

## 영역분할에 의한 격자세분화기법을 사용한 철도차량 마루부재 압출공정의 3차원 유한요소해석

박 근\* · 이영규\*\* · 양동열\*\* · 이동현\*\*\*

(1999년 12월 30일 접수)

### Three-Dimensional Finite Element Analysis for Hollow Section Extrusion of the Underframe of a Railroad Vehicle Using Mismatching Refinement with Domain Decomposition

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

#### Abstract

In order to reduce weight of a high-speed railroad vehicle, the main body has been manufactured by hollow section extrusion using aluminum alloys. A porthole die has utilized for the hollow section extrusion process, which causes complicated die geometry and flow characteristics. Design of porthole die is very difficult due to such a complexity. The three-dimensional finite element analysis for hollow section is also an arduous job from the viewpoint of appropriate mesh construction and tremendous computation time. In the present work, mismatching refinement, an efficient domain decomposition method with different mesh density for each subdomain, is implemented for the analysis of the hollow section extrusion process. In addition, a modified grid-based approach with the surface element layer is utilized for three-dimensional mesh generation of a complicated shape with hexahedral elements. The effects of porthole design are discussed through the simulation for extrusion of an underframe part of a railroad vehicle. An experiment has also been carried out for the comparison. Comparing the velocity distribution at the outlet with the thickness variation of the extruded part, it is concluded that the analysis results can provide reliable measures whether the die design is acceptable to obtain uniform part thickness. The analysis results are then successfully reflected on the industrial porthole die design

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

---

\* 삼성전기(주) 금형개발실  
\*\* 한국과학기술원 기계공학과  
\*\*\* 동양강철(주) 기술연구소

## 1. 서 론

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. 이중 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. 이중 알루미늄 합금은 중량의 감소에 의한 주행속도의 향상, 에너지 절감 등의 장점을 가지면서도 강도, 강성 및 인성 등의 기계적 성질이 비교적 우수하여 많이 사용되고 있다.

현재 철도차량의 몸체는 압출(extrusion) 공정에 의해 제작되고 있다. 압출공정은 일정한 단면형상을 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. 특히 본 연구에서 대상으로 하는 철도차량의 마루부재는 중공형 형상으로 이루어져 있어 고난도의 설계기술이 요구된다.<sup>(1)</sup> 이러한 복잡한 형제의 생산을 위해서는 소재의 유동 및 제품의 품질 향상 등을 위해 여러 인자들이 고려되어야 한다.

이러한 문제점을 극복하기 위해 본 연구에서는 유한요소해석을 활용한 중공형 압출공정의 수치해석을 통한 금형설계기술을 개발하고자 한다. 그러나 중공형 압출공정은 집합실(welding chamber) 내에서의 유동형상이 매우 복잡하기 때문에 3차원적으로 해석하는데 많은 어려움이 있으며, 현재 원형 관(tube)과 같은 비교적 간단한 형상에 적용된바 있다.<sup>(2,3)</sup> 또한 3차원 유한요소해석의 경우 문제의 자유도가 증가되어 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.

본 연구에서는 압출공정의 해석을 보다 효율적으로 수행하기 위해 영역분할(domain decomposition)에 의한 격자세분화 기법<sup>(4)</sup>을 도입하였다. 영역분할법은 전체 영역을 수개의 부영역(subdomain)으로 분할하여 각 영역에 대해 독립적인 해석을 수행하고, 영역간의 경계지역(interface region)에서 각 영역의 해를 반복계산에 의해 수렴시킴으로써 계산시간을 획기적으로 절감할 수 있는 방법으로,<sup>(5-7)</sup> 본 연구에서는 분할된 부영역간에 서로 다른 격자밀도로 격자를 구성하여 경계영역간의 격자구조가 일치되지 않더라도 해석을 수행할 수 있도록 함으로써 보다 효율적인 격자를 구성할 수 있도록 하였다. 이러한 해석기법은 단면에 2개의 구멍을 포함한 日-자 형상의 압출공정의 해석에 적용된바 있으며,<sup>(8)</sup> 본 연구에서는 보다 복잡한 철도차량의 마루부재의 해석에 적용하여 시행착오에 의한 시간과 금형 제작비용을 효과적으로 절감하고자 한다.

## 2. 철도차량 마루부재의 압출공정의 설계

### 2.1 중공형 소재의 압출공정

압출공정은 임의의 단면형상을 가진 형체를 생산하기 위해 널리 사용되는 소성가공 공정이다. 압출공정은 주로 알루미늄이나 강(steel)종의 소재에 널리 적용되고 있으며, 생산성과 경제성이 높다는 장점이 있다. 압출공정은 압출체의 단면형상에 따라 중실형(solid type) 압출공정과 중공형(hollow type) 압출공정으로 구분된다. 이중 중실형 단면은 기하학적으로 단일 폐곡선(singly connected curve)으로 정의되는 단면을 의미하며, 이때 금형은 압출체의 단면형태대로 가공되어 상대적으로 금형설계 및 제작공정이 용이하다.

반면에 중공형 단면은 여러 개의 폐곡선(multiply connected curve)으로 정의되는 단면, 즉 단면 내에 구멍이 존재하는 경우를 의미한다. 중공형 압출공정에서 소재의 외측 형상은 금형의 형상에 의해 결정되는 반면, 소재의 내측 형상은 만드렐(mandrel)에 의해 결정된다. 이때 만드렐과 금형의 연결을 위해 금형의 형상이 복잡해지게 되고, 그에 따른 소재의 유동 역시 복잡해지게 된다. 이러한 요인으로 인해 중공형 압출공정의 금형설계에 많은 어려움이 수반된다.

