

## 내구 열화에 따른 샤시계 볼트 체결력 변화 인자 연구

최동영\* · 최재칠\* · 한종욱\*

### A Study of Bolt Tightening Changing Factor according to Durability Degradation

Choi, Dong Young\*, Choi, Jae Chil\*, Han, Jong Uk\*

Key Words : Durability(내구), Chassis(샤시), Bolt(볼트), Clamping Force(체결 축력), Ultra-sonic(초음파), Torque(토크)

#### ABSTRACT

In vehicle development process, durability test should be carried out in field condition. Nowadays there are many customer live there multiple conditions. It makes change of the car's material. Such change causes to lose a bolt. Diversifications of climatic conditions are also a matter of loosening the bolt. To avoid this problem, to identify the cause of the problem, and the solution should be applied. To avoid problems during the durability development test should be measured by the clamping force. Ultrasonic instruments clamping force without affecting the torque can be measured. This instrument is part of the problem by monitoring the clamping force required to obtain objective data.

#### 1. 서론

차량을 이용하여 장거리를 이동을 할 때 우리는 차량의 편리성을 느낄 수 있다. 하지만 이러한 편의성을 느끼기 위해서는 기본적으로 차량이 안전하다는 믿음에서부터 시작된다. 고객에게 이러한 믿음을 주기 위해서는 차량 개발 시 안전과 관계된 부분에 대한 엄격한 개발이 이뤄져야 한다. 차량은 다양한 부품으로 이뤄져 있고 이러한 부품들의 수리 및 교환의 용이성을 위해 많은 부위가 체결 볼트/너트로 결합되어 있다. 차량 주행 중 체결부가 풀린다거나, 체결부가 파손된다면 고객 안전에 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 이유로 차량 내구 검증에 있어 차체/샤시계의 크랙 뿐 아니라 각 부품들을 연결하는 체결부의 체결력 또한 중요 개발 부분이다. 특히 샤시계통은 차량에 전달되는 하중이 크고 힘이 가장 먼저 전달되는 부위이며 체결

부가 많아 개발 시 더욱 주의를 요하는 부위이다. 최근 부식 보증연한의 증대로 샤시계의 많은 부품이 표면처리의 방법을 변경하고 있다. 표면처리 방법의 변화는 부식방지에는 효과적이거나, 마찰계수의 변화로 토크를 이용하는 당사 체결 방법에 문제를 야기 할 수 있다. 이러한 토크를 이용한 체결 법은 체결 시 편리하게 적용할 수 있으나 체결 산포가 크고, 마찰계수에 따라 토크가 마찰력으로 손실되어 체결 축력이 필요만큼 나오지 않는다는 문제가 있다. 이러한 문제는 부족한 체결력으로 체결부가 풀리는 위험이 존재 한다. 이에 샤시 주요 부위별 정확한 축력을 알고 내구 열화에 따라 축력이 어떻게 변화하는 지 알아볼 필요가 있다. 또한 수출 지역의 다양화로 험로 구간 및 가혹한 환경에 노출되는 빈도가 더욱 늘어나고 있다. 새로운 험로는 지금까지의 노면과 다른 거동을 통해 좀 더 풀림을 가속화 하는 하중으로 작용될 수 있다. 또한 온도 변화가 볼트 축력에 영향을 미치는 인자이기에 다양한 환경적 요인의 노출은 축력에 대한 고려가 필요하다.

\* 가속내구개발팀 (현대자동차)  
E-mail : rndchoi@hyundai.com



중은 기존의 차량 대비 더욱 늘어나고 있다. 증가한 하중을 견디기 위해서는 올바른 하드웨어 선택뿐 아니라 적절한 체결력으로 체결해 주어야 풀림, 풀림으로 인한 파손 등의 문제가 발생하지 않는다.

