

Monte Carlo 방법을 이용한 충돌 판별 알고리즘의 신뢰성 평가

Evaluation of the Reliability of Crash Discrimination Algorithms by using the Monte Carlo Method

김영학*, 정현용**
Young-Hak Kim, Hyun-Yong Jeong

ABSTRACT

The Monte Carlo method was used to evaluate the reliability of crash discrimination algorithms. Through the Fast Fourier Transformation, crash pulses obtained during frontal crash tests of a mini van and a sports utility vehicle were transformed to signals in the frequency domain, and the signals were divided into basic signals and changeable signals. The changeable signals were modified through random generation, and they were combined with the basic signals. Then, the combined signals were transferred back to the time domain. In this way numerous crash pulses could be generated. For the generated pulses, crash discrimination algorithms were evaluated by examining whether they did not result in air bag deployment for the pulses requiring no air bag deployment and whether they resulted in time-to-fires faster than required time-to-fires for the pulses requiring air bag deployment. The crash discrimination algorithm in which the absolute value of the deceleration change multiplied by the velocity change or the summation of the absolute value of the deceleration change was used as a metric was proven to be highly reliable.

주요기술용어 : Crash discrimination algorithm (충돌 판별 알고리즘), Monte Carlo method (몬테 카를로 방법), Safety ECU (안전 전자 제어 장치)

1. 서론

1986년부터 2000년 3월 1일까지 미국에서 에어백의 작동으로 목숨을 건진 사람은 약 5300명이지만 목숨을 잃은 사람도 약 158명이나 된다.¹⁾ 이렇게 에어백의 작동으로 생명을 잃은 사람은 에어백이 전개될 때 에어백에 가

까이 위치한 어린이나 체형이 작은 어른이 대부분이었다. 이러한 에어백의 피해를 최소화시키며 동시에 승객을 최대한 보호하기 위하여 자동차 안전 관련 연구자들은, 승객의 위치와 무게, 사고의 정도 그리고 안전띠의 착용 여부에 따라 에어백의 출력을 조절하는

에어백, 소위 스마트 에어백의 개발에 박차를 가하고 있다.¹⁻³⁾ 2000년 5월 미국 연방 도로교통안전국(National Highway Traffic Safety

* 회원, 서강대학교 기계공학과 대학원

** 회원, 서강대학교 기계공학과

Administration)은 이러한 스마트 에어백에 대한 시험 방법과 합격 기준을 이미 공포하였다.¹⁾ 이 시험 방법과 합격 기준은 2003년 9월 1일에 시작하여 2006년 9월 1일 이후에는 미국에서 판매될 모든 승용차와 경트럭에 장착될 스마트 에어백에 적용될 계획이다.

한편, 이러한 스마트 에어백 뿐만 아니라 현재 장착되고 있는 온-오프 방식의 에어백에 대해서도 그 신뢰성을 향상시키기 위하여 더 나은 충돌 판별 알고리즘에 대한 연구가 진행되어 왔다.⁴⁾ 현재 생산되는 차량 중 에어백이 장착된 차량에는 터널(tunnel)의 앞부분과 뒷부분 사이에 안전 ECU(Electronic Control Unit)가 설치되어 있으며, 안전 ECU는 하나의 가속도 센서(대개 $\pm 50G$ 까지 측정할 수 있음), 마이크로 프로세서, 축전기 및 주변장치로 구성되어 있다. 사고 시에 가속도 센서는 감가속도를 측정하고, 마이크로 프로세서는 감가속도 신호를 처리하여 에어백의 작동이 필요한 사고인지 그리고 언제 에어백 내의 인플레이터(inflator)에 점화할 것인지를 결정한다. 이렇게 마이크로 프로세서에서 감가속도 신호를 바탕으로 에어백의 작동 여부와 점화시간(time-to-fire, TTF)을 결정하는 프로그램을 충돌 판별 알고리즘이라고 한다.

이러한 알고리즘은 다음의 두 조건을 만족하여야 한다 (이 논문에서는 다음의 두 조건을 알고리즘의 요구조건이라고 일컫는다). 첫째, 경미한 사고 시에는 절대로 에어백을 작동시키지 않아야 한다. 둘째, 에어백을 작동시켜야 하는 사고 시에는 승객을 적절히 보호하는데 요구되는 시간, 즉 요구 점화시간(required time-to-fire, RTTF)보다 일찍 에어백을 점화해야 한다. 이러한 조건을 만족하는 알고리즘을 개발하기 위해서는 육성하는 차량의

충돌 시험에서 얻어진 가속도 신호를 바탕으로 에어백이 작동되지 않아야 하는 상황(예를 들어 12.8 km/h 정면 고정 벽면 충돌(frontal barrier crash), 15 km/h 오프셋 충돌(offset crash), 러프 로드(rough road) 주행 등)에서 에어백이 작동되지 않는지 확인하여야 한다. 또한, 고속의 정면 충돌, 경사면 충돌(oblique crash), 폴 충돌(pole crash), 오프셋 충돌 그리고 언더라이드 충돌(underride crash)에 대해서는 요구 점화시간 이전에 에어백이 점화되는지 확인하여야 한다.