중공형압출체의 생산을 위해서는 컨테이너(container) 안에 장착되어 있는 소재에 압력을 가하여 여러 형태의 보조금형을 사용하여 분리(splitting)하고 이를 다시 재결

합(re-welding)하는 과정을 거치게 된다. 이때 소재의 분리를 위해서 사용되는 대표적인 보조금형으로는 포트홀 금형(porthole die), 스파이더 금형(spider die), 브릿지 금형(bridge die)이 있다. Fig.1 에 이러한 3가지 금형의 개략적인 형상을 도시하였다.<sup>(9)</sup>

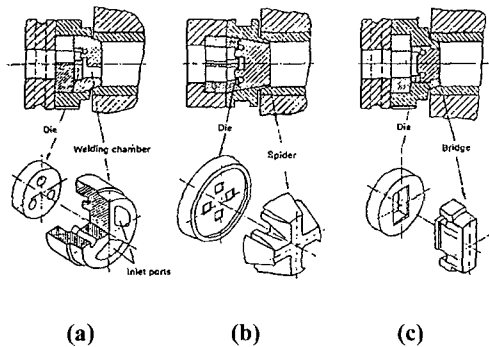


Fig. 1 Three types of dies for hollow section extrusion  
(a) porthole die (b) spider die (c) bridge die

본 연구에서는 이중 포트홀 금형을 사용한 중공형체의 압출공정을 대상으로 하겠다. 이때 포트홀 금형의 각 구멍에 의해 분리된 소재는 포트홀 금형에 연결되어 있는 만드렐과 형상금형 사이의 집합실(welding chamber)에서 재결합되어 원하는 단면형상으로 압출되어진다. 이러한 현상은 일종의 고상 압착(solid state bonding)으로 접합(seam welding)이라 명명된다.<sup>(10)</sup>

2.2 철도차량 마루부재(Underframe)의 압출공정

알루미늄을 사용한 철도차량의 제작은 1970년 이전까지는 알루미늄 골재에 알루미늄 판재를 리벳 결합시킴으로써 제작되어 왔다. 그러나 1980년대 후반에 들어 유럽에서 7,500톤급 이상의 초대형 압출기를 사용하여 최대 폭 700mm에 이르는 트러스(truss) 형태의 광폭 중공형체의 압출기술을 개발하여 일체형의 형체를 생산함으로써 획기적으로 차량의 경량화와 조립공수의 절감이 가능해졌다. 또한 차량 교차시, 혹은 터널 입출시에 발생하는 공기역학적 충격에 대한 저항성이 향상되었으며, 높은 차체강성을 얻을 수 있었다.<sup>(1)</sup> Fig. 2의 (a)에 이와 같이 광폭 트러스구조의 형체로 구성된 철도차량의 예를 도시하였다.

본 연구에서는 철도차량의 몸체를 구성하고 있는 여러 형체중에 Fig. 2의 (b)과 같은 마루부재(underframe)의 압출공정(포트홀 금형 사용)에 대해 고찰해보도록 하겠다. 단면형상을 보면 총 9개의 구멍을 포함하고 있으며, 최소 두께가 2.5mm로 전체 크기(폭 540.3mm)에 비

해 두께가 상대적으로 작아 성형시 많은 문제점이 따를 것으로 예상된다. 올바른 압출금형의 설계를 위해서는 이러한 문제점을 고려하여 포트홀의 형상, 개수, 크기 및 위치 등의 여러가지 설계변수를 설정해주어야 한다. 이러한 설계변수의 변화는 금속의 유동특성을 좌우하며, 잘못 설계되었을 경우 포트홀별로 유입되는 유동의 불균형을 초래하여 결과적으로 제품의 정밀도뿐 아니라 물성에도 나쁜 영향을 미치게 된다. Fig. 3은 철도차량 마루부재의 압출공정에서 금속 유동의 불균형으로 인해 발생하는 소재의 결함을 보여준다.<sup>(10)</sup>

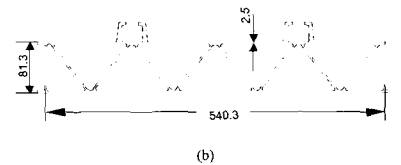
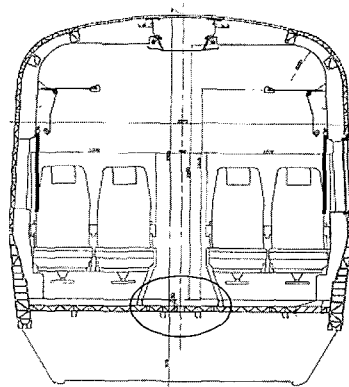


Fig. 2 Schematic description of a railroad vehicle  
(a) sectional view of a railroad vehicle  
(b) Schematic description of the underframe part

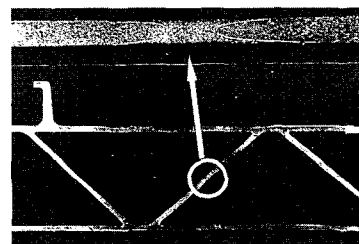


Fig. 3 Defects of the hollow section extrusion process

이와 같은 여러가지 설계 변수에 대한 최적의 금형설

계를 위해서는 수차례의 시행착오를 거치게 되며, 그러한 과정에서 많은 시간과 경비가 소요된다. 본 연구에서는 주어진 설계조건에 대해 유한요소해석을 수행하여 결과를 비교함으로써 설계변수의 영향을 파악하여 최적의 급형설계를 선정하는데 반영하고자 한다.

