충격흡수시설에 대한 특정 충돌시험데이터의 확대해석

Transforming Test Data of an Impact to a Crash Cushion into the Data of Different Impact Condition

장대영* · 고만기** · 주재웅*** · 김동성****

Jang, Dae Young · Ko, Man Gi · Joo, Jae Woong · Kim, Dong Sung

Abstract

It is found the first case of broad interpretation of the crash analysis in MASH (Manual for Assessing Safety Hardware, AASHTO, 2009) which is the guideline of roadside safety features in United States. They introduced the procedure of calculating 1,500 kg sedan safety index from the 2,270 kg pick-up truck crash test for crash cushion. First, following MASH's method, calculate 0.9 ton vehicle crash data and safety index using 1.3 ton vehicle crash test data and compare with actual 0.9 ton vehicle crash test data. results show that actual test data and the data calculated by MASH's method have great difference. Second, analyse the cause and develop new method. Proposed method can estimate not only the lighter vehicle (0.9 ton) crash data from the heavier vehicle (1.3 ton) crash test but also heavier vehicle (1.3 ton) data from lighter vehicle (0.9 ton) test. This method is superior to MASH's method and has stronger theoretical foundation. This paper proves the efficiency and the accuracy of new broad interpretation method using crash test data and investigates the principle.

Keywords : crash analysis, crash cushion, roadside safety features, crash test

요 지

충돌해석 데이터의 확대해석 사례는 미국의 도로안전시설 지침인 MASH(Manual for Assessing Safety Hardware, AASHTO, 2009)에서 2,270 kg 픽업트럭의 충격흡수시설에 대한 충돌시험 데이터로부터 1,500 kg 중형승용차의 안전도를 계산하는 절차에 관한 내용을 최초로 소개하였다. MASH 방법에 따라 1.3 ton 차량의 충돌시험 데이터로부터 0.9 ton 차량의 충돌데이터 및 안전지수를 계산하여 0.9 ton 차량의 충돌시험 데이터와 비교하였다. 비교 결과 MASH방법으로 계산한 0.9 ton 차량의 충돌데이터 및 안전지수가 충돌시험 데이터와 큰 차이를 나타낸다는 것을 확인하였고 그 원인을 분석하여 새로운 확대해석 방법을 개발하였다. 개발된 확대해석 방법은 질량이 큰 차량(1.3 ton)의 충돌시험 데이터로부터 작은 차량(0.9 ton)의 충돌 데이터를 계산할 수 있을 뿐 아니라 작은 차량(0.9 ton)의 충돌 데이터로부터 큰 차량(1.3 ton)의 데이터를 계산할 수 있다. 개발된 확대해석 방법은 정확도가 MASH에 비하여 월등하고 이론적인 원리가 확실하다. 본 논문은 충돌시험 데이터를 이용하여 새로운 확대해석 방법의 효율성과 정확도를 입증하고 그 원리를 규명하였다.

핵심용어 : 충돌해석, 충격흡수시설, 도로안전시설, 충돌시험

1. 서 론

도로안전시설의 개발이나 성능평가에 있어서 특정 충돌 조건에 대한 충돌시험 데이터를 이용하여 다른 충돌조건에 대한 데이터를 계산해 낼 수 있다면 그 효용성은 굳이 언급할 필요가 없을 것이다. 충돌시험 횟수를 줄일 수 있고 지침에서 규정하고 있는 차량 이외의 차량충돌에 대한 성능을 판단해 볼 수도 있기 때문이다. 문제는 안전시설의 종류와 각 시설물 별 충돌조건이 다양하고 충돌차량의 거동이 그 만큼 복잡하고 다양하여 해석적인 접근이 어렵다는 것이다. 이러

한 이유로 도로 안전시설 분야에는 해석적인 설계기술 대신 충돌시험을 통한 시행착오적인 설계와 성능검증 방법이 주로 이루어지고 있다.

충돌해석 데이터의 확대해석 사례로 MASH(Manual for Assessing Safety Hardware, AASHTO)(2009)는 Appendix G에서 2,270 kg 픽업트럭의 충격흡수시설에 대한 충돌시험 데이터로부터 1,500 kg 중형승용차의 안전도를 검토하는 방법을 최초로 소개하였다. MASH는 지금까지 안전시설 설계 기준이 되어왔던 NCHRP Report 350(1993)을 보완 개편하여 AASHTO의 기준으로 만든 것이다. 국내에서는 국토해양

*정회원 · 교신저자 · 로드키네마틱스 연구개발실장 (E-mail : dmyoung@daum.net)

**정회원 · 공주대학교 공과대학 건설환경공학부 교수 (E-mail : mgko@kongju.ac.kr)

***정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 선임연구원 (E-mail : jjw123@ex.co.kr)

****정회원 · 공주대학교 방재연구센터 선임연구원 (E-mail : dskim93@kongju.ac.kr)

부에서 발행한 “도로안전시설 설치 및 관련지침 통합 편”(2009)에서 충격흡수시설에 대한 성능평가 기준을 사용하고 있으며, 지침에 따라 충격흡수시설에 대한 실험차량 충돌시험은 0.9 ton 차량과 1.3 ton 차량을 사용하여 성능을 검증토록 하고 있으나 최근에는 SUV(2.0 ton, 2011년 기준으로 등록된 차량의 92.9%를 포함)(2011) 차량에 대한 안전성능에 관심이 높아지고 있다. 따라서 1.3 ton 차량에 대한 충돌시험을 수행하여 0.9 ton 차량에 대한 충돌거동을 추정하거나 0.9 ton 차량의 시험결과로부터 1.3 ton, SUV 혹은 그 밖의 차량에 대한 충돌거동을 예측할 수 있는 방법을 개발한다면 그 효용 가치는 매우 클 것이다.

본 논문에서는 동일한 충격흡수시설에 대하여 특정 차량의 충돌시험 결과로부터 다양한 질량을 갖는 차량의 충돌데이터 및 탑승자 안전지수를 예측할 수 있는 확대해석 방법을 개발하고자 한다. 또한 MASH의 계산절차에 따라 충돌실험 데이터를 이용한 탑승자 안전지수 예측방법을 국내의 충격흡수시설에 대한 충돌시험데이터에 적용하여 그 타당성과 문제점을 파악하고 개선책을 마련함으로써, 보다 정확하고 원리가 명확한 새로운 확대해석 방법을 개발하고자 한다.

