

판재성형 해석시 금형내의 공기거동 모델링

최광용¹ · 김현영[#]

Modeling the Behavior of Trapped Air in Die Cavity During Sheet Metal Forming

Kwang Yong Choi, Heon Young Kim

(Received July 6, 2011 / Revised July 20, 2011 / Accepted July 21, 2011)

Abstract

During stamping processes, the air trapped between sheet metal and the die cavity can be highly compressed and ultimately reduce the shape accuracy of formed panels. To prevent this problem, vent holes and passages are sometimes drilled into the based on expert experience and know-how. CAE can be also used for analyzing the air behavior in die cavity during stamping process, incorporating both elasto-plastic behavior of sheet metal and the fluid dynamic behavior of air. This study presents sheet metal forming simulation combined simultaneously with simulation of air behavior in the die cavity. There are three approaches in modeling of air behavior. One is a simple assumption of the bulk modulus having a constant pressure depending on volume change. The next is the use of the ideal gas law having uniform pressure and temperature in air domain. The third is FPM (Finite point method) having non-uniform pressure in air domain. This approach enables direct coupling of mechanical behavior of solid sheet metal and the fluid behavior of air in sheet metal forming simulation, and its result provides the first-hand idea for the location, size and number of the vent holes. In this study, commercial software, PAM-STAMPTM and PAM-SAFETM, were used.

Key Words : Sheet Metal Forming Simulation, Die Cavity, Bulk Modulus, Ideal Gas Law, FPM(Finite Point Method)

1. 서 론

21C 무한 산업 경쟁속에서 자동차, 전자산업의 판재 부품을 위한 프레스성형은 제품을 대량으로 생산할 수 있는 가장 경제적이고, 핵심적인 기술로써 인식되고 있다. 이를 위해 많은 기업체와 학교 및 연구소는 프레스 판재성형기술 개발을 위하여 많은 시간과 비용을 투자하고 있고, 금형설계 및 가공, 생산기술 분야에 있어서는 괄목할만한 기술개발을 이루었다[1~3]. 이런 프레스 판재성형기술 개발에 있어 컴퓨터를 이용한 유한요소법(Finite element method, FEM)은 그 정점

에 있다.

유한요소법은 시간적분법에 따라 내연적(Implicit) 방법과 외연적(Explicit) 방법으로 구분된다. 실제 산업모델과 같이 수십만~수백만 요소로 구성된 판재성형은 내연적방법으로는 해를 구하기가 어렵고, 외연적방법을 사용한다. 프레스 판재성형에서 내연적방법은 정적인 문제인 자중에 의한 처짐해석과 스프링백해석에 사용된다[4].

1990년대 초반부터 국내에서도 유한요소법을 이용한 판재성형 해석기술을 도입하여, 공법, 금형설계 및 시험(Try-out) 단계에서 파단, 주름에 대한 성형성 평가로 개발기간 단축, 비용 절감, 질적

1. 강원대학교 기계의용공학과
교신저자: 강원대학교 기계의용공학과,
E-mail:khy@kangwon.ac.kr

향상 등 많은 성과를 내고 있다. 2000년대 중반부터는 치수 정밀도를 높이기 위한 스프링백에 대한 평가 및 제어를 위한 금형 보정 기술 등을 적용하고 있다[5].

이와 같이 지난 20년간 유한요소법을 이용한 판재 성형해석은 괄목할만한 성과를 내고 있으나, 판재 성형 해석시 다이 캐비티(Die Cavity)내의 공기는 체적 감소로 압력이 발생되어, 프레스 성형압 상승 및 취출시 압축된 공기의 반력에 의한 변형을 유발할 수 있음에도 이를 고려한 해석기술은 전무한 실정이다. 이것은 판재성형시 판재의 기계적 거동과 공기의 유체적 거동을 동시에 고려한 해석을 진행하기가 어렵기 때문이다. 이에 정성윤[6]등은 판재성형 해석시 판재의 변형과 금형 캐비티와의 체적을 계산하여 작업자가 에어벤트홀(Air Vent Hole)의 크기 및 개수를 판단할 수 있는 프로그램을 개발하였고, 황세준[7]은 체적변화에 따른 여러 조건에서의 에어 포켓(Air Pocket) 내부 압력변화 및 유출계수를 계산하였다.

본 연구는 프레스 판재성형 해석시 공기 거동을 고려한 모델링 기법과 각 공기 모델링 기법이 판재 변형에 미치는 영향을 분석하였다. 외연적 유한 요소프로그램에서 공기 거동 모델링은 3가지로 모사할 수 있다. 체적탄성계수(Bulk Modulus)를 이용한 공기 모델링, 균일 압력의 이상기체 공기 모델링, FPM(Finite Point Method)을 이용한 불균일 압력의 이상기체 공기 모델링 등이다. 체적탄성계수는 판재 및 판재를 이용한 액압성형시 작동유체를 표현하는데 사용 될 수 있다. 김현영[8~9]은 유체의 체적탄성계수를 이용하여 액압공정에 대한 성형해석을 수행하였다. 알루미늄 튜브의 열간가스 성형해석에서는 물이 아닌 공기를 이용한 액압공정 성형해석을 수행하여 제품을 개발하였다. 이상기체방정식을 이용한 공기 거동 표현은 자동차 충돌시의 운전자와 탑승자의 상해를 보호하는 에어백(Airbag)의 전개(Deployment) 거동 수치해석에 주로 사용된다. 김현영[10]은 승용차 운전석 및 조수석 에어백 단품에 대한 유한요소 모델링 기법을 제시하였으며, 실험과의 비교를 통해 수치해석과 잘 일치함을 검증하였다. 1996년 E. Onate[11~12]에 의하여 제안된 FPM은 유체 유동에 대하여 가중잔여법(Weighted least square)을 이용하여 점과 이를 공유하는 점들의 근사 적분방법으로 대류 수송(Convective transport)문제의 편미

