

# 물을 이용한 충격완화시설 개발연구

## Development of Hydro-type Crash Cushion using Pam-Crash

이 성 관

(한국도로공사 도로연구소 연구원)

신 경 환

((주)다물기획 전무이사)

이 기 영

(한국도로공사 도로연구소 연구원)

최 형 연

(홍익대학교 기계공학과 부교수)

### 목 차

#### I. 서론

1. 교통사고 및 교통안전 관련 현황
2. 기존 충격흡수시설에 대한 고찰

#### II. 물통의 충격흡수효과 검증 실험

1. 대차(代車) 충돌실험
2. 유한요소법을 이용한 충돌거동 해석

#### III. 충격흡수시설 설계해석

1. 틀부스용 충격완화시설
2. I/C분기부용 충격완화시설

#### IV. 결론

## I. 서론

바야흐로 우리는 자동차 천만 대 시대에 살게 되었다. IMF라는 큰 경제위기를 거치면서 증가율이 둔화되기는 했지만 여전히 국내 차량 보유대수는 증가추세에 있고, 경제 물동량의 확대에 발맞추어 국가 기간도로망인 고속도로의 건설 역시 꾸준히 진행되고 있다. 한국도로공사는 '99년 현재 1,996.3km에 이르는 고속도로 총 연장을 2004년까지 3,700km로 확장한다는 계획을 가지고 있다. 이 같은 자동차와 도로연장의 증가와 더불어 교통의 역기능인 교통사고의 증가도 필수적인 현상으로 나타나고 있다.

본 논문에서는 지난 '94년 개발된 "충격흡수시설"의 개선을 위해 '99년 연구과제로 수행 중인 "충격흡수시설 개선 연구" 중 하나의 대안으로 제시된 고밀도 폴리에틸렌 물통을 이용한 충격흡수시설<sup>1)</sup>에 대한 컴퓨터 모의 충돌실험 시뮬레이션 결과를 중점적으로 설명하고자 한다.

## 1. 교통사고 및 교통안전 관련 현황

실제로 한국도로공사에서는 지난 '92년 이후 교통안전과 관련된 19건의 각종 연구를 수행하였으며, 특히 충격흡수시설, 충격완화 가드레일, 충격완화형 중앙분리대, 교량난간 등 교통안전 시설물 개발을 위한 실물차량 충돌실험을 실시해 각계의 호응을 얻고 있다. 또한 <표 1>의 사업비 증가에서 보듯이 매년 교통안전을 위한 각종 사업을 지속하고 있는 실정이다.

이러한 지속적인 연구와 적극적인 투자에 힘입어 최근 3년('96~'98)동안 고속도로 교통사고 건수[1]는 <표 1>에서 보듯이 감소추세를 보이고 있고, 고속도로 교통사고로 인한 인명피해 역시 지속적으로 감소하고 있다. 전체 교통량을 고려한 10만대당 사고발생 건수 역시 <표 1>에서 보듯이 지속적으로 감소하고 있어, 앞에서 말한 교통사고 발생건수의 감소와 더불어 고속도로의 교통안전 환경이 호전되고 있음을 대변하고 있다.

1) 본 연구는 한국도로공사와 (주)다물기획과의 협동연구로 수행되고 있다.

<표 1> 교통사고 발생건수 변화추이(백만원)

연도	구분 교통안전 사업비	사고수(건)		사상자수 (명)
		총계	10만대당	
'96	13,893	6,995	0.83	5,887
'97	64,442	6,019	0.65	5,067
'98	87,230.6	4,363	0.53	4,150

고속도로 교통사고로 인한 인명피해에 관한 통계를 살펴보면 교통사고로 인한 사망자는 '96년 976명에서 '98년 591명으로 39%, 부상자는 '96년 4,911명에서 '98년 3,559명으로 28%, 총 인명피해는 '96년 5,887명에서 '98년 4,150명으로 30% 감소한 것을 알 수 있다. 교통사고 발생시 사망사고 1건당 약 3억 4,600만원, 부상사고 1건당 약 3천 21만원에 이르는 피해비용이 발생하는 것으로 가정할 때, '98년에는 '96년에 비해 총 1,739억원 가량의 경제적 손실을 막을 수 있었음을 알 수 있다.

