

# 반도체 공정에 이용되는 레일의 최적설계

## Optimum Design of Rail in Semiconductor Processing

임오강 †     조재승\*     김학선\*\*     황종균\*\*\*  
Lim, O-Kaung   Cho, Jae-Seung   Kim, Hak-Sun   Hwang, Jong-Kyoon  
(논문접수일 : 2003년 11월 18일 ; 심사종료일 : 2004년 8월 27일)

### 요 지

자동반송 시스템인 천장용 호이스트 이송장치는 천장을 반송공간으로 반도체 웨이퍼를 운반하는 장치이며, 분진이나 소음 및 진동에 대단히 민감하다. 구동부와 레일의 접촉에 의해서 발생하는 마찰, 분진 소음 등의 문제를 최소화시키고 구동부와 이재부의 자중에 따른 구조물 자체의 안정성 검토를 수행하기 위해서 레일의 구조해석 및 최적설계가 필요하다. 본 연구에서는 구동부의 자중에 의한 레일의 기울기를 관심영역으로 설정하고, 변위 및 기울기를 최소화시키기 위해서 위상최적화, 근사 최적화 기법을 도입하여 최적화를 수행하였다. 구조해석은 ANSYS를 이용하였고, 3D 모델링은 Pro/Engineer를 이용하였다. 최적화 알고리즘은 수렴성이 높은 순차 이차 계획법인 PLBA(Pshenichny-Lim-Belegundu-Arora) 알고리즘을 사용하였다.

**핵심용어** : 자동반송 시스템, 위상최적설계, 치수 최적설계

### Abstract

There is an over head hoist transporter(OHT) by the system for delivering the wafer in semiconductor processing. The transfer system consist of carrier, vehicle, rail and support. The rail supporting the wafer and the transfer system should maintain enough strength and stiffness. To achieve lightness and enough strength and stiffness, optimization algorithm should be introduced in design process. In this study, two kinds of section shapes as L-type, C-type is carried out the structure analysis and optimization. Total weight of rail is to be minimized while displacement should not exceed limit. To improve the initial model, topology optimization is done by the plain problem. Size optimization is done with 3D solid element and PLBA algorithm, the RQP algorithm. The weight of optimum model as L-type, C-type is decreased by 2.3%, 10% respectively. It is improved better than the initial model in the strength and stiffness of the structure.

**keywords** : over head hoist transporter, topology optimization, size optimization

## 1. 서 론

반도체 공정에서 200mm 웨이퍼는 이미 일부의 메이커에서 자동반송시스템의 도입이 진행되고 있지만, 300mm라인에서는 웨이퍼 캐리어 중량의 증대에 따라서 사람 손에 의한 웨이퍼 반송이 점점 곤란하므로 완전 자동화가 필요하다.

자동반송 시스템인 Over Head Hoist Transporter(OHT)는 천장을 반송공간으로 반도체 웨이퍼를 운반하는 장치이

며, 분진이나 소음 및 진동에 대단히 민감하다. 구동부와 레일의 접촉에 의해서 발생하는 마찰, 분진 소음 등의 문제를 최소화시키고 구동부와 이재부의 자중에 따른 구조물 자체의 안정성 검토를 수행하기 위해서 레일의 구조해석을 수행하였다.<sup>1)</sup> 현재 이와 유사한 연구결과는 천장 크레인<sup>2)</sup>, 철도 레일<sup>3)</sup> 등이 있으나, 기존의 방법과 반도체 공정에 이용되는 레일 해석 방법에는 약간의 차이가 있다. 현 레일의 형상을 해석 모델로 선정하고 유한요소법을 사

† 책임저자, 정회원·부산대학교 기계공학부 기계기술연구소 교수  
전화 : 051-510-2306 ; Fax : 051-582-9164

E-mail: Oklim@pusan.ac.kr

\* 부산대학교 대학원 기계설계공학과

\*\* 해양대학교 대학원 기관공학과

\*\*\* (주) 대명엔지니어링

• 이 논문에 대한 토론을 2004년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2005년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

용하기 위해 형상 모델을 구상하고 형상모델에 하중조건과 변위 경계조건을 선정하였다. 하중은 구동부와 이체부가 레일에 미치는 자중으로 적용시켰고, 경계조건은 지지부에 의해서 레일에 고정되는 부분으로 설정하였다. 또한 구동부와 레일의 접촉에 의해서 생기는 레일 기울기를 관심영역으로 설정하였다. 본 과제에서는 정적 상태에서의 하중 조건만 고려하였다.

위상 최적화 기법을 도입하여 초기에 제시되었던 모델의 문제점을 제시하고, 그 문제에 대한 대안을 제시하였으며, 그 결과를 구조해석을 통해서 초기형상보다 개선되었음을 검증하였다. 또한, 근사 최적설계 기법을 도입하여 초기형상의 최적화를 수행하였다. 초기 형상을 토대로 근사 최적설계기법을 수행하여 최적값을 도출하였다. 이상에서 구조해석은 기존의 상용 해석 프로그램인 ANSYS<sup>4)</sup>를 이용하였고, 3D 모델링 작업은 Pro/Engineer<sup>5)</sup>를 이용하여 수행하였으며, 최적설계를 위해서는 수렴성이 우수하고 사용자의 이용이 편리한 반복 이차 계획법인 PLBA 알고리즘<sup>6)</sup>을 사용하였다. 허용치는 크레인의 제작 및 안전기준에 대한 KS규격<sup>7)</sup>에 따라 적용시켰다.

