

철도차량 마루부재 압출공정의 3차원 유한요소해석

박 근*, 이영규**, 양동열**, 이동현***

(*) 삼성전기(주) 금형개발실

(**) 한국과학기술원 기계공학과

(***) 동양강철(주) 기술연구소

Three-Dimensional Finite Element Analysis for Extrusion of the Underframe of a Railroad Vehicle

K. Park, Y. K. Lee, D. Y. Yang and D. H. Lee

Abstract

The present work is concerned with three-dimensional finite element analysis of the hollow section extrusion process using a porthole die. For economic computation, mismatching refinement, an efficient domain decomposition method with different mesh density for each subdomain, is implemented. The proposed method improves the computational efficiency significantly, especially for the three-dimensional analysis of extrusion problems. As a numerical example, extrusion of the underframe part of a railroad vehicle are analyzed. For three-dimensional mesh generation of a complicated shape with hexahedral elements, a modified grid-based approach with the surface element layer is utilized. The analysis results are then successfully reflected on the industrial porthole die design.

Key Words : Extrusion, Hollow Section Extrusion, Porthole Die, Railroad Vehicle, Rigid-Plastic Finite Element Method, Domain Decomposition, Mismatching Refinement

1. 서론

최근 날로 심각해져가고 있는 교통난을 해소하기 위한 방편으로 고속철도의 건설 및 지하철을 포함한 기존의 철도차량의 고속화가 추진되고 있다. 철도차량의 고속화를 이루기 위해서는 차체 및 부품의 경량화, 추진시스템 출력의 향상 및 고속에서의 주행안정성 확보 등 여러 가지 요인이 성립되어야 한다.

철도차량의 경량화를 추진하기 위해서는 차체 및 부품의 소재를 가능한 한 경량소재로 대체하는 것이 바람직하다. 현재 철도차량의 차체에 많이 사용되는 재료는 스테인레스강이나 고장력강인데, 특히 보다 가벼운 중량이 요구되는 초고속용 철도차량에는 알루미늄 합금이나 복합재료 등

보다 가벼운 소재로의 대체가능성이 검토되고 있는 실정이다.

현재 철도차량의 몸체는 압출(extrusion) 공정에 의해 제작되고 있다. 압출공정은 일정한 단면 형상을 갖는 제품의 생산에 가장 경제적인 공정으로서, 초기에는 단순한 형상의 제품에 이용되어 왔으나 근래에 들어서는 복잡한 형상의 제품 생산에 널리 이용되고 있다. 현재까지는 압출공정 및 금형설계는 주로 설계자의 경험과 직관에 의해 이루어지고 있어, 여러가지 금형설계안에 대해 실제 금형을 제작하고 이를 사용하여 실험을 수행함으로써 설계의 타당성을 검증하기 위해서는 많은 시간과 비용이 소모된다.

이를 위해 본 연구에서는 유한요소해석을 활용한 압출공정의 수치해석을 통한 금형설계기술

을 개발하고자 한다. 그러나 3 차원 강소성 유한 요소해석의 경우 문제의 자유도가 증가하게 되어 많은 계산시간이 소요되며, 사용 컴퓨터의 용량에도 제한이 따르게 된다. 특히 본 연구에서 해석하고자 하는 철도차량 몸체의 경우는 형상이 복잡하며 압출비가 상당히 크기 때문에 많은 수의 격자를 필요로 한다. 따라서 기존의 방법으로 해석을 수행하기 위해서는 엄청난 계산시간이 요구될 것으로 예상된다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 본 연구에서는 영역분할(Domain decomposition)에 의한 격자세분화 기법을 도입하였다. 또한 설계된 공정의 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 결과를 예측함으로써 시행착오에 의한 시간과 금형 제작비용을 효과적으로 절감하고자 한다. 이러한 기술개발을 통해 고속전철 마루부재의 금형 설계에 반영하도록 하겠다.

2. 영역분할에 의한 격자세분화

영역분할에 의한 격자세분화(Mismatching refinement)의 기본 개념은 해석 영역을 분할하고, 분할된 영역에 대해 격자밀도를 차별화하여 격자를 구성한다는 점이다.⁽¹⁻³⁾ 이때 부영역간의 격자밀도의 차이를 고려하기 위해 수정된 속도천이과정⁽⁵⁾을 사용하였다. 기본 개념은 속도 천이시 인접 부영역에서의 속도만을 고려하는 것이 아니라 해당 부영역에서의 이전단계의 계산결과까지 함께 고려해줌으로써 그만큼 세분화된 영역의 해석결과를 속도천이과정에 반영한다는 점이다.

