit and iterative implicit/explicit, schemes for the simulation of sheet-metal forming process, J. Materials Processing Technology, vol. 50, pp39-53
- [2] D. W. Jung., D. J. Yoo., and D. Y. Yang., 1995, A dynamic explicit/rigid-plastic finite element formulation and its application to sheet metal forming processes, Engineering Computations, vol.12, pp.707-722
- [3] 이재석, 1999, 가상실험기술, 충북대학교 건설기술 연구소, pp.4-5
- [4] H. B. Shim., D. Y. Yang., 1990, An Elastic-Plastic Finite Element Analysis on Hydrostatic Bulging of Rectangular Diaphragms by using Layered Degenerated Shell Element, Int. J. Mech. SDI., Vol. 32, pp.49-64
- [5] N. M. Wang., S. C. Tang., 1988, Analysis of Bending Effects in Sheet Forming Operations, Int. J. for Num. Mech. in Engng., voi.25, pp.253-367
- [6] K. Mattiason., 1985, Numerical Simulation of Stretching Processes, SIMOP-I, Editor Lange. K., Proc. of the 1. Int. Workshop, Stuttgart, pp.170-213
- [7] A first study of developing stamping die of REF SILL OTR-R/L auto-body panel stamping processes, Dong-Won Jung, Jae-Sin Hwang and Hyun-Gil Ahn, Reprinted from Bulletin of the Marine and Environmental Research Institute Vol.28 No. 1 Cheju National University Jeju, Korea, June 2004