### 2.2.1. 디자인 변경에 따른 휠 너트 풀림 사례

신규 개발 차량의 내구 주행 중 휠 너트의 풀림이 발생 하였다. 일정 토크를 부여하여 체결을 완료 한 후 내구 주행 결과 내구 만족 거리의 1/4정도에서 너트 풀림 현상이 발생했다. 아래 Fig. 2와 같이 기존 차종에 비해 볼트의 개수가 줄어들었고, 중심축에서 볼트까지의 간격이 줄어들어 각 볼트에 부하되는 하중이 커진 것이 풀림의 원인 이었다. 이는 휠 전체에 동일 하중이 가해질 때 디자인에 따른 볼트의 위치와 개수에 따라 각 볼트 면에 작용하는 하중이 달라져 볼트에 Slip 거동이 일어나는 것이다. 이러한 문제를 막기 위해서는 설계 단계에서부터 정확히 필요한 축력 값을 도출하여 해석을 통해 사전 검증하는 것이 필요하다. 해당 문제의 경우 축력을 증대할 수 있는 방안으로 개선하여 개발하였다.

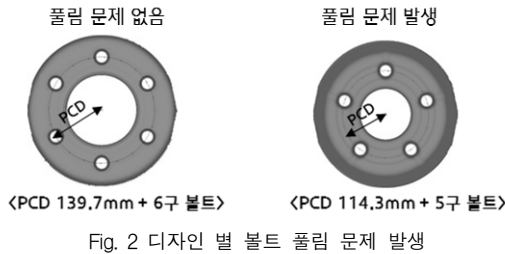


Fig. 2 디자인 별 볼트 풀림 문제 발생

### 2.2.2. 피 체결물 사이 형상에 따른 Slip 거동 사례

개발 중 서브프레임과 차체간 마운팅 볼트가 풀어지는 문제가 있었다. 서브프레임과 차체 사이의 면착 면에서 제동 및 험로 주행에서 서브프레임의 급격한 움직임으로 스틱슬립 이음이 발생하며 체결부의 풀림이 일어난다. 스틱슬립은 순간적으로 서브프레임이 움직이며 차체와 면착되어 있는 부분에서 발생하는 마찰음이다. 이는 체결체 사이의 피 체결물이 축 수직방향으로 움직이며 외력을 가하고 있다는 의미이다. Fig. 3은 해당 문제 부분이다. 문제에 대한 검증을 위해 좌면에 돌기를 넣어 서브프레임이 거동하지 않도록 한 것과 일반적인 좌면의 서브프레임간 축력을 비교 해

보았다. 동일 토크를 가하여 돌기타입과 일반 타입의 서브프레임을 각각 체결하고, 동일 주행 조건으로 주행한 후 축력의 변화 량을 비교한 결과 돌기가 있는 서브프레임의 축력 변화 량이 더 낮게 나왔다.

이론적으로 체결면의 좌면 형상은 면착이 많이 이뤄지는 것이 더 높은 체결력을 확보한다. 체결체와 피 체결체 사이의 면압분포가 고르게 이뤄져야 외력에 의한 풀림 회전이 일어 나지 않기 때문이다. 그러나 본 경우 체결체의 너트 부분이 차체에 고정되어 있어 체결체와 피체결물 사이가 아닌 피 체결물간 결합으로 볼 수 있다. 이러한 경우 외력의 크기가 클 때 체결력 보다 마찰력이 면착에 도움을 줄 수도 있다는 것을 알 수 있다.