<표 2>는 '99년 현재 우리공사에서 설치, 관리하고 있는 충격흡수시설의 현황이다.

<표 2> 충격흡수시설 현황

구분	내역(km)	비고
교차로출구부용	97	'99.9. 현재
영업소톨부스용	212	
중분대단부용	13	

최근 3년간 우리공사가 충격흡수시설에 투자한 비용과 '99년 사업예산은 <표 3>과 같다.

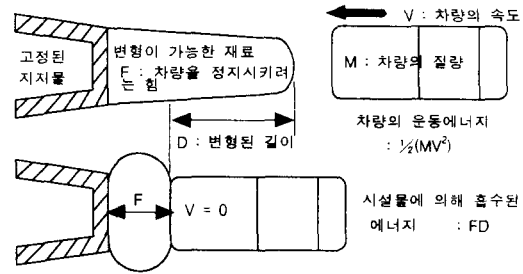
<표 3> 충격흡수시설 관련 사업비 현황(백만원)

세부사업	연도			
	'96	'97	'98	'99
충격완화시설	542	805	-	50

## 2. 기존 충격흡수시설에 대한 고찰

기존의 충격흡수시설은 톨부스용, I/C분기부용, 중앙분리대 단부용 등 세 가지 제품이 있으며, 지난 '94년 한국도로공사가 자체 개발한 제품들이다.

이들 충격흡수시설 개발에 이용된 기본 원리는 “운동에너지 보존법칙”이다. <그림 1>에서 차량이 충돌하기 전에 전체 시스템이 가지는 총 운동에너지는  $\frac{MV^2}{2}$ 이며, 충돌로 인해 충격흡수시설이 흡수한 총 에너지가  $FD$ 라고 하면 결국  $FD = \frac{MV^2}{2}$  이 된다.



<그림 1> 충격흡수 시설의 기본 원리

기존 충격흡수시설은 철제 케이스에 폴리우레탄으로 된 충격흡수재를 사용하는 방식이다. 충격흡수재인 폴리우레탄 폼의 충격흡수력과 충돌 차량의 유도 성능이 우수하며, 국내 최초로 자체 개발한 충격흡수시설이란 점에서 그 의의가 크지만, 제조원가가 최고 800만원('98년 기준)선에 달할 정도로 고가이며, 이로 인해 사고 발생시 원인자 부담의 원칙하에 사고 유발자가 부담하는 비용이 커 민원의 소지가 많으며, 구조가 복잡해 설치 및 수리에 많은 시간과 숙련된 기술이 필요하는 등 유지·보수와 관련하여 시설물의 관리가 쉽지 않다는 지적이 있었다.



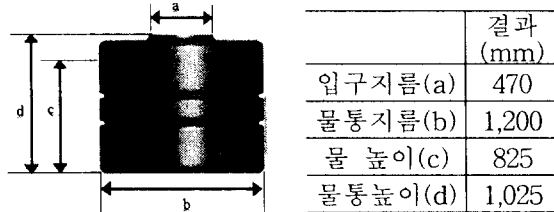
<그림 2> 기존의 충격흡수시설

## II. 물통의 충격흡수효과 검증 실험

물을 이용한 충격흡수시설의 설계해석을 위해 단순한 구조의 물통에 대한 대차실험과 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 시뮬레이션과 실제 실험과의 일치정도를 살펴보기로 했다.

## 1. 대차(代車) 충돌실험

<그림 3>과 같은 물통을 이용한 충돌 실험을 수행하였다. 대차를 이용한 충돌 실험에서는 충돌시 물통의 변형과 물의 거동을 고속 촬영하였으며 대차의 무게 중심에서 감속도 파형을 측정하였다.



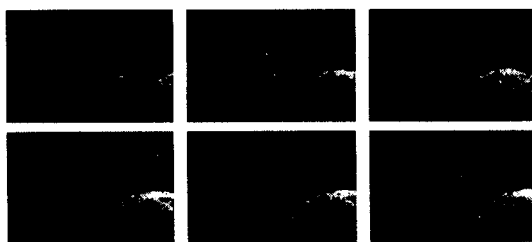
<그림 3> 실험용 물통

대차의 중량과 충돌 속도는 각각 1,067kg, 30 km/h였다. 물통의 재질은 고밀도 폴리에틸렌(HDPE)이었으며 기계적 물성치는 <표 4>와 같다.

