Check for updates

Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., 36(5) : 421~430, 2026
https://doi.org/10.5050/KSNVE.2026.36.5.421

한국소음진동공학회논문집 제 36 권 제 5호, pp. 421~430, 2026
ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

EGR 밸브의 내진동성 및 진동 축별 영향성에 대한 실험적 연구

An Experimental Study on the Vibration Durability of EGR Valve and the Effect of Vibration Direction

이 주 엽† · 윤 상 민*
Juyub Lee† and Sangmin Yun*

(Received June 19, 2026 ; Revised August 3, 2026 ; Accepted August 17, 2026)

Key Words : EGR Valve(배기가스 재순환 밸브), Vibration with Thermal Cycling Test(복합 진동 내구시험), Vibration Durability(내진동성), Failure Mode(고장모드), Reliability Analysis(신뢰성 분석)

ABSTRACT

In general, the engine room is an area where environmental conditions are the harshest and there is a high possibility of failure. In the case of engine electronic components installed here, demand for verification is increasing as the degree of components' integration increases according to the trend of enhancing vehicle functions. In this study, the EGR valve, one of the representative parts of engine electronic components, was targeted, but there is no case of experimental verification for this part with respect to reliability. Therefore, a quantitative review of the impact of each axis was conducted using a vibration with thermal cycling test with the highest fault detection capability. Before conducting the durability test, a resonant frequency analysis was performed to confirm the vibration characteristics of each axis, and an operating profile during the durability test was developed based on the driving data. A configuration to embody the mounting environment of the EGR valve was applied, and a temperature cycle in the range of -40 to 140 degrees was applied in combination with the vibration in the form of a sine on random recommended by ISO 16750-3 for the 21 EGR valves. As a result of failure analysis, it was concluded that the x-axis was the mounting direction least susceptible to vibration. Likewise, it was confirmed that the x-axis mounting direction had the longest lifetime in the results of the Weibull distribution-based reliability analysis.

기 호 설 명

a : 스위프 소요 시간, min
β : 형상모수
$F(t)$: 누적고장확률, %
f_1 : 주파수 대역의 하한, Hz
f_2 : 주파수 대역의 상한, Hz
k : 스위프 속도, oct/min
t : 통계적 변수(시험 시간), hours
η : 척도모수, hours

1. 서 론

자동차 부품의 경우, 사용자 환경에서 발생할 수 있는 다양한 환경적 부하에 대한 내구성이 확보되어

† Corresponding Author ; Member, Korea Automotive Technology Institute (KATECH), Senior Researcher
E-mail : leejy@katech.re.kr
* Korea Automotive Technology Institute (KATECH), Researcher

‡ Recommended by Editor Jong Moon Ha
ⓒ The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

야 한다. 환경적 부하의 요소로는 기계적 충격 및 진동, 습도, 열적 사이클, 먼지, 부식성 가스 등이 있으며[1], ISO 16750-1에서는 이 요소들을 기계적 부하, 기후적 부하, 화학적 부하 등으로 분류한다[2]. 부하의 가혹도가 높아질수록 부품의 고장이 발생할 가능성이 높아지게 되는데, 차량 구획 관점에서 접근하면, 엔진과 기어박스 영역에서 고장 발생 비중이 가장 높은 것으로 알려져 있다[3]. 특히 엔진에 장착된 부품은 환경 조건이 가장 가혹하여, 높은 수준의 신뢰성 검증이 요구된다[4,5]. 그 중 고장 검출력이 높은 검증 방법은 엔진 전장품에 대한 진동 시험이다. 이 시험은 노면으로부터 오는 진동과 엔진 동작으로 야기되는 진동을 모사하고 그와 동시에 온도 사이클이 인가되는 복합된 형태의 시험을 일컫는다. 시험 중에도 동작이 이뤄지므로, 고장 여부에 대한 모니터링도 가능하다. 게다가, 차량 기능의 고도화 추세에 따라 엔진 전장품의 동작 제어를 담당하는 PCB의 집적도가 더 심화되면서, 진동에 취약한 특성을 나타내고 있어 자동차 산업에서 검증 수요가 높은 상황이다[6].

이 연구에서는 엔진 전장품의 대표 부품 중 하나인 배기가스 재순환 밸브(EGR valve, exhaust gas recirculation valve)를 대상으로 복합 진동 내구시험을 통해 축별 영향성에 대한 정량적 검토를 수행하였다. EGR 밸브와 관련하여 선행된 연구는 대부분 동작 특성에 관한 연구가 높은 비중을 차지한다. 기존의 솔레노이드나 진공 타입에서 DC 모터가 적용된 액추에이터로 개발되면서, 증가하는 기술 수요에 대응하기 위해 실험적 검증을 수반한 제어기법에 관한 연구가 진행되었다[7]. DC 모터의 적용으로 제어 정밀도가 개선되었지만, 강화되는 배기가스 배출 규제를 충족시키기 위해서는 추가적인 정밀도 향상이 요구되었다. 그래서 운행 조건에 최적화된 EGR 밸브 제어 기술개발을 목표로, DC 모터 특성 분석에 관한 연구가 수행되었다[8]. 이와 같이 제어 성능 개선을 위한 연구가 이뤄지는 한편, EGR 밸브의 스프링-토크 모델 및 기계적 끝점 모델을 개발하고 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 비교함으로써 모델의 정확성을 검증한 연구도 존재한다[9]. 도출된 모델은 제어기 설계의 이론적 기반이 되는 동시에, 다변하는 동작 환경에 대해서도 제어 특성을 예측하고 대처할 수 있는 도구로 활용될 수 있다. 하지만 EGR 밸브의 내구성, 신뢰성에 대한 실험적 검증의 형태로 수행된 연구는 존재하지 않는다. EGR 밸브의 구조적 안정성에 대해 연구된 사례가 있지만, 내진동성에 관한 접근보다는 내열 성능 측면에서 열 변형, 열응력 피로도에 대한 해석이 수행되었다[10]. 진동 내구성 분석이 수행된 연구도 존재하지만, 이 연구에서는 EGR 쿨러와 EGR 밸브가 결합된, 모듈 관점에서의 유체-구조 연성을 고려한 유한요소 해석이 수행되었다[11].