만약 에어백이 요구 점화시간보다 늦게 점화되면 전개 중인 에어백이, 관성에 의하여 앞으로 움직이는 승객에게 충격을 가하는 소위 백 슬랩(bag slap) 현상을 유발하게 된다. 에어백의 작동을 요구하는 대개의 사고는 약 100 msec 에 걸쳐 진행된다. 이러한 사고 중에 승객을 적절히 보호하기 위해서는 약 30 msec 이내에 에어백이 전개되어야 하므로 에어백 선단의 최고 속도는 200 내지 300 km/h 이다. 따라서 사고의 감지가 늦거나 주행 중 줄음 등의 이유로 승객이 본래의 위치보다 앞에 있는 상황에서 에어백이 전개되면 백 슬랩 현상이 발생되고 이로 인한 충격으로 승객이 상해를 입거나 사망하게 되는 것이다.

따라서, 요구조건을 만족하는 알고리즘을 개발하는 것은 극히 중요하다. 안전 ECU의 개발 초기에는 감가속도의 적분값인 속도 변화(velocity change)가 임계값(threshold)보다 크게 되면 에어백을 작동시키는 알고리즘을 사용하였다. 그러나, 대개 속도 변화만으로는 알고리즘의 요구조건을 만족시킬 수 없었다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 속도 변화 대신에 일률 변화,⁴⁾ 감가속도 변화⁵⁾ 그리고 감가속도의 제곱의 합⁶⁾ 등의 변수(metric)가 각각

의 임계값보다 크게 되면 에어백을 작동시키는 알고리즘이 개발되었다. 이러한 알고리즘에서는 변수의 값과 그 임계값을 시간의 함수로 표현하였다. 또한, 감가속도의 제곱과 그 임계값을 속도 변화의 함수로 표현하는 2차원적인 알고리즘도 개발되었다.⁹⁾ 본 연구의 대상 차량은 국내에서 생산되는 일체형(unibody) 구조의 미니 밴(mini van)과 프레임 위의 차체(body-on-frame) 구조의 스포츠 유틸리티(sports utility) 차량인데, 이러한 알고리즘의 적용성을 검토하기 위하여 본 연구 대상 차량의 충돌 신호를 분석하였다. 하지만, 이러한 알고리즘으로는 알고리즘의 요구조건을 만족시킬 수 없었다.

따라서, 본 논문에서는 알고리즘의 요구조건을 만족시키는 감가속도의 제곱과 속도 변화의 곱,¹⁰⁾ 감가속도 변화의 절대값과 속도 변화의 곱^{10,11)} 혹은 감가속도 변화의 절대값의 합¹²⁾을 변수로 사용하고 그 임계값을 속도 변화의 함수로 표현한 알고리즘을 개발하였다. 이 알고리즘의 실차 적용 가능성을 판단하기 위하여 본 연구 대상 차량의 충돌 신호를 분석하였다. 그 결과 12.8 km/h 정면 고정 벽면 충돌, 15 km/h 오프셋 충돌 그리고 러프 로드 주행에 대해서는 에어백이 작동하지 않게 되었다. 또한, 고속의 정면 충돌, 경사면 충돌, 폴 충돌, 오프셋 충돌 그리고 언더라이드 충돌에 대해서는, 감가속도의 제곱과 속도 변화의 곱을 이용한 알고리즘의 경우 단지 32 km/h 언더라이드 충돌만을 제외하고는 요구 점화시간보다 빠른 에어백 점화시간을 얻을 수 있었다. 즉, 감가속도 변화의 절대값과 속도 변화의 곱 혹은 감가속도 변화의 절대값의 합을 이용한 알고리즘은 알고리즘의 요구조건을 모두 만족시킬 수 있었다.

하지만, 실제의 차량 충돌 상황에서는 많은 가변적인 요소들이 존재하기 때문에 한정된 실차 충돌 시험에서 측정한 감가속도 신호만을 이용해서는 충돌 판별 알고리즘의 신뢰성을 올바르게 평가할 수 없다. 올바른 평가를 위해서는 더 많은 충돌 신호를 필요로 하는데, 이를 위해 Monte Carlo 방법이 제시되었다.⁸⁾ Monte Carlo 방법이란 난수 발생 과정을 통하여 하나의 충돌 신호에서 다양한 신호를 생성시킬 수 있는 방법이다. 따라서 본 논문에서는 Monte Carlo 방법을 이용하여 많은 충돌 신호를 생성한 후, 개발된 충돌 판별 알고리즘의 신뢰성을 평가하였다. 그 결과 감가속도 변화의 절대값과 속도 변화의 곱 그리고 감가속도 변화의 절대값의 합을 변수로 이용한 알고리즘의 신뢰성이 높게 평가되었다.

