

# 도시형 자기부상열차 부상레일의 롤 성형공정 해석

## Analysis for Roll Forming Process to Levitation Rail of Urban Maglev System

김경택\* 김재용\* 김용환\* 박진수\*\* 변상윤\*\*\*  
Kim, Kyung-Taek Kim, Jae-Yong Kim, Yong-Hwan Park, Jin-Soo Pyen, Sang-Yun

### ABSTRACT

This Study discussed the roll forming process analysis of levitation rail for urban Maglev vehicle. To verify validity of roll forming process, we analyzed roll forming process for track shoe which is similar to levitation rail. The analysis process was composed of 12 passes and was performed for only 8 passes except overlapping passes.

In the variation of temperature with each pass, surface temperature of the structure was cooled from initial 1200°C to 1010°C during 30 second before first pass, and central temperature and surface temperature was cooled to 980°C and 900°C in final pass, respectively. A length of structure after final pass is about 5 times longer than that before roll forming process. A strain of structure had a higher value in the inner part of the track shoe and show from minimum 2.5 to maximum 6.5. A torque applying on roll appear high in 2, 3 and 4 passes and a maximum value was 27,000ton · mm. Also it was analyzed that a load to the normal direction needs maximum 300ton.

### 1. 서 론

부상레일을 제작하기 위한 방법은 크게 주물형식, 용접형식 및 일체형 롤포밍형식을 고려할 수 있다.

주물형식으로 레일을 제작하는 경우에는 폭에 비하여 길이가 긴 형상으로 금형제작에 어려움이 있으며, 직선부와 곡선부에 필요한 금형을 별도로 제작하여야 하며 특히, 곡선부의 경우는 각각의 반경에 따른 곡선부용 금형이 별도로 필요하게 된다. 아울러 주물성형 후의 표면에 대한 기계가공이 필수적이며 무엇보다도 주물성형시 내부에 발생하는 기포 등의 주물결함에 따른 안정성확보에 어려움이 있다. 그러나 제작단가 측면에서는 타 형식에 비하여 저렴하고 제작이 간편하다는 장점이 있다.

용접형식의 레일은 압연강관을 절단하여 상면과 폴(pole)부분을 용접하여 제작하므로 직선 및 곡선부의 자유로운 제작이 가능하고 압연강관을 사용하게 됨에 따라 표면조도가 매우 균일하여 별도의 표면가공이 필요치 않다. 그러나 용접부위가 증가함에 따른 용접결함 등이 발생할 수 있으며, 부분적으로 밀착이 불완전한 부분에서 자기회로 구성시 불안정한 부분이 발생할 수 있다.

일체형 롤포밍형식은 레일의 형상을 벌크의 강재에서 여러 번의 압연공정을 통하여 레일의 상면과 폴을 일체형으로 제작한다. 일체형 레일은 용접 및 주물공정을 통하여 제작되는 레일에 비하여 모든 면에서 그 성능이 우수하나 롤형상을 위한 압연롤의 가공비와 여러 단계의 성형공정이 필요하게 되어 레일 제작에 소요되는 경비가 큰 것이 단점이다.

\* 한국생산기술연구원, 신기능소재팀, 회원

E-mail : [kkt@kitech.re.kr](mailto:kkt@kitech.re.kr)

TEL : (032) 850-0213 FAX : (032) 850-0210

\*\* 현대제철(주), 전략기술팀, 비회원

\*\*\*Simulink, 컨설팅사업부, 비회원

본 연구는 도시형 자기부상열차 부상레일의 롤 성형공정 해석에 대한 연구로서 성형공정의 타당성을 검증하기 위하여 부상레일과 유사형상인 트랙슈에 대한 롤 성형공정을 해석하였다.

## 2. 본 문

### 2.1 해석대상 및 해석조건

본 연구에서 사용된 모델은 현대제철에서 생산되고 있는 트랙슈로 부상레일과 유사한 형상을 가지고 있다. 그림 1은 성형해석을 위한 시뮬레이션 모델을 나타낸 것이다.