## 2. 구조해석

### 2.1 반송시스템 구조

반도체 공정에 사용되는 반송시스템은 크게 반도체 웨이

퍼를 운송시키는 이동부와 반송시스템을 구동하는 구동부와 구동부를 지지하는 레일, 천장에서 레일을 고정시키는 지지부로 구성된다. 그림 1은 반송 시스템 OHT의 전반적인 형상을 보여준다.

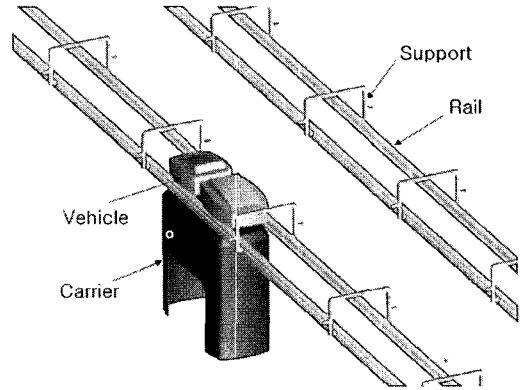
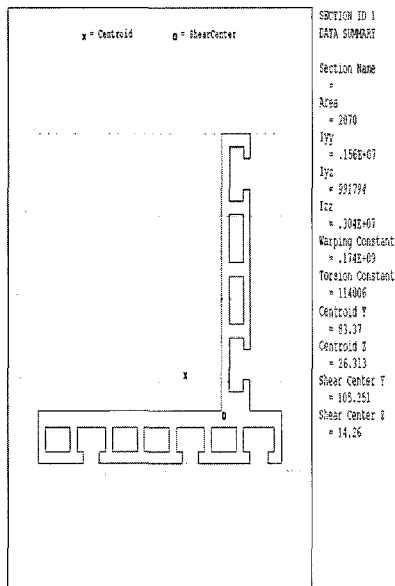


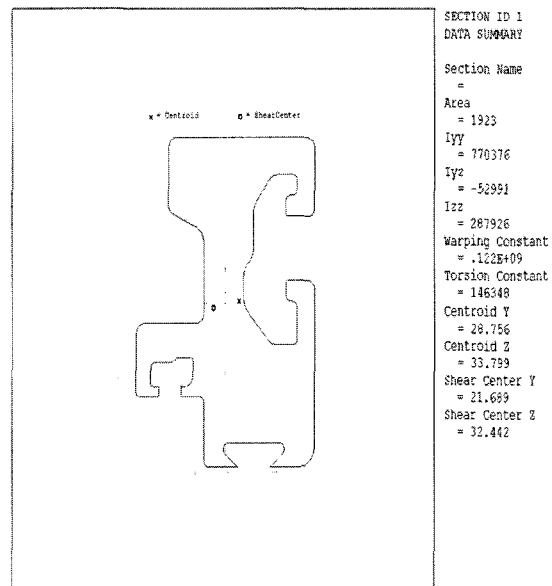
그림 1 Over Head Hoist Transporter system

### 2.2 유한요소 해석

기존의 C형상에 대해서 시스템 상에서 성공적으로 작동 중이다. 실제 C형상에 대한 상업적으로 사용되고 있기 때문에 구조적 안정성은 검증된 상태이다. 따라서 기존의 형상에 대한 개선된 L형상에 대한 신뢰성을 검증하기 위해서 C형상을 표준규격을 설정하여 구조물의 유한요소해석을 수행하고, 최적설계를 통해서 형상의 개선을 도모하였



(a) L-type



(b) C-type

그림 2 Two sectional shapes

다. 사용된 재료 물성치는 표 1과 같으며, 단면 형상은 그림 2에 나타내었다.

OHT에 사용된 전체 레일의 길이는 15,600mm×1,200mm이다. 구동부와 레일의 접촉에 의한 변위에 관심영역이기 때문에 3D Solid 요소를 이용한 전체 해석을 수행하였다. 하중조건은 구동부의 바퀴가 레일에 접촉하여 발생하는 분포하중을 집중하중으로 대체하여 735N을 수직하중으로 적용시켰다. 변위 경계조건은 1,200mm 간격으로 지지부에 의해서 레일이 고정되므로 그 간격만큼 구속조건을 적용시켰다.

표 1 AL6063T5 Material properties

Material data	SI
Ultimate tensile strength	185 MPa
Yield tensile strength	145 MPa
Modulus of elasticity	69 GPa
Poisson's ratio	0.33
Shear modulus	25.8 GPa
Yield shear strength	115 MPa
Allowance displacement	-1.5mm

본 연구에서 접촉부에 대한 변위를 관찰하였다. 접촉부의 처짐각에 따라서 레일 위를 움직이는 구동부의 바퀴 또한 그 각에 따라서 기울어지게 된다. 그 결과 바퀴의 불균형에 의한 진동이나 소음을 발생하게 된다. 정밀도를 요구하는 반도체 공정에서 진동이나 소음은 치명적인 오류이며, 이런 오류는 OHT의 정확한 웨이퍼 반송에 문제를 발생시킬 수 있다. 또한 이런 사소한 노이즈가 반복 작용으로 인해서 피로가 증가하게 되어 치명적인 기계적 결함을 일으킬 수 있다. 따라서 접촉부의 처짐각을 최소로 하는 최적화를 수행해야 된다.