<표 4> 물통의 기계적 특성 (HDPE)

밀도, $\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ )	958
탄성계수, E (GPa)	2.2
포아송비	0.3
항복응력, $\sigma_0$ (MPa)	29.9
신장률 (%)	800

<그림 4>는 충돌시 물통의 변형모습과 물의 거동을 함께 보여 주고 있다. 물통의 충돌 방향 최대 변형량은 충돌후 180ms. 정도에서 약 650mm(55%)였으며 통속의 물은 충돌후 80ms. 정도부터 분출되기 시작했다. 초기에는 후상방으로 향하던 물의 분출 방향은 충돌이 진행되며 전방으로 방향을 바꾸어 솟구쳤다. 물의 최고 분출 속도는 고속촬영필름 분석 결과 약 12m/s 정도였다. 또한 대차에서 측정된 최대 감속도의 크기는 약 8G 였다.



<그림 4> 대차충돌시의 물통변형과 물분출

## 2. 유한요소법을 이용한 충돌거동 해석

본 논문에서 제안하고 있는 물통을 이용한 충격흡수시설을 해석하기 위해서는 고체와 액체를 연계하여 모델링하는 기법이 필요하다. 이러한 문제에 적합한 수치해법으로는 CFD(Computational Fluid Dynamics), SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics) 등이 있다. CFD를 이용할 경우 유체의 거동은 매우 정밀하게 해석할 수 있으나 고체 즉 물통과 연계된 거동의 표현이 쉽지 않다는 단점이 있다. 반면 최근 들어 구조해석에 적용되기 시작한 SPH기법[2,3]의 경우 보다 효과적으로 CFD의 단점을 보완할 수가 있다. 본 연구에서는 이러한 SPH 알고리즘이 내재된 고속충돌해석 전용프로그램인 Pam-Shock<sup>TM</sup>[4,5]을 사용하여 물통의 충돌거동을 해석하였다. SPH기법의 개략적인 원리는 아래와 같으며 보다 자세한 설명은 본 논문에서 생략하기로 한다.

### - SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)

최근들어 그 활용도가 확대되고 있는 gridless 공간 분할법 중의 하나로서 변형이 매우 심한 고체, 유체 및 기체 해석에 적합하다. SPH는 Lagrangian 기법을 사용함으로써 일반적으로 전체적인(global) 거동해석에 사용되어지는 Eulerian 기법이 갖는 국부해석의 어려움이 없으며 또한 grid가 필요치 않아 재료의 대변형시 요소가 심하게 변형하는 수치해석상의 문제를 근본적으로 피할 수 있다. 1977년 천체 물리에 적용키 위하여 Lucy 등에 의하여 소개된 SPH 기법은 1983년 Monaghan과 Gingold가 기체동역학(Gasdynamics)에 있어서의 shock 해석 그리고 1990년 Libersky와 Petschek등에 의해 구조물의 동적 해석 영역으로 확장되는 등 기존의 기법으로는 해석이 어려운 초고속 충돌 및 관통 현상 등의 시뮬레이션에 적합한 기법이다.

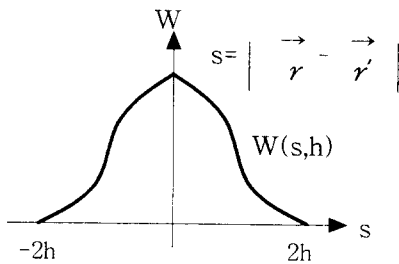
### - 기본 개념.

SPH의 본질적인 개념은 물질 내부에 자리하고 있는 임의 점의 국부적인 성질을 그 점을 둘러싸고 있는 체적의 가중 평균값으로 계산(estimation)하며, 연속체를 외력 또는 상호간에 작용하는 힘으로 인하여 자유로이 움직이는 유

한한 개수의 미소입자(particle)로 나누어 모델링 한다는 것이다. 보다 엄밀한 의미로 보면 이러한 미소입자는 단지 적분점 들에 불과하나, 해당 점들의 질량, 밀도, 운동량, 그리고 내부 에너지 등이 조합되어 있으므로 재료의 균질과 같다고 할 수 있다.

