

무기체계용 관성항법장치의 항법컴퓨터 구조 간섭 고장 사례분석 및 개선에 관한 연구

성수민*, 김병규*, 민홍주**
*국방기술품질원 기동화력센터
**한화에어로스페이스 주식회사
e-mail : angie.sooHmin@gmail.com

A Study on Failure Analysis and Design Improvement of Navigation Computer due to Structural Interference in INS(Inertial Navigation Systems)

SooHmin SEONG*, Byeonggyu Kim*, Hongju Min**
*Defense Agency for Technology and Quality
**Hanwha Aerospace Co. Ltd.

요약

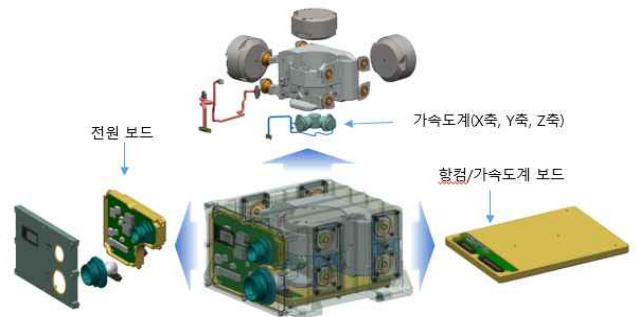
군용 무기체계의 핵심 항법장치인 관성항법장치는 국방규격에 따른 진동환경시험을 통해 신뢰성을 검증한다. 본 연구는 진동시험 중 발생한 Z축 가속도계 출력 이상 현상에 대한 원인을 분석하고 구조적 개선방안을 제시하였다. 분석 결과, 해당 현상은 가속도계 자체가 아닌 항법컴퓨터 내부 Z축 옵토커플러의 기계적 분리에 기인한 것으로 확인되었다. 상세 검토를 통해 하우징과의 협소한 간격, 컨포멀코팅액에 의한 점착, 그리고 공진 주파수 대역에서의 반복 응력 집중이 부품 탈락의 복합 원인을 규명하였다. 이에 대해 부품 대치, 아트웍 변경, 하우징 크기 증대, 국부 자리파기 등을 검토하였으나 각각의 기술적·구조적 제약사항을 확인하였다. 최종적으로 하우징 관통홀 적용 방안이 기존 신호처리 성능을 유지하면서도 구조적 간섭을 효과적으로 해소할 수 있는 최적의 대안임을 입증하였다. 본 사례는 정밀 전자장비 개발 시 전기적 기능 외에 구조적 공차 및 공정 특성을 고려한 통합 설계의 중요성을 말하고자 한다.

1. 서론

군용 무기체계에 적용되는 관성항법장치는 외부 위성신호 지원이 제한되는 환경에서도 자세, 속도 및 위치 정보를 지속적으로 제공하는 핵심 장비로서, 운용 신뢰성이 매우 중요하다. 특히 항공, 유도무기, 무인체계 등 다양한 무기체계에서 관성항법장치의 이상은 임무 성능 저하로 직결될 수 있으므로, 설계 단계부터 기계적·전기적 신뢰성 확보가 필수적이다. 이에 따라 군 적용 장비는 국방규격에 따른 환경시험을 통해 실제 운용 중 예상되는 진동, 충격, 온도 등의 가혹 조건에서도 정상 기능을 유지하는지를 검증이 필요하다.

본 논문에서 다루는 대상은 군용 무기체계에 사용되는 관성항법장치로, 그림 1에서 보이는 바와 같이 내부는 전원공급용 보드, X·Y·Z축 가속도계, 항법컴퓨터로 구성되어 있다. 국방규격 요구조건에 따라 관성항법장치의 진동환경시험을 수행하던 중, Y축, X축, Z축 순으로 진행되는 시험 과정에서

Z축 1단계 시험 종료 후 점검 시 Z축 가속도계 출력 이상 현상이 확인되었다. 초기에는 가속도계 고장 가능성이 고려되었으나, 추가 점검 결과 센서 자체가 아니라 항법컴퓨터 내부 신호전달부의 구조적 문제가 원인인 것으로 확인되었다. 이에 본 논문은 해당 이상 현상의 재현 및 원인 분석 결과를 정리하고, 적용 가능한 구조개선 방안을 비교·검토하여 최적 개선방안을 도출하고자 한다.



