

궤도진동에 대한 ISU 고압 시일 내구성능 개선

한 인 식*

국방과학연구소

Durability Improvement of High Pressure Seal for ISU under the Track Vibration

Insik Han*

Agency for Defense Development 5-3-2, Yuseong P.O.Box 35, Daejeon 305-600, Korea
(Received 18 July 2008 / Accepted 11 September 2008)

Abstract : The new suspension, called ISU(In-arm suspension system) was developed for Infantry Fighting Vehicle. During vehicle field test, early failure of ISU's sealing system was occurred after driving the paved road. From the failure analysis, ISU's displacement data was obtained. In analysis of PSD data, track induced vibration which has high frequency and small amplitude characteristics, was dominant. Such track vibration would result in early seal failure because of friction increase and lack of lubrication. To simulate track vibration environment in laboratory, seals were tested under the condition of 20Hz, ± 1 , ± 2 mm amplitude. The same type of seal failure occurred in vehicle test, was reproduced in the lab test under ± 1 mm amplitude. From the test results, the durability of improved seal was increased by 2.5 times compared with the previous one.

Key words : ISU(로드암 내장형 유기압 현수장치), High pressure seal(고압 밀봉 시일), Track induced vibration(궤도 진동), Tracked vehicle(궤도 차량), Durability(내구성능)

1. 서 론

군용 궤도차량은 전투목적을 위해 험지 및 야지에서라도 우수한 기동성능을 확보해야 하므로 현수장치의 설계특성이 민수용 차량과는 많은 차이점을 갖게 된다. 기동성능은 동력장치의 성능에 의해서도 많이 영향을 받지만, 야지노면의 경우는 현수장치의 성능에 의해 그 기동성이 좌우한다고 할 수 있다.

이에 따라 군용 궤도차량의 경우 기동성능의 극대화를 위해 공압 스프링을 적용한 유기압현수장치(HSU : Hydropneumatic Suspension Unit)를 1980년대 중반부터 적용하여 왔다. 유기압현수장치의 공압스

프링은 정적상태에서는 낮은 스프링 계수를 가지고, 스프링의 압축량이 커질 경우는 스프링 계수가 커지는 비선형적 특성을 가져, 가진 변위가 작을 때는 승차감이 우수하게 되며, 야지주행 시 가진변위가 커질 경우에는 공압 스프링 계수가 커져 차량의 하부와 지면이 접촉하는 것을 막아 차량 손상 및 충격을 방지한다.¹⁾

최근에는 유기압현수장치의 체적 및 중량을 감소시키기 위해 로드암(road arm)에 스프링/감쇠장치를 내장한 로드암 내장형 유기압현수장치(ISU : In-arm hydropneumatic Suspension Unit)가 개발되고 있다.

Fig. 1에서 ISU가 적용된 군용 궤도차량(장갑차)을 나타내었다. 차량 동체에 장착된 ISU의 한쪽 끝

*Corresponding author, E-mail: insikhan@add.re.kr

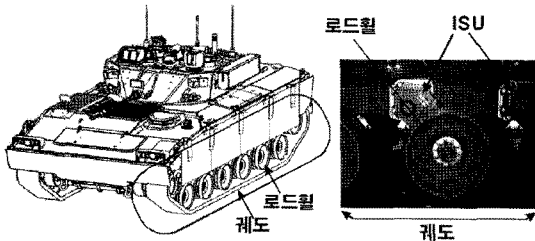


Fig. 1 ISU of tracked vehicle

단에는 로드휠(road wheel)이 장착된다. 차량 주행 시 로드휠은 궤도(track)의 상부 면을 주행하게 된다.