분방정식의 해를 구하였고, 또한 이류 확산 수송(Advective-diffusive transport)의 유체 유동 문제에 적용하였다. 또한 FPM을 고체 구조물의 구조강도 해석을 할 수 있는 탄성모델이 E. Onate[13]에 의하여 개발되기도 하였다. 빔(Beam) 모델과 중간에 구멍을 가지고 있는 사각 박스에 대한 응력해석을 수행하여 FEM 및 실험과 비교하여 거의 비슷한 결과를 얻었다. M. Alizadeh[14]은 FPM을 이용하여 연속구조의 열전달과 미소편석(Microsegregation)의 연계해석을 수행하였다. 이와 같이 FPM은 유체 유동으로부터 시작하여 점차 탄성체, 주조로 영역을 넓혀가고 있다. 외연적 유한요소프로그램에서의 공기 유동을 위한 FPM 응용은 2000년대 초반부터 적용이 되었다. J. Kuhnert[15~16]는 특성 해석(Characteristic analysis)을 이용한 FPM을 사용하여 압축성유체에 대한 이론을 제시하였고, A.Tramecon[17]은 이를 상용화한 에어백을 개발하였다. E.Gai[18]은 FPM을 이용하여 측면 충돌시 운전자를 보호하는 측면 커튼 에어백 전개해석을 수행하였고, Honglu[19]은 상용프로그램의 이상기체방정식과 FPM을 이용하여 에어백의 전개해석을 수행하여 변형양상, 계산된 압력 등을 실험과 비교하였다.

본 연구를 위해 판재성형 전용 외연적 상용프로그램인 PAM-STAMP™와 차량 충돌시 운전자를 보호하는 에어백의 전개(Deployment)를 위한 충돌 안전도해석 전용 외연적 상용프로그램인 PAM-SAFE™를 사용하였다. 판재성형시 공기 거동을 고려한 연계해석(Coupling analysis)은 성형성, 성형력, 외관 품질 평가 및 에어벤트홀의 위치 및 크기, 갯수 등의 선정에 유용한 정보를 제공할 수 있다.

2. 공기 거동 모델링

2.1 체적탄성계수를 이용한 모델링

체적탄성계수(Bulk modulus)은 어떤 물체에 등방성(Isotropic) 압축력이 가해졌을 때, 압축되지 않으려고 저항하는 정도를 나타내는 값이며 부피탄성율이라고도 한다. Fig. 1과 같이 밀폐된 공기 영역(Domain)에서 공기가 단열과정(Adiabatic process)에 따라 수축 또는 팽창하고 공기의 유입과 배출이 없으며 공기 영역내의 압력이 일정하다고 가정하면, 공기 영역의 체적 변화와 공기의 압력은 다음 식(1)과 같다. 이 모델링 방법은 액압성형시

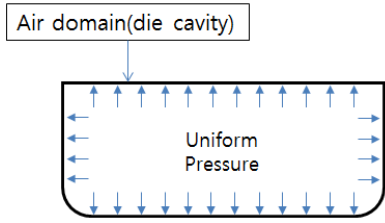


Fig. 1 Schematic illustration of uniform pressure by bulk modulus

관재 및 관재의 소성변형을 유발하는 작동유체의 특성 표현에 주로 사용된다.

$$\Delta p = B \times \left(-\frac{\Delta V}{V} \right) \quad (1)$$

여기서 Δp 는 공기 영역 내에 발생된 작용 압력이며, B 는 유체의 체적탄성계수, V 와 ΔV 는 초기 체적과 체적 변화이다.

2.2 이상기체방정식을 이용한 모델링

이상기체(Ideal gas)는 계(System)를 구성하는 입자의 부피가 거의 0이고 입자간 상호 작용이 거의 없어 분자간 위치에너지가 중요하지 않으며 분자간 충돌이 완전 탄성충돌인 가상의 기체를 의미한다. 이상기체방정식(Ideal gas equation)은 이상기체의 압력, 부피, 온도간의 상관관계를 기술하는 방정식이며, 식(2)와 같이 표현된다.

$$pV = mRT \quad (2)$$

여기서 p 는 압력, V 는 체적, m 은 기체의 질량, R 은 기체상수(8.3142J/mol·K), T 는 온도이다. Fig. 2와 같이 공기의 유입과 배출이 있고 공기 영역내의 압력이 일정하며, 공기영역이 외부와 단열된 시스템에서 공기의 밀도는 식(3)~(5)와 같이 질량, 운동량, 에너지보존의 법칙을 이용하여 계산할 수 있고 공기의 부피와 압력의 관계식은 앞서 제시한 이상기체 방정식을 이용하여 계산할 수 있다.