2. 관련 연구 고찰

Richard I. Emori(1968)는 차량이 강체벽(Rigid Wall)에 충돌하는 경우와 차량과 차량이 정면충돌 또는 후면 충돌하는 경우에 대하여 단위유도계, 혹은 2자유도 Mass-Spring Model을 이용하여 충돌차량의 거동을 해석하였다. 여기서는 다양한 차종과 다양한 충돌속도에 대하여 실험 차량 충돌시험을 통해 획득한 데이터를 이용해 차량의 스프링상수 k 를 구하였다. 그리고 단위유도 시스템의 기본 운동방정식을 적용하여 그 엄밀해를 찾는 방법으로 접근하였다. 이 과정에서 차량과 차량이 정면충돌하는 경우, 차종과 충돌속도에 상관없이 차량이 받는 단위변형 길이당 충격량 즉, 스프링상수 k 가 일정하다는 것을 발견하였고 차량이 강체벽에 충돌할 경우에도 스프링상수가 차량의 질량이나 충돌속도에 관계없이 일정하다는 것을 확인하였다.

미국에서 도로안전시설 관련 기준으로 사용하고 있는 MASH(2009)에서는 충격흡수시설, 단부처리시설, 트럭 장작용 충격흡수장치(TMA)의 성능을 평가하고자 할 경우 미국 내에서 운행되는 차량의 2%~90%를 포함할 수 있도록 1,100 kg 차량과 2,270 kg 차량에 대해 실험차량 충돌시험을 의무화 하고 있다. 1,100 kg 소형차를 이용한 충돌시험은 시설물의 최소차량에 대한 성능을 확인하기 위한 것으로 차량 무게가 작은 가혹한 조건에서의 탑승자안전을 확인하는 것이고, 2,270 kg 픽업트럭은 시설물의 최대 구조적 성능과 최대 에너지흡수 능력을 보기 위한 것이다. 그런데 최대 및 최소 차량의 성능 기준을 만족하도록 설계된 충격흡수시설, 단부처리시설, TMA 등이 중형차에 대한 성능을 만족시킬 것인가에 대한 의문이 있고 특히, 스테이지(Stage)형 충격흡수시설의 경우가 불확실하다는 우려에서 1,500 kg급 중형 승용차를 충격흡수시설의 시험항목에 추가하였다. 그러나 추가 충돌시험을 하는데 따른 비용문제 때문에 추가 충돌시험을 수행할 것인지를 판정하는 절차를 마련하게 되었다.

장대영(2006) 등은 충격흡수시설에 대한 25회의 실험차량 충돌시험데이터를 이용해 충격흡수시설의 안전성능을 분석하였는데, 차량의 진행방향인 X축 가속도(a_x)만을 사용한 경우와 X, Y축 가속도(a_x, a_y), Yaw 각속도(ω_z) 데이터를 사용한 경우를 비교하였다. 일반적으로 탑승자 보호성능을 평가하기 위해서는 안전지수 THIV(Theoretical Head Impact Velocity) 및 PHD(Post-Impact Head Deceleration)를 계산하는데 이를 위하여 충돌차량의 무게중심점에 X축 가속도센서, Y축 가속도센서, Yaw 각속도센서를 부착하여 데이터를 수집한다. THIV값의 계산에는 X축 가속도, Y축 가속도, Yaw 각속도가 사용되며, PHD값의 계산에는 X축 가속도, Y축 가속도가 사용된다. 이 연구에서는 시험차량이 충격흡수시설에 정면으로 충돌하는 경우 a_x 만을 사용하여 계산된 탑승자 안전지수가 a_x, a_y, ω_z 를 사용하여 계산된 값과 크게 차이가 나지 않음을 증명하였다.

3. 충돌시험 데이터 선정 및 분석방법

3.1 분석대상 충돌시험 데이터 선정

세계적으로 충격흡수시설에 대한 충돌시험 조건 및 평가기준은 각국의 도로여건을 고려하여 적용하고 있다. 미국에서는 도로안전시설 관련 기준으로 MASH(2009)를 사용하고 있으며, 유럽에서는 European Committee for Standardization (EN 1317-1~EN 1317-3)(2010)을 사용하고 있다. 국내기준(2009)은 유럽 기준에 유사하게 규정하여 사용하고 있으며 국내의 충돌시험 조건은 표 1과 그림 1에 나타내었다.

국내 충격흡수시설의 평가기준으로는 탑승자 보호성능, 충격흡수시설의 거동, 충돌 후 차량의 거동으로 크게 구분된다. 탑승자 보호성능의 평가 기준으로는 탑승자-차량 충돌 상대속도(THIV)와 탑승자-차량 충돌 후 최대가속도(PHD)를 평가기준으로 하며, THIV의 경우 시험 ①, ②, ③은 44 km/h 이하, 시험 ④, ⑤는 33 km/h 이하여야 하고 PHD의 경우

표 1. 국내 충격흡수시설의 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

그림 1. 차량의 충돌위치 및 충돌방향

표 2. 분석대상 충격흡수시설

Test No.	시험체 길이 (m)	구조적 Mechanism	차량 무게 (ton)	충돌 속도 (km/h)	THIV		PHD	
					km/h	sec	g	sec
CC2-No1	4.330	타이어의 공기압과 봉의 인발력	0.915	80.5	43.8	0.1004	13.0	0.1266
			1.285	81.4	40.5	0.1042	11.6	0.1159
CC2-No2	4.200	봉의 인발력	0.945	81.2	43.3	0.1319	15.7	0.2018
			1.300	82.5	39.1	0.1349	13.1	0.1893
CC2-No3	4.200	봉의 인발력	0.900	81.4	36.7	0.1317	17.0	0.1951
			1.305	81.0	36.1	0.1359	14.7	0.2003
CC2-No4	4.200	봉의 인발력	0.910	80.3	35.4	0.1208	14.5	0.1229
			1.300	81.8	34.3	0.1248	12.0	0.1249
CC2-No5	4.530	쿠션파이프이 파단력	0.905	80.3	38.6	0.1177	18.2	0.1244
			1.300	81.4	33.9	0.1291	14.1	0.2153
CC2-No6	4.530	쿠션파이프이 파단력	0.905	80.3	40.5	0.1106	16.9	0.1922
			1.300	80.7	40.3	0.1181	15.8	0.1194
CC2-No7	3.984	와이어로프의 굴곡마찰력	0.930	80.3	37.8	0.1120	19.7	0.2030
			1.310	80.7	35.1	0.1276	14.6	0.2593
CC3-No1	5.200	봉의 인발력	0.910	101.4	42.4	0.1165	15.6	0.1523
			1.300	101.6	38.6	0.1203	17.0	0.1396
CC3-No2	6.194	부재의 압축력, 와이어로프의 마찰력	0.900	101.7	40.4	0.0974	17.1	0.2373
			1.300	100.9	37.4	0.1086	16.7	0.2688
CC3-No3	5.200	봉의 인발력	0.910	101.4	39.1	0.1097	18.2	0.1671
			1.300	100.9	37.3	0.1140	14.1	0.1495
CC3-No4	5.200	봉의 인발력	0.900	103.7	42.8	0.1146	20.7	0.1509
			1.305	103.7	38.2	0.1203	17.5	0.1437

