

충격흡수시설의 실물차량 충돌시험 데이터를 이용한 탑승자 안전도 및 충돌거동 분석에 관한 연구

Study on Analysis of Occupant Safety Index & Behavior Using Full-Scale Crash Test Data of Crash Cushion

주재웅* · 금기정** · 장대영*** · 김범진****

Joo, Jae Woong · Kum, Ki Jung · Jang, Dae Young · Kim, Bum Jin

Abstract

According to the rules, a crash cushion is supposed to set up products that is satisfied with the standard of a performance test after performing the car crash test by road safety facilities and management guide. For development of crash cushion, performance should be estimated through the car crash test eventually. However, there is no reasonable design method which considers passenger's safety and only depend on crash test without an alternative plan. Therefore it incurs a loss materially and takes a lot. Therefore, we are asked to create a systematic design of the crash cushion. This study shows that a scientific basis of applying single degree of freedom when it designs the crash cushion after analyzing vehicle crash test data of crash cushion and also represents design of crash cushion through single degree of freedom response spectrum using calculated by crash test data on crash cushion.

Keywords : *crash cushion, occupant safety index, full-scale vehicle crash test, absorbed energy*

요 지

본 연구에서는 한국도로공사 도로교통기술원에서 수행한 충격흡수시설의 충돌시험 결과 데이터를 분석하여 충격흡수시설 설계법 개발을 위한 유용한 결과를 얻고자 하였다. 분석에 사용된 CC1등급 충격흡수시설 10회, CC2등급 충격흡수시설 24회 총34회의 충돌시험 결과데이터들을 이용하여 국내 지침에 따라 탑승자 충돌속도(THIV)와 탑승자 가속도(PHD)를 계산하였고 총34회의 충돌시험데이터에서 Y축 가속도와 Yaw 각속도를 무시하고 X축 가속도 충돌시험데이터만을 이용해 탑승자 충돌속도(THIV)와 탑승자 가속도(PHD)를 계산하였다. 비교분석 결과 충격흡수시설의 탑승자 안전도가 오차율 2% 미만으로 나타나 X축 가속도 충돌시험데이터만을 이용한 탑승자 안전도 계산의 유효성이 증명되었다. 충돌시험 데이터 중 X축 가속도를 적분하여 얻은 흡수에너지와 초기 충돌차량의 충돌에너지를 비교분석한 결과, 거의 정확히 일치하여 X축 가속도만을 사용한 충격흡수시설의 충돌거동 분석이 가능하였다. 본 논문에서는 충격흡수시설의 실물차량 충돌시험데이터를 이용해 탑승자의 안전도 및 충돌거동을 분석함으로써 일차원을 적용한 충격흡수시설의 설계법 개발의 근간을 마련하였다.

핵심용어 : 충격흡수시설, 탑승자 안전지수, 실물차량 충돌시험, 흡수에너지

1. 서 론

충격흡수시설이란 도로를 주행하는 차량이 차로를 벗어나 도로의 구조물 등과 직접 충돌하기 전에 차량의 충격에너지를 흡수하여 정지토록 하거나, 차량의 방향을 유도하여 본래의 주행차로로 복원시켜주는 도로안전시설물이다. 현재 국내에는 여러 종류의 다양한 충격흡수시설이 개발되어 차량의 충돌이 예상되는 교각, 교대, 연결로 출구 분기점, 고속도로 톨게이트, 터널 및 지하차도 입구 등에 설치되고 있다. 특히

충격흡수시설은 대형충돌사고의 가능성이 크고 교통량이 많으며 자동차가 고속으로 주행하는 도로에 사용하면 매우 효과적인 것으로 알려져 있다.

“도로안전시설 설치 및 관리지침(차량방호안전시설 편, 2001, 건설교통부)”에서는 현장에 설치되는 충격흡수시설의 경우 실차 충돌시험을 통해 성능평가 기준에 만족한 제품만을 설치하도록 규정하고 있다. 따라서 새로운 충격흡수시설 개발을 위해서는 최종적으로 실차 충돌시험을 통해 성능을 평가해야만 한다. 하지만 현재 탑승자의 안전을 고려한 충격

*정희원 · 교신저자 · 한국도로공사 도로교통연구원 도로시험팀 전임연구원 (E-mail : jjw123@ex.co.kr)

**정희원 · 영지대학교 교통공학과 교수 (E-mail : kjkum@mju.ac.kr)

***정희원 · 한국도로공사 도로교통연구원 도로시험팀 연구원 (E-mail : dmyoung@hanmail.net)

****한국도로공사 도로교통연구원 교통연구실 연구원 (E-mail : ydknykim@naver.com)

흡수시설의 합리적인 설계방법이 전무한 상황이며 대안없이 충돌시험에만 의존하고 있어 시간적, 물질적 손실이 큰 실정이다.

본 논문에서는 충격흡수시설의 실물차량 충돌시험데이터를 이용하여 탑승자 안전도와 충격흡수시설의 거동을 분석함으로써 삼차원의 복잡한 충돌거동을 일차원으로 단순화하여 손쉽게 수치적으로 접근할 수 있는 근거를 마련하고, 충돌차량의 무게중심점에서 계측된 X축 가속도 데이터를 이용해 충격흡수시설의 충돌거동을 분석함으로써 차후 체계적인 충격흡수시설의 설계법 개발을 위한 기초연구를 수행하였다.

2. 충격흡수시설의 충돌시험조건 및 평가기준

세계적으로 충격흡수시설에 대한 충돌시험 조건 및 평가기준은 각국의 도로여건을 고려하여 적용하고 있으며 미국의 NCHRP Report 350과 유럽연합의 European Standard (CEN)로 크게 구분되고 국내기준은 유럽의 기준을 주로 차용하여 개정한 것이며 국내의 충돌시험 조건은 그림 1과 표 1에 나타내었다.