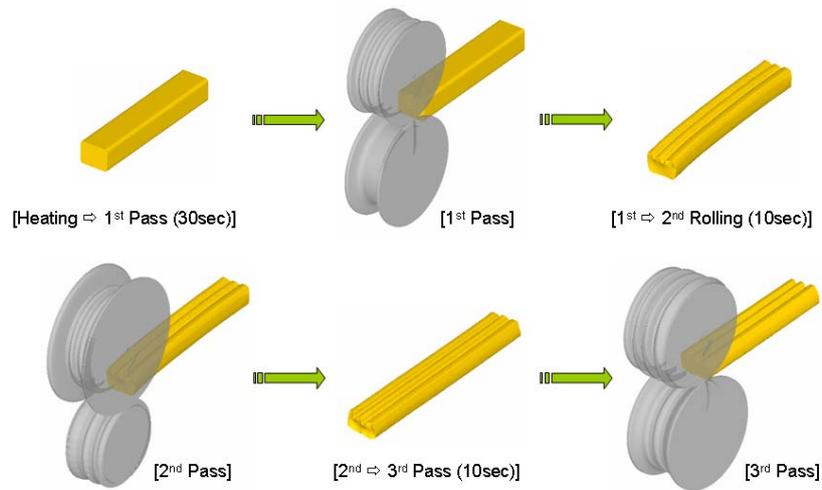


그림 1. Simulation Model

해석과정은 총 12공정으로 이루어졌으며 이 중 중복되는 공정을 제외한 8개의 공정에 대하여 해석을 수행 하였다. 표 2는 해석에 사용된 압연 속도 및 roll의 형상을 각 패스별로 나타낸 것이다.

표 1. 각 패스별 압연 속도 및 Roll의 형상 [자료제공 : 현대제철]

CONTINUOUS MILL SET - UP												
STAND NO	ROLL NO	공형 구분	V m/sec	NOM' DIA	NO/WOK DIA	MEAS' DIA	WORK DIA	SHAPE	WIDTH	HEIGHT	LOOP HEIGHT	STAND SET POSITION
ST.01	46132 54821	D.S	0.57	670	680	607	616		205.5	147		
ST.02	52726 57359	D.S	0.64	670	680	580	590		211.5	126		
ST.03	73148 42976	A,B	0.78	650	660	584	594		224.5	115		
ST.04	42970 52761	A,B	1.06	650	660	612	622		231.4	86.5		
ST.05	DUMMY											
ST.06	76655 76640	A,B	1.30	654	662	636	644		245	74.5		
ST.07	DUMMY											
ST.08	52771 54854	A,B	1.75	654	662	586	594		243.3	58		
ST.09	DUMMY										360	
ST.10	TS327 TS322	A,B	2.25	654	661	650	657		249.9	52.8		
ST.11	DUMMY										380	
ST.12	70282 68361	A,B	2.74	653	660	601	608		252.8	48.5		

원활한 해석의 진행을 위해 몇 가지 가정이 필요하다. 우선 해석과정에서 roll은 강체로 가정하였으며 roll의 탄성변형은 고려하지 않았다. 온도와 관련해서 실제로는 물을 분사하고, 소재가 패스와 패스간은 스탠드 위로 이동하게 되는 등 여러 가지 복잡한 조건들이 적용되지만 해석에서는 실제의 복잡한 상황을 계수로 적용하게 되며 접촉면의 열전달 계수로 이러한 상황을 컨트롤 하였다. 표 2는 해석에 적용된 조건들을 나타낸 것이다.