20 g 이하로 규정하고 있다. 국내에서 2001년부터 현재까지 충돌시험을 통해 성능이 검증된 충격흡수시설은 총 49종이 개발되었고 등급별로 CC1등급이 25종, CC2등급이 18종, CC3등급 6종이 개발되었으며, 등급에 따른 합격률(2011년 5월 기준, 한국도로공사 도로교통연구원 자체 조사결과)은 CC1등급이 30.8%, CC2등급이 10.0%, CC3등급이 22.2%로 매우 저조한 합격률을 보이고 있다. 이는 체계적인 설계절차를 거치지 않고 충돌시험에만 의존하기 때문에 발생하는 불합리한 현상이라 할 수 있다.

본 논문에서는 국내의 충돌시험 데이터를 이용하여 MASH의 탑승자 안전지수 예측방법을 검증하고 타당성과 문제점을 파악하여 보다 정확하고 원리가 명확한 새로운 확대 해석 방법을 개발하고자 한다. 이를 위하여 충격흡수시설의 등급별로 CC2등급 7개, CC3등급 4개, 시험조건별로는 0.9 ton 시설중앙 정면충돌이 11회, 1.3 ton 시설중앙 정면충돌이 11회를 사용하였다. 분석대상 충격흡수시설은 한국도로공사 도로교통연구원 충돌시험장에서 2004부터 2011년까지 수행한 충돌시험 결과를 사용한 것으로 표 2에 나타내었다. 시험대상 충격흡수시설은 Test No별로 각기 다른 제품이며, 동일한 제품에 동일한 충돌속도로 0.9 ton 차량과 1.3 ton 차량이 정면 중앙에 충돌하는 경우를 각각 검토대상으로 하였다.

3.2 충돌시험 데이터의 분석방법

일반적으로 충돌시험데이터는 충돌 진행방향 가속도의 시간이력(a_x-t)과 수직방향 가속도의 시간이력(a_y-t), 수직방

향 각속도(Yaw Rate)의 시간이력(ω_z-t)을 획득하여 탑승자 안전지수(THIV, PHD)를 계산한다. 그러나 충격흡수시설에 대한 정면충돌의 경우 a_y 및 ω_z 의 영향은 미미하기 때문에 CFC180 Hz로 필터링된 a_x-t 만을 이용하여 탑승자 안전지수를 계산하여도 큰 오차를 보이지 않는다는 것은 이미 확인(2006)되었다.

계측된 a_x-t 를 시간에 대하여 적분하면 차량의 진행방향 속도(v_x-t)를 구할 수 있고 v_x-t 를 시간에 대하여 다시 적분하면 차량의 변위(δ_x-t)를 구할 수 있으며 이를 그림 2에 나타내었다. 여기서 차량의 변위는 충격흡수시설의 변형 거리와 동일하다고 가정한다. 그림 2에서 탑승자 안전지수

그림 2. 시간에 대한 가속도, 속도, 변형거리

그림 3. 간략화된 충돌 특성

(THIV, PHD)가 계산되는 기본적인 개념은 장대영(2006)의 논문에서 확인할 수 있으며, THIV와 PHD의 자세한 계산절차는 국내지침(2009)에서 확인할 수 있다.

한편, 위에서 구한 a_x 의 시간이력 및 δ_x 의 시간 이력을 이용하고 $F = Ma_x$ 의 관계를 이용하면 그림 3과 같이 $F-\delta_x$ 의 관계를 나타낼 수 있다. 여기서 $F-\delta_x$ 그래프는 차량의 충돌과정에서 생기는 저항력(차량이 받는 하중)과 변위 사이의 관계가 여러 가지 모드의 복잡한 진동 때문에 심한 굴곡을 보이지만 일정한 기울기의 선형관계로 근사화시킬 수 있고 그 기울기는 충돌속도에 관계없이 일정하다는 것이 밝혀졌다(1968). 이 직선 그래프의 기울기를 충격흡수시설의 시스템 스프링상수 k 로 볼 수 있다. 엄밀히 말하자면, 선형관계로 단순화된 힘-변위 곡선의 기울기는 충돌차량과 충격흡수시설의 시스템 스프링상수 k 가 종합된 것이지만 본 논문에서는 이 기울기가 시설물의 시스템 스프링상수 k 라고 가정한다.

또한 $F-\delta_x$ 를 변형거리에 대하여 적분하면 그림 3에서 점선으로 나타낸 흡수에너지-변위관계($W-\delta_x$)를 나타낼 수 있다. 여기서 충격흡수시설이 흡수한 에너지와 충돌차량의 운동에너지는 같다고 가정한다. 실제로 이 두 값이 거의 일치한다는 것을 확인(2006)하였다. 여기서 충돌차량의 탄성회복을 표시하는 부분이 그림의 CD부분이다. 그림 3에서 근사화된 실선 A-B-C-D의 내부면적은 선형 스프링이 흡수한 충돌전 차량의 단위질량당 운동에너지를 나타내며, A-B의 기울기(한방향 시스템 스프링상수 k)는 차량이 받는 충돌하중을 최대변형거리가 발생하는 지점까지 적분하여 계산된 면

적과 동일한 면적에 해당되는 기울기를 찾은 것이다. 이를 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{2}k\delta_{\max}^2 = \int_0^{\delta_{\max}} Fd\delta \quad \therefore k = \frac{2}{\delta_{\max}^2} \int_0^{\delta_{\max}} Fd\delta \quad (1)$$

본 논문에서는 동일한 충격 흡수시설에 대하여 다른 질량의 차량으로 충돌시험을 수행한 결과를 이용하여 각각의 충돌에 대한 힘-변위 곡선을 구하고 이 곡선을 직선식으로 가정하여 기울기 k 를 계산하여 그 값이 충돌차량의 질량에 따라 크게 달라지지 않음을 확인(그림 8, 9 참조)하였다. 이를 이용하여 구조물의 고유한 시스템 스프링상수 k 가 일정하다고 가정하여 이를 질량변화에 따른 충돌거동 및 탑승자 안전지수를 예측하는 방법을 제시하고자 한다.