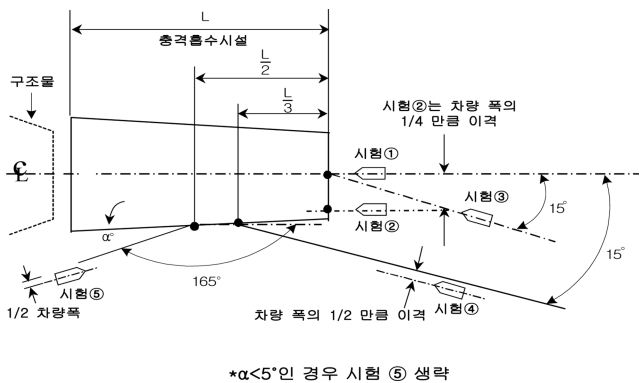


그림 1. 충돌 차량의 충돌 위치 및 충돌 방향

표 1. 충돌시험 조건

등급	충돌 속도 (km/시)	차량 중량 (kg)	충돌 방법
CC1	60	900 1,300	시험 ① 시험 ④
CC2	80	900 1,300	시험 ①, ② 시험 ①, ③, ④, ⑤
CC3	100	900 1,300	시험 ①, ② 시험 ①, ③, ④, ⑤

표 2. 정면충돌과 측면충돌의 탑승자 안전지수 비교

Test No.	시험등급	0.9ton 시설중앙 정면충돌(시험번호 ①)		1.3ton 15° 측면충돌(시험번호 ④)	
		THIV(44km/h 이하)	PHD(20g 이하)	THIV(33km/h 이하)	PHD(20g 이하)
Test 1	CC1	31.0	14.1	16.2	10.1
Test 2	CC1	33.7	30.3	14.9	1.1
Test 3	CC1	43.7	18.3	14.0	1.4
Test 4	CC1	39.9	11.0	16.8	1.8
Test 5	CC1	38.0	18.5	12.4	5.1
Test 6	CC1	40.2	12.6	15.9	9.1
Test 7	CC2	43.8	13.0	18.5	7.7
평균		38.61	16.83	15.53	5.19

국내 충격흡수시설의 평가기준으로는 탑승자 보호성능, 충격흡수시설의 거동, 충돌 후 차량의 거동으로 크게 구분되며 그 안에 세부적인 사항으로 나뉜다. 탑승자 보호성능의 평가기준으로는 탑승자 충돌속도(THIV)와 탑승자 가속도(PHD)를 평가기준으로 하며, THIV의 경우 시험 ①, ②, ③은 44km/h 이하, 시험 ④, ⑤는 33km/h 이하여야 하고 PHD의 경우 20g 이하로 규정하고 있다.

3. 충돌시험 데이터를 이용한 충격흡수시설의 탑승자 안전도 분석

본 논문에서는 한국도로공사 도로교통연구원에서 2005년 9월부터 2007년 6월까지 총 34회 실시한 주행복귀형 충격흡수시설 충돌시험데이터를 분석하였다. 하지만 충격흡수시설의 충돌시험 중 정면충돌시험 데이터만을 사용하였으며 측면충돌(시험번호 ④, ⑤)은 분석대상에서 제외하였다. 그 이유는 측면충돌시험의 경우, 탑승자 안전도를 평가하기 위한 시험이기 보다는 차량과 충격흡수시설의 거동 및 비산성능 등을 평가하기 위한 시험특성을 가지고 있으며, 측면충돌시험을 수차례 수행한 결과에 의하면 측면충돌의 탑승자 안전도는 매우 안전한 결과를 보였다. 표 2는 각 시험별 동일한 충격흡수시설을 대상으로 정면충돌시험과 측면 15° 충돌시험을 수행한 결과 THIV 및 PHD를 비교하여 나타낸 것이다.

등급별로 CC1등급이 6회 CC2등급이 1회를 대상으로 하였다. 시험번호 ④의 THIV 평균값은 시험번호 ①의 40.2% 수준이었고 PHD는 30.8% 수준으로 상대적으로 안정적인 결과를 보였다. PHD의 기준은 시험번호 ①과 시험번호 ④가 동일하게 20g 이하로 규정하고 있으나 THIV의 경우 시험번호 ①의 THIV 기준은 44km/h 이하여야 하고 시험번호 ④의 THIV 기준은 33km/h 이하여야 하므로 절대적인 비교는 다소 무리가 있다. 따라서 시험번호 ①의 THIV 평균값이 평가기준(44km/h)에 87.8% 수준으로 평가된 반면 시험번호 ④의 평균값은 평가기준(33km/h)에 47.1% 수준으로 상대적인 비교에서도 매우 안정적인 결과를 보였다. 따라서 측면충돌(시험번호 ④, ⑤)을 분석대상에서 제외하였으며 시험번호 ⑤의 경우에는 CC2, 3등급에서만 수행되는 충돌시험이고 본 조사대상에서는 1회(Test No. 7)가 해당되나 그 역시 시험번호 ④와 크게 차이나지 않는 결과를 보였다. 그러므로 탑승자의 안전을 고려한 충격흡수시설의 설계단계에서는 측면충돌시험보다는 정면충돌시험에 주안점을 두고 설계

하여야 할 것이다.

분석대상에 사용된 34종의 충격흡수시설은 차량의 충돌하중을 흡수하는 구조적 mechanism이나 적용등급, 충돌시험 방법, 충돌차량 무게, 규격, 재질 등이 각기 다르다. 표 3은 총 34종의 충격흡수시설의 특성을 정리하여 나타낸 것이다.

본 연구에서 분석대상으로 한 34회의 충돌시험데이터는 등급별로 CC1등급은 10회로 표 4에 나타내었으며, CC2등급은 24회로 표 5에 나타내었다. 충돌시험 조건별로는 0.9ton 시설중앙 정면충돌이 17회, 1.3ton 시설중앙 정면충돌이 11회, 0.9ton 차량폭의 1/4 Offset 정면충돌이 4회, 1.3ton 15° 정면충돌이 2회를 대상으로 하였다. CC1등급의 경우 10회를 수행하여 6회가 탑승자 안전성능조건에 만족한 결과를 보였으며, CC2등급의 경우 24회를 수행하여 13회가 만

족한 결과를 보였다.