접촉부에 대한 정확한 변위 정보가 필요하기 때문에 3D Solid 요소를 이용하였다. 해석을 위해서 상용 해석 프로그램인 ANSYS를 사용하였으며, 바퀴와 레일이 접촉하는 부분의 절점 변위를 측정하였다. 두 형상의 접촉부 변위 분포는 표 2와 같으며 접촉하는 노드에 따라서 절점 위치를 번호로 설정하였으며, 그에 따른 접촉부 절점 변위를 추세화 시켜서 그림 3과 같이 처짐각 그래프를 도시하였다. 두 형상의 평균변위 및 처짐각은 L형상이 -0.147mm, 0.126도이며, C형상은 -0.12mm, 0.027도이다. 개선된 형상을 제시하기 위해서는 초기 형상에 대한 구조적인 검증이 필요하며, 이를 수행하기 위해서 위상최적화 기법을 도입하여 개선된 초기 형상을 제시하였다.

표 2 Contact displacement of two sectional shapes (Unit :mm)

Distance	L-type	Distance	C-type
1st point	-0.17268	1st point	-0.11456
2nd point	-0.16428	2nd point	-0.11634
3rd point	-0.15577	3rd point	-0.11814
4th point	-0.14707	4th point	-0.11995
5th point	-0.13823	5th point	-0.12178
6th point	-0.12919	6th point	-0.12363
7th point	-0.11976		
Average disp.	-0.14670	Average dis.	-0.11990
Angle[degree]	0.126	Angle[degree]	0.027

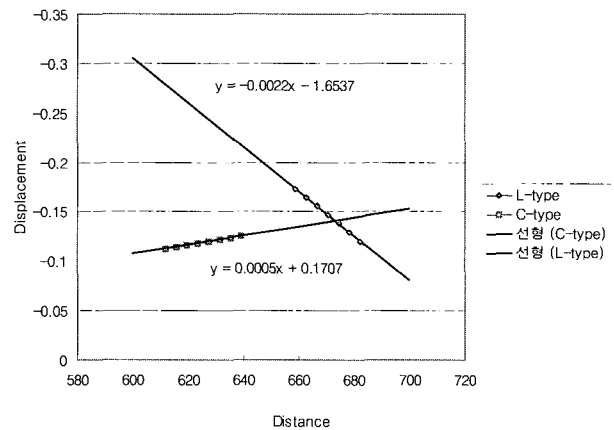


그림 3 Graph of gradient of two sectional shapes

### 3. 위상최적 설계

#### 3.1 위상 최적설계 개념

개념설계 단계에서 시스템의 요구조건을 고려한 최적의 형상을 도출하기 위해서는 설계자의 경험이나 직관뿐만 아니라 공학적인 측면에서 잘 정립된 설계가 요구된다. 위상 최적설계 기법<sup>8)</sup>은 시스템의 초기 요구조건들인 성능, 외력, 경계조건 및 공간 등을 고려한 시스템의 초기위상을 최적화 알고리즘을 이용하여 도출하기 때문에 개념설계에 이용 가능한 것으로 여러 문헌에 발표되고 있다. 시스템의 형상을 표현하는 방법은 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 첫 번째는 직접적인 방법으로 공간상의 모든 점에서 재료가 있고 없음을 나타내어 표현할 수 있고, 두 번째는 간접적인 방법으로 재료와 공간의 경계로 표현할 수 있다. 1980년대 후반이후 많은 연구가 진행되어 온 위상 최적설계는 첫 번째 방법을 이용하고 있다. 즉 재료가 있으면 '1', 없으면 '0'을 가지는 지시함수를 통하여 주어진 공간에

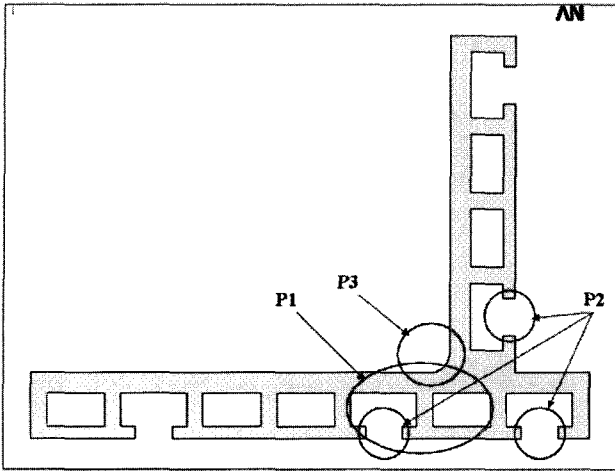


그림 6 An alternative plan about L-type of initial design

서의 시스템 형상을 표현한다. 그리고 지지함수에 포함되는 설계변수는 주로 재료의 밀도가 이용된다. 이와 같은 방법으로 최적의 위상과 함께 최적에 매우 근접한 형상을 얻을 수 있고, 이렇게 얻어진 형상을 초기 형상으로 하여 세부설계를 진행시키면 최종적으로 설계 요구조건에 부합되는 최적형상을 얻을 수 있다.