4. MASH 방법에 의한 탑승자 안전지수 예측방법 및 검증

4.1 MASH 방법에 의한 예측방법 및 검증결과

충돌해석 데이터의 확대해석 사례로 MASH(2009)의 Appendix G에서 제시한 계산절차는 2,270 kg 차량으로 정면충돌 하는 차량의 가속도를 이용하여 1,500 kg 차량의 탑승자 안전도를 계산하는 과정으로 구성되어 있다. 2,270 kg 차량의 가속도 데이터를 적분하여 시설물의 하중-변위 특성을 알 수 있으며 이 하중-변위 관계를 1,500 kg 차량에 적용하여 OIV(=THIV) 및 ORD(=PHD)을 구한다. 이렇게 구한 안전지수는, 1,500 kg 차량에 가한 하중-변위 곡선을 만든 충돌차량(2,270 kg)의 무게가 1500 kg에 비하여 무겁고 강성이 크기 때문에, 보수적이라고 말할 수 있다. 따라서 2,270 kg 충돌시험의 하중-변위 곡선을 이용하여 계산한 1,500 kg 차량의 안전지수가 허용치 이내라면 1,500 kg 차량에 대한 충돌시험을 수행할 필요가 없도록 하였다.

본 논문에서는 MASH에서 제시한 계산절차에 따라 충돌 차량의 무게가 큰 경우의 충돌시험데이터(X축 가속도)를 이용해 충돌차량의 무게가 작은 경우에 대해 탑승자 안전지수를 예측하는 방법을 검증하였으며 사용된 충돌시험 데이터는 표 2와 같다. 미국의 경우에는 2,270 kg의 차량의 충돌 시험데이터를 이용해 1,500 kg 차량에 대한 탑승자 안전지수를 예측하였으나 국내의 충격흡수시설에 대한 성능평가는 900 kg 및 1,300 kg 차량에 대하여 실시한다. 따라서 충돌 시험을 통한 1,300 kg 차량의 X축 가속도 데이터를 이용하

그림 4. MASH 방법(CC2-No1)

그림 5. MASH 방법(CC3-No1)

여 MASH의 계산절차에 따라 900 kg 차량에 대한 충돌거동 및 탑승자 안전지수를 계산한 후 900 kg의 충돌실험 데이터 분석결과와 비교하였다.

본 연구에서는 모든 분석대상시설에 대하여 계산하였으나 여기서는 그림 4와 그림 5와 같이 시험번호 CC2-No1과 CC3-No1에 대해서만 나타내었다. 그림에서 좌측 그래프는 X축 가속도 데이터를 시간에 따라 적분하여 초기 충돌속도에서 시작되는 차량의 속도를 나타내고 다시 시간축으로 속도를 적분하여 차량의 변위를 나타낸 것이다. 여기서 차량의 변위는 시설물의 변형거리와 동일하다고 가정한다. 그래프에서 점선은 0.9 ton 차량에 대한 실차 충돌시험 데이터를 나타낸 것이고 실선은 MASH 계산절차에 의해 1.3 ton 차량 충돌데이터로부터 0.9 ton 차량의 충돌데이터를 계산한 것이다. 그림의 우측그래프는 변형거리를 수평축으로 하여 충돌하중과 흡수에너지를 나타낸 것이다. 여기서 충돌하중은 $F = Ma$ 이므로 가속도에 충돌차량의 중량을 곱해서 나타낸 것이며 충돌차량이 받는 하중과 시설물에 가해지는 하중은 같다. 흡수에너지-변위 곡선은 충돌하중-변위곡선을 적분하여 나타낸 것으로서 구조물의 변형에 따라 초기운동에너지가 흡수되는 과정을 보여준다. 우측의 그래프에서 점선은 0.9 ton 차량에 대한 실차 충돌시험데이터를 이용하여 나타낸 것이고 실선은 MASH 계산식으로부터 예측된 가속도, 속도, 변형거리를 이용하여 나타낸 것이다.

그림 4, 5의 좌측 그래프에서 0.9 ton 차량의 충돌시험 결과를 이용하여 나타낸 속도-시간이력은 아주 작은 Rebound 속도를 보이는 반면, MASH의 방법에 따라 계산된 0.9 ton 차량의 속도-시간이력은 매우 큰 Rebound 속도를 보인다. 이는 1.3 ton 충돌실험 데이터로부터 0.9 ton 충돌차량의 변환속도 v' 를 구하는 과정에서, 1.3 ton 차량의 에너지 변화량을 0.9 ton 차량의 충돌에 그대로 사용했기 때문이다.

MASH의 방법에 따라 계산되는 시간 간격은 시간 간격 t' 가 증가하는 경향을 보였다. 즉 MASH의 계산절차로부터 예측된 t_f (충돌거동이 끝나는 시간, 그림 2 참조)가 0.9 ton 차량의 t_f 보다 더욱 길게 나타난다. 이는 시간 간격 t' 를 구할 때 1.3 ton의 차량의 변형거리 δ' 를 그대로 사용하였기 때문이다. 실제로 0.9 ton 차량과 1.3 ton 차량의 충돌시험 데이터에서 충돌거동이 끝나는 시간 t_f 를 비교하면 1.3 ton 차량이 0.9 ton에 비해 충돌거동 시간이 긴 것을 확인할 수 있으며, 시간축에 영향을 받는 1.3 ton의 변형거리를 0.9 ton에 그대로 사용하였기 때문에 예측된 0.9 ton 차량의 충돌거동이 끝나는 시간 t_f 가 길게 계산되어

그림 6. 실측데이터와 MASH 분석결과 THIV 및 PHD

진다. 또한 v' (변환속도)와 t' (변환 시간간격)를 이용하여 계산하는 변환 가속도와 변환 변형거리가 0.9 ton 차량의 실측 데이터와 큰 차이를 보이고, 충돌하중과 흡수에너지에서도 0.9 ton 차량의 실측 데이터와 큰 차이를 보인다.