표 2. 해석조건

가열온도 [°C]	1200
마찰	shear 0.7
접촉면의 열전달계수 [N/sec · mm°C]	5
재질	AISI 1016
Conductivity [W/mK]	30
Heat Capacity [W/mmK]	4.3

## 2.2 해석결과

그림 2는 압연해석에 의한 단면형상을 나타낸 것으로 앞서 언급한 바와 같이 총 12공정 중 중복공정을 제외한 8개의 공정에 대한 압연해석 결과를 나타낸 것이다. 1공정과 3공정에서 소재가 상부 롤과 미충전 상태로 압연되고 있으며 3공정의 경우 왼쪽에 비해 오른쪽 형상부에서의 차이가 더 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 특별한 이유가 없는 경우 소재가 roll과 충전된 상태로 공정이 진행되는 것이 바람직하나 여기서는 다음 공정(2공정과 4공정)이 충전상태로 진행되기 때문에 큰 문제가 없는 것으로 판단된다.

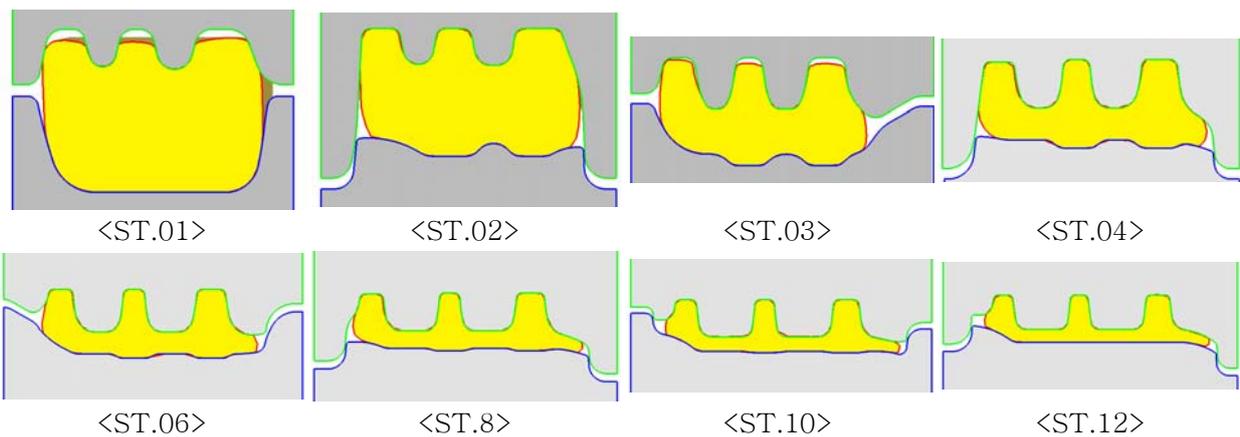


그림 2. 단면의 변화 양상

압연에서 중요한 연구 대상은 재결정이며 이것은 온도와 변형률의 영향을 받는다. 일반적으로 온도가 높고 변형이 커야 재결정이 잘되고, 제품의 품질이 향상된다.

그림 3은 각 공정 직후의 소재 단면에서의 변형률 분포를 나타낸 것이다. 초기 상부 롤과 접하는 부위에서 변형률이 증가하게 되며, 패스가 진행되면서 전체적으로 변형률이 증가하여 최종 압연 후 최소 2.5에서 최대 6.5의 변형률 분포를 보인다. 전체적으로 일정 변형률 이상이 되고 균일하면 좋으나 형상이 복잡한 경우 균일하기 어렵다.