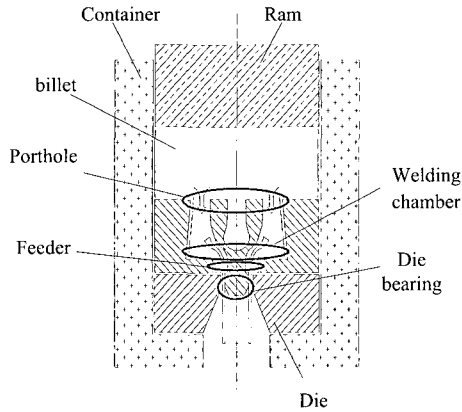


Fig. 4 Schematic description of the porthole die set

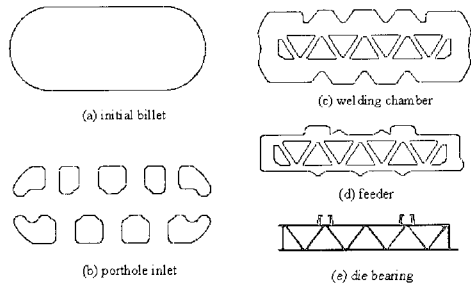


Fig. 5 Sectional view of the die set

Fig. 4에 마루부재 성형을 위한 압출급형의 구조를 도시하였다. 급형의 각 부분을 살펴보면 크게 초기소재, 포트홀, 접합실, 피더부(feeder), 베어링부로 구분할 수 있으며, Fig. 5에 각 부위의 단면형상을 도시하였다. 제품의 단면폭이 넓은 점을 감안하여 원형 소재 대신 Fig. 5의 (a)와 같은 4각 단면의 소재를 사용하였으며, 이때 소재의 폭은 580mm, 높이는 250mm이다. Fig. 6은 위의 구분을 기준으로 5개의 부영역으로 분할하여 3차원 CAD로 모델링한 형상이다. 마루부재의 경우 형상이 복잡하고 제품의 두께가 매우 얇아 유한요소해석을 위해서는 많은 개수의 격자가 요구되며, 결과적으로 엄청난 해석시간이 소요될 것으로 예상된다. 본 연구에서는 이러한 관점에서 계산시간을 효과적으로 절감할 수 있는 수

치적 기법을 개발하여 압출공정의 유한요소해석에 적용하였으며, 구체적인 내용에 대해서는 다음 장에서 언급하기로 하겠다.

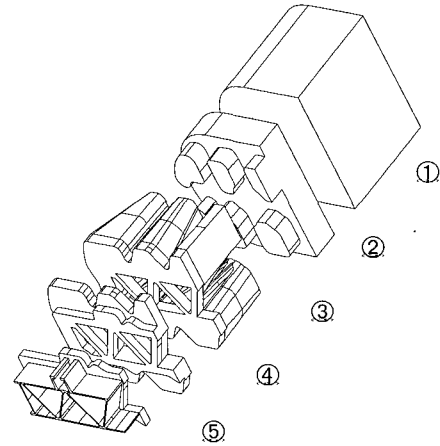


Fig. 6 Three-dimensional image of five subdomains

### 3. 성형해석을 위한 기본 수식화

#### 3.1 강소성 유한요소 수식화

본 연구에서는 강소성 유한요소 수식화를 사용하여 압출공정의 성형해석을 수행하였다. 강소성 재료의 구성방정식은 다음과 같다.<sup>(11)</sup>

$$\dot{\sigma}_{ij} = \frac{1}{\lambda} \dot{\epsilon}_{ij} \quad (1)$$

이때  $\dot{\sigma}_{ij}$ ,  $\dot{\epsilon}_{ij}$ 는 각각 편차응력 및 변형률속도 성분을 의미하며,  $\lambda$ 는 von-Mises 항복조건에서 다음과 같다.

$$\lambda = \frac{3}{2} \frac{\bar{\dot{\epsilon}}}{\sigma} \quad (2)$$

여기서

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \dot{\sigma}_{ij} \dot{\sigma}_{ij}}, \quad \bar{\dot{\epsilon}} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}} \quad (3)$$

이다. 위 식들을 사용하여 변분정리를 적용하면 강소성 재료에 대해 다음과 같은 변분방정식을 얻을 수 있다.

$$\int_{\Omega} \bar{\sigma} \delta \bar{\dot{\epsilon}} d\Omega + K^* \int_{\Omega} \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v d\Omega - \int_{\Gamma_f} f_i \delta u_i d\Gamma = 0 \quad (4)$$

여기서  $K^*$ 는 비압축성조건을 부과하기 위한 벌칙상수로 매우 큰 양수이다. 식 (4)를 유한요소 수식화하면 속도장  $u_i$ 에 대한 비선형 방정식으로 표현되므로 Newton-Raphson 반복법으로 선형화시켜 해를 구한다.