[그림 1] 관성항법장치 내부 구조

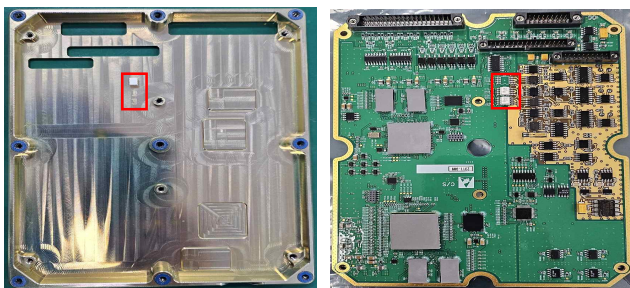
2. 현실대 및 문제점

진동시험 수행 중 Z축의 1단계 시험이 종료된 직후, 다음 단계 시험 전 점검 과정에서 표 1에서 보이는 바와 같이 관성항법장치의 BIT 결과상 Z축 가속도계 출력 이상 현상이 확인되었다. 초기에는 가속도계 자체의 불량 가능성이 우선적으로 검토되었으나, Z축 가속도계의 온도센서 출력값은 정상으로 확인되어 센서 소자 자체의 직접적인 고장으로 보기에는 한계가 있었다. 이에 따라 가속도계 신호를 처리하는 항법컴퓨터 내부 회로 이상 가능성이 추정되었고, 정상 장비와의 교차 장착 시험을 통해 이상 현상이 항법컴퓨터에 있음을 확인하였다. 정상 장비의 항법컴퓨터를 문제 장비에 장착했을 때는 정상 동작하였고, 문제 장비의 항법컴퓨터를 정상 장비에 장착했을 때는 동일한 이상이 재현되어 문제의 원인이 항법컴퓨터에 있음이 확인되었다.

항법컴퓨터를 분해하여 확인한 결과, 그림 2에서 보이는 바와 같이 Z축 가속도계에서 발생한 신호를 신호처리부로 전달하는 Z축 옵토커플러가 케이스에 부착된 채 이탈되어 있음을 확인하였다. 추가 분석 결과, 실장되지 않은 PCB 기준으로 케이스까지의 간격은 약 3mm였으나, 분리된 옵토커플러의 최대 높이는 3.63mm로(그림 3 참조) 회로카드조립체와 하우징 간 구조적 간섭이 발생함을 확인하였다. 여기에 컨

[표 2] BIT 점검 결과

가속도계 BIT 항목	bit	정상 상태	시험 결과
Ref. 5V BIT	0	0	0
Ref. 4.096V BIT	1	0	0
Ref. 1.25V BIT	2	0	0
자체 점검 BIT(가속도계 x축 +)	3	0	0
자체 점검 BIT(가속도계 y축 +)	4	0	0
자체 점검 BIT(가속도계 z축 +)	5	0	1
자체 점검 BIT(가속도계 x축 -)	6	0	0
자체 점검 BIT(가속도계 y축 -)	7	0	0
자체 점검 BIT(가속도계 z축 -)	8	0	1
데이터 CRC 오류 BIT	9	0	0
Reserved	10~15	-	-



[그림 2] 항법컴퓨터 내부 분해 결과

포멀코팅이 적용되면서 케이스와 접촉하던 옵토커플러가 코팅액에 의해 의도치 않은 고정(점착)되었고, 진동 하중이 반복적으로 인가되는 과정에서 옵토커플러 리드부에 응력이 집중되어 최종적으로 분리된 것으로 판단되었다.

추가로 수행한 유한요소해석에서는 334.7Hz 공진모드에서 문제가 발생한 Z축 옵토커플러가 다른 부품보다 더 큰 스트레스를 받는 것으로 확인되었다. 이는 해당 부품이 구조 간섭 상태에서 특정 주파수 대역의 진동에 노출될 경우, 반복 응력 집중에 의해 파손 가능성이 증가함을 의미한다. 즉, 본 문제는 단순한 우발 고장이 아니라, 부품 높이 초과, 하우징과의 협소한 간격, 코팅 공정에 따른 점착, 공진에 따른 응력 집중이 복합적으로 작용한 결과로 볼 수 있다.