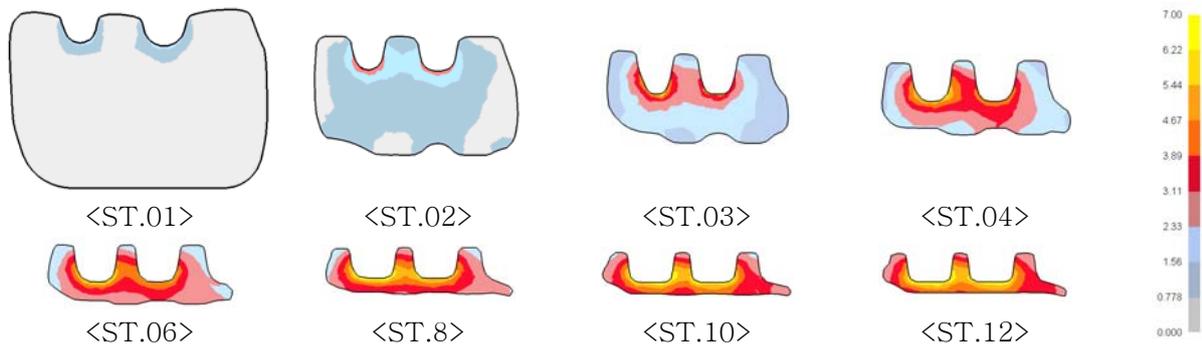


그림 3. 단면에서의 변형률 분포

그림 4는 각 공정별 변형률의 변화를 나타낸 그래프이다. 두 포인트에서의 각 공정별 변형률은 표면에 위치한 P1이 높게 나타나며, 4 공정까지 급격하게 증가하다가 이후 증가폭이 작아지게 된다.

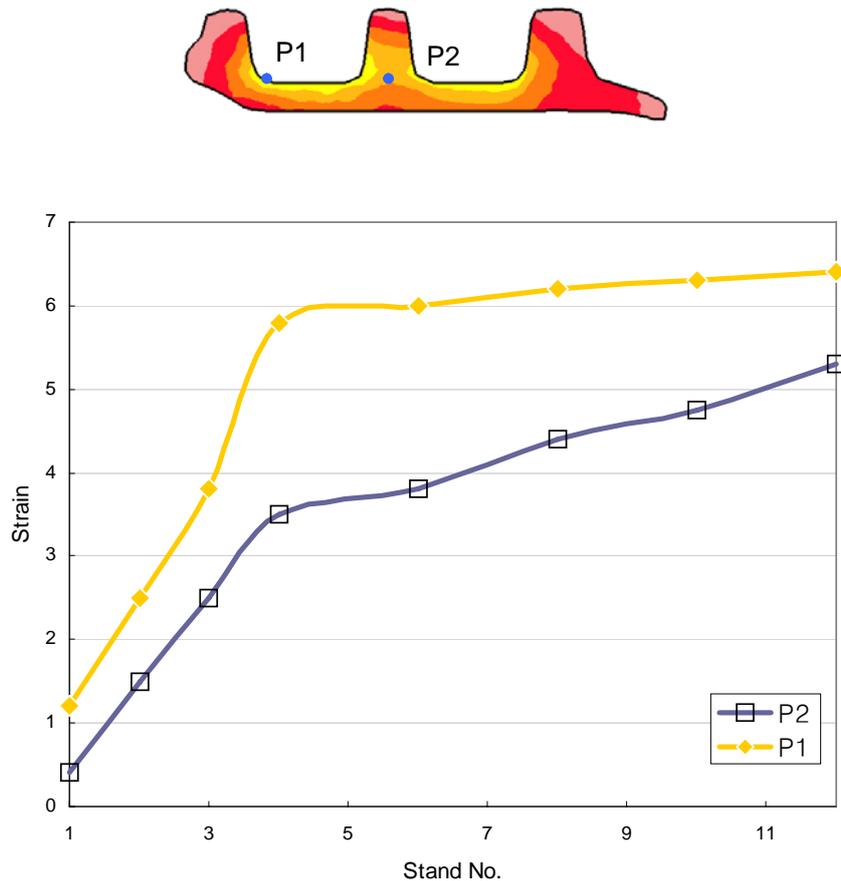


그림 4. 각 공정별 변형률 변화

그림 5는 각 공정 직후의 소재 단면에서의 온도분포를 나타낸 것이다. 가열로에서 첫 번째 패스까지의 소재의 온도분포를 살펴보면 모서리 부위의 온도가 1010°C까지 낮아지게 된다. ST.01에서의 온도분포는 1050~1180°C이며, ST.04 직후 중심부는 1080°C, 표면은 1000°C 이하로 떨어진다. ST.06에서의 온도분포는 980~1050°C이며, 이후 패스에서 점차 낮아지다가 ST.12에서 중심부는 980°C, 표면은 900°C 이하로 떨어진다.