이 연구에서는 전술된 복합 진동 내구시험 수행에 앞서, 축별 영향성을 가늠하기 위해 3개의 축에 대한 공진점 검출 시험을 수행하였다. 다음으로, 시험 중에 인가될 동작 프로파일에 대한 검토를 우선적으로 수행하였다. EGR 밸브의 환경 조건을 모사하는 진동 프로파일과 온도 사이클 조건을 인가함과 동시에 검토된 동작 프로파일을 적용함으로써, 개별 축에 장착된 EGR 밸브의 고장 시점을 확인하였다. 고장이 발생한 시험품들에 대해서는, 고장 분석을 통해 EGR 밸브의 고장모드 도출과 함께 축별 고장 경향을 분류하였다. 최종적으로는 고장 시점 데이터를 활용한 와이블 분포 기반의 신뢰성 분석을 통해 각 축에 대한 EGR 밸브의 수명을 확인하였다.

2. EGR 밸브의 내진동성 검증

2.1 공진점 검출 시험

공진점 검출 시험의 경우, 5 Hz ~ 2000 Hz의 주파수 대역에서 0.5 oct/min의 스위프(sweep) 속도로 주파수가 변화하는 동안 1 G의 가속도로 인가되었을 때, 각 축에서의 진동 응답을 확인하는 형태로 수행되었다. 가진 주파수 범위는 주행 환경에서 확인되는 주요 주파수 대역이고 스위프 속도의 경우, IEC 60068-2-6에서 제시하는 1 oct/min보다 속도를 늦춰 검출 성능을 높이기 위한 목적으로 설정하였으며[12], 이는 식 (1)을 활용하여 설명이 가능하다.

$$a = [\ln(f_2/f_1)/\ln 2]/k = \log_2(f_2/f_1)/k \quad (1)$$

여기서, f_1, f_2는 각각 주파수 대역의 하한, 상한을 나타내며, 분자는 옥타브(octave) 수로 산출된다. k는 스위프 속도이며, oct/min의 단위를 가지므로 a는 분 단위의 스위프 소요 시간을 의미하게 된다. 즉, 공진점 검출 시험에 약 17.3분의 시간이 소요되며, 이는 1 oct/min의 속도로 진행했을 때보다 2배의 시간이 소요되는 것을 알 수 있다. 또한, 전술된 ISO 규격의

정현파 진동 시험에서도 0.5 oct/min의 속도를 활용할 것을 권장하므로, 적정한 스위프 속도로 볼 수 있다[13]. 응답 확인 지점은 Fig. 1과 같이 하우징과 센서 커버로, 각각 모터와 센서에 미치는 영향을 확인하기 위한 목적으로 가속도계가 부착되었다. Fig. 2는 공진점 검출 시험 결과로, x축에 대한 모터부의 응답을 나타낸다. 축과 응답 위치별 공진점과 최대 응답을 정리한 결과는 Table 1과 같으며, z축의 응답이 제일 큰 것을 알 수 있다. Table 2는 지그에 대한 공진점 검출 시험 결과를 나타낸다. 약 730 Hz 및 970 Hz 대역에서 주요 지그 응답 피크가 확인되었으며, 해당 주파수 대역에서의 시험품 응답은 지그와 시험품으로 구성된 장착계의 응답 특성이 반영된 결과로 판단된다. 하지만 x축과 y축에서 지그의 응답은 유사한 수준을 나타냈으나, 시험품의 응답은 서로 상이하게 나타났다. 이는 지그의 응답이 시험품에 전달되는 과정에서 시험품의 방향별 구조적 응답 특성이 함께 반영된 결과로 판단된다. 또한 z축 방향에서는 약 970 Hz 대역을 제외한 시험품의 주요 응답이 지그의 공진점 검출 시험에서 확인되지 않았으므로, 시험품의 구조적 특성에 기인한 자체 응답으로 판단된다.

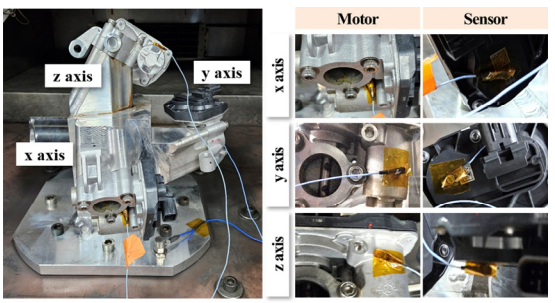


Fig. 1 Test set-up for resonant frequency analysis

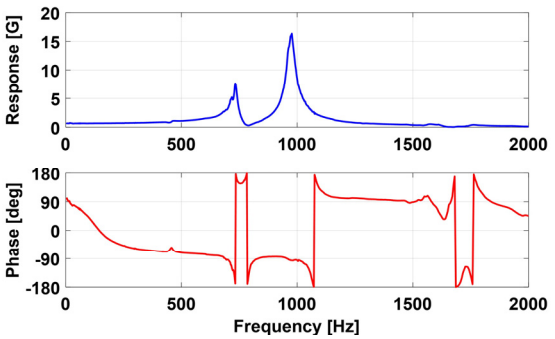


Fig. 2 Graph for data measured on the motor side of the component mounted on the x axis