진동환경 하에서 파손된 부품의 실질적인 변위를 확인하기 위하여 공진주파수(f_n)에서의 전달률(Q)과 최대 변위(Y_0)를 근사식으로 아래와 같은 수식을 사용하였다.^[2]

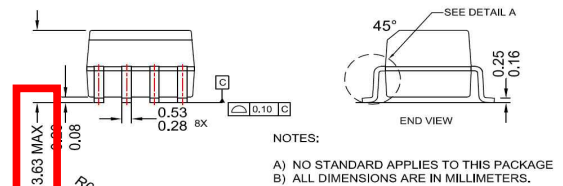
$$Q = \sqrt{f_n} = \sqrt{334.7} = 18.3 \quad (1)$$

$$Y_0 = \frac{9.8 G_{in} Q}{f_n^2} = \frac{9.8 \times 3.24 \times 18.3}{334.7^2} = 0.0052[inch] = 0.13[mm] \quad (2)$$

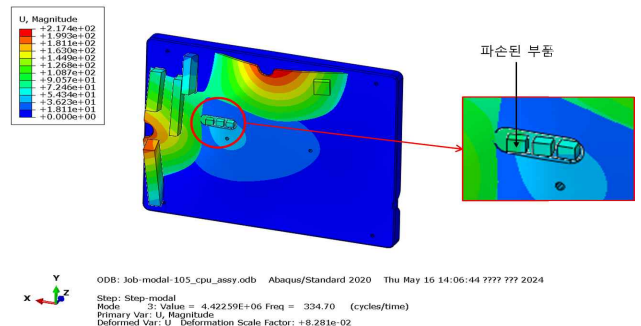
$$Y_f = 0.5 Y_0 \times \text{안전율} = 0.5 \times 0.13 \times 2 = 0.13 \quad (3)$$

* G_{in} 은 Vertical, Phase3의 RMS 값을 적용

계산 결과인 0.13mm는 334.7Hz 진동일 때 가장 변위가 크게 응답하는 곳이며 위 해석결과에서 파손된 부품 위치에서는 대략 50% 정도의 변위를 보이기 때문에 0.06mm의 응답으로 판단할 수 있으며, 안전율 2.0을 적용하면 파손된 부품이 334.7Hz의 공진주파수로 공진이 일어날 때 움직이는 변위는 0.13mm 이하로 판단할 수 있다.



[그림 3] 옵토커플러의 물리적 형상(높이)



[그림 4] 334.7Hz 공진모드에서 유한요소해석 결과

3. 개선방안

본 문제에 대한 개선은 단순히 손상된 옵토커플러를 교체하는 수준을 넘어, 구조 간섭을 근본적으로 해소하면서도 기존 항법 성능과 기계적 안정성을 유지할 수 있는 방향으로 검토하고자 하였다. 이를 위해 부품 대치, PCB 아트웍 변경, 하우징 크기 변경, 국부 자리파기, 하우징 관통홀 적용의 다섯 가지 대안을 순차적으로 검토하였다.

첫 번째로, 하우징과 PCB사이의 간격 3mm 이내를 만족시키기 위해 회로카드조립체 전체 부품 중 높이가 3mm를 초과하는 부품을 식별한 결과, 고장이 발생하였던 옵토커플러 뿐 아니라 레귤레이터 1종이 추가적으로 식별되었다. 그러나 PCB아트웍을 변경하지 않는 조건에서 이들 부품을 일대일로 대치할 수 있는 저높이 대체품을 검토한 결과, 표 2에서 보이는 바와 같이 관성항법장치의 요구 성능을 만족하면서 동시에 높이 제한을 충족하는 부품대체는 제한되었다.

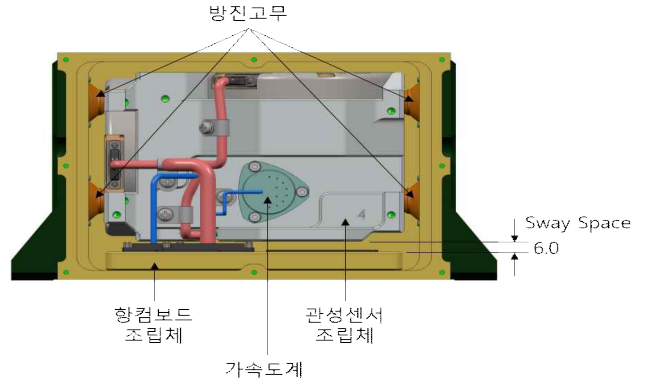
두 번째로, PCB 아트웍을 변경하여 부품 배치 또는 패턴을 조정하는 방안을 검토하였다. 그러나 가속도계 신호는 매우 미약하고 민감하며, 신호처리부는 약 1mA의 미세전류를 중력가속도 1g에 대응하도록 변환하는 정밀 회로로 구성되어 있다. 또한 해당 회로는 소수점 다섯째 자리 수준의 정밀도를 요구하므로, 패턴 변경 시 신호처리 특성에 영향을 줄 가능성이 높다. 이 경우 단순 수정보다 신규 제작에 준하는 수준의 재검증과 입증시험이 요구되어 개발 일정과 비용 측면에서 한계가 있고 비효율적으로 개선 제한 판단하였다.

