

# 유한요소해석을 이용한 일체복합성형성에 대한 연구

권승렬<sup>1</sup>, 이종길<sup>#</sup>

## A Study On the Combined One Body Stamping Using F.E.A.

S. Y. Kwon, J. K. Lee

### Abstract

Automotive parts manufacturers are doing their best to strengthen the competitiveness. They are developing a large variety of new manufacturing technologies to reduce the manufacturing cost. Combined One Body Stamping(C.O.B.S) is one of the remarkable technologies to reduce production cost. C.O.B.S makes possible to form several parts together in a process using only one die set while conventional stamping demands the same number of die sets to the number of parts. But the deformation mechanism in C.O.B.S is more complicated because the interactions between blanks. So the interaction effects should be considered in the stage of initial blank shape design.

In the study, a blank design method to consider the interactions between blanks was proposed and verified through the simulations and experiments. A commercial incremental FE code, LS-Dyna, was used to simulate the C.O.B.S Process. And a reverse one step FE code, Hyper Form, was used to predict initial blank shape. The boundary conditions of the reverse one step FE analysis were determined by the proposed method.

**Key Words** : Combined One Body Stamping(C.O.B.S.), Simultaneous Forming, Initial Blank Shape, Cushion Force

### 1. 서 론

일체복합성형(C.O.B.S, Combined One Body Stamping) 기술 중 하나인 일체동시성형(Simultaneous Forming)은 2 개 이상의 동종 혹은 이종의 재질 및 두께를 갖는 박판을 동시에 성형하는 기술로 기존의 금형 제작 및 여러 공정을 통한 성형 과정에서 요구되는 시간과 비용 소모를 절감하여 제품 경쟁력을 향상시킬 수 있는 성형기술이다. 따라서 프레스 성형공정이 널리 적용되고 있는 자동차 부품 산업, 즉 자동차 프레임 부품들의 제조산업에서 생산성 및 경쟁력 향상의 일환으로 일체복합성형

기술에 대한 관심이 증대되고 있는 추세이다. 일체복합성형 기술에 대한 간략한 도식은 Fig.1 과 같으며, 기존의 다단계 공정으로 이루어진 판재 성형 방식에 비해 두 개 이상의 부품을 동시에 성형함으로써 공정 수를 대폭 감소시킬 수 있을 것으로 예상된다. 그러나, 기존 판재 성형에서는 블랭크를 잡아주는 홀더 및 드로우 비드, 블랭크 형상 등을 포함하여 포밍 공정 이후 트리밍까지 함께 연계되어 성형공정에 대한 제어가 용이한 반면에 일체복합성형은 두 개 이상의 블랭크를 겹쳐서 단번에 성형이 완료되는 특징으로 인해 각 구성부의 정확한 소재 유동 예측에 기초한 초기

1. 서진산업 기술연구소

# 교신저자: 한국산업기술대학교 기계공학과

E-mail: ljk@kpu.ac.kr

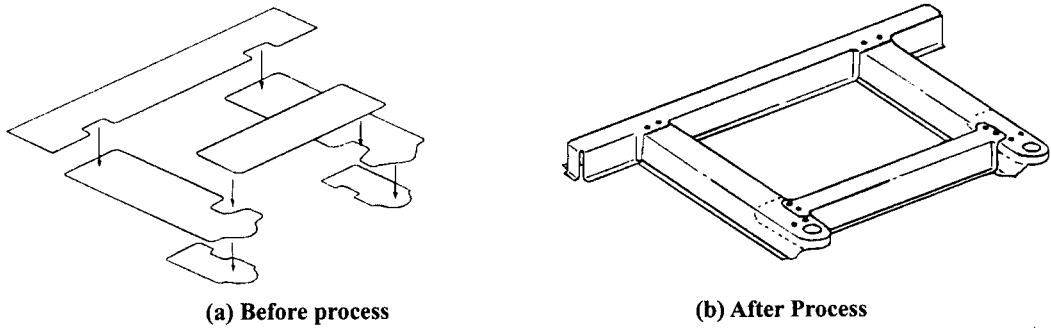


Fig. 1 Concept diagram

블랭크 형상의 설정이 어려운 단점이 있다.

