

레일용접부의 요철에 따른 차량 및 궤도 거동특성에 대한 연구

A study on the characteristics of train and track behaviors due to irregularities at rail welding part

이진욱* 양신추** 이안호***
Lee, Jin-Wook Yang, Sin-Chu Lee, An-Ho

ABSTRACT

Large dynamic forces are generated between wheel and rail due to rail surface irregularities at rail welded part. The effects become more and more significant in the view of the present tendency to train speed increasing. Therefore, the purpose of this paper is to derive useful guides for the effective and economical maintenance of rail welded parts through the wheel and rail interaction analyses. A typical shape for the irregularity of rail welded part is assumed to make the analysis quantitative. The effects of the irregularity depth and train speed on the train and track behaviors are investigated.

1. 서론

열차가 레일이음매를 통과할 때 레일의 불연속성에 의해 발생하는 충격력과 충격력에 의해 발생하는 자갈도상의 손상으로 레일이음매의 과대처짐이 발생한다. 과대처짐은 또다시 더 큰 충격력을 야기시키므로써 승객의 승차감악화와 소음, 진동에 의한 인접주민의 주거에 불편을 초래하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 장대레일의 부설이 점점 증가하고 있으며 1997년 현재 국내의 장대레일 부설현황은 200m이상인 개소만 1431개소 거리로는 1,330km에 이르고 있다. 그러나 장대레일의 많은 장점에도 불구하고 레일 용접부의 효율적인 관리가 이루어지지 않을 경우, 정칙레일의 부설시 발생하는 문제점들이 장대레일에서도 나타나는 경우가 많다. 따라서 장대레일부설의 이점을 최대한 활용하기 위해서는 용접부의 관리의 효율성을 높여야 한다. 용접부 관리의 효율성을 높이기 위해서는 레일용접부 형상에 따른 차량의 거동특성과 레일에 발생하는 응력의 산정, 용접부의 적정관리치 설정, 레일용접부의 피로수명예측에 따른 레일삭정 및 갱환 등의 연구가 이루어져야 할 것이다.

본 논문에서는 차량이 레일용접부를 통과할 때 비정상적인 국부궤도틀림에 의하여 차량과 궤도 상호작용에 의하여 발생하는 차량과 궤도의 동적 거동특성에 대하여 연구하였다. 요철량에 따른 차량 및 궤도의 거동특성을 용이하게 분석하기 위하여 레일용접부의 요철형상을 깊이의 함수로 나타낼 수 있는 단순화된 형상으로 가정하였다. 요철깊이 및 차량속도의 변화에 따른 차량 및 궤도거동 특성을 분석함으로써 용접부 요철관리의 적절한 방안을 제시하였다.

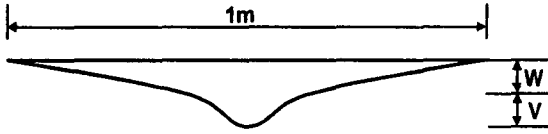
2. 레일용접부 거동특성

본 연구에서는 차량주행시 궤도에 가장 큰 영향을 주는 수직방향 상호작용력을 보다 정확히 해석할 수 있도록 개발된 GTDAP(General Track Dynamic Analysis Program)을 사용하여 용접레일의 특징치를 계산하였다.

* 한국철도기술연구원, 주임연구원
** 한국철도기술연구원, 책임연구원
*** 한국철도기술연구원, 선임연구원

2.1 계산제원

60kg레일과 PC침목으로 구성된 토노반상의 자갈궤도를 가정하였으며 궤도의 물성치는 <표 1>과 같다. 용접요철의 형상은 <그림 1>과 같이 엔크로즈 아크용접에서 주로 나타나는



<그림 1> 요철형상

형상을 사용하였으며 용접부의 형상변화는 측정길이를 1m로 하고 단파장요철의 깊이변화와 요철파장을 변화시켰다. 요철파장은 5cm, 10cm, 15cm, 20cm로 가정하고 요철깊이는 W와 V로 나누어 각각을 변화시키면서 궤도거동을 파악하였다. 또한 주행열차는 무궁화열차의

객차 물성치를 사용하였으며 열차 주행속도는 80km/h, 100km/h, 120km/h, 140km/h로 설정하였다.