### 3.2 영역분할에 의한 반복계산

식 (4)에 의해 표현된 변분식을 영역  $\Omega$ 에 대해서 강소성 유한요소 수식화에 의해 이산화하면 다음과 같은 행렬방정식을 얻을 수 있다.

$$Ku = f, \quad \text{in } \Omega \quad (5)$$

$$u = g, \quad \text{on } \Gamma \quad (6)$$

여기서  $K$ 와  $f$ 는 각각 요소강성행렬과 하중벡터를,  $\Gamma$ 는 영역  $\Omega$ 의 경계를 의미한다. 이때 영역  $\Omega$ 를 Fig. 7과 같이  $\Omega_1$ 와  $\Omega_2$ 의 2개의 부영역으로 분할할 수 있다. 분할된 2개의 부영역에 대해 Schwarz의 반복계산 수식화(Schwarz's alternating procedure)를 도입하면 부영역  $\Omega_1$ 에 대해 식 (5)와 (6)은 다음과 같이 표현된다.<sup>(5)</sup>

$$K_1 u_1^{(k)} = f_1, \quad \text{in } \Omega_1 \quad (7)$$

$$u_1^{(k)} = g, \quad \text{on } \Gamma \quad (8)$$

$$u_1^{(k)} = u_2^{(k-1)}, \quad \text{on } \Gamma_1 - \Gamma \quad (9)$$

$$\frac{\partial u_1^{(k)}}{\partial n} = \frac{\partial u_2^{(k-1)}}{\partial n}, \quad \text{on } \Gamma_1 - \Gamma \quad (10)$$

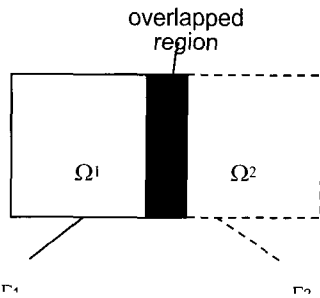


Fig. 7 Schematic description of domain decomposition

이때 아랫첨자 1과 2는 각각 부영역 번호를, 윗첨자 (k)는 현재의 축차횟수(iteration step)를 의미한다. 이때 (9), (10)식은 부영역간의 경계영역에의 속도 및 1차 미

분항의 연속조건을 의미하며 부영역  $\Omega_2$ 에 대해서도 마찬가지로 방법으로 유도할 수 있다. 이와 같이 중복된 영역에서의 속도성분은 인접 영역에서의 계산결과를 반영하여 단계적으로 수정되며, 이러한 반복계산은 경계영역에서의 오차가  $10^{-5}$  이하로 수렴될 때까지 수행하였다.

### 3.3 영역분할에 의한 격자세분화

영역분할에 의한 격자세분화의 기본 개념은 해석 영역을 분할하고, 분할된 영역에 대해 격자밀도를 차별화하여 격자를 구성한다는 점이다. 이때 부영역간의 격자밀도의 차이를 고려하기 위해 수정된 속도천이과정<sup>(4)</sup>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. 수정된 속도천이과정의 수식화는 다음과 같이 요약된다.

$$u_c^{(k)} = \alpha^{(k)} Q^{(k-c)} u_f^{(k-1)} + (1 - \alpha^{(k)}) u_c^{(k-1)}, \quad \text{on } \Gamma_c - \Gamma \quad (11)$$

$$\frac{\partial u_c^{(k)}}{\partial n} = \alpha^{(k)} Q^{(k-1)} \frac{\partial u_f^{(k-1)}}{\partial n} + (1 - \alpha^{(k)}) \frac{\partial u_c^{(k-1)}}{\partial n}, \quad (12)$$

$$u_j^{(k)} = \beta^{(k)} P^{(k)} u_c^{(k)} + (1 - \beta^{(k)}) u_j^{(k-1)}, \quad (13)$$

$$\frac{\partial u_j^{(k)}}{\partial n} = \beta^{(k)} P^{(k)} \frac{\partial u_c^{(k)}}{\partial n} + (1 - \beta^{(k)}) \frac{\partial u_j^{(k-1)}}{\partial n} \quad (14)$$

여기서  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 세분화된 부영역의 해석결과를 고려하기 위한 가중치(weight factors)로서 0과 1 사이의 값으로 수렴속도(rate of convergence)에 따라 자동으로 조절된다.

### 3.4 3차원 격자구성기법

Fig. 6을 보면 부영역 3을 제외한 나머지 부영역은 2½차원적 특성을 지니고 있음을 알 수 있다. 이들에 대해서는 2차원 단면에 대해 격자를 구성하여 3차원으로 연장하는 방식으로 3차원 격자를 구성하여 주었다. Fig. 8에 부영역 1, 2, 4, 5에 대한 3차원 격자의 형상을 도시하였다. Table 1에 각 부영역별 절점 및 요소의 개수를

정리하였다. 여기서 부영역별로 중요한 부위를 차별적으로 세분함으로써 격자의 효율을 증대시킬 수 있었다.