따라서, 일체복합성형에서 가장 중요한 기술은 초기에 성형하고자 하는 부품의 블랭크 크기 및 형상을 최적화하는데 있다. 또한 일체복합성형은 금형의 운동에 따른 블랭크의 변형 거동은 물론이고 성형 중 블랭크와 블랭크의 상호 물리적 연관성, 즉 초기 블랭크와 블랭크의 접촉 면적 및 쿠션(Cushion)에 의한 가압력과 그에 따라 발생하는 마찰력 등을 고려하여 초기 블랭크 형상을 계산해야 할 것으로 예상된다.

본 논문에서는 이러한 일체복합성형에서 예상되는 여러 상호 작용을 고려하여 Fig.2 와 같이 기존 성형 방식에서 성형성에 문제가 없는 자동차용 리어 크로스 멤버의 상판에 대해서 다양한 수치해석과 실험을 통해 초기 블랭크 형상을 설정하기 위한 방안을 제시하였으며, 수치 해석에 사용된 상용 소프트웨어로는 증분형 유한요소 프로그램(Incremental Explicit Program)인 LS-Dyna[1]를 이용하여 일체복합성형 공정에 대한 해석 방안을 제시하였고, 역 유한요소 프로그램(Inverse One Step Program)인 Hyper Form[2]을 이용하여 일체복합성형에서 경계조건을 고려한 초기 블랭크의 형상 예측 및 결정 방안을 위한 기준을 제시하였다.

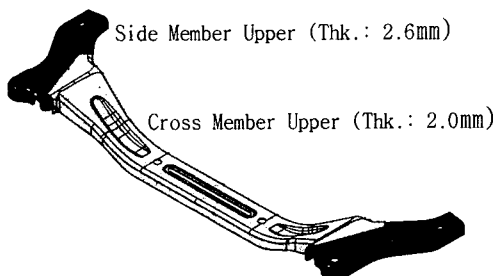


Fig. 2 Shape of the rear cross member

## 2. 해석의 적용 및 검증

2.1 블랭크 형상 설정을 위한 역 유한요소법의 적용  
 초기 블랭크의 형상을 산출하기 위한 수치해석적 기법으로 전소성변형이론(Total Deformation Theory)을 도입한 독특한 변형률 식을 이용하여 일반적인 형상에 적용할 수 있게 수식화한 Guo, Batoz[3] 등의 이론 및 역 유한요소법을 이용한 자동차용 Trunk-Lid Reinforcement 의 성형해석[4]을 참고로 상용 프로그램을 사용하여 해석을 진행하였다. 소재 두께가 각각 2.0 mm, 2.6 mm의 블랭크를 겹쳐서 동시 성형함으로써 겹쳐지는 접촉면은 4.6 mm의 두께를 형성하기 때문에 상형과 하형에는 단차를 고려하였고, 성형 중 접촉면의 움직임 제어를 위하여 금형 내 스프링을 이용한 쿠션을 적용하였다. 그에 따른 최대 가압력은 9.2ton 을 적용하였으며, 마찰계수 및 접촉면 등의 경계조건을 고려한 블랭크 형상을 Fig.3 과 같이 경계조건을 무시한 초기 블랭크 형상과 비교하여 나타내었다. 경계 조건을 무시한 크로스 멤버 블랭크 형상과 대비해서 경계조건을 고려한 블랭크의 끝단은 약 6.43 mm, 사이드 멤버의 경우는 가압력이 적용되는 접촉면이 사이드 멤버 전체 면적의 51.5%로 해당되고, 기하학적 높이 차이가 없기 때문에 가압력에 따른 소재의 유동은 약 1.70 mm로 크지 않다는 것을 예상할 수 있다. 그러나 현재 상용화된 역 유한요소 프로그램에서는 일정한 정수로 가압력을 설정해주기 때문에 실제 변위에 따라 일정 기울기를 가진 가압력의 효과 및 접촉 면적의 마찰력에 따라 수치 해석 상에서 오차를 수반하고 있을 것이라는 예상이 가능하다.