- 기본 수식.

SPH 기법에서는 <그림 5>에서와 같은 "smoothing kernel" 또는 가중 함수 W를 사용하여 임의의 r 점에서의 가중된 평균값 A(r)을 다음과 같은 수식을 통하여 정의한다



<그림 5> Smoothing kernel 함수

$$A(r) = \int_{\Omega} A(r') W(\vec{r} - \vec{r}', h) dr'$$

- A(r) : 임의의 스칼라, 벡터 또는 텐서 성분
- r : 입자의 위치 벡터
- $\Omega$  : 적분 영역
- h : Smoothing 길이

"Smoothing kernel" 또는 가중 함수 W는 다음과 같은 세 가지 조건을 만족하여야 한다.

- Normalization condition

$$\int_{\Omega} W(\vec{r} - \vec{r}', h) dr' = 1$$

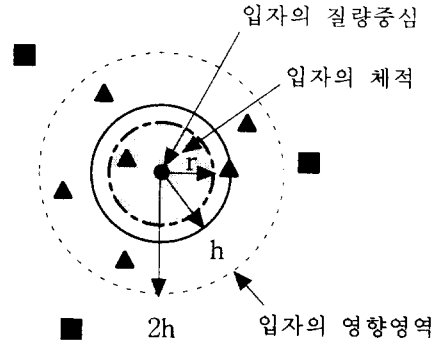
- Dirac delta function condition

$$\lim_{h \rightarrow 0} W(\vec{r} - \vec{r}', h) = \delta(\vec{r} - \vec{r}') = 1$$

- Locality condition

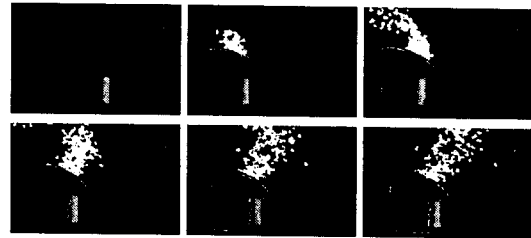
$$W(s, h) = 0 \quad \text{where, } |\vec{r} - \vec{r}'| > 2h$$

<그림 6>은 위에서 언급한 Smoothing 길이 (또는 체적)의 개념을 보여주는 개략도 이다.



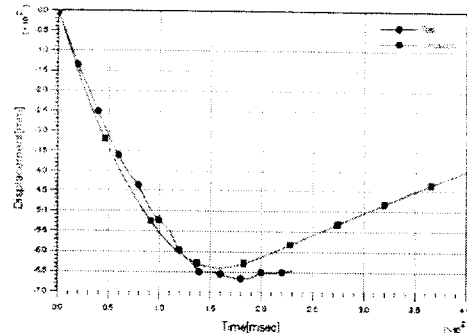
<그림 6> smoothing 길이와 체적 개념도

이와 같이 기술된 SPH기법을 이용하여 앞에서 제시한 물통의 대차 충돌실험을 시뮬레이션 하였다. <그림 7>은 계산된 물통의 변형 모습과 물의 거동을 보여주고 있으며 <그림 4>와 비교해 볼 때 그 거동이 매우 유사함을 알 수 있다.

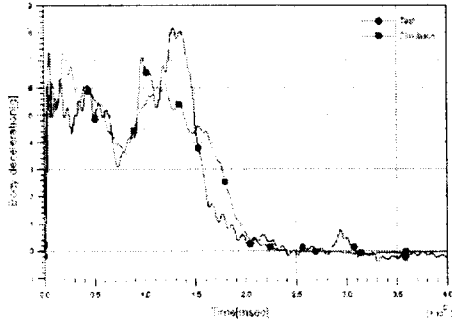


<그림 7> 대차 충돌실험 시뮬레이션

<그림 8>은 계산된 물통의 변형 곡선과 대차 무게중심점의 감속도 파형을 실험으로부터 측정된 결과와 함께 보여주고 있다. (a), (b) 그래프를 통해 실험 결과와 시뮬레이션 결과가 매우 유사함을 알 수 있다.