<표 1> 궤도의 물성치

궤도모델	물성치	궤도모델	물성치
레일	60	최상층 도상지지강성(kN/m)	0.89×10^6
레일표면반경(mm)	600	최상층 도상뎀핑계수(kN · s/m)	1000.0
레일질량(kg/m)	60.8	중간도상 질량(kg)	52.5
레일강성도(kN · m ²)	6.34×10^3	중간도상 지지강성(kN/m)	0.81×10^6
궤도패드강성(kN/m)	6.0×10^4	중간도상 뎀핑계수(kN · s/m)	1000.0
궤도패드 뎀핑계수(kN · s/m)	98.0	하층도상 질량(kg)	90.3
침목간격(m)	0.6	하층도상 지지강성(kN/m)	2.50×10^6
침목질량(kg)	130.0	하층도상 뎀핑계수(kN · s/m)	1000.0
침목지지 도상강성(kN/m)	1.78×10^6	최하층 도상강성(kN/m)	5.00×10^4
침목지지 도상뎀핑계수(kN · s/m)	1000.0	최하층 도상뎀핑계수(kN · s/m)	980.0
최상층 도상질량(kg)	52.5		

2.2 해석결과

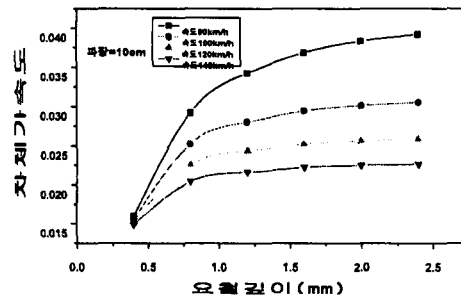
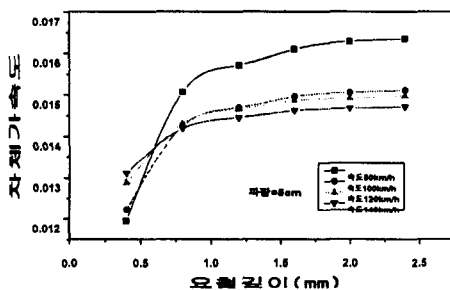
다음은 위에서 언급한 내용을 바탕으로 엔크로즈아크 용접부의 요철형상을 사용하여 해석한 결과들을 나타낸 것이다.

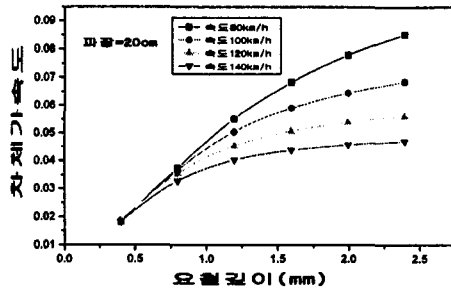
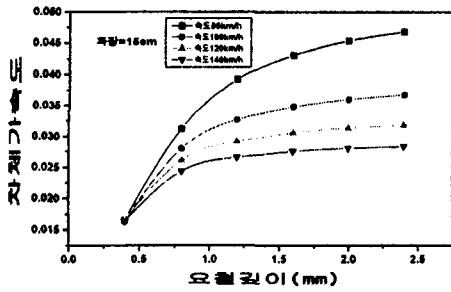
(1) 차체가속도

(가) 요철형상에서의 V변화

① 요철깊이의 영향

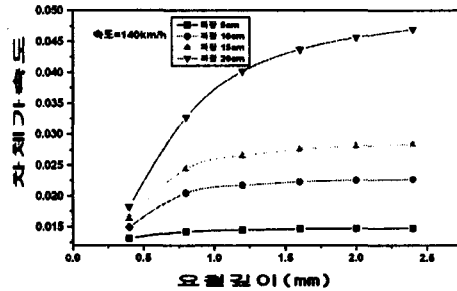
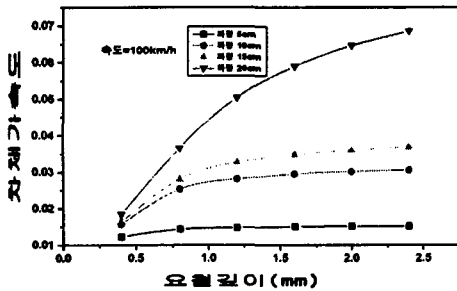
파장을 일정한 값으로 두고 각 속도별로 요철깊이에 따른 차체가속도의 값을 그래프로 나타내면 <그림 2>와 같다. 그림에서 알수 있듯이 차체가속도는 전파장에서 속도에 관계없이 조금씩 증가하는 경향을 보이고 있다. 특히 속도가 느릴수록 차체가속도의 변화량이 상대적으로 크게 나타나고 있다. 이것은 차량이 고속으로 주행하면서 요철을 통과할 때 대차의 현수장치에서 그 충격량이 완화되므로서 차체에 미치는 영향이 저속일때보다는 작게 나타나기 때문이다.





