

복부절단법에 의한 레일의 잔류응력에 관한 연구

A study on the residual stress in rail by the web saw-cut method

서정원*, 구병춘*, 정우현**

Key Words : K_I (Stress Intensity Factor) : 응력확대계수, Residual Stress : 잔류응력, Web SawCut Method : 복부 절단법

ABSTRACT : Rails have residual stresses produced during manufacturing processes. The residual stresses play an important role on brittle fracture, fatigue strength and derailment by producing cracks in the web of rail. The web saw-cut test is a technique developed to measure the bulk longitudinal residual stress level. It is a simple method to estimate a stress intensity factor, K_I for a web crack by using the radii of curvature of the upper and lower portions of a cut rail. But according to this method, K_I varies along the rail length because the curvatures along the rail length vary. In this paper, the residual stress was estimated by Finite Element Method and the web saw-cut method. In addition the variation of the residual stress with time was investigated.

1. 서론

구조물의 잔류응력을 측정하는 방법은 Sachs법, 절단법, 천공법, BN법, X선회절법 등 여러 가지가 있다. 대부분의 방법은 표면의 잔류응력을 측정하는데 사용한다. 그러나 표면뿐만 아니라 내부를 포함하여 전반적인 잔류응력의 분포를 측정하기 위해 절단법이 많이 이용되고 있다. 레일의 경우 이 방법은 길이방향의 잔류응력을 측정하기 위한 것이며 길이방향으로 가능한 한 많은 횡수로 절단을 하여야 한다. 그리고 각각의 잘려진 부분의 잔류응력의 크기 및 방향을 측정하기 위하여는 잘려진 부분의 절단전후의 치수가 정밀하게 측정되어야 한다. 이러한 측정방법은 내부의 잔류응력의 상태를 측정할 수 있지만 많은 시간이 소요된다⁽¹⁾. 따라서 많은 사람들은 잔류응력에 대한 한계 데이터(Limited Quantitative Data)를 공급하고 측정하기 쉬운 방법을 제안하였으며 이 방법의 하나가 복부절단법(Web Sawcut Method)이다⁽²⁾.

이러한 복부 절단법은 1983년 미국의 Amtrack에서 탈선사고의 원인조사에서부터 시작되었다. 조사 결과 레일의 복부에서 9m의 균열이 발생하여 열차의 탈선이 발생하였다. 이러한 복부에서의 균열발생은 다른 여러곳에서 발생하였으며 탈선의 원인이 되었다. 복부 균열발생의 원인은 과도한 잔류응력이라 결론 지었으며 주로 롤라 교정(Roller Straightening)에 의해 발생되었으리라 판단하였다.

* 한국철도기술연구원 차량연구본부 정희원

** 강원산업주식회사 기술부 정희원

따라서 잔류응력의 수준을 평가하는 방법으로 복부절단법에 대한 연구가 이루어졌으며 복부에서 균열진전 여부를 결정짓는 응력확대계수(K_I)를 구하는 방법이 제안 되었다. 또한 B.L. Bramfitt는 복부절단법에 의한 K_I 평가시 시간에 따라서 결과값이 변화한다고 주장하였다⁽³⁾.

본 연구에서는 복부절단법에 대한 유용성을 평가하기 위하여 외국의 곡률 측정결과를 이용하여 FEM 해석을 통하여 K_I 를 구하고 외국의 측정결과와 비교검토하고자 한다. 또한 측정시간의 흐름에 따른 잔류응력의 변화를 조사하기 위하여 시험편을 채취하여 절단 후 60일까지 잔류응력의 변화를 추적하였다.

2. 절단법에 의한 응력확대계수 K_I 평가

2.1 K_I 평가방법 소개

Wineman과 McClintock⁽²⁾은 복부 절단법에 의한 K_I 를 평가하기 위하여 다음의 방법을 제안하였다. Fig. 2.1에서와 같이 레일의 복부를 길이방향으로 절단하면 복부에 인장잔류응력이 존재할 경우에는 그림과 같이 상하로 벌어지게 된다.