### 3.2 L형상 레일의 위상 최적설계

#### 3.2.1 문제 정의 및 결과

본 연구에서 레일의 초기 형상이 정의되지 않은 상태라 가정한다. 레일이 조립될 공간, 경계조건 및 외부하중 조건만 알려진 상태에서 최적의 위상을 도출하고자 한다. L형상에 대한 위상최적화를 수행하였고, 사용된 공간은 너

비는 136mm, 높이는 97.5mm의 2D 단면 형상이다. 하중조건과 경계조건은 앞에서 논의했던 구조해석의 경우와 같은 조건을 적용시켰다. 그림 4는 위상 최적화를 위한 L형상의 설계영역과 경계조건이다. 요소는 고체 요소를 사용하여 총 3488개의 요소로 분할하였다. 설계변수는 각 요소의 밀도이고, 목적함수는 구조물의 굴성에너지의 최소화 즉, 구조물의 전체 강성의 최대화이다. 제약 조건은 전체 설계 영역에서 사용하는 재료의 30%만 사용하도록 하였다.

위상 최적설계의 결과는 그림 5에 나타내었다. 각각 요소 제거를 70%를 적용시켰다. 위상최적화를 통해서 개념적인 초기 형상의 보완 사항을 제시하였다.

외관보와 같은 형태라고 판단되기 때문에 지지부의 보강을 통해서 개선된 모델을 제시할 수 있었다. 개선될 사항에 대한 3영역의 대안을 제시하였다. 첫 번째 영역으로 L형태의 가로부재와 세로부재의 교차하는 부분의 두 홈을 메운 형태로 이 영역을 P1으로 설정하였다. 두 번째 영역은 교차부분의 끊어진 부재의 3부분을 연결한 형태로 P2로 설정하였고, 세 번째 영역으로 부재 교차부분의 라운드 부분의 반경을 보강한 형태로 이 영역을 P3으로 설정하였다. 그림 5에서 초기 형상에서 보강부의 개념적인 위치를 직관적으로 판단 할 수 있다. 위상최적 결과와 직관에 따른 설계변경 영역에 대한 대안을 그림 6에서 나타내었다.

#### 3.2.2 개선된 모델에 대한 타당성 검토

앞 절에서 제시되었던 개선된 모델의 타당성을 검증하기 위해서 구조해석을 수행하였다. P1과 P2에 대한 구조해석을 각각 수행하였고 그 결과는 표 3과 같다. 초기 모델의

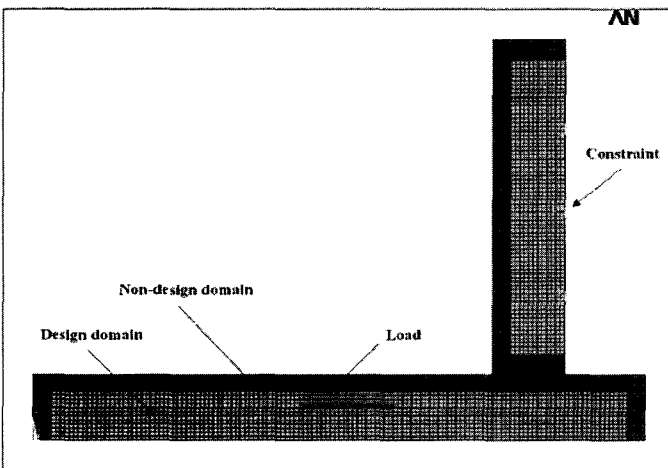


그림 4 Boundary condition and design domain of L-type rail topology optimization

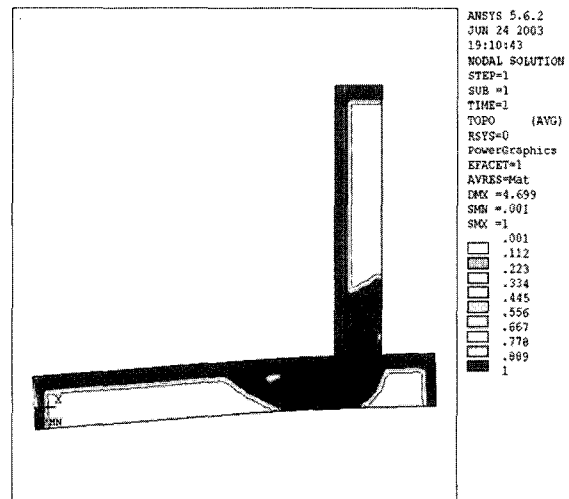


그림 5 Topology optimization result of L-type rail

평균변위 -0.1467mm에 비해서 개선된 모델의 평균변위 P1, P2 모두 -0.12mm로 -0.02mm 정도 떨어진 것을 알 수 있다. 반면에 변위 감소에 비해서 전체 체적은 증가한 것을 알 수 있다. 하지만 처짐각을 최소화시키기 위해서 어느 정도의 체적 증가는 큰 문제로 제기되지 않는다. P1과 P2를 비교해 볼 때 같은 변위를 나타냈지만, 체적을 비교해 볼 때 8% 정도의 차이를 나타낸다. 효율적인 측면을 고려해 볼 때 P2의 대안이 더 적당하다고 판단되었다.

P3에 대한 검토에 있어서 L형상의 라운드 보강에 따라서 변위의 감소는 당연하다고 판단된다. 라운드 최대 반경은 다른 부품과의 간섭이 발생하지 않는 r=20mm로 설정하였다. P3와 P1, P3와 P2의 관련성이 얼마나 작용하는지에 대해서 비교해 보았다. 표 3에서 보듯이 반경 r=20mm일 때 P1는 -0.105mm, P2는 -0.1068mm으로 r=5mm일 때와 비교해 보면 -0.02mm정도의 감소를 볼 수 있다. 그에 비해서 체적은 약 3.8%증가하였다. 증가된 체적에 비해서 변위값 자체는 상당히 떨어진 것을 알 수 있다. 결론적으로 P2의 반경 r=20mm인 단면 형태가 개선된 모델로 적당하다고 판단되었다.