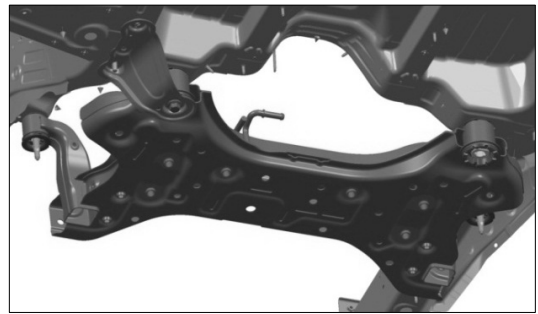


Fig. 3 서브프레임 볼트 풀림 문제

### 2.2.3. 부적절한 체결체 사용에 따른 풀림 사례

세 번째로 디퍼런셜 기어 하우징 볼트의 풀림 문제가 있었다. 하우징의 경우 마운팅 부위가 고무 부시에 연결되어 있고 주행 중 기어의 회전으로 인해 계속적인 잔 진동이 들어오는 부위이다. 그러나 제대로 체결력이 확보된다면 볼트의 풀림은 나타나지 않는다. 하지만 본 문제의 원인은 잘못된 체결 볼트의 선정이었다. 해당 부위의 체결 볼트는 볼트와 스프링 와셔, 평 와셔가 함께 체결되어 있었다. 체결체의 면착면에 들어간 스프링 와셔의 경우 스프링 형태를 만들기 위한 와셔 끝 단면 부위가 체결시 다른 면에 비해 비어있어 면압 분포가 일정하지 않다<sup>(2)</sup>. Fig. 4는 스프링 와셔의 면압이 불균형함에 따라 풀리는 풀림 메커니즘을 해석 기법으로 보여주고 있다. Fig. 5는 Fig. 4의 시험 결과로 스프링 와셔와 일반 너트에 있어 외력 사이클에 따른 볼트의 풀림 각도를 나타낸다.

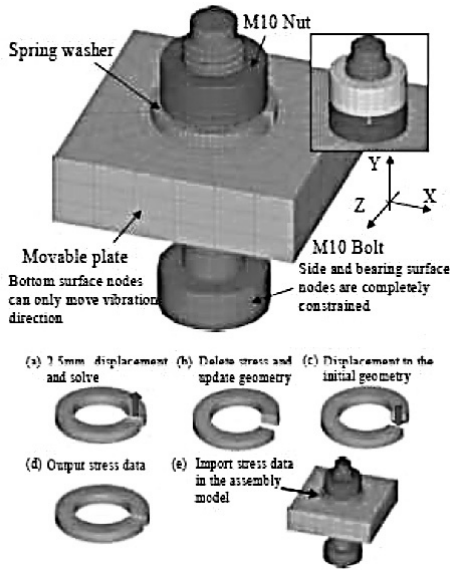


Fig. 4 해석을 통한 스프링 와셔 풀림 시험

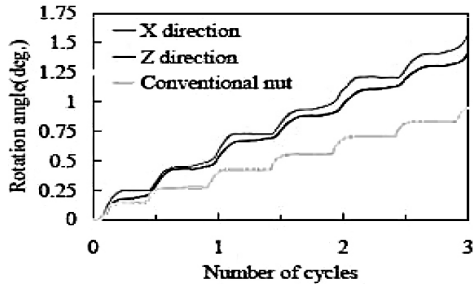


Fig. 5 피체결물의 외력에 따른 풀림각 비교

Table 1 체결부 형상에 따른 풀림 비교

이름	스파이크 와셔	스프링 와셔	육각 너트	육각 플랜지 너트	아크릴 락 너트	접착제 도포
그림						
경향	풀리기 쉽다 ←		기준	→ 풀리기 어렵다		

이런 상태에서 외력이 체결부 축 수직 방향으로 작용하면 풀림은 가속화 된다. Fig. 4와 같이 스프링 와셔를 적용할 경우 일반 볼트 대비 풀리기 쉽다. 이러한 결과를 바탕으로 스프링 와셔는 지양하는 것이 좋다. Table 1은 다양한 환경에서의 풀림 정도를 상호 비교하여 나타낸 자료이다. 위의 자료에서 보면 스프

링 와셔는 일반 육각 너트(볼트)에 비해 풀리지 않는 최대 미끌림 변위의 양이 작아서 풀림의 우려가 높음을 알 수 있다. 단순히 스프링 와셔가 면압을 높여준다는 기존의 설계적 믿음으로 관습적으로 사용하는 것은 오히려 중량 및 원가를 올리며 공학적으로는 더욱 불리한 방향으로 작용하기 때문에 설계단계에서부터 정확한 설계가 필요하다.<sup>(3)</sup>

### 2.3. 개발시 체결부 관리

차량 개발시 체결볼트는 다양한 부분에 다양한 종류가 적용된다. 그러나 동일 차량일지라도 판매 이후의 필요에 의해 다른 체결방법을 적용한다.