그림 6은 0.9 ton 차량과 1.3 ton 차량의 실측데이터에 대한 THIV(상부), PHD(하부)와 MASH의 계산절차를 통하여 1.3 ton의 실측데이터로부터 예측된 0.9 ton 차량의 THIV, PHD를 나타낸 것이다. MASH 절차를 이용한 THIV 계산치가 실측데이터로부터 계산된 THIV보다 최대 20.3%, 평균 9.6% 큰 것으로 나타났으며 PHD는 최대 78.3%, 평균오차는 35.9%로 매우 큰 차이를 보였다. MASH를 통하여 예측된 안전지수는 실차 충돌시험결과에 비해 매우 높은 경향을 보이므로 예측 결과가 기준을 만족한다면 실제 시험데이터가 기준을 만족시키는 것은 당연하다. 그러나 MASH에 따른 예측결과는 실차 충돌시험결과와 너무 큰 차이를 보이기 때문에 참고하는데 주의가 필요하다.

4.2 MASH 계산절차의 예측 한계

MASH의 탑승자 안전지수 예측방법은 질량이 큰 차량(1.3 ton)의 충돌시험 데이터로부터 질량이 작은 차량(0.9 ton)만을 계산하도록 추천하고 있으며 앞 절에서 이를 검증하였다. 본 절에서는 0.9 ton 차량의 충돌시험 데이터로부터 1.3 ton 차량의 충돌데이터를 예측할 수 있는지 검토해 보았다. 그 결과 MASH의 방법은 계산절차상의 문제점 및 한계가 있기 때문에 질량이 작은 차량의 충돌시험 데이터로부터 질량이 큰 차량의 충돌데이터를 예측하는 것이 불가능하다

그림 7. 질량 증가에 대한 분석결과(CC2-No1)

는 것을 확인하였다. 그림 7은 시험번호 CC2-No1을 이용하여 0.9 ton 차량과 1.3 ton 차량의 충돌시험 데이터로부터 가속도, 속도, 변형거리-시간이력을 나타내고, MASH의 계산절차에 따라 0.9 ton 차량의 충돌시험 데이터로부터 1.3 ton 차량의 충돌데이터를 계산하여 나타낸 것이다. 여기서는 시험번호 CC2-No1의 예측결과만을 예시적으로 나타내었으나 모든 분석대상 시설에서도 확인할 수 있었다.

0.9 ton 차량의 충돌시험 데이터로부터 계산된 1.3 ton 차량의 충돌데이터(굵은 실선)와 1.3 ton 차량의 충돌시험 데이터(얇은 실선)를 비교하면 다음과 같은 계산상의 문제점 및 한계를 확인할 수 있다. 일반적으로 충돌시험 데이터에서는 1.3 ton 차량의 충돌거동이 종료되는 시간은 0.9 ton 차량의 충돌거동이 종료되는 시간보다 길다. 그러나 MASH의 계산절차에 따른 결과를 보면, 0.9 ton 차량의 충돌시험 데이터로부터 예측된 1.3 ton 차량의 충돌 종료시간은 오히려 매우 짧은 시간에 끝난다. 따라서 0.9 ton 차량의 충돌접촉이 끝난 이후의 결과를 예측할 수가 없으며 더 이상의 계산이 불가능하다.

5. 충돌시험 데이터의 확대해석 방법 개발

5.1 시스템 스프링상수 k 의 산출

본 논문은 특정 질량의 차량이 특정한 충격흡수시설에 특

정 속도로 충돌할 때 얻은 가속도-시간 데이터로부터 질량이 다른 차량이 동일한 충격흡수시설에 동일한 속도로 충돌할 때의 충돌데이터(가속도, 시간, 변형거리-시간이력)를 예측하는 방법을 개발하기 위한 것이다. 이를 위한 기본 가정으로 동일한 구조물에 각기 다른 질량의 차량이 같은 속도로 충돌할 때 만들어내는 가속도-시간 곡선으로부터 구한 복합 스프링상수 k 값이 일정하다는 가정이 필요하다. 따라서 본 절에서는 충돌시험데이터를 이용하여 이 가정을 증명하기로 한다. 실차 충돌시험으로부터 계측된 가속도-시간이력을 시간에 따라 적분하여 속도-시간이력을 구하고 속도-시간이력을 적분하여 변위-시간이력을 구한 다음, 가속도에 충돌차량의 질량을 곱하여 구한 충돌하중-시간이력과 변위-시간이력을 이용하여 하중-변위 곡선을 구할 수 있다. 하중-변위 곡선이 만드는 면적과 동일한 면적을 갖는 선형의 하중-변위 직선의 기울기가 시스템 스프링상수이다. 본 장에서는 분석대상 충돌시험 데이터(표 2)를 이용하여 동일한 구조물에 서로 다른 질량의 차량(0.9 ton, 1.3 ton)이 동일한 충돌속도로 충돌할 때의 시스템 스프링상수 k 를 계산하였다.

충돌시험을 통하여 획득한 가속도 데이터(a_x-t)로부터 시스템 스프링상수 k 를 구하는 방법은 앞에서 설명하였다. 이 방법에 따라 각 Test No.별로 0.9 ton 차량과 1.3 ton 차량에 대한 시스템 스프링상수를 계산하여 표 3에 나타내었으며 예시적으로 CC2-No1과 CC3-No1의 계산결과만을 그림 8과 그림 9에 각각 나타내었다.

충돌에너지는 충돌차량의 초기조건을 이용해 $1/2mv^2$ 로 계산된 값이며, 흡수에너지는 위의 절차를 통해 계산된 값으로 소수점 첫째자리까지 모두 일치하는 결과를 보였다. 최대 변형량은 위의 절차를 통해 계산된 값으로 동적 최대 변형거리를 나타낸다.