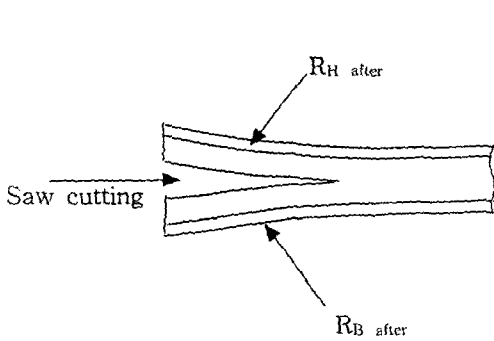


Fig. 2.1 복부절단법

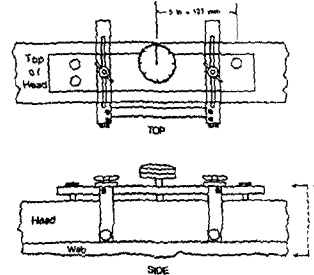


Fig. 2.2 곡률측정장치

Fig. 2.2와 같은 장치를 이용하여 절단된 절단 전후의 곡률변화를 측정하여 K_I 를 구하게 된다. 잔류응력에 의한 불안전 파괴는 모드 I에 의한 에너지 방출률에 의존한다는 가정에 의하여 제안된 K_I 를 구하는 식을 살펴보면 다음과 같다.⁽²⁾

$$K_I = \frac{E}{[2t_{web}(1-\nu^2)]^{1/2}} \left[I_H \left(\frac{1}{R_{H\ after}} - \frac{1}{R_{H\ before}} \right)^2 + I_B \left(\frac{1}{R_{B\ after}} - \frac{1}{R_{B\ before}} \right)^2 \right]^{1/2} \dots\dots\dots(1)$$

여기서,

E : 레일강의 탄성계수, ν : 푸아송 비, t_{web} : saw-cut부 웨브의 두께

I_H, I_B : 절단부 윗부분과 아랫부분의 관성모멘트

$R_{H\ before}, R_{H\ after}$: 절단 전후의 절단부 윗부분의 곡률

$R_{B\ before}, R_{B\ after}$: 절단 전후의 절단부 아랫부분의 곡률

이 평가방법은 레일의 곡률 측정과 대수적인 연산에 의해 응력확대계수 K_I 를 간단히 구할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

2.2 유한요소법에 의한 K_I 평가⁽⁴⁾

2.2.1 유한요소모델

Fig. 2.3은 해석에 사용된 레일의 유한요소모델을 보여주는 것으로 레일의 좌우대칭을 이용하여 1/2만을 모델링하였다. 그림은 레일길이 1.2 m 중 200 mm 절단시의 모델을 나타내고 있으며 요소가 세밀한 부분이 균열선단을 나타내고 있다. 해석에 사용된 요소는 절점 20개를 갖는 육면체 요소를 사용하였다.

균열선단은 선형탄성영역에서 거리에 따라 다음과 같은 변형률 특이성 (Crack tip strain singularity)을 가지고 있으므로 이러한 특성을 모델링하기 위하여 균열선단의 중간절점(Mid-point node)을 1/4 지점(Quarter point node)으로 이동시켰다.

$$\varepsilon \propto \frac{1}{\sqrt{r}} \quad \text{여기서 } \varepsilon : \text{변형률, } r : \text{균열선단에서의 거리}$$

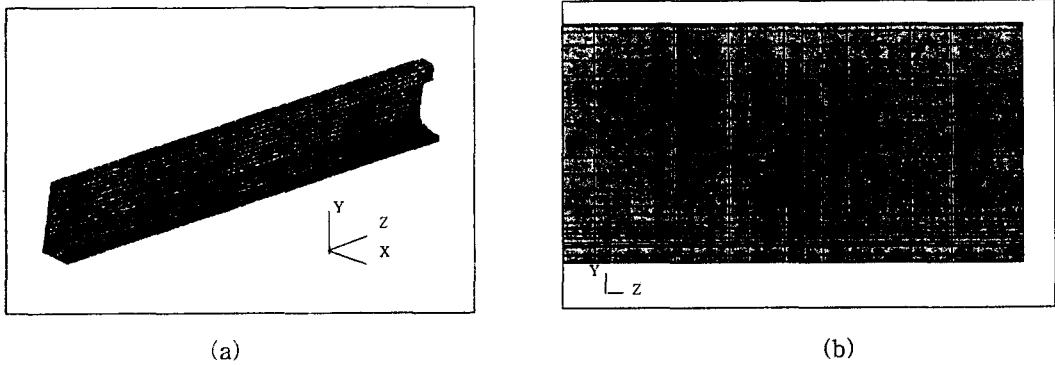


Fig. 2.3 유한요소 모델

2.2.2 해석조건 및 경계조건

하중조건으로는 복부절단법에 의해 레일선단의 변위를 측정한 Fig. 2.4의 데이터⁽³⁾를 이용하여 레일선단에서의 변위를 이용하였다.