<그림 2> 요철깊이-차체가속도(속도별)

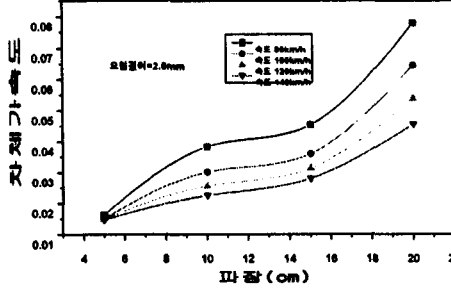
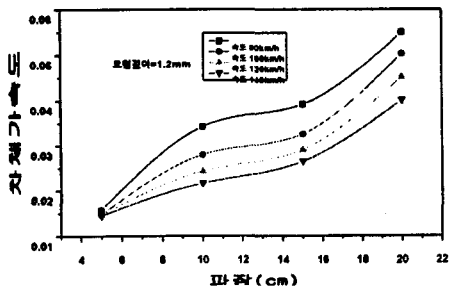
파장별 특성을 나타낸 <그림 3>에서는 파장이 짧은 경우에는 요철깊이에 관계없이 차체가속도가 일정한 값을 나타내고 있으며 장파장일수록 요철깊이가 깊어짐에 따라 차체가속도의 증가량이 커지는 경향을 보이고 있으나 파장에 대한 요철깊이의 비가 커질수록 차체가속도는 일정한 값을 가진다. 이것은 차륜의 반경에 비해 요철파장이 짧은 경우는 요철의 저부에 차륜의 접촉이 이루어지지 않으므로서 요철깊이와는 무관하게 된다. 이는 속도별로 파장과 파고의 관리비율을 달리하여 요철부를 관리하는 것이 더 효과적인 것을 나타내고 있다.



<그림 3> 요철깊이-차체가속도(파장별)

② 파장의 영향

차체가속도에 미치는 파장의 영향을 <그림 4>에 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 모든 속도에서 파장이 길어질수록 차체가속도가 증가하고 있다. 이러한 현상은 모든 요철깊이에 동일하게 나타나고 있다.

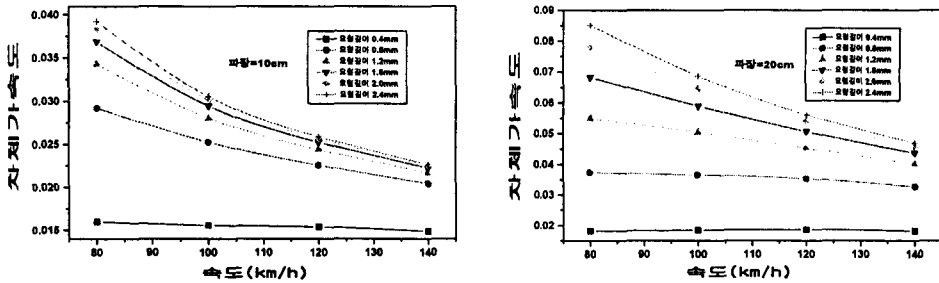


<그림 4> 파장-차체가속도(속도별)

③ 속도변화의 영향

각 파장별로 속도의 변화에 따른 차체가속도의 변화는 <그림 5>와 같다. 요철깊이가 작은 경우는 파장과 상관없이 속도가 증가해도 차체가속도는 거의 동일한 값을 나타

내고 있으며 요철깊이가 깊어질수록 속도에 반비례하여 차체가속도가 감소하는 경향을 보이고 있다. 파장대별로 속도에 관계없이 일정한 차체가속도값을 가지는 요철깊이가 있으며 파장이 길어질수록 일정한 차체가속도를 가지는 요철깊이도 깊어진다.