(1) 질량보존의 법칙

$$\frac{d}{dt}(\rho) + \rho \cdot \nabla^T v = 0 \quad (3)$$

(2) 운동량 보존의 법칙

$$\frac{d}{dt}(\rho v) + (\rho v) \cdot \nabla^T v = -\nabla p \quad (4)$$

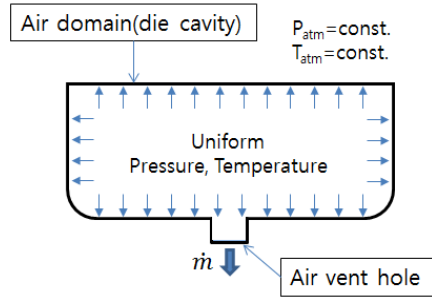


Fig. 2 Schematic illustration of uniform pressure by ideal gas equation

(3) 에너지보존의 법칙

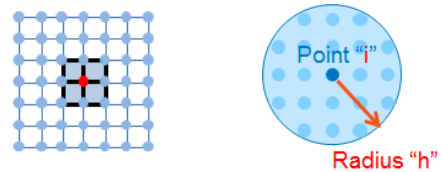
$$\frac{d}{dt}(\rho E) + (\rho E) \cdot \nabla^T v = -\nabla(\rho v) \quad (5)$$

여기서, ρ 는 밀도, v 는 속도 벡터, E 는 단위 질량당 에너지, ∇ 는 변화벡터(Gradient vector), p 는 압력이다.

이 모델링 방법은 차량 충돌 해석에서 에어백을 단순하게 모델링 할 때 주로 사용된다.

2.3 FPM을 이용한 이상기체방정식 모델링

유한요소법에서는 Fig. 3(a)와 같이 절점과 절점이 요소(격자)로 연결되어야 하고 요소 내에서 물리 방정식이 구성되는 반면에, FPM에서는 격자(Mesh)를 사용하지 않고 점(Point)들로 구성된다. 각 점들은 밀도, 속도와 같은 물리량을 가지고 있다. 물리 방정식이나 상태 방정식들은 Fig. 3(b)와 같이 스무딩 길이(Smoothing length) 내에 속한 점들의 물리량들을 MLS근사법으로 근사하여 계산된다.



(a) FEM (b) FPM
Fig. 3 FEM mesh and FPM point

Fig. 4와 같이 FPM을 이용하면, 공기 영역 내의 공기 유동을 유동방정식을 이용하여 풀 수 있기 때문에 공기 영역 내의 균일하지 않은 압력과 에어벤트홀의 위치에 따른 변화 등을 상세히 해석

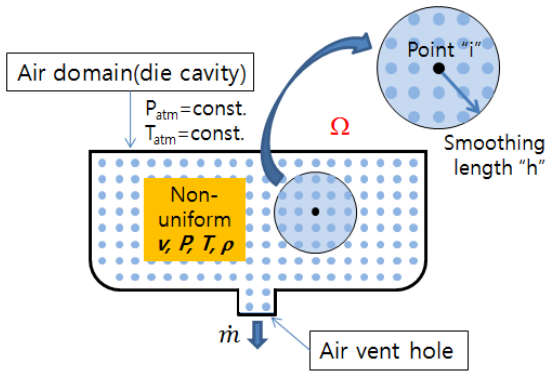


Fig. 4 Schematic illustration of pressure load by FPM

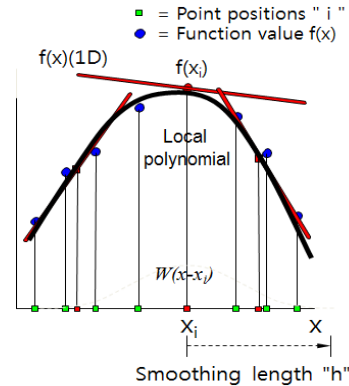


Fig. 5 Moving least square method

Table 1 Comparison of air behavior modeling

	Bulk Modulus	Ideal gas	FPM
Pressure Law	$\Delta P = \beta \times (-\frac{\Delta V}{V})$	$pV = mRT$	$pV = mRT$
Solver	PAM-STAMP™	PAM-SAFE™	PAM-SAFE™
Options	C.F. + fluid cell	C.F. + airbag	C.F. + FPM
Air vent hole	×	Local outlet	Local outlet
AVH Variables	×	Size Number	Size Number Position
Cal. Time (vs. C.F.)	little slow	little slow	very slow

할 수 있다.

Table 1은 앞서 제시한 세가지 방법들을 비교한 표이다. 여기서 C.F.(Conventional Forming)는 공기 거동을 고려하지 않은 전형적인 관재성형을 의미한다. 체적탄성계수 방법은 에어벤트홀을 통한 공기 배출을 모사할 수 없다는 단점이 있고, 이상기 체방법은 에어벤트홀이 전체 면적으로만 모델링되기 때문에 에어벤트홀의 전체 면적이 동일하다면, 각 에어벤트홀의 개수, 크기 및 위치에 의한 변화를 예측할 수 없다는 한계가 있다. 반면에, FPM을 이용한 모델링은 이러한 한계가 전혀 없이 정확한 해석이 가능하다는 장점이 있으나, 다른 방법들에 비해 매우 느리다는 단점이 있다.

