

감정연구 보고서(추가 감정)

LOT.	2310-LCO강릉-033강릉-018-PBS017R1
제출일자	2023년 10월 24일

차량 변속기 확인 및 RPM 분석 자료를 통한 사고발생 개연성 고찰



법 과 학 기 술 연 구 소
Forensic Science & Technology Institute

(주)PNST <http://www.pnst.kr>

T. (031) 817-8833 F. (02) 6280-2233 ip3458@gmail.com

경기도 고양시 일산동구 정발산로 24 웨스턴타워1차 906-1호

제 출 문

- 사건 번호 : 2023 가합 30051 손해배상(자)
- 원 고 : 최애숙 외 2명
- 피 고 : KG모빌리티 주식회사
- 감정 목적물 : 45가7512 자동차의 변속기와 기어 상태 등
- 감정 목적물(사고 차량) 확인
 - 일시 및 장소 : 2023. 9. 20 오후 1시~2시 / 강릉시 KG모빌리티 정비사업소
 - 참석자 : (원고측) 이상훈 (피고측) 변호사 유병수, KG모빌리티 오석진 외 1명

위 사건에 대해 감정촉탁을 받아 관련 감정결과를 본 보고서로 작성하여 제출합니다.

본 보고서는 자료 정보의 질적 한계로 인하여 주요 분석 근거인 새로운 증거물이 추가될 경우 감정내용이 달라질 수 있습니다.

박 승 범 (물리학박사, 도로교통사고감정사) 서명 : SeungBum Park

법 과 학 기 술 연 구 소

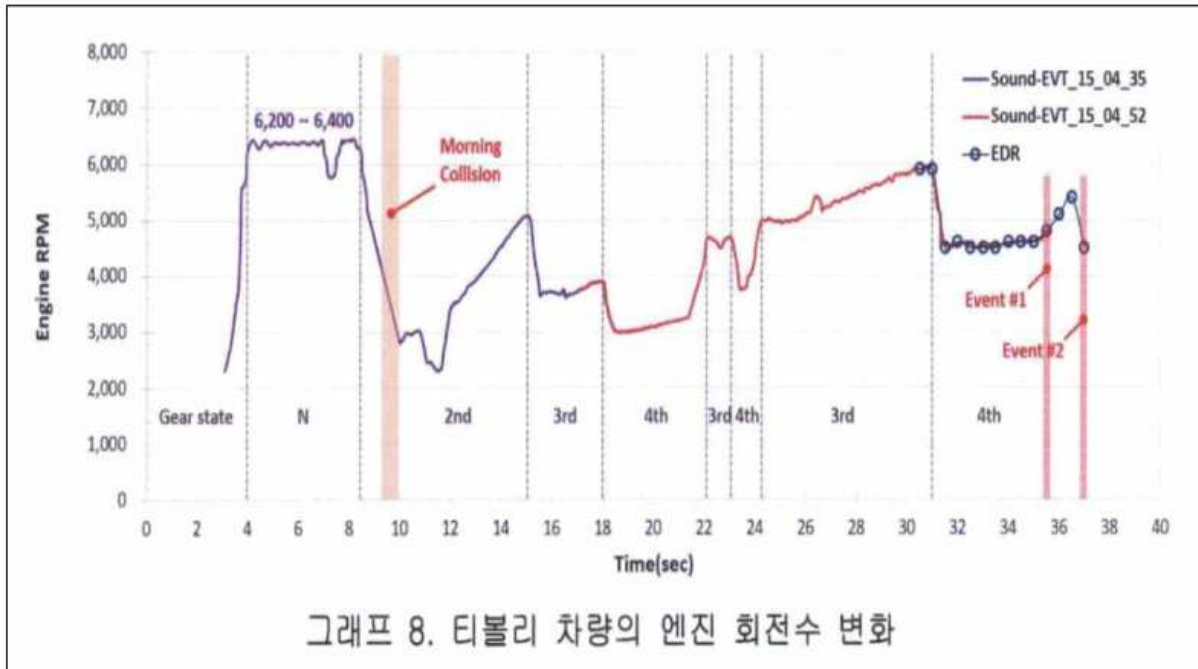


목 차

1. 충돌직전 RPM이 급격하게 떨어지는 현상의 원인은?	4
2. RPM 분석 자료 의미	5
3. 가속페달과 RPM 상승 관계	8
4. 5초 주행에 따른 차량 속도 변화	9
5. 구동력의 발생 개연성	11
6. 모닝과의 충돌 전 3초에서 충돌 시까지 속도와 가속페달 변위량	12
7. 사고 차량의 자동변속장치 외형적 손상 여부와 흰 연기 현상	13
8. 기타 파손 확인	18

1

충돌직전 RPM이 급격하게 떨어지는 현상의 원인은?