구속조건으로는 레일형상이 좌우방향에 대해서 대칭인 점을 고려하여 전체의 1/2만을 고려하였으며, 그림에서 z-축 선상위에 있는 절점에 대해 x-방향을 구속하였으며, 레일선단의 레일중립축에서 y-, z-방향의 변위를 구속하였다. 복부를 200, 300, 400, 550 mm 절단시에 대하여 모델링하였고, Fig. 2.4의 각각의 절단길이에 대한 변위 조건을 하중조건으로 하여 해석을 수행하였다.

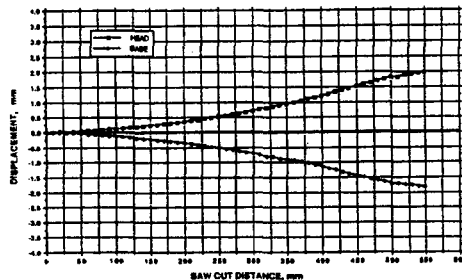


Fig. 2.4 복부절단법에 의한 절단길이에 따른 레일 끝단에서의 변위량⁽³⁾

2.2.3 해석결과 및 검토

Fig. 2.5는 200 mm 절단시 모델의 변형된 모습을 나타내고 있으며 그림과 같이 균열선단까지 변형된 모습을 잘 나타내고 있다. Fig. 2.6은 300mm 절단시, Fig. 2.7는 400mm 절단시, Fig. 2.8은 550 mm 절단시의 변형된 모습을 나타내고 있다.