3. FPM 정식화

FPM에서는 Fig. 4와 같이 공기 영역 Ω 이 N개의

점(Point)으로 표현된다. 각 점들은 점의 위치, 속도, 질량 등의 물리량에 대한 정보를 가지고 있다. 각 점의 물리량들은 불연속(Discrete)이다. 따라서 공기 유동에 대한 전체 시스템을 풀기 위해서는 각 점들의 물리량들을 식(6)과 같이 보간(interpolation)을 통해 근사(approximation)된 연속함수로 표현되어야 한다.

$$u(x) = \sum_{i=1}^n \Phi_i(x)u_i \quad (6)$$

여기서, ϕ 는 형상함수(Shape function)이다. 공기 유동의 변화에 적절히 대응하기 위해, FPM에서는 d차 다항 함수가 근사함수로 사용된다. 즉 점 x에서의 d차 다항 함수인 근사 함수 $\Pi f(x)$ 는 식(7)과 같이 표현된다. 이 때, 차수 d와 식 (7)의 계수들은 이동최소자승법(MLS, Moving least square method)을 이용하여 근사함수와 원 물리량 사이의 오차가 식(8)과 같이 최소화되도록 설정된다. 이러한 과정을 도식적으로 나타낸 그림이 Fig. 5이다.

$$\Pi f(x) \equiv p_d(x, x_j) = \sum_{k=0}^d c_k (x - x_j)^k \quad (7)$$

$$\sum W^2(x - x_j) \cdot (f_j - p_d(x, x_j))^2 = \text{minimize} \quad (8)$$

여기서 $W^2(x - x_j)$ 는 가중치(Weight)항이고, $(f_j - p_d(x, x_j))^2$ 는 오차(Error)항이다.

4. 이론적 검증(Verification)

2절에서 언급한 공기 거동 모델링에 대하여 이론적인 방법과 성형해석 결과를 비교 분석하였다.

검증을 위한 모델은 100×100×100의 사각 박스 형상을 이용하였다. 이론적 계산의 편의를 위해 x, y 축 방향은 고정이고, -z방향으로 50% 압축하였을 때의 내부 공기의 압력변화와 온도를 비교하였다

4.1 체적탄성계수를 이용한 이론적 결과

공기의 체적탄성계수는 0.000142GPa이고 체적이 50% 압축일 경우의 공기 도메인내의 압력변화는 식(1)로부터 0.000071GPa이 발생되었다.

4.2 이상기체방정식의 이론적 결과

이상기체방정식에 단열압축 과정을 적용하면 온도와 체적과의 관계는 식(9)와 같이 비열비 k로 표현할 수 있으며, 이상기체방정식 (2)는 (10)과 같이 압력과 체적, 비열비 k의 형태로 나타낼 수 있다. 공기의 비열비 k는 정압비열(c_p)와 정적비열(c_v)의 비로 1.4이다.

$$T_1 V_1^{k-1} = T_2 V_2^{k-1} \quad (9)$$

$$\rho_1 V_1^k = \rho_2 V_2^k \quad (10)$$

식(9)와 (10)으로부터 T₂는 395.8K이고, p₂는 0.000161GPa이다.

4.3 성형해석 결과

성형해석도 이론적 계산 방법과 같이 체적탄성계수와 이상기체방정식을 이용하여 50% 단열압축과정을 적용하였다. Fig. 6은 체적탄성계수와 이상기체방정식, FPM 공기모델링 사용시의 압력 변화 곡선이다. 체적탄성계수의 이용시 압력변화는 식(1)과 같이 공기 압축량에 비례하여 선형적으로 증가한 것에 반해, 이상기체방정식과 FPM은 비선형으로 증가함을 알 수 있다. Fig. 7은 이상기체방정식과 FPM 모델링을 사용했을 경우의 온도 변화 곡선이다.

FPM은 공기의 압력 및 온도가 공기 도메인 내 각 위치에 따라 균일하지 않지만 이상기체방정식과의 상대적 비교를 위하여 평균 압력 및 온도를 사용하였다.

Table 2는 이론적인 계산과 성형해석과의 결과를 비교하였다. 식 (10)으로부터 계산된 압력은 대기압을 포함하고 있으므로 p₂에서 대기압 0.000101GPa을 제한 0.000166GPa이 실제 판재에 작용되는 압축응력이다. 이론적인 계산값과 해석값이 잘 일치함을 알 수 있다.