국내 지침에 의하면 탑승자 충돌속도(THIV)의 계산에는 충돌차량의 무게중심점에서 계측된 X축 가속도, Y축 가속도, Yaw 각속도가 사용되며, 탑승자 가속도(PHD)의 계산에는 X축 가속도, Y축 가속도가 사용된다. 하지만 충격흡수시설에 충돌시험차량이 정면으로 충돌하는 것을 감안하여 차량의 X축 가속도(충돌차량의 진행방향 가속도)만을 이용해 THIV와 PHD를 계산한 결과와 지침에 따라 모두 사용해 계산결과를 표 4, 5와 같이 비교해 나타내었다.

충격흡수시설의 충돌거동은 보통 0.4초 미만의 짧은 순간에 일어나며, 삼차원의 매우 복잡한 거동을 보이기 때문에 이를 수치적으로 계산한다는 것은 쉽지 않다. 따라서 충격흡수시설의 설계에 주안점을 두어야 할 충돌시험조건이 정면

표 3. 충격흡수시설들의 특성 비교

Test No	규격 (mm) 길이/높이/폭	주요 재질	구조적 특성
No.01-CC1	2220×600×890	철재, 스테인레스 강선	스테인레스 강선의 인장력을 이용
No.02-CC1	2220×900×890	철재, 스테인레스 강선	스테인레스 강선의 인장력을 이용
No.03-CC1	No.02와 동일한 충격흡수시설		
No.04-CC1	2380×890×890	철재, 페타이어	페타이어의 압축 공기압과 철재 Bar의 인발력을 이용
No.05-CC1	2380×890×890	철재, 페타이어	페타이어의 압축 공기압과 철재 Bar의 인발력을 이용
No.06-CC1	2100×700×850	철재	철재 Bar의 인발력을 이용
No.07-CC1	2100×700×850	철재	철재 Bar의 인발력을 이용
No.08-CC1	2650×750×730	타이어, 철재, 피스톤	페타이어와 피스톤의 공기압과 볼트의 휨변형력을 이용
No.09-CC1	2510×750×730	타이어, 철재, 피스톤	페타이어와 피스톤의 공기압과 볼트의 휨변형력을 이용
No.10-CC1	2470×750×730	타이어, 철재	페타이어와 볼트의 휨변형력을 이용
No.11-CC2	4730×890×890	철재, 페타이어	페타이어의 순간적 압축 공기압을 이용
No.12-CC2	4335×890×890	철재, 페타이어	페타이어의 압축 공기압과 철재 Bar의 인발력을 이용
No.13-CC2	4330×890×890	철재, 페타이어	페타이어의 압축 공기압과 철재 Bar의 인발력을 이용
No.14-CC2	4730×890×890	철재, 페타이어	페타이어의 순간적 압축 공기압을 이용
No.15-CC2	No.13과 동일한 충격흡수시설		
No.16-CC2	4430×890×890	철재, 페타이어	페타이어의 순간적 압축 공기압을 이용
No.17-CC2	4430×890×890	철재, 페타이어	페타이어의 순간적 압축 공기압을 이용
No.18-CC2	No.11과 동일한 충격흡수시설		
No.19-CC2	No.14와 동일한 충격흡수시설		
No.20-CC2	4730×890×890	철재, 페타이어	페타이어의 순간적 압축 공기압을 이용
No.21-CC2	No.13과 동일한 충격흡수시설		
No.22-CC2	No.14와 동일한 충격흡수시설		
No.23-CC2	No.13과 동일한 충격흡수시설		
No.24-CC2	No.16과 동일한 충격흡수시설		
No.25-CC2	No.20과 동일한 충격흡수시설		
No.26-CC2	4730×890×890	철재, 페타이어	페타이어의 순간적 압축 공기압을 이용
No.27-CC2	4335×890×890	철재, 페타이어	페타이어의 압축 공기압과 철재 Bar의 인발력을 이용
No.28-CC2	No.11과 동일한 충격흡수시설		
No.29-CC2	4730×890×890	철재, 페타이어	페타이어의 순간적 압축 공기압을 이용
No.30-CC2	4430×890×890	철재, 페타이어	페타이어의 순간적 압축 공기압을 이용
No.31-CC2	4430×890×890	철재, 페타이어	페타이어의 순간적 압축 공기압을 이용
No.32-CC2	4810×890×890	철재, 페타이어	페타이어의 순간적 압축 공기압을 이용
No.33-CC2	4335×890×890	철재, 페타이어	페타이어의 압축 공기압과 철재 Bar의 인발력을 이용
No.34-CC2	No.12와 동일한 충격흡수시설		

표 4. CC1등급 충격흡수시설의 탑승자 안전지수 비교

Test No	시험조건	시험결과	X, Y, Yaw 모두 계산				X축 가속도만 계산			
			THIV		PHD		THIV		PHD	
			km/hr	sec	g's	sec	km/hr	sec	g's	sec
No.01-CC1	①-0.9 F	만족	43.7100	0.1152	18.3284	0.1570	43.7086	0.1152	18.2601	0.1569
No.02-CC1	①-0.9 F	만족	41.6008	0.1169	16.0170	0.1574	41.4627	0.1169	15.9295	0.1574
No.03-CC1	①-0.9 F	만족	39.9431	0.1206	11.0450	0.1564	39.9409	0.1206	11.0449	0.1564
No.04-CC1	①-0.9 F	만족	35.4276	0.1227	18.5250	0.1561	35.4268	0.1227	18.5249	0.1561
No.05-CC1	①-0.9 F	만족	38.0454	0.1116	18.4745	0.1543	38.0292	0.1116	18.4556	0.1543
No.06-CC1	①-0.9 F	만족	40.1771	0.1186	12.6479	0.1358	40.1411	0.1186	12.5734	0.1356
No.07-CC1	①-0.9 F	NG	30.8741	0.1446	43.9931	0.1735	30.8711	0.1446	43.9431	0.1736
No.08-CC1	①-0.9 F	NG	42.1811	0.1147	24.2970	0.1335	42.1787	0.1147	24.2337	0.1335
No.09-CC1	①-0.9 F	NG	52.8988	0.0953	29.6503	0.0996	52.8546	0.0953	29.2760	0.0995
No.10-CC1	①-0.9 F	NG	57.2705	0.0994	18.9891	0.0994	57.2336	0.0994	18.8352	0.0994