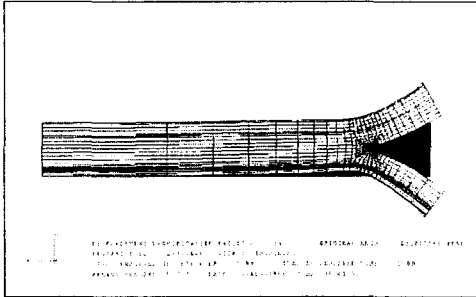


Fig. 2.5 200 mm 절단시 모델의 변형

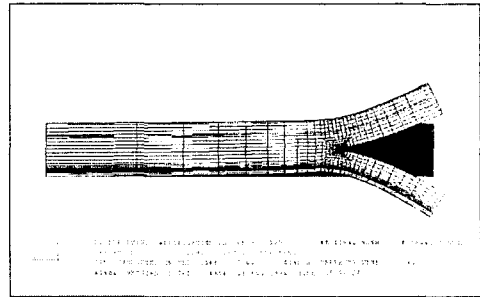


Fig. 2.6 300 mm 절단시 모델의 변형

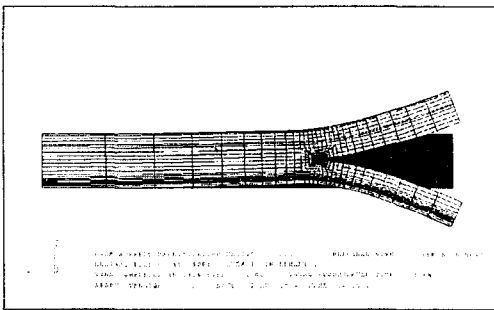


Fig. 2.7 400 mm 절단시 모델의 변형

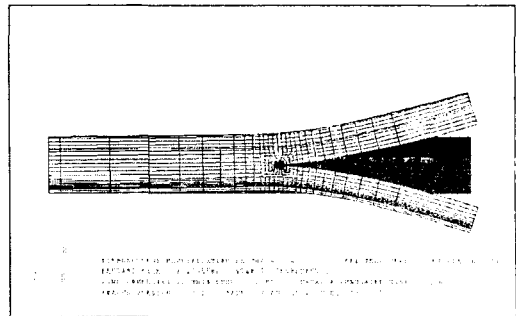


Fig. 2.8 550 mm 절단시 모델의 변형

각각의 절단길이에 따른 응력확대계수를 살펴보면 Table 2.1과 같다. 절단길이에 따라 약간의 차이는 있지만 유한요소법에 의한 값은 $33 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 이며 제안된 식(1)과 측정된 곡률의 변화에 의한 값은 $12 - 30 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 로 최대치가 유사한 값을 보이고 있다. 측정된 결과의 값에 변화가 있는 것은 Fig. 2.2의 곡률 측정장치로써 측정할 경우에 측정장치의 발의 거리가 245 mm(10inch)이므로 측정된 곡률은 이 거리에 대한 곡률이며 이에 대한 결과는 Fig. 2.9와 같다. 따라서 측정위치에 따라서 곡률 값이 레일의 길이방향에 따라서 변화한다. Fig. 2.10⁽³⁾은 50.8 mm의 간격으로 측정한 곡률로써 계산한 응력확대계수 K에 대한 결과로서 그림과 같이 양단 200mm부분을 제외하더라도 K값의 변화가 크게 발생하는 것을 알 수 있다.

레일의 길이 방향에 따라서 잔류응력이 일정하게 분포한다고 가정할 경우에는 잔류응력에 의한 응력확대계수 역시 일정한 값을 나타내어야 한다. 이러한 것은 양단의 변위변화 측정결과로부터 절단된 길이에 따른 응력확대계수를 평가하여 나타낸 Table 3.2에서와 같이 200mm 절단시 $33.34 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 에서 550 mm 절단시 $32.10 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 가 발생하여 거의 비슷한 값을 나타낸 것에서 알 수 있다. 제안식 식의 경우에는 국부곡률 변화의 크기에 따라서 응력확대계수가 변화하므로 이러한 방법보다는 레일 끝단의 변위만을 측정하면 유한요소해석을 통하여 응력확대계수를 쉽게 구할 수 있으리라 판단된다.

Table 2.1 해석된 결과 (K_I)

절단길이	종류	해석에 의한 K_I ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)	계산식(1)에 의한 K_I ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)
200 mm		33.34	12 - 30
300 mm		32.59	
400 mm		33.43	
550 mm		32.10	