그래프 8. 티볼리 차량의 엔진 회전수 변화

표 2. 티볼리 차량의 기어비 및 종감속비

기어 단수	1단	2단	3단	4단	5단	6단	종감속비
기어비	4.044	2.371	1.556	1.159	0.852	0.672	3.867

위 표에 의하면 이 사건 자동차가 기아 모닝 충돌직전 RPM이 6400에서 4000으로 급격히 떨어지는 커브를 그리고 있는데, 이와 같은 현상을 발생시킨 원인은 무엇인지

(답변 사항)

위 질문에서 제시한 <그래프 8.>를 보면 RPM이 1초 동안에 6400에서 4000으로 매우 급격하게 떨어지는 것으로 되어 있는데, 그래프에서 설명하고 있는 전체적인

RPM 곡선과 기어상태를 고려하면 중립기어 상태에서 2단 기어 상태로의 기어 변경 시에 발생할 수 있는 현상으로 판단됩니다. 즉, 순간적인 높은 RPM은 기어의 중립 상태 또는 고출력을 위한 기어의 하단으로 변경 시에 가능한데, 중립기어 상태에서 높은 RPM이 형성되었다가 주행속도에 적당한 2단 기어상태로 변경되며 RPM이 낮아질 수 있는 현상으로 추정됩니다.

그러나 이것은 제시된 그래프와 기어상태가 이건 사고에서의 명백한 사실이라는 전제하에 가능한 해석입니다. 단편적으로 짧은 시간 동안 RPM이 6400에서 4000 정도로 급격하게 떨어지는 원인은 다양할 수 있습니다. 하나의 단편적인 예로 제어 SW의 이상 등도 있을 수 있으나 시스템이 정상이라면 그 가능성이 낮아진다고 할 수 있습니다.

2

RPM 분석 자료 의미

위 1항의 표에 따르면 이 사건 자동차가 기아 모닝과의 충돌 이후 변속 단수가 2단, 3단과 4단 사이를 천천히 변경하면서 RPM이 높아졌다 낮아졌다는 반복하면서 속도가 110킬로대로 가속·주행했다고 하는데, 가속페달을 100% 풀로 밟고 있는 상태에서 이와 같은 변속단수의 변경과 RPM의 변동이 발생할 수 있는 개연성이 있는지,

(답변 사항)

그래프의 시간축상 모닝과의 충돌직후인 10초에서 20초 사이의 자료만으로 고려할 때 변속기어 상태가 2~4단으로 변속되면서 RPM의 변화가 발생되고 있음이 그래프상에서 확인됩니다. 이와 같은 RPM 변화는 자동변속기 장치의 자동차에서 가속페달을 조절하며 속도를 증가시킬 때 나타나는 자연스런 현상이라고 할 수 있습니다. 그러나, 이건 사고에서처럼 평지를 가속페달 100% 작동하며 주행하는 것을 전제로 하면 제시된 그래프의 변속단수 변경과 RPM 변동의 발생 개연성은 낮은 것으로 추정됩니다.

이 사건 자동차에 장착된 아래와 같은 6단 자동변속장치에서 이와 같은 2~4단 변속단수로 즉 5~6단 변속단수로 변경되지 않은 채 110킬로 넘게 가속된다고 보는 것은 비정상적인지,

(답변 사항)

자동차의 속도는 타이어의 크기와 각단 기어비, 종감속도비, RPM에 따라서 결정되므로 공학적 추산으로는 이 사건 자동차의 경우 4단 변속단수에서도 4000 RPM 이상에서 110km/h 이상의 속도로 가속 가능한 것으로 추정됩니다.

■ 티볼리에어 기어단수와 RPM에 따른 차량 속도

- 타이어 - 폭 215mm, 편평비 50%, 휠사이즈 18inch : 타이어지름 672.2mm
- 종감속비 : 3.867

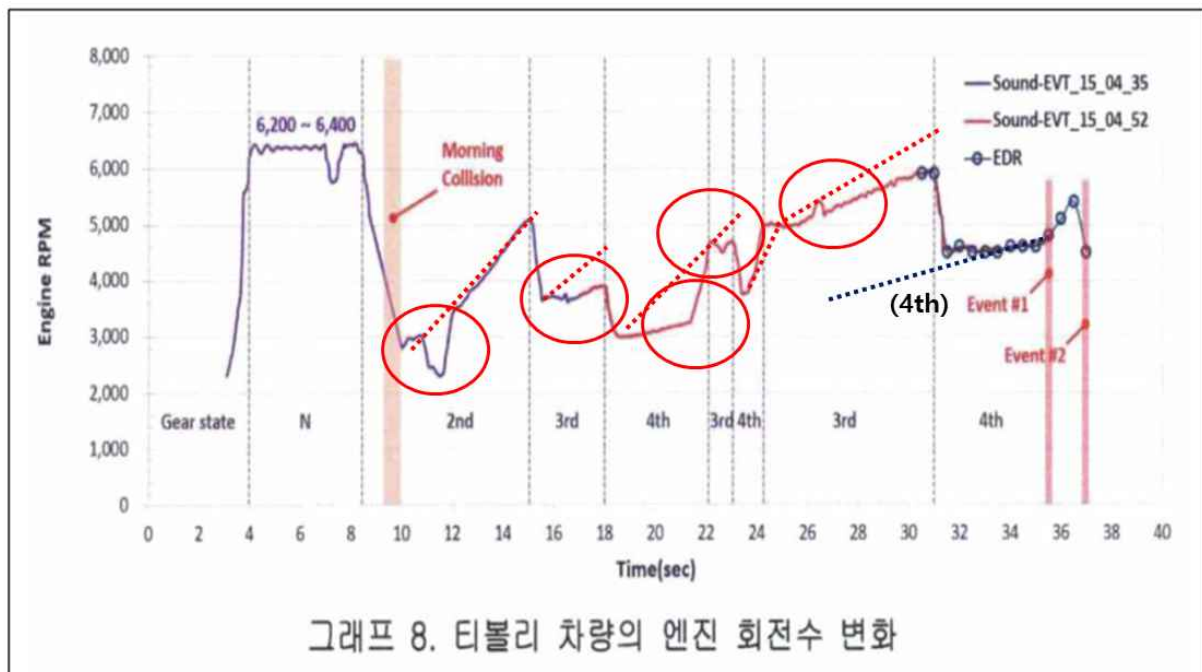
RPM/ (km/h)	기어 단수와 기어비					
	1단	2단	3단	4단	5단	6단
	4.044	2.371	1.556	1.159	0.852	0.672
800	6	11	16	22	30	38
1200	9	16	25	33	46	58
1600	12	22	33	45	61	77
2000	16	27	42	56	76	97
2500	20	34	52	70	96	121
3000	24	41	63	84	115	146
4000	32	55	84	113	153	194
4500	36	62	94	127	172	219
5000	40	69	105	141	192	243
5900	47	81	124	166	226	287