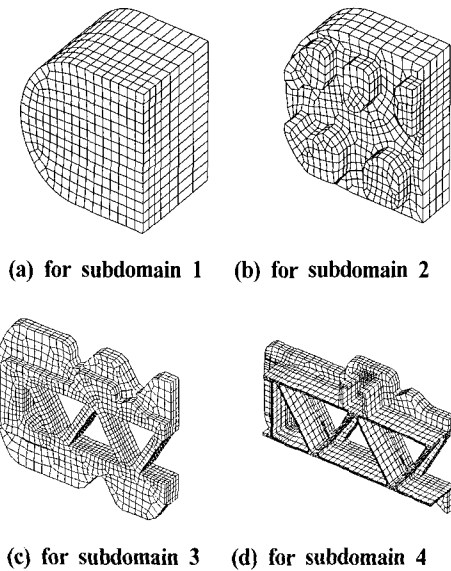


Fig. 8 Three-dimensional mesh structures

Table 1 The numbers of nodes and elements for each subdomain

Subdomain no.	1	2	4	5
No. of nodes	1896	2470	4745	6778
No. of elements	1470	1731	3228	4560

그러나 부영역 3은 형상이 매우 복잡하기 때문에 일반적인 방법을 사용하여 3차원 격자를 구성하기는 거의 불가능한 실정이다. 현재 3차원 6면체 요소를 사용한 자동 격자구성기법의 일환으로 마스터 그리드(master grid)에 기초한 방법<sup>(12~15)</sup>이 연구되어 왔다. 본 연구에서는 이중 Lee 와 Yang<sup>(15)</sup>이 제안한 수정된 마스터 그리드 기법을 사용하였다. 이 방법은 기존의 마스터 그리드 기법에 표면요소층(Surface Element Layer; SEL)을 도입하여 표면에서의 요소의 질을 향상시킨 방법이다. 이는 기존의 기법을 사용하여 격자를 구성한 후, 상대적으로 요소의 질이 떨어지는 표면영역에 두께가 미세하게 작은 요소층을 구성해준 뒤, 유연화 과정을 거쳐 최종 격자를 생성한다. 이러한 일련의 과정을 단계별로 살펴보면 다음과 같다.

- (1) Step 1 : 해석 영역의 CAD 모델링  
해석 영역의 정의를 위해 3차원 CAD를 사용하여 모

델링한다. Fig. 9의 (a)는 부영역 3에서 2번째 포트홀에 해당하는 부분을 CAD 모델링한 형상이다. 본 연구에서는 I-DEAS Master Series를 사용하여 모델링을 수행하였다.

- (2) Step 2 : 해석 영역의 표면정보 생성

생성된 CAD 모델의 효과적인 인터페이스를 위해 표면정보를 삼각형 패치(triangular patch) 데이터로 변환한다. 이러한 변환작업은 모델링된 형상의 표면에 삼각형 격자를 생성하거나 CAD 데이터를 사용하여 STL 파일을 작성하는 방법으로 이루어진다. 본 연구에서는 모델링된 형상의 표면에 삼각형 격자를 생성하는 방법을 사용하였다(Fig. 9의 (b)).

- (3) Step 3 : 마스터 그리드의 생성

마스터 그리드는 해석 영역 전체를 포함하는 격자시스템을 의미하며, 가능한 한 형상정보를 유사하게 묘사할 수 있는 범위 내에서 균일한 격자를 사용하여 구성한다. Fig. 9의 (c)에 2번째 포트홀에 대한 마스터 그리드를 도시하였는데, 이는 앞서 다른 부영역의 격자생성방법과 마찬가지로 2차원 격자를 구성하여 3차원으로 연장시키는 방법을 사용하였다.

- (4) Step 4 : 내부 격자구조(core mesh)의 생성

마스터 그리드에 속해있는 모든 요소에 대해 2단계에서 생성된 표면 정보를 사용하여 해석영역의 내부인지 외부인지를 구분한다. 이중 해석 영역의 외부에 속한 것으로 분류된 요소를 제거함으로써 결과적으로 내부의 요소들만 남겨둔다. 이때 각 요소의 8개의 절점 중 4개 이상의 절점이 내부에 속해 있을 경우 내부 요소로 간주한다. Fig. 9의 (d)는 이러한 과정을 거쳐 얻어진 내부 격자구조이다.

- (5) Step 5 : 내부 격자의 경계 사상(Boundary fitting)

전단계에서 생성된 내부 격자의 표면 부위는 들쭉날쭉하게 구성되어 있다. 격자구조의 표면을 2단계에서 정의된 표면정보와 일치시켜주기 위해서는 들쭉날쭉하게 배치되어 있는 표면상의 절점을 적절한 위치로 이동시켜주어야 한다. 이러한 목적으로 표면상의 절점의 사상을 위한 법선벡터를 다음과 같이 정의하였다.

$$n_i^N = \frac{\sum_j n_j^F}{\left| \sum_j n_j^F \right|}, \quad j=1, 2, \dots, N_{neighbor}^F \quad (15)$$

여기서  $n_i^N$ 는 절점 Ni에서의 법선벡터,  $n_j^F$ 는 절점 Nj에 인접한 경계면 Fj의 법선벡터이며,

$N_{neighbor}^F$ 는 절점  $N_i$ 와 인접해있는 경계면의 개수이다. Fig. 9의 (e)에 이러한 과정을 통해 경계사상을 수행한 후의 격자구조를 도시하였다.

(6) Step 6 : 표면요소층의 생성

경계사상을 거쳐 생성된 격자구조는 표면에 심하게 뒤틀린 요소가 존재하며, 해석의 정확도에 악영향을 끼치게 된다. 본 연구에서는 표면 요소의 질을 향상시키기 위해 다음과 같은 방법으로 표면 요소층을 생성하였다. 경계사상된 표면상의 절점을 매우 작은 거리( $10^{-3} \sim 10^{-5}$  mm)만큼 요소의 법선벡터에 따라 바깥쪽으로 이동(offset)시켜 새로운 절점을 구성한 후, 이를 연결시켜 두께가 매우 얇은 새로운 표면요소층을 생성해준다. 이때 생성된 표면요소층의 두께는 새로운 요소층의 생성에 의한 해석영역의 형상변화가 무시할 수 있을 정도의 값으로 설정한다.