#### 2.3.1. 소성영역 체결 관리

조립 후 수리를 위해 풀림과 조임을 반복할 일이 많은 엔진, 변속기의 경우 체결부의 체결력을 최대한으로 얻기 위해 소성체결 방법을 이용하여 체결부를 관리한다. 소성체결 법은 볼트의 탄성영역을 벗어나 소성변형이 일어나는 지점까지 토크를 가해 볼트가 항복 점을 벗어나 체결되어 있는 것을 의미한다. 항복 점을 넘긴 볼트는 탄성회복력을 잃었기 때문에 재 조임 시 초기의 축력까지 체결 할 수 없고, 볼트의 표면에 미세 크랙이 발생할 가능성이 있어 파단의 우려가 크다. 소성영역 체결은 일반적으로 각도법과 토크구배법을 사용하고 있다. 이러한 소성영역 체결 시 A/S등을 위하여 볼트를 풀었다 재 조임 시 파단의 우려가 높기에 새로운 볼트를 사용하는 것이 좋다. Fig. 6은 일반적인 볼트 회전각 대 체결부의 축력을 나타내는 그래프이다. 그림에서도 알 수 있듯이 항복점을 넘어가면 체결부 축력의 기울기가 완만해지고 파단점까지의 변화량이 적어서 체결 시 볼트 최대인장력을 넘지

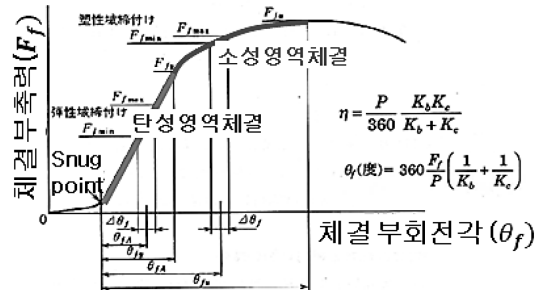


Fig. 6 회전각에 따른 볼트 축력 변화량

않도록 주의해야 한다.

### 2.3.2. 탄성영역 체결 관리

초기 차량 조립 이후 샤프시계는 부품 교환 등의 이유로 체결부의 풀림과 조임을 반복하게 된다. 이런 경우 체결부의 강성을 확보하기 위해 소성체결로 조립 시 체결부를 재 사용하지 못한다. 이러한 문제로 샤프시계통에 대해서는 탄성영역에서의 체결관리를 하고 있다. 탄성 영역 체결법은 체결물을 체결 시 일정 토크를 만족하게 조여주는 토크범이 가장 보편적이다. 당사 역시 샤프시계통 체결물은 토크 범을 사용하여 체결관리를 하고 있다. 그러나 토크 범은 단순 토크만을 관리하기에 체결물이 정확히 요구하는 축력을 가지고 있는지 알 수 없다. 앞에서 언급한 바와 같이 일정 토크를 부여하여 체결 시 볼트 헤드 면과 피체결물의 좌면 사이, 나사산에서의 마찰력 손실로 축력의 산포가 크게 나타난다. Fig. 7은 마찰계수의 산포에 따른 토크 및 축력의 산포를 나타내는 그래프이다.<sup>(4)</sup> 조립 시 토크는 일정하게 관리가 가능하나 면들의 마찰계수는 윤활유, 좌면 상태 등 관리가 어렵다. 체결 축력의 산포는 외력에 의해 볼트 풀림 또는 파단의 우려가 있기에 적절한 관리로 산포를 줄여야 한다. 또한 단순 토크관리는 작업자에 따라 일정하지 않아 신뢰성의 문제도 야기 하고 있다.

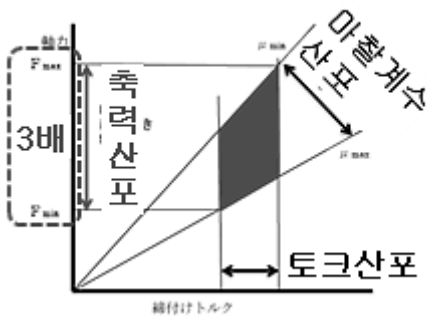


Fig. 7 마찰계수에 따른 토크/축력 산포

### 2.3.3. 차량 개발 시 체결 관리

차량 개발 시 개발을 위한 많은 부품의 교환이 요구된다. 부품의 교환은 체결부의 풀림과 조임을 반복하고 작업 시 마다 기준 토크로 체결하고 있다. 그러나 일정 내구 기간 중 체결부의 토크저하를 알기 위해