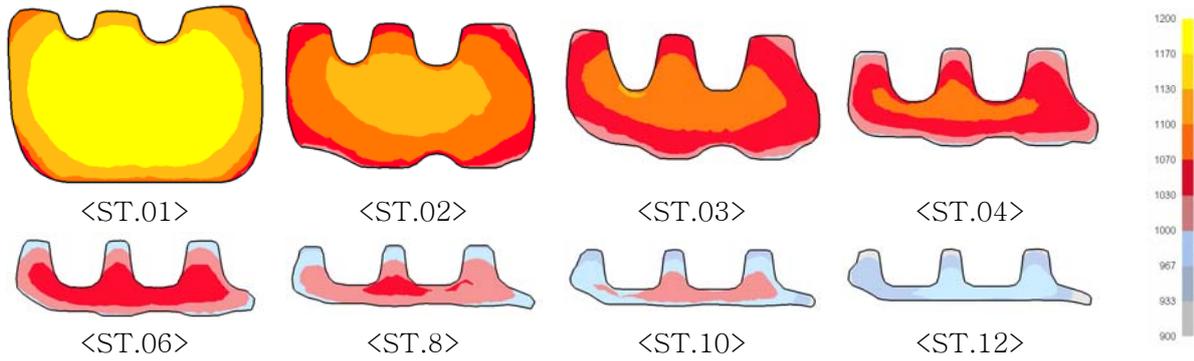


그림 5. 단면에서의 온도 분포

그림 6은 각 공정별 온도의 변화를 나타낸 그래프이다. 두 포인트에서의 각 공정별 온도 변화를 살펴 보면 전반적으로 일정하게 온도가 저하되는 것을 알 수 있다. 내부는 천천히 식고, 표면은 물과 접촉에 따라 빨리 떨어지게 되며 물을 지나게 되면 내/외부 편차가 줄어들게 된다. 소재에 따라 다르지만 재결정 온도(통상적으로 800~900°C)이하로 떨어지지 않아야 한다.