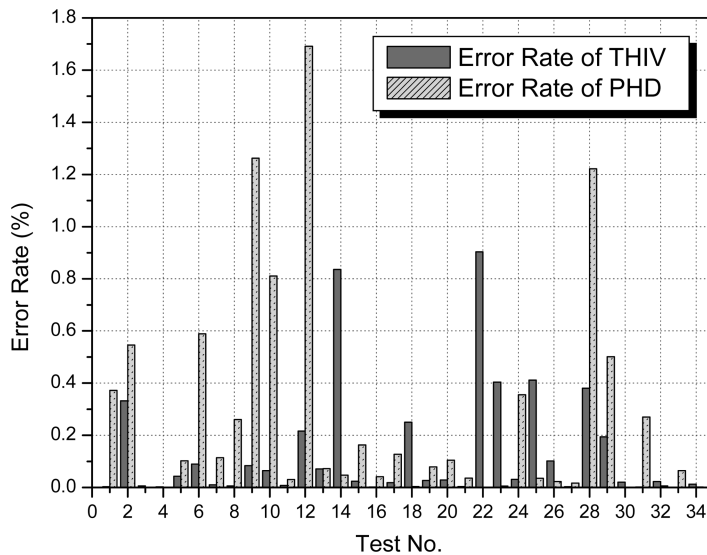
표 5. CC2등급 충격흡수시설의 탑승자 안전지수 비교

Test No	시험조건	시험결과	X, Y, Yaw 모두 계산				X축 가속도만 계산			
			THIV		PHD		THIV		PHD	
			km/hr	sec	g's	sec	km/hr	sec	g's	sec
No.11-CC2	①-0.9 F	만족	42.0251	0.0973	10.6033	0.2886	42.0218	0.0973	10.6001	0.2886
No.12-CC2	①-0.9 F	만족	42.4902	0.0938	9.6143	0.0981	42.3983	0.0938	9.4517	0.0979
No.13-CC2	①-0.9 F	만족	43.8156	0.1004	13.0085	0.1266	43.7844	0.1004	12.9991	0.1266
No.14-CC2	②-0.9 O	만족	38.8899	0.1016	16.2040	0.3013	38.5649	0.1016	16.1964	0.3013
No.15-CC2	②-0.9 O	만족	43.1883	0.1034	15.2749	0.1807	43.1780	0.1034	15.2500	0.1808
No.16-CC2	①-1.3 F	만족	37.4017	0.1034	16.0357	0.1153	37.4022	0.1034	16.0291	0.1153
No.17-CC2	①-1.3 F	만족	35.2950	0.1138	18.6516	0.2632	35.2886	0.1138	18.6278	0.2633
No.18-CC2	①-1.3 F	만족	33.9583	0.1167	17.0224	0.2990	33.8733	0.1167	17.0218	0.2990
No.19-CC2	①-1.3 F	만족	34.5902	0.1191	15.3571	0.2735	34.5809	0.1191	15.3450	0.2735
No.20-CC2	①-1.3 F	만족	33.8304	0.1192	13.4172	0.3114	33.8207	0.1192	13.4032	0.3096
No.21-CC2	①-1.3 F	만족	40.4505	0.1042	11.6040	0.1159	40.4490	0.1042	11.5998	0.1159
No.22-CC2	③-1.3 D	만족	36.1304	0.1136	15.0163	0.1788	35.8039	0.1136	15.0163	0.1788
No.23-CC2	③-1.3 D	만족	39.7278	0.1139	13.0194	0.2255	39.5674	0.1139	13.0187	0.2255
No.24-CC2	①-0.9 F	NG	46.1142	0.0918	9.1891	0.2937	46.1287	0.0918	9.1564	0.2937
No.25-CC2	①-0.9 F	NG	36.1240	0.1030	26.6762	0.1885	35.9754	0.1030	26.6669	0.1885
No.26-CC2	①-0.9 F	NG	38.2786	0.0961	21.9691	0.1837	38.2399	0.0961	21.9642	0.1837
No.27-CC2	①-0.9 F	NG	44.5326	0.0894	13.5703	0.2664	44.5311	0.0894	13.5680	0.2664
No.28-CC2	②-0.9 O	NG	39.0126	0.1132	25.4623	0.1354	38.8641	0.1132	25.1512	0.1354
No.29-CC2	②-0.9 O	NG	40.5342	0.0975	22.4666	0.3042	40.4554	0.0975	22.3539	0.3042
No.30-CC2	①-1.3 F	NG	37.0662	0.1109	25.6351	0.2754	37.0586	0.1109	25.6348	0.2754
No.31-CC2	①-1.3 F	NG	37.3078	0.1069	24.9793	0.2296	37.3073	0.1069	24.9118	0.2297
No.32-CC2	①-1.3 F	NG	34.4628	0.1216	21.0261	0.2673	34.4550	0.1216	21.0249	0.2673
No.33-CC2	①-1.3 F	NG	37.5636	0.1092	22.8136	0.2404	37.5635	0.1092	22.7989	0.2404
No.34-CC2	①-1.3 F	NG	37.7325	0.1109	20.0425	0.2412	37.7277	0.1109	20.0422	0.2412

주) 1. 시험조건에서 ①, ②, ③은 충돌시험 방법
 2. 시험조건에서 0.9과 1.3은 차량의 무게
 3. 시험조건에서 F는 시설중앙 정면충돌, O는 1/4 Offset 정면충돌, D는 15° 정면충돌

충돌시험이고, 정면 충돌시험의 Y축 가속도(차량의 측방향)와 Yaw 각속도를 무시하고 X축 가속도만을 사용하여 탑승자 안전지수를 계산하여도 큰 차이가 없다는 것을 증명한다

면, 일차원의 X축 가속도만을 분석함으로써 보다 손쉽게 충돌거동을 수치적으로 계산할 수 있을 것이다. 이를 증명하고자 총 34회의 충돌시험을 통해 수집된 X축



<All-Data>
 X축 가속도 = Raw Data
 Y축 가속도 = Raw Data
 Yaw 각속도 = Raw Data

<X-Data>
 X축 가속도 = Raw Data
 Y축 가속도 = 0
 Yaw 각속도 = 0

그림 2. All-Data 계산결과와 X-Data 계산결과의 오차율

가속도, Y축 가속도, Yaw 각속도 데이터를 모두 사용하여 탑승자 안전지수(THIV, PHD)를 계산(All-Data)하고, X축 가속도 데이터는 그대로 사용하되 Y축 가속도와 Yaw 각속도는 모두 0으로 하고 탑승자 안전지수 계산 프로그램(CEN)을 통해 계산(X-Data)하여 그 오차율을 비교해 그림 2에 나타내었다.