[표 3] 대체 부품 검토 결과

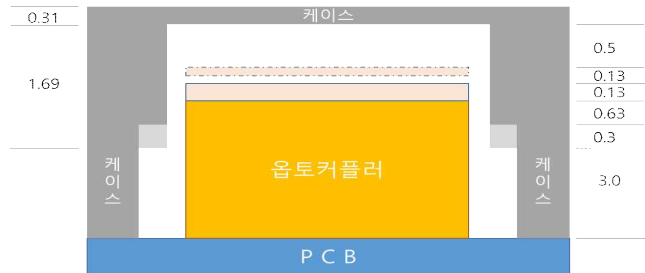
부품	입력전원 (V)	속도 (Mbit/s)	크기 (V × L × H mm)	검토결과
A	~5 (max 7)	10	5.3 × 4.1 × 3.38	높이 초과
B	~5.5 (max 6.5)	10	5.2 × 4.0 × 3.5	높이 초과
C	~5 (max 5.5)	15	5.4 × 4.0 × 3.47	높이 초과
D	~5.5 (max 7)	10	5.89 × 3.96 × 3.43	높이 초과
E	~5.5 (max 7)	10	4.93 × 3.96 × 3.43	높이 초과

[표 4] 공차를 고려한 간섭회피 여유치

구분	케이스 공차	부품 초과 높이	코팅 두께	진동 최대 변위	케이스와 접촉회피 여유공간	계
치수	0.3	0.63	0.13	0.13	0.5	1.69
근거	도면	카드로그	규격	해석	경험	-



[그림 5] 관성항법장치 내부 구조(형상)

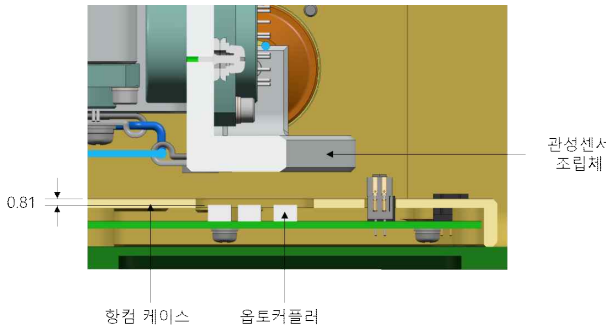


[그림 6] 간섭발생 위치 자리파기시 간격

세 번째로, 항법컴퓨터 하우징 높이를 증가시켜 내부 여유 공간을 확보하는 방안을 검토하였다. 그러나 항법컴퓨터 상부에는 가속도계 및 관성센서 조립체가 위치하고 있으며, 양자 간의 간격은 약 6.0mm로 관리되고 있는데(그림 5 참조) 이 간격은 진동 및 충격 시 내부 부품 간 물리적 충돌을 방지하기 위해 의도적으로 확보된 Sway space에 해당한다. 따라서 하우징 높이를 증가시키면 이 공간이 감소하게 되어, 오히려 다른 구조적 간섭이나 충돌 가능성을 유발할 수 있으므로 적절한 방안으로 보기 어려웠다.

네 번째로, 높이가 초과되는 부품 위치의 하우징 일부를 국부적으로 자리파기하는 방안을 검토하였다. 제작공차, 옵토커플러 초과 높이, 키포맬코팅 막 두께 등 누적공차를 고려한 결과, 표 4와 그림 6에서 보이는 바와 같이 최대 1.69mm 깊이의 가공이 필요한 것으로 분석되었다. 그러나 하우징 두께는 2mm에 불과하여 이 경우 잔여 살두께가 0.31mm만 남게 되며, 이는 가공 변형과 강성 저하를 유발하여 국부적인 응력 취약부가 될 가능성이 높다. 따라서 자리파기 방식은 간섭 해소 효과는 있으나 구조적 건전성 저하 우려로 인해 적용이 불가한 것으로 판단되었다.