2.2 동작 프로파일 검토

EGR은 연소실 내의 과도한 온도와 공기를 줄이기 위하여, 배기가스를 흡입 공기로 재사용하기 위한 목적으로, EGR 쿨러와 배기 라인 사이에 장착된다. 흡기 요구량과 엔진 부하 등으로 계산된 ECM의 듀티(duty) 신호에 의해 배기가스량을 제어하는 데, 이는 밸브 플레이트의 동작으로 이뤄진다. 주행 중에 발생하는 이 동작을 기반으로 동작 프로파일을 만들기 위해, 1시간 주행 중의 EGR 동작 신호를 검토하였다. 모니터링을 위한 회로 구성은 Fig. 3과 같으며, Fig. 4는 1시간 내외의 주행 중 확인된 EGR 밸브 동작부 근처의 온도와 동작 모니터링 결과를 나타낸다. 4 V가 최대 개도일 때를 가리키는데, 10회의 주행 중 출력 전압이 2.5 V를 초과하지 않았다. 그리고 밸브 개도 시간은 6초, 12초가 주로 확인되었다. 이 조사 결과를 토대로 [6초, 80 % 개도], [12초, 100 % 개도] 조합의 동작을 각각 3회씩 실시하는 형태로 결정하였으며, 동작 프로파일은 Fig. 5와 같다. 개도량의 경우, 시험 중에 개도 여부를 명확히 확인하기 위해 모니터링에서 확인된 개도량에 가중치를 부여하였다.

Table 1 Test results for resonant frequency analysis

Axis	Motor		Sensor	
	Response [G]	Frequency [Hz]	Response [G]	Frequency [Hz]
x	7.63	733	9.48	731
	16.4	977	37.1	974
y	12.0	722	42.6	974
	11.6	974	5.49	1758
z	34.0	977	63.7	974
	5.64	1564	23.1	1560

Table 2 Jig resonant frequency analysis results

Axis	Response [G]	Frequency [Hz]	Axis	Response [G]	Frequency [Hz]
x	3.64	715	z	3.24	351
	23.4	974		1.68	459
y	4.85	728		4.28	733
	23.2	974		6.78	974

2.3 복합 진동 내구시험

복합 진동 내구시험의 진동 프로파일은 ISO 16750-3의 엔진에 장착되는 부품에 대해 권장되는 정현파 진동과 랜덤 진동 프로파일을 활용하였다[13]. sine-on-random의 형태로 시험을 진행하였으며, 진동 프로파일은 Fig. 6과 같다. 스위프 내구의 형태로 공진점 근처에서 정현파 진동을 인가하는 형태도[14] 존재하나, 엔진 전장품에 대해서는 sine-on-random 형태의 시험이 사용 환경 구현, 고장 검출 측면에서 더 선호되고 있다. 진동과 동시에 인가되는 온도 사이클의 경우, 동일한 규격에서 참고하였으며 EGR 밸브가 장착되는 엔진룸 환경을 고려하여 최대 온도(T_{max})와 최소 온도(T_{min})를 각각 140 ℃, -40 ℃로 설정하였다. Fig. 7과 같이, 동작은 상온에서 최대 온도에 도달하는 구간까지만 이뤄지도록 설정하였다. 즉, 8시간 주기 기준 3시간 30분과 6시간 50분 사이의 3시간 20분 동안 동작하는 형태이다. 그리고, EGR 밸브 커넥터의 수단자와 와이어링 하네스의 암단자의 프렛팅

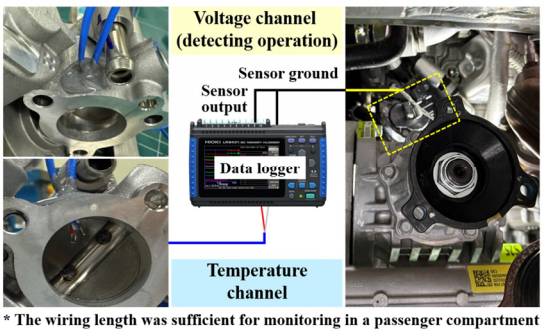


Fig. 3 Circuit composition for monitoring voltage and temperature of EGR valve

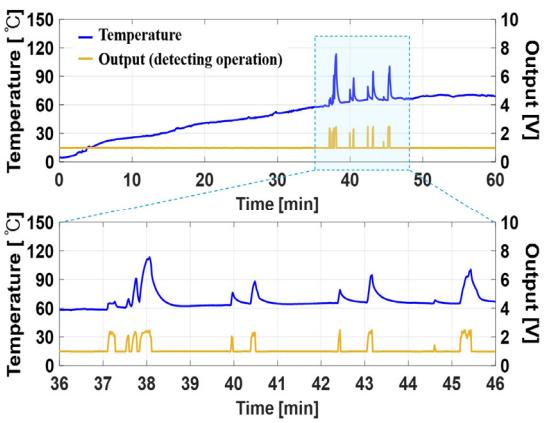
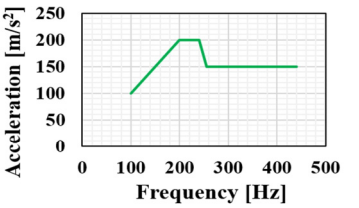
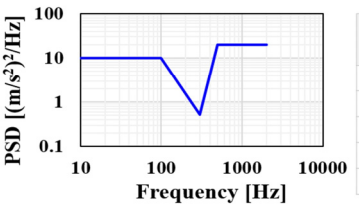


Fig. 4 Graph for measured temperature and output voltage of EGR valve while driving



Freq. [Hz]	Accel. [m/s²]
100	100
200	200
240	200
255	150
440	150



Freq. [Hz]	PSD [(m/s²)²/Hz]
10	10
100	10
300	0.51
500	20
2000	20

Fig. 6 Vibration profile of sinusoidal vibration and random vibration for evaluating EGR valves