Fig. 2에서 ISU, 로드휠 및 궤도의 단면을 나타내었다. ISU는 가스 스프링과 감쇠장치를 일체화 한 장치이다. 지면 굴곡에 따른 로드휠의 상하 운동은 ISU의 회전운동으로 변환되고, 이에 따라 ISU 하우징과 작동피스톤의 상대운동이 발생한다. 작동 피스톤의 변위는 ISU 기구 메커니즘에 의해 로드휠 수직변위의 약 1/3에 비례하는 구조로 되어 있다.

ISU 내부는 작동유와 가스가 충전된다. Fig. 2에서 ISU가 반시계방향으로 회전 시, 작동유는 댐퍼를 거쳐 가스 스프링의 체적을 감소시키게 되어 가스압력이 증가된다. 이때 감쇠력과 스프링력이 발생한다.

25톤급 군용차량의 경우 초기 정적상태의 압력은 100~130bar이고, 최대 압력 800bar의 고압조건에서 운용되고 있어 ISU의 내구성능은 고압 밀봉 시일의 설계특성에 의해 결정된다고 할 수 있다.

ISU의 작동 피스톤은 운용 중 발생하는 내압에 대한 우수한 밀봉성능이 요구된다. 고압 운용조건에서 효과적인 밀봉을 위해서 작동 피스톤의 1차 시

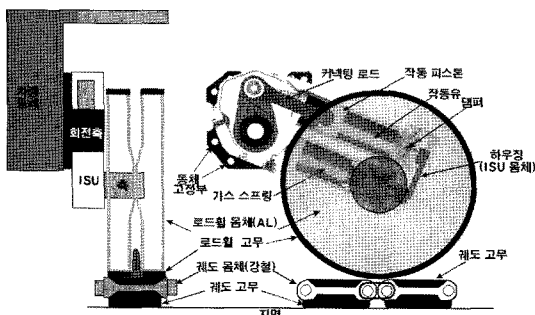


Fig. 2 Section view of ISU, road wheel and tracks

일 조립체는 충격적인 내압에 대한 저항성에 설계 중점을 두며, 2차 시일 조립체는 밀봉과 더불어 누유를 방지하는 데 우수한 특성을 가지도록 설계한다. 이러한 고압 시일 시스템의 개발은 해석적인 방법만으로는 충분하지 않아, 시험, 결과 분석 및 설계 개선의 과정이 반복되는 경우가 많다. 또한 시일 전문업체의 경우도 일반적인 시일에 대해서는 많은 데이터베이스를 가지고 있지만, ISU 운용조건에 적합한 시일에 관한 데이터베이스는 거의 없어 개발 시 많은 어려움이 발생하는 부품이다.

ISU 개발 시 실차 운용조건을 모사한 실험실 내구도 시험을 수차례 실시하여 내구성능이 양호한 밀봉시스템을 개발하여 실차에 적용하였다. 그러나 실차시험에서 포장도로를 연속으로 운용 후 ISU 고압시일의 조기마모 결함이 발생하였다. 본 논문에서는 이러한 ISU 밀봉 시스템 결함에 대한 원인 분석, 재현시험 및 설계개선 결과에 대해 기술하였다.

2. ISU 고압 시일 조기마모 원인 분석

2.1 결함 내용

실차시험 중 차량의 좌측 기움 현상이 발생하여 ISU 가스압력 및 작동유를 점검한 결과, 가스압력은 정상 압력을 유지하였으나, 일부 ISU에서 작동유 누유를 확인하였다.

작동유 누유 원인분석을 위해 ISU 분해검사²⁾를 실시한 결과 작동 피스톤 2차 시일 조립체 중 탄성 시일에 조기마모가 발생하였음을 확인하였다(Fig. 3의 원으로 표시된 부분).