(a) 물통의 변형



(b) 대차의 감속도

<그림 8> 변형과 감속도 곡선

### III. 충격흡수시설 설계해석

앞에서 살펴 보았듯이 SPH 기법을 사용하면 물의 거동을 통과 연계하여 성공적으로 해석할 수 있음을 확인했다. 이렇게 확보된 해석 기술을 사용하여 요금소 및 분기부용 충격완화시설의 예비설계해석을 수행하였다. 도로안전시설 설치 및 관리지침[6]에 의하여 <표 5>와 같은 충돌실험조건이 사용되었다.

<표 5> 충돌실험 조건

	톨부스용	I/C 분기부용
정면	차중량 : 800kg 충돌속도 : 80kph	차중량 : 800kg 충돌속도 : 80kph
1/4 offset	차중량 : 800kg 충돌속도 : 80kph	차중량 : 800kg 충돌속도 : 80kph
측면 (15°)	-	차중량 : 1,500kg 충돌속도 : 80kph

본 논문에서는 정면충돌해석 결과만을 설명토록 할 것이며 또한 해석에 사용된 충격완화시설물이 아직 개발이 완료되지 않아 자세한 제원은 생략토록 하겠다. 해석에 사용된 차량은 해석 시간의 단축을 위하여 강체로 모델링하였다. 따라서 차량의 무게 중심에서 계산된 감속도 파형은 실제 보다 큰 값을 지니게 된다.

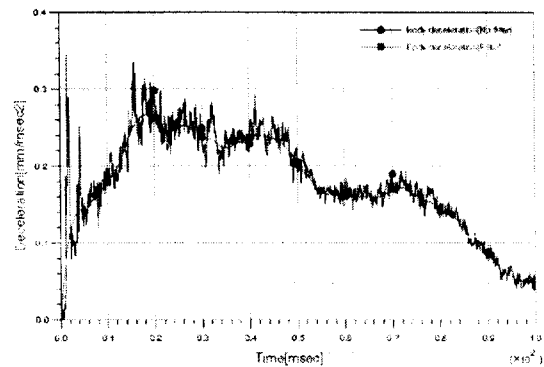
#### 1. 톨부스용 충격완화시설

<그림 9>는 3단으로 구성된 요금소용 충격완화시설의 정면충돌해석 결과를 보여주고 있다. 해석결과 25ms. 정도에서 첫번째 통 내부의 물이 분출을 시작하며 약 100ms.에서 차량이 정

지됨을 알 수 있었다. 또한 충돌이 진행됨에 따라 차량의 앞부분이 들리는 현상이 발생했으며, 이는 전륜구동인 차량의 경우 구동력의 전달을 차단하는 장점이 있다. <그림 10>은 차량모델의 무게중심점에서 계산된 감속도 파형을 보이고 있다. 최대 감속도의 크기는 약 26G 정도이며 차량이 강체로 모델링된 점을 감안할 때 본 충격흡수시설이 충분히 충격흡수 효과가 있음을 알 수 있다.



