

드로우 금형의 에어포켓 유출 유동해석

황세준*, 박원규**, 김철***, 오세욱****, 조남영*****

Flow Analysis of the Air Pocket in Draw Die

Sejoon Hwang*, Warngyu Park**, Chul Kim***, Sewook Oh****, Namyoung Cho*****

Keywords : Draw die(드로우 금형), Air Pocket(에어포켓), Air Pressure Variation(공기압력변화), isentropic Process(등엔트로피과정)

Abstract

In sheet metal forming process using press and draw die some defect can be made because of the high pressure of air pocket between draw die and the product. The purpose of this study is to develop a program to decide an optimal combination of air vent hole size and number to prevent those defect on product. The air inside air pocket is considered as ideal gas and the compression and expansion is assumed as isentropic process. The mass flow is computed in two flow condition: unchoked and choked condition. The present computation obtains required cross-sectional area of air vent hole for not exceeding the user specified pressure such as the pressure for yielding strength of the product or the pressure for unchoked flow. To validate the program the present results are compared with the results of other researchers and commercial CFD code.

1. 서론

오늘날의 생산비용이 중요한 요소로 부각되는 실제 공정에서 주조, 단조 등의 공정이 오래 전부터 스탬핑 공정으로 대체 되어 왔다. 금속의 스탬핑 공정은 치수가 정확하고, 강하며 내구성 있는 제품을 대량으로 생산 할 수 있는 경제적이고 빠른 방법으로 그 응용분야가 넓다. 한마디로 표현하면 스탬핑은 다이와 프레스를 이용해서 소재를 원하는 치수와 모양으로 가공하는 냉간

가공(cold-working) 공정이다. 요철이 있는 형을 이용하여 박판 소재에 요철 형상을 만드는 공정이므로 공정 중 금형에 의해 소재의 일부분에 굽힘이 발생하고, 이 과정에서 소재와 금형 사이에 Fig. 1과 같은 밀폐된 공기층, 즉 air pocket이 발생한다. Air pocket은 성형의 최종단계에서 성형하중을 급격히 상승시킬 뿐만 아니라, 취출 시 air pocket내의 압축공기에 의해 성형이 완료된 제품에 변형을 발생시켜 불량품을 생산시키기도 한다. 그럼에도 불구하고 각 스탬핑 공정에서의 air pocket의 압력증가량에 대한 데이터와 Air vent hole에 대한 데이터의 부재로 인하여 기존 공정에서는 현장 작업자의 경험적 지식에 근거한 air vent hole의 위치와 직경, 개수 등이 정해졌다. 금형을 제작하여 현장 작업자가 air pocket의 발생 부위를 예측하고 그 정도를 판단하여 air vent hole을 가공, air pocket 내의 공기를 외부로 유출시켰다. 이 과정에서의 가장 큰 문제점은 너무 많은 air vent hole의 가공으로 인한 비용과 공수의 증가로 인한 생산성 저하이다. 성형 최종 단계에서 air pocket 내부 압력에 의해 소재에 작용하는 힘이 그 소재의 항복강도를 넘지 않기 위한 air vent hole의 최소 직경 및 개수를 산정하는 프로그램의 개발이 현재 연구의 최종 목적이다. 이 연구는 최종 연구 목표에 대한 선행 연구로서 air pocket의 이론적 모델링을 통해 체적 변화율에 따른 여러 조건에서의 air pocket 내부 압력 변화 및 유출계수를 계산하였다.

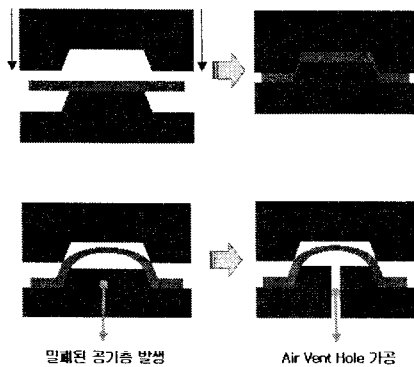


Fig. 1 Generation of air pocket

* 부산대학교 기계공학과, sehwang@pusan.ac.kr
** 부산대학교 기계공학부, wgpark@pusan.ac.kr
*** 부산대학교 기계공학부, chulki@pusan.ac.kr
**** 현대자동차 금형기술개발팀, swoh5380@hyundai-motor.com
***** (주)엔지비, nams@ngvtek.com

2. 수학적 모델링

2.1 Air pocket 내부 압력/온도변화

Air pocket내부의 공기는 이상기체의 등엔트로피 과정으로

가정한다.