2. 충돌 판별 알고리즘

2.1 기존의 충돌 판별 알고리즘

대개 동일한 유형의 사고 시 충돌 속도가 클수록 차체 손상도 크고 승객도 많이 다치게 된다. 따라서 사고의 정도를 나타내는 가장 기본적인 변수는 충돌 속도라고 말할 수 있으며, 이는 감가속도 신호를 사고가 시작될 때부터 종료될 때까지 적분함으로써 얻을 수 있다. 또한, 감가속도 신호를 사고가 시작될 때부터 어느 시간까지 적분하면 충돌 속도로부터 그 시간까지의 변화량, 즉 속도 변화를 얻을 수 있는데, 이는 안전 ECU 개발 초기에 주로 사용되었던 변수이다. 하지만, 속도 변화만을 고려해서는 알고리즘의 요구조건을 만족시킬 수 없다. 왜냐하면 사고 초기에 감가속도 신호가 미약한 경사면 충돌, 폴 충돌, 오프셋 충돌, 언더라이드 충돌 시에 사고 감지가 늦어 에어백 점화시간이 요구 점화시간 보

다 늦게 될 뿐만 아니라 러프 로드 주행 시에 에어백이 작동될 수도 있기 때문이다.^{4,5,7)} 이러한 문제점을 해결하기 위하여 속도 변화 대신에 일률 변화,⁴⁾ 감가속도 변화⁵⁾ 혹은 감가속도의 제곱의 합⁷⁾이 각각의 임계값보다 크게 되면 에어백을 작동시키는 알고리즘이 개발되었다.

마이크로 프로세서의 저역필터를 통과한 감가속도 신호를 $a(t)$ 라고 하면 이들 변수는 다음과 같은 수식으로 표현될 수 있다.

$$\text{속도 변화 } v(t) = \int_0^t a(\tau) d\tau \quad (1)$$

$$\text{감가속도 변화 } j(t) = \frac{da(t)}{dt} \quad (2)$$

$$\text{혹은 } \Delta a(t) = a(t_{i+1}) - a(t_i)$$

$$\text{에너지 } e(t) = \frac{1}{2} mv(t)^2 \quad (3)$$

$$\text{일률 } p(t) = \frac{de(t)}{dt} = mv(t)a(t) \quad (4)$$

$$\text{일률 변화 } \frac{dp(t)}{dt} \approx v(t)j(t) + a(t)^2 \quad (5)$$

$$\text{감가속도 제곱의 합 } \int_0^t a(\tau)^2 d\tau \quad (6)$$

여기서, 감가속도 신호 $a(t)$ 는 충격력과 상관 있는 신호이므로 속도 변화나 감가속도 제곱의 합은 사고 초기부터 누적된 충격량과 상관 있는 변수라고 말할 수 있다. 따라서, 정면 고정 벽면 충돌과 같이 주로 프레임이 충돌 에너지를 흡수하는 사고에서는 충격력이 커서 감가속도 신호가 크게 되고, 경사면 충돌, 폴 충돌, 오프셋 충돌 혹은 언더라이드 충돌과 같이 상대적으로 프레임 이외의 부재가 충돌 에너지를 흡수하는 경우에는 누적된 충격량이

커지게 된다.^{4,5,7)} 이는 프레임의 강성이 다른 부재보다 크기 때문이다.

Figure 1에 나타낸 예에서 알 수 있듯이 필터를 통과한 감가속도 신호도 그 값의 변화가 심하므로 감가속도의 미분값인 감가속도 변화는 그 값의 변화가 더욱 크다. 이러한 이유로 감가속도 변화를 변수로 사용한 알고리즘은 노이즈에 아주 민감하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 양의 감가속도 변화만을 취하고 일정 시간에 걸쳐 평균을 계산하는 방법이 고안되었다.⁵⁾ 이렇게 노이즈에 민감하다는 문제에도 불구하고 감가속도 변화를 사용하는 이유는 감가속도 변화가 감가속도의 미분값으로서 다음 순간에 작용할 충격력 및 사고의 정도를 예측할 수 있기 때문이다.⁵⁾

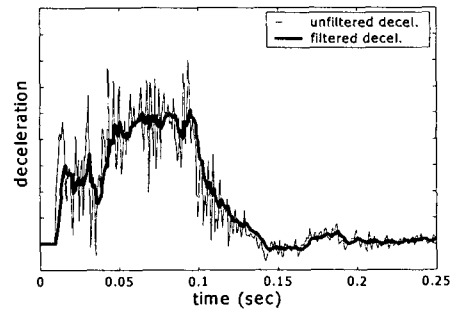


Fig. 1 Deceleration signals before and after the digital filtering

경사면 충돌, 폴 충돌 혹은 오프셋 충돌 시에는 대개 프레임이 좌굴되기 때문에 감가속도 신호에 굴곡이 발생한다. 따라서, 감가속도 제곱의 합을 이용하여 요구 점화시간 이전에 사고를 감지하는 알고리즘도 개발되었다.⁷⁾

한편, 감가속도 제곱과 그 임계값을 속도 변화로 나타낸 2차원적 알고리즘이 개발되었다.⁶⁾ 여기서 속도 변화는 감가속도 신호를 일정 시간에 걸쳐 적분한 것으로 이는 그 시

간 내에 누적된 충격량과 상관 있는 값이다. 따라서 이 알고리즘은 사고 시 매 순간에 작용하는 충격력과 일정 시간에 걸쳐 누적된 충격량을 동시에 감지할 수 있다는 장점이 있다. 그러나, 육성하는 차량에 따라 속도 변화를 계산하는 일정 시간의 크기를 조정하여야 하는 어려움이 있다.