비교결과 탑승자 충돌속도(THIV)값의 차이 중 최고오차율은 0.90%이고 평균오차율은 0.14%이며, 탑승자 충돌속도(THIV)가 발생하는 시간의 오차율은 모두 일치하여 오차가 발생되지 않았다. 또한 탑승자 가속도(PHD)값의 오차 중 최고 오차율은 1.69%이고 평균오차율은 0.26%이며, 탑승자 가속도(PHD)가 발생하는 시간의 오차 중 최고 오차율은 0.58%이고 평균오차율은 0.03%였다. 또한 충돌방법에 따라 0.9ton 정면충돌(17회)의 경우 평균오차율은 THIV 0.10%, PHD 0.51%이었으며, 1.3ton 정면충돌(11회)의 경우 평균오차율은 THIV 0.04%, PHD 0.07%이었으며, 0.9ton 1/4 Offset 정면충돌(4회)의 경우 평균오차율은 THIV 0.36%, PHD 0.48%이었으며, 1.3ton 15° 정면충돌(2회)의 경우 평균오차율은 THIV 0.65%, PHD 0.003%이었다.

즉, 0.9ton 정면충돌, 1.3ton 정면충돌, 0.9ton 1/4 Offset 정면충돌, 1.3ton 15° 정면충돌의 4가지 충돌조건에 대해서는 Y축 가속도와 Yaw 각속도를 무시하고 X축 가속도 데이터만으로 탑승자 충돌속도(THIV)와 탑승자 가속도(PHD)를 계산하여도 오차범위 2% 미만의 비교적 정밀한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 삼차원의 복잡한 충돌거동을 X축 가속도 데이터만을 이용한 일차원으로 적용하여도 충격흡수시설의 탑승자 안전도 결과에는 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 확인할 수 있었다.

충격흡수시설의 정면충돌에서 X축 가속도만으로 계산하여도 탑승자 안전지수에 거의 영향을 미치지 않는다는 것은 많은 의미를 갖는다. 특히, 복잡한 충돌거동을 일차원으로 적용함으로써 차량과 충격흡수시설의 충돌거동을 수치계산으로 접근하기가 손쉬워지며 충격흡수시설의 설계법을 개발하는데 중요한 기초자료가 될 것이다.

4. 충돌시험 데이터를 이용한 충격흡수시설의 거동 분석

충격흡수시설은 구성부재가 파손 또는 변형됨으로 인해 차량의 충돌에너지를 소산시키는 Sacrificial Structure(자체의 파손을 전제로 하는 구조물)이므로 적절한 변형거리를 확보하여야 한다. 또한 충격흡수시설의 구조적 강성과 구성부재의 재료에 따라 다양한 충돌거동을 보이며 충돌시험 결과에도 많은 영향을 준다. 따라서 모든 충돌시험 결과가 탑승자 안전기준에 만족하는 것은 아니다. 총 34개의 시험데이터 중 만족스럽지 못한 데이터의 형상과 만족스러운 데이터의 형상을 그림 3, 그림 4에 각각 나타내었다.

그림 3의 그래프는 차량 무게중심점에서 계측된 X축 가속도(g) 데이터이며 각 조건별 충돌시험(4회)을 나타내고 있다. 여기에서 가속도에 차량의 무게를 곱하면 충격하중이 되므로 시간에 따라 충격흡수시설이 받게 되는 에너지의 양을 간접적으로 판단할 수 있다. 그래프를 보면 약 0.08초에서 0.23초까지('A')는 에너지를 거의 소산시키지 못하고 약 5g의 감속도로 진행하다가 약 0.25초에서 0.3초 사이에서 충격흡수시설이 Bottoming Distance에 달해 차량이 충격하중을

