

차량 속도-시간 이력을 이용하는 충격흡수시설 설계

Design of Crash Cushion using Vehicle Velocity-time History

김동성^{*} · 박찬하^{**} · 김기동^{***} · 고만기^{****}

Kim, Dong Seong · Park, Chan Ha · Kim, Kee Dong · Ko, Man Gi

1. 서 론

충격흡수시설은 운전자의 과실, 돌발상황 등에 의하여 주행차로를 벗어난 차량이 도로상의 고정된 구조물과의 직접적인 충돌을 방지하기 위하여 주로 터널 및 지하차도 입구, 교각, 분기점 및 요금소 전면 등에 설치되는 보호시설이다. 국내/외 관련기준(국토해양부, 2009; Ross et al., 1993; CEN, 1998)에는 일반적으로 많이 적용되는 주행복귀형, 비관성형 충격흡수시설에 대한 구체적인 설계 방법이 제시되어 있지 않다. 따라서 주행복귀형, 비관성형 충격흡수시설의 개발은 설계자의 경험에 의해서 차량충돌에너지 소산 메커니즘을 결정하고 충분한 검증과정 없이 다양한 충돌시험 조건에 대한 성능기준을 만족할 때 까지 여러 차례 실험차량 충돌시험을 실시하는 비합리적인 방법으로 이루어져 왔다. 본 연구의 목적은 기존의 정형화되어 있지 않은 충격흡수시설의 개발 과정을 개선할 수 있도록 차량 속도-시간 이력을 사용하는 설계 방법을 제시하여 다양한 충돌시험 조건에 대한 성능기준을 만족하는 충격흡수시설의 개발이 가능하도록 하는 데 있다.

2. 차량 속도-시간 이력을 이용하는 설계 개념

충격흡수시설은 다양한 충돌조건에 대하여 탑승자 안전성과 구조적 적합성을 만족시켜야 한다. 도로안전시설 설치 및 관리지침(국토해양부, 2009)에서는 6가지 충돌조건을 적용한 실험충돌 시험 방법을 제시하고 있다. 6가지 충돌조건 중에서 차량질량 900kg, 1/4 offset 정면 충돌조건이 탑승자 안전도 측면에서 가장 불리한 조건이고 차량질량 1,300kg, 정면 충돌조건이 구조적 적합성 측면에서 가장 불리한 조건이다. 900kg-1/4 offset 정면 충돌조건은 900kg-정면 충돌조건에 비하여 THIV(Theoretical Head Impact Velocity)가 다소 크게 나오는 경향이 있지만 전체적으로 유사한 거동을 보인다. 본 연구에서는 탑승자 안전도 만족을 위한 한계 THIV와 PHD(Post Head Deceleration)를 유발하는 차량 속도-시간 이력을 구하기 위하여 900kg-정면 충돌조건을 탑승자 안전도 측면에서 가장 불리한 조건으로 간주하고 적절한 안전율을 적용하였다. 구조적 적절성 검토를 위한 충격흡수시설의 소요 변형거리를 구하기 위하여 1,300kg-정면 충돌조건을 적용하였다. 그림 1에 충돌속도 80km/h(22.2m/s)에 대한 시뮬레이션 결과 차량 속도-시간 이력이 나타나 있다. 충돌후 차량 속도-시간 이력은 약간의 파동형태로 감소한다. 충격흡수시설을 구성하는 부재의 배치와 충격흡수 Device를 적절하게 결정하면 차량 속도-시간 이력을 직선으로 가정하여도 실제 거동과 큰 차이가 나타나지 않으며 수치적으로 충돌거동을 파악하기 용이하여 설계 방법을 제시할 수 있다.