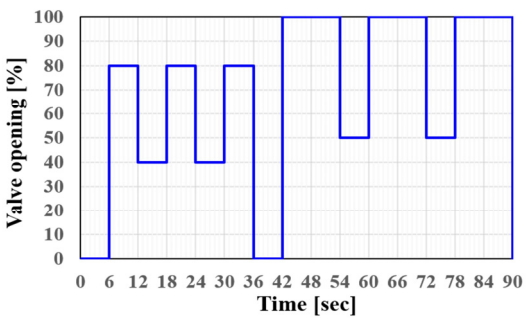


Fig. 5 Operating profile of EGR valve for vibration with thermal cycling tests

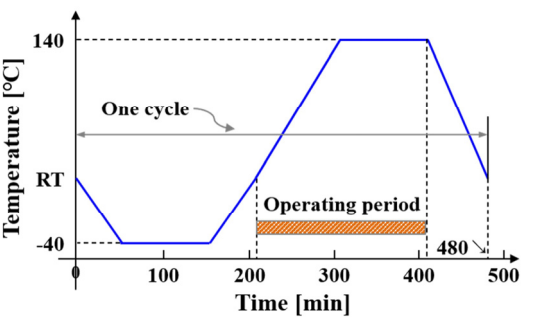


Fig. 7 Temperature profile including operating period for vibration with thermal cycling tests

(fretting) 마모로 기인하는 전기적 신호의 전달 과정에서의 고장 발생을 최소화하기 위해 시험품(EGR 밸브)이 교체될 때마다 신규 와이어링 하네스를 연결하였다.

Fig. 8은 공진점 검출 시험과 동일하게 3개의 축에 대한 동시 검증의 형태로 진동 시험용 지그에 EGR 밸브가 장착된 것을 보여준다. 2.2 장의 Fig. 3에서 보는 것처럼, 차량에 실제 장착된 형태를 모사하고자 하였다. 이 장착 방향을 z축으로 지정하고, 나머지 x, y축 방향에 맞게 EGR 밸브를 90도씩 회전시켜서 장착되었으며 체결 토크는 20 N·m가 적용되었다. 시험 시간과 관련해서는, 초반에는 40시간 단위로 시험을 진행하였다가, 시험품의 고장이 확인되면 바로 중단시켜서 신품을 투입하는 형태로 진행하였다. Table 3은 총 21개의 시험품에 대한 고장에 소요된 시간을 보여준다. 동작 프로파일 기준, 동작 발생 구간에서의 6초 간 개도량(측정 신호)의 평균값이 타겟 프로파일 개도량의 50 %에 미달하는 수준인 경우, 고장으로 판정하였다. 시험품 #12, #18은 고장이 발생할 때까지 진행한 결과로, 나머지 2개 시험품이 교체되어 검증하는 동안에도 이상 없이 동작하여 시험 시간이 누적되었다. 동작 구간에서 신호가 발생하지 않은 경우에 대해서는, 고장 시간을 동작이 시작되는 최초 시점인 3시간 30분으로 간주하였다. Fig. 9는 고장으로 판정된 동작 모니터링 결과를 가리키며, 시험품 #1과 #9를 예로 들었다. 실시간 모니터링 데이터는 분석이 수월하도록 10 MB 단위로 분리 추출되도록 하였으므로, 파일당 1시간 내외의 데이터가 수집되었다.

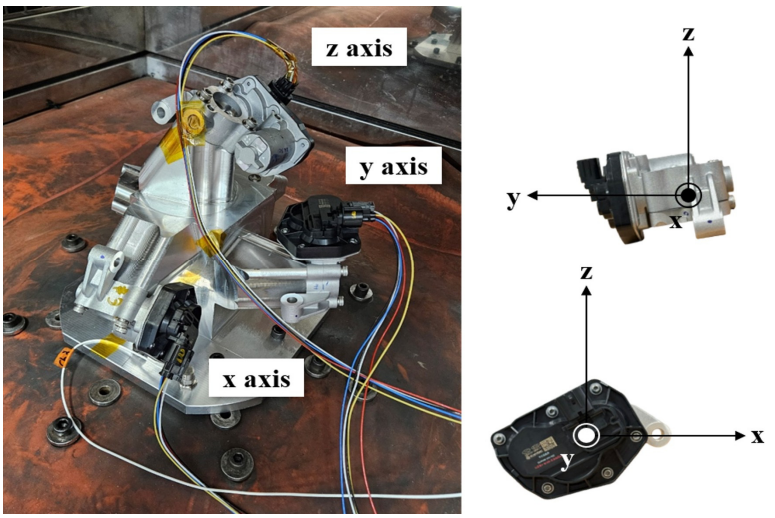


Fig. 8 Mounting form of EGR valves according to vibration axis

Table 3 Information of time to failure and mounting direction for each test part

Test part No.	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
Time to failure [h]	3.65	3.87	12.6	4.34	3.50	19.9	3.50
Mounting direction	y axis	z axis	x axis	y axis	z axis	x axis	y axis
Test part No.	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14
Time to failure [h]	3.58	4.67	3.50	3.50	44.6	3.50	3.50
Mounting direction	z axis	x axis	y axis	z axis	x axis	y axis	z axis
Test part No.	#15	#16	#17	#18	#19	#20	#21
Time to failure [h]	4.94	3.50	3.64	24.4	3.50	4.24	13.9
Mounting direction	x axis	y axis	z axis	y axis	z axis	z axis	x axis