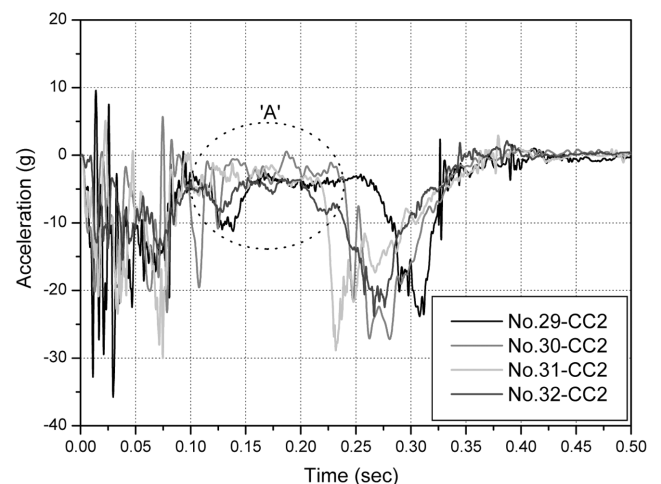


그림 3. 만족스럽지 못한 데이터의 형상

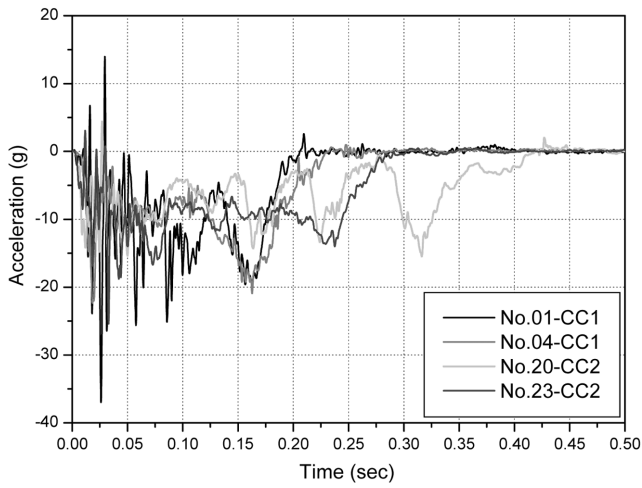


그림 4. 만족스러운 데이터의 형상

크게 받는 형상을 보인다. 반면, 그림 4의 그래프는 충돌 순간부터 충돌이 완료되는 시점(약 0.2초에서 0.4초까지 등급에 따라 차이가 있음)까지 충격하중을 일정한 크기(약 10g)로 흡수하고 있음을 알 수 있다. 따라서 일정량의 충돌 에너지를 고르게 분산시킴으로써 최대치를 낮추는 효과를 보이므로 탑승자의 안전 측면에서 효율적인 충돌거동을 보이

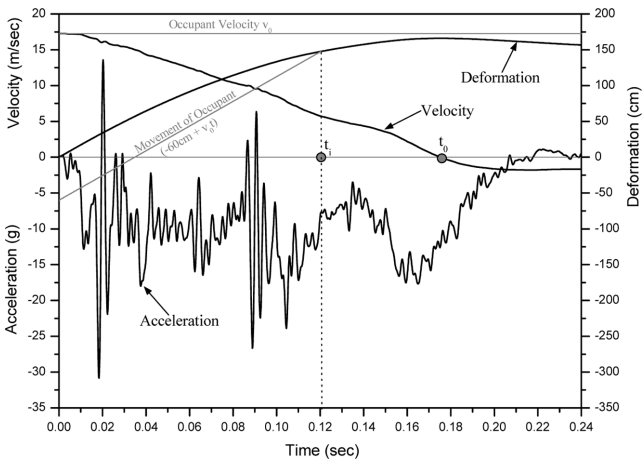


그림 5. No.02-CC1의 시간 이력에 따른 가속도, 속도, 변형거리 관계

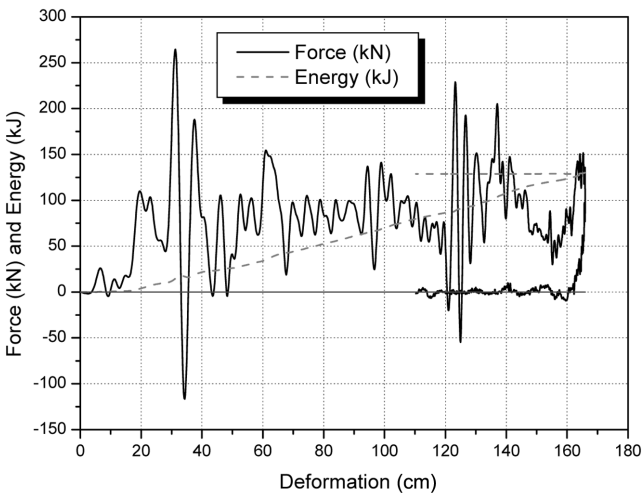


그림 6. No.02-CC1의 변형거리 이력에 따른 충격하중, 흡수에너지 관계

고 있음을 확인할 수 있다. 다시 말해 충돌이 시작되어 종료되기까지 일정한 저항력을 지속적으로 발휘할 수 있는 부재의 선정이나 배열 등이 중요하기 때문에 충격흡수시설을 설계하고자 할 경우 이러한 충돌특성을 잘 파악하고 이해하여 설계에 적극 반영함으로써 보다 효과적이고 안전한 충격흡수시설을 개발할 수 있을 것으로 판단된다.

앞 장에서 Y축 가속도와 Yaw 각속도를 제외하고 X축 가속도만을 사용하여도 탑승자 안전지수에는 큰 영향이 없음을 증명하였다. 이를 근거로 X축 가속도 데이터를 이용하여 충격흡수시설의 충돌거동을 분석하고자 하였다. 각 시험별 데이터를 분석하여 그림 5, 6과 같은 그래프를 구성할 수 있으며 모든 시험데이터를 대상으로 그래프를 구성하였다. 하지만 본 논문의 내용에는 No.02-CC1과 No.21-CC2의 분석결과만을 그림 5, 6, 7, 8에 각각 나타내었다. 그림 5, 7과 같은 시간 이력에 따른 가속도, 속도, 변형거리 그래프를 나타내기 위해 시간에 따른 X축 가속도를 적분하여 초기충돌속도에서 감속되는 속도 그래프를 구하고 이를 다시 적분하여 초기위치 0에서 변형되는 충격흡수시설의 변형거리를 구하였다. 또한 그림 6, 8과 같은 변형거리에 따른 충격하중 (kN)과 흡수에너지(kJ)를 나타내기 위해 운동방정식을 적용하였다. 이므로 차량이 받는 가속도에 충돌하는 차량의 질량