- 속도 $V[\text{km/h}] = \frac{60\pi[(\text{접지폭} \times 0.02 \times \text{편평비}) + (25.4 \times \text{휠사이즈})] \times \text{RPM}}{\text{각단 기어비} \times \text{종감속비} \times 1000000}$

국과수의 음향에 기한 RPM 분석은 운전자가 가속 페달을 밟지 않았을 개연성을 확인해 주는지,

(답변 사항)

국립과학수사연구원의 음향에 기한 RPM 분석 결과인 <그래프 8.>의 엔진 RPM을 보면 충돌 이후 약 37초에 이르기까지 같은 기어상태에서 RPM의 증가가 일정하지 않은 것으로 나타납니다.



위 그래프에서 RPM 그래프는 가장 이상적으로 전제할 때 가속페달 100% 작동상태 이므로 적어도 같은 기어상태에서는 RPM이 일정한 상승직선 형태로 증가를 해야 합니다. 모닝 충돌 후 라디에이터 등에 문제가 발생되어 엔진이 과열되면서 출력 저하가 발생되었다고 해도 방향성은 비교적 균일하게 이뤄져야 하는데, 균일성이 있다고 보기 어렵고, 도로 및 주행 여건상에 특이성으로 인한 균일성이 깨진 것이라 볼만한 것도 없는 것으로 판단됩니다. 만일 최대가속중인 일반적인 상황이라면 점선의 직선 형태처럼 RPM 그래프가 우상향해야 할 것으로 추정되는데, 분석된 그래프는 RPM의 균일성이 유지되지 않는 것으로 볼 때 단정하기는 어렵지만 운전자가 최대로 가속 상태를 유지하지 않았거나, 운전자의 행위보다는 공기유입 등 차량 제어의 HW/SW 문제에서 비롯될 수 있음을 배제하기 어려운 것으로 추정됩니다.

위 1항 표와 같은 변속단수의 변경과 RPM의 변동 및 속도의 증가 및 유지는 차량 결함에 의한 급발진이 생성하는 구동력에 따른 것이라고 볼 수 있는지.

(답변 사항)

제시된 분석자료 내용이 실제 사고에서 발생한 사실이고, 가속페달 작동이 최대로 이루어진 상태에서 나타난 그래프라고 전제하면 이진 사고가 차량결함에 의한 급발진이 생성하는 구동력에 의해 발생한 것이라 단정하기는 어려우나 운전자가 최대로 가속페달을 작동하여 발생한 것이라고는 보기 어려운 것으로 추정됩니다.

3

가속페달과 RPM 상승 관계

자동변속장치가 손상되지 않았다고 전제하에 운전자가 가속페달을 100% 풀로 밟았다면 아래 표와 같이 RPM이 5900에서 4500으로 떨어지고, 그 후 4600 상태로 유지되는 것이 비정상적인지, 그런데도 이와 같이 RPM이 떨어지고 낮은 RPM이 유지되었다는 것은 이에 기하여 운전자가 가속페달을 100% 풀로 밟지 않은 것으로 보아야 하는지

EDR 제공 정보							
기록시간 (s)	자동차속도 (km/h)	엔진회전수 (rpm)	가속페달 변위량 (%)	제동페달 작동여부 (ON/OFF)	ABS작동여부 (OFF/ON)	ESC 작동여부	조향핸들각도
-5.0	110	5900	100	OFF	지원하지 않음	지원하지 않음	지원하지 않음
-4.5	111	5900	100	OFF	지원하지 않음	지원하지 않음	지원하지 않음
-4.0	112	4500	100	OFF	지원하지 않음	지원하지 않음	지원하지 않음
-3.5	113	4600	100	OFF	지원하지 않음	지원하지 않음	지원하지 않음
-3.0	114	4500	100	OFF	지원하지 않음	지원하지 않음	지원하지 않음
-2.5	113	4500	100	OFF	지원하지 않음	지원하지 않음	지원하지 않음
-2.0	113	4500	100	OFF	지원하지 않음	지원하지 않음	지원하지 않음
-1.5	114	4600	100	OFF	지원하지 않음	지원하지 않음	지원하지 않음
-1.0	113	4600	100	OFF	지원하지 않음	지원하지 않음	지원하지 않음
-0.5	116	4600	100	OFF	지원하지 않음	지원하지 않음	지원하지 않음
-0.0	116	4600	100	OFF	지원하지 않음	지원하지 않음	지원하지 않음

(답변 사항)

위 표는 EDR 자료상 5초의 기록이므로 이건 사고에서처럼 30초 이상의 시간을 높은 RPM으로 주행한 경우에는 EDR 자료만 가지고 단편적으로 자동차 주행관련 문제를 판단하기는 한계가 있습니다. 자동변속장치가 손상되지 않았음을 전제하에 운전자가 가속페달을 100% 최대로 밟았다면 같은 기어상태에서는 RPM이 증가하나 고단 기어로 변속되면 순간 RPM은 떨어지게 되고 다시 선형적으로 증가하는 상태로 되는 것이 일반적입니다.