### 3.3 C형상 레일의 위상최적설계

#### 3.3.1 문제 정의 및 결과

L형상뿐만 아니라 C형상에 대한 기존 형상의 개선할 부분이 있으리라 판단되기 때문에 본 과제에서는 C형상에 대한 위상최적화를 수행하였다. 레일의 초기 조건인 하중과 경계조건만 알려진 상태에서 최적의 위상을 도출하고자 한다. 사용된 공간은 너비 50mm, 높이 67mm인 2D 단면형상이다. 하중조건 및 경계조건은 앞에서 제시한 바와 같다. 위상 최적화를 위한 설계 영역 및 경계조건은 그림 7과 같다. 요소는 고체 요소를 사용하여 총 705개의 요소

로 분할하였다. 설계변수는 각 요소의 밀도이고, 목적함수는 구조물의 굴성에너지의 최소화이다. 제약 조건은 전체 설계 영역에서 사용하는 재료의 30%만 사용하도록 하였다. 위상 최적설계의 결과는 그림 8에 나타내었다. 개선된 모델에 대한 3영역 대안을 제시하였다. 첫 번째 C형상의 상단 앞쪽으로 차륜과 접촉하는 부분으로 하중에 큰 영향을 받지 않는 부분이나 부품간의 간섭이 발생하는 영역이라 설계 대상에서 제외시켰다. 이 부분을 C1으로 설정하였다.

두 번째는 형상의 중앙부분의 지지부 역할을 하는 영역으로 두 부분으로 나누어서 개선시켰다. 중앙부분의 아래쪽을 뒤로 메우는 형태와 위쪽을 앞으로 제거하는 형태이다. 각 형태를 C2-1, C2-2로 설정하였다. 세 번째 영역으로 C형상의 하단부분은 하중에 영향을 받지 않기 때문에 홀을 파는 형태로 이 영역을 C3로 설정을 하였다. C형상에 대한 초기 형상의 개선부분을 그림 9에 도시하였다.

#### 3.3.2 개선된 모델에 대한 타당성 검토

C형상에 대한 개선된 모델의 타당성을 검증하기 위해서 구조해석을 수행하였다. C2-1과 C2-2에 대한 구조해석을 각각 수행하였고 그 결과는 표 4와 같다. 초기 모델의 평균변위 -0.12mm에 비해서 개선된 모델의 평균변위 C2-1, C2-2는 -0.098mm, -0.010mm으로 비슷한 결과값을 도출하였다. 전체적인 기울기를 비교해 볼 때 C2-1, C2-2는 0.012도의 차이를 보였다. C2-1과 C2-2를 비교해 볼 때 같은 변위를 나타냈지만, 체적을 비교해 볼 때 4% 정도의 차이를 나타낸다. 체적증가에 비해서 변위, 기울기 감소 효율이 C2-1이 더 높다고 판단된다. C3에 대한 검토에 있어서 하중에 영향을 받지 않는 부분의 구멍을 팽으로써 부피 감소 효과가 있을 것이라 판단된다. 다른 부품과의 간섭이 발생하지 않는 R=5mm로 설정하였다. C2-1과 C3, C2-2와 C3의 관련성이 얼마나 작용하는지

표 3 Displacement analysis of improvement model (Unit :mm)

Dis.	Initial	P1		P2	
		r=5	r=20	r=5	r=20
1st point	-0.1727	-0.1406	-0.1207	-0.13822	-0.1209
2nd point	-0.1643	-0.1342	-0.115	-0.13249	-0.1163
3rd point	-0.1558	-0.1278	-0.1103	-0.12667	-0.1117
4th point	-0.1471	-0.1213	-0.1051	-0.12076	-0.1069
5th point	-0.1382	-0.1147	-0.0998	-0.11473	-0.1021
6th point	-0.1292	-0.1081	-0.0945	-0.10876	-0.0972
7th point	-0.1198	-0.1015	-0.0891	-0.10259	-0.0925
Volume(mm <sup>3</sup> )	67,469,000	76,288,191	78,957,367	70,134,658	72,803,834
Average	-0.1467	-0.1212	-0.1050	-0.1206	-0.1068
Angle(degree)	0.126	0.0916	0.0744	0.086	0.069