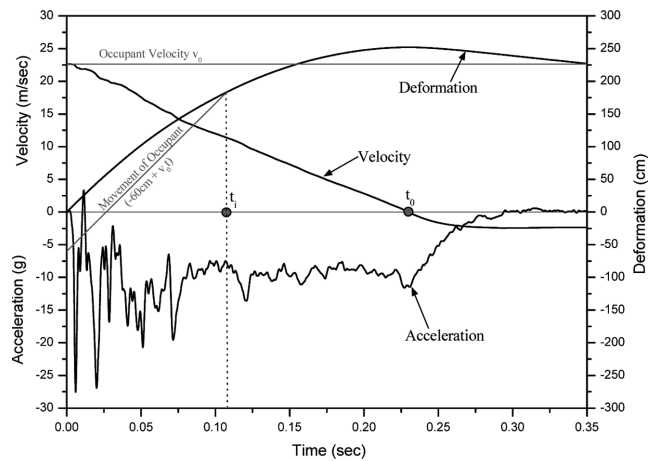


그림 7. No.21-CC2의 시간 이력에 따른 가속도, 속도, 변형거리 관계

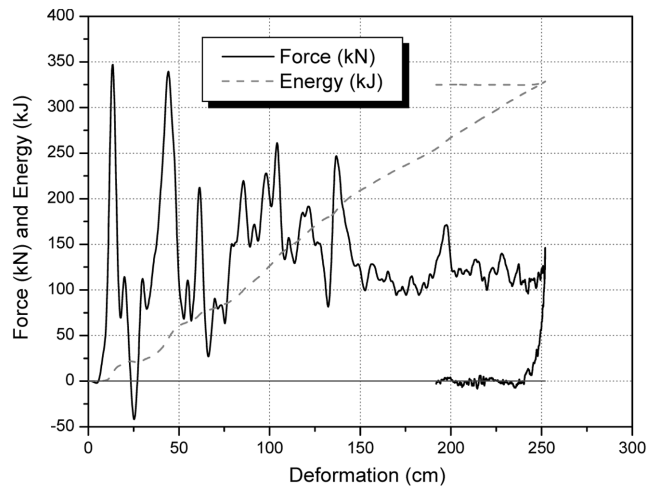


그림 8. No.21-CC2의 변형거리 이력에 따른 충격하중, 흡수에너지 관계

을 곱하여 충격흡수시설이 받는 충격하중을 계산할 수 있었고 이를 충격흡수시설의 변형거리에 대한 충격하중 그래프로 표현할 수 있었으며, 이를 적분하여 변형거리에 따른 충격흡수시설의 흡수에너지로 표현할 수 있었다.

위와 같은 과정으로 모든 시험데이터를 분석하였으며 이를 표 6과 표 7에 나타내었다. 여기서 충돌속도와 차량무게는 시험차량의 충돌속도와 차량무게를 나타낸 것이다. 시험등급 별로 60km/h와 80km/h로 구분되고 시험방법별로 900kg과 1,300kg으로 구분되며 각 시험별로 약간의 시험오차를 보이거나 모두 허용오차범위를 벗어나지 않았다.

표 6과 표 7에서 충돌속도와 차량무게는 실차 충돌시험 당시 차량의 무게와 충돌속도를 나타낸 것이므로 차량이 충돌직전에 갖는 충돌에너지는 운동방정식에 의해 차량의 무게와 충돌속도로부터 충돌에너지를 계산하여 나타낸 것이다. 반면 흡수에너지는 그림 5, 6과 같이 차량의 X축 가속도 센서로부터 계측된 시험데이터를 이용해 적분과정과 운동방정식에 적용해 흡수에너지로 나타낸 것이다. 다시 말해 그림 6, 8과 같이 충격하중을 적분하여 나타낸 충격흡수시설의 흡수에너지를 나타낸 것이다. 여기서 Y축 가속도와 Yaw 각속도를 제외하고 X축 가속도만을 사용하여 분석한 이유는 3장

표 6. CC1등급 충격흡수시설의 거동분석

Test No	시험조건	시험결과	충돌속도 (km/hr)	차량무게 (kg)	충돌에너지 (kJ)	흡수에너지 (kJ)	속도 Zero (sec)	최대변형량 (cm)
No.01-CC1	①-0.9 F	만족	63.30	880	136.0364	136.0359	0.1655	164.04
No.02-CC1	①-0.9 F	만족	62.10	875	130.1836	130.1836	0.1753	165.99
No.03-CC1	①-0.9 F	만족	60.80	890	126.9294	126.9294	0.1889	168.74
No.04-CC1	①-0.9 F	만족	61.90	890	131.5638	131.5638	0.1753	176.47
No.05-CC1	①-0.9 F	만족	60.90	890	127.3473	127.3472	0.1632	152.58
No.06-CC1	①-0.9 F	만족	61.00	900	129.2014	129.2014	0.1779	163.75
No.07-CC1	①-0.9 F	NG	61.60	905	132.4875	132.4875	0.1801	210.46
No.08-CC1	①-0.9 F	NG	61.00	900	129.2014	129.2014	0.1463	148.10
No.09-CC1	①-0.9 F	NG	61.90	900	133.0420	133.0420	0.1075	110.89
No.10-CC1	①-0.9 F	NG	61.90	890	131.5638	131.5638	0.1107	117.42

표 7. CC2등급 충격흡수시설의 거동분석

Test No	시험조건	시험결과	충돌속도 (km/hr)	차량무게 (kg)	충돌에너지 (kJ)	흡수에너지 (kJ)	속도 Zero (sec)	최대변형량 (cm)
No.11-CC2	①-0.9 F	만족	81.96	935	242.3151	242.3158	0.3585	339.23
No.12-CC2	①-0.9 F	만족	81.00	895	226.5469	226.5469	0.2419	234.97
No.13-CC2	①-0.9 F	만족	80.50	915	228.7588	228.7586	0.1927	218.35
No.14-CC2	②-0.9 O	만족	82.60	885	232.9530	232.9521	0.3217	340.23
No.15-CC2	②-0.9 O	만족	81.50	910	233.1963	233.1965	0.194	230.48
No.16-CC2	①-1.3 F	만족	82.59	1260	331.5816	331.5826	0.3517	363.21
No.17-CC2	①-1.3 F	만족	81.82	1280	330.5932	330.5938	0.2835	346.05
No.18-CC2	①-1.3 F	만족	82.24	1275	332.6913	332.6900	0.3234	369.81
No.19-CC2	①-1.3 F	만족	81.07	1280	324.5602	324.5600	0.3134	353.41
No.20-CC2	①-1.3 F	만족	81.80	1265	326.5594	326.5587	0.3251	354.95
No.21-CC2	①-1.3 F	만족	81.40	1285	328.4861	328.4857	0.2298	252.01
No.22-CC2	③-1.3 D	만족	81.70	1285	330.9118	330.9105	0.3385	320.19
No.23-CC2	③-1.3 D	만족	81.50	1290	330.5749	330.5749	0.2372	278.38
No.24-CC2	①-0.9 F	NG	80.76	930	234.0133	234.0126	0.3704	305.25
No.25-CC2	①-0.9 F	NG	81.00	890	225.2813	225.2813	0.3162	270.77
No.26-CC2	①-0.9 F	NG	82.10	915	237.9427	237.9436	0.2865	258.80
No.27-CC2	①-0.9 F	NG	80.80	915	230.4670	230.4661	0.2483	221.92
No.28-CC2	②-0.9 O	NG	81.73	895	230.6487	230.6492	0.231	270.47
No.29-CC2	②-0.9 O	NG	83.50	905	243.4370	243.4360	0.3009	306.37
No.30-CC2	①-1.3 F	NG	81.46	1265	323.8503	323.8510	0.2877	358.20
No.31-CC2	①-1.3 F	NG	81.85	1250	323.0817	323.0814	0.2721	330.14
No.32-CC2	①-1.3 F	NG	80.47	1270	317.2756	317.2763	0.2774	345.52
No.33-CC2	①-1.3 F	NG	81.00	1275	322.7344	322.7344	0.2548	301.58
No.34-CC2	①-1.3 F	NG	82.10	1295	336.7605	336.7617	0.2488	299.40