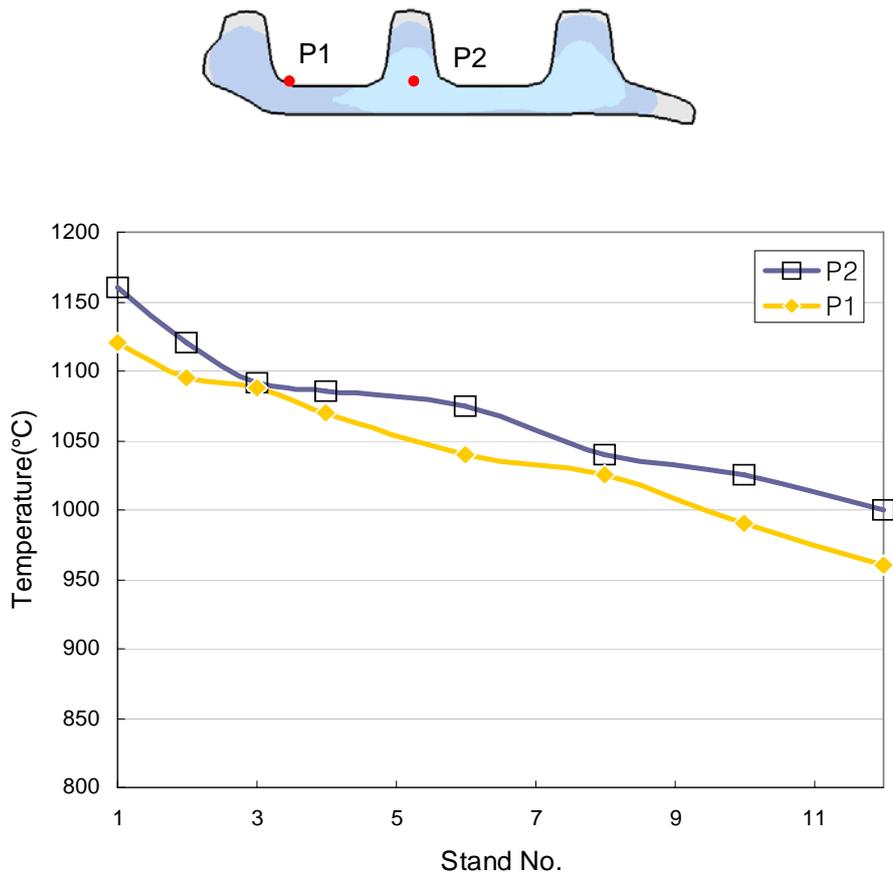


그림 6. 각 공정별 온도 변화

그림 7은 각 공정별 소재의 길이 변화를 나타낸 것으로 압연 전 블랭크의 크기를 1로 했을 경우 각 공정별로 소재의 늘어난 길이를 초기 길이로 나누어 비율로 나타낸 것이다. 소재의 길이는 최종 공정 후 초기에 비해 약 5배 정도 증가하였다.