지침에서 제시하는 탑승자 안전지수의 한계값은 $THIV \leq 12m/s$, $PHD \leq 20g$ 이다. 그림 1에 충돌속도(V_0)가 22.2m/s인 경우 1직선 형태로 단순화된 충돌차량의 속도-시간 이력이 나타나 있다. 1직선 형태로 단순화된 속도-시간 이력을 이용하여 탑승자 안전지수(THIV, PHD 등), 충격흡수시설의 변형소요거리(D_{total}), 충돌거동 지속시간(t_{total}), 그리고 감가속도(a)를 산정 할 수 있다. 탑승자 머리와 차량 내부 충돌면까지의 종방향 초기 이격거리 $D_x = 0.6m$ (국토해양부, 2009)이므로 THIV 발생시간(t_1)은 탑승자 머리와 차량 내부 충돌면

* 정회원 · 공주대학교 건설환경공학과 박사과정 · 공학석사 · 041-551-8629(E-mail: dskim93@kongju.ac.kr)

** 정회원 · 공주대학교 건설환경공학과 석사과정 · 공학사 · 041-551-8629(E-mail: chan-ha@kongju.ac.kr)

*** 정회원 · 공주대학교 건설환경공학과 교수 · 공학박사 · 041-521-9306(E-mail: kkkim@kongju.ac.kr)

**** 정회원 · 공주대학교 건설환경공학과 교수 · 공학박사 · 041-521-9307(E-mail: mgko@kongju.ac.kr)

까지의 상대거리가 0.6m가 될 때(t_1) 충돌속도(V_0)와 차량의 속도(V_1)와의 차로 산정할 수 있다. THIV 발생 시간 t_1 과 THIV값이 산정되었으므로 차량의 감가속도 $a = \Delta V / t_1$ 로 결정된다. 차량의 감가속도를 이용하여 차량이 최종적으로 멈추는 충돌지속시간 $t_{total} = V_0 / a$ 로 산정된다. 충격흡수시설의 소용 변형거리는 그림 1에 나타나 있는 것 같이 차량의 이동거리에서 차량의 변형거리를 빼주면 된다. 900kg-정면 충돌조건에 대하여 설계한 충격흡수시설에 대하여 1300kg-정면 충돌조건을 적용하면 그림 2에 나타나 있는 것과 같이 차량의 감가속도가 a 에서 a' 로 감소하여 충격흡수시설의 소요 길이가 증가하게 되므로 1300kg-정면 충돌조건을 적용하여 충격흡수시설의 최종 소요길이를 결정할 수 있다.

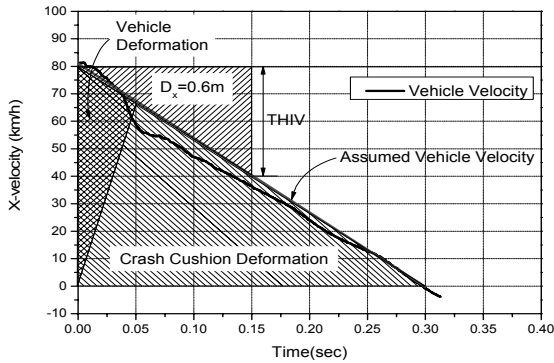


그림 1. 차량 속도-시간 이력 가정

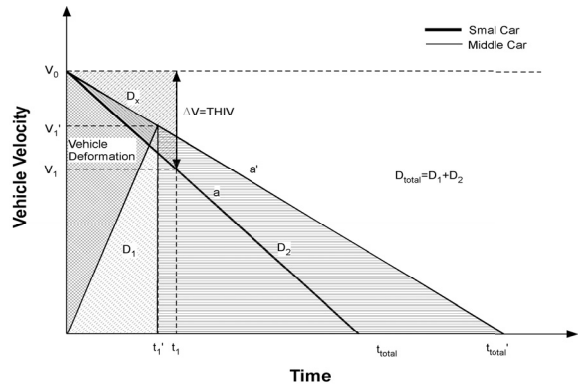


그림 2. 소형차와 중형차 충돌을 고려한 감속도-시간 이력

3. 차량 속도-시간 이력을 이용하는 설계 절차

충격흡수시설의 최종적인 성능평가는 실물차량 충돌시험을 통해서 이루어진다. 실물차량 충돌시험은 소형차와 중형차에 대한 충돌조건으로 분류된다. 소형차(900kg) 정면 충돌조건에 대한 차량 속도-시간 이력을 이용하여 탑승자 안전지수(THIV, PHD)를 만족하도록 충격흡수시설을 설계하고 중형차(1,300kg) 정면 충돌조건에 대한 차량 속도-시간 이력을 이용하여 충격흡수시설의 소요길이를 결정한다. 본 연구에서는 충돌속도 22.2m/s에 대한 주행복귀형 모듈타입 충격흡수시설의 설계 절차를 다음과 같이 제시한다.