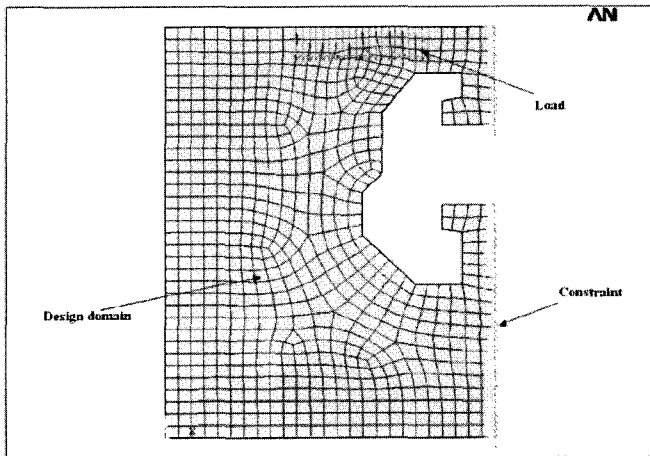


그림 7 Boundary condition and design domain of L-type rail topology optimization

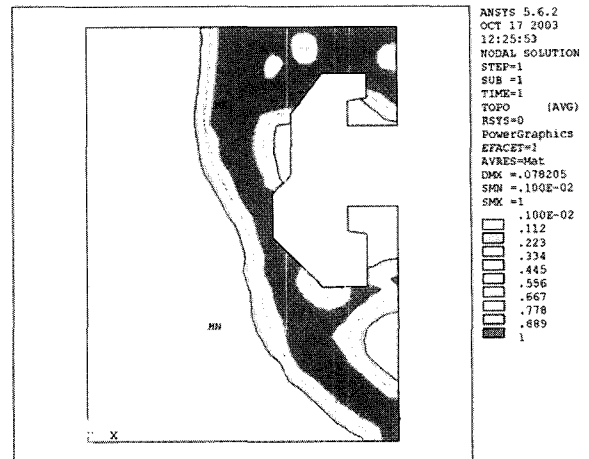


그림 8 Result of C-type rail topology optimization

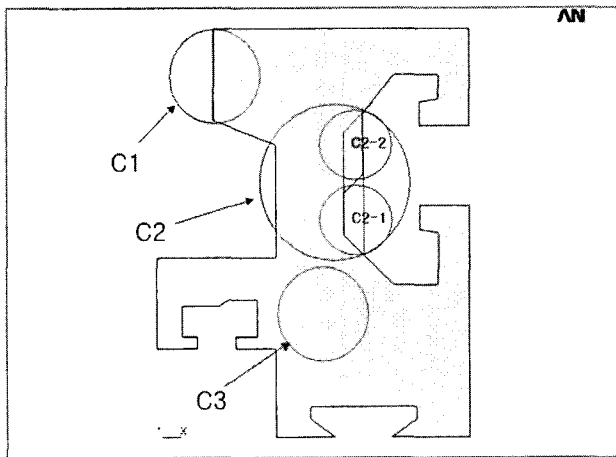


그림 9 An alternative plan about C-type of initial design

에 대해서 비교해 보았다. 표 4에서 보듯이 반경  $r=5\text{mm}$  일 때 C2-1는  $-0.098\text{mm}$ , C2-2는  $-0.1039\text{mm}$ 으로

$r=0\text{mm}$ 일 때와 비교해 보면 거의 비슷한 결과치를 나타내며, 부피 감소율은 약 4%의 정도의 감소를 볼 수 있다. 결론적으로 C2-1에 반경  $R=5\text{mm}$ 인 단면 형태가 개선된 모델로 적당하다고 판단되었다.

#### 4. 치수최적설계

##### 4.1 근사 최적설계

일반적으로 구조물의 최적설계시 구조해석 프로그램과 최적설계 프로그램과의 연결에는 두 가지 큰 어려움이 있다. 첫째, 연결 프로그램 작성이 어렵다는 것이다. 둘째, 프로그램 실행시 높은 계산 비용을 필요로 한다는 것이다. 이러한 어려움을 해결하기 위한 방법이 근사 최적설계<sup>9)</sup>이다. 이 방법은 설계 영역 안에서 몇 개의 실험점을 정하고 구조해석을 통해서 얻어진 응답량을 구하고 그 값을 토대

표 4 Displacement analysis of improvement model (Unit : mm)

Dis.	Initial	C2-1		C2-2	
		R=0	R=5	R=0	R=5
1st point	-0.1146	-0.0954	-0.0952	-0.0982	-0.0994
2nd point	-0.1163	-0.0965	-0.0963	-0.1000	-0.1012
3rd point	-0.1181	-0.0977	-0.0974	-0.1018	-0.1030
4th point	-0.1200	-0.0989	-0.0985	-0.1036	-0.1048
5th point	-0.1218	-0.1002	-0.0997	-0.1055	-0.1066
6th point	-0.1236	-0.1014	-0.1008	-0.1073	-0.1085
Volume[mm <sup>3</sup> ]	63,034,200	64,261,935	61,949,231	61,585,586	59,272,882
Average	-0.1191	-0.0983	-0.0980	-0.1027	-0.1039
Angle[degree]	0.029	0.017	0.017	0.029	0.029

로 오차를 최소화시키는 최소자승법을 이용한 근사함수를 구한다. 구해진 함수를 최적설계 알고리즘을 이용하여 최적값을 도출한다.

4.2 L형상에 대한 근사 최적설계

본 절에서는 최적설계 프로그램에 사용할 근사 다항식의 결과에 대해 논하였다. 실험계획법<sup>10)</sup>으로 3수준의 직교배열표를 이용하였고, 설계변수의 개수가 많기 때문에 2차 회귀모형을 사용하였다. 설계 변수를 그림10과 같이 설정하였다. 설계 영역은 표 5와 같이 나타내었다. 여기서 앞에서 제시했던 반경부분  $r=20\text{mm}$ 로 고정시켰다.

목적함수는 각 실험에 대한 무게에 대한 2차 근사식, 제약함수는 실험을 통해서 나온 접촉부의 각 절점의 변위를 기준으로 2차 근사식을 구하였다. 그리고 응력 제약함수는 설계 영역 내에서 비활성이라 고려 대상에서 제외시켰다.