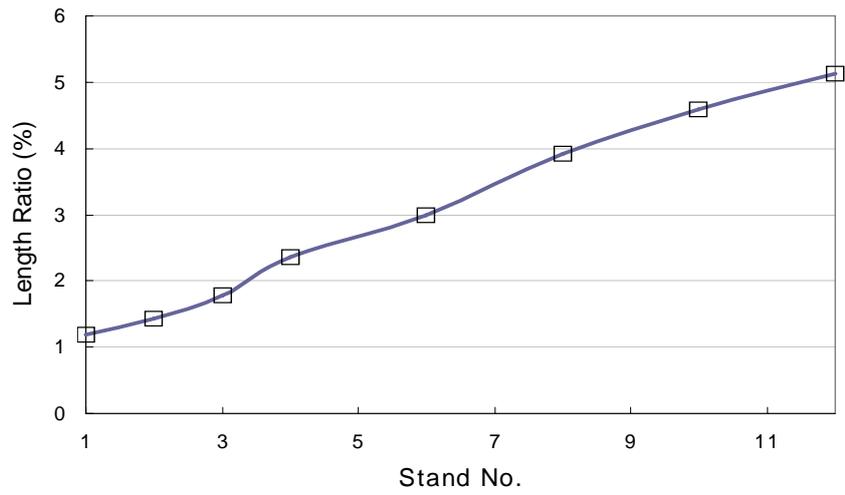


그림 7.각 공정별 소재의 길이 변화

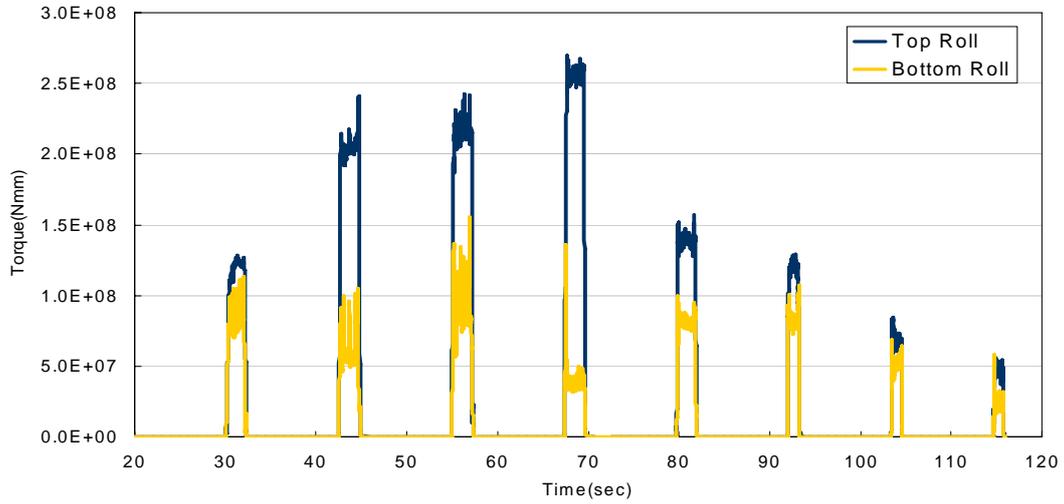


그림 8. 상·하부 롤의 토크

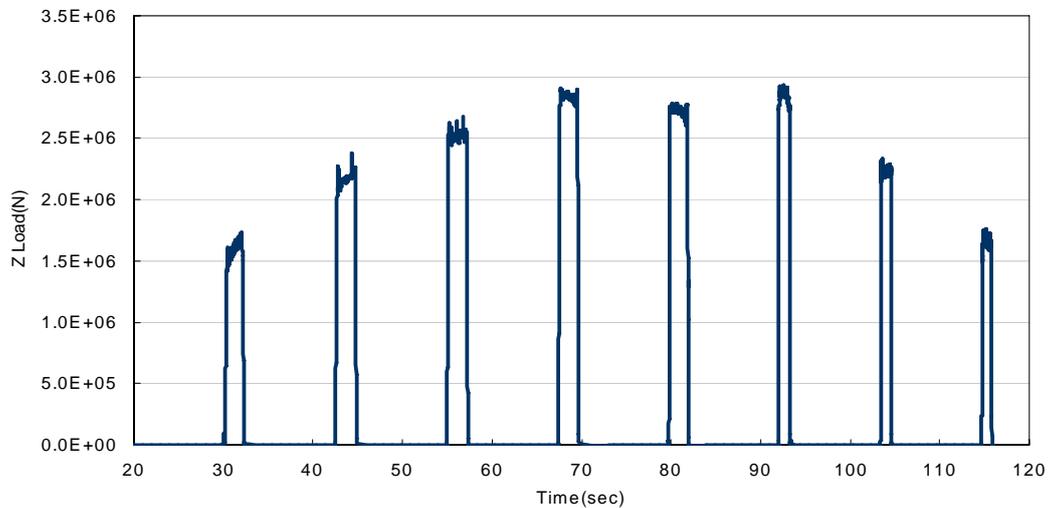


그림 9. 수직방향으로 작용하는 하중

그림 8은 각 패스별 상·하부 롤의 토크를 나타낸 것이다. ST.02, ST.03, ST.04에서 상부 롤 토크가 크게 나타나고 있으며, ST.04 상부 롤에서 최대 27,000 ton·mm를 보인다.

그림 9는 각 패스에서의 롤에 수직방향으로 작용하는 하중을 나타낸 것이다. 순서별로 ST.01, ST.02, ST.03, ST.04, ST.06, ST.08, ST.10, ST.12이고 토크에 비하여 각 패스별 하중 편차는 작으며, 최대 약 300ton의 하중이 작용한다. 상·하 롤의 수직방향 하중 값은 같다.

### 3. 결 론

본 연구는 도시형 자기부상열차 부상레일의 롤 성형공정 해석에 대한 연구로서 성형공정의 타당성을 검증하기 위하여 부상레일과 유사형상인 트랙슈에 대한 롤 성형공정을 해석하였다. 해석과정은 초기 육면체의 블록에서 시작하여 총 12공정으로 이루어졌으며, 이중 중복되는 공정을 제외한 8개 공정에 대하여 해석을 수행하였다.

공정별 온도의 변화는 초기 1200℃에서 1공정에 투입되는 30초 동안 표면의 온도는 1010℃까지 냉각되며, 최종 공정인 12공정에서는 중심부에서 980℃, 표면은 900℃로 냉각되었다. 아울러 각 공정별 소재의 길이변화는 롤 성형전의 블록을 1로 했을 경우 각 공정별로 소재의 길이변화를 초기 길이로 나누어 비율로 계산한 결과 최종 공정후 초기에 비해 5배 증가하는 것을 알 수 있었다. 소재의 변형률은 상부롤의 형상부에서 크게 나타났으며, 최소 2.5에서 최대 6.5의 변형률을 나타내었다. 각 공정별 상·하부롤의 토크는 초기 2, 3, 4공정에서 높게 나타났으며, 최대 27,000ton·mm를 보였으며, 수직방향으로의 하중은 최대 300톤이 필요한 것으로 해석되었다.