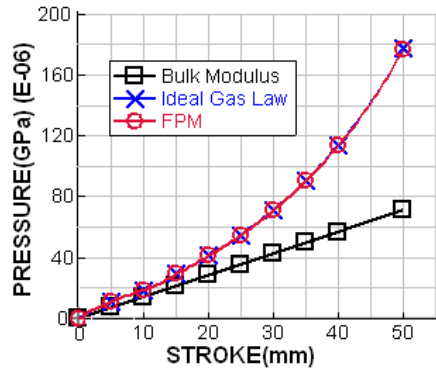


Fig. 6 Pressure curve due to air modeling

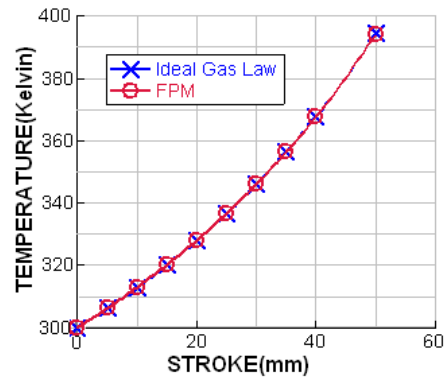


Fig. 7 Temperature curve due to air modeling

Table 2 Comparison of analytical and simulation result (50% compression)

		Bulk Modulus	Ideal gas	FPM
Pressure (GPa)	Analytical	0.000071	0.000161	×
	Simulation	0.000071	0.000177	0.000177
Temperature (K)	Analytical	×	395.8	×
	Simulation	×	394.2	394.2

5. 성형해석

5.1 해석 모델

공기 거동을 고려한 판재성형 해석을 위하여 Fig. 8(a)와 같이 판재 크기 370mm×480mm의 복동 프레스(Double action press)의 유한요소 모델을 구성하였다. 판재의 최소 요소 크기는 2mm이며 45046개의

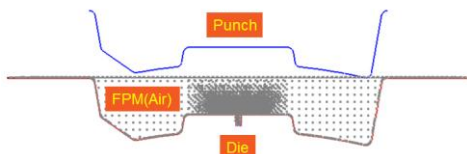
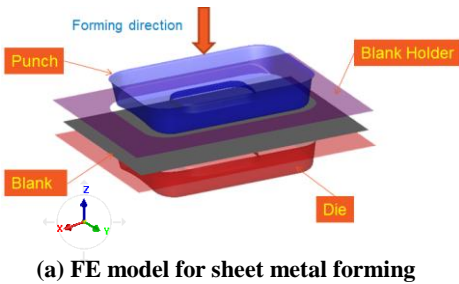


Fig. 8 FE model and section view

Table 3 Material properties of blank sheet

Young's Modulus(GPa)	210
Poisson's ratio	0.3
Density(Kg/mm3)	7.8E-06
Anisotropy Behavior($r_0/r_{45}/r_{90}$)	1.85/1.37/2.02
Hardening curve($K/\epsilon_0/n$)	0.58/0.0079/0.23

Table 4 Air gas properties

Bulk modulus(GPa)	0.000142
Temperature(K)	300
Universal Gas Constant	8.31441
Molecular Weight(kg/mole)	0.02897
Specific heat (kN·mm/K·mole)	28.11

Table 5 Process conditions

Termination time(ms)	58
Punch stroke(mm)	58
Friction coefficient	0.15
Blank Holding Force(kN)	100

요소로 구성하였다. 8(b)는 FPM을 이용한 성형 해석 모델 중심에서의 YZ 방향 단면도이며, 에어벤트홀 근처는 상태변화가 심하므로 조밀한 점으로 구성하였다. FPM에서의 점은 점들간의 전체 간격과 국부적 간격으로 정의할 수 있다. 실제 에어벤트홀의 위치는 판재의 외관에 영향을 주지 않고 공기의 배출과 유입을 원활히 할 수 있는 위치에

설치하나, 본 연구에서는 다이부 중앙에 1개, 좌우 상하측에 4개로 각각 5 ϕ 로 임의로 설계하였다.

판재는 SPCD 0.5t로 Table 3과 같은 기계적 물성을 사용하였으며, 공기는 Table 4와 같은 기체적 물성을 사용하였다. 성형해석은 전형적인 판재성형 해석과 공기거동을 고려한 체적탄성계수, 에어벤트홀을 고려하지 않은 이상기체방정식, 에어벤트홀을 고려한 이상기체방정식과 FPM 기법 등 5가지 방법을 이용하여 판재성형 해석을 수행하였다. Table 5는 성형해석에서 사용된 공정조건이다. 공기의 실제 모사를 위하여 1m/s의 속도를 사용하여 상대 평가하였다.

5.2 해석 결과

최종 펀치 이송거리를 0으로 기준하였을 때, Fig. 9 (a)~(e)는 -36mm전의 결과이고, Fig. 10(a)~(e)는 -10mm전의 단면에서의 변형 형상을 보여주고 있다. 펀치와 판재, 다이 중심부와 판재의 접촉 시점은 거의 비슷하나 공기 거동의 고려 유무에 따라 판재의 변형된 형상이 서로 다를 수 있다. Fig. 10(b)의 체적탄성계수의 사용과 10(c)의 이상기체방정식의 경우 공기의 배출을 모사하지 않았으므로 공기의 배출을 고려한 이상기체방정식의 10(d), FPM의 10(e)와 비교했을 때 상대적으로 많은 압력 저항을 모사하여 다이 하단부의 중심부에서 볼록(Bulge) 효과와 같은 결과를 얻었다.

Fig. 11(a)~(b)는 펀치의 최종 이송거리 -2mm 전의 결과를 보여주고 있다. 공기 거동을 고려하지 않은 전형적인 판재성형은 Fig.11(a)와 같이 성형중에 빨간색 점선의 원과 같이 주름이 발생함을 알 수 있고, FPM의 11(b)는 공기 압력 저항으로 주름이 발생하지는 않았다. 이것은 다이 캐비티내의 공기의 압축에 의한 압력이 주름이 발생하는 것을 제어하였다. 체적탄성계수와 이상기체를 이용한 결과 11(b)와 공기 압축 압력에 의하여 주름이 발생되지 않았다.