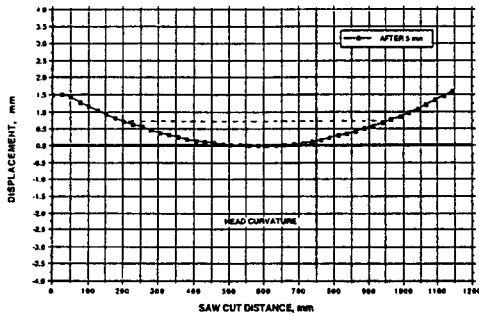


Fig. 2.9 복부절단후 곡률측정결과⁽³⁾

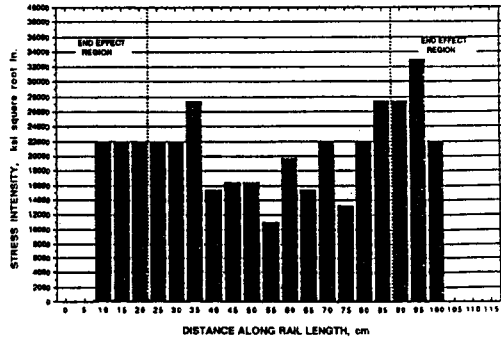


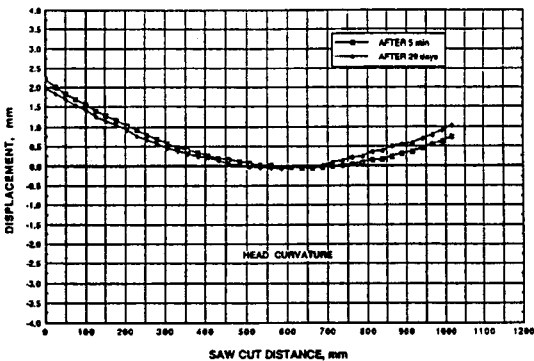
Fig. 2.10 곡률측정결과로부터의 응력확대계수⁽³⁾

3. 시효효과

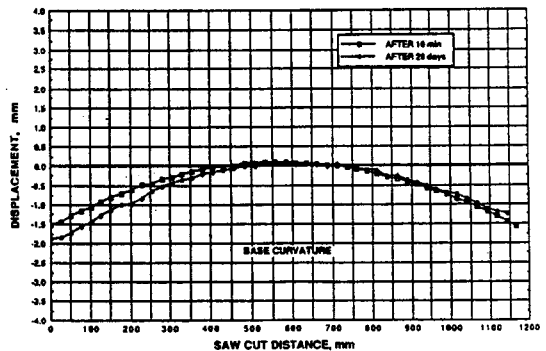
3.1 시효효과 개요

잔류응력 평가방법중에 하나인 복부절단법에 의한 K_I 측정은 절단에 따른 곡률의 변화로서 평가하고 있으며, B.L. Bramfitt는⁽³⁾ 이에 대한 실험을 실시하여 시간이 경과함에 따라 곡률이 변화하는 것에 대하여 설명하고 있다. Fig. 3.1은 이러한 측정결과를 나타내고 있으며 5분후에 측정한 곡률과 29일이 지난후 측정한 곡률에 변화가 발생하여 이로부터 계산된 K_I 값은 33 %가 증가됨을 보여주고 있다.

$K_I = 22.8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (5, 10분 후 측정시), $K_I = 30.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (29일 후 측정시)



a) 두부



b) 저부

Fig. 3.1 절단후 5분 후와 29일 후에 측정한 곡률의 변화⁽³⁾

3.2 절단법에 의한 잔류응력 측정

3.2.1 시험방법

시효효과를 확인하기 위하여는 Fig. 3.2와 같이 길이 1m의 시편을 준비하여 20 mm 절단하여 절단 전후의 변화된 스트레인을 측정하여 응력으로 환산하였다. 게이지 부착위치로는 시간에 따른 전반적인 잔류응력의 변화를 살펴보기 위하여 Fig. 3.2와 같이 좌우 대칭이 되는 부위에 8개를 부착하였고, 길이방향의 응력을 측정하기 위하여 사용된 게이지는 3mm - 120 Ω 단축게이지를 사용하였다. 절단 후 측정시간의 흐름에 따른 잔류응력의 변화를 조사하기 위하여 절단 후 60일까지 잔류응력의 변화를 추적하였다.

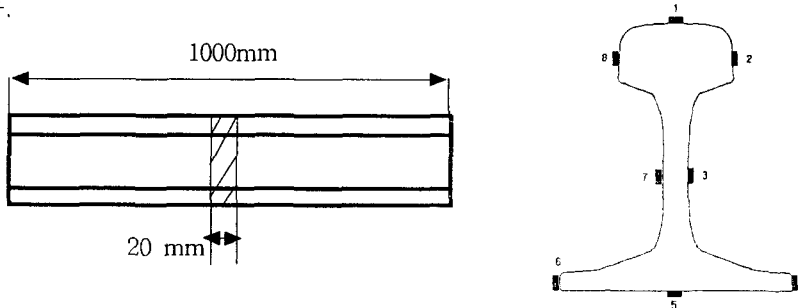


Fig. 3.2 게이지 부착위치 및 절단위치

3.2.2 측정결과 및 검토

Table 3.1 - 3.2는 1시간후, 24시간후, 7일후, 60일후에 측정된 결과를 나타내고 있다. Fig. 3.3은 시편 1에 대한 결과로서 a)의 그림을 살펴보면 1번 게이지의 경우에는 초기의 압축응력이 -10.1 MPa에서 -15.5MPa로 4.4MPa이 증가하였고 2번 게이지는 1.8MPa이 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 초기에 인장응력이 작용한 3, 7, 8의 경우에는 크기는 5.2MPa, 작기는 1.9MPa이 감소하였다. b)의 그림의 경우는 5번 게이지에 대한 경우로서 -3.9MPa이 감소하는 경향을 나타내고 있으며 c)의 그림에서 4MPa에서 0.8MPa 까지 증가하고 있다.