이건 사고의 경우 5초간의 EDR 기록에서 가속페달 최대 작동의 전제조건을 고려할 때 RPM이 5900에서 4500으로 떨어지고, 그 후 4600 상태로 유지된 것은 일반적이라 보기는 어렵습니다. 이 현상에 대하여 운전자가 가속페달을 100% 최대 작동한 것이 아닌지 여부에 대해서는 판단하기는 어렵고, 운전자 또는 스로틀밸브 제어 HW/SW의 원인 등으로 가속페달이 최대로 작동되었다고 해도 이 사건 진행과정에서 모닝과의 충돌 후 RPM이 평균 3000이상 약 20여초 정도 지속되어 엔진에 과열상태가 발생하면서 RPM이 충분하게 상승하지 못했을 개연성도 있습니다. 즉, EDR 자료만을 분석하여 RPM 변화 예측과 어떤 오류 가능성을 단편적으로 판단하는 것은 한계가 있습니다.

--

4 5초 주행에 따른 차량 속도 변화

위 표와 같은 EDR 데이터상의 0초가 이 사건 자동차가 중앙분리화단을 충격했을 때라고 볼 때, 자동변속장치의 손상이 없는 상태에서 시속 110km 주행 중에 가속페달을 최대로 하여 5초 동안 작동시켰다면 5초 후에 차량의 속도는 얼마나 되었을 것인지

(답변 사항)

자동차의 동력학적 특성상 저단기어 상태에서는 속도 증가를 위한 발진가속도가 크고, 높은 속도에서는 토크 출력보다는 RPM이 높아지게 여러 단계의 기어를 구성하게 되므로 높은 속도에서는 발진가속도의 크기가 줄어든다고 할 수 있습니다.

평탄한 일반 도로에서 시속 110km/h 정도로 주행하며 가속페달을 최대로 작동해 가속을 시킬 때, 가속도의 크기는 해당 기어의 위치에 따라 다소의 차이는 있으나 3단 기어 이상에서는 평균 $0.15g(1.47 \text{ m/s}^2)$ 내외로 추정됩니다. 만일 이와 같은 조건을 전제로 하면 110km/h 주행상태에서 5초 뒤에 약 136.5km/h 정도에 이를 것으로 추정(끝부분 경사 무시)되나, 도로의 경사 여건과 엔진 상태에 따라 다소의 차이는 있을 것으로 추정됩니다.

$$(\text{관계식}) \quad V = V_i + (3.6 \times at)[\text{km/h}] = 110 + 3.6(1.47 \times 5) = 136.5 \text{ km/h}$$

$$\text{여기서, } V_i = 110 \text{ km/h, } 1.47a = 1.47 \text{ m/s}^2, t = 5 \text{ s}$$

■ 참고

이건 사고와 동종의 티볼리 에어의 가속성능에 대한 공식적인 자료나 테스트 값은 확인할 수 없었으나, 2015년 Mobility Engineering¹⁾에 발표된 자료에서 현재와 유사한 아신 6단 자동변속장치의 휘발유 연료 티볼리에서는 0-100km/h 소요시간이 11.9s로 보고되고 있다. 또한 유튜브에 게재된 각종 속도 테스트 영상들을 참고해 보면 동종의 티볼리 에어의 계기판상 0-100km/h은 8~11초 정도에 이르는 것으로 확인된다. 최대가속 상태는 매우 가혹조건이므로 테스트보다 다소 빠를 수 있다.

<0-100km/h 발진가속도>

- ▶ 8.0초 : 3.48 m/s^2 (0.35g)
- ▶ 10초 : 2.78 m/s^2 (0.28g)
- ▶ 12초 : 2.32 m/s^2 (0.24g)

1) SAE International, Mobility Engineering, Vol 2. December p.58

5

구동력의 발생 개연성

국립과학수사연구원이 추출한 EDR에 기록된 이벤트 2에서 -1.5초에 가속페달 변위량이 100%, 엔진회전수는 4800rpm에서 -1.0초에서 0.0초 사이의 가속페달 변위량은 지속적으로 0%였음에도 엔진회전수는 -1.0초에서 5100rpm, -0.5초에서는 5400rpm으로 증가 후 0.0초에서는 4500으로 기록되었는데 이와 같은 RPM 증가 현상이 가속페달 변위량 0%에서 발생할 수 없는 비정상적인 엔진회전수인지, 이와 같은 가속페달 변위량 0%에서 RPM이 5100, 5400, 4500이나 된 것은 가속페달 작동에 따른 구동력이 아니라 차량 결함에 의한 급발진 구동력이 계속 생성되고 있기 때문에 발생했을 개연성이 있는지

(답변 사항)

가속페달 변위량은 엔진 RPM를 결정한다고 할 수 있는 스로틀밸브를 제어하는 기능을 하고, 가속페달 변위량이 0%이면 당연히 스로틀밸브 열림 제어도 최소화시켜 RPM은 1000 정도의 기본 상태로 떨어지게 됩니다. 이러한 측면에서 볼 때 EDR 자료상의 이러한 기록은 비정상적인 엔진회전수라 추정되고, 이러한 원인은 차량의 자체적인 어떤 문제로 발생되었을 개연성이 높은 것으로 추정됩니다.