표 3과 그림 8, 9의 그래프에서 확인할 수 있듯이, 0.9 ton 차량과 1.3 ton 차량의 충돌시험 데이터로부터 계산된 시스템 스프링상수 k 는 다소간의 차이를 보인다. 이는 여러 가지 이유가 있겠으나 가장 큰 이유는 충돌차량이 시설물에 충돌하여 파손되는 차량 자체의 변형거리를 무시하였기 때문으로 판단된다. 또 다른 원인으로는 시설물의 설치 오차(볼트의 조임력 등)와 충돌과정에서의 시설물의 거동이 다를 수 있

표 3. 시스템 스프링상수 계산 결과

Test No.	시스템 스프링상수 (kN/m)		충돌에너지 (kJ)		최대 변형거리 (cm)		흡수에너지 (kJ)	
	0.9 ton	1.3 ton	0.9 ton	1.3 ton	0.9 ton	1.3ton	0.9 ton	1.3 ton
CC2-No1	95.96	103.44	228.8	328.5	218.4	252.0	228.8	328.5
CC2-No2	58.76	66.03	240.4	341.4	286.0	321.6	240.4	341.4
CC2-No3	45.48	57.08	230.1	330.3	318.1	340.2	230.1	330.3
CC2-No4	52.21	60.23	226.4	335.6	294.5	333.8	226.4	335.6
CC2-No5	62.64	59.03	225.1	332.3	268.1	335.6	225.1	332.3
CC2-No6	75.45	77.79	225.1	326.6	244.3	289.8	225.1	326.6
CC2-No7	68.34	62.53	231.4	329.1	260.2	324.5	231.4	329.1
CC3-No1	45.23	55.19	361.0	517.7	399.5	433.1	361.0	517.7
CC3-No2	53.22	59.37	359.1	510.6	367.4	414.8	359.1	510.6
CC3-No3	37.27	45.13	361.0	510.6	440.1	475.7	361.0	510.6
CC3-No4	48.81	54.96	373.4	541.4	391.2	443.9	373.4	541.4

그림 8. CC2-No1의 시스템 스프링 상수

그림 9. CC3-No1의 시스템 스프링 상수

을 것이다. 그 밖에도 충돌시험 과정에서의 측정오차, 지면의 조건 등의 이유로 차이가 발생할 수 있다.

5.2 속도-시간 이력의 평행이동을 이용한 확대해석 방법

$\delta_{1,2\max}$ 는 1.3 ton 차량 충돌 시 충격흡수시설의 변형-시간 곡선으로부터 알 수 있는 최대변형거리로, 식 (2)로부터 구할 수도 있다.

$$W_{known} = \frac{1}{2} m_{known} (v_0)_{known}^2 = \frac{1}{2} k (\delta_{\max})_{known}^2 \quad (2)$$

여기서 W_{known} , m_{known} , $(v_0)_{known}$, $(\delta_{\max})_{known}$ 은 충돌시험 데이터로부터 이미 알고 있는 충돌에너지, 차량 질량, 충돌 속도 및 최대변형거리이다. 한편 앞 절에서 충돌차량의 질량에 관계없이 'k'가 일정하다고 가정하였으므로 식 (2)로부터 $\delta_{0,9\max}$ 를 구할 수 있게 된다.

이제 1.3 ton 충돌시험 데이터로부터 구한 $\delta_{1,3}-t$ 곡선과 $\delta_{0,9\max}$ 를 이용하여 0.9 ton 차량의 충돌시험결과에 최대한 근접한 $\delta_{0,9}-t$ 관계를 구하는 과정을 설계하고자 한다. 그림 10은 충돌시험 결과로부터 구한 $\delta_{1,3}-t$ 곡선과 $\delta_{0,9}-t$ 곡선을 보여주고 있다. $\delta_{0,9}-t$ 곡선은 $\delta_{1,3}-t$ 곡선이 δ 축 및 t 축으로 축소(Scale-down)된 것으로 볼 수 있다. $\delta_{1,3}-t$ 곡선을 δ 축 및 t 축 방향으로 적절히 축소하면 실측된 $\delta_{0,9}-t$ 에 근접한 $(\delta_{0,9}-t)_{estimate}$ 를 구할 수 있는 것이다. δ 축 방향으로의 Scale Factor를 변위변환계수 α 라 하면 $\alpha = (\delta_{\max})_{estimate} /$

그림 10. 변형거리 변환계수와 시간 변환계수

$(\delta_{\max})_{known}$ 로 쓸 수 있고, 1.3 ton 충돌시험 데이터로부터 0.9 ton 충돌시험 데이터를 추정하고자 할 때, $\alpha = \delta_{0,9\max} / \delta_{1,3\max}$ 이 된다. 참고로, 그림 10의 $\delta_{MASH}-t$ 곡선은 1.3 ton의 충돌시험 데이터로부터 MASH 방법에 의하여 계산된 0.9 ton 차량의 변형거리-시간이력을 나타낸 것이다.

$F = k\delta$ 로부터 이상화한 경우의 α 는 식 (3)과 식 (4)의 $(v_0)_{known}$ 과 $(v_0)_{estimate}$ 를 같게 함으로써 식 (5)와 같이 구할 수 있다. 이는 질량은 각각 1.3 ton 및 0.9 ton으로 다르

그림 11. 속도-시간이력의 평행이동

그림 12. 가속도-시간의 평행이동

그림 13. 변위-시간이력의 평행이동

그림 11. 속도, 가속도, 변위의 평행이동

지만 충돌속도는 v_0 로 동일함을 의미한다.

$$\frac{1}{2}m_{0.9}v_0^2 = \frac{1}{2}k(\delta_{0.9})_{\max}^2 \quad (3)$$

$$\frac{1}{2}m_{1.3}v_0^2 = \frac{1}{2}k(\delta_{1.3})_{\max}^2 \quad (4)$$

$$(\delta_{0.9})_{\max} = \sqrt{\frac{m_{0.9}}{m_{1.3}}}(\delta_{1.3})_{\max} \quad \therefore \alpha = \sqrt{\frac{m_{0.9}}{m_{1.3}}} \quad (5)$$