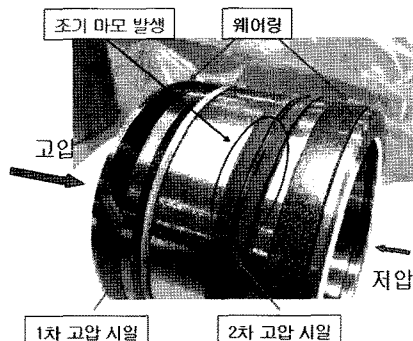


Fig. 3 Failure of high pressure seal

2.2 고압시일 조기마모 원인분석

2.2.1 2차 고압시일의 구조

ISU 작동피스톤에 장착되는 고압 시일은 앞서의 Fig. 3에서 표시한 바와 같이 3종, 4개의 시일이 장착된다. 양쪽 끝에는 웨어링(Wear ring) 2개가 장착되어 실린더와 피스톤의 간격을 유지시킨다. 웨어링 사이에는 고압이 작용하는 쪽에 1차 고압 시일을, 저압 측에는 2차 고압 시일이 장착된다. 결합이 발생한 부위는 2차 고압 시일이며 그 구조는 Fig. 4와 같다.

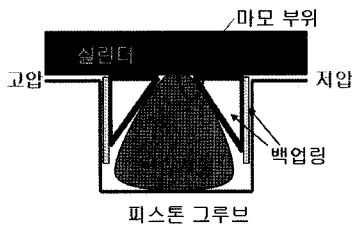


Fig. 4 Structure of secondary seal

2차 시일 조립체는 피스톤의 그루브에 장착되어, 피스톤과 실린더 사이의 작은 틈새에 작용하는 압력을 밀봉하여 작동유 누유를 방지한다.

시일이 장착되는 피스톤의 그루브 폭(10.77mm), 삼각형의 델타 백업링 폭(3.28mm) 및 직선 형태의 엔티-익스트루전 백업링 폭(0.69mm)을 고려 시 실린더와 접촉하는 탄성시일 폭은 2.83mm로 계산된다. 결합이 발생한 탄성 시일의 마모 부위를 Fig. 4에 붉은 원으로 표시하였다. 마모부위는 탄성시일과 실린더와의 접촉부의 1/2 수준이므로 그 폭은 1.4mm이다.

실린더와 접촉하는 탄성시일 부위의 마모로 결합이 발생한 점으로 판단 시, 탄성 시일에 작은 변위가 반복적으로 작용할 경우 실린더와 탄성시일 사이는 무 윤활 상태가 되면서 마찰력 증가 및 온도 증대로 인해 시일의 기계적 물성이 저하되어 조기마모가 발생된 것으로 추론된다. 또한 고압/저압에 의한 압력 차이로 인해 저압 측의 탄성 시일 부분에 응력이 집중된 것으로 판단된다.

2.2.2 ISU 실험실 내구도 시험 결과 검토

ISU의 내구성을 평가하기 위한 실험실 시험은 야

지주행조건을 고려하여 진폭 75~360mm, 주파수 0.7Hz 정현파를 60만회 가진하는데 이는 조기마모의 원인으로 추정되는 미소 변위와는 큰 차이가 있다. 총 60만회의 실험실 내구도 시험 결과 또한 본 결합과 같은 탄성 시일의 조기마모는 발생하지 않았으며, 양호한 밀봉성능을 유지하는 것으로 나타났다. 따라서 75mm 이상의 대변위 내구도 시험 프로파일은 ISU 고압 시일의 조기 마모의 원인이 아닌 것으로 판단된다.

2.2.3 주행노면별 미소진동 발생가능성

차량 주행이력 분석결과와 주행이력에 따라 시일 마모정도가 달라져, 포장도로/야지와 같이 노면 종류에 따른 진동의 형태를 조사하였다.

Fig. 5에서 평탄 포장도로상의 궤도를 나타내었다. 로드휠이 궤도 상부를 주행 시 궤도 몸체 간 불연속점과 강철 소재의 궤도 몸체부와 고무부의 강성의 차이로, 미소진동이 발생하게 된다. 발생된 미소진동은 로드휠을 통해 ISU의 작동 피스톤으로 전달된다.