이와 같은 알고리즘을 사용하여 본 연구 대상 차량인 미니 밴의 각 충돌 유형에 대한 에어백 점화시간을 산출하였다. 또한, 각 충돌 유형에 대한 요구 점화시간도 산출하였다. 요구 점화시간을 산출하는 방법으로는 125 mm - 30 msec 조건을 사용하였는데, 이는 승객이 전방으로 125 mm 움직이기 30 msec 이전에 에어백을 점화하여야 한다는 조건이다. 50th percentile 남자(중간 체격의 남자)와 완전히 전개된 에어백과의 간격이 대개 125 mm 이고 에어백이 점화된 후 전개될 때까지 소요되는 시간이 약 30 msec 이므로, 125 mm - 30 msec 조건은 백 슬랩 현상을 방지하기 위한 조건이라고 말할 수 있다. 승객이 125 mm 움직일 때의 시간은 충돌 시험 중에 얻어진 영상 사진을 분석하여 결정할 수 있으나 식 (1)에 주어진 속도 변화를 다시 한번 적분하여 계산하는 것이 보통이다. 따라서 본 논문에서도 속도 변화를 다시 한번 적분하여 승객의 움직이는 거리를 산출하고 이로부터 에어백의 요구 점화시간을 결정하였다.

이렇게 산출한 에어백 점화시간(TTF)의 요구 점화시간(RTTF)에 대한 백분율을 Table 1에 나타내었다. 여기서 비점화(no fire)는 에어백이 작동하지 않는 비전개 상황을 의미하며, 100% 이상은 에어백 점화시간이 요구 점화시간 보다 늦게 되어 에어백이 너무 늦게 전개

됨을 의미한다.

위에서 언급한 다섯 가지의 알고리즘 모두 32 km/h 언더라이드 충돌에 대하여 요구 점화시간 보다 빠른 점화시간을 얻을 수 없었다. 이 밖에도 속도 변화를 변수로 사용한 알고리즘으로는 56 km/h 정면 고정 벽면 충돌, 30.4 km/h와 48 km/h 폴 충돌, 그리고 48 km/h 우사면 충돌에 대하여 요구 점화시간 보다 빠른 점화시간을 얻을 수 없었다. 일률 변화 혹은 감가속도 제곱의 합을 변수로 사용한 알고리즘과 감가속도의 제곱과 속도 변화를 사용한 2 차원 알고리즘으로는 30.4 km/h와 48 km/h 폴 충돌에 대하여 요구 점화시간 보다 빠른 점화시간을 얻을 수 없었다. 또한, 감가속도 변화를 변수로 사용한 알고리즘으로는 56 km/h 정면 고정 벽면 충돌에 대하여 요구 점화시간 보다 빠른 점화시간을 얻을 수 없었다.

Table 1 The ratio of TTF to RTTF for frontal crash modes of a minivan

algorithm crash mode	velocity vs. time	power rate vs. time	Acceleration vs. time	Edcceleration ² vs. time	decceleration ² vs. velocity change
128 km/h frontal	No Fire	No Fire	No Fire	No Fire	No Fire
40 km/h rough road	No Fire	No Fire	No Fire	No Fire	No Fire
15 km/h offset	No Fire	No Fire	No Fire	No Fire	No Fire
22.4 km/h frontal	75 %	60 %	60 %	68 %	62 %
48 km/h frontal	70 %	63 %	70 %	70 %	67 %
56 km/h frontal	104 %	73 %	104 %	89 %	94 %
30.4 km/h pole	158 %	128 %	89 %	173 %	155 %
32 km/h underride	170 %	137 %	120 %	178 %	136 %
35.2 km/h left oblique	38 %	33 %	56 %	35 %	37 %
35.2 km/h right oblique	41 %	36 %	44 %	39 %	36 %
48 km/h pole	173 %	160 %	63 %	183 %	108 %
48 km/h right oblique	202 %	41 %	41 %	50 %	43 %
56 km/h offset	92 %	24 %	33 %	27 %	27 %

2.2 새로운 충돌 판별 알고리즘

위에서 언급한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 다음과 같은 세 개의 새로운 변수를 개발하였다. 첫째, 감가속도의 제곱과 속도 변화의 곱, 즉 $a(t)^2v(t)$ 를 속도 변화의 함수로 나타내는 새로운 변수를 개발하였다. 감가속도는 사고가 진행되는 때 순간에 작용하는 충격력과 상관 있는 값이고, 속도 변화는 사고 시점부터 누적된 충격량과 상관 있는 값이다. 그러므로 이 변수를 통하여 충격력과 충격량을 동시에 감지할 수 있다. 하지만, 감가속도에 제곱을 취함으로써 상대적으로 충격력을 더 많이 고려한 것이다.

둘째, 감가속도 변화의 절대값과 속도 변화의 곱, 즉 $|\Delta a(t)|v(t)$ 를 속도 변화의 함수로 나타내는 새로운 변수를 개발하였다. 감가속도 변화는 다음 순간에 작용할 충격력과 관련 있는 값으로 사고 정도를 예측할 수 있다고 알려져 있다.⁵⁾ 또한, 속도 변화는 사고 시점부터 누적된 충격량과 상관 있는 값이다. 그러므로 이 변수를 통하여 사고 정도를 예측하고 충격량을 감지할 수 있다.