### 감사의 글

본 연구는 도시형 자기부상열차 실용화 사업단의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 나경환(1992), “Roll Forming 공정의 원리 및 특성과 기술개발 현황”, 生産技術, pp. 44-55
2. 김명균, 이규창, 박준표, 김상원(2007), “알루미늄 합금 휠 연속주조 및 압연공정 컴퓨터 전산모사”, RIST 연구논문 제21권 제1호, pp. 40-48
3. 천명식, 정제숙(2003), “유한요소해석을 이용한 열간압연 폭압하공정의 변형거동 연구”, MSC Software Korea Users Conference
4. 백만인(2003), “완전 평면 브라운관의 전면 유리 성형 해석 및 실험적 검토”, MSC Software Korea Users Conference
5. 심현보(1994), “슬랩법을 이용한 쌍롤식 박판주조 공정의 열간 압연 해석”, 소성가공학회지, 3권 1호, pp. 63-83

# 도시형 자기부상열차 부상레일의 롤 성형공정 해석

## Analysis for Roll Forming Process to Levitation Rail of Urban Maglev System

김경택\* 김재용\* 김용환\* 박진수\*\* 변상윤\*\*\*

Kim, Kyung-Taek Kim, Jae-Yong Kim, Yong-Hwan Park, Jin-Soo Pyen, Sang-Yun

---

### ABSTRACT

This Study discussed the roll forming process analysis of levitation rail for urban Maglev vehicle. To verify validity of roll forming process, we analyzed roll forming process for track shoe which is similar to levitation rail. The analysis process was composed of 12 passes and was performed for only 8 passes except overlapping passes.

In the variation of temperature with each pass, surface temperature of the structure was cooled from initial 1200°C to 1010°C during 30 second before first pass, and central temperature and surface temperature was cooled to 980°C and 900°C in final pass, respectively. A length of structure after final pass is about 5 times longer than that before roll forming process. A strain of structure had a higher value in the inner part of the track shoe and show from minimum 2.5 to maximum 6.5. A torque applying on roll appear high in 2, 3 and 4 passes and a maximum value was 27,000ton · mm. Also it was analyzed that a load to the normal direction needs maximum 300ton.

---

### 국문요약

본 연구는 도시형 자기부상열차 부상레일의 롤 성형공정 해석에 대한 연구로서 성형공정의 타당성을 검증하기 위하여 부상레일과 유사형상인 트랙슈에 대한 롤 성형공정을 해석하였다. 해석과정은 초기 육면체의 블록에서 시작하여 총 12공정으로 이루어졌으며, 이중 중복되는 공정을 제외한 8개 공정에 대하여 해석을 수행하였다.

공정별 온도의 변화는 초기 1200°C에서 1공정에 투입되는 30초 동안 표면의 온도는 1010°C까지 냉각되며, 최종 공정인 12공정에서는 중심부에서 980°C, 표면은 900°C로 냉각되었다. 아울러 각 공정별 소재의 길이변화는 롤 성형전의 블록을 1로 했을 경우 각 공정별로 소재의 길이변화를 초기 길이로 나누어 비율로 계산한 결과 최종 공정후 초기에 비해 5배 증가하는 것을 알 수 있었다. 소재의 변형률은 상부롤의 형상부에서 크게 나타났으며, 최소 2.5에서 최대 6.5의 변형률을 나타내었다. 각 공정별 상·하부롤의 토크는 초기 2, 3, 4공정에서 높게 나타났으며, 최대 27,000ton · mm를 보였으며, 수직방향으로의 하중은 최대 300톤이 필요한 것으로 해석되었다.

---

\* 한국생산기술연구원, 신기능소재팀, 회원

E-mail : [kkt@kitech.re.kr](mailto:kkt@kitech.re.kr)

TEL : (032) 850-0213 FAX : (032) 850-0210

\*\* 현대제철(주), 전략기술팀, 비회원

\*\*\*Simulink, 컨설팅사업부, 비회원