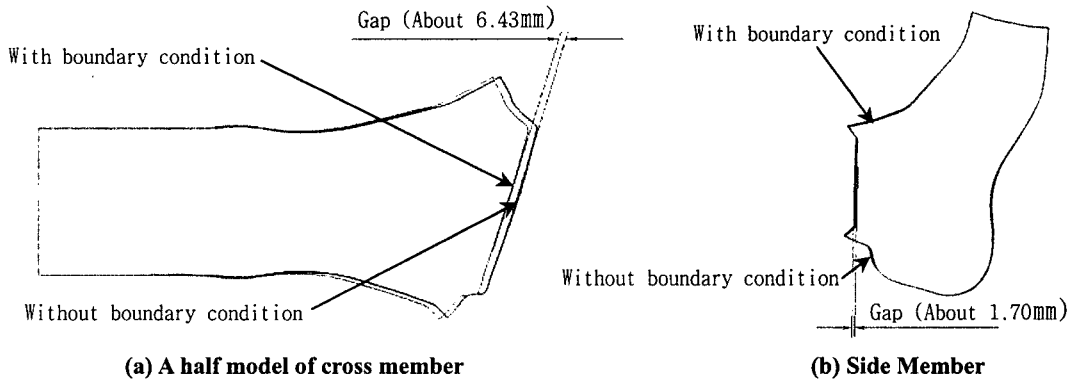


Fig. 3 Predicted initial blank shape according to boundary condition

## 2.2 증분형 유한요소해석을 통한 검증

성형 해석 중 블랭크의 성형과 관련하여 전단 강성 과잉을 피하는 동시에 영 에너지 모드(Zero Energy Mode) 혹은 아워글라스 모드(Hourglass mode)를 억제하기 위해 일점적분과 아워글라스 에너지를 고려하는 쉘 요소 정식화를 Belytschko와 Tsay[5] 등이 제안하였는데, 본 논문에서도 이와 같은 정식화를 사용하였으며, 역 유한요소법에 의해 계산된 블랭크 형상을 Fig.3 과 같이 경계 조건 적용에 따른 여러 오차를 감안해서 경계조건을 고려하지 않은 초기 블랭크 형상(CASE1)과 CASE1 에서 끝단을 5.0 mm 수정한 형상(CASE2), 10.0 mm 수정한 형상(CASE3)에 대해 증분형 유한요소법을 이용한 수치해석을 진행하였다. 금형 상의 두께 단차 부분과 크로스 멤버의 초기 블랭크 형상 끝단의 차이를 Gap-A, 사이드 멤버의 초기

이 도식적으로 정의하였으며, 그에 따른 차이를 Table 1 과 같이 정리를 하였다. 여기서 (-) 부호를 갖는 수치는 블랭크가 금형의 두께 단차 구간에 안정적인 변형을 이루지 못하고 그 경계에서 상호 스크래치를 예상하는 것이며, 역 유한요소법에서 가압력(9.2ton)을 적용한 초기 블랭크 형상의 예측된 6.43 mm의 수치와는 상이함을 확인할 수 있다.

Table 1 Variation of gap according to blanks

Gap (mm)		CASE1	CASE2	CASE3
A	Cross Member	-4.0	8.0	12.0
B	Side Member	-1.3	5.0	10.0

## 2.3 실험을 통한 검증

역 유한요소법과 증분형 유한요소법을 이용한 일체복합성형 공정의 수치 해석에 대한 접근방법을 검증하기 위해서 상호 스크래치에 대한 문제점이 예상되었던 CASE1 의 크로스 멤버와 사이드 멤버 블랭크를 비롯해서 CASE2 및 CASE3 의 블랭크 형상으로 실험을 하였다. CASE1 의 블랭크에 대한 성형성을 육안으로 확인해보면 해석에서 예상을 했던 것과 같이 두께에 따른 금형 상의 단차 설정 부분에서 상호 스크래치 문제점을 Fig. 5 와 같이 현상을 확인할 수 있었으며, CASE2 와 CASE3 의 블랭크에서는 CASE1 처럼 스크래치와 같은 문제점은 나타나지 않았지만 설계된 제품 형상과는 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 성형이 완료된 이후의 크로스 멤버와 사이드 멤버의 블랭크 끝단을 성형 스트로크 방향에 수

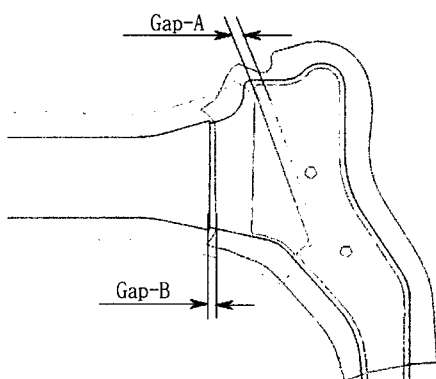


Fig. 4 Definition of Gap-A and Gap-B

블랭크 끝단의 차이를 Gap-B 라고 Fig.4 와 같

직한 축으로 일정 기준 하에 Fig.6 과 같이 CASE 별로 블랭크 소재 유입을 비교한 결과 실제 시차 품과 해석에서의 결과와 유사한 분포 및 결과를 보여주었다.