Fig. 12(a)~(b)는 최종 성형후의 변형률을 보여주고 있다. 전형적인 판재성형 11(a)는 최소 -0.147이고 최대는 0.317이다. FPM을 이용한 성형해석 12(b)는 최소 -0.136, 최대는 0.318이다. 이것은 공기 압축에 의한 압력 저항이 판재와 블랭크 홀더 면에서는 두께 방향으로의 가압 효과로 마찰력이 증가하여 판재 유입에 영향을 주었다. 결과적으로 공기 거동을 고려한 성형해석의 플랜지면에서의 판재는 유입이 상대적으로 적어지고 두께가 두꺼워

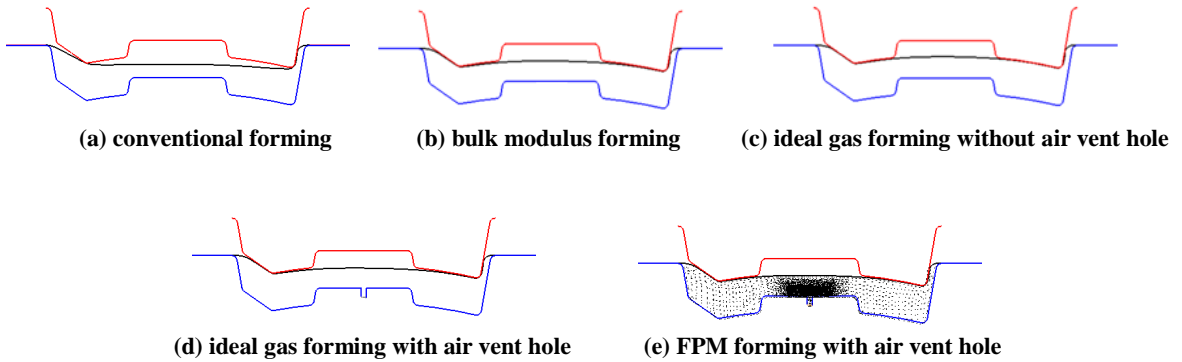


Fig. 9 Deformed shapes at stroke -36mm

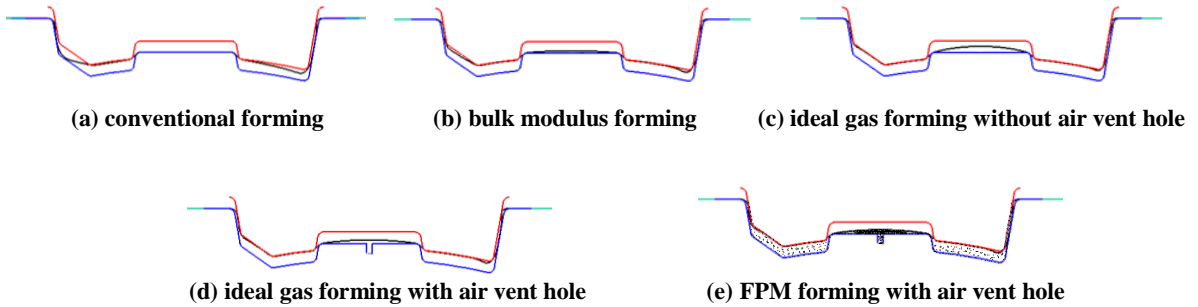


Fig.10 Deformed shapes at stroke -10mm

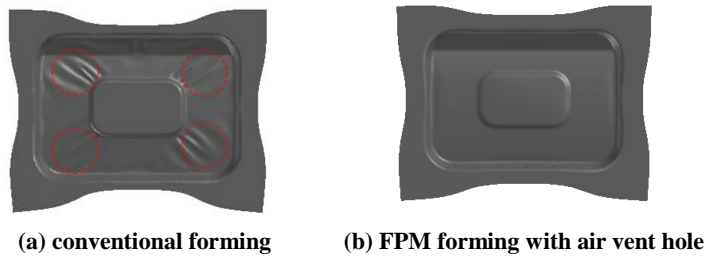


Fig.11 Deformed shape at stroke -2mm

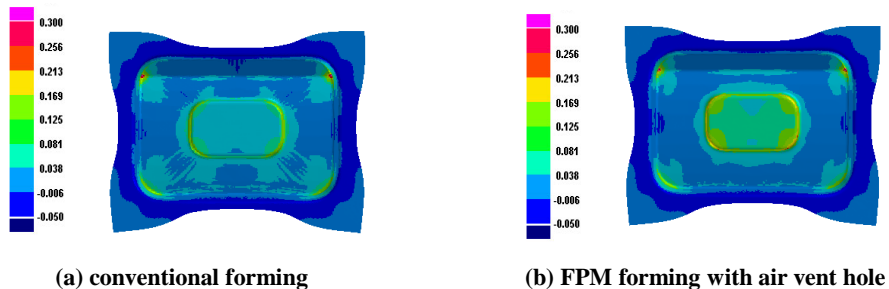


Fig.12 Thinning distribution after forming

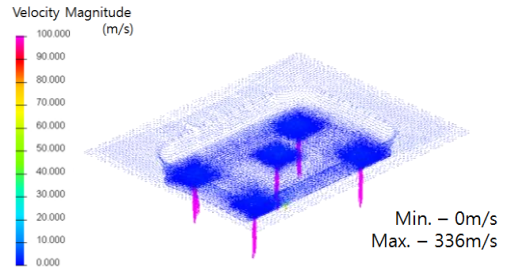
Table 6 Thinning distribution

	Minimum	Maximum
Conventional forming	-0.147	0.317
Bulk modulus	-0.142	0.313
Ideal gas without AVH	-0.118	0.486
Ideal gas with AVH	-0.134	0.317
FPM with AVH	-0.116	0.318