서 토크렌치를 사용한다면 정확한 토크값을 알 수 없고, 조임 또는 풀림 토크를 측정하기 위해 기존의 토크값이 변화하는 문제가 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 체결 시 볼트와 피체결물을 함께 마킹 표시를 하여 풀림 여부를 확인 한다. 그러나 험로 주행 및 내구 환경에 의한 풀림 중 일부는 마킹 표시식으로 분간할 수 없는 상황이 발생한다. 추가적인 볼트의 접촉 없이 토크 및 축력에 대한 자료 수집이 요구 되었고, 이를 위해 초음파를 통한 볼트 축력 측정 장비를 통해 문제 우려부위의 볼트를 측정 관리할 수 있다.

### 2.4. 개발문제 개선 검토

개발 시 발생하는 문제에 대한 다양한 측면에서의 개선은 신뢰성 높은 시험 결과를 도출 할 수 있다. 먼저 시험 방법에 대한 개선이 있다. 체결볼트의 풀림 메커니즘은 앞에서 설명한 것과 같이 피체결물의 축수직방향의 외력에 의해서이다. 샤프시계통의 체결부는 다양한 방향으로 체결되어 있다. 특히 서브프레임과 차체를 체결하는 마운팅부의 경우 상하방향의 체결이 이뤄져 있다. Z방향의 수직방향인 X와 Y방향의 하중을 부하하여 볼트의 풀림 여부를 보기 위해 기존의 모드보다 더욱 큰 전후 방향과 횡 방향의 외력을 부하하는 내구 모드를 추가 하였다. 새로운 모드인 뉘버그링과 영암 서킷 모드는 기존에 나오지 않던 볼트 풀림 문제를 발견하였고, 개발 기간 중 검증하여 개선함으로써 기존의 내구 개발에 비해 더욱 강건하고 신뢰성 높은 내구 시험을 할 수 있게 되었다.

또한 전후 방향 및 횡 방향을 중심으로 상하 가진의 복합적인 하중을 부여할 수 있는 내구 시험을 위해 급제동, 출발 모드 및 Curved Belgium 노면을 통해 샤프시계 전반적인 내구력 및 체결 볼트의 체결력을 검증할 수 있다. 이러한 모드의 변화는 기존의 개발기간 발생한 문제와는 일정부분 다른 양상의 새로운 문제점을 야기 하고 있다. 그러나 앞서 말한 것과 같이 수출 지역의 확대로 다양한 환경 및 도로조건을 보편적으로 만족 하기 위해 지속적인 내구 모드 개발은 필요하다.

내구 모드뿐 아니라 체결물의 객관적인 계측 결과를 바탕으로 신뢰성 있는 내구 시험을 진행해야 한다. 기존의 토크게이지를 통한 토크 저하 여부 확인 방법은 내구 주행 중 중간 점검이 불가 하다. 토크를 측정하기 위해 조임 토크로 측정 하는 순간 체결물에 추가적인 토크가 가해져 완료시점에 정확한 토크 변화를

알 수 없기 때문이다. 이러한 문제를 극복하기 위해 초음파 측정 장비를 통해 사시계 체결부의 축력을 초기 내구 투입 전부터 주행 중, 주행 완료 시점까지 지속적인 계측 관리가 필요하다. 본 시험 장비는 초음파를 통해 볼트의 헤드면에서부터 끝단까지의 길이를 측정하여 기준으로 삼고, 캘리브레이션한 데이터를 바탕으로 체결 후 볼트의 신장된 길이로 축력을 계산하는 방식이다.(Fig. 9)