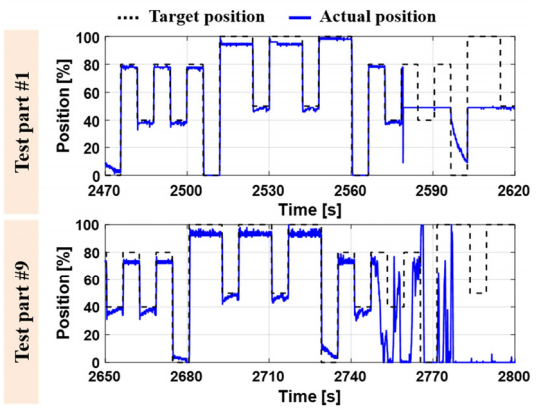


Fig. 9 Monitored data at the failure time of test part #1 and #9

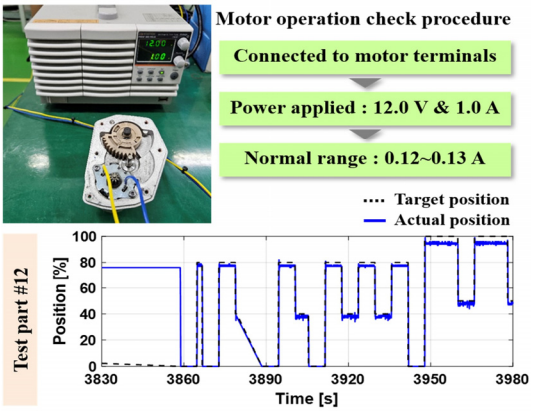


Fig. 10 Motor operation check procedure prior to teardown analysis

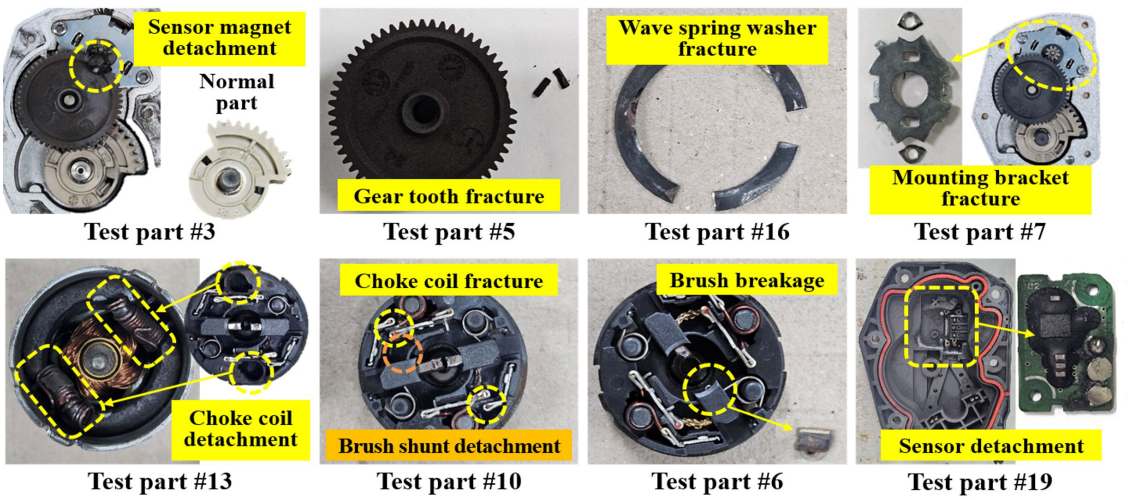


Fig. 11 Identified EGR valve failure modes in the teardown analysis after vibration with thermal cycling tests

3. 진동 축별 영향성 검토

3.1 시험품 고장 분석

21개의 시험품의 고장 원인을 확인하기 위한 분해 분석을 실시하였다. Fig. 10은 분해 분석 실시에 앞서, 사전 점검의 형태로 모터 회로의 단선 여부를 평가하는 과정을 보여준다. 12.0 V와 1.0 A를 인가하였을 때 정상품이 0.12 A ~ 0.13 A를 나타내는데, 시험품 #12와 시험품 #21이 각각 0.33 A, 0.13 A로 측정되는 것을 제외하고는 다른 시험품들은 모두 모터 회로 단선으로 확인되었다. 동작 모니터링 측면에서는, 공통적으로 신호 소실의 급격한 발생이 관찰되었다. 시험품 #12는 일정 시간 신호 소실 후 복원되었다가 다시 소실되었고, 시험품 #21은 동작 구간에서 정상적으로 동작하다가 신호가 소실되었다. 시험품 #12에서 브러시 마모가 정상품 대비 더 진행된 것을 제외하고는 내부 부품들의 특별한 이상 형태가 확인이 안 된 것으로 봤을 때, 커넥터 연결성 문제로 고장이 발생한 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 진동 시험품에 대한 분해 분석 과정에서 확인된 EGR 밸브의 고장모드를 나타낸다. 이로부터 진동 시험품의 고장은 대체적으로 DC 모터 회로의

Table 4 Comparison of failure modes identified in each test part by mounting direction

Axis	Test part No.	Valve assembly failure		DC motor failure			Remarks (additional explanation or characteristic features)
		sensor magnet detachment	Gear tooth fracture	Brush breakage	Choke coil detachment	Brush shunt detachment	
x	#3	●	-	-	-	▲	Electrical open circuit confirmed (▲)
	#6	-	-	●	-	-	-
	#9	▲	●	●	●	●	Partially detached sensor magnet (▲)
	#12	-	-	-	-	-	Measured operating current : 0.33 A
	#15	-	-	-	-	▲	Electrical open circuit confirmed (▲)
	#21	-	-	-	-	▲	Measured operating current : 0.13 A
y	#1	-	-	-	-	▲	Electrical open circuit confirmed (▲)
	#4	▲	-	●	●	●	Wave spring washer fracture
	#7	▲	-	●	●	●	Mounting bracket fracture
	#10	-	-	-	▲	●	Choke coil fracture (▲)
	#13	-	-	-	●	●	Wave spring washer fracture
	#16	-	-	-	●	●	Wave spring washer fracture
	#18	-	●	-	●	●	Wave spring washer fracture
z	#2	-	-	-	-	●	-
	#5	▲	●	●	●	●	Wave spring washer fracture
	#8	▲	●	●	●	●	Partially detached sensor magnet (▲)
	#11	-	-	-	▲	●	Choke coil fracture (▲)
	#14	-	-	●	●	●	-
	#17	-	●	●	●	●	-
	#19	-	●	●	●	●	Sensor detachment
	#20	-	●	●	●	●	-