$$pV = mRT \quad (1)$$

여기서 p 는 압력, V 는 air pocket의 체적, m 는 air pocket 내부의 공기질량, T 는 온도, R 은 기체상수이다. 에어 포켓 내부의 체적이 펀치의 상하운동에 의해 시간에 대해 변화하므로 식(1)을 시간에 대해 미분하면 다음 식을 얻는다.

$$p \frac{dV}{dt} + V \frac{dp}{dt} = mR \frac{dT}{dt} + RT \frac{dm}{dt} \quad (2)$$

등엔트로피 관계식을 시간에 대해 미분하면 다음의 온도변화율을 얻는다.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{T}{p} \frac{dp}{dt} \quad (3)$$

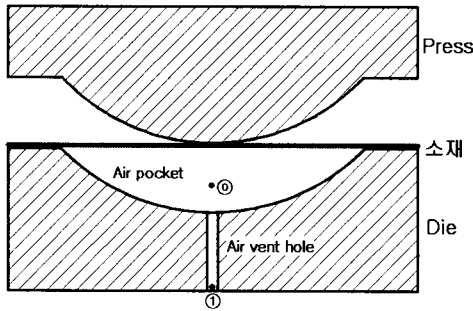


Fig. 2 Air pocket geometry

한편, Fig. 2에 도시된 air pocket의 유출공기 질량유량은 유동이 chock 되는 경우와 그렇지 않은 경우로 나누어 생각 할 수 있다. 먼저 Chock되지 않은 경우는 에어 포켓 내부를 정체상태로 보면, 에너지 방정식에서

$$\frac{V_1^2}{2} + C_p T_1 = C_p T_0 \quad (4)$$

이다. 여기서 C_p 는 정압비열이며 T_0 는 0위치의 정체점 온도를 의미한다. 등엔트로피 관계식과 연속방정식으로 부터

$$\dot{m} = \rho_0 A \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \left[\left(\frac{2\gamma}{1-\gamma} \right) \left(\frac{p_0}{\rho_0} \right) \left\{ 1 - \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

그러므로 식(2)에 식(3), 식(5)를 대입하면 압력의 시간변화율이 다음과 같이 유도된다.

$$\frac{dp}{dt} = \left[RT \dot{m} - p \frac{dV}{dt} \right] \frac{\gamma}{V} \quad (6)$$

한편 유동이 chock 상태인 경우 다음의 관계가 성립된다.

$$\frac{p_1}{p_0^*} = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (7)$$

단, p_0^* 는 $Ma = 1$ 일때의 p_0 .

이때의 질량유량은 식(5)에 식(7)을 대입하고 정리하면 다음과 같이 유도된다.

$$\dot{m} = Ap_0 \sqrt{\frac{\gamma}{RT_0}} \sqrt{\left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (8)$$

유동이 chock된 경우의 압력의 시간 변화율은 chock 되지 않은 경우의 식(6)과 동일한 모양을 가지나 이 경우의 \dot{m} 은 식(8)로 표현된다.

식(6)을 시간에 대해 적분하면 각 시간에서의 air pocket 내부 압력값을 얻을 수 있게 된다. 각 시간에서의 air pocket 내부 온도 및 밀도는 등엔트로피 관계식으로부터 구할 수 있다. 그리고 식(5)와 식(8)의 air vent hole 단면적 A 는 이상적인 포텐셜유동의 유출단면적이므로 실제 점성유동에서는 Vena contracta 효과를 고려해 유출단면적에 유출계수 C_c 를 곱하여 보정해 준다. 유출계수 C_c 는 실험적으로 정해지는 값이나 본 연구에서는 전산유체해석방법을 이용하여 보정하였다.

3. 계산 결과

3.1 Test case 계산 조건

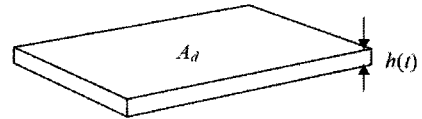


Fig. 3 Test case geometry

수학적 모델의 검증을 위해 상용 CFD code인 Fluent의 계산 결과를 자체 개발 프로그램의 결과와 비교 하였다. 계산을 위해 air pocket의 형상은 Fig. 3과 같은 직육면체로 가정한다. 따라서 윗면의 면적 A_d 는 일정하고, 펀치 속도를 V_p 라고 할 때 높이 h 는 다음과 같이 표현된다.