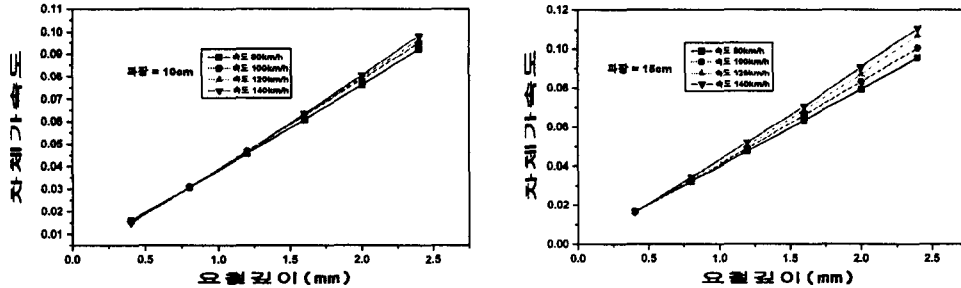


<그림 5> 속도-차체가속도(요철깊이별)

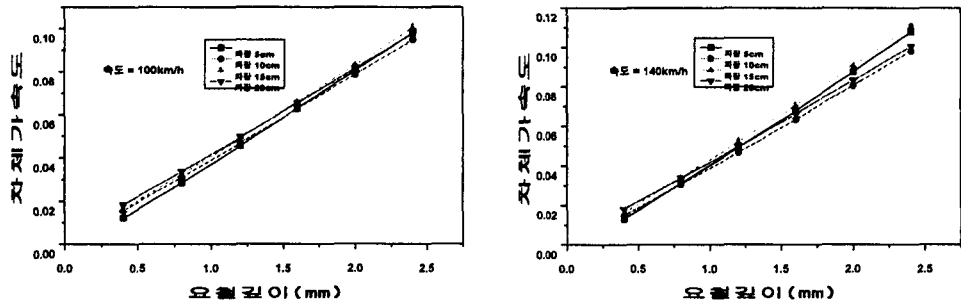
(나) 요철형상에서의 W변화

① 요철깊이의 영향

속도변화와 요철깊이가 차체가속도에 미치는 영향을 나타낸 <그림 6>을 보면 요철형상 V변화(<그림 2>)에서는 요철깊이가 어느 한계점 이상에서는 차체가속도가 일정한 값을 나타내었지만 W변화의 경우에는 요철의 깊이를 따라 계속해서 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 V변화에 비해 차체가속도의 값이 모든 파장에 대해 크게 나타나고 있다.



<그림 6> 요철깊이-차체가속도(속도별)

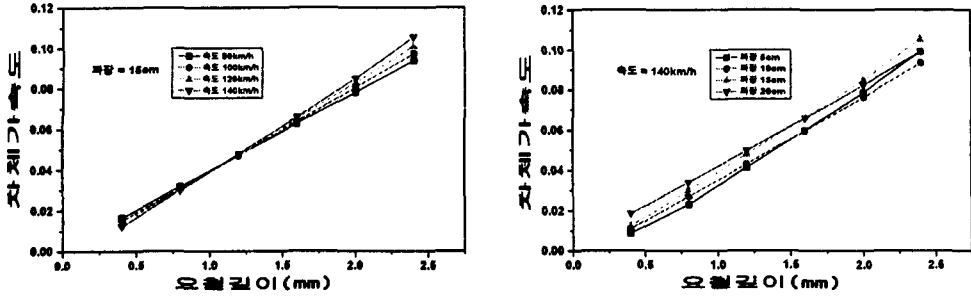


<그림 7> 요철깊이-차체가속도(파장별)

파장별 요철깊이의 영향을 나타낸 <그림 7>에서도 파장의 크기에 상관없이 요철깊이와 차체가속도는 거의 정비례관계에 놓여있는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 특정의 요철깊이부터 일정한 차체가속도를 나타내는 요철의 V변화의 특성과는 크게 다른 점이라 할 수 있다.

이러한 현상은 전체 요철깊이를 일정하게 두고 단파장의 요철깊이(V)를 두배로 크게 한 경우에도

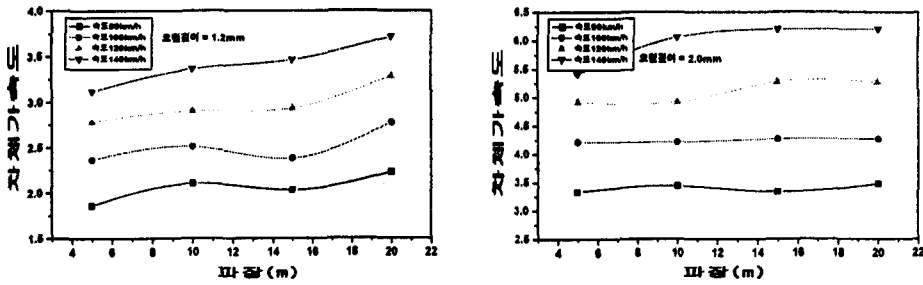
같은 현상을 보이고 있다(그림 8).