Fig. 3.4는 시편 2에 대한 결과로서 a)의 그림에서는 모두 초기에 압축이 작용하였으며 시간이 경과함에 따라 압축응력이 증가하는 경향을 보이고 있으며, b)의 그림에서는 5번 게이지에 대한 결과로서 인장응력이 증가하였으며 전체적으로 응력이 증가하는 경향을 나타내고 있다.

잔류응력의 경우에는 구조물의 내부와 외부에 인장 및 압축응력이 평형을 이루고 있는 상태이며 이러한 평행조건이 변화되었을 경우에는 잔류응력이 재분포된다. 따라서 잔류응력의 변화를 모두 합하며 "0" 인 상태가 되어야 한다. 본 실험에서는 이러한 평행상태를 파악하기 위하여 레일의 둘레에 대하여 게이지를 부착하였고 이를 살펴보면 Table 3.1과 같다. Table 3.1과 같이 전체 합은 시편 1의 경우에는 +2.9로 어느 정도의 평행을 보여주고 있지만, 시편 2의 경우에는 전반적으로 응력이 증가하여 22.3을 나타내고 있다. 시편 2의 경우처럼 평행조건이 맞지 않는 것은 내부의 잔류응력의 변화를 고려하지 않았기 때문이라고 판단되며 잔류응력의 평행상태를 정확하게 파악하기 위해서는 외부뿐만 아니라 내부의 잔류응력 상태도 고려해야 할 것이다.

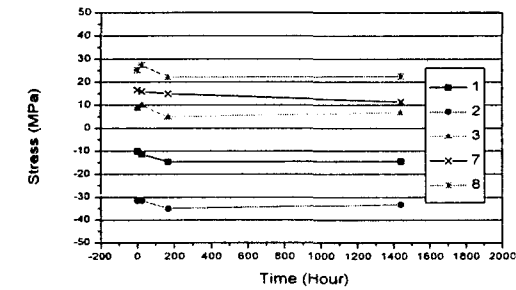
Table 3.1, 3.2에는 잔류응력의 시효효과를 보여주고 있다. 최대변화는 게이지 1번에서 45.5 %까지 변화하였지만 전반적으로 10% 이내로 변화하고 있다. 이렇게 변화량이 작은 이유는 B.L. Bramfitt 등의 시험에서는 시편이 1.2m에서 변화되므로 변화폭이 크지만 본 실험의 경우에는 20mm로 절단 후에 그 영향을 보았기 때문에 그 영향이 작은 것으로 판단된다.

Table 3.1 시편 1에 대한 시간에 따른 응력변화

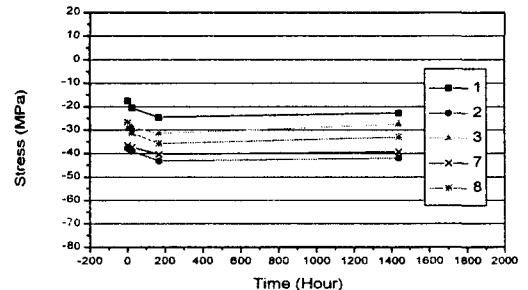
게이지번호	1	2	3	4	5	6	7	8	비고
1시간후	-10.1	-31.5	8.7	-116.5	66.0	-139.1	16.6	25.3	
24시간후	-11.4	-31.5	9.9	-117.0	64.8	-136.8	15.9	27.3	
7일후	-14.7	-35.0	4.8	-120.5	59.8	-140.3	14.9	22.1	
60일후	-14.5	-33.3	6.8	-120.5	62.1	-139.9	11.4	22.4	
변화	+4.4	+1.8	-1.9	+4.0	-3.9	+0.8	-5.2	-2.9	+2.9
변화율(%)	45.5	11.1	13.7	3.4	1.8	0.8	31.7	7.9	