3.1 소형차 정면 충돌조건

그림 2에 소형차 정면 충돌조건에 대한 차량 속도-시간 이력이 나타나 있다. 소형차 정면 충돌조건에 대하여 첫 번째 모듈에 의한 초기 감속량(ΔV)과 차량 속도(V_1)를 식-1과 같이 산정하고 THIV 발생시간(t_1)과 감가속도(a)를 식-2와 같이 산정한다.

$$\Delta V = V_0 - V_1 = \alpha V_L, \quad \text{여기서, } V_0 = \text{차량 초기속도} \quad \text{식-1}$$

$$V_1 = V_0 - \alpha V_L \quad V_L = \text{THIV 한계값 (12m/sec)}$$

$$\alpha = \text{안전율} (\alpha \leq 1)$$

$$t_1 = \frac{2D_x}{V_0 - V_1}, \quad \text{여기서 } D_x = 0.6\text{m}, \quad a = \frac{V_1 - V_0}{t_1} \leq a_{\text{allow}} = 12.2\text{g} \quad \text{식-2}$$

THIV 발생시 까지 충돌에너지 소산은 첫 번째 모듈의 질량과 충격흡수 Device의 에너지 소산량에 의하여 결정된다. 첫 번째 모듈의 질량에 의해 감속된 차량속도(V_{M1})는 식-3과 같이 산정된다.

$$V_{M1} = \frac{M_v}{M_v + M_1} V_0, \quad \text{여기서, } M_v = \text{소형차량 질량(충격흡수 Device포함)} \quad \text{식-3}$$

$$M_1 = \text{첫번째 모듈 질량}$$

V_{M1} 에서 충격흡수 Device에 의해 추가로 감속된 차량속도($V_{D1} = V_1$)는 충격흡수 Device의 에너지 소산량(E_{D1})에 따라서 결정된다. E_{D1} 은 정/동적 실험, 실험식 또는 컴퓨터 시뮬레이션에 의해서 그림 3과 같이 산정

할 수 있다. 첫 번째 모듈의 충격흡수 Device의 항복강도(P_{y1})는 식-4를 만족하도록 하고 E_{D1} 은 식-5에 의하여 산정한다.

$$P_{y1} \leq (M_v + M_1) \cdot a_{allow} \quad \text{식-4,}$$

$$E_{D1} \leq \frac{1}{2}(M_v + M_1)(V_{M1}^2 - V_{D1}^2) \quad \text{식-5}$$

$\alpha = 0.8$ 을 적용하면 식-1에 의해서 $V_1 = 12.6\text{m/s}$ 로 산정되고 식-2에 의해서 $t_1 = 0.125\text{sec}$, $a = 7.8g$ 로 산정된다. 일반 강재 Frame을 적용하는 경우 모듈당 질량은 $100\text{kg} \sim 200\text{kg}$ 정도이다. 모듈당 질량이 150kg 이고 충격흡수 Device 질량이 100kg 인 경우 식-3에 의해서 $V_{M1} = 17.4\text{m/s}$ 로 산정되고 이때 발생하는 감가속도(a_a)는 충돌차량 특성에 따라 다르게 나타나지만 일반적으로 $13.0g$ 정도로 볼 수 있다. $a_a \leq a_{allow}$ 로 만들기 위해서 첫 번째 모듈 전면에 항복강도(P_y)가 $1.2 \cdot M_v \cdot a_a \leq P_y \leq M_v \cdot a_a$ 이고 $\Delta \geq 0.3\text{m}$ 를 갖는 충격흡수 Device를 설치한다. 식-4에 의해서 $P_{y1} \leq 126\text{kN}$ 으로 산정 되고 식-5에 의해서 $E_{D1} \leq 75.6\text{kJ}$ 로 산정된다.