<그림 8> 요철깊이-차체가속도

② 파장의 영향

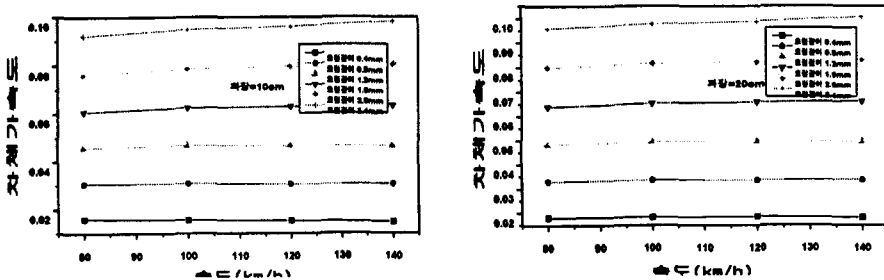
요철깊이와 주행속도에 관계없이 요철형상에서 단파장인 V파장의 크기는 차체가속도에 거의 영향을 미치지 않는다(그림 9).



<그림 9> 파장-차체가속도(속도별)

③ 속도변화의 영향

파장의 크기에 관계없이 주행속도의 영향을 받지 않고 거의 일정한 값을 나타내고 있으며(그림 10) 단파장 요철의 깊이가 두배인 경우도 일정한 값을 나타내었다.

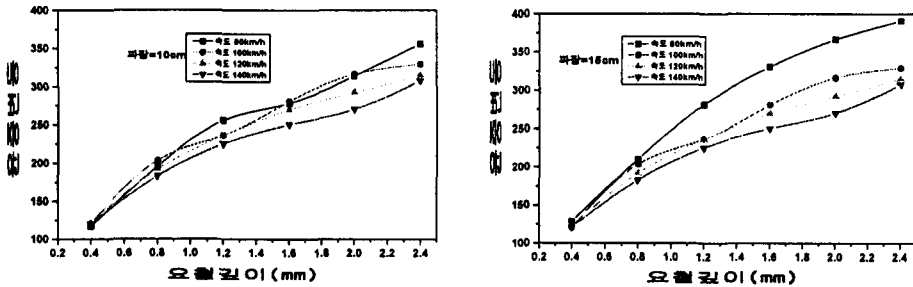


<그림 10> 속도-차체가속도(요철깊이별)

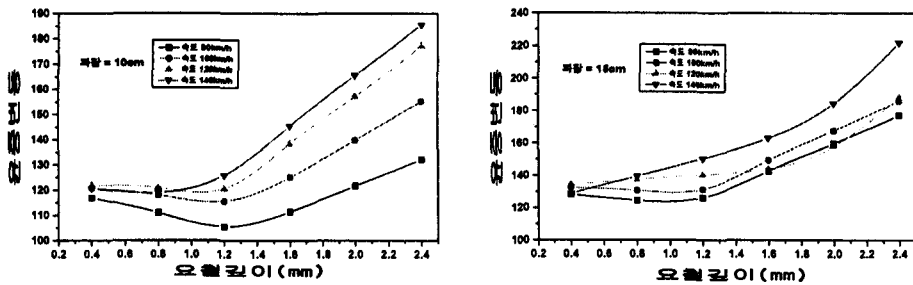
(2) 운중변동

단파장의 파장과 요철깊이(V)를 변화시키는 경우 파장에 관계없이 요철깊이의 증가에 따라 운중이 전체적으로 증가를 하고 있으며 요철깊이가 커질수록 운중의 변동정도는 작아지는 경향을 보이고 있다(그림 11). 장파장 요철의 깊이(W)변화의 경우도 속도와 단파장 길이에 관계없이 요철깊이의 증가에 따라 증가하고 있다(그림 12). 그러나 이 경우는 단파장의 변화때와는 달리

요철깊이가 작을때는 변화량이 작지만 요철깊이가 증가할수록 윤중의 변화량도 커지는 경향을 나타낸다. 특히 요철의 전체적인 깊이가 같은 경우에는 장파장의 요철깊이에 비해 단파장의 요철이 깊을수록 윤중의 값은 더욱 크다.