이벤트 2의 경우 충돌 1.5초전에 가속페달 변위량이 100%에서 0.5초뒤 0%로 변경된 사항은 만일 충돌 1.5초 전에 이르기까지 운전자에 의해 변위량이 100%를 유지한 상태였다면 1.0초 전에 이르러 운전자의 발이 가속페달을 작동시키고 있지 않음을 의미합니다. 이것은 EDR 분석자료를 참고로 할 때, 중앙분리화단과 1차 충돌하고 1.3초 후에 2차 전신주와의 충돌이 발생한 것으로 추정됩니다. 여기서 자료내용만으로 본다면 가속페달 변위량은 100%에서 0%로 값이 떨어졌는데 RPM은 오히려 1차 충돌에서는 4800에서 2차 충돌 1.5초 전에서 충돌 순간까지 5100→5400→4500으로 변화된 것으로 나타납니다.

이벤트 1인 사고 차량이 중앙분리화단 충돌에서 주된 충돌부위가 전면부 하단으로

추정되며, 충돌 후 점프하듯 날아가는 모습을 볼 때, 충돌 충격부하로 인해 스로틀 밸브 또는 가속페달 센서에 명백하게 물리적 파손 등의 문제가 발생되었다고 단정하기는 어렵습니다. 국과수의 감정결과에서도(감정서 22-24p) 가속 페달 위치 센서와 스로틀밸브 위치 센서, 제동 페달 스위치 센서 등이 진단기기를 통해 작동되고 있음이 기록되어 있습니다.

이벤트 1의 충돌 후 가속페달 변위 0%인데 RPM의 상승이 발생한 원인에 대해서는 충돌에 따른 변수들이 있을 수 있으므로 특정하기는 어렵습니다. 단정하기는 어렵지만 이와 같은 현상은 운전자에 의한 가속 페달 작동 여부와는 별개로 어떤 다른 요인에 의해 고속 RPM을 유지시켜 주었을 개연성이 높은 것으로 추정됩니다.

6

모닝과의 충돌 전 3초에서 충돌 시까지 속도와 가속페달 변위량

감정인은 이 사건 자동차가 모닝 차량을 충돌하기 전 속도를 40km/h 내외 정도로 추정하였는데 국립과학수사연구원은 모닝 차량과 충돌 전 약 40km/h 속도에서 충돌 바로 직전에는 46km/h로 속도가 증가하여 모닝 차량과 충돌한 것으로 분석하고 있어서 상호 속도 감정의 결과가 서로 상이하기 때문에 기아 모닝과의 충돌직전의 3초 전부터 0.5초 단위로 속도와 가속페달 변위량이 각각 어떻게 되는지

(답변 사항)

국립과학수사연구원의의 감정결과를 참고해보면 감정인과 모닝과의 충돌 전 속도 분석 원리는 같은 방식임을 알 수 있습니다. 감정인과의 숫자의 차이는 주된 감정사항이 아니므로 대략적 구간을 정해 평균적인 속도를 제시했던 것이고, 국립과학수사연구원의 경우는 구간을 세부적으로 나눠서 계산한 결과일 뿐입니다. 블랙박스 영상을 통해 분석한 것이라, 영상만을 분석해서는 모닝과의 충돌직전 3초전부터 0.5초 단위로 속도와 가속페달 변위량은 알 수가 없습니다. 설령 매우 짧은 시간단위로 속도를 추정한다고 해도 오차 범위는 매우 크다고 할 수 있습니다.