THIV 발생시 차량이 Rigid Body Motion으로 충돌하는 경우 차량의 이동거리(D_v)는 식-6과 같이 구할 수 있고 충격흡수시설의 변형거리(D_1)은 D_v 와 같다. 차량의 변형과 첫 번째 모듈 전면에 설치된 충격흡수 Device의 변형길이(Δ)를 고려하는 경우 D_1 는 D_v 에서 차량의 변형과 Δ 를 빼주면 된다. 충돌조건 $900\text{kg} - 22.2\text{m/s}$ 인 차량이 150kg 질량체에 충돌하는 경우 차량 변형은 0.3m 정도 나타나고 $\Delta = 0.4\text{m}$ 를 적용하면 D_1 은 0.9m 로 계산된다.

$$D_v = \frac{V_0^2 - (V_0 - V_L)^2}{2 \cdot a_{allow}} \quad \text{식-6}$$

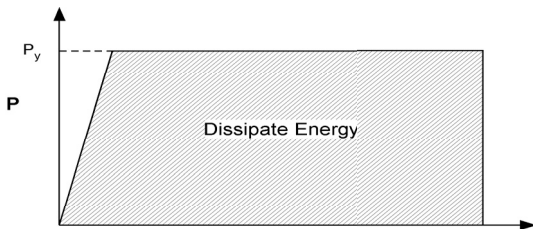


그림 3. 충격흡수 Device의 에너지 소산성능

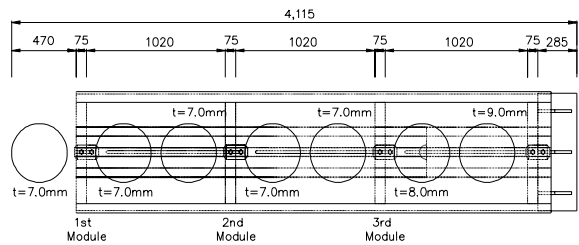


그림 4. $V_0 = 80\text{km/h}$, 충격흡수시설 설계 예

3.2 중형차 정면 충돌 조건

THIV 발생이후 남은 에너지 소산 길이(D_2)는 중형차 충돌조건에 의해 결정된다. D_2 는 중형차(M'_v)가 소형차 충돌조건으로부터 결정된 M_1 과 E_{D1} 에 충돌 후 감속된 차량 속도 V'_{M1} 와 $V'_{D1} (= V'_1)$ 를 이용하여 산정할 수 있다. 중형차 충돌차량 질량(M'_v)적용 첫 번째 모듈의 질량(M_1)에 의한 감속도(V'_{M1})는 식-7과 같이 구할 수 있다.

$$M'_v \cdot V_0 = (M'_v + M_1) \cdot V'_{M1}, \quad \text{여기서, } M'_v = \text{중형차량 질량} \quad \text{식-7}$$

$$V'_{M1} = \frac{M'_v \cdot V_0}{(M'_v + M_1)} \quad M_1 = \text{첫번째 모듈 질량}$$

첫 번째 모듈의 에너지소산 Device에 의해 추가로 감소된 차량 속도($V'_{D1} = V'_1$)는 식-8로 산정된다.

$$\frac{1}{2}(M'_v + M_1)V_{M1}'^2 - E_{D1} = \frac{1}{2}(M'_v + M_1)V_{D1}'^2 \quad \text{식-8}$$

중형차의 감가속도(a')는 소형차의 감가속도(a)보다 최대 20%정도 작게 나타나 식-9와 같이 구할 수 있다.

$$a' \leq a_{allow}/\beta, \quad \beta > 1.2 \quad \text{식-9}$$

V'_1 이후 남은 에너지 소산 길이(D_2)는 a' 에 의해서 식-10과 같이 산정된다.



$$\frac{V_1'^2}{2D_2} = a', \quad D_2 = \frac{V_1'^2}{2a'} \quad \text{식-10}$$

충격흡수시설의 모듈당 변형길이(L_M)는 측면 충돌에 대한 구조적 적합성을 만족하고 정면충돌시 적절한 변형이 발생하게 하기 위해서 0.8m~2.0m 정도로 결정될 수 있다. D_2 가 L_M 보다 큰 경우 모듈 수를 증가 시켜 준다. 추가 되는 모듈 수(n)는 식-11과 같이 결정 된다.