Fig. 8 초음파 축력 계측 장비

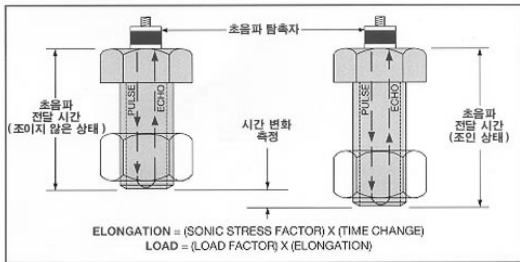


Fig. 9 초음파 축력 계측기 원리

개발단계에서 토크 풀림의 문제가 있던 차량에 동일 부위를 초음파 측정 장비를 통해 계측 해 보았다. 계측 위치는 전방 서브프레임의 후측 마운팅 볼트와 서브프레임과 로어암의 G부시 마운팅 볼트 부이다. 개발단계에서 풀림 문제가 발생한 서브프레임 마운팅 볼트 이외 노면의 영향도를 비교하기 위해 동일한 방향으로 체결되는 G부시 체결 볼트를 비교군으로 선정하였다.(Fig. 10) 내구 노면에 따른 축력 변화를 통해 정량적인 영향도를 파악해 보았다. 각 체결 부에 대한 초기 체결토크와 시험 전 초기 축력값은 아래 Table 2와 같이 체결 하였다. 주행 시험은 5가지의 가속노면에 대해 각 5회 실시 하였다. BG노면, XC노면, Pot-Hole, ABS제동 그리고 빨래판로를 각 내구 SPEC에 맞게 주행한 후 축력 변화 정도를 확인해 보았다.

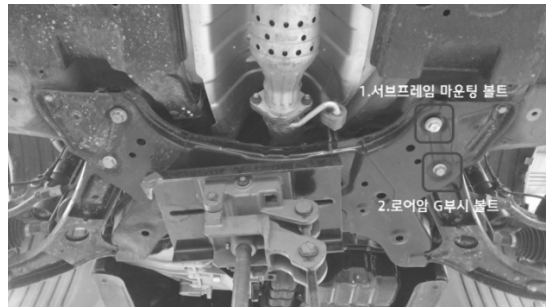


Fig. 10 축력 풀림 시험 부위

Table 2 초기 축력 및 체결 토크

체결위치 (SPEC)	체결토크(kgfm)	축력(kN)	
S/Frame 마운팅 볼트	LH	18.1	32.15
	RH	18.4	33.84
L/Arm G 부시 마운팅	LH	16.0	23.41
	RH	18.2	29.71

시험 결과 가장 체결부 풀림에 가장 가혹조건인 빨래판로에서 축력 저하가 크게 나타 났다. Fig. 11의 결과 기타 주행 노면에서의 축력 변화는 미비하나 빨래판로에서의 축력은 떨어짐을 알 수 있다. 또한 Fig. 12와 비교할 때 풀림 문제가 발생한 부위에만 영향을 미치는 것을 보아 해당부위의 설계상 문제가 있음을 알 수 있었다. 아래의 시험시 배기계가 체결 볼트의 근처에 존재 하고 엔진 및 변속기의 열이 체결 볼트에 영향을 미쳐 시험 후 볼트의 온도가 크게 올라가는 현상이 있었다. 시험 직 후 볼트의 온도가 높이 올라간 상태에서 측정하는 축력 값과 1시간 이상 쿨링하여 대기온에서 기본적인 볼트의 온도일 때 축력 값은 변화함을 알 수 있었다. 온도가 높은 상태일 때는 볼트의 연성 성질로 인해 늘어나는 길이가 길어 더 높은 축력을 나타내지만 온도가 대기와 맞춰지며 볼트의 재질적 성질이 일반적으로 변화하면서 축력은 떨어지는 양상을 얻을 수 있었다. 이는 초음파를 통해 볼트의 늘어난 길이를 통해 축력을 측정하는 본 장비의 특성에 따른 변화이다. 내구 평가에 있어 가혹 조건을 기준으로 하고 강건한 개발을 위해 본 시험에서는 쿨링 후 일정하게 수렴한 축력을 계측하였다.