단선으로 야기되는 것을 알 수 있다. 브러시의 파손, 브러시와 모터 단자(terminal)를 연결하는 브러시 션트(brush shunt)의[15] 파손, 초크 코일(choke coil) 단선 또는 이탈이 개별적으로 발생하거나 심한 경우 복합적으로 발생하면서 EGR 밸브가 의도한 동작을 구현하지 못하였다. 또한, DC 모터의 고장 외에도, 기어 치 마모 또는 파손, 센서 마그넷 이탈, 웨이브 스프링 와셔(wave spring washer) 파손 등의 고장이 확인되었다. Table 4는 장착 축 방향별로, 각 시험품에서 확인된 고장모드에 대하여 정리한 것을 보여준다. 2.2 장의 Table 3의 고장에 이르는 시간에서 확인되는 것처럼 x축, y축, z축 순으로 진동에 의한 영향을 상대적으로 덜 받는 것을 알 수 있다. 특징적으로는, 모터 축 방향에 평행하게 진동이 발생하는 y축에서 웨이브 스프링 와셔가 상당수 파손된 것을 확인할 수 있다. 이로부터 다음과 같은 고장메커니즘 추론이 가능하다. 웨이브 스프링 와셔의 공진으로 상대적으로 큰 응답이 형성되고, 반복 가진되면서 야기되는 피로파괴가 근본적 원인이 된다. 그에 따라 주변 구조물과의 충돌에 따른 충격 하중이 그대로 전달되면서 브러시와 정류자의 상대 운동이 강화되고 브러시 션트가 반복적인 굽힘 및 인장 변형을 받게 된다. 결국, 션트 접속부에 변형이 집중되어 피로 단선이 발생하고 상대적으로 강성이 높은 쵸크 코일에도 피로가 누적되면서, 코일이 단선되고 최종적으로 이탈이 발생하게 된다. Fig. 12는 웨이브 스프링 와셔와 DC 모터 단자측에 대하여 응답점과 타격점을 상호 교환하여 FRF를 측정한 결과로, 이러한 추론을 뒷받침한다. y축에서의 EGR 밸브의 센서부와 웨이브 스프링 와셔의 오목한 형상부의 공진주파수가 일치하고, DC

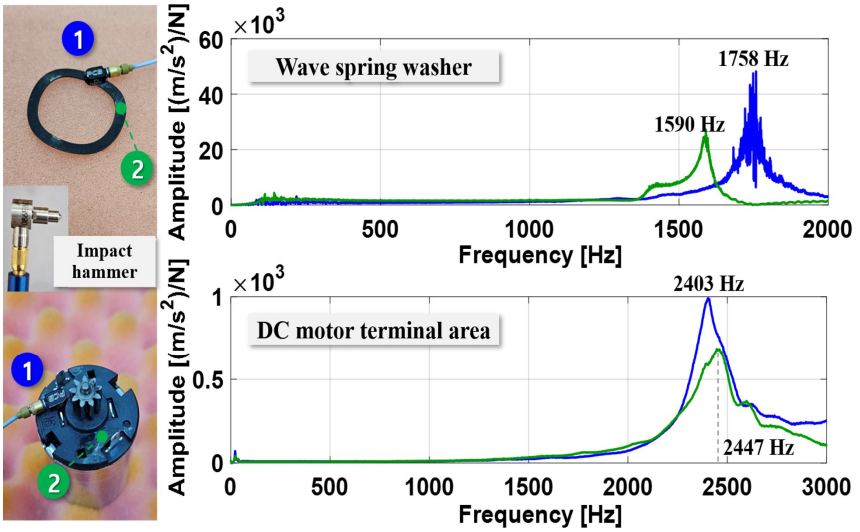


Fig. 12 FRF test results for the wave spring washer and DC motor

모터 단자 측의 공진주파수는 내진동성 관점에서 검토되는 주파수 대역(2000 Hz 이내)을 벗어난 것을 알 수 있다. 한편, z축 방향은 브러시의 넓은 면과 초크 코일의 축에 수직하고, 브러시 션트의 길이 방향과 평행하며, 기어 치의 맞물림 면(두께 방향)에 수직한 가진 방향이다. 이러한 방향으로 반복 진동이 작용할 경우, 굽힘 또는 인장 하중이 반복적으로 작용하며, 이에 따른 응력의 누적으로 피로 파괴가 발생한 것으로 판단된다. 또한, DC 모터 고장이 선행되고, 그에 따라 기어의 움직임이 구속(비동작)되면서 기어 치의 마모 및 파손이 가속된 것으로 볼 수 있다.