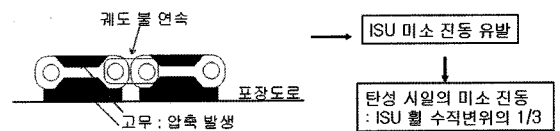


Fig. 5 Mechanism of track induced vibration on paved road

차량 주행 속도에 따른 궤도 가진 주기 및 주파수의 계산은 식 (1), (2)와 같다. 궤도 불연속에 의해 발생하는 진동의 주파수는 궤도 피치와 반비례하고, 차량 속도에 비례한다.

$$T = \frac{\text{TrackPitch}}{\text{Vehicle Speed}} = \frac{0.5486}{V} \quad (1)$$

$$f = \frac{1}{T} = 1.823V(\text{Hz}) \quad (2)$$

where V in KPH

반면 Fig. 6과 같은 야지노면 주행 시에는 포장도로 주행 시 보다 상대적으로 큰 동체 운동과 노면 굴곡으로 인해 ISU 진폭이 커지게 되어, 작동 피스톤은 궤도에 의한 미소진동과 더불어 대 변위 운동특성을 동시에 가지게 된다. 이에 따라 야지 주행 시의

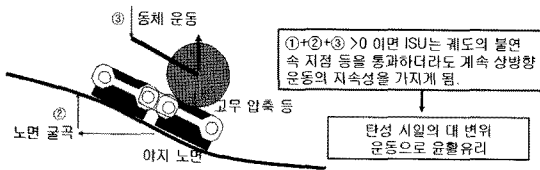


Fig. 6 Mechanism of track induced vibration on cross country road

ISU 작동 피스톤 시일의 윤활 조건은 미소진동을 주된 가진요소로 가지는 포장도로 주행 시 보다 유리할 것으로 예상된다.

2.2.4 주행노면별 ISU 가진변위 분석

포장도로 및 야지주행 시 ISU 휠 변위 계측자료³⁾를 이용하여 미소진동을 정량적으로 분석하였다.

Fig. 7은 야지를 15KPH 속도로 주행 시 측정된 1, 2, 4번 로드휠 위치에서의 ISU 휠 수직변위이며 Fig. 8은 포장도로를 45KPH 주행 시 동일한 위치에서 측정한 ISU 휠 수직변위이다.

야지노면 주행 시는 노면의 굴곡 및 차량의 움직임에 의해 ISU 휠 수직변위의 변동이 포장도로 주행 시보다 더 크며, 포장도로의 경우에는 평균값을 중심으로 편차가 적음을 알 수 있다.

고압 밀봉 시일의 내구성은 시일에 작용하는 압력과 상대운동의 속도에 의해 크게 영향을 받으므로, 이를 분석하기 위해 ISU 휠 수직 속도에 대한 PSD를 구하였다. PSD를 구하기 위해서 Matlab의 pwelch 함수⁴⁾를 이용하였다. 함수를 구동하기 위한 명령어의 형식은 다음과 같다.