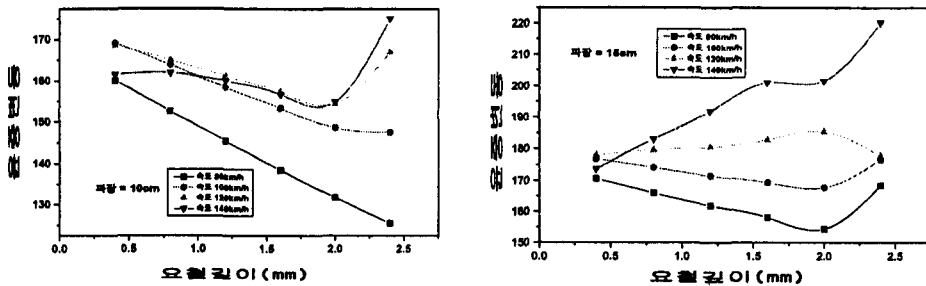


<그림 11> 요철깊이-윤중변동(V변화)



<그림 12> 요철깊이-윤중변동(W변화)

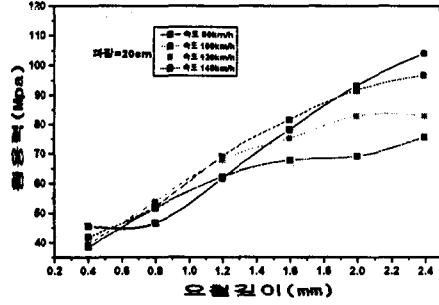
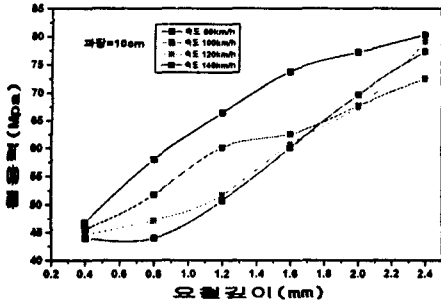
단파장의 요철깊이(V)를 두배로 한 경우의 장파장 요철깊이의 변화에 대한 윤중변동의 특성을 <그림 13>에 나타내었다.



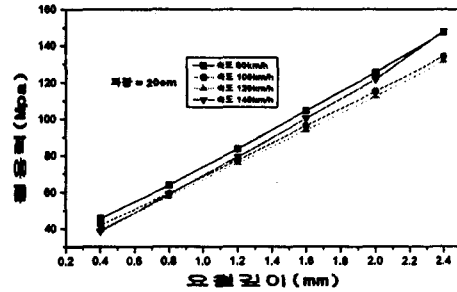
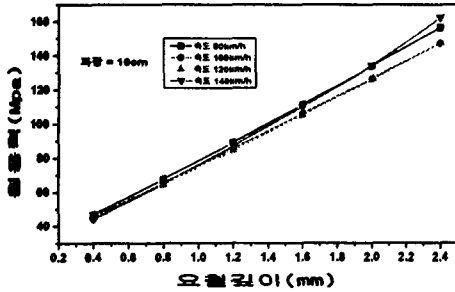
<그림 13> 요철깊이 - 윤중변동

(3) 휨응력

용접부 레일저부에서 발생하는 레일의 휨응력의 변화는 <그림 14>, <그림 15>와 같다. 일정한 파장에서 속도별로 단파장의 요철깊이(V)에 따른 휨응력의 변화는 그림에서 알 수 있듯이 요철깊이에 따라 휨응력이 증가하고 있으나 규칙적인 형상을 가지고 있지는 않다. 반면 장파장 변화의 경우 요철깊이와 휨응력은 정비례관계를 보이고 있다. 또한 속도에 관계없이 일정한 값을 가지고 있으며 단파장의 요철깊이보다는 장파장의 요철깊이에 영향을 많이 받고 있다. 하지만 속도의 차이에 의한 특별한 특징은 나타나지 않고 있다.