<그림 9> 톨부스용 충격흡수시설 시뮬레이션



<그림 10> 톨부스용 충격흡수시설 감속도

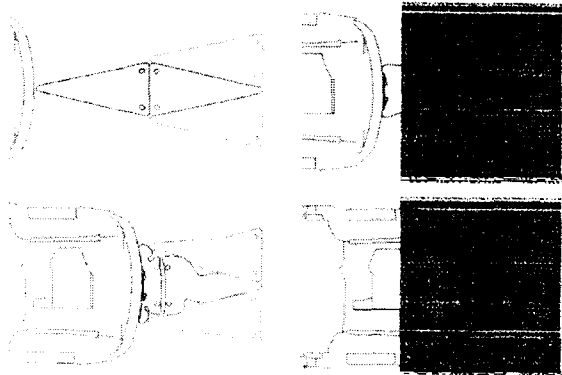
#### 2. I/C분기부용 충격완화시설

<그림 11>은 전열에 한 개의 통과 후열에 3개의 통으로 구성된 2단의 분기부용 충격완화시설의 정면충돌해석 결과를 보여주고 있다. 해석결과 40ms. 정도에서 첫번째 통 내부의 물이 분출을 시작하며 약 120ms.에서 차량이 정지됨을 알 수 있었다. 또한 앞에서 설명한 톨부스용 충격흡수시설과 마찬가지로 충돌이 진행됨에 따라 차량의 앞부분이 들리는 현상이 발생하였다. <그림 12>는 충돌이 진행됨에 따른 단면의 변형 모습을 보이고 있다. 전열의 물통이 변형하며 후열 중앙에 위치한 물통으로 충돌에너지를 전달하고 있으며 동시에 후열 측면에 위치한 두개의 물통이 충돌에너지를 흡수하면서 변형하고 있어 효과적인 충격흡수 성능을 보이고 있다. <그림 13>은 차량모델의 무게중

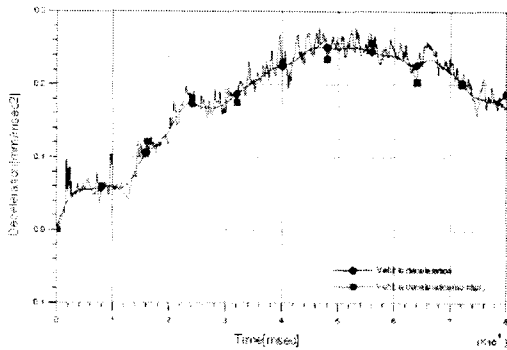
심점에서 계산된 가속도 파형을 보이고 있으며 최대 가속도의 크기는 약 25G 정도였다. 역시 차량 모델이 강제인 점을 감안할 때 충격흡수 효과가 있음을 알 수 있다.



<그림 11> I/C분기부용 시뮬레이션



<그림 12> I/C분기부용 시뮬레이션 단면도



<그림 13> I/C분기부용 충격흡수시설 가속도

#### IV. 결론

고밀도 폴리에틸렌 물통을 이용한 컴퓨터 모의 충돌실험 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

- 단순 구조의 물통에 대한 대차 실험결과와 시뮬레이션 결과 물통과 물의 거동이 일치하고 있다.
- 강제로 모델링된 차량을 이용한 틀부스용 충격흡수 시설에 대한 모의 충돌실험 결과

차량과 시설의 거동은 만족스러웠으며, 충돌로 인한 가속도는 최대 26g였다.

- I/C분기부용 충격흡수 시설에 대한 모의 충돌실험 결과 차량과 시설의 거동은 역시 만족스러웠으며, 충돌로 인한 가속도는 최대 25g였다.
- 두 가지 시뮬레이션을 통해 충격흡수시설의 파괴 거동과 차량의 거동 등에 근거해 본 시설물이 상당한 충격흡수 성능을 가지고 있음을 알 수 있었다.
- 실물차량 충돌실험 결과가 본 개발품의 승패에 가장 큰 영향을 미친다는 점에서 시뮬레이션 결과를 바탕으로 실물차량 충돌실험을 통해 고밀도 폴리에틸렌 물통을 이용한 충격흡수시설의 충격흡수 성능에 대한 검증 작업이 이루어져야 한다.

본 논문에서 다룬 내용은 실물차량 충돌실험을 위한 사전 연구의 성격을 띠지만, 대차 실험과 시뮬레이션 결과 비교에서도 살펴보았듯이 본 연구에 이용된 모의 충돌실험용 프로그램의 현실 설명력을 고려할 때 고밀도 폴리에틸렌 물통을 이용한 충격흡수시설은 만족할 만한 성과물로 평가된다.

#### 참고문헌

- [1] 한국도로공사, 업무통계, 1999.
- [2] Gingold, R.A. and Monaghan, J.J., Kernel Estimates as a Basis for General Particle Methods in Hydrodynamics, J. Comput. Phys., 1982
- [3] E. Haug, P. Groenenboom, A. Kamoulakos, M. Przybylowicz and A. Tramecon, Application of SPH Techniques in the PAM- SCLTM Code Family, PUCA 97, NIHON ESI KK. 1997
- [4] PAM-SHOCK™ solver notes users manual, PSI, 1998
- [5] PAM-SHOCK™ solver reference users manual, PSI, 1998
- [6] 도로안전시설 설치 및 관리 지침 - 충격흡수시설편, 건설교통부, 1998. 10.