3.2 와이블 분포 기반의 신뢰성 분석

Fig. 13은 21개의 시험품의 고장 시간을 기반으로 와이블 분포 분석을 수행한 결과를 나타낸다. y축을 고장률(failure rate), x축을 고장 시간으로 하는 3개의 와이블 분포 곡선을 통해 각 축별 진동에 대한 영향성을 정량적으로 비교할 수 있다. 이는 식 (2)를 활용하여 설명이 가능하다.

$$F(t) = 1 - \exp\left[-(t/\eta)^{\beta}\right] \tag{2}$$

여기서, t는 통계적 변수로 시간이나 사이클 수 등을 대상으로 할 수 있다. $F(t)$는 누적고장확률(cumulative failure rate)로 시간 t까지 고장날 확률을 가리킨다. β는 형상모수(shape parameter)로, 로그-로그 스케

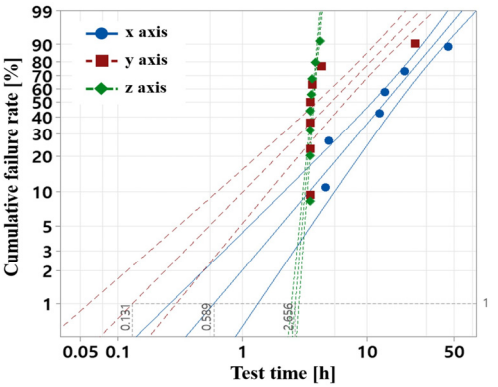


Fig. 13 Weibull distribution curves using failure time data for each axis with confidence level 50 %

일 상에서의 와이블 분포 곡선의 기울기를 결정한다. η는 척도모수(scale parameter)로 누적고장확률이 63.2 %일 때의 t 값을 가리키며, 특성 수명으로 활용된다[16]. 3개의 축에 대한 고장 시간 데이터를 활용하여 산출된 형상모수와 척도모수 등의 정보는 Table 5와 같다. 특성 수명 기준으로 봤을 때 수명은 x축, y축, z축 순으로 높은데, 이 연구에서 견지되고 있는 진동에 대한 영향을 덜 받는 순서와 일치한다. 한편, 자동차 업계에서 통용되고 있는 B_1 life(1 % 누적고장확률) 기준으로[17] 봤을 때에는 z축에 장착된 시험품의 수명이 y축보다 더 우위에 있는 것으로 보인다. 하지만, z축

Table 5 Obtained results of Weibull distribution curves for each axis

Axis	Shape parameter	Scale parameter [h]	B_1 life [h]
x	1.34	18.4	0.589
y	1.15	7.06	0.131
z	12.9	3.79	2.66

방향 진동에 관한 형상모수는 조기 고장이 유도될 수 있다는 것을 시사한다. z축 방향으로 장착된 시험품들은 반복 진동 하중에 대하여 상대적으로 큰 응답을 받으면서, 모터 엔드 캡(motor end cap) 내 구성 부품들의 기계적 피로 파손이 조기에 발생하여 회로 단선에 기인한 EGR 고장이 발생할 수 있다는 것이다.

4. 결 론

이 연구에서는 배기계 전장부품의 대표 부품인 EGR 밸브에 대한 진동 내구성을 검증하는 것을 목표로 하였다. 실제 장착 조건에 부합하는 형태를 비롯하여 수직 방향의 나머지 2개의 축 방향을 모사하는 진동 시험용 지그를 제작하여, 3개의 축에 대해서 동시 검증이 가능하도록 구성하였다. 이 지그를 활용하여 공진점 검출 시험과 복합 진동 내구시험을 실시하였다. 진동 프로파일의 경우, 실제 차량에서 계측된 진동 데이터를 활용하여 설정한 가속 진동 조건이 가장 적합한 검증 수단이지만, 이 연구에서는 가혹 사용자 조건에 기반하여 도출된 ISO 16750-3의 진동 프로파일을 활용하였다. 다수의 완성차 업체 규격에서 인용되는, 공신력을 갖춘 진동 프로파일 적용을 통해 연구의 효율성과 시험 조건의 객관성을 확보하고자 하였다. 최종적으로는, 축별 내진동성 특성을 파악하기 위해서 고장 분석 및 와이블 분포 기반의 신뢰성 분석을 수행하였다. 위의 과정을 통해서 도출한 결론은 다음과 같다.

(1) 공진점 검출 시험의 경우, 공진점과 최대 응답 발생 측면에서 검토하였을 때 진동에 대한 영향을 덜 받는 축은 x축, y축, z축 순으로 예상되었다. 응력과 피로를 결정하는 것은 응답 크기이므로, 공진점에서의 응답 뿐만 아니라 최대 응답이 큰 순서는 위의 순서와 반대로 z축, y축, x축이기 때문이다.

(2) 복합 진동 내구시험 후, 고장 분석을 수행하고 축별 분석 결과를 종합적으로 검토하였을 때 진동 가혹도가 높은 순서는 z축, y축, x축으로 볼 수 있다. z축, y축에서 초크 코일 이탈, 브러시 파손, 기어 치 마모/파손이 복합적으로 발생하였고, z, y축 대비 x축에서 확인된 고장모드가 상대적으로 적었던 사실에 근거한다. 그리고 웨이브 스프링 와셔의 경우, DC 모터 축 방향과 평행한 y축 방향에서 높은 빈도로 파손이 확인되었다. 이는 웨이브 스프링 와셔의 공진으로 큰 응답이 형성되고, 반복 응력 발생에 따른 피로 파괴에 기인한다. 그에 따라 감쇠되지 않은 진동이 DC 모터로 전달되면서 브러시 션트 단선, 쵸크 코일 이탈로 이어지게 되었다. z축 방향의 경우, 브러시의 넓은 면과 초크 코일의 축에 수직하고, 브러시 션트의 길이 방향과 평행하며, 기어 치의 맞물림 면에 수직한 가진 방향으로, 상대적으로 진동에 취약한 형태가 된다. 여기에 큰 응답이 발생하고 진동에 의한 반복 하중으로 응력이 누적되면서 피로 파괴가 조기에 발생하게 된다. 그에 따라 기어의 움직임이 구속되면서 기어 치의 마모 및 파손이 가속된 것으로 볼 수 있다.