$$n \geq \frac{D_2}{L_M}, \quad \text{여기서, } n \text{은 정수} \quad \text{식-11}$$

n 번 째 모듈의 충격흡수 Device의 항복강도(P_{ym})는 $n-1$ 번째 모듈의 항복강도보다 크게 설정하여 순차적인 변형을 유도한다. n 번 째 모듈의 충격흡수 Device의 에너지 소산량과 감속량은 첫 번째 모듈에서 구한 방법을 반복 적용한다. 충격흡수시설 전체 소요 변형거리 $D_{total} = D_1 + D_2$ 로 나타난다. 중형차 질량 1,300kg을 적용한 경우 식-7에 의해서 $V_{M1}' = 18.6\text{m/s}$ 로 산정되고 $E_{D1} = 68\text{kJ}$ 을 적용하면 식-8에 의해서 $V_{D1}' = 16.1\text{m/s}$ 로 산정된다. a' 는 식-9에 의해서 10.2g로 산정되고 D_2 는 식-10에 의해서 1.3m로 산정된다. 모듈당 변형길이(L_M) 0.9m를 적용하는 경우 식-11에 의해서 추가 모듈 수는 2개로 산정된다.

4. 차량 속도-시간 이력을 이용하는 설계 예

충돌속도 22.2m/s(80km/h)에 대하여 차량 속도-시간 이력을 적용하여 설계된 충격흡수시설의 예가 그림 4에 나타나 있다. 설계된 충격흡수시설은 강제 Frame을 적용한 3개의 Module로 구성되어 있으며 충격흡수 Device로는 항복 후 일정한 에너지 소산 능력을 갖고 있는 Steel Tube를 적용하였다. Steel Tube의 에너지 소산 성능은 Redwood(1964)가 제시한 수학적 모델을 적용하여 $P_y = 105\text{kN}$, $\Delta = 0.8\text{m}$ (= Tube 지름×2개)로 결정하였다. 설계 예에 대하여 지침에서 제시하는 6가지 충돌조건을 적용한 Full Scale 컴퓨터 시뮬레이션 결과가 표 1에 나타나 있다. 시뮬레이션 결과 모든 충돌조건에 대하여 만족하는 결과를 보였다.

표 1. 시뮬레이션 결과 충돌조건별 안전지수

실험 종류	THIV		PHD		비 고	
	통과기준	해석값	통과기준	해석값		
900kg	정면충돌실험	12m/s	9.9m/s	20g	9.4g	모두 만족
	정면 1/4 offset충돌실험	12m/s	10.5m/s	20g	8.9g	모두 만족
1,300kg	정면충돌실험	12m/s	8.9m/s	20g	13.5g	모두 만족
	정면15° 충돌실험	12m/s	9.6m/s	20g	13.0g	모두 만족
	측면 15° 충돌 실험	9m/s	8.3m/s	20g	16.5g	모두 만족
	측면 165° 충돌 실험	9m/s	8.9m/s	20g	13.5g	모두 만족

5. 결 론

충격흡수시설의 설계의 어려움을 해소하기 위해서 차량 속도-시간 이력을 적용한 설계 방법을 제시하고 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 검증하였다. 차량 속도-시간 이력을 이용한 설계 방법은 다양한 충돌속도, 충돌차량 질량에 대하여 적용이 가능하여 다양한 충격흡수 Device를 적용한 충격흡수시설 개발에 적용될 수 있을 것이다.

참고 문헌

1. 국토해양부 (2009). “도로안전시설 설치 및 관리지침-차량방호울타리 편”
3. European Committee for Standardization(CEN) (1998). “Road restraint systems (EN-1317)”
5. H. E. Ross, et. al.(1993). “NCHRP Report 350”, TRB.
6. Redwood(1964). “Discussion on Crushing of a Tube Between Rigid Plates”, Journal of Applied Mechanics, ASME, 31, 357-358.