한편 시간축은 $t_{f1.3}$ 에서 $t_{f0.9}$ 로 축소되고 있는 것을 볼 수 있다. $t_{f1.3}$ 은 1.3 ton 차량의 충돌 종료시점으로 충돌시험 데이터로부터 쉽게 알 수 있다. $\delta_{0.9\max} = \alpha\delta_{1.3\max}$ 를 만족하는 $\delta_{0.9}-t$ 의 추정치는 $v_{1.3}-t$ 곡선의 시간축에 대한 평행이동 즉, $v_{0.9}(at) = v_{1.3}(t)$ 로부터 가능하다. 속도-시간 이력의 평행이동은 다음과 같다. 차량의 충돌속도가 그림 11-①과 같이 v_0 에서 0까지 직선으로 변화한다고 하고 속도가 0이 될 때의 시간을 t_0 라고 하자. 동일한 구조물에 동일한 속도로 충돌할 경우 질량이 작은 차량이 받는 가속도가 질량이 큰 차량이 받는 가속도에 비하여 클 것이므로 $v_{1.3}-t$ 곡선과 $v_{0.9}-t$ 곡선은 그림과 같이 나타낼 수 있는데 v_0 점을 중심으로 A를 B로 옮기면 $v_{0.9}(at) = v_{1.3}(t)$ 의 평행이동이 완료된다. $v_{1.3}-t$

곡선의 평행이동은 다음과 같이 가속도-시간이력 $a_{1.3}-t$ 및 변위-시간이력 $\delta_{1.3}-t$ 를 이동시키는 것이다.

v_0-t 곡선의 평행이동은 다음과 같이 가속도-시간 곡선을 변화시킨다. 그림 11-①에서 속도-시간이력의 기울기가 가속도이므로 1.3 ton 차량의 가속도 $a_{1.3}(t)$ 는 그림 11-②와 같이 v_0/t_0 로 일정하고 0.9 ton 차량의 가속도 $a_{0.9}(t)$ 는 v_0/at_0 로 일정하다. 그런데 시간 t_0 동안 속도의 변화량은 1.3 ton 차량의 경우 v_0 이고 0.9 ton 차량도 v_0 로 충돌하기 때문에 v_0 로 동일하며 이는 그림 11-②의 $\int_0^{at} a_{0.9}(t)dt$ 및 $\int_0^{t_0} a_{1.3}(t)dt$ 의 면적으로 확인된다.

한편 v_0-t 곡선의 평행이동은 변위-시간 곡선을 다음과 같이 변화시킨다. 그림 11-① 및 그림 11-②는 초기속도 v_0 인 등가속 운동으로 $v(t) = v_0 - at$ 로 일반화시킬 수 있고 변위 $\delta(t) = v_0t - 1/2at^2$ 으로 나타낼 수 있다. 따라서 $\delta_{1.3\max}$ 및 $\delta_{0.9\max}$ 는 식 (6)과 식 (7)과 같다.

$$\delta_{1.3}(t) = v_0t - \frac{1}{2}at^2$$

$$\delta_{1.3\max} = \delta_{1.3}(t_0) = \frac{1}{2}v_0t_0 \quad (6)$$

그림 12. 충돌차량의 질량이 감소하는 경우에 대한 검증결과

$$\delta_{0.9}(t) = v_0 t - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\alpha t_0} \right)^2 t^2$$

$$\delta_{0.9\max} = \delta_{0.9}(\alpha t_0) = v_0 \alpha t_0 - \frac{1}{2} \frac{1}{\alpha t_0} (\alpha t_0)^2 = \frac{1}{2} \alpha v_0 t_0 = \alpha \delta_{1.3\max} \quad (7)$$

결론적으로 그림 11-①과 같은 $v_{1.3}-t$ 그래프의 시간축을 α 만큼 A에서 B로 v_0 를 중심으로 회전하여 $v_{0.9}-t$ 그래프를 구하면 그림 11-②와 같은 $a_{0.9}-t$ 와 그림 11-③과 같은 $\delta_{0.9}-t$ 그래프를 얻을 수 있으며 이는 충돌시험데이터를 이용하여 그림 10에서 설명한 바와 일치한다. 여기서 변환계수 α 는 그림 11-③에 나타난 바와 같이 $\delta_{0.9,\max}/\delta_{1.3,\max}$ 으로부터 구하는데 $\delta_{0.9,\max}$ 및 $\delta_{1.3,\max}$ 는 선형화된 힘-변위 곡선과 운동에너지를 이용하여 설명한바 있다.

요약하면, 1.3 ton 차량을 속도 v_0 로 특정 충격흡수시설에 충돌시켜 획득한 데이터($a_{1.3}-t$, $v_{1.3}-t$, $\delta_{1.3}-t$)로부터 0.9 ton 차량을 동일한 속도 v_0 로 1.3 ton 충돌과 동일한 충격흡수시설에 충돌시킬 경우의 충돌시험데이터($a_{0.9}-t$, $v_{0.9}-t$, $\delta_{0.9}-t$)를 구하고자 할 경우, $v_{1.3}-t$ 데이터의 시간축에 변환계수 α 를 곱하여 얻어진 $v_{1.3}-\alpha t$ 가 새로운 시간축 $t^{0.9}$ 에

대한 $v_{0.9}$ 가 되는 것이다.

5.3 충돌차량의 질량 변화에 따른 검증

질량이 감소하는 경우, 즉 1.3 ton 차량의 X축 가속도를 이용하여 0.9 ton 차량의 충돌거동과 탑승자 안전지수를 예측하여 실제 충돌시험데이터와 비교하였으며 본 논문에서는 특정 결과만을 그림 12에 나타내었다. 그래프에서 실선은 1.3 ton 차량을 대상으로 본 논문에서 제시한 예측방법을 이용하여 0.9 ton 차량의 예측결과를 시간축에 대한 가속도, 속도, 변형거리로 나타내었으며, 변형거리축에 대한 충돌하중, 흡수에너지로 나타내었다. 예측치와의 비교를 위해 0.9 ton 차량의 충돌시험결과를 점선으로 나타내었다.