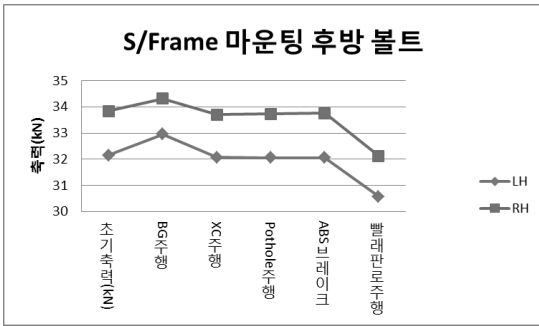


Fig. 11 노면별 S/Frame 축력 변화

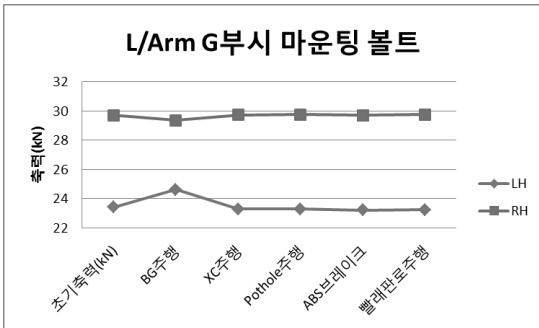


Fig. 12 노면별 G부시 축력 변화량(비교군)

이러한 결과를 통해 내구시 축력 풀림의 우려부위에 대한 내구 진행 전/중/후의 지속적인 볼트 축력 모니터링이 가능해 졌다. 개발에 있어 산포가 큰 토크 체결을 통해 내구 개발을 진행하는 것은 신뢰성 있는 개발 결과를 얻기 힘들다. 축력의 변화를 지속적으로 모니터링 하여 볼트와 체결부의 형상에 따른 축력 데이터를 수집하여 객관적인 자료화 한다면 풀림 문제에 대한 좀 더 다양하고 빠른 해결책을 제시 할 수 있을 것이다. 또한 개선의 효과를 신속하게 알 수 있으므로 신뢰성 있고 빠른 내구 검증을 할 수 있을 것이다.

### 2.5. 향후 계획

초음파 축력 계측기를 통해 개발 시 문제가 된 차량의 개선안에 대한 개선 검증을 통해 유효성을 확인한다. 또한 개발중인 차종에 문제 우려부위를 선행 계측하여 내구 주행 전/중/후 변화하는 축력값을 계측할 예정이다. 또한 플랫폼에 따른 각 부위별 적정 축력 값을 계측하여 내구 투입 전 선행 평가 가이드를 작성 할 예정이다.

### 3. 결론

본 연구를 통하여 최근 이슈가 되고 있는 사시계통의 체결부 풀림 문제에 대한 원인 파악과 개발 기간에서 나타나는 관리 방법에 대해 알아보았다. 이러한 문제를 해결하기 위한 개선안을 다방면으로 검토하였다. 또한 객관적인 데이터를 수집, 활용하여 내구 검증을 할 수 있는 방법에 대해 알아보았다.

- 1) 체결부 볼트의 풀림은 피 체결물의 축방향 수직으로 작용하는 하중에 의해 발생한다. 사시계통의 경우 지면에서 들어오는 하중이 전후, 상하, 좌우 모두 입력됨에 따라 입력되는 외력을 견딜 수 있는 축력뿐 아니라 적절한 하드웨어 선택으로 풀림의 가능성을 줄여야 한다.
- 2) A/S가 어려운 엔진 변속기의 경우 소성 영역 체결법을 사용하여 볼트의 체결력을 최대한 사용하고 있다. 탄성영역의 사시계 체결은 산포가 많아 정확한 축력 관리가 어렵다. 토크벌의 단점에 대한 보안으로 새로운 개발 기준이 필요하다.
- 3) 개발시 나타나는 축력 문제를 해결하기 위해 다양한 모드의 추가와 더불어 객관적인 축력 데이터 확보를 위한 초음파 볼트 축력계의 축력 계측 및 데이터화가 필요하다.
- 4) 축력 계측을 통한 데이터를 바탕으로 객관적이고 신뢰성 높은 선행 개발 가이드를 정립하여 내구 개발에 활용 하고자 한다.

### 참고문헌

- (1) 핫토리 토시오 (2011年), Strength Design Handbook for Failure Prevention of Product. (NTS 출판) P.152~157
- (2) 핫토리 토시오 (2011年), Strength Design Handbook for Failure Prevention of Product. (NTS 출판) P.153~154
- (3) 핫토리 토시오 (2011年), Strength Design Handbook for Failure Prevention of Product. (NTS 출판) P.155
- (4) (2003年), 増補ねじ締結概論. (養賢堂発行)