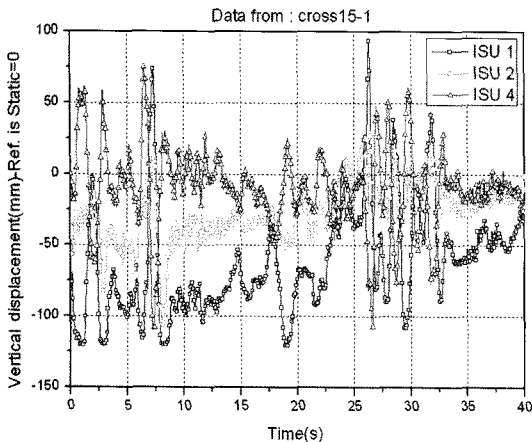


Fig. 7 Vertical wheel displacement on cross country road

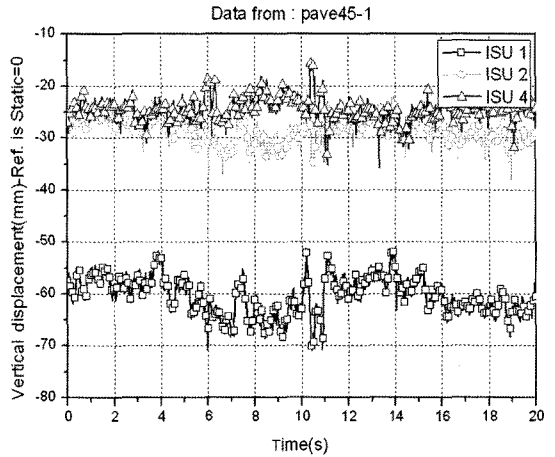


Fig. 8 Vertical wheel displacement on paved road

$$[Pxx,w]=pwelch(x,window,noverlap,nfft) \quad (3)$$

계산 시 window는 1024, overlapping은 50%를 적용하였다.

Fig. 9는 야지노면 및 포장도로로 주행 시의 ISU 휠 수직속도를 계산한 후 PSD를 구한 결과이다.

45KPH로 주행한 포장도로에서는 약 80Hz에서 첫 번째 피크가 발생하며, 15KPH 주행한 야지노면에서는 약 30Hz에서 첫 피크가 발생되었다. 이러한 피크 주파수는 식 (2)에서 나타낸 궤도 주파수 계산식의 결과와 잘 일치하여, 이 피크는 궤도진동에 의해 발생함을 알 수 있다.

특히 포장도로로 주행 시 궤도진동에 의한 속도 PSD 값의 크기가 다른 주파수에서의 속도 PSD 값보

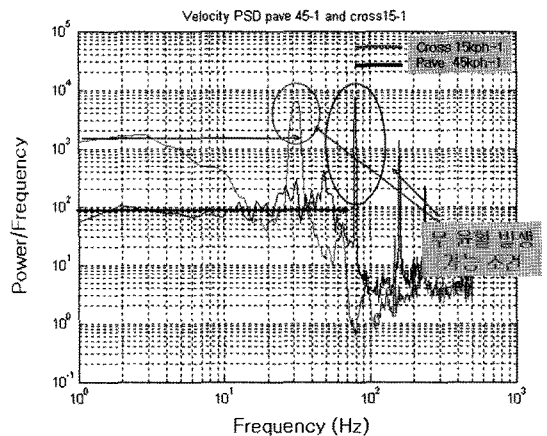


Fig. 9 PSD data of ISU velocity

다 커, 궤도 진동 조건하에서 무 윤활 발생가능성이 더 클 것으로 예상되며 이에 따라 시일의 내구수명 측면에서도 불리한 조건으로 판단된다.

실험실 재현 시험 조건 설정을 위해 ISU 휠 수직 변위 신호를 8Hz로 high-pass 필터링 후, RMS 값을 구한 다음 등가 진폭을 구하였다.

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2 dt} \quad (4)$$

$$X_{amplitude} = \sqrt{2} * X_{RMS} \quad (5)$$

궤도진동에 의한 고주파수/저변위 진폭의 평균 이 포장도로에서는 0.8mm로 계산되었으며, 야지노면에서는 1.7mm로 계산되었다. 포장도로의 경우 고주파수 성분의 대표 진폭 크기가 야지주행 시의 고주파수 대표 진폭 크기보다 작아, 포장도로 주행 시 탄성시일에서 무 윤활 조건이 발생할 가능성이 더 높은 것으로 판단된다.

2.2.5 실험실 재현 시험 및 결과

야지와 포장도로에서의 ISU 변위 및 속도에 대한 주파수 분석 결과 차량 주행 속도와 비례하는 궤도 주파수가 발생하며, 궤도주파수 성분의 속도가 크고, 진폭이 작아 시일의 내구성에 영향을 미치는 주된 성분으로 판단하였다. 이를 확인하기 위하여 궤도 진동 조건을 모사하여 ISU 시일의 내구성 시험을 실시하였다. 시험 조건은 Table 1과 같으며, 시험 장치는 Fig. 10과 같다.