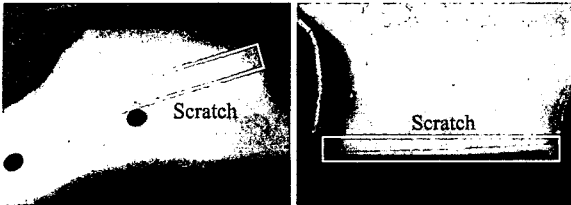


Fig.5 Problems caused by improperly designed blank shapes

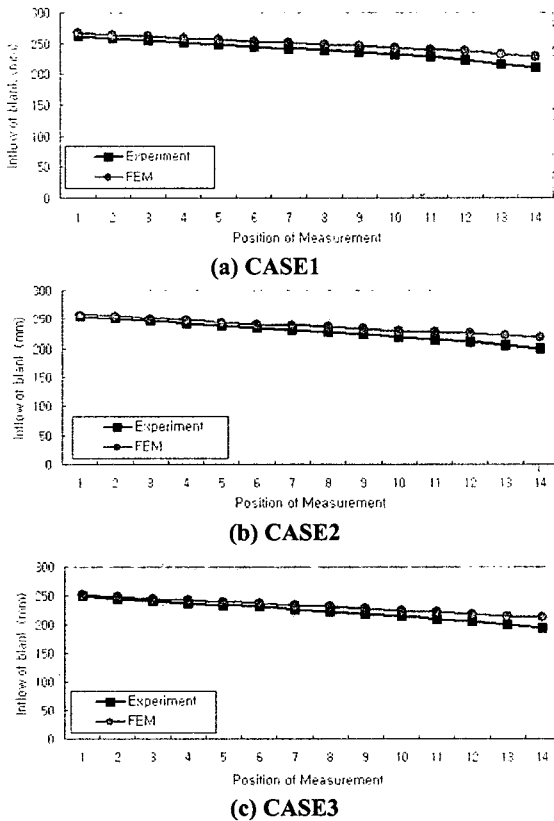


Fig.6 Predicted and measured inflow of blanks

### 3. C.O.B.S에서의 블랭크 형상 결정 방안

역 유한요소법을 이용하여 초기 블랭크 형상을 설정하기 위해서는 금형의 펀치 스트로크에

따른 가압력의 변동적인 크기를 소재와 소재의 접촉면에 있어서 마찰에 따른 정량적인 가압력으로 부여하는 기준 설정이 필요하다는 것을 지금까지 역 유한요소법과 증분형 유한요소법을 적용한 해석 결과와 실험에서 확인하였다.

금형의 쿠션에 의해 접촉면에 가해지는 수직 한 힘( $F$ )과 더불어서 마찰에 따른 마찰력과 최대 전단 응력( $k = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2 = Y/2$ )의 관계로 초점을 맞춰 소재에 수직 한 힘이 작용하는 가압력과 성형이 이루어지는 동안 접촉면( $A_{contact}$ )에 작용하는 수평력의 관계식에서 마찰 계수( $\mu$ )에 따른 상수 값을  $C$  라고 정의하며 그 관계식은 다음과 같다.