(7) Step 7. 절점 위치의 유연화(Smoothing) 과정

생성된 표면요소층은 두께가 매우 얇으므로 역시 요소의 질이 좋지 못한 상태로, 이를 향상시키기 위해 다음과 같은 유연화 과정을 거쳐게 된다. 우선 표면상의 절점을 다음과 같이 경계면상에서 유연화시킨다.

$$P_N = \frac{\sum_{i=1}^{N_e} A_i^F C_i^F}{\sum_{i=1}^{N_e} A_i^F} \quad (16)$$

여기서  $P_N$ 은 표면상의 절점의 새로운 위치이며,  $A_i^F$ 는  $i$ -번째 인접하고 있는 경계면의 면적,  $C_i^F$ 는 인접 경계면의 중심좌표를 의미한다. 경계 절점들의 위치가 정해지면 이를 고정시킨 상태에서 내부 절점에 대해 마찬가지로 방법으로 유연화시켜준다.

$$P_N = \frac{\sum_{i=1}^{N_e} V_i^E C_i^E}{\sum_{i=1}^{N_e} V_i^E} \quad (17)$$

여기서  $P_N$ 은 내부 절점의 새로운 위치이며,  $V_i^E$ 는  $i$ -번째 인접하고 있는 요소의 체적,  $C_i^E$ 는 인접 요소의 중심좌표를 의미한다. 이러한 유연화 과정은 보통 5~10번의 반복계산을 거쳐게 된다. Fig. 9의 (f)에 이러한 과정을 통해 얻어진 최종 격자의 형상을 도시하였다.

부영역 3의 나머지 포트홀에 해당하는 부분도 마찬가지로 방법으로 격자를 구성할 수 있다. Fig. 10은 이러한 과정을 거쳐 얻어진 부영역 3의 최종 격자구조이며,

13274개의 절점과 10577개의 요소로 구성되어 있다.

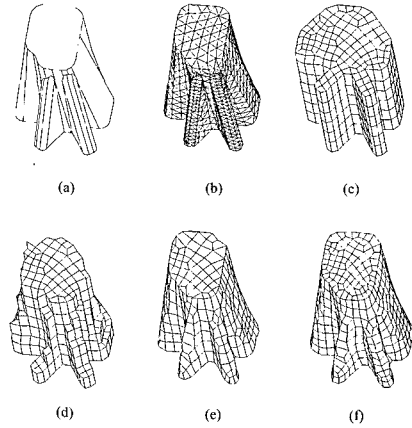


Fig. 9 Three-dimensional mesh generation procedure (a) CAD modelling (b) surface patch (c) master grid (d) core mesh (e) after boundary fitting (f) final mesh

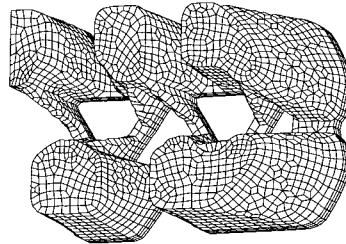


Fig. 10 Three-dimensional mesh structure for subdomain 3

#### 4. 철도차량 마루부재의 성형해석

##### 4.1 마루부재 압출공정의 유한요소 해석

본 연구에서는 철도차량 마루부재의 압출공정을 위한 급형설계 조건에 대해 유한요소해석을 수행함으로써 설계의 타당성을 검토하고자 한다. 성형해석에 의한 압출 급형의 평가를 위해서는 유동의 불균형 여부의 검토, 접합부의 접합강도 평가, 압출품의 형상정밀도 예측 등이 필요하다. 이중 접합부의 접합강도를 예측하기 위해서는 접합면의 위치, 형상 및 접합면에서의 정수압 응력성분의 정확한 예측이 필요하여 정상상태 강소성 유한요소해석으로는 다소 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 관점에서 예측이 가능한 유동의 불균형 여부를 검토함으로써 형상정밀도를 간접적으로 유추하는 방향으로의 접근방법을 채택하였다.

해석은 대칭성을 고려하여 1/2에 대해서만 수행하였

으며, 등은 정상상태로 가정하였다. 이때 작업조건은 Table 2와 같으며, 작업온도는 500° C, 램의 이동속도는 2mm/sec, 마찰계수는 0.2로 설정하였다. 해석은 Cray C90를 사용하여 수행되었다.

Table 2 Process parameters for the extrusion process

Billet material		Al6065
Temperature(°C)	Billet	500-545
	Die	412-498
	Container	470
Ram Speed(mm/sec)		1.2-2.4

Fig. 11에 반복계산 결과로부터 얻어진 압출속도의 분포를 부영역별로 도시하였다. 이중 5개의 포트홀을 통과하는 시점에서의 속도분포(Fig. 11의 (a) 참조)를 비교해보면 바깥쪽 부분에서의 속도가 상대적으로 낮음을 알 수 있는데, 이러한 경향은 부영역 3, 4, 5를 거쳐 최종 압출품까지도 계속됨을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 우선 금형설계에 문제가 있음을 확인할 수 있었고, 또한 이러한 문제점은 포트홀의 설계에 기인함으로 판단하여 금형설계 과정에 반영하였다. 한편 Table 3에 각 부영역별 자유도 및 계산시간을 비교하였다. 계산시간은 총 53,023초(14시간 43분)로 문제의 규모에 비추어볼 때 효율적인 해석이 가능해졌다고 판단된다.