(3) 와이블 분포 기반의 수명 분석 결과를 토대로 검토할 경우, 척도모수(특성 수명) 기준으로는 x축, y축, z축의 순서로 내림차순으로 정렬이 된다. 한편, z축 방향 진동 시험 결과로부터 높은 형상모수가 산출되었다는 사실은, 내구 고장 요인이 명확하다는 것을 시사한다. z축 방향으로 장착된 시험품들은 반복 진동 하중에 대하여 상대적으로 큰 응답을 받으면서, 모터 엔드 캡(motor end cap) 내 구성 부품들의 피로 파손이 조기에 발생하여 회로 단선에 기인한 EGR 고장이 발생할 수 있다는 것이다.

상기의 결과를 종합해보면, 진동에 대한 영향이 가장 적은 축은 x축으로, 실제 차량 장착 상태에서도 진동에 의한 고장 발생 가능성이 가장 낮은 축 방향임을 보여주었다. 검증 측면에서, 지그의 무게 중심을 낮추는 방향으로 지그 개선 설계 적용을 통해 내진동성을 검증함으로써 고장 시간의 증대를 기대해 볼 수 있다. 또한, 진동의 수준이 다소 가혹하다 판단되어 그 수준을 완화하는 방향으로 진동 프로파일을 조금 더 현실화해 볼 수 있다. 하지만, 축별 내진동성이 균형적으로 확보되지 않았고, B_1 결과 측면에서도 엔진 전장품에 요구되는 15년/30만 km 수명에 상응하는 축당 40시간의 무고장 시험 충족을 위해서는 반드시 내진동성 개선 설계가 적용되어야 한다. 이를 위해,

향후 연구에서는 이 연구에서 실험적으로 규명한 고장메커니즘을 대상으로 컴퓨터 유한요소 해석(CAE)을 활용한 응력 해석을 수행하고, 실험 결과와의 교차 검증을 통해 각 요소부품의 파손 원인 및 응력 집중 특성을 정량적으로 규명할 계획이다. 이를 바탕으로, 고장메커니즘에 대한 해석적 근거를 더욱 보완함과 동시에 개선이 필요한 부위의 설계 방향을 제시하고자 한다.

후 기

이 연구는 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원(KIAT)의 지원을 받아 수행된 연구임 (2410015673, RS-2025-25397256).

References

(1) Jacob, P., 2016, Early Life Field Failures in Modern Automotive Electronics - an Overview; Root Causes and Precautions, Microelectronics Reliability, Vol. 64, pp. 79~83.

(2) International Organization for Standardization, 2023, Road Vehicles — Environmental Conditions and Testing for Electrical and Electronic Equipment — Part 1: General, ISO, ISO 16750-1:2023, Geneva, Switzerland.

(3) Colosio, M., Andrade, A. and Santos, J., 2000, Overview of Automotive Component Failures, SAE International, 2000-01-3231, PA, United States.

(4) Volkswagen AG, 2017, Electric and Electronic Components in Motor Vehicles up to 3.5 t, Volkswagen AG, VW 80000, Wolfsburg, Germany.

(5) International Organization for Standardization, 2023, Road Vehicles — Environmental Conditions and Testing for Electrical and Electronic Equipment — Part 4: Climatic Loads, ISO, ISO 16750-4:2023, Geneva, Switzerland.

(6) Thukral, V., Roucou, R., Chou, C., Zaal, J. J. M., Soestbergen, M. et al., 2024, Understanding Board Level Vibrations in Automotive Electronic Modules, Microelectronics Reliability, Vol. 159, 115430.

(7) Choi, S. Y., Lee, S. H. and Lee, S. B., 2014, A Study on the Electronic EGR Valve Control Method, Journal of Korea Academia-industrial Cooperation Society, Vol. 15, No. 5, pp. 2594~2602.

(8) Heo, J. H. and Lee, S. B., 2016, The Characteristic Analysis of EGR Valve Motor, Journal of Korea Academia-industrial Cooperation Society, Vol. 17, No. 2, pp. 137~146.

(9) Seo, E. S. and Shin, H. B., 2017, Modeling of EGR Valve Actuator, The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, Vol. 22, No. 5, pp. 390~396.

(10) Han, M. and Cho, J. U., 2011, Study on Structural Safety Analysis of EGR Valve, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 20, No. 5, pp. 528~534.

(11) Ryu, J. and Yang, W., 2022, Durability Analysis for Vibration Characteristics of EGR System Considering Fluid-structure Interaction, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 32, No. 6, pp. 552~559.

(12) International Electrotechnical Commission, 2007, Environmental Testing — Part 2 - 6: Tests — Test Fc: Vibration (sinusoidal), IEC, IEC 60068-2-6:2007, Geneva, Switzerland.

(13) International Organization for Standardization, 2023, Road Vehicles — Environmental Conditions and Testing for Electrical and Electronic Equipment — Part 3: Mechanical Loads, ISO, ISO 16750-3:2023, Geneva, Switzerland.

(14) Lee, J., Jang, G. and Jang, J., 2015, Fatigue Life Estimation of Solid-state Drive due to the Effect of Dummy Solder Ball under Forced Vibration, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 25, No. 3, pp. 176~183.

(15) International Electrotechnical Commission, 2018, Carbon Brushes, Brush Holders, Commutators and Slip-rings — Definitions and Nomenclature, IEC, IEC 60276:2018, Geneva, Switzerland.

(16) Bertsche, B., 2008, Reliability in Automotive and Mechanical Engineering, Springer Berlin, Heidelberg, Germany.

(17) General Motors, 2023, General Specification for Electrical/Electronic Components — Environmental/Durability, General Motors, GMW 3172, MI, United States.