셋째, 감가속도 변화의 절대값의 합, 즉 $\Sigma|\Delta a(t)|$ 를 속도 변화의 함수로 나타내는 새로운 변수를 개발하였다. 이 변수는 항상 단조 증가하므로 노이즈에 둔감하고 임계값을 설정하기가 용이하다는 장점을 갖고 있다. 또한, 이 변수는 감가속도와 같은 차원을 가지며, 감가속도 변화에 비례하므로 다음에 작용할 충격력 및 사고 정도와 관계가 있다. 따라서, 두 번째 변수와 마찬가지로 이 변수를 통해서도 사고 정도를 예측하고 충격량을 감지할 수 있다.

본 논문에서 제안한 알고리즘을 사용하여 연구 대상 차량인 일체형 구조의 미니 밴과

Table 2 The ratio of TTF to RTTF for frontal crash modes of a minivan obtained by new algorithms

algorithm crash mode	deceleration ² x velocity	\Delta deceleration x velocity	\Sigma \Delta deceleration
12.8 km/h frontal	No Fire	No Fire	No Fire
40 km/h rough road	No Fire	No Fire	No Fire
15 km/h offset	No Fire	No Fire	No Fire
22.4 km/h frontal	60 %	70 %	75 %
48 km/h frontal	47 %	67 %	67 %
56 km/h frontal	89 %	98 %	89 %
30.4 km/h pole	89 %	89 %	81 %
32 km/h underride	108 %	90 %	93 %
35.2 km/h left oblique	37 %	56 %	57 %
35.2 km/h right oblique	43 %	60 %	61 %
48 km/h pole	97 %	75 %	65 %
48 km/h right oblique	39 %	50 %	52 %
56 km/h offset	24 %	62 %	33 %

Table 3 The ratio of TTF to RTTF for frontal crash modes of a sports utility vehicle obtained by new algorithms

algorithm crash mode	deceleration ² x velocity	\Delta deceleration x velocity	\Sigma \Delta deceleration
12.8 km/h frontal	No Fire	No Fire	No Fire
40 km/h rough road	No Fire	No Fire	No Fire
15 km/h offset	No Fire	No Fire	No Fire
22.4 km/h frontal	60 %	81 %	81 %
48 km/h frontal	60 %	83 %	83 %
56 km/h frontal	89 %	97 %	97 %
30.4 km/h pole	89 %	98 %	84 %
32 km/h underride	121 %	88 %	79 %
35.2 km/h left oblique	37 %	44 %	41 %
35.2 km/h right oblique	43 %	41 %	39 %
48 km/h pole	97 %	79 %	61 %
48 km/h right oblique	39 %	56 %	45 %
56 km/h offset	24 %	40 %	40 %

프레임 위의 차체 구조의 스포츠 유틸리티 차량의 여러 충돌 유형에 대한 에어백 점화시간을 산출하였다. 그리고 요구 점화시간에 대한 백분율을 Table 2와 3에 각각 나타내었다. 세 개의 알고리즘 모두 에어백의 전개를 요하지 않는 상황에서는 비점화 조건을 만족시켰다. 또한, 감가속도 제곱과 속도 변화의 곱을 변수로 사용한 알고리즘으로만 단지 32 km/h 언더라이드 충돌에 대하여 요구 점화시간보다 늦은 점화시간을 얻게 되었으며, 감가속도 변화의 절대값과 속도 변화의 곱 혹은 감가속도 변화의 절대값의 합을 변수로 사용한 알고리즘으로는 모든 충돌 유형에 대하여 요구 점화시간보다 빠른 점화시간을 얻게 되었다. 즉, 이 두 개의 알고리즘은 알고리즘의 요구조건을 모두 만족시켰다.

3. 알고리즘의 신뢰성 평가

3.1 Monte Carlo 방법

실제의 충돌 상황에서는 많은 가변적인 요소 (예를 들어, 다양한 충돌 각도, 충돌 물체, 도로 조건, 차량의 노후 상태 등)들이 존재한다. 따라서, 한정된 실차 충돌 시험에서 측정된 감가속도 신호만을 이용하여 알고리즘의 신뢰성을 평가하는 것은 옳지 않다. 즉, 충돌 판별 알고리즘의 신뢰성을 올바르게 평가하기 위해서는 더 많은 충돌 신호가 필요하다. 물론, 실차 충돌 실험으로 더 많은 충돌 신호를 얻을 수 있으나, 이는 많은 비용과 시간을 요한다. 한편, 충돌 신호를 얻는 방법으로 실차 충돌 시험 대신에 Monte Carlo 방법이 제시되었다.⁸⁾ 이는 난수 발생과정을 통하여 한정된 충돌 신호로부터 다양한 충돌 신호를 얻을 수 있는 효율적인 방법이다.

3.2 충돌 신호의 분석

일반적으로 충돌 신호는 동일한 충돌 유형에서 항상 일정한 기본 파형(저주파 성분)과 가변 파형(고주파 성분)으로 이루어져 있다. 하지만, Fig. 2에 나타내었듯이 시간 영역에서는 기본 파형과 가변 파형을 쉽게 구분할 수 없다. 기본 파형은 충돌 시 차체의 변형 양상, 즉 충돌 에너지의 흡수 특성과 관계 있는 저주파 성분이고, 주파수 영역에서는 모든 신호가 주파수 축에 대해서 선형적인 계수의 합으로 표현되기 때문에 충돌 신호의 기본 파형과 가변 파형을 쉽게 구분할 수 있다. 따라서, FFT를 통하여 충돌 신호를 주파수 영역으로 변환하였다.