에서 X축 가속도만을 사용하여도 결과에는 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 재차 확인하기 위한 것이다.

비록 차량 무게중심점에서의 가속도를 측정한 것이지만 충격흡수시설의 구조적 저항력으로 차량의 충돌하중이 소산되는 것이며 차량이 갖는 초기 충돌에너지는 차량의 속도가 Zero가 되기까지 충격흡수시설이 차량의 충돌에너지를 흡수하게 되므로 충격흡수시설의 흡수에너지라 말할 수 있다. 여기서 충돌차량의 초기 충돌에너지와 계측데이터의 적분과정을 통해 계산된 흡수에너지가 0.000167%의 평균오차율로 정확히 일치한다고 말할 수 있다.

또한 속도 Zero Time과 최대변형량은 그림 5, 7과 같이 X축 가속도의 적분과정을 통해 구해진 값이다. 예를 들어 그림 7의 그래프는 무게 1,285kg인 차량이 81.4km/h (=22.61m/sec)의 충돌속도로 충돌하는 시험조건(초기 충돌에너지=328.4861kJ)을 갖는다. 이 조건으로 시험하여 측정한 X축 가속도를 통해 초기속도 22.61m/sec에서 점차적으로 감속되어 0.2298sec()에서 속도가 0이 되고 이후 약 2.4m/sec의 속도로 Rebound됨을 알 수 있었다. 여기서 속도 Zero Time()은 충격흡수시설의 최대변형량이 발생하는 시간이다. 그림 8의 그래프를 보면 충격흡수시설은 최대변형량이 252.01cm로 변형이 발생하는 동안 약 100kN에서 200kN 사이의 하중을 받으면서 충격하중을 소산하였다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 충격흡수시설이 흡수한 에너지는 328.4857kJ로 초기 충돌에너지와 거의 일치함을 확인할 수 있었다.

이와 같은 결과는 충돌시험을 통해 측정한 X축 가속도 데이터의 적분을 통한 충격흡수시설과 충돌차량의 충돌거동을 분석하는 과정이 얼마나 정확한지를 직접적으로 보여주는 것이다. 따라서 충돌시험 데이터만으로도 충격흡수시설과 차량의 동적인 충돌거동을 충분히 파악할 수 있으며 더 나아가 충격흡수시설의 체계적인 설계법을 개발하는 등, 그 활용가치는 매우 높을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 충격흡수시설의 실물차량 충돌시험데이터를 이용해 탑승자의 안전도 및 충돌거동을 분석함으로써 일차원을 적용한 충격흡수시설의 설계법 개발을 위한 근간을 마련하였다. 향후 본 연구에 의해 도출된 결과를 이용하여 일차원을 적용한 충격흡수시설 설계법 개발 연구를 수행하고

자 한다.

본 논문의 내용을 통해 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

1. 충격흡수시설의 정면충돌시험을 통해 측정한 데이터 중 X축 가속도, Y축 가속도, Yaw 각속도 데이터를 모두 사용하여 탑승자 안전지수를 계산한 결과와 X축 가속도 데이터는 그대로 사용하되 Y축 가속도와 Yaw 각속도는 모두 0으로 하고 탑승자 안전지수를 계산한 결과를 비교하였을 경우 오차범위가 2% 미만으로 큰 차이가 없음을 확인하였다.
2. 본 연구를 통해 충격흡수시설의 복잡한 충돌거동을 일차원으로 적용할 수 있다는 근거를 마련하여 충격흡수시설과 충돌차량의 충돌거동을 수치계산하기가 손쉬워짐으로써 향후 충격흡수시설의 설계법 개발에 중요한 기초자료가 될 것으로 판단된다.
3. 충돌차량의 초기충돌조건으로부터 계산된 충돌에너지와 차량의 무게중심점에서 측정한 X축 가속도를 분석하여 계산된 흡수에너지가 거의 정확히 일치하는 것을 확인하였다. 이는 계측데이터를 이용해 충격흡수시설의 충돌거동을 분석하는 과정이 얼마나 정확한지를 직접적으로 나타내는 것이며, X축 가속도 데이터만으로도 충격흡수시설의 동적인 충돌거동을 충분히 파악할 수 있으므로 향후 충격흡수시설의 설계법 개발에 활용할 수 있는 가치가 매우 높을 것으로 판단된다.

참고문헌

- 건설교통부(2001) 도로안전시설 설치 및 관리지침-차량방호 안전시설 편.
- 고만기, 김기동, 장대영(2003) 단자유도 시스템을 이용한 충돌해석과 베리어 설계, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제23권 제6A호, pp. 1193-1204.
- 고만기(2004) 충돌차량 탑승자 안전을 고려한 충격흡수시설 설계법, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제24권 제5A호, pp. 1031-1041.
- Ross Jr., H. E., Sicking, D. L., and Zimmer, R. A. (1993) Recommended procedures for the safety performance evaluation of highway features, *NCHRP Report 350, Transportation Research Board*, Washington, D. C.
- Emori, R/ I. (1968) *Analytical Approach to Automobile Collisions*, Dept. of Engineering, University of California, Los Angeles, SAE Paper 6800.

(접수일: 2007.8.8/심사일: 2007.9.10/심사완료일: 2007.10.23)