다섯 번째로, 최종적으로 간섭이 발생하는 부품 위치에 대응하는 하우징 부위에 관통홀을 적용하는 방안을 검토하였다. 본 방안은 추가적으로 필요한 여유공간 1.69mm를 충분히 상회하는 2mm의 공간을 확보할 수 있어, 구조 간섭을 직접적으로 제거할 수 있는 장점이 있다. 또한 하우징 두께가



[그림 7] 관통홀 적용시 항법컴퓨터 형상

2mm이므로 최대 공차를 적용하더라도 그림 7에서 보이는 바와 같이 부품이 외부 표면보다 돌출되지 않아 외형 및 조립 안정성 측면에서도 유리하다. 이에 따라 하우징 관통홀 적용안은 기존 회로 성능에 영향을 주지 않으면서 구조적 간섭을 해소할 수 있는 가장 현실적이고 타당한 개선방안으로 도출되었다.

4. 결론

본 연구는 군용 무기체계에 적용되는 관성항법장치의 진동 환경시험 중 발생한 Z축 가속도계 출력 이상 현상을 대상으로, 고장 재현과 원인 분석, 개선방안을 검토하였다. 검토결과, 이상 현상은 가속도계 자체의 고장이 아니라 항법컴퓨터 내부 Z축 옵토커플러의 분리에 의해 발생하였으며, 그 배경에는 내부 여유공간 대비 부품 높이 초과에 따른 하우징 간섭, 컨포멀코팅에 의한 점착, 그리고 공진 주파수 대역에서의 응력 집중이 복합적으로 작용한 것으로 확인되었다. 이는 정밀 전자장비의 환경시험에서 나타나는 기능 이상이 반드시 전기적 결함만을 의미하지 않으며, 구조적 여유와 공정 특성까지 함께 고려해야 함을 보여준다.

개선방안 검토 결과, 단순 부품 대치안은 요구 성능을 만족하는 저높이 대체품 부재로 한계가 있었고, PCB 아트웍 변경안은 미세 신호처리 회로의 특성상 과도한 재검증 부담이 존재하였다. 또한 하우징 크기 변경안은 내부 Sway space를 감소시켜 새로운 구조적 문제를 유발할 가능성이 있었으며, 국부 자리파기안은 잔여 두께 부족으로 인해 구조적 취약부를 형성할 우려가 있었다. 이에 비해 하우징 관통홀 적용안은 기존 회로 성능을 유지하면서 필요한 여유공간을 확보하여 간섭 원인을 직접 제거할 수 있는 가장 실현 가능한 대안으로 판단되었다. 해당 개선방안을 적용하여 규격에 따라 진동 환경시험을 재실시한 결과 부품의 탈락이나 고장현상 발생 없이 정상동작하여 유효성을 입증하였다.

따라서 본 사례는 관성항법장치와 같은 고신뢰성 군수 전자장비의 설계 및 제작 과정에서, 전기적 기능 검토뿐 아니라 부품 높이 관리, 하우징 간격 검증, 코팅 공정 영향 분석, 공진 모드 기반 구조 건전성 검토가 함께 수행되어야 함을 시사한다. 향후 유사 장비 개발 시에는 설계 초기 단계에서부터 3차원 간섭 검토와 공정 누적공차 분석, 환경하중 기반 구조 해석을 병행함으로써, 시험 단계에서의 예기치 않은 구조 고장을 사전에 예방할 필요가 있다. 이러한 점에서 본 연구는 실제 고장 사례를 기반으로 한 설계 개선 방향을 제시하였다는 점에서 실무적 활용 가치가 있다.

참고문헌

- [1] 이창수, 조희근, 김유광. “CCGA 부품의 패러린 컨포멀코팅 적용에 따른 진동 영향분석”. 한국항공우주학회 학술발표회 초록집(2021-11-17)
- [2] Vibration Analysis for Electronic Equipment, Dave S. Steinberg
- [3] Abid-Alrahman Fawzi Abbas et al. “Impact of Conformal Coating Material on the Long-Term Reliability of Ball Grid Array Solder Joints” Procedia Manufacturing Volume 38, Pages 1138-1142, 2019.
- [4] Bin Hua et al. “Vibration characteristics and lead stress optimization for printed circuit board with PQFP under random loads” Microelectronics Reliability, Volume 171, 2025.