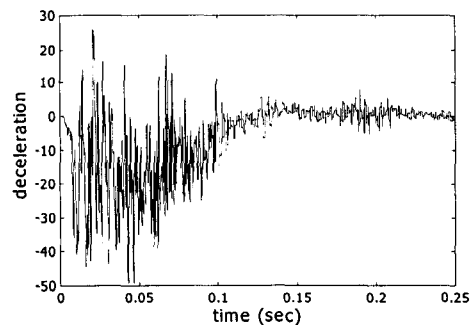


Fig. 2 Deceleration signal in the time domain

모든 신호는 Fourier 급수의 합으로 나타낼 수 있는데, 이 급수의 각 항의 계수가 주파수 영역에서의 크기와 위상을 결정하게 된다. 이러한 크기와 위상을 빠르게 계산할 수 있는 변환 방법이 FFT이다.

Figure 3(a)에는 충돌 신호의 주파수 특성의 한 예를 나타내었는데, 이는 0.1 msec 샘플링 주기로 250 msec 동안 측정된 신호를 주파수 영역으로 변환하고 신호의 크기를 dB로 표현한 것이다. 해상도는 신호의 측정 주기에 의

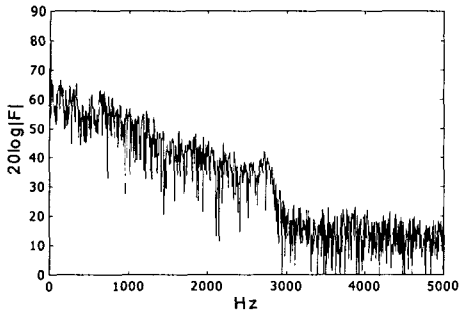


Fig. 3 (a) Crash signal in the frequency domain

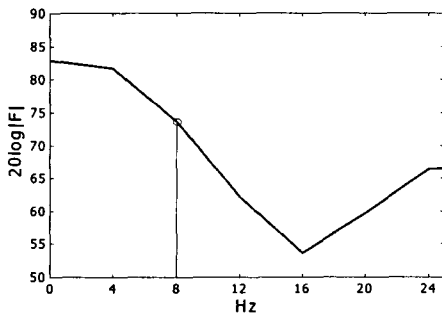


Fig. 3 (b) Bandwidth of a crash signal

해서 결정되는데 여기서 측정 주기가 250 msec 이므로 해상도가 4 Hz 임을 알 수 있다. 또한, 최대 주파수는 10000 Hz 이지만 주파수 영역에서는 신호가 대칭성을 가지므로 신호를 0 Hz ~ 5000 Hz 에서만 나타내었다. 보통 대역폭(bandwidth)은 신호에 대한 대부분의 에너지를 포함하고 있다. 이미 언급한 대로 기본 파형은 차체가 변형하며 흡수하는 충돌 에너지와 관계가 있으므로 기본 파형 성분을 구분하기 위해서 본 논문에서는 충돌 신호의 대역폭을 이용하였다.

Figure 3(b)는 Fig. 3(a)에서 보여준 충돌 신호의 대역폭을 나타낸 것이다. 대역폭은 주파수 영역에서 크기가 3 dB 이하로 떨어지는 지점이다. 본 논문에서 사용하는 충돌 신호의 해상도는 4 Hz 이지만 4 Hz 에서는 3 dB 이상

그 값이 떨어지지 않아서 9 dB 이상 떨어진 8 Hz 로 대역폭을 결정하였다.

한편, 충돌 신호의 기본 파형으로 하버싸인(haversine) 모델이 제시되었다.⁸⁹⁾ 하버싸인이란 상수 $\times(1-\cos\omega t)$ 로 표현되는 수학적 모델로 충돌 시간에 걸쳐 반주기를 갖는 신호이다. 또한, 그 신호의 적분값이 충돌 속도와 같도록 상수를 결정한다.

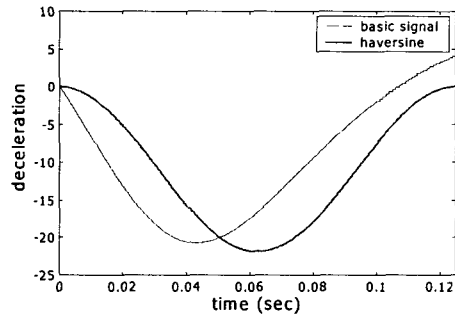


Fig. 4 Comparison of the basic signal with the haversine

Figure 4에서는 기본 파형과 하버싸인을 비교하였는데, 최대 감가속도의 값은 비슷하나 파형과 최대 감가속도가 발생하는 시각은 다르다. 본 논문에서 제시한 기본 파형은 차체의 변형 특성과 충돌 양상이 고려된 물리적인 신호이므로 단순한 수학적 모델인 하버싸인보다 기본 파형을 이용하는 것이 더 타당하다고 말할 수 있다.