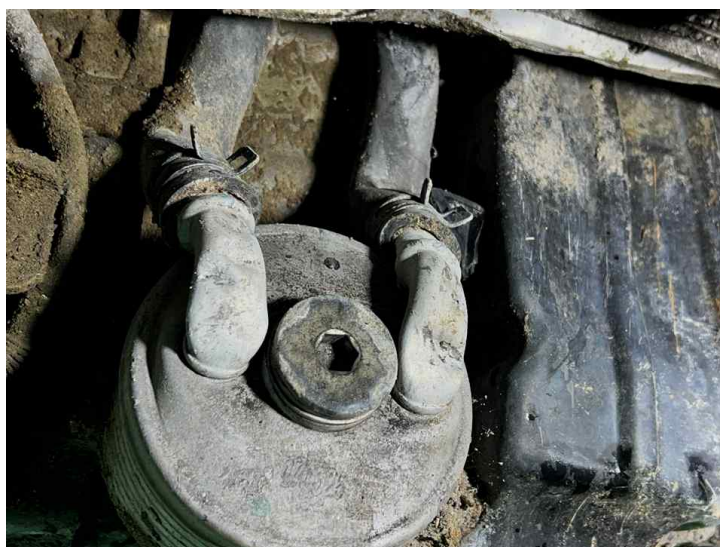
7

사고 차량의 자동변속장치 외형적 손상 여부와 흰 연기 현상

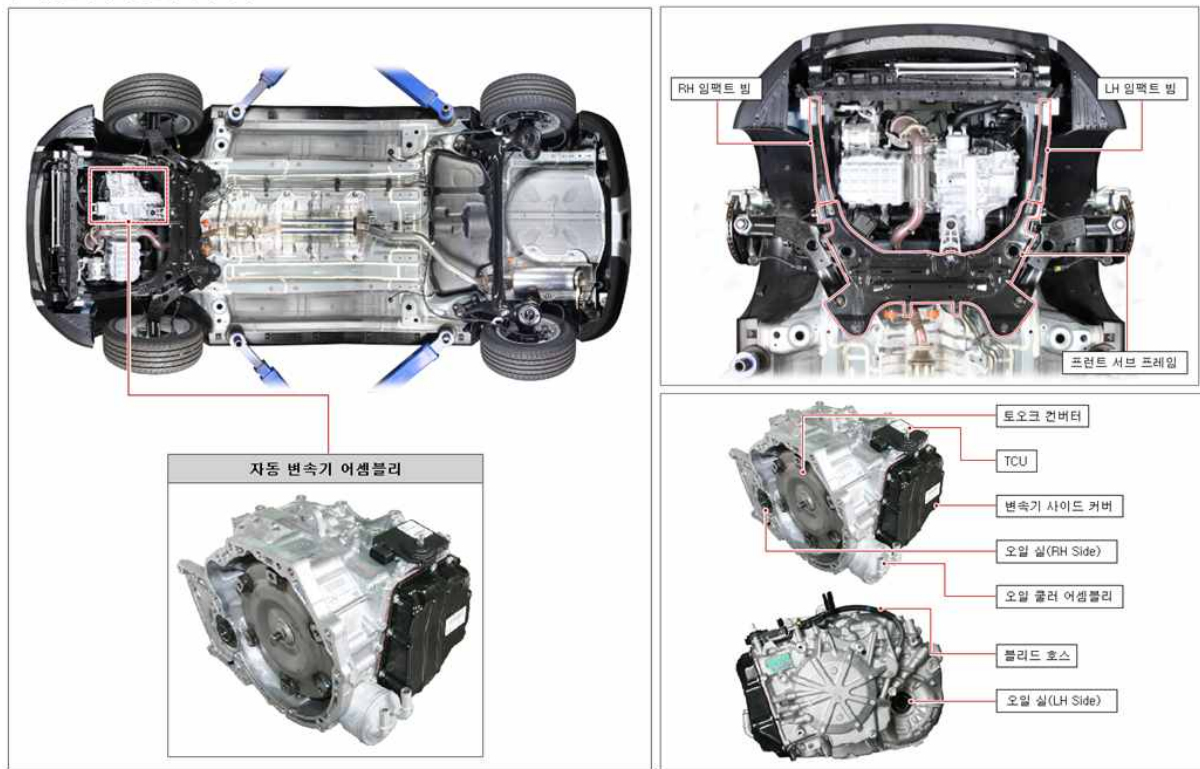
현재 원고들이 보존하고 있는 이 사건 자동차를 검사할 때 자동변속장치에 외형적으로 손상이 있는지,

(답변 사항)

2023년 9월 20일에 차량 확인 시점에서 EDR의 이벤트 1에서 발생된 것으로 추정되는 충돌 접촉에 따른 차체 전면부 하부에 다소 변형된 흔적은 있으나 그로 인해 변속기 오일이 새어나오거나 하는 등의 기능상 문제 될만한 자동변속장치의 외형적인 손상은 없는 것으로 확인됩니다.



▶ 자동변속기 어셈블리 장착 위치



라디에이터 부분의 파손 상태는 어떠한지, 이와 같은 라디에이터 파손으로 냉각수가 흘러나온다 하더라도 이 사건 자동차의 돌진과정이 녹화된 영상과 같이 흰 연기가 다량으로 지속적으로 강하게 대형선풍기가 바람을 불어 내듯이 배출될 수가 있는지

(답변 사항)

차량 전면부에 위치한 라디에이터의 앞부분이 매우 강한 충격 작용으로 파손 정도가 크게 발생되었고, 뒤로 밀린 상태입니다.