$$\mu F = C(k \cdot A_{contact}) \quad (1)$$

접촉 면적에 대한 소재의 마찰과 관련해서 응착마찰 및 고착마찰에 대한 개념과 접촉면에 대한 일부분에 대해서 정량적으로 산출된 기준은 없지만, 정사각 컵 드로잉의 플랜지 부에서 면압 지로 측정 한 압력 분포에 대한 결과[6]를 적용하여 기준을 전개해보았다. 9.2ton 의 가압력을 기준으로 비례적으로 증가 및 감소에 따른 상수  $C$  값을 계산해보면 2.44ton 의 가압력에서 0.0068 의 상수  $C$  값을 산출할 수 있었으며, 일반 금속에 대한 냉간 단조 시 약 0.1~0.05 의 마찰계수 값 [7]에 10%의 실제 접촉면을 적용하게 되면 단조가 아닌 판재 성형 및 쿠션의 가압에 따른 응착 마찰 조건에서 마찰계수 값은 0.001 보다는 상대적으로 0.005 에 가까울 것이라고 예상할 수 있다. 따라서 앞서 0.0068 의 상수  $C$  값이 이 범위에 만족하게 되며 그 때, 가압력은 2.44ton 으로 역 유한요소법에 정량적으로 입력한 수치해석의 결과는 크로스 멤버 초기 블랭크의 형상 수정을 1.64 mm로 예상할 수 있었으며, 앞서 2.1 장에서 역 유한요소법의 적용과 2.2 장 증분형 유한요소법을 이용한 수치해석의 결과 값에 대해서 상호 외삽법(Extrapolation)을 이용하여 정량적인 가압력을 2.44ton 으로 확인할 수 있었으며 이 때, 형상 수정은 1.59 mm로 산출할 수 있었다. 이와 같은 1.59 mm의 수치계산 값과 수치해석적 계산 값인 1.64 mm와는 차이가 크지 않으며 초기 블랭크 형상을 설정하기 위한 기준으로 설정하는데 적합하다는 것을 확인하였다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 일체복합성형을 위한 초기 블랭크의 형상을 설정하기 위해서 수치 해석적으로 역 유한요소법과 증분형 유한요소법의 이론을 적용하여 자동차용 리어 크로스 멤버의 상판에 대해 해석 및 실험을 수행하였으며 일체복합성형성에 대한 연구를 수행한 결과 얻어진 주요 결론은 다음과 같이 요약될 수 있다.

(1) 일체복합성형을 적용할 제품의 기하학적 형상과 접촉면적의 크기에 따라서 소재 유입 양상에 차이를 나타냈으며, 상대적으로 금형의 스트로크 방향으로 기하학적 형상의 높이 차이가 거의 없으며, 해당 소재 면적의 50% 이상 접촉면이 설정된 특정 형상을 갖는 사이드 멤버에 있어서는 역 유한요소법에서 내포하고 있는 오차를 어느 정도 무시할 수 있었다.

(2) 크로스 멤버와 같이 금형의 스트로크 방향으로 기하학적인 높이 차이가 있으며, 전체 면적 대비 접촉 면적의 크기가 약 24% 이하인 일부 분에 지나지 않는 형상의 경우는 초기 블랭크 형상을 산출하기 위해서 소재와 소재의 접촉면과 가압력, 마찰에 따른 경계조건을 반드시 고려해야 하며 응착 및 고착 마찰 이론과 최대전단 응력 조건을 이용하여 기준을 제시하였다.

(3) 경계 조건과 응착 및 고착 마찰의 이론을 고려한 약 10% 값의 기준 제시 및 접근 방안에 따른 결과와 역 유한요소법과 증분형 유한요소법

을 이용한 수치 해석 및 실험 결과 값을 이용하여 예상된 형상의 설정 방안과 비교해서 제시된 기준에 대한 타당성을 확인하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] LSTC, 2001, LS-Dyna User's Manual Version 960
- [2] ALTAIR, 2003, Hyper Form 6.0 Release Note
- [3] Y. Q. GUO, J. L. BATOZ, J. M. DETRAUX and P. DUROUX, 1990, Finite Element Procedures For Strain Estimations Of Sheet Metal Forming Parts, International Journal For Numerical Methods In Engineering, Vol. 30, pp. 1385~1401
- [4] 이종길, 이종민, 이석환, 김형배, 1998, One Step 유한요소법을 이용한 Trunk-Lid Reinforcement의 성형해석, 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집, pp.22~26
- [5] Ted BELYTSCHEK, Jerry I. LIN and Chen-Shyh TSAY, 1984, Explicit Algorithms For The Nonlinear Dynamics Of Shells, Computer Methods In Applied Mechanics and Engineering, Vol. 42, pp.225~251
- [6] 홍주표, 김현영, 오수익, 1997, 레이저 용접 판재의 정사각 컵 드로잉 성형성 연구, 한국소성가공학회지, 제 6 권, 제 1 호, pp.68~80
- [7] S. Kalpakjian, 1991, Manufacturing Processes for Engineering Materials Addison-Wesley Publishing, pp.145~152