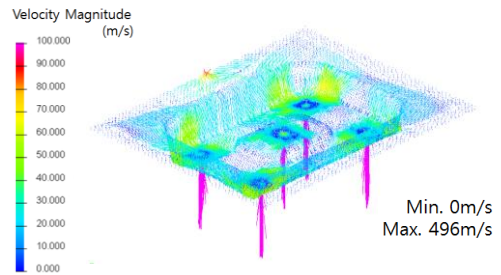
지는 것을 제어하였다. 이것은 실제 블랭크홀딩힘 (Blank Holding Force)이 커지면 플랜지면의 두께가 두꺼워지는것은 방지하고 유입을 적게하는 것과 일맥상통한다. 펀치면에서는 반대로 공기의 압축력에 의한 벌지 효과에 의하여 공기를 고려하지 않은 전형적인 판재성형 조건보다는 두께 감소를 증가에 영향을 주었기 때문이다. Table 6은 공기거동 모델링 기법에 따른 두께 변형을 분포를 보여주고 있다.

Fig. 13(a),(b)는 FPM을 사용하였을 때 각각 최종 이송거리 -28mm전과 0에서의 공기의 속도 크기를 보여주고 있고, 최종 스트로크 0에서 최대 496m/s이다.

Fig. 14는 펀치에서 측정된 접촉력(Contact force)이다. 공기를 고려하지 않은 전형적인 판재성형은 33ton 정도 예측된다. 반면 공기 저항에 의한 압력표현을 위한 체적탄성계수를 사용하였을 때는 48ton이 발생하였다. 공기와 같이 압축 성이 심한 기체의 경우는 압축정도에 따라 공기압력이 비선형적으로 증가하지만, 체적탄성계수 사용시의 압력변화는 체적탄성계수와 체적변화율과의 선형관계로 실제보다 작은 압력변화가 발생되었다. 에어벤트홀을 고려하지 않은 이상기체방정식을 적용한 성형해석의 경우는 공기의 압축과 온도상승에 의한 압력증가로 펀치와의 접촉력이 최대 310ton이 발생하였다. 이는 공기저항이 접촉력에 얼마만큼 영향을 주는지 수치적으로 예측할 수 있다. 또한 에어벤트홀을 고려한 이상기체방정식과 FPM을 사용하였을 때는 성형중의 공기 배출로 인하여 각각 76ton과 81ton이 예상된다. 이는 에어벤트홀이 충분하지 않아 공기저항에 따른 접촉력의 상승을 유발하였으며, 충분히 공기가 배출되도록 에어벤트홀의 위치 및 개수의 조정이 필요함을 해석적으로 검증할 수 있다. Table 7은 공기 모델링에 따른 펀치 접촉힘의 최대값을 보여주고 있다.



(a) at stroke -28mm



(b) at final stroke 0

Fig.13 Velocity magnitude of air

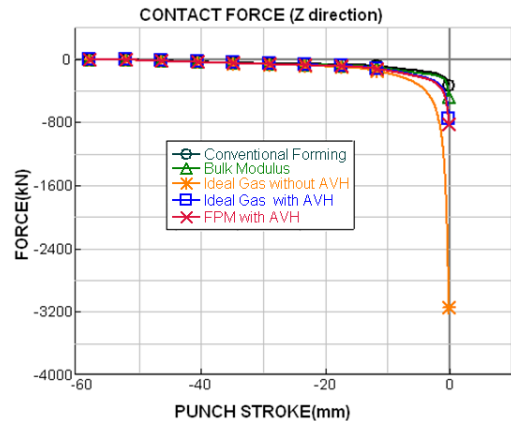


Fig.14 Contact force on Punch

Table 7 Contact force calculation

	Max. Force(KN)
Conventional forming	33
Bulk modulus	48
Ideal gas without AVH	310
Ideal gas with AVH	76
FPM with AVH	81

6. 결 론

판재성형 해석시 프레스내의 공기 거동을 위한 체적탄성계수, 이상기체방정식, FPM 모델링을 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 금형내의 공기거동을 고려한 판재성형해석은 공기의 압축에 따라 판재 유입형상, 주름 및 펀치 접촉 힘 등에 영향을 미치므로, 성형성 평가 측면에서 새로운 방법으로 접근 할 수 있다.

(2) 체적탄성계수를 이용한 공기 거동 모델링은 압력변화가 체적변화에 비례하여 선형적으로 증가하므로 판재성형시의 공기 거동 표현으로는 적합하지 않다. 실제 압력은 체적변화에 비례하여 비선형적으로 증가한다.