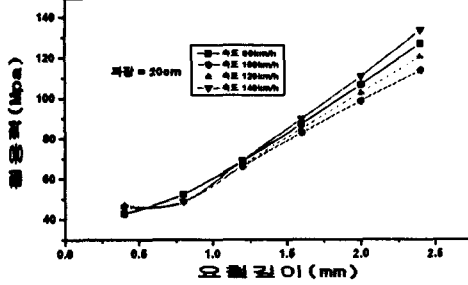
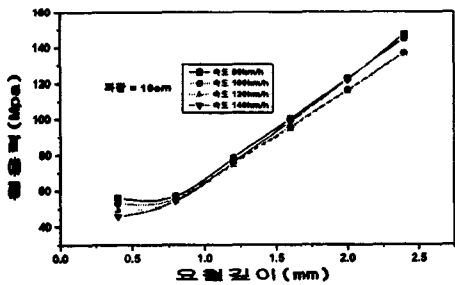


<그림 14> 요철깊이-횡응력(V변화)



<그림 15> 요철깊이-횡응력(W변화)

단파장의 요철깊이(V)를 두배(0.4mm)로 한 경우의 장파장 요철깊이의 변화에 대한 횡응력의 특성을 <그림 16>에 나타내었다. 변화의 특성은 초기특성에 약간의 차이가 있을뿐 0.2mm일때와 거의 같으며 횡응력의 값도 별 차이를 보이지 않고 있다.



<그림 16> 요철깊이-횡응력

3. 결론

용접부의 형상변화에 따른 차량거동 및 레일의 응력특성을 파악하기 위한 시뮬레이션 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 일정한 차체가속도를 유지하기 위해서는 단파장 요철보다는 장파장 요철의 관리가 효율적이다.

단파장 요철에 의한 차체가속도의 값은 전체 요철깊이가 같은 장파장 요철에 의한 차체가속도에 비해 매우 작은 값을 나타내고 있을뿐만 아니라 단파장의 경우 어느 일정 파장깊이 이후에는 차체가속도의 값의 변화가 거의 일어나지 않는다. 그에 비해 장파장에서는 단파장의 길이에 관계없이 요철깊이에 비례하여 차체가속도의 증가가 일어나고 있다.

- 주행속도에 따른 용접부 요철의 차체가속도에 대한 관리는 저속일때의 기준을 사용한다.

단파장의 파장변화 및 요철깊이 변화를 주었을 때, 속도가 증가할수록 차체가속도는 감소하는 경향을 보였으며 장파장의 경우 속도증가에 의한 차체가속도의 변화는 거의 없는 것으로 나타나고 있다.

· **윤중의 기준치에 따른 요철관리는 단파장요철 관리가 효율적이다.**

요철의 깊이가 같은 조건에서는 장파장에 비해 단파장 요철에 의한 윤중값이 훨씬 크게 나타나고 있다.

· **레일저부의 휨용력은 장파장 요철의 관리를 통하여 줄일 수 있다.**

특히 레일저부의 휨용력은 레일용접부의 굴곡피로에 의한 파괴에 직접적인 영향을 주므로 휨용력의 관리는 차량의 주행안전성에 매우 중요한 역할을 한다.

이상에서와 같이 용접부의 관리는 관리기준을 어느것에 중점을 두느냐에 따라 관리대상이 달라질 수 있는 것을 알 수 있다. 하지만 시뮬레이션에 사용한 레일용접부의 형상은 정형파로 가정한 것으로서 실제와는 차이가 있을 수 있을뿐만 아니라 가스압접에서 생성되는 요철은 테르밋트와 형상이 다르다. 따라서 앞으로는 실질적으로 현장에서 측정된 특성값들과 현장에서 측정된 용접부 요철형상을 정형화하여 시뮬레이션을 한 결과를 비교하여 이론값에 대한 보정치를 구하므로써 레일용접부의 관리기준치에 대한 설정 및 보완에 기초자료로 활용할 계획이다.

<참고문헌>

1. 阿部則次, 福井義弘, 長藤敬晴, 石田誠, 三浦重(1994), “レール壽命延伸のための溶接部凹凸管理”, RTRI REPORT Vol.8, No.11
2. 이종득(1998), “레일용접부 굴곡피로가 궤도지지강성에 미치는 영향”, 철도시설, No.68
3. 이진욱, 양신추(1998), “차량고속주행시 차량 및 궤도거동에 미치는 궤도틀림의 영향”, 한국철도학회 춘계학술대회 논문집
4. “97철도통계연보”, 철도청, 제35회