본 절에서 구해진 근사 다항식을 바탕으로 최적설계를 수행한 결과에 대해서 논의하였다. 제약조건은 구동부 바퀴와 레일이 접촉을 하는 각 절점의 변위로 이루어진 근사식으로 하였으며 허용변위는  $-0.11\text{mm}$ 로 설정하였다.

최적 설계를 수행한 결과를 표 6에서 나타내었다. 결과치를 볼 때 전체적으로 변수값이 1mm 정도 감소하였다. 초기형상과 비교할 때 체적은 2.3% 감소하였다. 표 7은 초기모델, 개선된 모델 P2,  $r=20\text{mm}$ 의 각 변위값과 최적화를 수행 후 최적값을 이용해서 구조해석을 수행하여 나온 결과값과의 비교를 나타낸다. 기울기는 초기형상 보다는 46% 감소를 보였으며, P2,  $r=20\text{mm}$  대안에 비해서 비슷한 기울기를 나타내지만 체적감소를 10%의 감소 효과를 도출하였다.

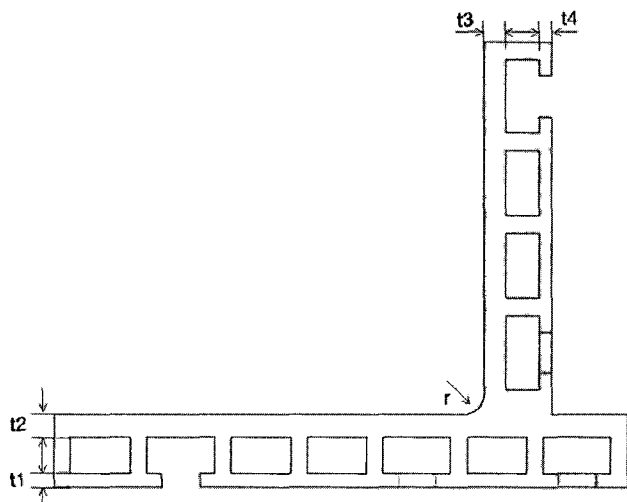


그림 10 Design variables of L-type rail

표 5 Range of design variables (Unit:mm)

Design variables	t1	t2	t3	t4	r
Initial	3	5	3	5	20
Lower	2	3	2	3	20
Upper	4	7	4	7	20

표 6 Result of approximate optimization (Unit:mm)

Design variables	t1	t2	t3	t4	r	Obj.(mm <sup>3</sup> )
Initial	3	5	3	5	5	67,469,000
P2, $r=20$	3	5	3	5	20	72,803,834
Optimum	2.06	4.3	3.0	4.3	20	65,919,069

표 7 Displacement analysis of contact part after optimization (Unit :mm)

Displacement	Initial	P2, $r=20$	Optimum
1st point	-0.1727	-0.1217	-0.1273
2nd point	-0.1643	-0.1163	-0.1226
3rd point	-0.1558	-0.1117	-0.1178
4th point	-0.1471	-0.1069	-0.1128
5th point	-0.1382	-0.1021	-0.1077
6th point	-0.1292	-0.0972	-0.1027
7th point	-0.1198	-0.0925	-0.0974
Average	-0.1467	-0.1068	-0.1126
Angle[degree]	0.126	0.069	0.069

4.3 C형상에 대한 근사 최적설계

본 절에서는 C형상에 대한 최적설계를 수행하였다. 실험계획법으로 설계변수가 작은 경우에 유리한 3수준의 요인배치법을 이용하였다. 설계 변수를 그림11와 같이 설정하였다. 설계 영역은 표 8과 같이 나타내었다. 목적함수 및 제약함수는 앞에서 제시한 바와 같다. 본 절에서 구해진 근사 다항식을 바탕으로 최적설계를 수행한 결과에 대해서 논의하였다. 허용변위는  $-0.10\text{mm}$ 로 설정하였다.

최적 설계를 수행한 결과를 표 9에서 나타내었다. 결과치를 볼 때  $b1=7.8\text{mm}$ , 반경  $r=6.27\text{mm}$ 값이 도출되었으며, 초기형상과 비교할 때 최적형상의 체적은 10% 감소하였다. 표10은 초기모델, 개선된 모델 C2-1,  $r=5\text{mm}$ 의 각 변위값과 최적화를 수행 후 최적값을 이용해서 구조해석을 수행하여 나온 결과값과의 비교를 나타낸다. 기울기는 초기형상 보다 60%의 감소를 보였고, C2-1,  $r=5\text{mm}$  대안에 비해서 약 33%의 감소 효과를 보였으며, 체적 또한 8.34% 감소 효과 또한 보였다.

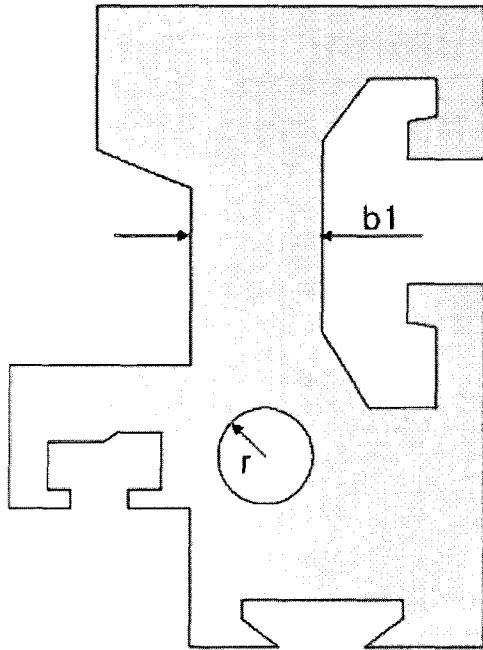


그림 11 Design variables of C-type rail

표 8 Range of design variables (Unit:mm)