가진 주파수의 경우 시험장비의 최대용량인 20Hz로 설정하였다. 20Hz는 PSD 분석 예에서의 주파수 80Hz 보다는 상당히 낮으나, 탄성시일의 조기 마모 원인이 미소진동의 작은 진폭과 마찰열 축적에 따른 결과로 예상되므로 20Hz로 시험해도 실험실 재현이 가능할 것으로 판단하였다.

Table 1 Lab test condition

항목	내용
가진 파형	정현파
주파수	20Hz
진폭	± 1, 2mm
시험장비	MTS 25톤 고속 유압가진기
적용 시일	결합 발생품과 동일 종류

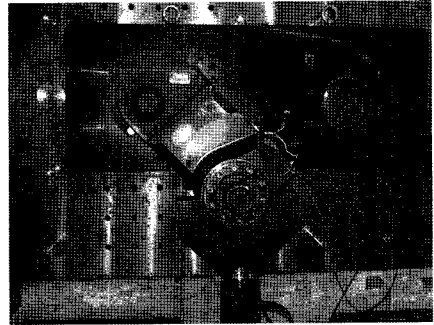


Fig. 10 Test apparatus

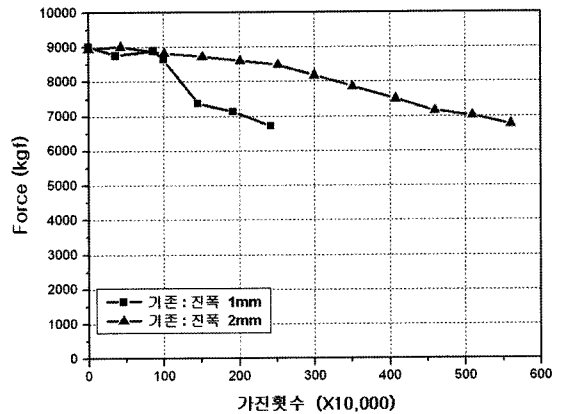


Fig. 11 ISU test result for track vibration

Fig. 11에 ±1, 2mm 진폭으로 가진시의 시험결과를 나타내었다. 포장도로에 해당하는 ±1mm, 20Hz 조건으로 242만회 가진 후 ISU 스프링 최대 하중이 25.7% 감소(9,027 → 6,709kgf)하여 내구수명(-25% 하중 감소)에 도달하였다. 분해검사 결과 탄성시일에서 마모가 발생하였으며, 실차시험 시 발생한 결함과 동일한 마모형태임을 확인할 수 있었다.

야지노면을 모사하는 ±2mm 가진 시에는 스프링 최대하중 25% 감소까지는 500만회 이상의 가진이 필요하였다. ±2mm 가진 조건에서는 ±1mm 가진시보다 마모가 천천히 발생하였으며, 마모패턴은 ±1mm 가진 시 마모형태와 유사하였다.

3. 설계 개선 및 입증시험

3.1 고압 시일 설계개선

고압 시일의 설계 보완은 시일 전문 제작업체와의 협조를 통해 진행되었다. 설계 보완의 주안점은

엔타-익스트루전 백업링의 강도보완과 길이 증대에 두었다. 기존품 대비 개선품의 엔타-익스트루전 백업링은 폭(d)과 두께(c)를 증대시켰고, 델타 백업링의 폭(a)은 감소시켰으며, 탄성시일은 기존과 동일제품을 유지하였다(Fig. 12). 이에 따라 피스톤의 그루브에서 시일 시스템이 차지하는 체적비율인 충전율이 증가되었다.