영역 Ω 에 대한 변분식을 강소성 유한요소 수식화⁽⁴⁾에 의해 이산화하면 다음과 같은 행렬방정식을 얻을 수 있다.

$$Ku = b, \quad \text{in } \Omega \quad (1)$$

$$u = g, \quad \text{on } \Gamma \quad (2)$$

여기서 K 와 b 는 각각 요소강성행렬과 하중벡터를, Γ 는 영역 Ω 의 경계를 의미한다. 이때 영역 Ω 를 각각 세분화된 부영역 Ω_f 과 그렇지 않은 부영역 Ω_c 의 2개의 부영역으로 분할할 수 있다. 분할된 2개의 부영역에 대해 수정된 Schwarz의 속도천이과정의 수식화⁽⁶⁾는 다음과 같이 요약된다.

$$K_c u_c^{(k)} = b_c, \quad \text{in } \Omega_c \quad (3)$$

$$u_c^{(k)} = g, \quad \text{on } \Gamma \quad (4)$$

$$K_f u_f^{(k)} = b_f, \quad \text{in } \Omega_f \quad (5)$$

$$u_f^{(k)} = g, \quad \text{on } \Gamma \quad (6)$$

$$u_c^{(k)} = \alpha^{(k)} Q^{(k-c)} u_f^{(k-1)} + (1-\alpha^{(k)}) u_c^{(k-1)}, \quad \text{on } \Gamma_c - \Gamma \quad (7)$$

$$\frac{\partial u_c^{(k)}}{\partial n} = \alpha^{(k)} Q^{(k-1)} \frac{\partial u_f^{(k-1)}}{\partial n} + (1-\alpha^{(k)}) \frac{\partial u_c^{(k-1)}}{\partial n} \quad (8)$$

$$u_f^{(k)} = \beta^{(k)} P^{(k)} u_c^{(k)} + (1-\beta^{(k)}) u_f^{(k-1)}, \quad \text{on } \Gamma_f - \Gamma \quad (9)$$

$$\frac{\partial u_f^{(k)}}{\partial n} = \beta^{(k)} P^{(k)} \frac{\partial u_c^{(k)}}{\partial n} + (1-\beta^{(k)}) \frac{\partial u_f^{(k-1)}}{\partial n} \quad (10)$$

이때 윗첨자 (k) 는 현재의 축차횟수를 의미하며, α 와 β 는 세분화된 부영역의 해석결과를 고려하기 위한 가중치(weight factors)로서 0과 1 사이의 값이다. 이와 같이 중복된 영역에서의 속도성분은 인접 영역에서의 계산결과를 반영하여 단계적으로 수정되며, 이러한 반복계산은 경계영역에서의 오차가 10^{-5} 로 수렴될 때까지 수행하였다.

3. 철도차량 마루부재 압출공정의 고찰

철도차량 마루부재(Fig. 1 참조)는 중공형 압출재로서 총 9개의 내부 구멍을 포함하고 있다.⁽⁶⁾ 중공형 압출재의 생산을 위해서는 컨테이너(container) 안에 장착되어 있는 소재를 분리(splitting)하고 이를 다시 재결합(re-welded)하는 과정을 거치게 된다.⁽⁷⁾ 이를 위해 본 연구에서는 포트홀 금형(porthole die)을 사용하였는데, 포트홀 금형 사용시 소재의 유동이 매우 복잡한 양상을 띄게 되어 세심한 주의가 요구된다. 특히 전체 크기에 비해 두께가 매우 얇아 소재의 유동이 급격히 변화되고 이로 인한 치수 미달과 평활도 불량 등의 문제점이 발생할 가능성이 높다.