(3) 이상기체방정식을 이용한 공기거동 모델링은 공기도메인내의 압력이 균일하므로 에어벤트홀의 크기 및 개수를 고려할 수는 있지만, 위치에 따른 영향은 분석하지 못하는 단점이 있다.

(4) FPM은 실제 공기 유동 방정식으로 구성되어 있으므로 에어벤트홀의 크기, 개수와 위치에 대한 수치적 검증 평가가 가능하다. 반면에 다른 공기 모델링 기법에 비하여 해석 시간이 많이 걸린다는 단점이 있다.

본 연구는 간이 금형에 대한 공기거동모델의 적용 및 평가이었으므로, 향후 실 판넬의 판재성형시 공기거동이 판재성형에 미치는 영향의 평가 및 비교와 FPM 사용시 해석시간 단축을 위한 수치적 변수 연구(Parametric Study)가 요구된다.

참 고 문 헌

[1] H. J. Kim, B. H. Jeon, H. Y. Km, J. J. Kim, 1993, Finite element analysis liquid bulge forming process of T-shaped pipe by an explicit code, *Advanced Technology of Plasticity*, pp.545~550.

[2] H. Y. Kim, Y. S. Shin, K. H. Kim, Won Seok Cho, 1998, Stamping Analysis and Die Design of laser Welded Automotive Body, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 7, No. 4, pp. 382~392.

[3] H. Y. Kim, H.T. Lim, H.J. Kim, W.H. Lee and C. D. Park, 2004, 3-Dimensional Finite Element Analysis of Hemming for Automotive outer Panels by Part Model Assembling Method, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 13, No. 2, pp. 115~121.

[4] T. Belytschko, J. I. Lin, C. S. Tsay, 1984, Explicit

algorithms for the nonlinear dynamics of shells, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 42, Issue 2, pp. 225~251.

[5] D. Y. Lee, B. S. Choi, J. H. Hwang, I. K. Baek, K. Y. Choi, 2009, Springback Control of an Automotive Surround Molding part Using Automatic Die Compensation Module, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 18, No. 3, pp. 210~216.

[6] S. Y. Jung, S. J. Hwang, W. G. Park, C. Kim, 2008, Development of an Automated System for Predicting Shape and Volume of Air Pocket on the Draw Die, *J. Kor. Soc. Prec. Eng.*, Vol. 25, No. 1, pp. 72~78.

[7] S. J. Hwang, W. G. Park, C. Kim, S. W. Oh, N. Y. Cho, 2006, Flow Analysis of the Air Pocket in draw Die, *Proc. Natl. Cong. Fluids Eng.*, pp. 345~348.

[8] H. Y. Kim, H.T. Lim, 2003, Die Design for Tube Hydroforming Process Considering Preforming Effect, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 12, No. 5, pp. 433~439.

[9] H. Y. Kim, H.T. Lim, S. H. Hwang, K. D. Lee, W.S. Lee and D.Y. Kim, 2007, Hot Air Forming Analysis of Aluminum Tube, *Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf.*, pp. 116~119.

[10] H. Y. Kim, S. K. Lee, Y. J. Shin, 1996, Finite element Modeling of Folded Airbag and Analysis of Deployment Process, *J. Kor. Soc. Auto. Eng.*, Vol. 4, No. 6, pp. 236~246.

[11] E. Onate, S. Idelsohn, O. C. Zienkiewics, R. L. Tayler, 1996, A Finite Point Method in Computational Mechanics, *Int. J. Num. Met. Eng.*, Vol. 39, pp. 3839~3866.

[12] E. Onate, S. Idelsohn, 1998, A mesh-free finite point method for advective-diffusive transport and fluid flow problems, *Comp. Mec.*, 21, pp.283~292.

[13] E. Onate, S. Idelsohn, 2001, A finite point method for elasticity problems, *Comp. Struc.*, 79, pp. 2151~2163.

[14] M. Alizadeh, S. A. J. Jahromi, 2008, Using Finite Point Method for the Numerical Simulation of Heat Transfer Coupled with Microsegregation during Continuous Casting, *Int. J. ISSI*, Vol. 5 No. 2, pp. 1~7.

[15] J. Kuhnert, 1999, General Smoothed Particle

- Hydrodynamics, PhD thesis, Univ. Kaiserslautern, Kaiserslautern.
- [16] J. Kuhnert, An Upwind Finite Pointset Method (FPM) for Compressible Euler and Navier-Stokes, ITWM.
- [17] A. Tramecanto, 2003, Finite Point Method : A Mesh-Free Approach to model Airbag Inflation model , ICD Conference.
- [18] E. Gai, H. Zhang, 2005, Finite point method: a new approach to model the inflation of side curtain airbags, Int. J. Crash., Vol. 10, pp. 445~450.
- [19] H. Zhang, S. Raman, M. Gopal, T. Y. Han, 2004 Evaluation and Comparison of CFD Integrated Airbag Models in LS-DYNA, MADMO and PAM-CRASH, SAE int., ISBN 0-7680-1319-4.
- [20] Introduction to Fluid Mechanics, Fox & McDonald
- [21] PAM-STAMPTM Manual
- [22] PAM-SAFETM Manual