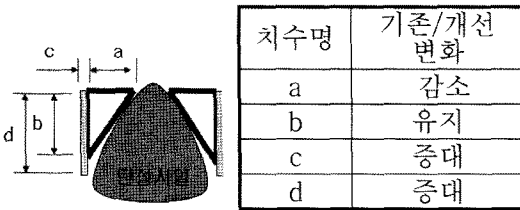


Fig. 12 Contents of seal change

3.2 개선품 궤도진동 시험결과

개선 시일에 대하여 기존품 결함 재현시험과 동일한 조건으로 궤도진동 시험을 수행하였다.

±1mm 진폭으로 가진 한 개선품의 경우 300만회 가진 후에도 밀봉능력이 유지(스프링 최대 하중 2.7% 감소)되어, 기존품의 내구수명 242만회와 비교 시, 수명 개선 효과가 큰 것으로 나타났다.

±2mm 진폭 가진 시에는 설계개선 전과 유사한 내구수명을 나타내었다.

개선품에 대한 ±1mm 가진의 경우 300만회 가진 후 하강 패턴이 발생하여 밀봉능력의 저하가 시작되는 시점으로 판단된다. 개선품의 300만회 이후의

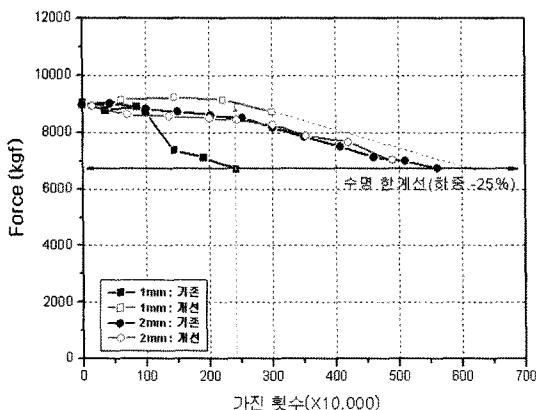


Fig. 13 Seal test results for before and after improvement

성능저하가 ±2mm 가진시의 기울기를 따른다고 가정 시(Fig. 13의 점선 표시) 개선품의 수명은 600만 회로 예측되어 기존품 수명(242만회) 대비 약 2.5배 증대 될 것으로 예상된다.

4. 결론

군용 궤도차량의 야지기동성능을 획기적으로 증대하기 위해 ISU 개발을 추진하였다. ISU 개발 중 실차시험에서 고압 시일 조기마모 결함이 발생하였으며, 이에 대한 원인분석 및 개선활동 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 결함이 발생한 기존 시일에 대해 포장도로 주행시의 궤도진동을 모사하여 실험실 시험한 결과 실차에서 발생한 결함이 재현되어, 포장도로에서의 궤도 진동이 시일 조기마모의 원인임을 확인하였다.
- 2) 설계개선 ISU 고압시일에 대한 궤도진동 모사 조건 시험결과 내구성 개선 효과는 2.5배로 판단된다.
- 3) 궤도 차량용 ISU 고압 시일 개발 시 기존의 야지를 모사한 대변위 내구성 시험평가 외에도 궤도 차량의 특성에 기인되는 궤도 진동 특성 모사시험도 실험실 내구도 시험 시나리오에 포함하여 시험하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

References

- 1) T.-Y. Kim, Y.-B. Cho, C.-H. Lee and J.-H. Lee, "Development of a Semi-Active In-Arm Suspension Unit in Tracked Combat Vehicle," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.929-934, 2001.
- 2) Tong-Myung Heavy Industry Co. Ltd., R&D Center, Technical Report of the Disassemble Inspection of the ISU, 2007.
- 3) J.-Y. Kim and Y.-B. Lee, Dynamic Characteristics Test Results for NIFV MTR(Mobility Test Rig), Agency for Defense Development, 2006.
- 4) Matlab User's Guide, Signal Processing Toolbox, The Math Works, Ver.5, 2000.