질량이 증가하는 경우, 즉 0.9 ton 차량의 X축 가속도를 이용하여 1.3 ton 차량의 충돌거동과 탑승자 안전지수를 예측하고 실제 충돌시험데이터와 비교하였으며 본 논문에서는 특정 결과만을 그림 13에 나타내었다. 그래프에서 실선은 0.9 ton 차량을 대상으로 본 논문에서 제시한 예측방법에 따라 1.3 ton 차량의 예측결과를 시간축에 대한 가속도, 속도, 변형거리로 나타내었고 이를 이용해 변형거리축에 대한 충

그림 13. 충돌차량의 질량이 증가하는 경우에 대한 검증결과

그림 14. MASH의 예측방법과 개발된 예측방법의 THIV 결과비교

돌하중, 흡수에너지로 나타내었다. 예측치와의 비교를 위해 1.3 ton 차량의 충돌시험결과를 점선으로 나타내었다.

5.4 검증결과 분석

그림 14는 MASH에 의한 예측방법과 본 연구를 통하여 개발된 확대해석 방법의 결과를 비교한 것이다. 또한 0.9 ton 차량의 실차 충돌시험을 통해 계산된 탑승자 안전지수를 나타내었다. 여기서 11개의 각기 다른 충격흡수시설에 동일한 충돌속도로 충돌하는 경우 MASH 방법에 따라 1.3 ton 차량의 충돌시험 데이터로부터 0.9 ton 차량의 충돌거동 및 탑승자 안전지수를 예측한 결과와 실차 충돌시험으로부터 계산된 결과가 큰 차이가 있는 것을 볼 수 있다. MASH의 계산절차를 이용한 결과(질량이 감소하는 경우)와 실차 충돌시험 결과를 비교한 결과 THIV의 평균오차율은 9.6%, PHD의 평균오차율은 35.9%로 크게 나타났다. 본 계산절차로 예측된 결과(질량이 감소하는 경우)와 실차 충돌시험 결과를 이용한 안전지수를 비교한 결과 평균오차율은 THIV의 경우 3.7%, PHD의 경우 8.8%로 나타났다. 참고로, 충돌차량의 질량이 증가하는 경우 즉, 0.9 ton 차량의 충돌시험 데이터로부터 계산된 1.3 ton의 예측결과와 1.3 ton 차량의 충돌시험 결과의 안전지수를 비교하면 평균오차율은 THIV의 경우 4.4%, PHD의 경우 10.7%로 나타났다.

본 논문을 통해 개발된 질량 변화에 따른 확대해석방법과 MASH에서 제시한 탑승자 안전지수 예측방법에는 차이가 많다. 먼저 MASH의 예측방법은 질량이 큰 차량의 충돌시험 데이터를 이용해 질량이 작은 차량의 충돌거동 및 안전지수를 예측할 수 있으나 질량이 작은 차량의 충돌시험 데이터를 이용해 질량이 큰 차량의 충돌거동 및 탑승자 안전지수를 예측하는 것은 불가능하다. 그러나 본 연구를 통해 개발된 확대해석 방법은 질량이 증가하거나 감소하는 경우 모두를 예측할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 11가지 충격흡수시설에 대한 충돌시험 결과로부터 1.3 ton 및 0.9 ton 차량의 충돌데이터(a_x-t)를 이용하여 MASH 방법의 타당성을 검증하여 문제점을 파악하고

수치적으로 안정적인 충돌시험 데이터의 확대해석 방법을 개발하였다. MASH의 계산절차를 이용한 결과에 비하여 새로 개발된 확대해석 방법은 정확도가 월등할 뿐만 아니라 이론적인 원리가 명확하다.

MASH에 따른 안전지수 계산방법은 질량이 큰 차량의 가속도데이터를 이용해 질량이 작은 차량의 탑승자 안전지수를 예측하도록 추천하고 있으며 질량이 작은 차량의 충돌시험결과로는 질량이 큰 차량을 예측할 수 없다는 한계가 있다. 그러나 본 연구에서 개발한 안전지수 확대해석 방법은 질량의 크기와 상관없이 특정한 차량의 충돌시험 가속도데이터를 이용하여 질량변화에 따른 광범위한 충돌거동을 예측할 수 있다. 즉, 질량이 큰 차량(1.3 ton)의 충돌시험 데이터로부터 작은 차량(0.9)의 충돌 데이터를 계산할 수 있을 뿐만 아니라 작은 차량(0.9 ton)의 충돌 데이터로 부터 큰 차량(1.3 ton)의 데이터를 계산할 수 있다. 본 논문은 새로운 확대해석 방법의 효율성과 정확도를 실험데이터를 통하여 입증하고 그 원리를 규명하였다.

국내에서 수행된 충돌시험 데이터는 동일한 충격흡수시설에 대하여 서로 다른 질량으로 충돌시험 한 경우는 있으나 충돌속도가 변하는 경우에 대해서는 수행한 사례가 없기 때문에 본 연구를 통하여 개발한 확대해석 방법은 충돌차량의 질량 변화에 대한 경우에 국한하여 검증하였다. 그러나 본 연구에서 제시한 확대해석 방법은 동일한 충격흡수시설에 대하여 충돌속도가 변하는 경우에도 적용할 수 있는 방법으로, 확대해석할 수 있는 범위를 넓힐 수 있으며 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

참고문헌

- 고만기(2004) 충돌차량 탑승자 안전을 고려한 충격흡수시설 설계법. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제24권 제5호.
- 국토해양부(2009) **도로안전시설 설치 및 관리지침-통합 편**.
- 김경주(2004) **승용차의 충돌거동 및 충격흡수시설 설계에 관한 연구**. 석사학위논문, 공주대학교.
- 장대영(2003) **단자유도 시스템을 이용한 충돌해석과 베리어 설계**. 석사학위논문, 공주대학교.
- 장대영(2006) **탑승자의 안전을 고려한 충격흡수시설의 충돌거동 분석 연구**. **대한토목학회 학술대회논문집**, 대한토목학회.
- 주재웅(2009) **단자유도계 충돌모형을 이용한 충격흡수시설 설계방안 개발**. 박사학위논문, 명지대학교.
- SMART Highway 안전성 확보기술 개발, 한국건설교통기술평가원(2011).
- AASHTO (2009) **Manual for Assessing Safety Hardware**. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- CEN (2010) **Road Restraint Systems**. EN 1317-1~EN 1317-3, European Committee for Standardization.
- 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.
- Richard I. Emori (1968) **Analytical Approach to Automobile Collisions**. Dept. of Engineering, University of California, Los Angeles, SAE Paper 680016.

(접수일: 2012.2.7/심사일: 2012.4.6/심사완료일: 2012.4.29)