3.3 충돌 신호 생성

Monte Carlo 방법을 이용하여 다양한 충돌 신호를 생성하는 순서는 다음과 같다. 첫번째, FFT 를 이용하여 실제 차량 충돌 신호를 주파수 영역으로 변환한 뒤, 기본 파형을 제외한 가변 파형의 면적을 동일하게 나눈다. 적은 숫자로 면적을 나누는 것이 충돌 시험에

서 얻은 신호와 많이 다르기 때문에 좀 더 다양한 신호에 대한 신뢰성 평가를 위하여 본 논문에서는 5 등분 하였다.

두번째, 충격량을 일정하게 유지하기 위해서 모든 가중치의 합이 항상 1이 되도록 가중치를 난수 발생시킨 후, 이 가중치를 해당되는 면적에 속해있는 성분에 곱해 새로운 가변 파형을 생성한다.

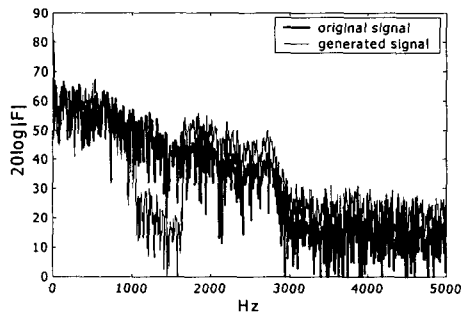


Fig. 5 (a) Comparison of the original signal with the generated signal in the frequency domain

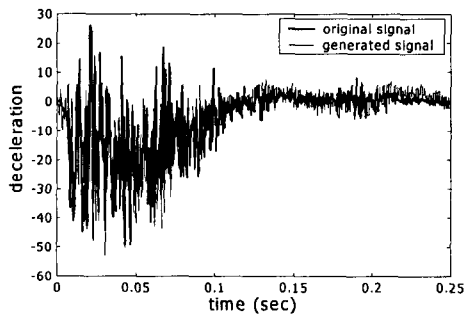


Fig. 5 (b) Comparison of the original signal with the generated signal in the time domain

마지막으로, 새로운 가변 파형과 기본 파형을 합성한 후 시간 영역으로 역 FFT를 시키면 새로운 충돌 신호를 얻을 수 있다. 이러한 방법으로 다양한 충돌 신호를 생성할 수

있다. Figure 5(a)에는 실제 충돌 신호와 생성된 신호의 일례를 주파수 영역에서 나타내었는데 원래 충돌 신호와 생성된 신호가 상이한 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 5(b)에는 그 두 신호를 시간 영역에서 나타내었는데 주파수 영역에서보다 유사해 보임을 알 수 있다.

3.4 에어백 알고리즘의 신뢰성 평가

각 충돌 유형에 대하여 Monte Carlo 방법으로 생성된 200 개의 충돌 신호를 이용하여 본 논문에서 개발한 알고리즘의 신뢰성을 평가하였다.

Table 4 와 5 는 각각 일체형 구조의 미니 밴과 프레임 위의 차체 구조의 스포츠 유틸리티 차량에 대한 알고리즘 요구조건의 만족도를 백분율로 나타낸 것이다. 12.8 km/h 정면 충돌, 40 km/h 러프 로드 그리고 15 km/h 오프셋과 같이 에어백이 전개되지 않아야 하는 상황에서 100 %는 에어백이 전혀 작동하지 않는 것을 의미하며, 나머지 충돌 유형에서 100 %는 요구 점화시간 이내에 에어백이 점화되는 것을 의미한다. 32 km/h 언더라이드 충돌에 대하여 요구 점화시간을 만족시키지 못한, 감가속도 제곱과 속도 변화의 곱을 이용한 알고리즘은 32 km/h 언더라이드 충돌에 대하여 요구 점화시간보다 점화시간이 빠를 확률이 41 %로 신뢰성이 좋지 않았다. 주목할 점은 이 알고리즘을 이용하였을 경우 35.2 km/h 좌사면 및 우사면 충돌에 대하여 점화시간의 요구 점화시간에 대한 백분율이 37 %와 43 %로 요구조건을 충족시켰음에도 불구하고, 요구 점화시간보다 점화시간이 빠를 확률은 44.5 %와 32 %로 신뢰성이 좋지 않다는 것이다. 결과적으로 한정된 충돌 신호만을 이용해서 충돌 판별 알고리즘의 신뢰성을 평가하는 데는

한계가 있음을 알 수 있다.