$$h(t) = h(0) - V_p \cdot t \quad (9)$$

따라서 air pocket의 체적은 다음과 같다.

$$V = A_d \cdot h(t) \quad (10)$$

그러므로 체적 변화율 dv/dt 는 식(15)를 식(16)에 대입하고 시간에 대해 미분하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{dv}{dt} = A_d \cdot V_p \quad (11)$$

즉, air pocket 형상을 직육면체로 가정했으므로 체적변화율은 프레스 속도에만 의존하는 것을 알 수 있다. 계산에 사용된 값은 $A_d = 1.47 \times 0.43$ [m²], $V_p = 0.18$ [m/s], air pocket 내부 및 외부의 초기 압력은 절대압력 1atm, 초기 온도는 27 [°C], $h(0) = 0.159$ [m], dt (time step size)는 전체 시뮬레이션 시간의 1/100 이다.

3.2 수학적 모델의 타당성 검토

수학적 모델의 물리적 타당성을 검토하기 위해 air pocket 내부의 초기 압력을 4atm(abs)로 두고 다른 모든 조건을 동일하게 유지한 상태에서 dv/dv 값의 변화에 따른 air pocket 내부 압력 변화를 Fig. 4와 같이 계산 하였다. Fig. 4에서 체적 변화율(dv/dt)이 작은 값을 가질 때는 체적이 감소함에도 불구하고 압력 상승이 없음을 볼 수 있다. 체적 변화율이 점차 커지게 되면 압력 감소율이 점차 작아지다가 $dv/dt=-0.017$ 에서 압력이 거의 일정하게 유지 되는 것을 볼 수 있다. 즉, air vent hole을 통해 유출되는 공기의 유량과 체적 감소량이 거의 같은 값을 가지는 것이다. 여기서 체적 변화율을 더 키우면 유출유량보다 체적감소율이 더 커져 압력 상승이 일어난다. 이상으로 본 연구에서 제시한 수학적 모델이 물리적으로 타당하다고 할 수 있다.

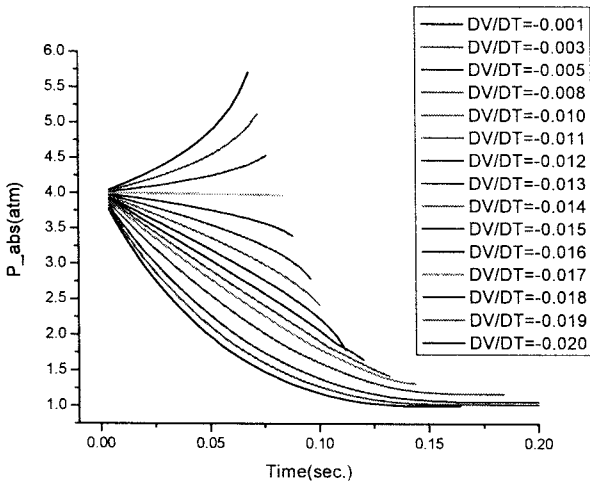


Fig. 4 Effect of volume change rate on pressure change

3.3 Test case 계산 결과

직경 1in. air vent hole 1개가 있는 경우에 대한 air pocket 내부 압력 및 온도 변화를 자체 개발한 프로그램으로 예측한 결과는 Fig. 4와 같다. 수축계수(C_c)는 0.7로 가정하였다.

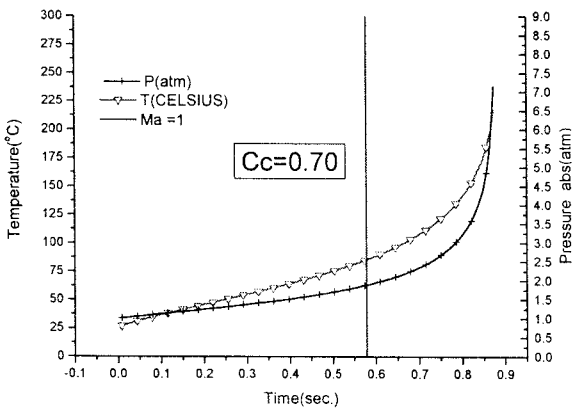


Fig. 5 Pressure and temperature change with time inside the air pocket

전체 시뮬레이션 시간이 70% 이상 경과한 시점에서 $Ma=1$, 즉 유동이 chock 상태가 되고, 압력과 온도 모두 시뮬레이션 시간의 마지막 10% 정도의 구간에서 급격히 상승하는 경향을 보이고 있다.