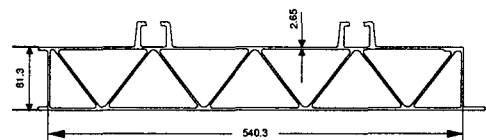


Fig. 1. Sectional view of the underframe part of a railroad vehicle

Fig. 2 에 공정의 개략도를 도시하였다. 소재는 포트홀을 따라 분할되어 압출실(welding chamber)에서 재결합되며, feeder를 통해 일종의 예비형상(preform)으로 압출된 뒤, 금형 베어링 면을 따라 최종 형상으로 성형된다. Fig. 3 은 전체 영역을 5개의 부영역으로 구분하고 대칭성을 고려하여 1/2 만을 3 차원 CAD로 모델링한 형상이다. 각각의 부영역이 표현하는 형상은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 부영역 1: 초기 소재(rectangular billet)
- 부영역 2: 포트홀로 유입되는 부분
- 부영역 3: 포트홀 금형 내부의 소재
- 부영역 4: 압출실 및 feeder 부분
- 부영역 5: 금형베어링을 통해 성형되는 압출재

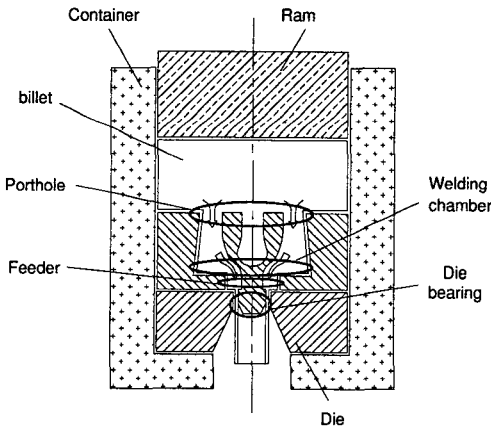


Fig. 2 Structure of the extrusion die set

4. 철도차량 마루부재 압출공정의 유한요소해석

Fig. 3 을 보면 부영역 3 을 제외한 나머지 부영역은 2½ 차원적 특성을 지니고 있음을 알 수 있다. 이들에 대해서는 2 차원 단면에 대해 격자를 구성하여 3 차원으로 연장하는 방식으로 3 차원 격자를 구성하여 주었다. Fig. 4 에 부영역 1, 2, 4, 5 에 대한 3 차원 격자의 형상을 도시하였다. 그러나 부영역 3 은 형상이 복잡하여 기존의 방법으로는 3 차원 육면체요소를 사용한 격자구성이 불가능하다. 본 연구에서는 이를 위해 마스터 그리드(master grid)와 표면요소층(surface

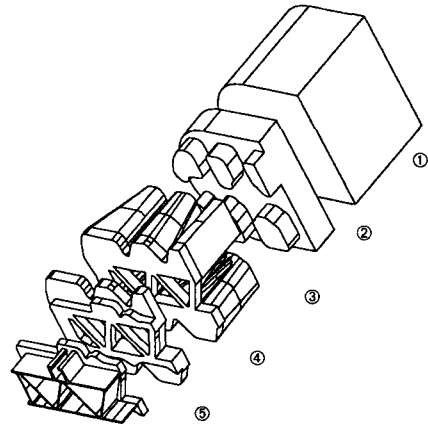


Fig. 3 Decomposition into five subdomains

element layer)을 사용한 3 차원 자동격자기법⁽⁸⁾을 사용하였다. Fig. 5 에 부영역 3 의 3 차원 격자형태를 도시하였다.

해석은 대칭성을 고려하여 1/2 에 대해서만 수행하였으며, 등온 정상상태로 가정하였다. 이때 작업온도는 500°C, 램의 이동속도는 2mm/sec, 마찰계수는 0.2 로 설정하였다. 해석은 Cray C90 를 사용하여 수행되었다. 한편 해석결과의 신뢰성을 확인하기 위해 성형실험을 수행하였다. 시압은 동양강철(주)에서 8,000 톤 압출기를 사용하여 수행