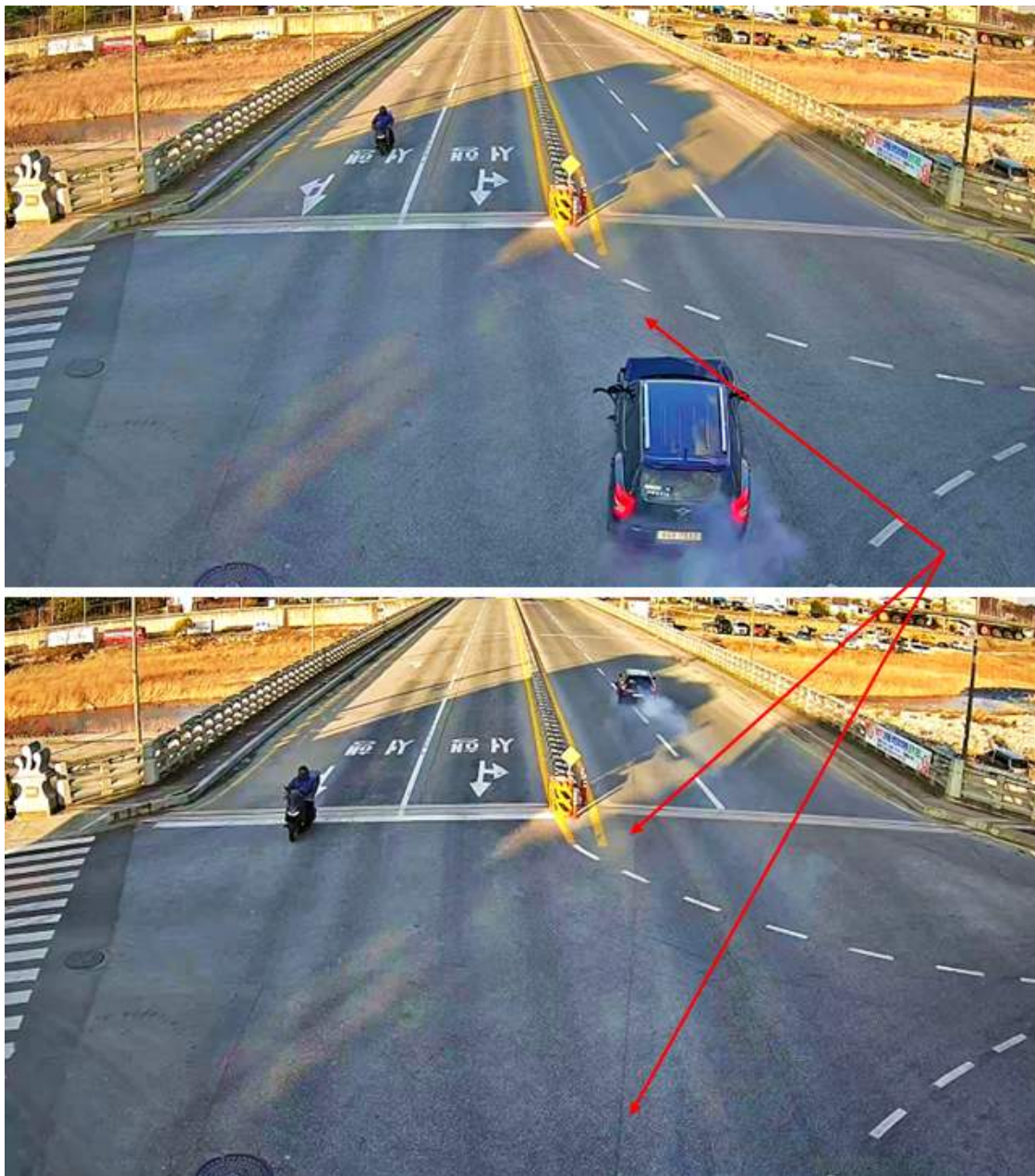
모닝과의 충돌당시에 라디에이터는 크게 파손된 것으로 확인됩니다. 모닝과의 충돌은 전면부 충돌에 따른 라디에이터가 뒤로 밀리며 엔진계통에 다소 간접충돌의 영향을 미칠 수 있으나 그 정도는 크지 않았던 것으로 보여지고, 충돌 후 30여초를 더 주행한 것으로 볼 때 외형적 차량주행에는 결정적인 영향을 미치지 않은 것으로 추정됨

니다.

사고관련 영상자료를 보면 수증기 계통으로 추정되는 기체발생은 모닝과의 충돌 이전에는 발생하지 않았고, 충돌직후부터 발생하는 것으로 확인됩니다. 전면부의 파손 상태를 보면 라디에이터의 손상 외에 기체가 대량으로 발생할 만한 특별한 충격손상이 발생될만한 것은 없는 것으로 추정되고, 주행과정에서는 발생하는 노면상의 흔적을 보면 액체가 뿌려지는 것이 확인되는데, 라디에이터가 파손되며 가열된 액체가 수증기가 되며 차체 아래로 흘러들어가고, 일부는 액체 상태에서 바닥에 흘러내리는 것으로 추정됩니다. 라디에이터의 하단부분에 비교적 크지 않은 정도의 충돌 파손에 따른 냉각수 누수가 발생되어 나타난 현상으로 추정됩니다.