Table 4 The percentage of satisfying the requirements for a minivan

algorithm crash mode	deceleration ² x velocity	\Delta deceleration x velocity	\Sigma \Delta deceleration
12.8 km/h frontal	94.5%	91%	96.5%
40 km/h rough road	100%	100%	100%
15 km/h offset	100%	98.5%	74.5%
22.4 km/h frontal	93%	100%	86%
48 km/h frontal	100%	100%	100%
56 km/h frontal	100%	100%	99.5%
30.4 km/h pole	75%	100%	100%
32 km/h underride	41%	85.5%	96%
35.2 km/h left oblique	44.5%	99%	100%
35.2 km/h right oblique	32%	100%	100%
48 km/h pole	100%	98.5%	96.5%
48 km/h right oblique	99%	100%	100%
56 km/h offset	100%	100%	100%
Average	83%	97.9%	96.1%

Table 5 The percentage of satisfying the requirements for a sports utility vehicle

algorithm crash mode	deceleration ² x velocity	\Delta deceleration x velocity	\Sigma \Delta deceleration
12.8 km/h frontal	99.5%	90%	99.5%
40 km/h rough road	100%	100%	100%
15 km/h offset	99.5%	99.5%	92%
22.4 km/h frontal	94.5%	98.5%	90.5%
48 km/h frontal	100%	100%	99.5%
56 km/h frontal	100%	100%	100%
30.4 km/h pole	85.5%	100%	100%
32 km/h underride	57.5%	100%	97.5%
35.2 km/h left oblique	72.5%	100%	100%
35.2 km/h right oblique	66%	100%	100%
48 km/h pole	100%	99.5%	99.5%
48 km/h right oblique	99.5%	100%	100%
56 km/h offset	100%	100%	100%
Average	90.3%	99%	98.3%

한편, 감가속도 변화의 절대값과 속도 변화의 곱 혹은 감가속도 변화의 절대값의 합을 이용한 알고리즘은 실제 충돌 신호를 이용한 평가에서도 모든 충돌 유형에 대해서 요구 점화 시간을 만족하였으며, 신뢰성 평가에서도 평균 96% 이상의 높은 신뢰도를 나타내었다. 즉, 이 두 개의 알고리즘은 구조가 전혀 다른 일체형 구조의 미니 밴과 프레임 위의 차체 구조의 스포츠 유틸리티 차량에 대하여 신뢰성이 높은 것을 알 수 있다. 따라서, 이 두 개의 알고리즘은 본 연구 대상 차량 이외의 차량에 대하여도 알고리즘의 요구조건을 만족시킬 것으로 예상된다.

4. 결론

본 논문에서는 감가속도의 제곱과 속도 변화의 곱, 감가속도 변화의 절대값과 속도 변화의 곱 혹은 감가속도 변화의 절대값의 합을 속도 변수의 함수로 표현하는 새로운 충돌 판별 알고리즘을 개발하였다. 본 연구 대상 차량인 일체형 구조의 미니 밴과 프레임 위의 차체 구조의 스포츠 유틸리티 차량의 모든 충돌 시험에 대하여, 감가속도의 제곱과 속도 변화의 곱을 변수로 이용한 알고리즘의 경우 32 km/h 언더라이드 충돌만을 제외하고는 모든 충돌 유형에 대하여 요구조건을 만족시켰다.

하지만, 실제 차량 충돌 상황에서는 많은 가변적인 요소들이 존재하기 때문에 실차 충돌 시험에서 측정된 감가속도 신호만을 이용해서는 충돌 판별 알고리즘의 신뢰성을 올바르게 평가할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 Monte Carlo 방법을 이용하여 많은 충돌 신호를 생성한 후 새로 개발한 충돌 판별 알고리즘들의 신뢰성을 평가하였다. 감가속도 변화

의 절대값과 속도 변화의 곱 혹은 감가속도 변화의 절대값의 합을 변수로 이용한 알고리즘은 구조가 전혀 다른 두 개의 차량에 대하여 그 신뢰성이 높음을 알 수 있었다. 따라서, 이 두 개의 충돌 판별 알고리즘은 본 연구 대상 차량 이외의 차량에 대해서도 에어백 알고리즘의 요구조건을 만족시킬 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- 1) NHTSA Docket No. NHTSA 00-7013; Notice 1.
- 2) NHTSA Docket No. NHTSA 99-4405; Notice 1.
- 3) JPL Final Report, "Advanced Air Bag Technology Assessment," April 1998.
- 4) J. L. Allen, "Power-Rate Crash Sensing Method for Safety Device Actuation," SAE 920478, 1992.
- 5) T. Gioutsos, "A Predictive Based Algorithm for Actuation of an Airbag," SAE 920479, 1992.
- 6) J. Kanamoto, M. Miyamori, K. Jinno and M. Hirao, "Electronic Crash Sensing Unit for Airbag," SAE 940624, 1994.
- 7) 박서욱, 전만철, "전자식 에어백 제어 장치의 충돌 판별 알고리즘," 한국자동차학회 논문집 98134, 1998.
- 8) M. A. Piskie and T. Gloutsos, "Automobile Crash Modeling and the Monte Carlo Method," SAE 920480, 1992.
- 9) T. Gioutsos and E. Gillis, "Tradeoffs and Testing for Frontal Crash Sensing Systems," SAE 932911, 1993.
- 10) H.-Y. Jeong and Y.-H. Kim, "New Crash Discrimination Algorithms and Locations of Accelerometers," FISITA, Seoul, Korea, June 12-15, 2000.
- 11) 정현용, 김영학, "새로운 충돌판별 알고리즘과 가속도 센서의 위치," 한국자동차학회 논문집 8 권 6 호, pp.182-193, 2000.
- 12) H.-Y. Jeong and Y.-H. Kim, "New Algorithm and Accelerometer Locations for Frontal Crash Discrimination," submitted to Journal of Automobile Engineering, Aug. 2000.