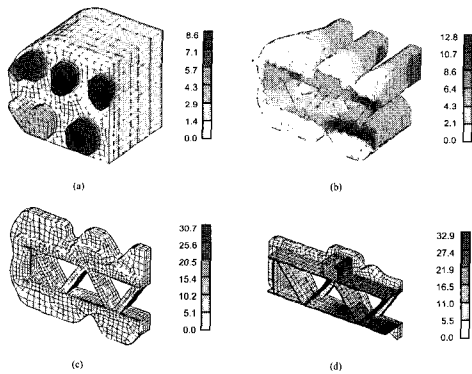


Fig. 11 Distribution of the axial velocity (a) for subdomain 1 & 2 (b) for subdomain 3 (c) for subdomain 4 (d) for subdomain 5

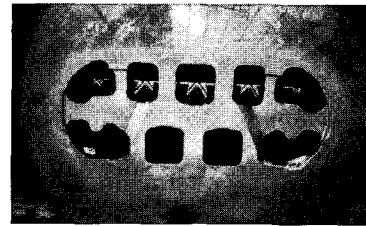
4.2 실험결과와의 비교

한편 해석결과의 신뢰성을 확인하기 위해 성형실험을 수행하였다. 시압은 동양강철㈜이 보유하고 있는 8,000톤 압출기를 사용하여 수행되었다. Fig. 12는 실험에 사용된

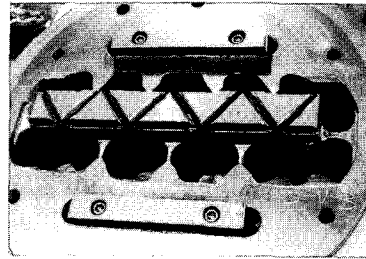
포트홀 금형의 사진이며, (a)와 (b)에 각각 입구와 출구부에서의 형상을 도시하였다. Fig. 13은 압출금형의 사진으로 접합실, 피더 및 베어링부의 형상을 확인할 수 있다. Fig. 14에 최종 성형된 제품의 절단면을 도시하였다.

Table 3 Summary of problem size and performance

Analysis no.	The 1 <sup>st</sup> domain		The 2 <sup>nd</sup> domain		No. of iterations	Elapsed time (sec)
	Subdomain no.	No. of Nodes	Subdomain no.	No. of Nodes		
1	1	1896	2	2470	8	2321
2	2	2470	3	13274	8	8457
3	3	13274	4	4745	12	26395
4	4	4745	5	6778	16	15850



(a) inlet viewpoint (porthole)



(b) outlet viewpoint (mandrel)

Fig. 12 Porthole die for experiment

Fig. 15에 해석결과로부터 얻어진 출구부의 속도분포를 실제 성형품의 두께와 비교하였다. Fig. 15의(a)를 보면 최종 제품의 사양이 살부위의 두께공차가 2.5mm ± 0.5mm인 점을 감안하면 양쪽 끝단 부위에서 불량 발생함을 알 수 있었으며, 이러한 경향은 해석결과로부터 얻어진 출구부 유동속도의 분포와 유사하여 결과의 신뢰성을 입증할 수 있었다. 따라서 보다 균일한 두께분포를



연기 위해서는 바깥쪽으로의 소재의 유입을 증가시키기 위한 포트홀 급형의 수정이 필요하다. 이때 기존의 해석 방법으로는 포트홀 급형만이 수정되더라도 그에 따른 접합실, 피더 및 베어링부까지 모두 다시 해석해야 하는 번거로움이 따른다. 이는 단순히 계산시간 측면에서만이 아니라 해당 부위의 격자를 모두 다시 구성해주어야 하기 때문에 상당히 많은 시간과 노력이 요구된다. 그러나 제안된 기법을 사용하면 해당 부영역의 격자만을 재구성하고 다른 부영역과의 경계정보를 재설정하여 해석을 수행함으로써 소요되는 시간을 획기적으로 절감할 수 있다.

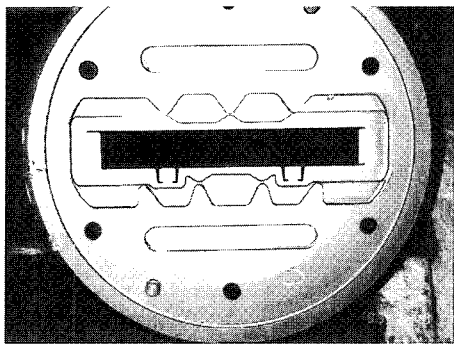


Fig. 13 Extrusion die (welding chamber, feeder and die bearing)

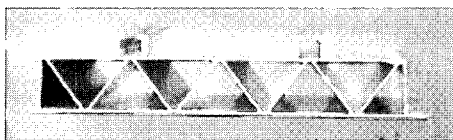


Fig. 14 Extruded part through the experiment

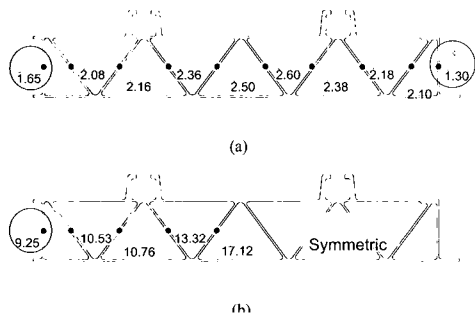


Fig. 15 Comparison with experiment results  
(a) Measurement data of the rib thickness (mm)  
(b) Axial velocity components at the corresponding reference points (mm/sec)