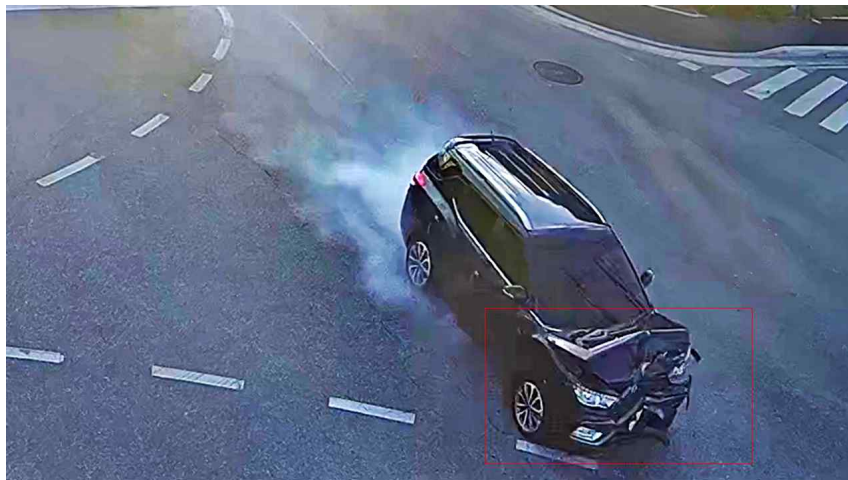


<충돌 모습과 충돌 직후 기체 발생 모습>



<이동하며 발생하는 노면 상의 액체흔적 모습>

--



<모닝과의 추돌로 발생된 전면부 파손 모습과 기체 발생 모습>



<차량 확인시점에서 라디에이터 파손 모습>

차량 주행 중에 발생하는 흰 연기는 차량 내에서의 액체가 일부 기화되면서 발생하는 것으로 추정되고, 차량의 손상과 가능한 액체 형태 등을 고려할 때 그 가능성은 라디에이터의 냉각수로 추정됩니다. 즉 모닝과의 충돌로 인해 라디에이터 하단부에서 작은 구멍 같은 파손이 발생되었고, 고온의 냉각수가 내부 압력에 의해 뿜어져 나오면서 차량의 주행으로 하부에 들어가고 주행 풍압에 따라 차량 뒤쪽으로 흰 연기형태와 노면에 액체를 뿌린 것으로 추정됩니다.

8

기타 파손 확인

■ 외관상 기어 레버 변형과 파손여부 확인

차량 확인을 통해 볼 때 기어 레버의 변형과 파손은 없는 것으로 추정됩니다.



<차량 확인시점에서 기어레버 상태>

■ 기타 손상 : 엔진 오일 용기

엔진 오일 용기는 파손으로 구멍이 발생되었고, 오일은 누유발생이 있었던 것으로 추정됩니다.



<차량 확인시점 점검 사항>

■ 기타 손상 : 축간 거리(Wheel Base) 변형

차량 좌우측의 축간 거리는 왼쪽이 약 240cm로 20cm 정도 줄어든 것으로 확인됩니다. 이것은 차량 전면부 충격이 좌측으로 강하게 작용했다는 의미입니다. 오른쪽은 원상태보다 약 4cm 정도 늘어난 264cm 정도인데, 측면 전신주 충돌과정에서 틀어진 영향이 있었던 것으로 추정됩니다.

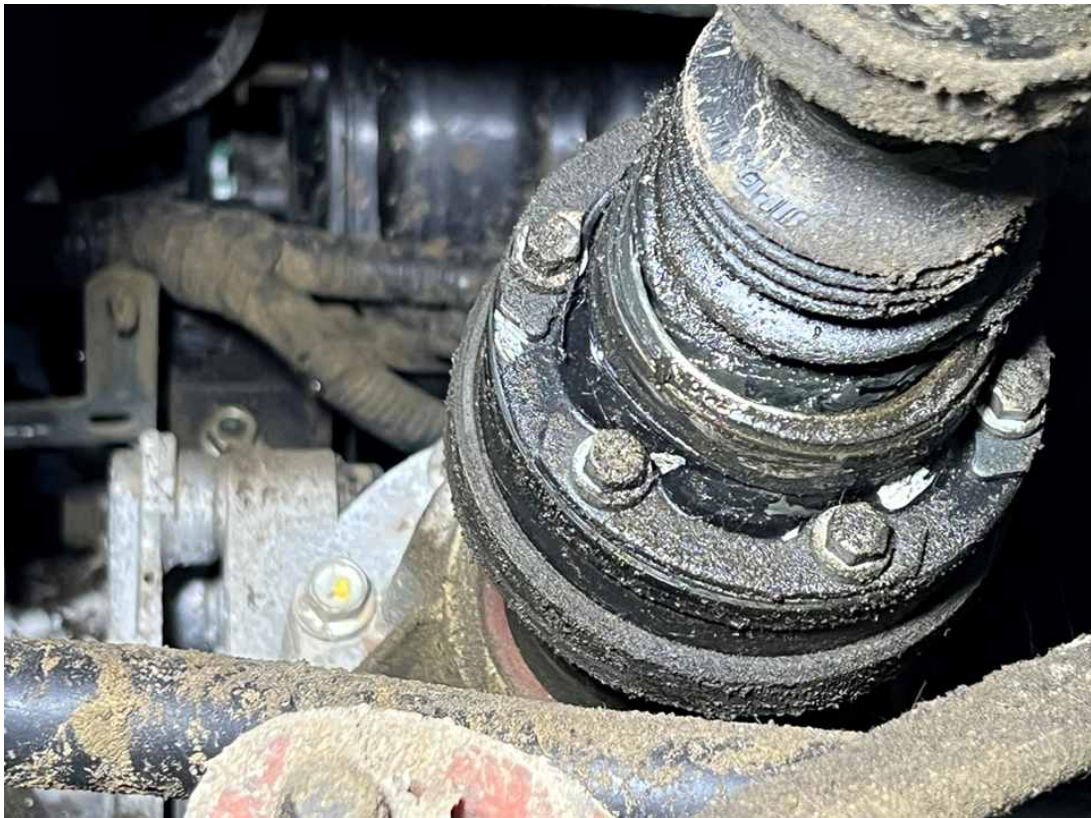




<축간 거리 측정 모습 사진의 (좌) 차량 좌측과 (우) 차량 우측면>

■ 기타 손상 : 프로펠라 샤프트 변형

동력을 전달하는 프로펠라 샤프트가 다소 변형 발생



2023. 10. 24.

감정서 작성 : 물리학 박사 감정인 박 승 범