Design variables	Initial	Lower	Upper
b1	5	5	10
r	3	3	8

표 9 Result of approximate optimization (Unit:mm)

Design variables	Initial	C2-1, r=5	Optimum
b1	10	13	7.8
r	-	5	6.27
Obj.[mm <sup>3</sup> ]	63,034,200	61,949,231	56,781,000

표 10 Displacement analysis of contact part after optimization (Unit :mm)

Displacement	Initial	C2-1, r=5	Optimum
1st point	-0.114560	-0.0952	-0.10246
2nd point	-0.116340	-0.0963	-0.10310
3rd point	-0.118140	-0.0974	-0.10375
4th point	-0.119950	-0.0985	-0.10441
5th point	-0.121780	-0.0997	-0.10510
6th point	-0.123630	-0.1008	-0.10580
Average	-0.119067	-0.0980	-0.104103
Angle[degree]	0.0286	0.017	0.0114

5. 결 론

레일의 구조적 안정성을 검토하고 개선된 모델을 제시하

였으며, 근사최적화를 이용하여 최적화를 수행하였다. 실제 C형상에 대한 상업적으로 사용되고 있기 때문에 구조적 안정성은 검증된 상태이다. 따라서 기존의 형상에 대한 개선된 L형상에 대한 신뢰성을 검증하기 위해서 C형상을 표준규격을 설정하여 구조물의 유한요소해석을 수행하고, 최적설계를 통해서 형상의 개선을 도모하였다.

개선된 형상을 토대로 L형상은 3수준 직교배열표를 이용한 근사식을 정립하였고, C형상은 3수준의 요인배치법을 이용하여 근사식을 세웠다. 변위제약 근사식은 접촉부에 대한 각 절점의 변위값을 기준으로 근사식을 구성하였다. 목적함수는 무게에 대한 2차 근사식을 이용하였다. 이상의 과정에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) L형상, C형상에 대한 구조해석을 수행하였으며, 레일의 처짐에 따른 문제가 발생하기 때문에 주행부와 레일 접촉부의 절점 기울기를 주 관심 대상으로 선정하였다. 접촉부 변위를 보면 L형상은 -0.1467mm, C형상은 -0.12mm 값이 각각 도출되었다.
- 2) 위상최적설계를 수행하여 초기 단면의 형상에 대한 개선된 방향을 제시하였다. 또한 개선된 형상에 대한 구조해석을 통해서 그 타당성도 검증하였다. 각 모델에 대한 L형상은 P2, r=20mm, C형상은 C2-1, R=5mm인 두 모델이 개선된 모델로 선정되었다.
- 3) 근사식을 토대로 PLBA 알고리즘을 이용한 치수최적설계를 수행하였고, 그 결과는 L형상은 각각 t1은 2.0mm, t2는 4.3mm, t3는 3.0mm, t4는 4.3mm이며, 목적값은 65,919,069mm<sup>3</sup>으로 초기치에 비해서 감소효과를 보였다. 또한 C형상은 b1은 7.8mm, r은 6.27mm인 최적값이 도출되었고, 목적값은 56,781,000mm<sup>3</sup>으로 초기치에 비해서 10%감소하였다. 또한 접촉부 평균 변위값은 L형상이 -0.1467mm에서 -0.11mm로 약 25%, C형상이 -0.12mm에서 -0.10mm로 17%감소하는 경향을 보였으며, 기울기는 L형상이 0.126°에서 0.069°로 46%, C형상이 0.0286°에서 0.0114°로 60%감소 효과를 보였다.

후 기

본 연구는 (주)대명엔지니어링과 한국과학기술재단 지정 최적설계 신기술 연구센터의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 조재승, 김학선, 임오강, 황종균, "반도체 공정에 이용되는 레일의 형상 최적화를 위한 강도 및 강성해석", 추계



- 학술대회 논문집, 대한기계학회 부산지부, 2003, pp. 15~20
2. 홍도관, 권용수, 최경호, 최석창, 안찬우, "다구찌법을 이용한 마그네트 천장 크레인의 경량화를 위한 최적설계", 2002 Korea Ansys User's Conference, 2002, pp.286~293
  3. 성기득, 양원호, 조명래, 허성필, "철도차량용 휠과 레일의 형상 설계에 관한 연구", 대한기계학회논문집 A 권, 제23권 제11호, pp.2033~2039
  4. ANSYS APDL Programmer's guide Release 5.6, Swanson Analysis System, Inc., 1998.
  5. Parametric Technology Cooperation, Pro/Engineer Fundamentals Release 2000i.
  6. O. K. Lim and J. S. Arora, "An active set RQP algorithm for engineering design optimization", *Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 57, Issue 1, 1986, pp.51~6
  7. KS-A1627, 크레인강 구조 부분의 계산기준, 한국산업규격, 1994
  8. 송영준, 민승재, 국지승, "유한요소법과 최적구조설계 CAE", 성안당, 1999
  9. 임오강, 김정진, "근사 최적설계를 위한 순차 설계영역에 관한 연구", 전산구조공학회논문집, 제14권, 제3호, 2001, pp.339~348
  10. 박성현, "현대실험계획법", 민영사, 1996