다음으로 수축계수(C_c)의 보정을 위해 자체개발 프로그램과

상용 CFD code인 FLUENT의 계산결과를 Fig. 5와 같이 비교하였다. 식 (14)에서 정의된 것과 같이 C_c 에 의해 공기의 실제 유출 면적이 결정되기 때문에 시간에 따른 압력변화량에 많은 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. FLUENT와 자체 개발 프로그램의 전체적인 압력 변화 경향을 비교 했을 때 초기에 가정한 $C_c = 0.70$ 이 타당함을 알 수 있다.

온도의 경우도 압력과 동일한 조건으로 FLUENT와의 계산결과를 Fig. 6과 같이 비교 하였다. 온도변화 역시 $C_c = 0.70$ 에서 두 결과가 잘 일치함을 볼 수 있다.

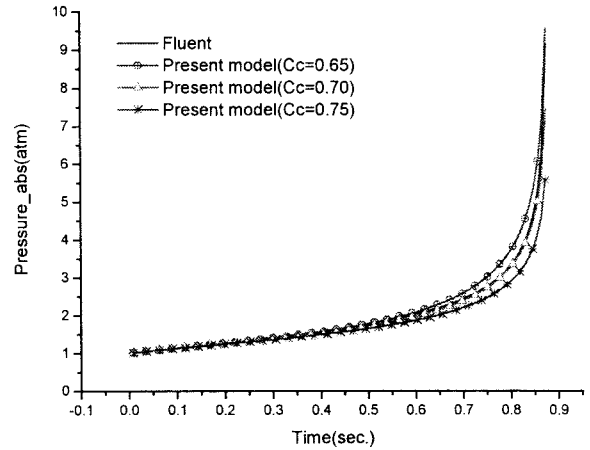


Fig. 6 Effect of contraction coefficient on pressure change

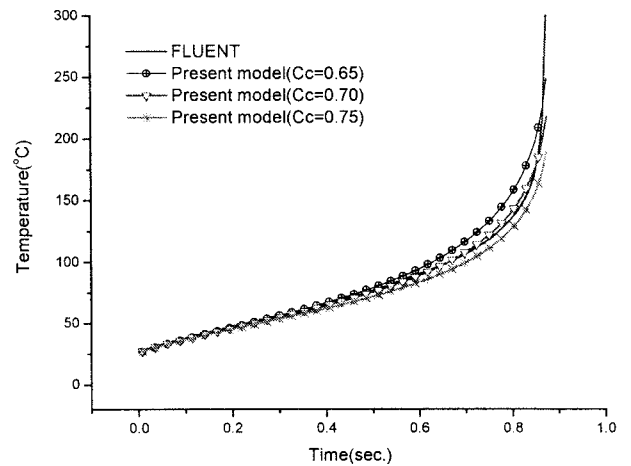


Fig. 7 Effect of contraction coefficient on temperature change

3.4 팽창 체적에 대한 압력 변화

성형시 다이와 펀치가 완전히 소재와 밀착된 후 펀치는 다시 원래의 위치로 후퇴하게 된다. 이때 국부적인 진공 발생으로 인해 제품의 불량률이 유발될 수 있다. 이를 고려하기 위해 팽창체적에 대한 해석을 수행하였다. Fig. 8 ~ 10과 Table. 1은 초기 체적에서 체적이 0이되는 수축과정, 체적이 0이 된 시점에서 다시 초기 체적으로 팽창되는 일련의 과정에서의 압력 변화를 나타낸 그래프이다. 체적 변화율이 커질수록 최종 단계에서의 진공이 더 크게 걸리는 경향을 보인다. 그러나 체적 변화율이 어느 정도 큰값을 초과하면 체적 수축으로 형성된 고압으로 인해 오히려 최종 단계에서의 진공이 더 적게 걸리는 경향을 보였다. 즉, 체적 수축시에 형성된 최고 압력으로 인해 그 압력이 그대로 팽

창하는 경우 최종 단계에서의 진공도가 더 작아지게 된다. 다시 말해 체적 수축을 기준으로 벤트홀의 면적을 선정하면, 팽창시의 진공압력은 따로 고려 할 필요가 없다고 생각된다.