Table 3.2 시편 2에 대한 시간에 따른 응력변화

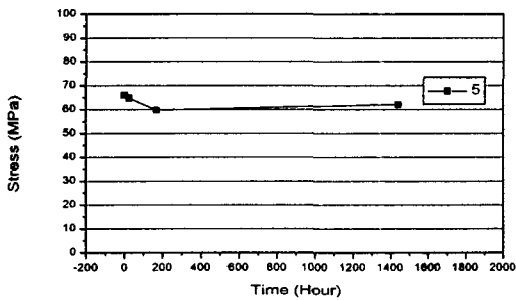
게이지번호	1	2	3	4	5	6	7	8	비고
1시간후	-17.6	-37.9	-29.6	-202.7	94.2	-208.4	-36.6	-26.7	
24시간후	-20.5	-38.9	-28.8	-201.2	92.9	-208.2	-37.3	-31.3	
7일후	-24.6	-43.3	-31.5	-205.6	99.2	-208.9	-40.4	-35.8	
60일후	-22.8	-42.0	-27.5	-205.8	97.5	-207.4	-39.3	-33.1	
변화	+5.2	+4.1	-2.1	+3.1	+3.3	-1.0	+2.7	+7	+22.3
변화율(%)	39.4	14.2	6.4	1.5	3.5	0.4	10.4	34.8	



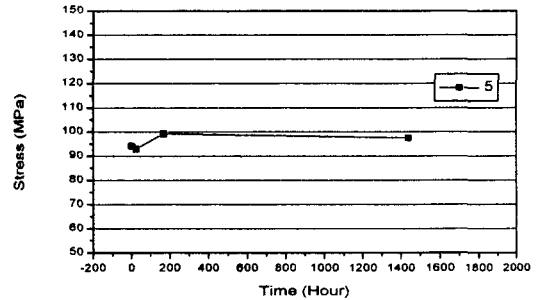
a)



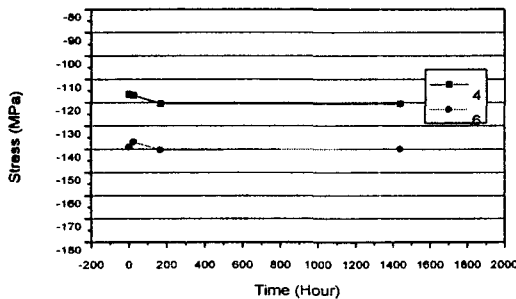
a)



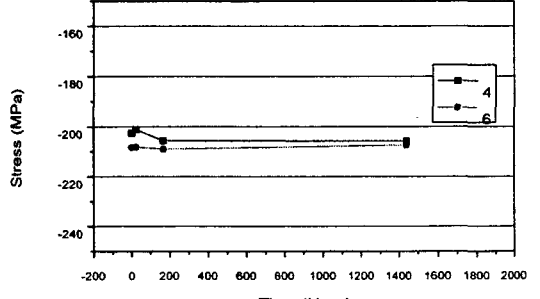
b)



b)



c)



c)

Fig. 3.3 시편 1에 대한 시간에 따른 응력변화

Fig. 3.4 시편 2에 대한 시간에 따른 응력변화

5. 결론

복부절단법에 대한 해석과 레일의 잔류응력 측정을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 복부절단법으로 응력확대계수를 구하기 위해 제안된 식은 국부곡률 변화로 인하여 값의 차이가 발생한다.
2. 복부 절단된 레일의 끝단 변위를 하중조건으로 사용하여 유한요소해석을 통해 응력확대계수를 쉽게 평가할 수 있다.
3. 시편 절단후 시간에 따라 측정된 잔류응력의 변화는 전반적으로 10% 정도이다.

후기

본 연구결과는 “고속철도기술개발사업”의 일환으로 수행되었으며 관계자에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) C.G. SCHILLING, G.T. BLAKE, "The Measurement of Triaxial Residual Stresses in Railroad Rails-Measurement and Analysis Techniques," Experimental Techniques, pp.25~31, 1984.
- (2) S.J. WINEMAN, F.A. McCLINTOCK, "A Saw-Cutting Test for estimating Stress Intensity at a rail web crack due to residual stress," Theoretical and Applied Fracture Mechanics, pp.21~27, 1990.
- (3) B.L. Bramfitt, "Residual stress in rail measured by the web sawcut method," 1992 RAIL STEELS SYMPOSIUM PROCEEDINGS, pp.69~78, 1992
- (4) D. BROEK, "The Practical Use of Fracture Mechanics," Kluwer Academic Publishers, pp. 271~274, 1988.