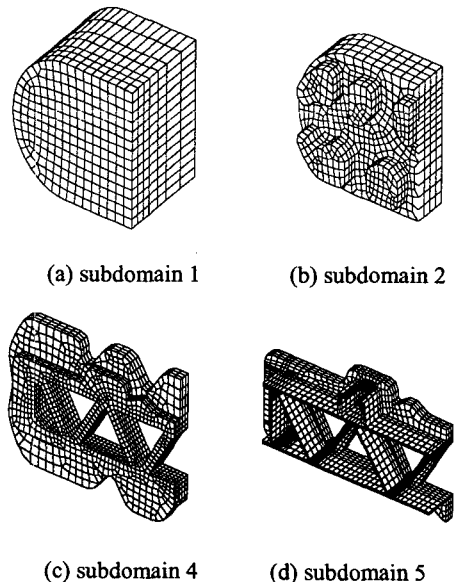


Fig. 4 Three-dimensional mesh structures

되었다. Fig. 6에 해석결과로부터 얻어진 출구부의 속도분포를 실제 성형품의 두께와 비교하였다. Fig. 6-(a)를 보면 최종 압출품에서 바깥쪽 리브의 두께가 얇음을 알 수 있으며, 이러한 경향은 출구부 유동속도의 분포와 유사하여 해석결과의 신뢰성을 입증할 수 있었다.

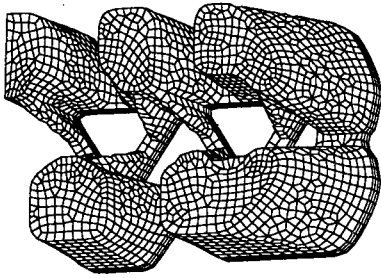
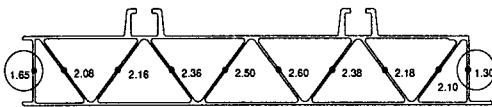
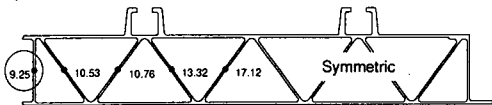


Fig. 5 Mesh structure for the subdomain 3



(a) measured rib thickness (mm)



(b) axial velocity components (mm/sec)

Fig. 6 Comparison of the results

5. 결론

이상으로 본 연구에서는 철도차량 마루부재의 압출공정 시뮬레이션을 위한 유한요소해석 시스템을 개발하였으며, 보다 효율적인 계산을 위해 영역분할에 의한 격자세분화 기법을 제안하였다. 개발된 해석기법을 사용하여 포트홀 금형을 사용한 철도차량 마루부재의 압출공정의 성형해석을 수행하였다. 또한 해석결과를 실험결과와 비교하여 해석의 신뢰도를 입증하였고, 향후 변경된 설계에 대해 성형 결과를 예측할 수 있는 시스템을 구축하였다. 이러한 해석시스템은 향후 압출 공

정설계 과정에 효과적으로 반영될 수 있을 것으로 전망된다.

후 기

본 연구는 고속전철 기술개발사업인 “고강도 알루미늄 형강재 압출기술개발”과제의 일환으로 건설교통부, 통상산업부, 과학기술부의 지원을 받아 수행된 것으로서 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) H. A. Schwarz, 1870, “Uber enen grenz bergang durich alternirender verfahren,” *Ges. Math. Abhandlungen*, Bd. 1, Berlin, 133 ~ 143.
- (2) G. Rodrigue and S. Shah, 1989, “Pseudo-boundary conditions to accelerate parallel Schwarz methods,” in G. F. Carey eds. in *Parallel supercomputing: method, algorithm and applications*, Wiley, New York, pp. 77 ~ 88.
- (3) D. Funaro, A. Quarteroni and P. Zanolli, 1988, “An iterative procedure with interface relaxation for domain decomposition methods,” *SIAM J. Numer. Anal.* Vol. 25, 1213 ~ 1236.
- (4) C. H. Lee and S. Kobayashi, 1973, “New solution to rigid plastic deformation using a matrix method” *ASME, J. of Engng. for Industry*, Vol. 95, 865 ~ 873.
- (5) 박근, 양동열, 1998, “영역분할에 의한 격자세분화기법을 사용한 압출공정의 유한요소해석,” *한국소성가공학회 추계학술대회 논문집*, pp. 83 ~ 86.
- (6) 이동현, 박재홍, 1998, “철도차량용 알루미늄 압출재 설계,” *대한금속학회회보*, 제 11 권, pp. 155 ~ 168.
- (7) R. Akeret, 1992, “Extrusion welds - quality aspects are now center stage”, *Proc. of 5th Aluminum Extrusion Technology Seminar*, Vol. 1, pp. 319 ~ 336.
- (8) Y. K. Lee and D. Y. Yang, 1996, “A new automatic mesh generation technique and its application to the finite element analysis of practical forging process”, *Proc. 5th Int. Conf. Tech. Plasticity*, pp. 409 ~ 413.