## 5. 결론

중공형 압출공정은 유동특성이 매우 복잡하여 급형설계시 많은 어려움이 수반된다. 특히 실제 산업현장에서 문제가 되는 경우는 대개 압출비가 높고 형상이 복잡한 경우로 그만큼 해석의 난이도도 높아진다. 이러한 이유로 유한요소법을 사용한 수치해석기법이 산업 현장에서 발생하는 문제를 해결하기에는 아직까지 많은 제약이 따르는 실정이다. 본 연구에서는 이러한 관점에서 해석의 난이도가 매우 높다고 할 수 있는 철도차량 마루부재의 압출공정의 유한요소해석을 효과적으로 수행하기 위해 다음과 같은 연구를 진행하였다.

(1) 포트홀 급형을 사용한 중공형 소재의 압출기술에 대해 고찰하고 이를 바탕으로 철도차량 마루부재의 압출 급형 설계안을 검토하였다.

(2) 계산의 효율성을 증대시키기 위해 영역분할에 의한 격자세분화 기법을 적용하였으며, 해석 영역의 기하학적 특성을 고려하여 5개의 부영역으로 구분하여 반복 계산을 수행하였다.

(3) 분할된 부영역의 부위별 기하학적 특성을 고려하여 격자밀도를 차별화하였으며, 이중 기존의 방법으로 격자구성이 불가능했던 부영역 3에 대해서는 수정된 마스터 그리드 기법을 적용하여 자동격자구성을 수행하였다.

(4) 실제 급형을 제작하여 성형실험을 수행하였고, 실험결과를 해석결과와 비교하여 해석의 신뢰도를 입증하였다.

이러한 연구결과를 바탕으로 향후 변경된 설계에 대한 성형 결과를 예측할 수 있는 시스템을 구축하였으며, 이러한 해석시스템은 향후 압출 공정설계 과정에 효과적으로 반영될 수 있을 것으로 전망된다.

## 후 기

본 연구는 고속전철 기술개발 사업인 "고강도 알루미늄 형강재 압출기술개발"과제의 일환으로 건설교통부, 통상산업부, 과학기술부의 지원을 받아 수행된 것으로서 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) 이동현, 박재홍, 1998, "철도차량용 알루미늄 압출재 설계", 대한금속학회회보, 제 11권, pp. 155~168.
- (2) X. Q. Zhang, Y. C. Lam, and C. Devadas, 1993,

- "Progress in numerical simulation of extrusion of aluminum sections", Proc. of the 4th Int. Conf. on Tech. of Plasticity, pp. 16~21.
- (3) H. G. Mooi and J. Huetink, 1995, "Simulation of complex aluminum extrusion using an arbitrary Eulerian Lagrangian formulation", Proc. 5th Int. Conf. Num. Meth. Indust. Forming Processes, pp. 869~874.
- (4) K. Park and D. Y. Yang, 1999, "Mismatching refinement with domain decomposition for the analysis of three-dimensional extrusion processes", accepted for publication in Int. J. Numer. Meth. Engng.
- (5) H. A. Schwarz, 1869, "Über einige Abbildungsaufgaben", J. Reine Angew. Math., Vol. 70, pp. 105~120.
- (6) M. Dryja and O. Widlund, 1992, "Additive Schwarz methods for elliptic finite element problems in three-dimensions" in Chan, T.F. Keyes, D.E. Meurant, G.A. Scroggs, J.S. and Voight, R.G. (Ed.), Proc. 5th Conf. Domain Decomposition Meths. for Partial Differential Equations, Soc. Indust. Appl. Math., Philadelphia.
- (7) K. Park, D. Y. Yang, and Y. S. Kang, 1999, "Three-dimensional finite element analysis for hollow section extrusion of a triply-connected section using mismatching refinement with domain decomposition", revised to Engng. Computations.
- (8) P. Le Tallec, 1994, "Domain decomposition methods in computational mechanics", Comp. Mech. Adv. Vol. 1, pp. 121~220.
- (9) K. Laue and H. Stenger, 1976, "Extrusion: processes, machinery, tooling", American Society for Metals, Metals Park, Ohio.
- (10) R. Akeret, 1992, "Extrusion welds - quality aspects are now center stage", Proc. of 5th Aluminum Extrusion Technology Seminar, Vol. 1, pp. 319~336.
- (11) C. H. Lee, and S. Kobayashi, 1973, "New solution to rigid plastic deformation using a matrix method", ASME, J. Engng. Indust., Vol. 95, pp. 865~873.
- (12) R. Kopp, K. Karhausen, and R. Schneiders, 1993, "Application of FEM to prediction of microstructure in hot forming of metals", Proc. 4th Int. Conf. Tech. Plasticity, pp. 1203~1211.
- (13) R. Taghavi, 1994, "Automatic mesh generation from CAD on vector-parallel and massively parallel supercomputers", CRAY Research Inc.
- (14) A. E. Tekkaya, and S. Kavakli, 1995, "3-d simulation of metal forming processes with automatic mesh generation", Steel Research, Vol. 66, pp. 377~383.
- (15) 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.