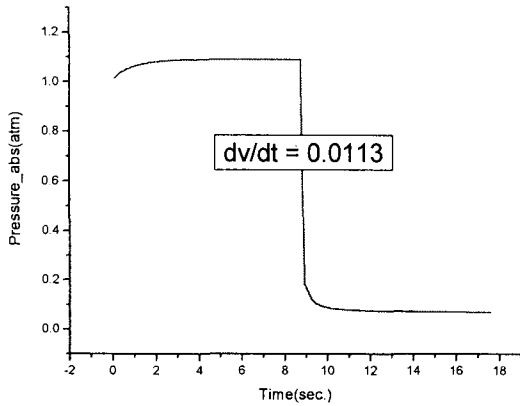


Fig. 8 Pressure variation during compression and expansion of air pocket

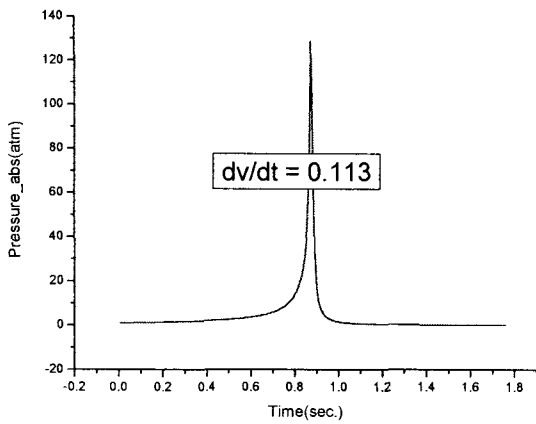


Fig. 9 Pressure variation during compression and expansion of air pocket

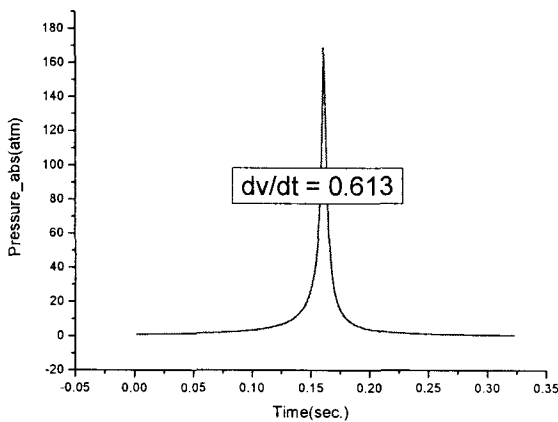


Fig. 10 Pressure variation during compression and expansion of air pocket

dv/dt [m ³ /s]	P_{max} [atm]	P_{final} [atm]
0.0113	1.09	0.07
0.113	128.56	0.11
0.613	168.94	0.582

Table. 1 Maximum and vacuum pressure

4. 결론

본 연구에서는 이상기체 상태방정식과 등엔트로피 관계식을 이용하여 압축되는 air pocket 체적에 대한 압력변화를 계산하였다. Air pocket을 직육면체로 가정하였기 때문에 체적 변화율은 프레스 속도에 정비례하는 관계를 가진다. 압력변화에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 이 펀치 속도와 수축계수(Contraction coefficient)이다. 여러 수축 계수에 대해 자체 개발 프로그램으로 계산을 수행하고 그 결과를 상용 CFD code인 FLUENT와 비교함으로써 최적이라 생각되는 수축계수 값을 결정하였다. 그리고 펀치가 다이와 완전히 접촉한 후 다시 후퇴할 때 발생 할 수 있는 진공압력을 고려한 계산을 수행하였다. 계산결과 체적이 수축할 경우에 대해 air vent hole이 선정되면 체적 팽창시에는 기 선정된 air vent hole로 제품에 불량을 유발할 만한 진공압력을 충분히 방지할 수 있는 것으로 나타났다.

상용코드로 자체 개발 프로그램의 신뢰도를 평가 하였으나 향후 실제 금형의 측정 데이터를 통한 예측된 압력 변화에 대한 유용성을 검증할 필요가 있겠다.

참고문헌

- [1] Patrick H. Oosthuizen, William E. Carscallen, 1997, Compressible fluid flow, McGraw-Hill, pp.184-193
- [2] Bruce R. Munson, Donald F. Young, 1998, Fundamentals of fluid mechanics 3rd edition, Wiley, pp. 121-123
- [3] 손권, 정상화 공역, 2000, 수치해석, 도서출판 인터비전, pp.52-57
- [4] Fluent Inc., 2003, Fluent Documents, Fluent Inc.
- [5] Genick Bar-Meir, 2005, "Fundamentals of Compressible Fluid Mechanics", University of Minnesota, pp.179-202
- [6] Szente, V., Vad, J. 2003, "A Semi-empirical Model for Characterisation of Flow Coefficient for Pneumatic Solenoid Valves", v.47 no.2, pp.131-142